

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月12日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02214

研究課題名(和文)量子測定で拓く多体量子システム

研究課題名(英文) Many-body quantum systems developed by quantum measurements

研究代表者

井元 信之 (Imoto, Nobuyuki)

大阪大学・理学研究科・招へい研究員

研究者番号：00313479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,800,000円

研究成果の概要(和文)：系に対する量子測定的作用を利用する新奇な多体量子状態生成・制御・評価を行った。(1)周波数変換付き単一光子検出器を用いた量子メモリの書き込み読み出し、(2)高時間分解超伝導光子検出器を用いた非同期光子多光子干渉、および(3)「弱値」の新しい使い道の提案と実証である。(1)は多体Rb原子やCaイオンが発する近可視光赤外光子を通信光子に波長変換し、離れた場所で読み出した。(2)は複数光子を同期させる必要のない非同期光源を用い、観測段階で同期成分を抽出することに成功した。(3)は弱値の新しい使い道として「その光子に施した操作の実効効果の向きと大きさ」という新しい意義を理論的に見出し、実証実験した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ダイナミクスを使う従来方法でなく「量子観測の反作用」を使って多体系の量子状態の生成・制御・評価を行ったことは学術的に新奇であるだけでなく、得られる効果が通常の方法で得られない域に達している。テクノロジー的には、(1)必ず必要となる「量子状態を変えない波長変換」を用い、固定量子ビットの代表である量子メモリと飛行型量子ビットの代表である光子の波長不整合を解消したこと、また(2)高時間分解超伝導光子検出器で事後に選択することにより「長距離通信に向かない同期光子パルス」を不要としたこと、そして(3)新概念「弱値」の新しい使い道を提案実証したことである。これらにより今後の技術革新に資する結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：Many-body quantum state generation, control and evaluation were performed in a novel way using the back-action of quantum measurement on the system. (1) Read/Write of quantum memory using single photon detector with frequency conversion, (2) asynchronous multi-photon interference using superconducting photon detector having high time-resolution, and (3) suggestion and demonstration of new use of "weak value." In concrete, (1) a near-visible infrared photon emitted from Rb atoms or a Ca ion is converted to a telecom photon keeping its quantum state, and is read out after telecom photon propagation, (2) the two-photon interference was observed without synchronized photons but with asynchronous photons source, and, (3) we propose a new usage of the weak value and experimentally demonstrate it: The weak value of a photon is an indicator of "the direction and magnitude of the effective influence of an operation applied to that photon."

研究分野：量子情報・量子光学

キーワード：量子情報 量子測定 量子テレポーテーション 光量子情報処理 超伝導光子検出器 イオントラップ  
量子周波数変換 原子トラップ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光が理想的な量子系であることは、これまでの量子光学およびそれによる量子情報処理の進展を見れば明らかである。当初は光の直接相互作用が小さいため光のみによる量子演算は難しいと考えられていたが、それを補うための量子プロトコルが数多く提案された。原理的には問題は解決され、線形光学素子を用いても任意の量子演算を行えることが示された。一方で、現在の技術レベルもしくは現実の系を考えると、無損失、無雑音、無誤謬等の理想的な光子発生や光子検出器や光学素子は存在しない。この状況は一見悲観的に見えるが、実際はそのおかげで、光子を用いた様々な量子演算が議論され、現実的な装置で可能な量子演算の理解が深まり、工夫を凝らした量子情報処理の新しい機能が提案され続けている。その最近の例の一つが測定装置無依存型量子暗号通信 (MDI-QKD) である。

MDI-QKD では情報の送信者と受信者は勝手に選んだ光子の状態を、中継を受け持つ第3者 (= 典型的には通信事業者: 必ずしも信頼できないと仮定) へ送信し、受け取った2つの光子をその第3者が測定し、その結果を送信者と受信者に送ることでプロトコルが成立する。ここで重要なのは、第3者は2つの光子を Bell 測定 (50:50 のビームスプリッターを使用) と呼ばれる量子測定を行うことである。送信者と受信者はこの Bell 測定の結果をもらうことで相手の量子状態を推定することができるのである。丁度、第3者が量子相関光子対を配る E92 プロトコルの時間反転版である。この方法では第3者に情報が漏れないだけでなく、第3者が送受信者に嘘の申告をすると見破られてしまうのである。E92 の方法では実際に量子相関光子対を送る必要があるが、MDI-QKD は微弱レーザー光でも遜色なく動作する。さらに、ユーザーである送受信者は光子検出器が要らなくなるため、光子検出器の不完全性を突いた盗聴攻撃にさらされなくなる。この方法によりユーザーは古典的なデバイスだけで量子力学的な性質を享受できる新しいシステムを構築している。学術的にも興味深く、示唆に富む好例である。

### 2. 研究の目的

MDI-QKD のように複数光子にまたがった量子測定による事後選択によって、事前の状態を推定する問題や事後の状態を抽出あるいは制御する問題に対して、我々はこれまで多く研究を行ってきた。例えば、事後選択により量子相関を高める量子もつれ蒸留 (Nature 421,343,2003) 雑音フリーな状態抽出 (Nature Photonics 2,488,2008) 測定ベース量子計算 (Phys. Rev. Lett. 100, 210501,2008) 等である。これらは、1987年に実証された Hong-Ou-Mandel 干渉の実験技術を基本にしている。一方、これだけにとらわれず、現在の進歩した光技術や新しいアイデアを元に、新たな干渉効果による量子測定が出現しつつある。本研究課題では、このような新しい量子測定を通じて、一段と進化した新しい多体量子システムの基礎となる研究を推進する。

### 3. 研究の方法

これまでとは“異なる”量子測定として、場所的に或いはハード的に異なる物理系を跨ぐ全系を一つの系と見る量子力学的測定が必要となって来ている。異なる物理系は直接相互作用させるのが難しいため、光を介して繋ぐ方法が有望である。従来 Bell 測定や多光子干渉では、入力光子の識別不可能性つまり同じ周波数モードの複数光子を使うことが条件であった。しかし異なる物理系が発する光子の周波数は一般に異なる。そのため、光子の量子状態に触れずに周波数だけ変換する必要である。本研究課題ではその実証実験として、単一カルシウム Ca<sup>+</sup>からの単一光子発生を行い、上記の「量子性を保つ」光周波数変換により通信波長帯光子に変換する。同じく、冷却 Rb 原子集団が発する単一光子を通信波長帯光子に変換する。

MDI-QKD の実装を念頭に置いて長距離量子情報通信[論文(7)]に目を向けると、従来の実験では、離れた光源は同期パルスレーザー励起であり、それらの光子を中間地点に配送し、光子の時間波束をビームスプリッターでオーバーラップさせ、光子検出を行うことで量子測定を実現している。このとき、検出器の時間分解能は光子の時間波束より大きくとっている。しかし、光子波束より時間分解能の良い光子の同時検出ができれば、原理的には光子発生から量子測定までの時間差を調節せずとも、検出器の同時検出時刻を元に光子波束がオーバーラップしていた事象のみを事後選択することができる。こうすると、非同期であっても量子測定が行え、従来の同期式方法より複雑さを排した量子通信が実現する。これにより、光源同期が難しい長距離通信における新しい方法を提供できる。本研究課題では、このような非同期光源による量子測定を、非常に高い時間分解能を持つ超伝導光子検出器 (SNSPD) により実現し、高い忠実度を呈する多体量子系を実証する。これに加えて、最新の提案になる量子中継方式も研究を進める。

上記のような非同期型量子測定は、従来にはなかった技術の進化によってはじめて実現可能となったタイプのものである。一方、測定概念そのものを拡張するような、これまでにない発想によって可能となる新しい量子測定も今後の進展が期待できる。本研究課題ではその一つとして、アハラノフの提唱した「弱測定」に見られるような、一見非物理的と思われるような測定値 (普通なら正の量が負で現れたり、実数の量が複素数で現れたりする) による量子操作の推定や量子相関の推定といった新しい発想に基づいた量子測定の研究を行う。弱値は様々な使い道が提唱・議論されているが、現状で目処が立っている独自のものとして、「弱値を測定することにより、所望の結果をもたらす現実的な物理操作に関する指針が得られる」ことを鮮やかに示す量子測定実験を行う。

### 4. 研究成果

4-1 研究開始当初は冷却 Rb 原子からの単一光子周波数変換に注力して研究を行った[論文(8)]。周波数変換器として導波路型 PPLN 結晶を用い、励起光として 1600 nm の狭線幅レーザー

を用い、差周波発生によって、780 nm 光子から 1522 nm 光子への周波数変換を行った。結晶長 20 mm において、変換可能波長幅 0.3 nm であり、中心波長における変換効率はノイズ抑制フィルター等を考慮に入れると約 20%強であった。励起光によるラマン散乱ノイズの抑制のために、励起光 200 mW で動作させた場合でも約 10%程度の変換効率であり、十分な変換が確認できた。冷却 Rb 原子からの単一光子性を表す強度相関  $g(2)$  値も変換前 0.47、変換後 0.54 となり、どちらも非古典性を示す 1 以下であった。これから、この実験における Hong-Ou-Mandel 干渉の明瞭度が 0.65 と期待され、古典限界の 0.5 を超える可能性を示すことができた[論文(9)]。単一 Ca+からの光子による 866nm 単一光子を光通信波長帯へ高効率に変換する量子周波数変換器も作成し、1530 nm への波長変換を実施した。PPLN 導波路での内部変換効率は約 50%であり、中心波長における変換効率はノイズ抑制フィルター等を考慮に入れると約 3%であった。変換前の強度相関  $g(2)$  値は 0.0017 であり、変換後の強度相関  $g(2)$  値は 0.67 であり、変換後においても十分に非古典性を示すことができた。主なノイズ原因は周波数変換によるものではなく、単一 Ca+からの光子の光ファイバーへの結合効率の低さであることもわかった[論文(2)]。これらの結果から、冷却 Rb 原子と単一 Ca+の多体量子システムの形成が、量子周波数変換器によって実現する可能性を示すことができた。

4-2 非同期光源を用いる際の量子測定に関しては、超伝導光子検出器開発技術[論文(5,11)]を背景とし、非常に高い時間分解能を持つ超伝導光子検出器 (SNSPD, 85ps 時間分解能) および連続光励起した導波路型 PPLN 結晶による光子対光源を開発し研究を行った。非同期光源による Hong-Ou-Mandel 干渉実験は最初の実験[Nature Physics 3, 692 (2007)]において明瞭度 0.77 が報告されてから、向上が見られなかった。また、データ解析法も厳密なものではなく、報告された干渉の明瞭度は伝統的に用いられているものとのズレがあることもわかった。本研究課題では、非同期光源から同期光源まで適用可能である伝統的な Hong-Ou-Mandel 干渉の明瞭度を求める一般的なデータ解析手法を明らかにした。開発した光子対光源は、780 nm の狭線幅レーザー励起のパラメトリック変換から 1541 nm と 1580 nm の非縮退光子対を発生する。光子発生効率は  $3.2 \times 10^8$  pairs/(s · mW · nm) であり、非常に高い光子対発生率であった。非同期光源による Hong-Ou-Mandel 干渉では、光子対のコヒーレンス時間よりも短い時間分解能の光子同時検出が必要である。使用した超伝導光子検出器の時間分解能の実測値は 85 ps であり、周波数フィルターにより狭窄化された光子対のコヒーレンス時間は 231 ps であったため、条件を満たすことができた。最終的に得られた Hong-Ou-Mandel 干渉の明瞭度は 0.87 であり、非同期光源では最も高い値を得た[論文(6)]。更にすすめて、多体量子もつれ状態である GHZ 状態生成も実現した[論文(4)]。

4-3 弱測定に関しては三つの成果があった。このうち最初の二つは「負の弱値は物理操作の効果の符号を意味する」という理論および実験研究であり、三つ目は「弱値（およびモジュラー値）の非因果的發展を、ヒルベルト空間を拡大することにより因果的に記述する方法」についての理論研究である。まず初めの二つであるが、通常のマッハツェンダー干渉計（粒子が二手に分かれたあと偏光位相差をつけられて合流する）を「三方に分かれて合流」に変更した干渉計を考える。入力光子をある状態に準備し出力光子を別の状態に事後選択し、三つの中間経路のどれかに偏光回転素子を置くと、「光子が通った確率」に対応する弱値が「-1」となることがある。そのとき偏光回転角を計算すると、open space での通常の回転角と逆になっている。すなわち、その経路の「弱値 = -1」は以前議論となった「光子の存在確率が -1」を意味するのではなく、「偏光回転効果が -1 倍で現れる経路」を意味するのである。これは本課題の期間内に実証実験にまで至った[論文(10)]。さらに、偏光回転のような可逆過程でなく「損失」のような不可逆過程にも理論を適用した。その結果「弱値が 1 となる経路に吸収体を置くと干渉計の動作は当然変わるが、それに加えて -1 を示す経路に同じ吸収率の物体を置くと、元に戻る」ことを明らかにした。つまり弱値 1 の経路に置かれた「散逸」を、弱値 -1 の経路に置いた「散逸」が、効果を undo する（打ち消す、無かったことにする）のである[論文(1)]。最後に三つ目であるが、弱値（モジュラー値も同様）の時間発展に関する理論である。弱値は一般に時間の関数であるが、時刻  $t$  の弱値がわかれば  $t + \Delta t$  の弱値が計算できるわけではない。あくまで初期条件から事後選択までの時間推移の全部の情報を使ってはじめて中間時刻  $t$  の弱値が計算される。その意味で弱値は因果的変化をしていない。しかしこの系を「適当に拡大した系の一部」と見なすと、その拡大された系（仮想または現実のどちらでもよい）の中では因果的変化をしているように記述できるという理論である[論文(3)]。

以上の三つの成果 4-1~4-3 とともに、従来の量子測定概念を発想段階から変えるもので、今後の大いなる応用が期待される。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 35 件)

(1) K. Yokota, N. Imoto, Negation of photon loss provided by negative weak value, Journal of Physics Communications, 2, 065013 (2018), 査読有, DOI: 10.1088/2399-6528/aacccb

- (2) T. Walker, K. Miyanishi, R. Ikuta, H. Takahashi, S. V. Kashanian, Y. Tsujimoto, K. Hayasaka, T. Yamamoto, N. Imoto, M. Keller, Long-Distance Single Photon Transmission from a Trapped Ion via Quantum Frequency Conversion, Phys. Rev. Lett., 120, pp. 203601, 2018, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevLett.120.203601
- (3) L. B. Ho, N. Imoto, Quantum weak and modular values in enlarged Hilbert spaces, Phys. Rev. A, 97, 012112, 2018, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.97.012112
- (4) Y. Tsujimoto, M. Tanaka, N. Iwasaki, R. Ikuta, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto, High-fidelity entanglement swapping and generation of three-qubit GHZ state using asynchronous telecom photon pair sources, Scientific Reports 8, 1446 (2018), 査読有, DOI: 10.1038/s41598-018-19738-8
- (5) S. Miyajima, S. Miki, M. Yabuno, T. Yamashita, H. Terai, Timing discriminator based on single-flux-quantum circuit toward high time-resolved photon detection, Supercond. Sci. Technol.30(2017)12LT01, 査読有, DOI: 10.1088/1361-6668/aa926e
- (6) Y. Tsujimoto, Y. Sugiura, M. Tanaka, R. Ikuta, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, N. Imoto, High visibility Hong-Ou-Mandel interference via a time-resolved coincidence measurement, Optics Express, 25, 11, 12069-12080 (2017), 査読有, DOI: 10.1364/oe.25.012069
- (7) R. Ikuta, S. Nozaki, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto, Experimental demonstration of robust entanglement distribution over reciprocal noisy channels assisted by a counter-propagating classical reference light, Scientific Reports, 7, 4819 (2017), 査読有, DOI: 10.1038/s41598-017-05008-6
- (8) R. Ikuta, T. Kobayashi, K. Matsuki, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, T. Yamamoto, M. Koashi, T. Mukai, N. Imoto, Heralded single excitation of atomic ensemble via solid-state-based telecom photon detection, Optica, 3, Issue 11, 1279-1284 (2016), 査読有, DOI:10.1364/optica.3.001279
- (9) L. B. Ho, N. Imoto, Generalized modular-value-based scheme and its generalized modular value, Phys. Rev. A 95, 032135(2017), 査読有, DOI:10.1103/physreva.95.032135
- (10) K. Yokota and N. Imoto, When a negative weak value  $-1$  plays the counterpart of a probability 1, NewJ.Phys.18(2016)123002, 査読有, DOI:10.1088/1367-2630/18/12/123002
- (11) T. Yamashita, K. Waki, S. Miki, R. A. Kirkwood, R. H. Hadfield, H. Terai, Superconducting nanowire single-photon detectors with non-periodic dielectric multilayers, Scientific Reports, 6, 35240 (2016), 査読有, DOI: 10.1038/srep35240

〔学会発表〕(計 40件)

- (1) Nobuyuki Imoto, Quantum Information Processing - Similarities and Differences with Classical Information Processing -, 22nd Workshop on Elliptic Curve Cryptography (ECC 2018)
- (2) Nobuyuki Imoto, Quantum communication and fundamental quantum physics, CQT Colloquium, 2017, CQT, NUS, Singapore.
- (3) Nobuyuki Imoto, Frequency-domain single-photon/two-photon interferometry, Quantum Optics to Quantum Technologies, The Royal Society, London, 2017.
- (4) Nobuyuki Imoto, Frequency-qubit manipulation of photons, Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Technologies with atoms and photons (Quantum 2017) University of Torino, Italy, 2017.
- (5) Nobuyuki Imoto, Underlying technology in photonic quantum information processing, International Conference on Quantum Science and Application (ICQSA 2016), Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir, Turkey, 2016.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1件)

名称：光子検出装置

発明者：竹内尚輝, 三木茂人, 寺井弘高

権利者：竹内尚輝, 三木茂人, 寺井弘高

種類：特許

番号：特願 2019-037650

出願年：2019

国内外の別：国内

(1)研究分担者

研究分担者氏名：早坂 和弘

ローマ字氏名：HAYASAKA KAZUHIRO

所属研究機関名：国立研究開発法人情報通信研究機構

部局名：未来 ICT 研究所量子 ICT 先端開発センター

職名：研究マネージャー

研究者番号（8桁）：10359086

(2)研究分担者

研究分担者氏名：三木 茂人

ローマ字氏名：MIKI SHIGEHITO

所属研究機関名：国立研究開発法人情報通信研究機構

部局名：未来 ICT 研究所フロンティア創造総合研究室

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：30398424

(3)研究分担者

研究分担者氏名：山本 俊

ローマ字氏名：YAMAMOTO TAKASHI

所属研究機関名：大阪大学

部局名：基礎工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：10403130

(4)研究協力者

研究協力者氏名：生田 力三

ローマ字氏名：IKUTA RIKIZO

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。