

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17772

研究課題名(和文) 単一光子波長変換を用いた遠距離量子メモリ間の量子相関実証

研究課題名(英文) Entanglement between distant quantum memories via quantum frequency conversion

研究代表者

生田 力三 (Ikuta, Rikizo)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：90626475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：光ファイバー量子通信を利用して遠距離量子メモリ間で量子もつれを形成するための課題解決に取り組んだ。量子中継に基づく高効率なファイバー量子通信のためには、量子メモリと通信波長光子の量子もつれ状態を作る必要がある。そのために本研究では、偏光無依存型の単一光子波長変換器を構築し、量子メモリ候補であるルビジウム原子集団と量子もつれ状態にある可視領域の偏光光子を通信波長に変換した。その結果、ルビジウム原子と通信波長光子間の量子もつれ状態を実験的に観測することに成功した。また、同期不要の2光子干渉実験、雑音環境下での偏光光子の忠実な光ファイバー通信など、長距離量子通信に必要な要素技術の実証を行った。

研究成果の概要(英文)：We studied about establishment of entanglement between distant quantum memories through an optical fiber-based quantum communication. For the effective fiber-based quantum communication with quantum repeater algorithm, entanglement between a quantum memory and a telecom photon is vital. We developed a polarization-insensitive quantum frequency converter. By using the device, we converted a wavelength of a visible photon entangled with a rubidium atomic cloud as a quantum memory to the telecom wavelength. As a result, we achieved an entanglement between the atoms and the telecom photon. We performed other experiments for long distance quantum communication: demonstration of the two photon interference without timing synchronization of the photons, and faithful entanglement distribution of polarized photons via noisy optical fibers.

研究分野：量子情報・量子光学

キーワード：量子エレクトロニクス 量子情報 量子通信 波長変換 エンタングルメント 量子中継 量子メモリ
冷却原子

1. 研究開始当初の背景

単一光子の配送効率は通常距離に対して指数関数的に減少するが、より効率的な配送を実現するために量子中継方式が提案されていた。多くの量子中継プロトコルは、量子メモリとして用いる物質量子系と光子間にエンタングルメントを生成しこれらを量子テレポーテーションで繋ぐ構成となっている。量子通信にとって重要な光ファイバー通信を行うためには光子の波長は通信波長帯(1.3 μm 帯あるいは1.5 μm 帯)である必要があるため、量子中継に基づく光ファイバー量子通信実現のためには、量子メモリと通信波長光子間のエンタングルメント形成が求められていた。しかし、有力候補と目される量子メモリの発光波長は可視光領域に多く、通信波長帯との間にギャップがあるため、量子状態を壊さない可視から通信波長への光波長変換が必要であった。こうした状況の中、我々は、強い非線形光学効果を持つPPLN結晶による差周波発生を用いることで、パラメトリック下方変換により生成した可視域エンタングル光子対の一方の光子を通信波長変換し、波長変換後もエンタングルメントが保持されていることを確かめた[Nature Commun. 2, 537(2011)]。その後、非常に高い信号雑音比での波長変換を達成し、初期状態の量子状態をほぼ劣化させない光波長変換器を実現していた[PRA 87, 010301(R)(2013)]。この技術を、本来の目的である量子メモリからの発光光子に適用することで、量子メモリと通信波長光子のエンタングルメント確立が期待できる。我々は、量子メモリとして冷却ルビジウム(Rb)原子集団を立ち上げ、上記目的達成に向けた研究を開始していた。

2. 研究の目的

本研究では、上述の量子中継に基づく光ファイバー量子通信の実現を目指し、冷却Rb原子と通信波長光子のエンタングルメント生成、およびそれを利用した遠隔Rbノード間のエンタングルメント状態の実現を目的として研究を行った。具体的には、
(A)単一光子波長変換の技術を活かすことで、冷却原子と通信波長光子間にエンタングル状態を実現する
(B)通信における雑音除去を行うことにより、実用的な長距離量子通信を構築する
(C)Rb-通信波長光子間のエンタングルメントシステムを2台構築し、通信波長光子上にベル測定を行うことで、Rb間のエンタングルメントを確立することを目指して研究を行った。

3. 研究の方法

(A)波長変換素子であるPPLN結晶には偏光依存性があるため、例えば垂直偏光の光を波長変換するように軸を合わせると水平偏光の光には応答しない。本研究では、PPLN結晶を

サニャック干渉計の内部に導入することにより、偏光無依存の波長変換器を構築する。Rbと可視光子の偏光エンタングルメントは、Rbに書き込み光を当てて発生する光子のうち2つの異なる波数ベクトル状態を偏光状態に変換することで準備する。Rbの状態は、読み出し光を当てることで光子の状態に変換して評価する。

(B)通信波長帯の偏光光子の雑音除去を効率的に行うために、光ファイバー2本と逆伝搬参照光を用いた雑音除去手法を利用する。まずは比較的簡単に系が構築できる可視光で実証実験を行った上で、通信波長への適用を行う。

長距離通信においては、参照光と信号光子の同期をとるのが難しい場合があり得るが、そうした状況では光源側で同期をとるのではなく、光子検出器側で事後選択的に検出光子の同期をとる方法が考えられる。高速かつ正確な光子検出器を用いて、光源に対して同期不要な干渉実験の実証を行う。

(C)冷却Rb原子集団システムの立ち上げを行う。その際、1台目で問題となった箇所を改善を行う。(1)のエンタングルメントシステムを2つ準備し、通信波長光子をHOMタイプの回路を構築することでベル測定を実現する。

4. 研究成果

(A)Rb冷却原子に書き込み光を当てて発生した光子を通信波長に変換し、通信波長光子とRb状態間の相互相関を測定し、確かに強い相関状態があることを確認した。本成果はOptica(2016)に掲載された。Rbと可視光の相関状態を異なる2つの波数ベクトルをもつRbと光子について重ね合わせ状態として生成することでRbと可視光子間にエンタングル状態を生成した。光子の波数自由度を偏光自由度に変換することで得られた偏光光子を、前述のサニャックタイプの偏光無依存型波長変換器により通信波長の偏光光子に変換した。その結果、この通信波長の偏光光子とRbの間には確かにエンタングルメントが存在していることが確認された。本成果はNature Communications(2018)に掲載された。
(B)ビット・位相両方の雑音がある光ファイバーを波長板の組み合わせにより模擬することで、逆伝搬参照光による雑音除去手法を、可視光エンタングル光子対を用いて実証した(Scientific reports(2017))。続いて、通信波長エンタングル光子対の光ファイバー通信において本手法を適用し、雑音除去できたことを実証した。本成果は現在論文準備中である。

雑音除去のための逆伝搬参照光はエンタングル光子対との同期を必要としない。代わりに、高分解能、低ジッター特性をもつ超伝導単一光子検出器により光子検出のタイミングを同期させている。本方式は、同期不要のHOM干渉実験(Opt. Exp. (2017)、エンタング

ルメントスワッピング (Sci. Rep. (2018)) において上の雑音除去実験とは別に実証実験を行った。

(C) これまでの実証実験で用いた Rb とは別に、冷却 Rb 原子の系の立ち上げを開始した。(A) で用いた Rb 系では既存研究に比べて光学深さが非常に低いことが問題となっており、これは原子を効率的に集められていないからではないかと推測された。そこで、Rb をロードするガラスセルのサイズ、ロード位置、トラップコイルの設計などを改良し、系の構築を行った。Rb 冷却の最適化を行っている最中であり、完了後直ちに量子情報の実験に取り組む予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

(1) Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Tetsuo Kawakami, Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Masato Koashi, Tetsuya Mukai, Takashi Yamamoto, Nobuyuki Imoto, “Polarization insensitive frequency conversion for an atom-photon entanglement distribution via a telecom network,” Nature Communications 9, 1997 (2018).

(2) Thomas Walker, Koichiro Miyaniishi, Rikizo Ikuta, Hiroki Takahashi, Samir Vartabi Kashanian, Yoshiaki Tsujimoto, Kazuhiro Hayasaka, Takashi Yamamoto, Nobuyuki Imoto, Matthias Keller, “Long-distance single photon transmission from a trapped ion via quantum frequency conversion,” Phys. Rev. Lett. 120, 203601 (2018).

(3) Yoshiaki Tsujimoto, Motoki Tanaka, Nobuo Iwasaki, Rikizo Ikuta, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, “High-fidelity entanglement swapping and generation of three-qubit GHZ state using asynchronous telecom photon pair sources,” Sci. Rep. 8, 1446 (2018).

(4) Toshiki Kobayashi, Daisuke Yamazaki, Kenichiro Matsuki, Rikizo Ikuta, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, “Mach-Zehnder interferometer using frequency-domain beamsplitter,” Opt. Exp. 25, 12052 (2017).

(5) Yoshiaki Tsujimoto, Yukihiro Sugiura, Motoki Tanaka, Rikizo Ikuta, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Mikio Fujiwara, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Masahide Sasaki, Nobuyuki Imoto, “High visibility Hong-Ou-Mandel

interference via a time-resolved coincidence measurement,” Opt. Exp. 25, 12069 (2017).

(6) Rikizo Ikuta, Shota Nozaki, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, “Experimental demonstration of robust entanglement distribution over reciprocal noisy channels assisted by a counter-propagating classical reference light,” Sci. Rep. 7, 4819 (2017).

(7) Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Kenichiro Matsuki, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Tetsuya Mukai, Nobuyuki Imoto, “Heralded single excitation of atomic ensemble via solid-state-based telecom photon detection,” Optica, 3, 1279 (2016).

[学会発表] (計 12 件)

(1) 宮西 孝一郎, T. Walker, 生田力三, S. Kashani, 高橋優樹, 遠本吉朗, 早坂和弘, 山本俊, 井元信之, Matthias Keller, “40Ca+ から通信波長帯への単一光子波長変換” (口頭, 発表日 3/22), 第 73 回物理学会春季大会, 2018/3/22-25 東京理科大学 (野田キャンパス) .

(2) 川上哲生, 小林俊輝, 生田力三, 三木茂人, 山下太郎, 寺井弘高, 山本俊, 小芦雅斗, 向井哲哉, 井元信之, “冷却 Rb 原子集団と通信波長光子間のエンタングルメント実証” (口頭, 発表日 9/5), 2017 年 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017/9/5-8 福岡国際会議場.

(3) 川上哲生, 小林俊輝, 生田力三, 三木茂人, 山下太郎, 寺井弘高, 山本俊, 小芦雅斗, 向井哲哉, 井元信之, “冷却 Rb 原子集団と通信波長光子間のエンタングルメント実証” (口頭, 発表日 9/22), 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017/9/21-24 岩手大学.

(4) Koichiro Miyaniishi, Yoshiaki Tsujimoto, Rikizo Ikuta, Takashi Yamamoto, Nobuyuki Imoto, “Faithful distribution of polarization entangled photon-pairs at telecom wavelength through optical fiber,” (poster, 8 June), Interdisciplinary Symposium for Up-and-coming Material Scientists 2017 (ISUMS 2017), 8-9 June 2017 (presented on 8 June), Osaka University Hall, Osaka, Japan.

(5) 宮西孝一郎, 遠本吉朗, 生田力三, 山本俊, 早坂和弘, 井元信之, “波長 866 nm から通信波長 1530 nm への波長変換実験” (ポスター, 発表日 5/29), 第 36 回量子情報技術研究会 (QIT36), 2017/5/29-30 立命館大学朱雀キャンパス.

(6) 山崎大輔, 小林俊輝, 松木賢一郎, 生田力三, 山本俊, 小芦雅斗, 井元信之, “周波数領域マッハツェンダー干渉計を用いた光干渉実験” (口頭, 発表日 9/13), 2016 年第

77 回応用物理学会秋季学術講演会 13p-B2-8
2016/9/13-16 朱鷺メッセ.

(7) Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Kenichiro Matsuki, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Tetsuya Mukai, Nobuyuki Imoto, “Wavelength conversion of non-classical light from rubidium atoms to the telecom band” (ポスター, 発表日 8/25), 文科省科研費新学術領域「ハイブリッド量子科学」第 3 回領域会議, 2016/8/25-26 東京理科大学神楽坂キャンパス森戸記念館.

(8) Yoshiaki Tsujimoto, Motoki Tanaka, Yukihiro Sugiura, Rikizo Ikuta, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, “High fidelity entanglement swapping via a time-resolved coincidence measurement,” (poster, 5 July), 13th International Conference on Quantum Communication, Measurement, and Computing (QCMC 2016), 4-8 July, 2016, National University of Singapore, Singapore.

(9) Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Kenichiro Matsuki, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Tetsuya Mukai, Nobuyuki Imoto, “Wavelength Conversion of non-classical light from rubidium atoms to the telecom band” (poster, 5 July), 13th International Conference on Quantum Communication, Measurement, and Computing (QCMC 2016), 4-8 July, 2016, National University of Singapore, Singapore.

(10) Toshiki Kobayashi, Rikizo Ikuta, Kenichiro Matsuki, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Tetsuya Mukai, Nobuyuki Imoto, “Wavelength conversion of non-classical light emitted from rubidium atoms to the telecom band” (口頭, 発表日 5/31), 第 34 回量子情報技術研究会 (QIT34), 2016/5/30-31 高知工科大学 永国寺キャンパス.

(11) Yoshiaki Tsujimoto, Motoki Tanaka, Yasuhiro Sugiura, Rikizo Ikuta, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, “High fidelity entanglement swapping via a time-resolved coincidence measurement” (口頭, 発表日 5/31), 第 34 回量子情報技術研究会 (QIT34), 2016/5/30-31 高知工科大学 永国寺キャンパス.

(12) Rikizo Ikuta, Shota Nozaki, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, “Experimental demonstration of robust entanglement distribution over reciprocal channels assisted by a counter-propagating light” (口頭, 発表日 5/31), 第 34 回量子情報技術研究会 (QIT34),

2016/5/30-31 高知工科大学 永国寺キャンパス.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

生田 力三 (IKUTA, Rikizo)
大阪大学・基礎工学研究科・助教
研究者番号: 90626475

研究者番号: 90626475

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()