

研究課題別評価

1 研究課題名： 光と原子の間の量子情報ネットワークの実現

2 研究者氏名：上妻 幹男

研究員： 宇佐見 康二（研究期間 H.16. 4月.~H.17. 9月）

3 研究のねらい：

光は最も速い情報の担体であるが、互いに相互作用をしないという欠点をもつ。一方、原子は互いに相互作用をするが、情報の担体にはむかない。本研究の目的は、こうした相補的な特徴をもつ二つの系間において量子情報を自由にやりとりする技術を構築することにある。このような技術が確立すれば、相補的な二つの系がもつ短所は自動的に抹消され、長所のみを活用することが可能となる。具体的には、「真空スクイーズド状態」、および「単一光子状態」に対して上記の保存再生を行うことを目的として研究を行った。これら二つの状態は、連続量、および離散量とよばれる光の非古典的状态の代表格であり、これらの保存再生が実現できれば、ほとんどすべての非古典的光場を保存再生する基礎技術が確立したといっても過言ではないだろう。

ところで、原子に量子情報を保存するという観点からみると、これら二つの状態は大変対照的な特徴を持っているといえる。真空スクイーズド状態は、通常バランسدホモダインと呼ばれる手法を用いて観察される。ホモダイン検出とは、語弊を恐れずに表現するならば、局発光と信号光との間のビートを検出する手法である。ビート信号に対して適切な電氣的フィルタリングを施せば、信号光を構成するさまざまな周波数成分の中から、わずか数Hzのスペクトル幅をもつ成分だけを選択的に評価することも可能である。つまり、発生した真空スクイーズド状態の中から、原子系と相互作用をしている周波数成分だけを選びだして観察することはとりたてて難しいことではない。しかしながら、光学系におけるロスがスクイージングに如実に反映されてしまうという大きな欠点も持っている。一方、単一光子状態は、通常 g^2 測定によって評価されるため、光学系のロスには原理的にはまったく影響されないという利点をもつ（ロスがあれば、光の状態に真空が混入することになるので、当然正確な意味での単一光子状態ではなくなる。しかし大概の応用実験においては、光子が検出された事象のみをポストセレクトすれば済むことが多く、真空の寄与をキャンセルすることができるため、この点については目をつぶることが多い。）しかし、 g^2 測定が立脚する光子検出過程は、光の周波数に対しては全く不敏感であるため、発生した単一光子状態のうち、原子系と相互作用した周波数成分のみを選択的にとりだすことは至難のわざである。この点に対して、我々は 1. パラメトリック下方変換過程で発生した非古典光を光学素子を利用して周波数フィルタリングする、2. 原子そのものから非古典光を発生させる、という二つの異なる手法をとった。両者とも、それぞれの成果をあげることができたが、特に後者は、当初予想していた以上の新しい展開をむかえることができた。具体的には、原子集団と単一光子との間に軌道角運動量のエンタングルメントを生成することに成功した。実験は、2次元のヒルベルト空間に限定して行ったが、軌道角運動量は無限次元のヒルベルト空間をもつため、原理的には原子集団と単一光子との間に多次元のエンタングルメントを形成することも可能となる。

4 研究成果：

<光の真空スクイーズド状態の原子集団への転写、保存、そして再生>

図1にみられるような3準位原子系を考える。0数とみなせるような強いコントロール光を入力すると、原子集団のプローブ光に対する吸収が消失する。これを電磁誘起透明化(EIT)と呼ぶ。吸収の消失と同時に鋭い屈折率分散が発生するため、入射したプローブ光パルスは超低速度で原子集団中を伝播し、空間的に圧縮されることになる。プローブ光パルスが完全に原子媒体中に局在したときにコントロール光を遮断すると、プローブ光がもつ量子情報を原子集団のスピンの情報に変換し保存することができる。再度コントロール光を照射すれば、逆過程が誘起され、元のプロ

ーブ光が再生される。これが光量子情報の保存再生の基本的なメカニズムである。この研究を実現するためには、まず原子と共鳴する真空スクイズド状態を生成しなければならない。我々は、PPLN導波路を用いて、RubidiumのD₁線(795nm)において真空スクイズド状態を生成した。得られたスクイーディングレベルは-1.5dBであり、他の波長で得られているスクイーディングレベル(現時点でのワールドレコードは-6dB程度)と直接的な比較をすると見劣りするの否めない。しかし、スクイーディングは、使用している非線形結晶の非線形定数、およびロスなどに大きく依存するため、異なる波長間におけるスクイーディングレベルの比較が常に意味をもつとは限らない。実際、RubidiumのD₁線におけるスクイーディングとしては、現時点で我々のデータがワールドレコードとなっている。

発生したスクイズド状態を Rubidium ガスが封入されたガラスセルに入射し、さらにコヒーレント状態のコントロール光を照射することで、真空スクイズド状態に対する電磁誘起透明化現象を世界で初めて確認することに成功した。図2にみられるように、コントロール光を遮断した場合には、スクイズド状態が Rubidium ガスによって吸収され、スクイーディングが観察されなかったが、コントロール光を照射するとEITによってスクイーディングが復活した。我々の研究は、EITを全量子力学的領域(原子系と光場の両方を量子化しなければ現象を説明することが出来ない領域)において初めて観察したものであり、光量子情報の保存再生研究におけるマイルストーンといっても過言ではないと思われる。

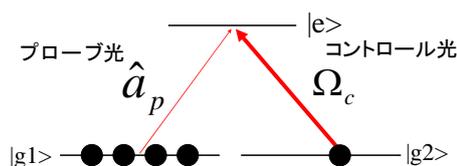


図1 電磁誘起透明化の原理図

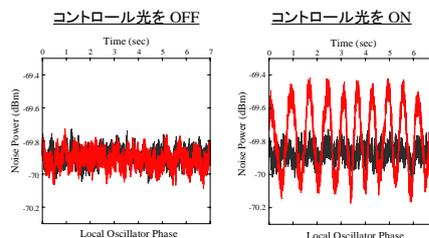


図2 真空スクイズド状態のEIT

<原子集団を用いた単一光子状態の生成>

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。PPLN導波路から発生するパラメトリック蛍光は約 10THzのスペクトル幅をもつ。原子系のdipolar allowedな遷移の典型的な自然幅が 10MHz程度であることを考えると、たとえ条件付きの単一光子状態をパラメトリック過程で得たとしても、それだけでは原子系との相互作用を研究することが出来ないことは明らかである。我々は干渉フィルター、エタロンを用いることで、発生したパラメトリック蛍光に対して周波数のフィルタリングを行い、スペクトル幅を1.7GHzまで狭窄化した。この時点で、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。というのも、原子系の自然幅が 10MHzのオーダーであっても、熱ガス原子であれば、ドップラー広がりによってスペクトル幅が 1GHzのオーダーまで膨らむためである。実際、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。ま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。

原子系との相互作用を確認するだけでなく、電磁誘起透明化を利用して、光の量子状態を保存再生するためには、スペクトルをさらに 1000 分の1に狭窄化し、原子の自然幅以下にする必要がある。この目的のために、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1MHz まで狭窄化した。このような極限的スペクトル幅の狭窄化も世界で初めての試みである。実際には、FSR3GHz、フィネス 3000 のファブリペロー型共振器を作成した。ファブリペロー共振器の共鳴周波数は、時間とともに容易にドリフトしてしまうため、ミラー間距離を安定化する必要がある。通常は、レーザーを共振器に送り、パウンドドリバー法で誤差信号を発生させ、それをミラー間に挿入した PZT に負帰還すればよい。しかし、そ

れでは、パラメトリック蛍光はロック用のレーザーと混ざってしまい、光子統計を行うことが出来なくなる。そこで、パラメトリック蛍光とロック用のレーザーを X 分岐型ファイバーで同一空間モードに成形した後、ロック光とパラメトリック蛍光とを時間的に切り替えることで上記の問題を解決することにした。50 μ s の間、ミラー間距離の安定化を行い、その後の 50 μ s は、ロック光をカットし、パラメトリック蛍光のみをファブリペローに入力し、光子統計を行うというわけである。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わけ、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、図3にみられるような同時発生した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。

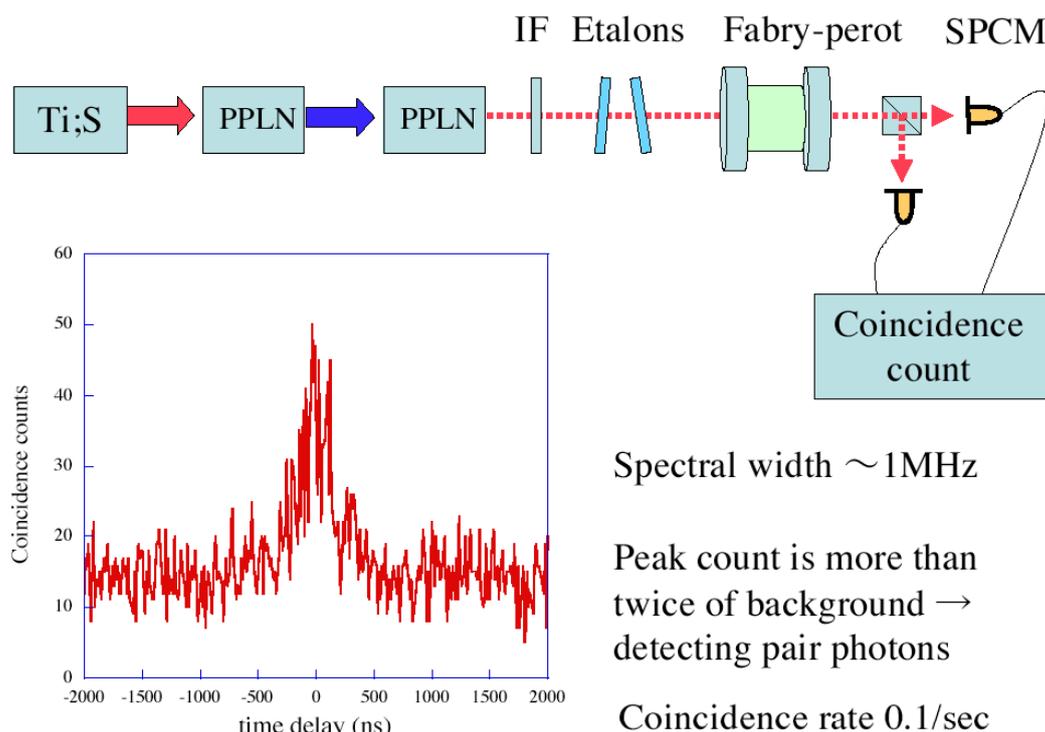


図3 周波数狭窄化されたパラメトリック蛍光の強度相関関数

<原子集団-単一光子状態間における軌道角運動量のエンタングルメント>

図4のように予めハイパーファインポンピングされた原子集団に C 数とみなせるような光を照射すると Anti-stokes Raman 過程がおこる。この際、ある特定の空間モードに射出された単一の光子を検出すると、原子の symmetric collective mode を1つ励起することができる。原子系のデコヒーレンス時間内であれば、Stokes Raman 過程を誘起するような光を照射することで、好きな時刻に単一光子を取り出すことが可能となる。レーザー冷却された原子集団を用いて実験を行ったところ、発生した Anti-stokes 光子と Stokes 光子との間で、強度相関関数についてのコーシーシュワルツの不等式が大きく破れていることが確認された。このことは、Anti-stokes 側の光子検出によって条件付けを行えば、原子の自然幅と同程度の単一光子を Stokes 側で発生させることができることを意味している。このようにして発生した単一光子が、実は原子集団との間に軌道角運動量のエンタングルメントをもつことを、我々は世界で初めて確認することに成功した。図5は dislocation をもつホログラムとシングルモードファイバーとの組み合わせを利用して、軌道角運動量に関する量子トモグラフィーを行った結果である。量子トモグラフィーによって再構成された密度

行列要素から、エンタングルメントの指標である Entanglement of formation を評価したところ、最大で 0.68 という値を得た。この値は、系が明らかに軌道角運動量に関するエンタングルド状態にあることを意味している。この研究によって、多次元のエンタングルメントを原子集団と単一の光子との間で共有できる可能性がでてきた。またこの成果は、量子情報処理だけでなく、イラスト状態の生成といった物性研究の重要性もっており、今後大きく展開する可能性が高い。

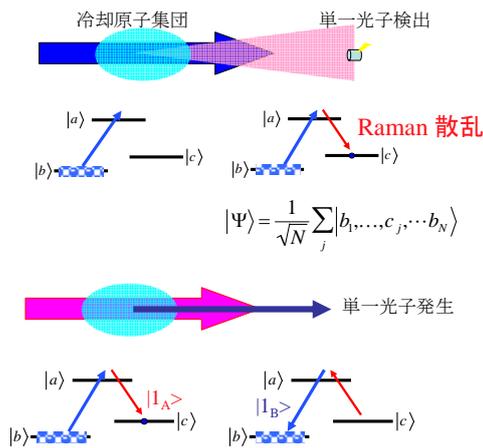


図4 原子集団を用いた単一光子状態の生成

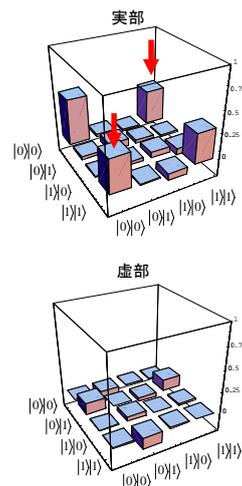


図5 16基底による量子トモグラフィ

5. 自己評価:

本研究の最終ゴールは、光の量子情報を原子集団のスピン情報として保存し、しかるのち再生することにあつた。3年間の研究期間の間に、保存再生の鍵となる電磁誘起透明化現象を真空スクイズド状態に対して確認したことは大きな成果だといえる。また、得られた真空スクイズド状態をパルス化する技術の開発も非常にスピーディーに行つたと自負している。ただし、研究を進めるにつれ、真空スクイズド状態が本質的に2モードであるのに対して、通常の EIT による保存の対象は単一モードであることなど、予想外に難しい問題が次々とあらわれた。ポスドクや学生諸子の斬新なアイデアや不断の努力に支えられて、問題をひとつひとつ解決し、現時点では、最終ゴールに到達する道がありありとみえるに至っている。すなわち上記した問題の全てを理論的には解決し、かつ実験的にも解決できる見通しがたっている。細かい成果を出すために途中で妙に路線をかえたりすることなく、ただひたすらに大きな最終目的にむかって研究室が一丸となって努力をしてきたことは、我々の誇りとするところである。この3年間、後悔のない研究ができたことは間違いない。単一光子状態の保存再生については、諸外国の実験グループにより先に実現されたのは事実である。この点、大いに反省すべき点があるかと思う。が、それでもパラメトリック蛍光の周波数狭化実験を通して、量子通信への現実的な応用という観点にたったときに、次に何をなすべきかの指針が得られたことは重要だと感じている。現時点では、世界の全グループが原子と相互作用させるためには光の帯域を狭めなければならないという観点で研究を行っている。しかしこの観点にたつと、通信の bit レートが現実的なレベルまで上がらないことは間違いない。現在我々は、原子系の自然幅によって単純に光の帯域が制限されない新しい保存再生の研究に着手しており、この研究が成功すれば、大きな展開がおとずれることは間違いないと考えている。また、原子集団と単一光子状態との間の軌道角運動量のエンタングルメントに関しては、非常に大きな

成果であると自負している。

6 研究総括の見解:

情報の伝達に適した光と、情報の処理に適した原子の間で、量子情報を自由にやりとりする技術の構築を目ざした。それによって、相補的な二つの系がもつ短所を抹消し、長所のみを活用することをねらった。

上記の目的の実現に向けて、第一歩として光の真空スクイズド状態を原子集団へ転写、保存、そして再生することを目指した。MgO:LiNbO₃ 導波路を用いて⁸⁷RbD₁線(795 nm)の真空スクイズド光を生成し、それをコヒーレント状態のコントロール光照射下のRbガスを封入したガラスセルに入射し、真空スクイズド光に対する電磁誘起透明化現象を確認することに成功した。MgO:LiNbO₃ 導波路を用いて得ることの出来るスクイーミングレベルが-1dBと比較的小さいため、今のところRbガスに真空スクイズド光の情報を書き込み、再生するには至っていない。しかし、氏は最近になってPPKTP結晶を用いたOPOによって、-2dBのスクイーミング(795nmにおける世界最高データ)を得ることに成功しており、実験の成功は近いと思われる。更に、レーザー冷却によって得られる冷却Rb原子集団を用いた単一光子状態の生成と、この原子集団と単一光子状態間における軌道角運動量のエンタングルメントにも成功している。

この様に、原子と光の長所を活かした情報処理と伝送に向けての要素技術を着実に積み重ねており、この分野への貢献は極めて大きい。

7 主な論文等:

学術論文(2件)

- (1) K. Akiba, D. Akamatsu, and M. Kozuma, "Frequency-filtered parametric fluorescence interacting with an atomic ensemble", **Optics Communications** (25 October 2005 よりweb 上にて公開, 紙面による出版近日中).
- (2) D. Akamatsu, K. Akiba, and M. Kozuma, "Electromagnetically induced transparency with squeezed vacuum", **Phys. Rev. Lett.** **92**, 203602(2004).

招待講演(3件)

- (1) M. Kozuma, D. Akamatsu, K. Akiba, T. Tanimura, Y. Yokoi, "Quantum Information Processing and Quantum Memory: Exerimental Approach from Atomic Physics", International Quantum Electronics Conference 2005 (Nippon Toshi Center, Japan), 11-15 Julay 2005.
- (2) M. Kozuma, "Communication of quantum information between light and atoms", ESF-JSPS Frontier Science Conference Series for Young Researchers, Quantum Information and Quantum Physics (Shonan Village Center, Japan), 12-18 March 2005.
- (3) M. Kozuma, "Ultra-slow propagation of squeezed vacuum by using electro-magnetically induced transparency", Japan German Colloquium 2004 on Quantum Optics (Wildbad Kreuth, Germany), 9-12 February 2004.

一般国内発表(15件)

- (1) 赤松大輔、横井芳彦、谷村崇仁、秋葉圭一郎、古沢明、上妻幹旺: 周波数縮退真空スクイズド状態による電磁誘起透明化の観察; 日本物理学会 2005 年秋季大会(同志社大学、2005 年 9 月 19 日-22 日)。
- (2) 井上遼太郎、金井紀文、秋葉圭一郎、小芦雅斗、上妻幹旺: 対称集団励起とスピン自由度とを利用した量子テレポーテーションの提案; 日本物理学会 2005 年秋季大会(同志社大学、2005 年 9 月 19 日-22 日)。

- (3) 谷村崇仁、赤松大輔、上妻幹男; LBO-ダブルおよびPPLNを組み合わせたスクイーミング・レベルの改善; 日本物理学会2004年秋季大会、(2004年9月14日)。
- (4) 秋葉圭一郎、赤松大輔、上妻幹男; 原子アンサンブルを用いた条件付き単一光子の遅延の実現、日本物理学会2004年秋季大会、(2004年9月14日)。
- (5) 金井紀文、高橋純一、西周慶久、上妻幹男; Long MOT の生成とその評価; 日本物理学会第59回年次大会、(2004年3月27日)。
他10件

受賞(1件)

東工大挑戦的研究賞 平成17年1月:

“真空スクイーズド状態の原子アンサンブルへの転写と再生”