

令和元年6月7日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05492

研究課題名（和文）量子トンネル効果中の測定理論の構築

研究課題名（英文）Construction of Quantum Measurement Theory through Quantum Tunneling

研究代表者

鹿野 豊（Shikano, Yutaka）

慶應義塾大学・理工学研究科（矢上）・特任准教授

研究者番号：80634691

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：量子状態推定と弱測定の関係性を定量化し、量子トンネル効果の測定理論の構築に向けた足がかりとなる結果を得た。また、励起子・ポラリトン凝縮体に関して、凝縮体がボース・アインシュタイン凝縮体であるかを議論するために強励起状態の影響を考えた結果を得た。更には、量子トンネル効果に端を発した研究成果を飛躍させ、量子基礎理論における同一粒子性の問題を検証する理論を提唱した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義は、量子トンネル効果と呼ばれている量子力学特有の現象における理論的解釈を深める結果に繋がり、量子現象を実験するという観点から、理論的解釈の妥当性を実験的に検証出来るためのスキームを提示することが出来る。量子トンネル効果がなければ、化学反応プロセスや星形成、宇宙生成に関してまで実験的な検証可能性まで含めた理論体系を構築することが出来ないと考えており、広範囲な科学分野に応用可能であると考えている。

研究成果の概要（英文）：We strikingly pointed out the relationship between quantum state tomography and the weak measurement and proposed the experimental protocol and showed its advantage. Furthermore, on the exciton-polariton condensation in the micro cavity system, we studied the high density regime to check the evidence of the Bose-Einstein condensation even in the nonequilibrium situation. Finally, by the generalization of the previous quantum tunneling effect experiment, we pointed out the experimental verifiable protocol to reveal the properties on the identical particles.

研究分野：量子基礎論

キーワード：量子測定理論 量子トンネル効果 同一粒子 量子測定 励起子・ポラリトン凝縮 非平衡凝縮体

1. 研究開始当初の背景

量子技術の目覚ましい発展により量子力学の基礎について深い理解が得られるようになった。特に、量子状態に対しては、量子状態推定のような方法論が確立しつつある現状にある。その根幹をなすのが量子測定である。しかし、このような状況下においても、量子力学特有の現象である量子トンネル効果に関する基礎的な知見は得られていない。というのも、量子トンネル効果中の量子現象をそもそも現在の量子測定の枠組みで記述することが出来ないからである。なので、おそらくどんな量子力学の教科書に書いてあると思われる量子トンネル効果中の波動関数は、計算することは出来ても未だにその波動関数を測定し、波動関数を推定結果として再構築することは出来ていない。しかし、「そもそもこのような測定は可能なのであろうか？」ということが疑問になる。

研究代表者は大阪大学の占部研究室と協働して、線形パウルトラップを用いてカルシウムイオンを捕捉し、擬似的に2重スリットと同じ状況を作り出し、世界で初めてイオン集団のマイクロ運動に対する振動基底状態に対して空間的干渉を初めて作り出すことに成功し、マイクロメートルサイズでの量子トンネル効果を実現させ、量子トンネル効果中においてもアハラノフ・ボーム効果が成り立つということを実験により明らかにすることが出来た[A. Noguchi, Y. Shikano, K. Toyoda, and S. Urabe, *Nature Communications* 5, 3868 (2014)]. つまり、量子トンネル効果中の量子状態の変化を量子干渉のテクニックを使い、間接的に測定出来たことにはなる。しかし、これらの実験系は全体に磁場がかかっており、ローレンツ力の効果を計算することが必要であるが、トンネル粒子の速度というものを定義することが出来ないため、計算することが出来ない。また、WKB 近似やトンネル確率から計算される平均トンネル時間を用いた速度の定義を用いて計算した結果が異なる結果となり、量子トンネル効果中の量子ダイナミクスを測定により明らかにしようという動機に至った。

2. 研究の目的

本研究計画は量子トンネル効果中の測定理論を確立し、量子状態推定の方法およびそれらの実験的実装方法を理論的に提案することを目標としている。概念的に親和性の高い「弱測定」をトンネル粒子の測定に適用させようとするものである。そして、その物理的意味やこれまでの理論体系との関係性に関して議論し、弱測定の測定結果である「弱値」を用いた記述により量子トンネル効果でも適用可能な測定理論を確立し、実際に測定理論を構築するのに具体的な物理系で解析することが必須であると考えている。

3. 研究の方法

我々は量子トンネル効果中の測定理論を確立し、量子状態推定の方法およびそれらの実験的実装方法を理論的に提案する。

概念的に親和性の高い「弱測定」をトンネル粒子の測定に適用させようとするもの。そして、その物理的意味やこれまでの理論体系との関係性に関して議論し、弱測定の測定結果である「弱値」を用いた記述により量子トンネル効果でも適用可能な測定理論を確立する。

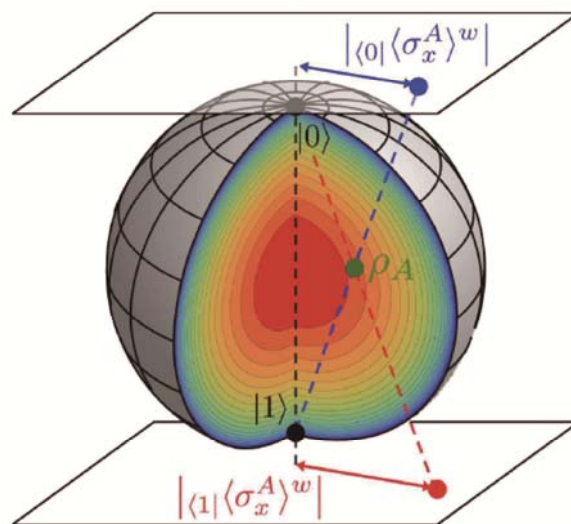
また、実際に測定理論を構築するのに具体的な物理系で解析することが必須であると考えている。そこで、研究代表者はこれまで研究を行ってきた微小半導体共振器中の励起子・ポラリトン凝縮体の自発的に発光する性質を用いるとトンネル効果の実証しやすい物理系

であると考えられるため、その実装提案までを理論的に行う。

4. 研究成果

弱測定理論における量子トンネル効果を導入する前の量子情報理論との対応関係の議論を行った。量子状態推定の観点において推定精度の観点ではこれまで議論はされてきたものの、最適な量子推定を実装するためには技術的な困難さが立ちかどっていた。そこで、本年度の研究により、量子状態推定のスキームに対して弱測定を応用した際の利点について議論を行い、その考察を行った（下図参照）[M. Tukiainen, H. Kobayashi, Y. Shikano, Phys. Rev. A 95, 52301 (2017).]。この継続プロジェクトとしての論文を現在準備しており、論文の大枠に関しては書き上げている。現在はその推敲作業中であり、得られた知見は弱測定の本質のみならず、実験しやすさのような尺度が導入できる可能性を示唆するものとなっている。しかし、本研究期間では議論が収集しておらず、結果として纏めることの出来る段階ではないと判断する。

2年度目で研究計画の見直しを行い、予定では最終年度に行う予定であった半導体微小共振器中の励起子・ポラリトン凝縮体に関する研究を前倒しで行った。ただし、現状のサンプルの開発状況および実験手法を考慮に入れると時間変化まで観測することは難しいと考えられるが、本物理系が量子トンネル効果を調べる上で至的な系であるということを確認するための研究を行った。ポラリトンには自発発光する特徴があるため、発光した光子と共振器中のポ



ラリトン凝縮体の状態との関係を測定理論の枠組みの中で対応づけることが出来るという予想であった。しかし、励起子・ポラリトン凝縮体のコヒーレンスに関して強励起領域での現象を調べてみると、これまでには考えられなかった負の分散関係を得ることに成功した。未だ理論的には解明できていない部分もあるのだが、励起子・ポラリトンが原子や分子の凝縮体とは異なり、自発発光する性質を帯びているために、負の分散関係を得られたものであると定性的には理解出来る。だが、研究代表者が想定していたコヒーレンスに対する1対1関係を得ることは現段階では難しそうであるということを確認した。しかし、この検討結果は他の準粒子物理系における議論のもととなり、マグノン系における理論の発展へと寄与することが出来た。

また、量子トンネル効果を用いた測定理論に関して、本研究提案のもととなった論文[A. Noguchi, Y. Shikano, K. Toyoda, and S. Urabe, Nature Communications 5, 3868 (2014)]を拡張し、トンネル効果を直接測定することはなかったが、この系でしか捉えられない量子基礎理論の拡張に関して理論的な提案をすることが出来た。この点に関しては、2019年3月にボストンで行われたアメリカ物理学会で発表し、今後、具体的な物理系を検討し、実験家と一緒に議論することとなった。

弱測定理論と量子トンネル効果に関する議論に関しても、その提案者であるアハロノフ

博士と議論することとなり、2次元のシンプルな量子系において量子トンネル効果中の測定理論においてゲージに対して不思議な性質があるということを読み明かすことが出来た。しかし、この理論を完全に議論しきっている訳ではないので、更なる議論が必要であることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

- 1) M. Tukiainen, H. Kobayashi, Y. Shikano, Phys. Rev. A 95, 52301 (2017, 査読有).
- 2) F. Matsuoka, A. Tomita, and Y. Shikano, Quantum Stud.: Math. Found. 4, 159 – 169 (2017, 査読有).
- 3) Y. Shikano, AIP Conf. Proc. 1871, 020001 (2017, 査読無).
- 4) T. Horikiri, M. Yamaguchi, K. Kamide, Y. Matsuo, T. Byrnes, N. Ishida, A. Löffler, S. Höfling, Y. Shikano, T. Ogawa, A. Forchel, and Y. Yamamoto, Sci. Rep. 6, 25655 (2016, 査読有).

〔学会発表〕 (計 20 件)

- 1) 鹿野 豊, 第4回光渦討論会 at 名古屋大学, 18 March 2019, "弱測定中の光渦".
- 2) 池田 智則, 伊藤 飛鳥, 身内 健太郎, 早田 次郎, 鹿野 豊, Dany Lachance-Quirion, 第74回日本物理学会年次大会 at 九州大学伊都キャンパス, 14 March 2019, "マグノンを用いたアクシオンダークマター探索".
- 3) 鹿野 豊, 弱値・弱測定の新展開 at 高エネルギー加速器研究機構, 11 March 2019, "弱値のイメージング科学への応用可能性" (Video Conference). (招待講演)
- 4) Yutaka Shikano, APS March Meeting 2019 at Boston Convention Center, 8 March 2019, "Three-Particles Aharonov-Bohm Effect".
- 5) 鹿野 豊, RIBF 若手放談会: エキゾチック核物理の将来 at 理研神戸・融合連携イノベーション推進棟, 18 February 2019, "ABC of Weak Measurement". (招待講演)
- 6) 池田 智法, 身内 賢太郎, 伊藤 飛鳥, 早田 次郎, 鹿野 豊, 日本物理学会 2018 年秋季大会 at 信州大学 (松本キャンパス), 17 September 2018, "マグノン検出装置を用いたアクシオン探索実験".
- 7) 鹿野 豊, 第8回光科学異分野横断萌芽研究会 at 国民宿舎 箱根太陽山荘, 21 August 2018, "伝搬に伴う光渦強度分布の回転による Gouy 位相の可視化".
- 8) 鹿野 豊, 慶應義塾大学 日吉物理学教室コロキウム, 26 July 2018, "Control of Optical Propagation Distance by Post-selection".
- 9) Yutaka Shikano, 7th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2018) at Kolymbari, Crete, Greece, 10 July 2018, "Geometric Phase with Decoherence". (招待講演)
- 10) Yutaka Shikano, the University of Birmingham Gravitational Wave Group, 20 June 2018, "Dispersively coupled optomechanical system".
- 11) Yutaka Shikano, Towards Ultimate quantum theory (UQT) at Linnaeus University, Vaxjo, Sweden, 12 June 2018, "Quantum Dynamical Simulation

- by Quantum Walk". (招待講演)
- 12) Yutaka Shikano, Quantum Frontiers and Fundamentals (QFF2018): Experimental Studies and Theoretical Ramifications at Raman Research Institute, Bangalore, India, 30 April 2018, "Control of Optical Propagation Distance by Post-selection". (招待講演)
 - 13) Yutaka Shikano, International Conference on challenges in Quantum Information Science at National Institute for Informatics, Tokyo, Japan, 9 April 2018, "Dispersively coupled optomechanical system".
 - 14) 鹿野 豊, 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究「量子測定の物理と情報通信」第3回研究会 at 東北大学電気通信研究所, 7 March 2018, “重ね合わせラゲール・ガウスビームによる Gouy 位相の直接測定”. (招待講演)
 - 15) Yutaka Shikano, 30th year anniversary conference on AAV effect at Chapman University, Orange, CA, USA, 1 March 2018, “Control of Optical Propagation Distance by Post-selection”. (招待講演)
 - 16) 鹿野 豊, 弱値・弱測定、エンタングルメント、量子コヒーレンスの新地平 at 高エネルギー加速器研究機構, 21 February 2018, “量子状態の可視化”. (招待講演)
 - 17) Yutaka Shikano, International Workshop on Quantum Information, Quantum Computing and Quantum Control 2017 at Shanghai University, China, 21 December 2017, “Quasi-Squeezed Coherent State”. (招待講演)
 - 18) Yutaka Shikano, 3rd International Conference on Quantum Foundations at National Institute of Technology, Patna, India, 5 December 2017, “Quantum Phase through Quantum Tunneling”. (招待講演)
 - 19) 鹿野 豊, IMI Colloquium at 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所, 8 November 2017, “Visualizing Optical States”. (招待講演)
 - 20) Yutaka Shikano, Quantum Information and Quantum Simulation Day (QIQSD) at Universit´e Pierre et Marie Curie, France, 19 September 2017, “Visualizing Quantum States”. (招待講演)

〔図書〕 (計 1 件)

- 1) 鹿野 豊, 量子力学の固有値 (特集: 「固有値問題の探究」－ 数理科学とその枠を超えて－), 数理科学 670 (2019年4月号), 49 - 55 (2019).

〔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:

<http://quantum.sfc.keio.ac.jp/employees/yutaka-shikano/>