

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20244063

研究課題名（和文） 広帯域ユニバーサルスクイザーの研究

研究課題名（英文） Research on broadband universal squeezers

研究代表者

古澤 明（FURUSAWA AKIRA）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：90332569

研究成果の概要（和文）：

広帯域ユニバーサルスクイザーの作製に成功し、単一光子状態をスクイーズし、シュレディンガーの猫状態を生成する事に成功した。

研究成果の概要（英文）：

We succeeded in building a broadband universal squeezer and creation of a Schrodinger's cat state from a single photon state with the squeezer.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
20 年度	15,900,000	4,770,000	20,670,000
21 年度	14,400,000	4,320,000	18,720,000
22 年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
年度			
年度			
総計	37,500,000	11,250,000	48,750,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子情報

1. 研究開始当初の背景

ガウス型状態に対してスクイージングの報告はあったが、非ガウス型状態に対するスクイージングの報告は無かった。そこで、本提案では非ガウス型状態のスクイーズ状態を行い、本来の意味でのユニバーサルスクイザー作製を目指した。

2. 研究の目的

本研究提案では、測定誘起型量子状態操作を用いて、連続量量子情報処理と量子ビット量子情報処理の統合を視野に入れた研究を行う。具体的には、広帯域ユニバーサルスクイザーを作製し、単一光子状態にスクイーズ操作を施し、シュレディンガーの猫状態を生成する。つまり、連続量の手法を用いて量子ビットの状態を生成するというものである。

3. 研究の方法

本研究提案では、広帯域ユニバーサルスクイザーを作製し、単一光子状態にスクイーズ操作を施し、シュレディンガーの猫状態を生成することを目指す。

この実験に関し、現時点で開発されていない実験テクニックは、実験系の広帯域化である。この実験の基本となる量子テレポーテーション実験は、従来、キャリア光のサイドバンド成分しか用いておらず、周波数シングルモードとして近似できる極めて狭帯域の実験であった。つまり、無限の時間続く波束（波動）であった。それに対し、単一光子状態やシュレディンガーの猫状態は、非線形光学効果が発現する広帯域で定義され、その波束の時間的長さは、帯域の逆数程度と短くなる。つまり、ある意味で粒子性が発現する。現実の実験では、非線形光学効果を高めるため共

振器を用いるので、単一光子状態やシュレディンガーの猫状態は、共振器の共鳴幅に相当する帯域 (10MHz 程度) を持つ。実験系の広帯域化には 2 つの課題がある。それは、量子エンタングルメントの広帯域化と測定・フィードフォワード系の広帯域化である。量子エンタングルメントの広帯域化に関しては既に実現している (N. Takei et al., Phys. Rev. A 74, 060101(R) (2006))。したがって、本研究で注力しなければならないことは、測定・フィードフォワード系の広帯域化である。測定は、主にホモダイン測定とフォトンカウンティングを行うが、フォトンカウンティングの帯域は十分足りているため、ホモダイン測定器の広帯域化が必要となる。また、測定誘起型量子状態操作を完結させるには、測定結果を出力側にフィードフォワードする必要があるが、そのフィードフォワード系の広帯域化も重要となる。理論に関しては、狭帯域 (シングルモード) と広帯域 (マルチモード) に跨った理論を構築する必要がある。

図 1 に作製を目指す広帯域ユニバーサルスクイザーの実験系を示し、図 2 に成功した場合のウイグナー関数を示す。

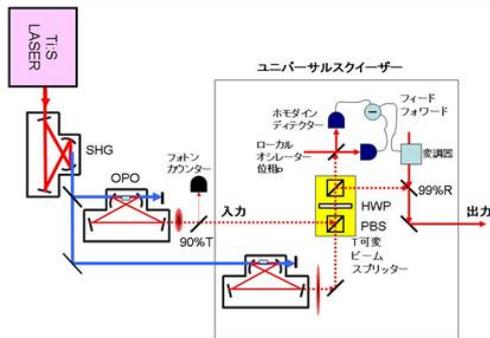


図 1 広帯域ユニバーサルスクイザー実験概念図

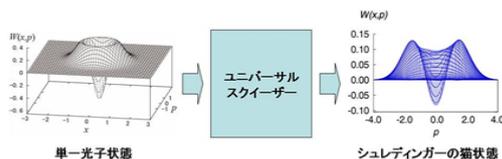


図 2 広帯域ユニバーサルスクイザーによる単一光子状態からシュレディンガーの猫状態への変換。

基本波となる波長 860nm の光はチタンサファイアレーザー (Ti:S LASER) から出力され、

それが 2 倍波発生器 (SHG) により、430nm に変換される。この 430nm の光は 2 つに分けられ、それぞれ光パラメトリック発振器 (OPO) へ送られる。それぞれの OPO ではスクイズド光 (正確にはスクイズされた真空場) が生成される。ただし、2 つのスクイズド光のスクイーディングレベルは異なっており、上側の OPO でのスクイーディングレベルは非常に低く、下側の OPO でのスクイーディングレベルは非常に高くなっている。上側のスクイズド光は 90% 透過のビームスプリッターを通過し、10% がフォトンカウンターへ行く。このスクイズド光のスクイーディングレベルは非常に低いから、2 個ずつの光子流と見なすことができ、フォトンカウンターで光子を検出すると、ビームスプリッターには 1 個だけ光子が存在することになる。つまり、条件付きで単一光子状態を生成したことになる。それが、ユニバーサルスクイザーの入力となり、透過率 T 可変のビームスプリッターで、補助的に用いるもう 1 つの高レベルスクイズド光と合波され、それらの中に量子エンタングルメントが形成される。その後、補助系がホモダイン測定に掛けられ、その結果、もう 1 つの出力側が影響を受ける。最後に、測定結果により出力側に所定の操作を施してやれば、入力状態がスクイズされて出力される。ここで、入力の単一光子状態生成は条件付きであるが、スクイズ操作そのものは決定論的、つまり常時意図したスクイズが掛けられる。したがって、オンデマンドな単一光子発生器が存在すれば、量子操作は決定論的に (連続的に) 行うことができる。また、図 2 に示したようなウイグナー関数は、ホモダイン測定に基づいた量子トモグラフィにより、直接求めることができ、実験の成否はこのホモダイントモグラフィにより判定する。

平成 20 年度は、この実験のうち、スクイズド光から単一光子状態を生成することを行う。これに関してはある程度実績があるので (K. Wakui, Opt. Exp. 前出)、このテクニックの完成度を高める。また、実験全体に関する理論的考察とホモダイントモグラフィの最適化について考える。これら理論的考察は、量子光学的手法を用いた連続量量子情報理論の大家である S. L. Braunstein 教授や P. van Loock 博士と行う。

平成 21 年度以降は、広帯域ホモダインディテクターとフィードバック系の開発を E. Huntington 博士のグループと協力して行い、広帯域ユニバーサルスクイザーを作製する。これらの中で特に困難な箇所は、広帯域ホモダイン測定と広帯域フィードフォワードである。いずれも理想的には、スクイーディング帯域幅 (OPO の共鳴幅、10MHz 程度) で、ゲインがフラットで位相遅れが無視でき

ることが望ましい。しかし、現実の系ではそれは不可能なので、少なくとも周波数に対して線形な位相遅れとすることができれば、光路長を調整することにより、位相を合わせることもできる。我々の目的に合うような広帯域ホモダイナミック検出器やフィードフォワードに必要な容量負荷・広帯域ハイパワーアンプは市販されていないので、それらを自作する必要がある。豪・ニューサウスウェールズ大学の E. Huntington 博士のグループには、それらの技術があり、彼女らと共同研究を行うことにより、実現できると考えている。遅くとも最終年度である平成 22 年度には、単一光子状態生成系と広帯域ユニバーサルスクイザーを統合して、単一光子状態のスクイージング実験を行う予定である。何らかのアクシデントにより、仮にどこかの段階で進捗が遅れても、それぞれにある程度過去の経験があるので、遅くとも 3 年間の研究期間内で実験に成功できると確信している。

4. 研究成果

本研究提案では、測定誘起型量子状態操作を用いて、連続量量子情報処理と量子ビット量子情報処理の統合を視野に入れた研究を行った。

具体的には、広帯域ユニバーサルスクイザーを作製し、単一光子状態にスクイーズ操作を施し、シュレディンガーの猫状態を生成する。つまり、連続量の手法を用いて、量子ビットの状態を生成するというものである。スクイーズ操作は、連続量の量子情報処理に於いては最も基本的な操作の 1 つで、非常に重要であり、任意の入力状態に対応できるものは測定誘起型量子状態操作により実現可能であることが知られている (Filip et al., Phys. Rev. A 71, 042308 (2005))。スクイザーとしては、光パラメトリック発振器 (OPO) 等が古くから研究され性能も高いが、任意の入力状態に対してフィデリティ高くスクイーズ操作を施すことはできない。これは、OPO 等の今まで知られてきたスクイザーは、入力状態に直接非線形光学操作を施さなければならぬため、どうしても損失が大きく、フィデリティが低くなるためである。それに対し、Filip らにより提案された測定誘起型量子状態操作を用いたユニバーサルスクイザーでは、入力そのものは線形光学素子のみを通すので損失は非常に少なく、ほぼ理想的なスクイーズ操作が可能である。ここでは、まず補助系としてスクイーズされた真空場を用意し (これは OPO 等により高いレベルのスクイーズを得ることができる)、これをビームスプリッターを用いて入力光と合波させる。この結果、入力と補助系の間に量子エンタングルメントが生成され、補助系の測定による影響とその後のフィードフォ

ワードによりスクイーズ操作を実現している。また、この測定誘起型量子状態操作は、量子テレポーテーション装置を一部改造することで実現できる。これは、量子テレポーテーションが入出力状態の等しい恒等変換であるのに対し、それを改造したユニバーサルスクイザーでは、入力がスクイーズ操作を受けて出力されると言うこともできる。初年度は、第一段階として、広帯域の量子テレポーテーション装置の開発を行った。その結果、10MHz の広帯域で量子テレポーテーションに成功した。さらに、非ガウス型の状態をテレポートすることにも成功した。2 年目以降、時系列で表記する。

(平成 21 年 4 月-9 月) 広帯域ユニバーサルスクイザーの元となる広帯域量子テレポーテーションの実験を行う。具体的には、導波路電気光学変調器を用い、帯域 10MHz の広帯域古典情報チャンネルを作製する。これについては、ある程度昨年度に成功しているが、これをさらに高性能化する。→達成した。さらに、これも昨年度生成に成功した広帯域量子エンタングルドビーム (EPR ビーム) とその操作系 (時間補償光学系) の完成度を高める。これにより、広帯域量子テレポーテーションの実験、ひいては広帯域ユニバーサルスクイザーの実験が可能となる。→達成した。

入力状態として、シュレディンガーの猫状態を、我々が開発したフォトンサブトラクション法で生成し、実際に量子テレポーテーションを行い、非ガウス性がテレポートできることを確認する。→達成した。

(平成 21 年 10 月-平成 22 年 3 月) 広帯域ユニバーサルスクイザーの入力としての単一光子状態を生成する。これは、スクイーズド光のサイドバンド成分が EPR ビームであることから、片方を光子検出すれば、もう片方が単一光子状態になることを用いる。もちろん、これは低レベルポンプの場合であるが、ポンプレベルはイベントレートに直結するので、どの程度のポンプレベルが最終的なユニバーサルスクイザー実験に最適かを見出す。これにより、広帯域ユニバーサルスクイザーの入力に最適なレベル・レートの単一光子状態を生成できるようになる。→達成した。

平成 22 年 4 月-6 月) 昨年度成功した、広帯域ユニバーサルスクイザーの入力に適したレベル・レートの単一光子状態生成を最適化する。→達成した。また、この成果を論文化する。→論文準備中。

(平成 22 年 7 月-平成 23 年 2 月) 昨年度作製に成功した広帯域ユニバーサルスクイザーに、上記の単一光子状態を入力し、実際にシュレディンガーの猫状態の生成を行う。→達成した。

実験の検証は量子トモグラフィーを用いて行う。成功の基準としては、スクイーズ操作後の状態のウイグナー関数に負の部分の存在の有無とする。負の部分が存在すれば、実験成功とする。→達成した。

シュレディンガーの猫状態生成成功の確認後、スクイーズ操作のレベルを変化させ、操作後の状態がどのように変化するかを調べる。また、理論的な考察も併せて行う。→達成した。

(平成 23 年 3 月)

このプロジェクトのまとめを行う。さらに、スクイーズ操作によるシュレディンガーの猫状態生成に関して論文を執筆した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

15. N. Lee, H. Benichi, Y. Takeno, S. Takeda, J. Webb, E. Huntington, and A. Furusawa
"Teleportation of Non-Classical Wave-Packets of light"
Science 332, 330-333 (2011).
14. L. Mista, Jr., R. Filip, and A. Furusawa
"Continuous-variable teleportation of a negative Wigner function"
Phys. Rev. A 82, 012322 (2010).
13. H. Yonezawa, K. Nagashima, and A. Furusawa
"Generation of squeezed light with a monolithic optical parametric oscillator: Simultaneous achievement of phase matching and cavity resonance by temperature control"
Optics Express 18, 20143-20150 (Sep. 2010).
12. Y. Miwa, R. Ukai, J. Yoshikawa, R. Filip, P. van Loock, and A. Furusawa
"Demonstration of cluster state shaping and quantum erasure for continuous variables"
Phys. Rev. A 82, 032305 (2010)
11. R. Ukai, N. Iwata, Y. Shimokawa, S. C. Armstrong, A. Politi, J. Yoshikawa, P. van Loock, and A. Furusawa
"Demonstration of unconditional one-way quantum computations for continuous variables"
arXiv:1001.4860[quant-ph], Phys. Rev. Lett. accepted.
10. G. Masada, T. Suzudo, Y. Satoh, H. Ishizuki, T. Taira, and A. Furusawa
"Efficient generation of highly squeezed light and second harmonic wave with periodically poled MgO:LiNbO₃"
Optics Express 18, 13114-13121 (2010).

9. T. A. Wheatley, D. W. Berry, H. Yonezawa, D. Nakane, H. Arao, D. T. Pope, T. C. Ralph, H. M. Wiseman, A. Furusawa, and E. H. Huntington
"Adaptive optical phase estimation using time-symmetric quantum smoothing"
Phys. Rev. Lett. 104, 093601 (2010).
8. R. Ukai, J. Yoshikawa, N. Iwata, P. van Loock, and A. Furusawa
"Universal linear Bogoliubov transformations through one-way quantum computation"
Phys. Rev. A 81, 032315 (2010).
7. H. Takahashi, J. S. Neergaard-Nielsen, M. Takeuchi, M. Takeoka, K. Hayasaka, A. Furusawa, and M. Sasaki
"Entanglement distillation from Gaussian input states"
Nature Photonics 4, 178 - 181 (2010).
6. Y. Miwa, J. Yoshikawa, P. van Loock, and A. Furusawa
"Demonstration of a universal one-way quantum quadratic phase gate"
Phys. Rev. A 80, 050303(R) (2009).
5. M. Arikawa, K. Honda, D. Akamatsu, S. Nagatsuka, A. Furusawa, and M. Kozuma
"Quantum memory of a squeezed vacuum for arbitrary frequency sidebands"
Phys. Rev. A 81, 021605(R) (2010).
4. T. Aoki, G. Takahashi, T. Kajiya, J. Yoshikawa, S. L. Braunstein, P. van Loock, and A. Furusawa
"Quantum error correction beyond qubits"
Nature Physics 5, 541-546 (2009).
3. J. Yoshikawa, Y. Miwa, A. Huck, U. L. Andersen, P. van Loock, and A. Furusawa
"Demonstration of a quantum nondemolition sum gate"
Phys. Rev. Lett. 101, 250501-1-4 (2008).
2. H. Takahashi, K. Wakui, S. Suzuki, M. Takeoka, K. Hayasaka, A. Furusawa, and M. Sasaki
"Generation of large-amplitude coherent-state superposition via ancilla-assisted photon-subtraction"
Phys. Rev. Lett. 101, 233605-1-4 (2008).
1. M. Yukawa, R. Ukai, P. van Loock, and A. Furusawa
"Experimental generation of four-mode continuous-variable cluster states"
Phys. Rev. A 78, 012301-1-6 (2008).

[学会発表] (計 94 件)

【国際】

11. A. Furusawa (Invited)
"Quantum teleportation and information processing"

- OSA's 94th annual meeting Frontiers in optics 2010/ Laser Science XXVI, LthE1, p103, Rochester, (October, 28, 2010)
10. A. Furusawa(Invited)
"Quantum teleportation and quantum information processing"
The 10th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC), Brisbane, (July. 21, 2010)
 9. A. Furusawa(invited)
"Quantum teleportation and quantum information processing"
CLEO/QELS 2010, QThA1, P149, San Jose, (May. 20, 2010)
 8. A. Furusawa (invited)
"Quantum information processing with squeezed states of light"
Nonlinear Optics, NTuB2, Honolulu, (Jul. 14, 2009)
 7. A. Furusawa (invited)
"Quantum information processing with squeezed states of light"
ACQAO Seminar, ANU, Canberra, (Jan. 14, 2009)
 6. A. Furusawa (invited)
"Continuous-variable quantum information processing with squeezed states of light"
Workshop on Topological Cluster State Computing In Optics, Hitotsubashi, (Dec. 11, 2008)
 5. A. Furusawa (invited)
"Continuous-variable quantum information processing with squeezed states of light"
International symposium on physics of quantum technology, Nara, (Nov. 28, 2008)
 4. A. Furusawa (invited)
"Continuous-variable quantum information processing with squeezed states of light"
COAST/CORAL Autumn School on Advanced Laser Science, Shiodome, (Nov. 21, 2008)
 3. A. Furusawa (invited)
"Quantum information processing with squeezed states of light"
The Ninth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC), Calgary, (Aug. 21, 2008)
 2. A. Furusawa (invited)
"Quantum Information Processing with Squeezed States of Light"
International Nano-Optoelectronic Workshop, Shonan Village, (Aug. 14, 2008)
 1. A. Furusawa (invited)
"Continuous-variable quantum information processing with squeezed states of light"
Solvay Workshop on "Bits, Quanta and Complex Systems: modern approaches to photonic information processing", Brussels, (May. 2, 2008)
- 【国内】
8. 古澤 明 (Invited)
"量子情報処理のコヒーレント光通信への応用"
東京大学産学連携協議会 平成22年度年次総会、経団連会館2階国際会議場(東京)、(2011年3月14日)
 7. 古澤 明 (Invited)
"量子情報処理のコヒーレント光通信への応用と非線形光学素子への要求"
(財)光産業技術振興協会の光材料・応用技術研究会 第四回、機会振興会館(東京)、(2011年3月4日)
 6. 古澤 明 (Invited)
"量子テレポーテーションとその量子版コヒーレント光通信への応用"
富士フィルム講演会、富士フィルム先進研究所(足柄)、(2011年2月25日)
 5. 古澤明
"量子中継基盤技術開発"
ナノ量子情報エレクトロニクスシンポジウム、東京大学武田先端知ビル、(2010年12月22日)
 4. 古澤明
"量子テレポーテーションと量子情報処理"
応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「量子情報の最前線と今後10年の展開」、上智大学軽井沢セミナーハウス(2010年1月8日)
 3. 古澤明
"量子テレポーテーションと量子情報処理"
第4回量子ICT運営会議、主婦会館 プラザエフ(2009年10月1日)
 2. 古澤明 (invited)
"擬似位相整合素子を用いた量子情報処理実験"
第9回「マイクロ固体フォトンクス」専門委員会、分子科学研究所(岡崎市)、(2008年11月20日)
 1. 古澤明 (invited)
"スクイーズド光を用いた量子情報処理"
分子研オープンセミナー、分子科学研究所(岡崎市)、(2008年9月30日)
- 〔図書〕(計3件)
3. 古澤 明
"量子もつれとは"
講談社ブルーバックス(Feb. 2011)

2. 古澤 明

"量子テレポーテーション"
講談社ブルーバックス(2009)

1. 宮野健次郎、古澤 明

"量子コンピュータ入門"
(日本評論社) (2008)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://www.alice.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古澤 明 (FURUSAWA AKIRA)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：90332569

(2) 研究分担者

米澤 英宏 (YONEZAWA HIDEHIRO)
東京大学・大学院工学系研究科・講師
研究者番号：50451802

(3) 連携研究者

()

研究者番号：