

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14636

研究課題名（和文）弱測定理論の精密分光学への応用可能性の探究

研究課題名（英文）Application of Weak Measurement to Precision Spectroscopy

研究代表者

鹿野 豊（Shikano, Yutaka）

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：80634691

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：量子測定理論の一つである弱測定理論に関して、精密分光学または精密測定科学の応用を視座においた研究を行ってきた。弱測定理論そのものの進展に関しては、理論的な定式化において線形光学との対応関係が見いだされ、弱測定理論の応用可能性を広げることが出来た。更に、線虫を用いたナノダイヤモンド量子センサーの研究において、量子測定理論の応用可能性を検討し、局所温度測定技術に対する進展が得られ、「局所温度生物学」の分野の創成に寄与する重要な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果に関しては、基本的に数学の理論体系の中で発展してきた量子測定理論を実験できるような形に実装することに対する理論的な基盤を構築できたという側面において、学術的な意義があると考えられる。その中で、量子センサーを用いた応用事例をモデル生物ではあるものの示すことが出来たことは近年の量子技術に対する社会的なニーズに応える意味でも一定度の社会的意義があったのではないかと考えている。

研究成果の概要（英文）：Weak measurement is recognized as one of the methods in quantum measurement theory. We studied this theory to be applied to the precision spectroscopy and precision metrology. We found the relationship between linear optics and weak measurement to broaden the applicational possibility of the weak measurement. Furthermore, we studied the nanodiamond quantum sensor to be applied to the thermotaxis of the model biology, *C. elegans* and obtained the insight to open a door to the local thermal biology.

研究分野：量子論の基礎

キーワード：量子測定 量子計測 線虫 量子センサー ナノダイヤモンド

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

量子測定理論はフォン・ノイマンにより問題が数学的に整備され、小澤正直らにより現在の間接量子測定理論の体系は整備され、量子情報科学の根幹を為している。量子測定により量子状態はどのように変化するかを記述することが出来るようになり、観測型量子計算の文脈においては重要な役割を果たしている。量子情報技術の観点からも量子測定理論の重要性は日に日に増してきている。しかし、量子情報科学以外の分野における量子測定理論の応用は皆無であった。

また、量子測定理論の中の一分野として認識されることになった「弱測定理論」は1988年に量子状態を「ほぼ壊さず」に時間対称な形式で量子測定理論を展開出来るとアハラノフらによって提案された。その測定結果である「弱値」が一般に複素数値を得ることから、量子論におけるパラドキシカルな現象を説明出来る道具として有用性が示され、実験的検証が困難と思われていた光のスピン・ホール効果の実験的実証が弱測定理論に内在している「弱値増幅」という観点を以てなされ、弱測定理論の応用可能性に大きな注目が集まり、研究が盛んになされた。その後の研究の発展により、「弱値増幅」は単一パラメータ推定の文脈においてはテクニカルノイズを入れたような文脈を考慮しない限り、有益ではないことが示され、弱測定理論の新しい応用分野の可能性を示唆する研究が始められてきている。研究代表者は、これまで「量子状態の可視化」という応用可能性を模索し、ラゲール・ガウス光を用いた弱測定理論を展開し、高知工科大学の小林弘和准教授と共同で偏光状態の可視化に成功した。研究開始当時は、これらの研究を進展させて、「弱値イメージング」という線形光学領域に弱測定理論の概念を応用した小さい研究領域を形成しつつある。しかし、この応用可能性は問題を単純化して考えられるため、線形光学領域の新しいアイデアを創発出来るものの、本質的には幾何光学計算を真面目に行うことで同様の結果を得ることが出来るため、その量子性を使っていないという欠点があった。

### 2. 研究の目的

これまでに関連性が明確には見いだされてこなかった「量子測定理論」と「分光学」を結びつけることで、初めて新規分光手法が提案できると考え、本研究では研究代表者がこれまで専門にしてきた「弱測定理論」と「分光学」の関連性を明確に示すことを目標とし、「弱測定理論」に対して新しい応用可能性を示唆することを目的としている。その手がかりとなるのは、弱値の形式がグリーン関数と対応していることから、量子測定理論の中でも「弱測定理論」を応用できる可能性が高いと考えている。また、本研究目標は、量子多体系における測定理論の確立に向けた一つの試みとも解釈することが出来、関連性を明確し、量子多体系において、何が測定出来て、何が測定出来ないのかを明確化する可能性を秘めている。

### 3. 研究の方法

#### 1) 弱測定理論の理論体系の強化

物質(または粒子)と光の相互作用を記述する学問として分光学が位置づけられるため、物質(または粒子)の量子状態を記述する方法論を確立しておく必要がある。研究代表者は研究開始時までの研究成果として、スピン1/2の系における1つの量子状態に対しては、ブロッホ球上に状態を割り振ることが出来、そのステレオ射影点が弱値に対応することを明確に示した。この概念を拡張させることで、量子状態の記述方法として、弱値が果たすべき役割を明確化することが出来る。具体的にはスピン1/2の系をN個考える量子多体系の状態記述方法として、どのような演算子の弱値を測定することが出来れば良いかを明確化する。その処方箋としては、2個の場合に示した研究代表者らの結果を一般化し、密度演算子を取り扱えるようにするために混合状態の記述方法に関しても検討を行う。

また、量子情報科学の分野で用いられている量子状態推定方法と解析的には難しいと考えられるため、数値的に比較をすることで、弱測定理論を用いる優位性に関しても検討を行う。

#### 2) 弱測定理論の応用可能性を展開するための量子センサーの開発

量子センサーは量子状態の環境に対する脆弱性を積極的に利用したセンサーのことであり、従来型のセンサーより感度が高いということが理論的に示され、様々な物理系において開発がなされてきた。しかし、本研究を開始する当時まで、その応用可能性を示した研究は皆無であったと言って過言ではない。そのため、研究代表者は当時、大阪市立大学の藤原正澄講師(現、岡山大学准教授)と共同研究を開始し、量子センサーとして、ナノダイヤモンド中の窒素格子欠陥から出る発光型センサーに焦点を絞り、応用先に関してもモデル生物系の温度測定に焦点を絞って共同研究を開始する。更には、量子センサーとして、東京大学先端科学技術研究センターの中村泰信教授らが開発した超伝導量子ビットを量子センサーとして用いた強磁性体の集団スピン波であるマグノンモードの観測実験を基に、今度はマグノンモードをセンサーとして用いることで、暗黒物質検出が出来るのではないかと考え、暗黒物質検出の専門家である神戸大学の身内賢太郎准教授らと共同研究を開始する。

### 4. 研究成果

#### 1) 弱値イメージング手法の発展

中国科学技術大学の研究グループと共同研究を開始し、研究代表者らが発展させてきた「弱値イメージング」の技術と機械学習の技法を組み合わせることにより、混合状態の量子状態測定に

においても精密に測定できるということを理論的に示し、実証を行った。報告書執筆時においては、論文が投稿中である。これにより、量子状態推定手法として、機械学習の手法を応用させることに成功したことになり、更には、量子測定理論の応用事例として、評価手法として機械学習を取り入れる可能性について議論を深めているところである。

#### 2-1) ナノダイヤモンド量子センサーのモデル生物系への応用

岡山大学の藤原正澄准教授らと共同し、ナノダイヤモンド量子センサーの開発に関する共同研究を開始した。モデル生物として、大阪公立大学の中台枝里子教授と共同研究の下で、線虫 (*C. elegans*) を対象とした。また、ナノダイヤモンド量子センサーの研究の主流は磁場計測であるが、線虫に対して磁場計測を行う生理学的意義がないと判断できるため、温度計測手法の確立を目指し、モデル生物が取り扱えるような技術開発に取り掛かった。更には、理論的なデータ解析手法として、キャリブレーション手法としてアラン分散を導入し、技術的なノイズ源等についても議論を行ってきた。研究代表者らは4点ODMR法と呼ばれている手法を採用し、線虫の薬剤投与下における非ふるえ熱産生を確認することに成功した。また、ヒートショック状態での線虫の体内温度測定にも成功しており、環境温度を直接測るだけでなく、局所領域における代謝測定の測定精度があり、更には毒性が低いと期待されるため、今後、生理学研究との融合により、発展性のある研究課題であることに発展させることが出来た。また、これらの一連の業績を基に、ナノダイヤモンド量子センサーを用いた量子センサーに関する依頼レビュー論文を執筆し、国際的なプレゼンス向上にも努めてきた。

#### 2-2) マグノン・超伝導量子ビットのハイブリッド量子システムの量子センサー応用

暗黒物質検出のメカニズムにおいては、弱測定理論と理論的な定式化の類似性から議論することを開始した。そこで、神戸大学の身内賢太郎准教授らと共同研究を開始することで、マグノン・超伝導量子ビットのハイブリッド量子システムにより、超伝導量子ビットを量子センサーとして利用した、マグノンの数モードの観測実験が東京大学先端科学技術研究センターの中村泰信教授の研究グループによって行われ、量子マグノニクスという研究分野が創出していた。これらの知見をそのまま利用し、暗黒物質候補の一つであるアキシオンに焦点を絞ると、アキシオンが電子と反応する過程があるという理論モデルが提唱されていることから、それを直接検出できるための量子センサーとしてマグノンの数モード検出の結果を見なすことが出来るということが分かった。そのため、東京大学先端科学技術研究センターの中村泰信教授の研究グループから測定の生データを提供してもらい、現在の測定系においてアキシオン検出感度を計算することに成功した。これらは、量子センサーを用いたテーブルトップ基礎物理学実験の成果として捉えることが出来、今後、益々、この分野の発展が望まれる結果となった。

#### 2-3) 原子核実験における量子測定理論応用の可能性

理化学研究所仁科加速器研究センターと共同研究を開始し、原子核実験のセットアップにおける量子測定理論の応用可能性、特に弱測定理論との関連性を議論してきた。結果として、ターゲットサンプルとして置かれていた物性評価を行うことで原子核ビームとの相互作用を解き明かすことが出来ないかということに挑戦し、実際の照射サンプルを用いて理論と実験の融合を始めた段階である。今後、弱測定理論を用いた原子核実験の具体的提案が出来るような理論体系を構築する手立てが整ったと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Masazumi Fujiwara, Simo Sun, Alexander Dohms, Yushi Nishimura, Ken Suto, Yuka Takezawa, Keisuke Oshimi, Li Zhao, Nikola Sadzak, Yumi Umehara, Yoshio Teki, Naoki Komatsu, Oliver Benson, Yutaka Shikano, Eriko Kage-Nakadai	4. 巻 6
2. 論文標題 Real-time nanodiamond thermometry probing in vivo thermogenic responses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaba9636
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aba9636	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 Masazumi Fujiwara, Alexander Dohms, Ken Suto, Yushi Nishimura, Keisuke Oshimi, Yoshio Teki, Kai Cai, Oliver Benson, and Yutaka Shikano	4. 巻 2
2. 論文標題 Real-time estimation of the optically detected magnetic resonance shift in diamond quantum thermometry toward biological applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 43415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043415	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 Yushi Nishimura, Keisuke Oshimi, Yumi Umehara, Yuka Kumon, Kazu Miyaji, Hiroshi Yukawa, Yutaka Shikano, Tsutomu Matsubara, Masazumi Fujiwara, Yoshinobu Baba, Yoshio Teki	4. 巻 11
2. 論文標題 Wide-field fluorescent nanodiamond spin measurements toward real-time large-area intracellular thermometry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-83285-y	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 -

1. 著者名 Yutaka Shikano	4. 巻 2286
2. 論文標題 Toward quantum phononics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 30001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0029700	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 -

[学会発表] 計22件(うち招待講演 6件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Masazumi Fujiwara, Simo Sun, Alexander Dohms, Yushi Nishimura, Ken Suto, Yuka Takezawa, Keisuke Oshimi, Li Zhao, Nikola Sadzak, Yumi Umehara, Yoshio Teki, Naoki Komatsu, Oliver Benson, Yutaka Shikano, and Eriko Kage-Nakadai
2. 発表標題 Real-time nanodiamond thermometry probing in vivo thermogenic responses
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原正澄, S. Sun, A. Dohms, 西村勇姿, 首藤健, 竹澤有華, 押味佳裕, L. Zhao, N. Sadzak, 梅原有美, 手木芳男, 小松直樹, O. Benson, 鹿野豊, 中台(鹿毛)枝里子
2. 発表標題 電子スピン共鳴融合型蛍光顕微鏡による線虫のin-vivo温度計測
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第76回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤原正澄, Simo Sun, Alexander Dohms, 西村勇姿, 首藤健, 竹澤有華, 押見佳裕, Li Zhao, Nikola Sadzak, 梅原有美, 手木芳男, 小松直樹, Oliver Benson, 鹿野豊, 中台枝里子
2. 発表標題 生体内リアルタイム蛍光ナノダイヤモンド温度計測
3. 学会等名 量子情報技術研究会(QIT)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤原正澄, Sun S, Dohms A, 西村勇姿, 首藤健, 竹澤有華, 押味佳裕, Zhao L, Sadzak N, 梅原有美, 手木芳男, 小松直樹, Benson O, 鹿野豊, 中台枝里子
2. 発表標題 生体内リアルタイム蛍光ナノダイヤモンド温度計測
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤原正澄, A. Dohms, 首藤 健, 西村 勇 姿, 押味 佳裕, 手木芳男, 蔡 凱, O. Benson, 鹿野 豊
2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心の電子スピン共鳴周波数が示す光強度依存性とセンシングにおける アーティファクト
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会(2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鹿野 豊
2. 発表標題 量子技術の要件
3. 学会等名 2020年度 第4回 光材料・応用技術研究会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鹿野 豊
2. 発表標題 ナノダイヤモンドによるリアルタイム局所温度センサーの原理と応用
3. 学会等名 フロンティア・プラズマ波動合同研究会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yutaka Shikano
2. 発表標題 Real-time in-vivo thermometry on worms by nitrogen-vacancy center in nanodiamond
3. 学会等名 OIST Mini-Symposium for Quantum Sensors of Magnetic and Inertial Forces(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原 正澄, Simo Sun, Alexander Dohms, 西村 勇姿, 首藤 健, 竹澤 有華, 押味 佳裕, Li Zhao, Nikola Sadzak, 梅原 有美, 手木 芳男, 小松 直樹, Oliver Benson, 鹿野 豊, 中台 枝里子
2. 発表標題 生体内リアルタイム蛍光ナノダイヤモンド温度計測
3. 学会等名 第43回量子情報技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masazumi Fujiwara, Simo Sun, Alexander Dohms, Yushi Nishimura, Ken Suto, Yuka Takezawa, Keisuke Oshimi, Li Zhao, Nikola Sadzak, Yumi Umehara, Yoshio Teki, Naoki Komatsu, Oliver Benson, Yutaka Shikano, Eriko Kage-Nakadai
2. 発表標題 Real-time Nano diamond thermometry probing in-vivo thermogenic responses
3. 学会等名 1st Conference on Zero and Ultra Low Field (ZULF) NMR (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鹿野 豊
2. 発表標題 バルク固体中のコヒーレントフォノンの計測および生成過程
3. 学会等名 フロンティア材料研究所学術賞講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鹿野 豊
2. 発表標題 我々は何が見えて、何を見て、何を見たいのか？
3. 学会等名 第 9 回光科学異分野横断萌芽研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤原 正澄, Dohms Alexander, 西村 勇姿, 手木 芳男, Benson Oliver, 鹿野 豊
2. 発表標題 蛍光ナノダイヤモンドを用いたリアルタイム温度計測
3. 学会等名 2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Fujiwara, S. Sun, A. Dohms, Y. Nishimura, K. Suto, Y. Takezawa, K. Oshimi, L. Zhao, N. Sadzak, Y. Umehara, Y. Teki, N. Komatsu, O. Benson, Y. Shikano, and E. Kage-Nakadai
2. 発表標題 Realttime nanodiamond thermometry probing in-vivo thermogenic responses
3. 学会等名 International Workshop on Quantum Sensing & Biophotonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Shikano
2. 発表標題 Quantum Thermometry by nitrogen-vacancy center in diamond
3. 学会等名 Mini-Workshop on Biological Sensing and its Application (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Shikano
2. 発表標題 Quantum Thermometry by nitrogen-vacancy center in diamond
3. 学会等名 21st Annual Greater Boston Area Statistical Mechanics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Yutaka Shikano
2. 発表標題 Multifunctional Quantum Nanodiamond Sensor
3. 学会等名 International conference on quantum Metrology and Sensing (IQuMS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Shikano
2. 発表標題 Axion Detection by Superconducting Qubit
3. 学会等名 The 12th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鹿野 豊
2. 発表標題 量子情報技術入門 ~量子計算・量子計測を例にして~
3. 学会等名 2019年度 第4回 光材料・応用技術研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masazumi Fujiwara, Simo Sun, Alexander Dohms, Yushi Nishimura, Ken Suto, Yuka Takezawa, Keisuke Oshimi, Li Zhao, Nikola Sadzak, Yumi Umehara, Yoshio Teki, Naoki Komatsu, Oliver Benson, Yutaka Shikano, and Eriko Kage-Nakadai
2. 発表標題 Real-time nanodiamond thermometry probing in-vivo thermogenic responses
3. 学会等名 Universal Principles in Biological Systems and their Evolution (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市川 温子, 鹿野 豊
2. 発表標題 マグノンを用いた宇宙背景ニュートリノ検出法の提案
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鹿野 豊
2. 発表標題 ナノダイヤモンドを用いた量子計測応用
3. 学会等名 第5回光渦討論会（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

慶應義塾大学量子コンピューティングセンター 業績 <a href="https://www2.quantum.keio.ac.jp/">https://www2.quantum.keio.ac.jp/</a> 群馬大学研究室HP <a href="https://sites.google.com/gunma-u.ac.jp/slab/">https://sites.google.com/gunma-u.ac.jp/slab/</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
研究協力者	藤原 正澄  (Fujiwara Masazumi)  (30540190)		

## 6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	加田 渉  (Kada Wataru)  (60589117)		
研究協力者	鈴木 真粧子  (Suzuki Masako)  (90598880)		
研究協力者	坂本 広太  (Sakamoto Kota)		

## 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3件

国際研究集会 International Workshop on Quantum Sensing & Biophotonics 2019	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 Mini-Workshop on Biological Sensing and its Application	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 9th Workshop of Quantum Simulation and Quantum Walks	開催年 2020年～2020年

## 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