

研究課題別評価書

1. 研究課題名

「光子数確定パルスの空間制御理論」

2. 氏名

越野 和樹

3. 研究のねらい

光子は量子コヒーレンスを長時間保持することができるため、量子情報処理をはじめとする次世代量子技術の実装に最適の物理系である。よって、光子を意のままに操作する諸技術(オンデマンド生成, 光子による光子の制御, 高効率検出)の開発が急務である。本研究では、物質の有する光学非線形性を活用した光子操作技術の可能性を、理論面から追求する。

光子群の非線形光学応答を定量的に評価するための理論には、次の二点が必須である。(i) 一般に非線形光学効果は、電場すなわち光子パルスの時空間形状に敏感である。よって、光子場の連続多モード性を厳密に導入する。(ii) 単一光子のような光子数確定状態は、古典光学の枠を超えた純量子力学的状態である。よって、物質系のみならず光も量子論的に扱う。これら二点を具備した『量子非線形光学理論』を展開し、量子多体問題の観点から従来の光学応答理論を見つめなおすとともに、次世代量子技術に直結する光子操作手法の提案を目標とする。

4. 研究成果

I. 光子非線形動力学の新解析手法の開発 —古典パルス光の活用—

光子の光学応答、特に非線形応答を定量的に解析するための『量子非線形光学理論』には、「光子場を連続多モード場として取り扱うこと」「光・物質双方を量子力学的に扱うこと」の二点が必須である。しかし、この厳密な枠組みには「光子数の増加に伴い、ファインマン図形や数値計算量が指数関数的に増加する」という困難があり、これまで着手不能であった。一方で、古典光パルスの光学応答を解析する際には、光を古典電磁場として扱い物質のみを量子力学的に扱う『半古典理論』が有効であり、前者に比べて遥かに数値的負担が少なく済む。そこで本研究では、二つの理論の関係を考察し、数値的負担の少ない『半古典理論』の拡張として『量子非線形光学理論』を遂行するための処方箋を示した。

古典光は、量子力学的には様々な光子数の重ね合せ状態(コヒーレント状態)として記述される。よって、量子光学の観点からは、半古典理論は「様々な光子数での動力学を同時進行させ、電場期待値を評価している理論」と解釈される(図1)。また、動力学に関与している光子数は、摂動次数に反映される。これらの事実を組み合わせると、二光子が非線形媒質を透過する際に獲得する『非線形位相シフト』を次の方法で評価することができる: 古典パルス入射に対して、半古典理論により出力パルスの線形成分・三次非線形成分を求め、両者の重なり積分の位相を求める。この方法では、二光子という非古典状態を取り扱うにも関わらず、古典光の光学応答を計算することによって、興味ある物理量を厳密に抽出できるという面白みがある。

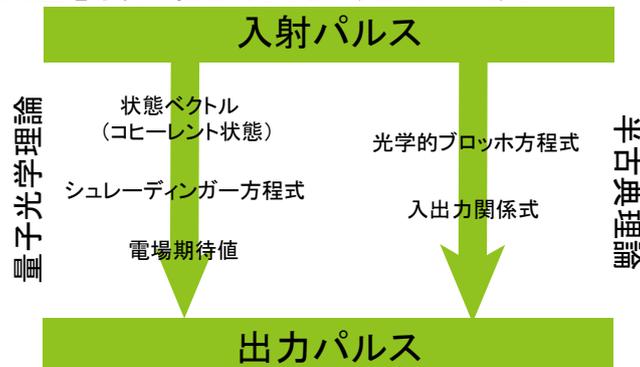


図1 古典パルス光入射に対する、量子光学理論と半古典理論の流れの比較。

一方、半古典理論では、光子群の完全な情報(多体波動関数)を電場振幅(一点相関関数)に縮約してしまっているため、上述のアイデアが適用できる対象は、非線形位相シフトなど僅かな種類の物理量に限定されてしまう。そこで、計算対象を一点相関関数から多点相関関数に拡張することにより、光子群の完全な情報である多体波動関数を、次のようにして求めることができる:古典パルス入射に対して、出力パルスの多点相関関数を最低次摂動により求め、規格化する。この手法は、二次非線形過程など光子数が非保存の状況も含め、一般的な光学過程にも適用可能であり汎用性が高い。

この手法の応用例として、 N 光子が同時にカー媒質(ここでは二準位量子系)に入射した場合の解析結果を示す。既存の現象論では、光子パルス形状は不変のまま、光子数の2乗 $\sim N(N+1)$ に比例する非線形位相シフトが得られると予言する。一方、本手法による厳密解析のもとでは、現象論の予想よりも小さな位相シフトしか得られないことや、光子数増加に伴うパルス形状乱れを正確に評価することができる(図2)。これらの結果は、光子デバイス設計の際の定量的指針としての、本手法の有用性をデモンストレーションしている。

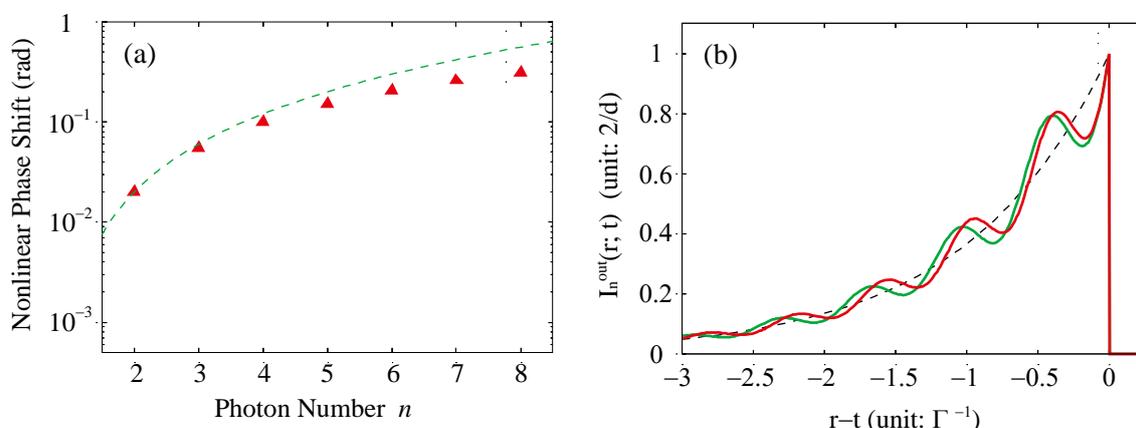


図2 (a)入射光子数の関数としての、非線形位相シフト。緑点線は現象論による予想 $\sim N(N+1)$], データ点は厳密理論による値。(b)光子パルス形状の乱れ。点線:入射パルス, 赤実線:1光子出力, 緑実線:8光子出力。

古典パルス光に含まれる光子群は、時間的相関を持たない。よって、上述の方法は、入射光子群が古典パルス対応を持つ無相関光である場合にのみに有効であり、時間相関のある光子群(例:パラメトリック下方変換光子対など)に対しては使えないように見える。しかし、「時間相関のある光子群は、 δ 関数的に時間的に局在した光子群の重ねあわせとみなせる」「 δ 関数的光子には古典対応がある」といった事実から、 δ 関数的古典パルスの光学応答の解析が、光子群の伝播関数計算に活用できることがわかる。

II. 単一光子フィルタ

光子を意のままに生成することは、古典パルス生成と比較すると圧倒的に難しい技術であるため、単一光子レベルにまで弱めた古典パルスを光子の代替品として用いることが多い。しかしながら、量子情報処理においては、古典パルスに含まれる多光子成分が盗聴など誤作動の原因となる。よって、古典パルスから、一光子成分を高く保ちつつ多光子成分のみを効率的に除去する必要が生じる。本提案では、共振器と二準位量子系とを結合させた『共振器QED系』により、上記機能を有する『単一光子フィルタ』を提案した。

二準位系からの輻射には高々1個の光子しか含まれないため、「古典パルス入射により二準位系を励起し、入射光との隔離を保ちつつ、二準位系からの輻射を高効率で取り出す」ことが単一光子フィルタの設計指針となる。本装置のセットアップは図3(a)のとおりである:二準位系を内包した両側共振器の片側から古典パルスを入射し、反射側を出力ポートとする。共振器からの散逸

レートがラビ振動数よりも大きな「弱結合領域」においては、入射パルスのほとんどが透過方向に抜け二準位系からの輻射のみが反射方向に出力される、という状況が実現されるので、出力ポートには高々一個の光子しか放出されない。図3(b)に、平均光子数1の古典パルスを入射した場合の、入出力パルスの光子統計を示す。入射パルスにおいては、1光子確率 P_1 と多光子確率 $P_m (=P_2+P_3+\dots)$ はそれぞれ(0.37, 0.26)であるが、出力パルスでは(0.32, 0.01)となり、1光子成分を保持したまま多光子成分のみを効率的に除去していることがわかる。

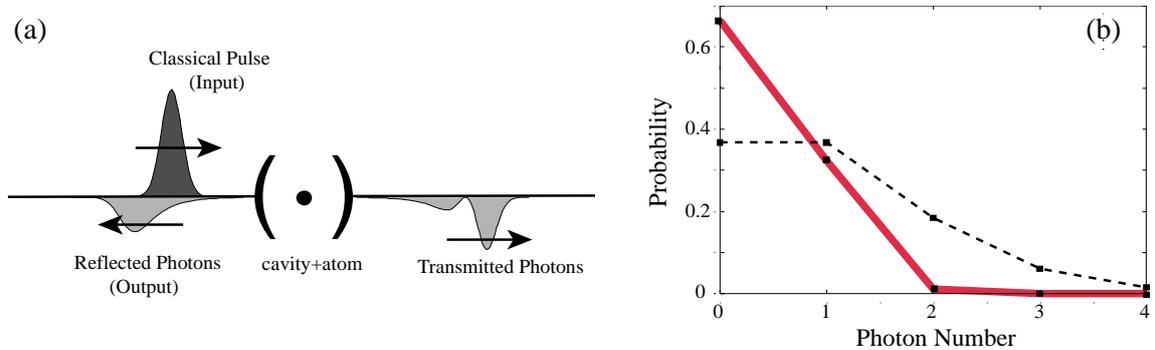


図3 (a)単一光子フィルタのセットアップ。二準位系を内包する両側共振器の片側から古典光パルスを入射し、反射側を出力とする。(b)入力・出力パルスの光子統計。出力(赤実線)では、入力(細点線)に比べ多光子成分が大きく抑えられている。

Ⅲ. 光子による光子の制御 —決定論的な二光子量子ゲート—

光子により光子を制御し「二光子量子ゲート」を実現することは、量子情報処理においてここ20年間最も期待されている要素技術であるが、非線形効果を介した光子間相互作用が極めて弱いために、大変難しいと思われてきた。これまでに、線形光学素子のみを用いて確率的にゲート動作させる提案がなされてはいるが、その確率的性格のためにスケーラブルな量子回路への拡張が原理的に不可能である。ここでは、現実的な物理系を使い、決定論的な(効率1の)二光子制御ゲートを実装する手法を提案した。

用いる物理系は、一次元的に伝播する光子と、反射型配置で相互作用する縮退 Λ 型三準位量子系である[図4(a)]。この物理系の特筆すべき点は、 Λ 系の2つの崩壊レート($|2\rangle \rightarrow |0\rangle$, $|2\rangle \rightarrow |1\rangle$)が等しい場合に、決定論的なラマン過程を誘起しうる点である。すなわち、状態 $|0\rangle$ の Λ 系が縦偏光光子を吸収し、横偏光光子を放出して状態 $|1\rangle$ に緩和する(或いはその逆)という過程が、確率1で起こる。この現象の原理は、両側共振器における共鳴トンネリングと同様の「入射光と Λ 系からの輻射の負の干渉」であり、一次元光子に特有のものである。

この系は、光子- Λ 系間の『量子状態交換ゲート』として活用可能である。 Λ 系が状態 $|0\rangle$ ($|1\rangle$)のときには横(縦)偏光光子と相互作用しないことと、上述の決定論的ラマン過程に注意すると、光子の偏光qubitと Λ 系の基底状態qubitとが、反射により完全に交換することが容易に確認できる。また、入射光子のエネルギーが Λ 系の共鳴から若干ずれている場合には、量子状態を「半分だけ」交換させることもできる。これらを組み合わせ、図4(b)のように三つの光子を共鳴→非共鳴→共鳴の順に連続して入射させることによって、二光子間の『(SWAP) $^{1/2}$ ゲート』を構築することも可能である。(SWAP) $^{1/2}$ ゲートは、構築のきわめて容易な一光子ゲートと併せて、あらゆるユニタリ変換を構築できることが知られている(ユニバーサルゲートセット)。よって、光子qubitのみで量子計算を行うための鍵となる『二光子制御ゲート』を、現実的な物理系で実装することができる。

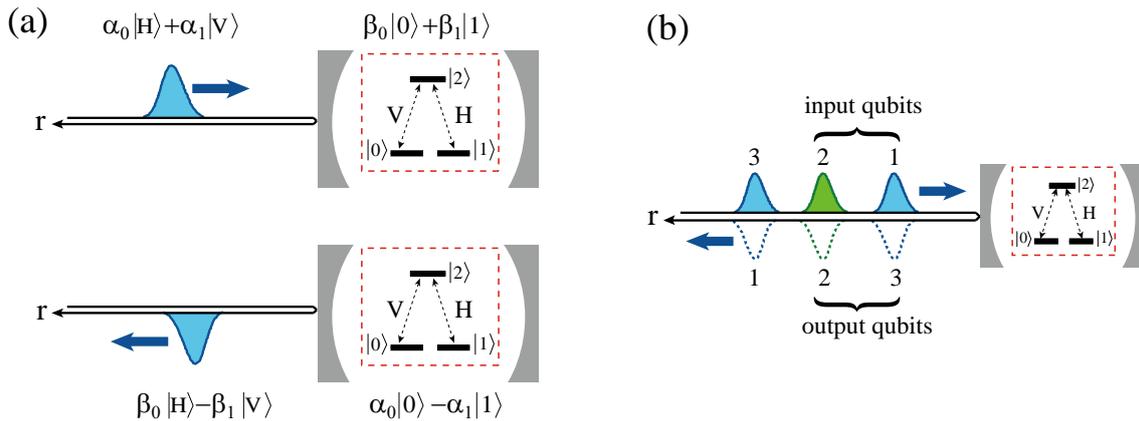


図4 (a) 光子— Λ 系間の『量子状態交換ゲート』。一次元的に伝播する光子と、縮退 Λ 型三準位量子系とが反射型配置で相互作用する。一回の反射により、光子の偏光qubitと Λ 系の基底状態qubitとが完全に入れ替わる。(b)二光子間『(SWAP) $^{1/2}$ ゲート』。光子1・3は Λ 系に共鳴、光子2は非共鳴。入力qubitは光子1・2、出力qubitは光子2・3。

5. 自己評価

本研究の目的は(i)「光子場の連続多モード性」「光・物質双方の量子化」を具備した『量子非線形光学』の解析手法の開拓、および(ii)それに基づく光子操作諸技術の理論的提案、であった。それぞれの課題に対する自己評価は以下のとおりである。

(i)に関して:本研究では、古典光に対する非線形光学理論の拡張(電場=1点相関関数から、多点相関関数へ)という着想を活用し、量子非線形光学理論に付随する技術的困難を解決することができた。提案した方法は、「数値計算量を劇的に減らして解析可能な問題の対象を拡げた」という直接的な利点に加え、「長年に亘り蓄積されてきた非線形光学の知見を、量子光学領域へスムーズに転用できる」という長所を併せ持つ実用的価値の高い手法であり、『量子非線形光学理論』に対する壁を取り払った独創的貢献であると自負している。

(ii)に関して:次世代量子技術、特に量子情報処理に必須の光子操作技術である「単一光子フィルタ」「決定論的な二光子間量子ゲート」を提案した。これまでの決定論的な二光子ゲートの探索の基本方針は、「光子間の微弱な非線形効果を最大限に活用する」であった。しかしながら、この方針では、光子パルス形状の歪みのために、忠実度の高いゲート構築が原理的に不可能である。そこで、本研究において、「光子の量子状態を物質に転写することによって、非線形性を使わずに光子間相互作用をもたらす」というアイデアを世界にさきがけて発信した。この方法では、光子パルス形状の歪みが原理的に問題にならない、物質の初期化が自動的に行われる、など実用化に向けて有利な点が多く、今後の量子ゲート構築の新しい潮流に成長する可能性があるかと自負している。

6. 研究総括の見解

光子の光学応答、特に非線形応答を定量的に解析するための「量子非線形光学理論」での厳密解において、光子場の連続多モード性、ならびに、光・物質双方の量子化、を具備した新解析手法開拓、ならびに、それに基づく光子操作諸技術の理論的提案を目標に研究を行った。

主たる成果は下記2点である。

- 1)新解析手法開拓:厳密解は数値計算量が指数関数的に増加する為これまで着手不可能であったが、本研究では数値的負担の少ない「半古典理論」の拡張として計算を遂行するための処方箋を示した。本手法は、数値計算量を大きく減らし解析可能な対象を拡げた事に加え、従来の非線形光学理論を量子光学領域へ適用可能な実用的価値の高い手法となっている。
- 2)光子操作技術の提案:「光子の量子状態を物質に転写することによって、非線形性を使わずに光子間相互作用をもたらす」というアイデアを世界にさきがけて発信し、次の2案の有用性検

証を行った。

①光子を意のままに生成する「単一光子フィルタ」

②光子により光子の制御を行う「二光子量子ゲートとその制御方法」

理論的で独創的な研究手法により、実用的価値の高い手法ならびに実用化を見据えた操作技術を提案する成果を得たことは高く評価できる。研究成果は、主に 10 件の原著論文に纏められ、日本物理学会若手奨励賞受賞の評価を受けている。

本研究で開発、提案された手法は実用化に向けて有利な点も多く、国内外の実験チームとの共同研究などを通じて、新奇量子デバイスの開発に結びつけて行くことを期待する。

7. 主な論文等

(A) さきがけ個人研究者主導で得られた成果で主なもの

(1) 論文(原著論文)発表

- K. Koshino: "Novel Method for Solving the Quantum Nonlinear Dynamics of Photons: Use of a Classical Input", Phys. Rev. Lett. **98**, 223902 (2007).
- K. Koshino, "Single-photon filtering by a cavity quantum electrodynamics system", Phys. Rev. A **77**, 023805 (2008).
- K. Koshino: "Multiphoton wave function after Kerr interaction", Phys. Rev. A **78**, 023820 (2008).
- K. Koshino: "Down-conversion of a single photon with unit efficiency", Phys. Rev. A **79**, 013804 (2009).
- K. Koshino: "Conditional sign flip of two photons without pulse distortion", Phys. Rev. A **80** 023813 (2009).

(2) 受賞

- 2007年9月 日本物理学会第1回若手奨励賞
表彰業績名; 「量子ゼノ効果と測定問題の理論的考察」
表彰主催団体; (社)日本物理学会

(3) 招待講演

- 越野和樹: "一般的量子測定による量子ゼノ効果 ~射影測定を超えて~", 日本物理学会, 2007.09.23.
- K. Koshino: "Translation of semiclassical optical-response theory into quantum-optics theory", 2008 International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, 2008.06.25.

(4) 学会発表(国際会議講演)

- K. Koshino: "Use of classical input for solving two-photon nonlinear dynamics", CLEO/Europe IQEC 2007, 2007.06.19.
- K. Koshino: "Single-photon filtering using a two-level system in a two-sided cavity", 8th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, 2008.04.10.
- K. Koshino: "Extraction of Single Photons by a Cavity-QED System", Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 08), 2008.05.06.
- K. Koshino: "Conditional sign flip of a two-photon pulse with unit fidelity", CLEO Pacific RIM 2009, 2009.08.31.