

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 24日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21740294

研究課題名（和文） 量子コヒーレンスと量子観測の織りなす物理

研究課題名（英文） Quantum Coherence and Quantum Measurement

## 研究代表者

湯浅 一哉（YUASA KAZUYA）

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：90339721

研究成果の概要（和文）：量子と古典の違いを際立たせる様々な要素のうち「量子コヒーレンス」と「量子観測」に焦点を当て、両者が意外な関わりを持って紡ぐ興味深い現象や方法論を追究した。単に、量子コヒーレンスをいかに捉えるかにとどまらず、量子コヒーレンスがいかに発現するか、量子コヒーレンスをいかに制御するかといったところにまで量子観測が重要な役割を果たす。そんなテーマを通じて量子論の奥深い世界に迫るとともに、量子情報技術に貢献する知見を提供した。

研究成果の概要（英文）： Among various features that distinguish the quantum world from the classical world, we have focused on “quantum coherence” and “quantum measurement,” and have explored their interesting interplay. We have worked at a variety of subjects, where quantum measurements play nontrivial roles, not simply capturing quantum coherence, but playing a crucial role for the emergence of quantum coherence, or providing us with unique ways of controlling quantum coherence. Through such research, we have approached the intriguing nature of the quantum-mechanical world and developed unique methodologies useful for quantum-information technologies.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：量子論基礎、量子情報、量子観測、量子コヒーレンス、量子制御、量子推定

## 1. 研究開始当初の背景

ミクロのスケールで起こる特異的な現象を見事に説明する量子論は、日常的な感覚に基づく理解をはるかに超える自然観を我々に提示している。近年、実験技術の目覚ましい進歩にともなって、その基礎を検証する様々な実

験が可能になり、盛んに行われている。また、量子論ならではの現象、量子性を積極的に活用することで従来の情報処理の限界を超えようとする「量子情報」が大きな盛り上がりを見せ、精力的に研究が進められている。ここで特筆すべきは、そうした量子情報の新しいアイデアを創出し、実現しようとする努力に牽

引かれて、理論と実験の両面で研究が加速度的に進み、その結果、単に量子情報そのものの発展にとどまらず、量子論の基礎に対する理解もますます深まるという好循環が生まれている点にある。こうした情勢のもと、量子論の基礎的側面に迫り、量子情報技術に貢献する研究の意義、機運がますます高まっている。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、上記の背景のもと、量子論ならではの現象、概念を取り上げて量子論の本質に迫るとともに、量子情報をはじめとする「量子技術」のアイデアの創出、発展に貢献することを大きな目的として研究を展開した。特に、量子と古典の違いを際立たせる要素のうち、「量子コヒーレンス」と「量子観測」に焦点を当てた。一見、互いに何の関係もないように思われる両者が、意外な関わりを持って興味深い物理を紡ぐ。単に、(1) どうやって量子コヒーレンスを捉えるかにとどまらず、(2) 量子コヒーレンスがいかに発現するか、(3) 量子コヒーレンスをいかに制御するか、といった意外なところで量子観測が重要な役割を果たす。そんなテーマを通じて量子論の本質に迫るとともに、量子論ならではの独自の手法で量子情報技術に貢献することを目指した。

## 3. 研究の方法

「量子コヒーレンス」と「量子観測」が関わり合う様々なテーマに取り組んだ。大きく分類すると、次の3つを柱に研究を展開した。

(1) 「量子コヒーレンス」：近年、様々な系で実験的検証が可能になっている「多粒子干渉現象」、「多粒子相関」に関する話題や、ボース凝縮体や超伝導体などの「量子多体系」が示す高い干渉性など、「多粒子系の量子コヒーレンス」に関する話題に取り組んだ。多粒子相関をいかにとらえるかという話題とともに、量子多体系のコヒーレンスに量子観測が重要な役割を果たすという「観測による量子コヒーレンス」を追究した。

(2) 「量子系制御」：量子情報の様々なアイデアの実装に向けて、量子系を意のままに制御する手法の開発は、重要な課題の1つとなっている。我々は、量子観測が観測対象に引き起こしてしまう状態変化も、うまく利用すれば量子系を制御するのに使えるのではないか、という着想のもと、「観測による量子系制御」を追究した。特に、我々独自の「繰り返し観測による量子状態生成」の発展を図った。

(3) 「量子計測」：量子状態や相互作用定数などは、いわゆるオブザーバブルではないため、直接、観測することができず、観測可能量を

通じて推定することになる。この「量子推定」の問題に独自の視点から取り組んだ。特に、「エンタングルメント」など、量子論ならではの要素を利用することによって古典的計測精度限界を超える「量子計測」の話題に取り組んだ。

## 4. 研究成果

(1) 超伝導体から電界放出される電子ビームによる2粒子干渉実験を念頭に、超伝導体中のクーパー対相関をとらえる方法と条件を明らかにした。また、クーパー対の寄与はバンチング的な正の相関を示すことを明らかにした。こうして引き出されるクーパー対は、量子論の非局所性の検証に利用できるとともに、量子情報のリソースとしての可能性も秘めている。

(2) 2つの独立な超伝導体から放出される電子の2粒子干渉を議論し、正の相関に生じる干渉縞の起源が通常の2粒子干渉(HBT効果)とは異なって、クーパー対の“1粒子干渉”に他ならないことを明らかにした。これは、有名な2つの独立なボース凝縮体間の干渉現象のフェルミ粒子版と言える。

(3) フランソン干渉計を利用してクーパー電子対の2電子間相関長や重心運動のド・ブロイ波長を計測できることを示した。

(4) 「観測による量子コヒーレンス」の考え方に基づいて、2つの独立な有限温度のボース凝縮体間の干渉現象を解析し、対称性の自発的破れを仮定しないこの記述でもやはり「ボース凝縮」が干渉性に重要であることを明らかにした。

(5) 複数の独立なボース凝縮体の列による干渉を「観測による量子コヒーレンス」のアイデアに基づいて解析し、実験結果を説明できることを示した。

(6) 互いに直接相互作用しない2つの量子ビットに補助量子ビットを散乱させてエンタングルメントを生成する方法を検討した。この解析を通じて識別不可能性とエンタングルメントの関わりについての理解が深まるとともに、スピン自由度を伴う3次元デルタ関数型ポテンシャルの散乱問題を扱う繰り込み処方を構築した。

(7) 「量子-古典境界」の問題に取り組んだ。エンタングルメントをとらえることができる物理量(entanglement witness)と量子性をとらえることができる物理量(quantumness witness)の関係を追究し、前者は必ず後者でもあることを数学的に証明した。

(8) 量子状態の量子性(非可換性)を、干渉計を組み合わせてとらえる方法を提案した。

(9) 「観測による量子系制御」の一例として追究してきた「繰り返し観測による量子状態

生成」の独自の手法の発展に力を入れ、複数の成果を得た。主だったところでは、

① 従来、離散スペクトルを有する系に対してしか機能しなかったこの方法が、連続スペクトルを有する系でも機能し得ることを明らかにした。

② 従来、状態生成が確率的にしか成功しない方法だったこの枠組みを、確率1で機能する方法に昇格させる最初の例の構成に成功した。この成果を発表した論文は、掲載から1ヶ月半ほどの間のダウンロード数が、英国物理学会が出版する論文の中でトップ10%を記録した。

(10) 多重散乱の干渉効果を利用して書き込みと読み出しができる量子メモリを提案した。

(11) プローブ粒子の散乱データを通じてターゲットスピンの量子状態を推定する方法を考察し、空間自由度が推定精度の向上に有用であることを明らかにした。

(12) 前項の状態推定の問題において、入射状態にエンタングルメントを用いると、推定精度を向上できることを示した。

(13) 入出力応答からブラックボックス内の量子系を推定する「量子系推定」の一般論の構築に成功した。その成果は、Physical Review Letters 誌に掲載された。

## 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23件)

- ① A. De Pasquale, F. Ciccarello, K. Yuasa, and V. Giovannetti, *Selective Writing and Read-Out of a Register of Static Qubits*, New Journal of Physics **15** (2013) 043012 (14 pages) (査読有)  
DOI: 10.1088/1367-2630/15/4/043012
- ② K. Modi, R. Fazio, S. Pascazio, V. Vedral, and K. Yuasa, *Classical to Quantum in Large-Number Limit*, Philosophical Transactions of the Royal Society A **370** (2012) 4810-4820 (査読有)  
DOI: 10.1098/rsta.2011.0353
- ③ V. Giovannetti and K. Yuasa, *Probing Cooper Pairs with Franson Interferometry*, Physical Review B **86** (2012) 115429 (8 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.86.115429
- ④ H. Nakazato, T. Tanaka, K. Yuasa, G. Florio, and S. Pascazio, *Measurement Scheme for Purity Based on Two Two-Body Gates*, Physical Review A **85** (2012) 042316 (7 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.85.042316
- ⑤ 湯浅一哉, 「マクロ状態と量子測定」, 数理学 2012年3月号「量子を操る」(2012) 14-20 (査読無)
- ⑥ A. De Pasquale, P. Facchi, V. Giovannetti, and K. Yuasa, *Entanglement-Assisted Tomography of a Quantum Target*, Journal of Physics A **45** (2012) 105309 (19 pages) (査読有)  
DOI: 10.1088/1751-8113/45/10/105309
- ⑦ D. Burgarth and K. Yuasa, *Quantum System Identification*, Physical Review Letters **108** (2012) 080502 (5 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.080502
- ⑧ P. Facchi, S. Pascazio, V. Vedral, and K. Yuasa, *Quantumness and Entanglement Witnesses*, Journal of Physics A **45** (2012) 105302 (13 pages) (査読有)  
DOI: 10.1088/1751-8113/45/10/105302
- ⑨ R. Migliore, M. Scala, A. Napoli, K. Yuasa, H. Nakazato, and A. Messina, *Dissipative Effects on a Generation Scheme of a W State in an Array of Coupled Josephson Junctions*, Journal of Physics B **44** (2011) 075503 (9 pages) (査読有)  
DOI: 10.1088/0953-4075/44/7/075503
- ⑩ M. Iazzi and K. Yuasa, *Relevance of Bose-Einstein Condensation to the Interference of Two Independent Bose Gases*, Physical Review A **83** (2011) 033611 (13 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.83.033611
- ⑪ S. Ando, K. Yuasa, and M. Iazzi, *Interference of an Array of Independent Bose-Einstein Condensates with Fixed Number of Atoms*, International Journal of Quantum Information **9** (2011) 431-443 (査読有)  
DOI: 10.1142/S0219749911007393
- ⑫ B. Bellomo, G. Compagno, H. Nakazato, and K. Yuasa, *Distillation by Repeated Measurements: Continuous Spectrum Case*, Physical Review A **82** (2010) 060101(R) (4 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.82.060101
- ⑬ M. Iazzi and K. Yuasa, *Interference of Cooper Pairs Emitted from Independent Superconductors*, Physical Review B **81** (2010) 172501 (4 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.81.172501
- ⑭ K. Yuasa, *Extraction of an Entanglement by Repetition of the Resonant Transmission of an Ancilla Qubit*, Journal of Physics A **43** (2010) 095304 (14 pages) (査読有)

DOI: 10.1088/1751-8113/43/9/095304

- ⑮ Y. Omar, Y. Hida, H. Nakazato, and K. Yuasa, *Entanglement Generation by a Three-Dimensional Qubit Scattering: Concurrence vs. Path (In)Distinguishability*, in *Quantum Communication and Quantum Networking: First International Conference, QuantumComm 2009, Naples, Italy, October 2009*, edited by A. Sergienko, S. Pascazio, and P. Villoresi (Springer, Berlin, 2010), pp. 17-25 (査読有)  
DOI: 10.1007/978-3-642-11731-2\_2
- ⑯ K. Yuasa, D. Burgarth, V. Giovannetti, and H. Nakazato, *Efficient Generation of a Maximally Entangled State by Repeated On- and Off-Resonant Scattering of Ancilla Qubits*, *New Journal of Physics* **11** (2009) 123027 (19 pages) (査読有)  
DOI: 10.1088/1367-2630/11/12/123027
- ⑰ B. Bellomo, G. Compagno, H. Nakazato, and K. Yuasa, *Thwarted Dynamics by Partial Projective Measurements*, *Journal of Russian Laser Research* **30** (2009) 451-457 (査読有)  
DOI: 10.1007/s10946-009-9100-3
- ⑱ B. Bellomo, G. Compagno, H. Nakazato, and K. Yuasa, *Extraction of a Squeezed State in a Field Mode via Repeated Measurements on an Auxiliary Quantum Particle*, *Physical Review A* **80** (2009) 052113 (7 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.80.052113
- ⑲ A. De Pasquale, K. Yuasa, and H. Nakazato, *State Tomography of a Qubit through Scattering of a Probe Qubit*, *Physical Review A* **80** (2009) 052111 (6 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.80.052111
- ⑳ K. Yuasa, *Quantum Coherence of Electrons Field-Emitted from a Superconductor: Correlations and Entanglement*, *Physical Review B* **80** (2009) 104516 (19 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.80.104516
- ㉑ Y. Hida, H. Nakazato, K. Yuasa, and Y. Omar, *Entanglement Generation by Qubit Scattering in Three Dimensions*, *Physical Review A* **80** (2009) 012310 (18 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.80.012310
- ㉒ T. Otobe, H. Nakazato, K. Okano, K. Yuasa, and N. Hattori, *Analysis of Critical Short-Time Langevin Dynamics in Two-Dimensional  $\phi^4$  Theory on the Basis of a Higher-Order Algorithm*, *International Journal of Modern Physics C* **20** (2009) 735-745 (査読有)  
DOI: 10.1142/S0129183109013959
- ㉓ K. Yuasa, P. Facchi, R. Fazio, H. Nakazato, I. Ohba, S. Pascazio, and S. Tasaki, *Entangle-*

*ment of Electrons Field-Emitted from a Superconductor*, *Physical Review B* **79** (2009) 180503(R) (4 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.79.180503

[学会発表] (計 3 4 件)

- ① 寺澤翔一郎・湯浅一哉, 「環境の影響下での繰り返し観測による 2 量子ビット間エンタングルメント生成」, 第 27 回量子情報技術研究会 (QIT27) (慶応義塾大学) 2012. 11.
- ② 松岡耕司・湯浅一哉, 「同種粒子性を利用する量子計測と識別不可能性」, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (横浜国立大学) 2012. 9.
- ③ 稲葉弘一・湯浅一哉, 「マッハ・ツェンダー干渉計を用いて 2 量子ビット間に任意の初期状態から確率 1 でエンタングルメントを生成する方法」, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (横浜国立大学) 2012. 9.
- ④ K. Yuasa, *Estimation of a Parameter of a Quantum System by a Single Sequence of Repeated Measurements without State Initialization* (invited), VI Workshop ad Memoriam of Carlo Novero: Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with Atoms and Photons (Quantum 2012), Torino, Italy (May, 2012).
- ⑤ 稲葉弘一・湯浅一哉, 「マッハ・ツェンダー干渉計を用いて 2 量子ビット間に任意の初期状態から確率 1 でエンタングルメントを生成する方法」, 第 26 回量子情報技術研究会 (QIT26) (福井大学) 2012. 5.
- ⑥ 松岡耕司・湯浅一哉, 「同種粒子性を利用する量子計測と識別不可能性」, 第 26 回量子情報技術研究会 (QIT26) (福井大学) 2012. 5.
- ⑦ 奥出淳也・湯浅一哉, 「複数の同種粒子の散乱によるポテンシャル強度の推定」, 日本物理学会第 67 回年次大会 (関西学院大学) 2012. 3.
- ⑧ 安藤慧・湯浅一哉, 「エルゴード写像による量子パラメータ推定」, 日本物理学会第 67 回年次大会 (関西学院大学) 2012. 3.
- ⑨ K. Yuasa, *Quantum Ergodic Channels and Generation of Quantum States* (invited), Research in Optical Sciences “Quantum Information and Measurement (QIM)” (2012 OSA Optics and Photonics Congress), Berlin, Germany (March, 2012).
- ⑩ 湯浅一哉, 「観測による量子コヒーレンス」 (invited), 基礎物理セミナー合宿 (箱根) 2011. 12.
- ⑪ 湯浅一哉・V. Giovannetti・D. Burgarth・

- 中里弘道・奥出淳也・寺澤翔一郎, 「量子エルゴードチャンネルによる量子状態生成」, 第 25 回量子情報技術研究会(QIT25) (大阪大学) 2011. 11.
- ⑫ 安藤慧・湯浅一哉, 「端点 1 量子ビットに対する 1 試行の繰り返し観測データ列から 3 量子ビット鎖の相互作用定数を推定する方法」, 第 25 回量子情報技術研究会(QIT25) (大阪大学) 2011. 11.
- ⑬ K. Yuasa, *Generation of Quantum States by Quantum Ergodic Channels*, Italy-TWIns-Waseda 2011 “Quantum Technologies: Information, Communication and Computation,” Tokyo, Japan (November, 2011).
- ⑭ 寺澤翔一郎・湯浅一哉, 「観測とランダム操作の繰り返しによる 2 量子ビット間エンタングルメント生成」, 日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学) 2011. 9.
- ⑮ 山本大人・湯浅一哉, 「少数の原子からなる 2 つの独立なボース凝縮体間の干渉とその揺らぎ」, 日本物理学会 2011 年秋季大会 (富山大学) 2011. 9.
- ⑯ K. Yuasa, *Generation of Quantum States by Ergodic Maps*, 4<sup>th</sup> International Conference on Quantum Information (ICQI), Ottawa, Canada (June, 2011).
- ⑰ K. Yuasa, *Generation of Quantum States by Ergodic Maps* (invited), Problemi Attuali di Fisica Teorica (17<sup>th</sup> ed.: 4<sup>th</sup> Italian Quantum Information Science Conference IQIS 2011), Vietri sul Mare, Italy (April, 2011).
- ⑱ 安藤慧・湯浅一哉, 「状態の初期化, 多数回試行の重ね焼きを必要としない 2 量子ビット間イジング相互作用定数の推定」, 第 23 回量子情報技術研究会(QIT23) (東京大学) 2010. 11.
- ⑲ 湯浅一哉・M. Iazzi, 「2 つの独立な超伝導体から放出されるクーパー対の干渉」, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学) 2010. 9.
- ⑳ 安藤慧・湯浅一哉・M. Iazzi, 「光学格子から解放されたボース凝縮体列の干渉とその揺らぎ」, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学) 2010. 9.
- ㉑ 奥出淳也・湯浅一哉, 「補助系に対する観測とフィードバックの繰り返しによる 2 量子ビット間エンタングルメント生成」, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学) 2010. 9.
- ㉒ K. Yuasa, D. Burgarth, V. Giovannetti, and H. Nakazato, *Driving Two Fixed Qubits to a Maximally Entangled State by Repeated On- and Off-Resonant Scattering of Ancilla Qubits*, 10<sup>th</sup> Asian Conference on Quantum Information Science (AQIS'10), Tokyo, Japan (August, 2010).
- ㉓ K. Yuasa, D. Burgarth, V. Giovannetti, and H. Nakazato, *Driving Two Fixed Qubits to a Maximally Entangled State by Repeated On- and Off-Resonant Scattering of Ancilla Qubits*, 17<sup>th</sup> Central European Workshop on Quantum Optics (CEWQO2010), St. Andrews, Scotland (June, 2010).
- ㉔ K. Yuasa, *Interference of Bose Gases and Bose-Einstein Condensation* (invited), V Workshop ad Memoriam of Carlo Novero: Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with Atoms and Photons (Quantum 2010: 3<sup>rd</sup> Italian Quantum Information Science Conference IQIS 2010), Torino, Italy (May, 2010).
- ㉕ 奥出淳也・湯浅一哉, 「補助系に対する観測とフィードバックの繰り返しによる 2 量子ビット間エンタングルメント生成」, 第 22 回量子情報技術研究会(QIT22) (大阪大学) 2010. 5.
- ㉖ 湯浅一哉・M. Iazzi, 「2 つの独立な理想ボース原子気体間の干渉パターンの揺らぎとボース凝縮」, 日本物理学会第 65 回年次大会 (岡山大学) 2010. 3.
- ㉗ K. Yuasa, *Interference of Cooper Pairs Emitted from Independent Superconductors*, Waseda Meeting “Quantum Technologies: Information and Communication,” Tokyo, Japan (December, 2009).
- ㉘ 湯浅一哉・中里弘道・V. Giovannetti・D. Burgarth, 「媒介系の共鳴散乱の繰り返しによる 2 量子ビット間のエンタングルメント生成」, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本大学) 2009. 9.
- ㉙ B. Bellomo, G. Compagno, H. Nakazato, and K. Yuasa, *Extraction of a Squeezed State in a Field Mode via Repeated Measurements on an Auxiliary Quantum Particle*, 11<sup>th</sup> International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations, Olomouc, Czech Republic (June, 2009).
- ㉚ K. Yuasa and M. Iazzi, *Typicality of Interference Patterns between Independent Bose Gases*, 16<sup>th</sup> Central European Workshop on Quantum Optics (CEWQO2009), Turku, Finland (May, 2009).
- ㉛ 小笠原敦・中里弘道・湯浅一哉, 「2 次元散乱による 2 量子ビットエンタングルメント生成」, 第 20 回量子情報技術研究会(QIT20) (広島大学) 2009. 5.
- ㉜ M. Iazzi, K. Yuasa, and R. Fazio, *Density Correlations and Interference of Independent*

*Bose Gases*, Conference on Research Frontiers in Ultra-Cold Atoms, Trieste, Italy (May, 2009).

- ③③ A. De Pasquale, K. Yuasa, and H. Nakazato, *State Tomography of Qubits through Scattering of a Probe Qubit*, QUROPE09 International School “Quantum Information and Many-Body Systems,” Cortona, Italy (May, 2009).
- ③④ K. Yuasa, *Entanglement Generation by Scattering an Ancillary Qubit in 3D*, *Problemi Attuali di Fisica Teorica* (15<sup>th</sup> ed.), Vietri sul Mare, Italy (April, 2009).

[その他]

ホームページ等

<http://www.f.waseda.jp/yuasa/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

湯浅 一哉 (YUASA KAZUYA)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：90339721

### (4) 研究協力者

中里 弘道 (NAKAZATO HIROMICHI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00180266

BURGARTH DANIEL

Aberystwyth University (英国)・数学物理学  
科・講師

GIOVANNETTI VITTORIO

Scuola Normale Superiore, Pisa (イタリア)  
)・物理学科・准教授

PASCAZIO SAVERIO

University of Bari (イタリア)・物理学科・  
准教授