

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04931

研究課題名（和文）無条件量子もつれ光の誘導放出

研究課題名（英文）Stimulated emission of unconditional quantum entangled photons

研究代表者

佐中 薫（Sanaka, Kaoru）

東京理科大学・理学部第一部物理学科・准教授

研究者番号：00450172

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では「無条件の量子もつれ光」の発生手法、量子もつれ光の誘導放出手法を組み合わせることで、「量子もつれ」をレーザーの原理である「誘導放出」により放出確率を受動光学部品のみにて増幅する試みを行い、量子もつれ光子の増幅実験によりこの効果を確認した。またこの量子もつれ光子の増幅実験における一般的な理論解析にも取り組み、実験結果および理論解析をまとめた結果を、学術論文にて発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在実用化が進められている量子暗号通信には、通信者間で共有する暗号鍵の複製の可能性を完全に排除することができないという技術的課題、そして光ファイバーネットワークにおいて暗号鍵を担う通信信号の損失を補うため増幅を行うことができないという原理的課題が残されている。本研究では、本研究室で独自に開発された検出方法に依存しない「無条件の量子もつれ光」の発生手法、および本研究室で実験的に確認された量子もつれ光の誘導放出手法を組み合わせることで、受動光学素子のみを用いて上記の技術的・原理的課題を同時に解決する量子もつれレーザーの原理である「誘導放出」により放出確率を増幅する試みを行った。

研究成果の概要（英文）：In this study, we attempted to amplify the emission probability of quantum entangled photons by combining the generation method of "unconditional quantum entangled light" and the induced emission method of quantum entangled light. This research attempted to amplify the emission probability of "quantum entanglement" using only passive optical components by combining the generation of "unconditional quantum entangled light" and the induced emission of quantum entangled light, which is the principle of lasers, and confirmed this effect through experiments of amplification of quantum entangled photons. We have also conducted a general theoretical analysis of the amplification of quantum entangled photons. The results of the experiments and theoretical analysis were published in some academic papers.

研究分野：量子光学実験

キーワード：量子もつれ光子 誘導放出 量子暗号

1. 研究開始当初の背景

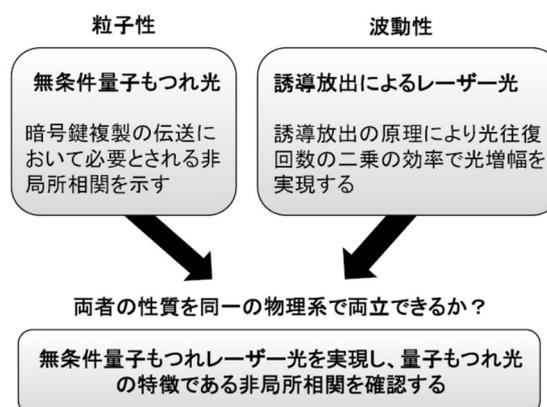
近年、インターネット通信環境においてやりとりされる膨大な情報の安全性を確保することが重要視され、そのための有望な候補として量子力学においては状態の複製が不可能であるという原理「量子状態複製禁止定理」を利用した量子暗号通信の開発が進められている。中国では官主導による専用の人工衛星をつかい宇宙規模で進められており、欧州では民間の通信会社が主体となって都市間での既存の商用光通信網をつかって量子暗号の運用実験を始めている。日本では内閣府による官民の合同プロジェクト「東京 QKD ネットワーク」における都市圏数十キロ圏内における量子鍵の配送実験が行われ、その有効性が示されている。これらの量子暗号システムは光子一個一個に乱数情報を載せて伝送し 2 地点間で同一の暗号鍵を共有するという、BB84 というプロトコルに基づいている。

しかしこのような光源は技術的に未発達であり、現在は微弱なレーザーパルス光による擬似的な単一光子状態を利用している。ここで暗号鍵を担う光子は単一光子状態であることを前提としているが、このような光源は未発達であり実用上のレベルには到達していない。そのため官民合同のプロジェクト「東京 QKD ネットワーク」における都市圏数十キロ圏内における量子鍵の配送実験などでは、微弱なレーザーパルス光による擬似的な単一光子状態を利用しており、量子鍵複製の可能性を完全に排除することができていない。また数 100 キロにおける光ファイバーネットワークにおいて暗号鍵を担う光子の損失を補うため光増幅を実現することも解決すべき重要な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究提案による誘導放出の原理により数メガヘルツレベルの信号伝達速度をもつ高輝度量子もつれレーザー光を実現できれば、量子暗号通信の分野で大きなインパクトをもつ。この光源が高輝度性と安定性を保ちつつ、量子もつれ光の特徴である「非局所的相関」をもつことを示すことができれば、上記のような量子暗号システムへの導入へ向けた大きな一歩となる。また本研究は「量子もつれ」と「誘導放出」という量子力学における特徴的な二つの現象を同一の物理系において両立する試みでもあり、相補的な物理量を両立させる条件とはなにかという物理学の新たな研究分野の発展にもつながると予想される。

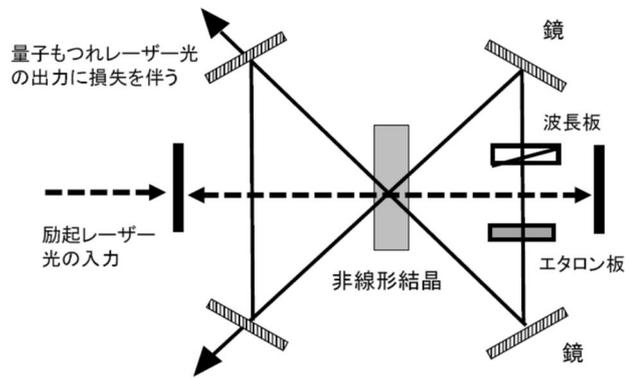
本研究提案では、右図のように本研究室で独自に開発された「量子干渉効果による無条件の量子もつれ光発生」の手法 (Scientific Reports, 8, 15733, 2018)、およびレーザー光のように誘導放出の原理でコヒーレントな増幅機構を可能にする手法 (特願 2019-046524) を組み合わせて、受動光学素子のみを用いて可能となる量子もつれレーザーの原理を実験的に検証する。本研究では量子もつれ光の特性である「非局所的相関」が、誘導放出の原理で増幅された高輝度量子もつれレーザー光でも現れることを実験で確かめ、物理学におけるこの二つの重要な現象が受動光学素子のみを用いて同一の物理系において両立できることを示すことを目的とする。



本研究提案動機

3. 研究の方法

量子もつれ光源が量子暗号通信のシステムに導入することが困難な理由は、一般にこの光源の光強度が光子計数法をつかっても数キロヘルツ程度の信号伝達速度であり、また通信波長に適した近赤外波長 $1.5 \mu\text{m}$ 帯に発生させる技術が確立されていないからである。右図のような量子もつれの性質を示す光源である非線形光学結晶を共振器構造に組み込むと、共振器許容モードで決まる特定の波長・周波数帯域に誘導して原理的には通常のレーザーと同じように光が非線形結晶を通過する回数の二乗に比例する効率で量子もつれ光を際限なく増幅させることができる (Phys.Rev.Lett.91, 053601, 2003)。

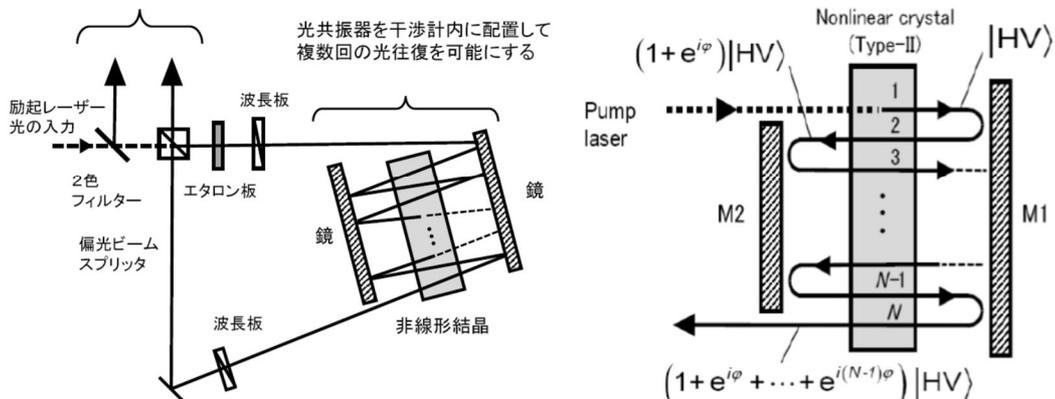


従来の往復型干渉計による量子もつれレーザー

しかしこの方法では装置の出力側にも鏡があるため共振器内で複数回往復して増幅された量子もつれ光子対をいかにして光損失なしに共振器外部に放出させるか、という課題が解決されていない。そのため誘導放出による量子もつれ光の増幅実験は、共振器を使用せず非線形結晶に光を2回通過させることによって4倍の効率の光増幅までしか報告されていない (Nature 412,887,2001)。数メガヘルツレベルの高輝度・波長可変量子もつれレーザー光を実現するためにはやはり光源を共振器構造に組み込み、受動光学素子のみをつかって外部に効率よく増幅された量子もつれ光を放出させるしくみが必要となる。

これに対して本研究提案においては本研究室で独自に実現した「無条件量子もつれ光」を発生させる手法 (Scientific Reports, 8, 15733, 2018) および下図のような共振器構造をサニャック型と呼ばれる光干渉計に組み込む (特願 2019-046524)。この装置においては量子もつれ光を発生させる非線形結晶に対し、励起光を微小角度のもとで照射する。この角度の大きさに応じて励起光は複数回共振器内で非線形結晶を往復し、増幅された量子もつれ光を原理的に損失なしに共振器外部に放出させる。試算によると $10\text{mm} \times 5\text{mm}$ 程度の非線形結晶では光を100回程度通過させることが可能であり、その場合は $\sim 10^2$ の効率改善、つまり約2桁程度の量子もつれ光の増幅が可能となることが予想される。このような誘導放出のしくみで数メガヘルツレベルの高輝度・波長可変量子もつれレーザーを実現すれば「東京 QKD ネットワーク」などで現在用いられているレーザー光による擬似的な単一光子光源を代替し、量子鍵複製の可能性を量子力学の原理に基づいて完全に排除することができる。さらに誘導放出の原理で増幅された量子もつれレーザーに量子もつれの特徴である「非局所的相関」の性質が表れることを実験的に確認することで、「量子もつれ」と「誘導放出」という量子力学における相補的な二つの重要な現象が同一の物理系において両立できることを示すことができれば物理学の新たな研究分野の発展につながる。

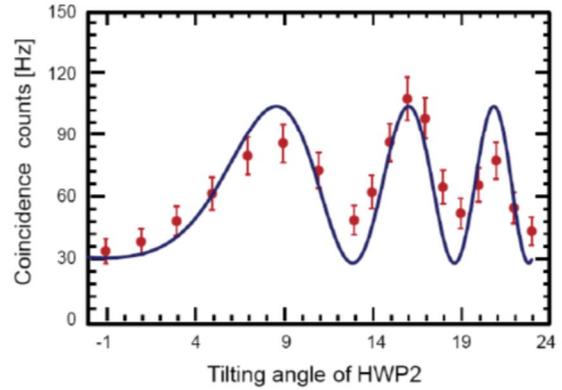
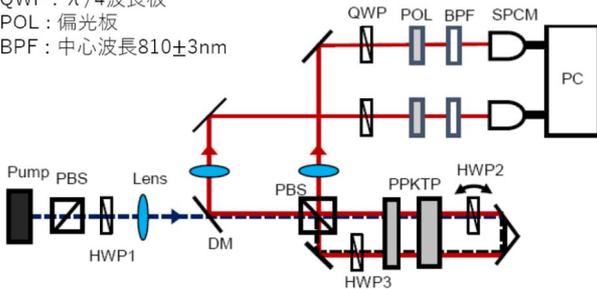
量子もつれレーザー光を損失なしに出力できる



本研究提案のサニャック型干渉計による量子もつれ光子レーザーの実現手法(左)および増幅原理(右)

4. 研究成果

Pump: LD405nm
 PBS: 偏光ビームスプリッター
 HWP: $\lambda/2$ 波長板
 (HWP1青色は405nm用)
 (HWP2赤色は810nm用)
 (HWP3紫色は両波長)
 Lens: $f=300\text{mm}$
 DM: ダイクロイックミラー
 PPKTP: 結晶長10mmと5mm(5mmは補償用)
 QWP: $\lambda/4$ 波長板
 POL: 偏光板
 BPF: 中心波長 $810\pm 3\text{nm}$

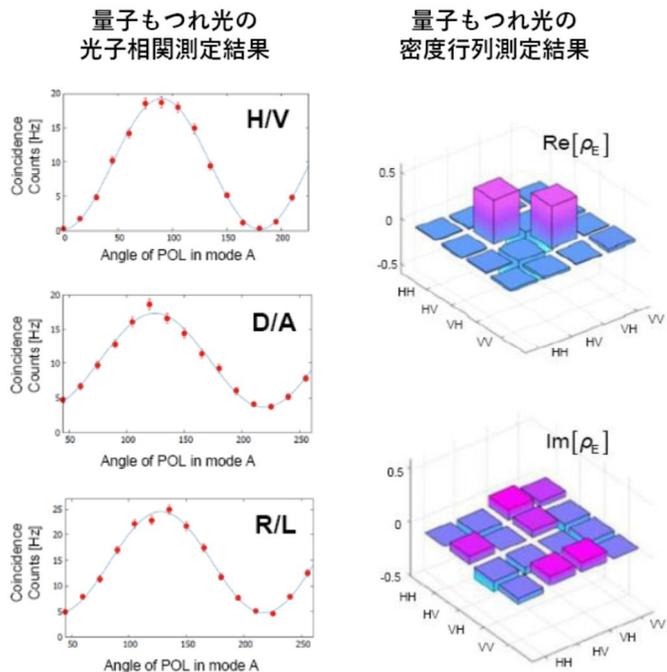


本研究提案でもちいた実際の実験装置(左)および誘導放出を示す実験結果(右)

本研究室で開発された「量子干渉効果による無条件の量子もつれ光発生」の手法 (Scientific Reports, 8, 15733, 2018) および独自の量子光学実験装置により、上図(左)のような実験装置を用いて近赤外光において誘導放出による量子もつれ光の増幅効果の確認する実験をおこなった。この実験では受動光学素子のみを用いて、上図(右)のように非線形光学結晶に励起光を一往復させた場合、量子もつれ光子は特定の相対位相角度において、誘導放出の効果により単純な二倍の放出より大きい 3.4 ± 0.1 倍の増幅を示し、誘導放出による増幅効果が確認された (日本物理学会 2019-16pK201)。この実験結果は「量子もつれ光の発生効率は非線形結晶への励起光の通過回数の二乗に比例する」という原理を実証している。

我々はさらに、この増幅された量子もつれ光子が量子もつれ特有の「非局所相関」を示すため、右図のように光子の偏光に関する光子相関測定および密度行列測定をおこなった (Physical Review A, 107, 023707, 2023)。光子相関測定結果は非局所性を示すベルの不等式の破れを示し、また測定された密度行列から計算した信頼度の大きさは、量子もつれ状態を示す 50% より十分大きな値を示した。現在は光共振器を組み込むことにより 5 ~ 10 回程度の光を通過させて無条件量子もつれ光の発生効率を指数的に増幅させる試みを行っている。

今後はさらに量子もつれ光を通信波長帯 ($\sim 1.5 \mu\text{m}$) への変換技術の確立するため、希土類添加光ファイバーによる量子もつれ光子と単一光子の結合実験に取り組み、量子的な光を発生させることができることを示した (Appl. Phys. Lett. 124, 081106, 2024)。この手法により今回の近赤外領域における量子もつれ光発生のみならず、通信波長を含めた様々な量子もつれ光子発生への道筋が示すことができた。



量子もつれ光の発生を示す実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryo Nozaki, Yoshiro Sato, Yoshitaka Shimada, Taku Suzuki, Kei Yasuno, Yuta Ikai, Wataru Ueda, Kaito Shimizu, Emi Yukawa, and Kaoru Sanaka	4. 巻 107
2. 論文標題 Enhancing the stimulated emission of polarization-entangled photons using passive optical components	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 23707
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.107.023707	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kaito Shimizu, Kai Inoue, Kazutaka Katsumata, Ayumu Naruki, Mark Sadgrove, and Kaoru Sanaka	4. 巻 124
2. 論文標題 Single-photon generation from a neodymium ion in optical fiber at room temperature	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 81106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0181691	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清水魁人、湯川英美、佐中薫
2. 発表標題 受動光学素子を用いた偏光量子もつれ光子対生成効率増幅の原理
3. 学会等名 第47回量子情報技術研究会（QIT47）
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 島田 能孝
2. 発表標題 Type-IIパラメトリック下方変換を用いた偏光量子エンタングルメント源の高効率な生成
3. 学会等名 東京理科大学理学研究科物理学専攻修士論文発表会
4. 発表年 2021年～2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

佐中研究室研究活動の紹介ホームページ
<https://quantum-optics.wixsite.com/photonlab/blank-2>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------