

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03466

研究課題名（和文）弱値などを利用した、量子基礎現象における量子系の挙動の研究

研究課題名（英文）Study of quantum dynamics on fundamental level with weak values

研究代表者

長谷川 祐司 (hasegawa, yuji)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：60282498

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題において、3つの中性子干渉計実験を行った。それらは、1）遅延選択オプション付きの量子チェシャ猫現象を確認する実験、2）3光路干渉計を用いた量子チェシャ猫の3つの自由度の分離実験、3）2つのスピン回転機に異なる周波数を適用して、マッハ・ツェンダータイプの干渉計における2光路の同時弱測定の実験である。さらに、量子測定における「隠れた誤差」の存在を示しさらに定量化を実現した実験を、中性子スピン偏極測定装置を用いて、行った。これらはすべてウィーン工科大学との共同研究の一環として行った。またこれらと並行して、北海道大学においては、原子波干渉実験を行うための環境整備を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子力学の提示する事象には、日常の世界観から理解しようとする、不可解な事柄が多数含まれている。本研究課題では、中性子干渉計と中性子偏極測定装置を用いて、未踏の基礎量子物理学現象にアプローチし、数々の新たな知見を得ることに成功した。その中には、『不思議の国のアリス』に出てくる笑いのみを残して消える「チェシャ猫」にちなんで名づけられた、量子チェシャ猫現象と呼ばれるものに関連する研究が含まれている。さらに、量子測定において、今まで認知されていなかった、測定誤差に関する研究においても成果が報告されている。これらの研究はウィーン工科大学との国際共同研究によって遂行された。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we performed mainly three experiments with perfect-crystal neutron interferometers. They are (i) an experiment to confirm the quantum Cheshire-cat phenomenon with a delayed-choice option, (ii) an experiment to separate three degrees of freedom of the quantum Cheshire-cat using a three-path neutron interferometer, and (iii) an experiment to carry out simultaneous path weak-measurements in a Mach-Zehnder-type interferometer by the use of two spin rotators operated with different frequencies. Furthermore, an experiment was performed using a neutron spin polarimeter to show the existence of hidden errors of a quantum measurement and realize further quantification. All these experiments were done as a part of the cooperative works with the Vienna University of Technology. In parallel, we developed a setup for conducting atom-interferometer experiments at the Hokkaido University.

研究分野：基礎量子物理学

キーワード：量子物理学 量子光学 中性子光学 物質波光学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 量子力学は、20 世紀後半には量子エレクトロニクスや半導体物理・電子工学という膨大な新技術体系を生み出した。さらに近年、重ね合わせ状態で記述される量子ビットをフルに活用した、量子コンピュータや量子暗号から発展した量子ネットワーク等の新技術の創始を目指して、研究が進められている。

(2) 研究代表者は、『不思議の国のアリス』に出てくる“猫のいない笑い“にちなんで名づけられた“量子チェシャ猫”という新しい量子現象を検証する実験を最近行った。この実験で、量子系のダイナミックスの検知が可能であることが示された。

(3) 本研究ではダイナミックスの検知を通して、量子基礎現象における新規の知見の獲得を目指す。

## 2. 研究の目的

本研究を通して以下のような量子力学の根本的な問題にアプローチする。

- 量子系の発展に関して何を知り得るのか、そしてその情報の精度には限度があるのか？
- 量子コンテクスチュアリティと量子系のダイナミックスの関係とは何か？
- 弱値・弱測定以外にも量子系のダイナミックスを検知する方法があるのか？
- 量子系のダイナミックスを検知した上で、デコヒーレンスはどのように作用するのか？
- 量子力学に内在する、量子測定の物理的な制限はあるのか？またそれは何なのか？

これらが量子基礎物理学の新現象の実演を通して基礎概念の解明にも寄与すると期待される。

## 3. 研究の方法

(1) 中性子光学的手法を用いた量子基礎物理学の研究は、研究代表者が長年ウィーン工科大学で研究成果を収めるのに用いた極めて独創的な研究方法である。ウィーン工科大学との共同研究は、世界最高中性子フラックスを供するラウエ・ランジュバン研究所(ILL)の研究用原子炉を利用できる利点があり、安定した測定環境の整備が進めば、収量のみならず精度においても世界一となる。本研究の背景にある、物質波を用いた量子基礎物理学の研究が研究代表者固有の研究スタンスであることは強調しすぎることはない。

(2) “量子系のダイナミックスの検知”に関する研究が弱測定により、近年、可能となってきたことに注目する。この分野は射影測定やPOVMで表される従来の量子測定を弱測定や不完全測定へと拡張し、従来型の測定では得られなかった“量子系の挙動”に関する情報を獲得する新手法の開発と位置付けられる。この観点からも量子チェシャ猫の実演実験の独創性は特筆すべきものがある。

(3) 本研究計画では、量子ダイナミックスの知見に関する効率的でかつ、よりよい評価方法につながる新技術の開拓を目指している。そこで得られた成果は中性子、原子を用いた光学実験のみならず、光子や核スピンや超伝導素子などさまざまな物理系にも適用しうる。本研究課題を通して“新しい量子メトロロジー”が構築できれば、量子コンピュータや量子暗号と並んで、急速に立ち上がりつつあり、そしてデバイスの開発にもつながる“個別新技術”という量子情報技術の第二波の新量子情報アプリケーションの基盤となりうる。

(4) 具体的には、第一に、遅延選択(delayed-choice experiment)を行った量子チェシャ猫観測実験の展開に取り掛かる。並行して、“擾乱”を極力抑えた光路の“マーキング”法を実現する。具体的には、時間依存した磁場を印加して、中性子の一部分のみ微小なエネルギーをコヒーレントに操作する。この擾乱を抑えた新しい光路マーキング法を確立できれば、例えば、量子チェシャ猫実験や多光路干渉実験において多数の弱測定を同時に遂行する可能性が開ける

(5) さらに、量子測定における不確定性関係に関する研究においては、すでに確立した中性子ポラリメータをフル活用してより広範な不確定性関係に関する実験を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) 遅延選択(delayed-choice experiment)を行った量子チェシャ猫観測実験

シリコン完全結晶干渉計を用いて、量子チェシャ猫を実現した。まずは、量子チェシャ猫自身(中性子)とその笑い(スピン)を空間的に分離することを確認した。ここで、量子チェシャ猫の光路割り当ての選択を、中性子が干渉計内に侵入したあとの時刻まで延期することによって分離した性質の居場所が変わるのかを観測することを試みた。実験結果によると、量子システムの挙動は、後の時点での選択によって影響を受けることが示された。このことは、同時に、量子力学的因果関係も暗示している。本実験の出版に向けた対応が行われている。

##### (2) 3光路における量子チェシャ猫実験

我々は世界に先駆けて「量子チェシャ猫の実証実験」に成功した。そしてこの実験は量子チェシャ猫減少に隠された未踏の量子現象に関しても議論を喚起した。そこでは、観測された結果を単なる量子干渉効果に帰そうとするような乱暴な議論も行われてきた。我々は量子チェシャ猫現象の本質は、ある量子状態に対して並行と反平行な状態が示す、摂動に対する一次の応答の違いによるものだと解釈してきた。このことをより明確に示すために、2光路ではなく3光路のマッハ・ツェンダ一型の干渉計を用いた実験(図2参照)を行った。スピンの操作による熱的な障害が、当初は、予想以上に大きく良好な結果にたどり着くのに時間を要した。最終的には、良好な結果が得られたので、出版に向けた対応を行っている。

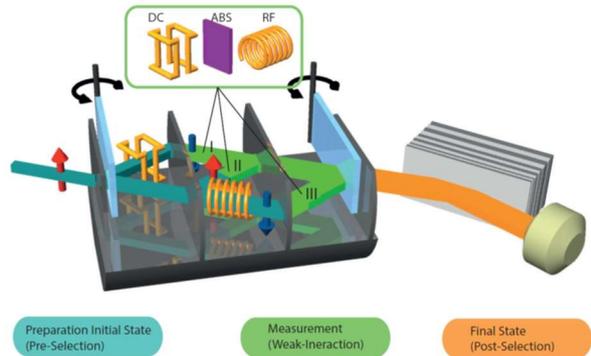


図2 3光路の量子チェシャ猫実証実験の配置

##### (3) 隠れた測定誤差に関する研究\*

我々はすでに量子測定における不確定性関係に関して実験的なアプローチを持って、新たな知見を得てきている。これらの研究の過程で明らかになったことの一つに、様々な量子測定において、一見すると小さいが実は大きな測定誤差が隠されている場合があることが理論的に予知された。本研究では、この「隠された測定誤差」を実験的に実測・実証をした。実験配置と主な実験結果を図3に示す。この結果はnpj Quantum Information誌上で発表され、中部大学、名古屋大学、北海道大学、ウィーン工科大学、インターネット総合研究所と共同で共同でプレス発表も行われた。

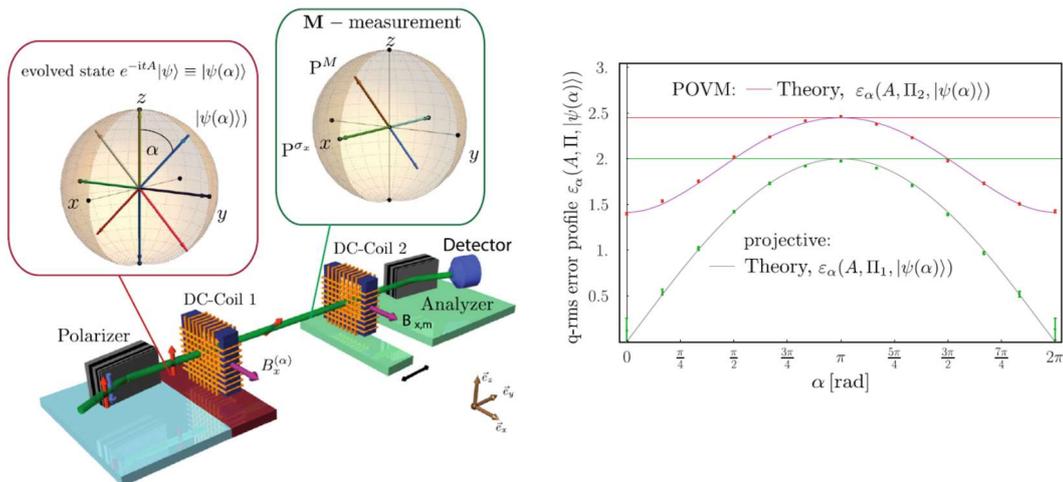


図3 実験配置(左図)と隠れた誤差の存在を確認する実験結果(右図)\*

\* Neutron optical test of completeness of quantum root-mean-square errors, Stephan Sponar, Armin Danner, Masanao Ozawa, and Yuji Hasegawa, npj Quantum Information 7,106 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sponar Stephan, Danner Armin, Obigane Kazuma, Hack Simon, Hasegawa Yuji	4. 巻 102
2. 論文標題 Experimental test of tight state-independent preparation uncertainty relations for qubits	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.102.042204	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Sponar Stephan, Danner Armin, Ozawa Masanao, Hasegawa Yuji	4. 巻 7
2. 論文標題 Neutron optical test of completeness of quantum root-mean-square errors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41534-021-00437-8	査読の有無 無
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0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Publications <a href="http://www.neutroninterferometry.com/home/publications">http://www.neutroninterferometry.com/home/publications</a>
---

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
研究分担者	筒井 泉 (Tsutsui Izumi) (10262106)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授 (82118)	

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
---------	---------