

令和 6 年 4 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03621

研究課題名（和文）精密分光による新しい物理の探索に向けた基礎研究

研究課題名（英文）Fundamental aspects of new physics search in precision spectroscopy

研究代表者

田中 実 (Tanaka, Minoru)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：70273729

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、次世代周波数標準の基礎となる精密分光技術による素粒子の標準模型を越える新しい物理の探索を行った。具体的にはイッテルビウム原子・イオンの同位体シフトを用いた原子内で作用する未知の力の検出について研究を行った。代表者は、既存のYbイオンの2つの遷移データと共同研究者による中性Yb原子の1つの遷移データを用いて、代表者らが提案した一般化線形性解析による新物理探索を世界で初めて実現し、原子内で電子・中性子間に作用する力の強さに新たな制限を与えた。分担者はYbイオンの安定偶数同位体すべてを選択的にトラップすることに成功し、時計遷移の同位体シフトの測定に向けて、イオンの冷却を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な理由から素粒子標準模型を越える新しい物理があると考えられていて、これまでその探索が加速器実験で多岐に渡って行われてきた。しかし、これまでその兆候は見えていない。そこで加速器実験とは異なる方法である精密分光を用いて新しい物理の探索を行った。精密分光は次世代の周波数標準を目指して開発が急速に進んでいる技術である。本研究では、イッテルビウム原子・イオンの同位体シフトによって原子内で電子・中性子間に作用する新たな力の探索を行った。代表者らが提案した一般化線形性を初めて実験データに適用し、これまでとは異なる方法で新物理探索を行った。この解析は理論・実験の両面で世界をリードしている。

研究成果の概要（英文）：We searched for physics beyond the standard model of particle physics using the precision spectroscopy developed for the next-generation frequency standard. Specifically, we studied isotope shifts in the spectra of ytterbium atom and ion to detect a new force between the electron and the neutron. The PI (MT) analyzed the existing data of the Yb ion and the novel data of the Yb atom obtained by his collaborators to give a new bound on the new force. The generalized linearity, proposed by him and collaborators, was applied to actual data for the first time. The collaborator (KS) exclusively trapped the stable even isotopes of Yb ion and developed a cooling device to measure isotope shifts of clock transitions.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：同位体シフト キングの線形性 一般化線形性 イッテルビウム 単一イオントラップ

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準模型はもっとも成功した物理学における基本的模型であるが、宇宙バリオン数、暗黒物質、暗黒エネルギー等の標準模型では説明が難しい問題がある。そのため、標準模型を越える新しい物理が存在すると考えられている。しかし、LHC 等の高エネルギー実験で、期待される新しい物理の兆候は未だ観測されていない。また、より低エネルギーの現象にも注目が集っており、新物理探索の一つのフロンティアを形成している。残念ながら、ここでも新しい物理は発見されていない。このような現状から、新しい物理への手掛かりを得るための革新的方法が必要であると考えている。

一方、原子物理、量子エレクトロニクス分野に目を向けると、次世代の周波数標準、つまり現在のセシウム原子時計に替わるものとして光時計の開発が進んでいる。そこで達成される分光精度は、例えば、イッテルビウム(Yb)イオンの時計遷移について、単一イオントラップによる分光では相対精度で 18 桁、絶対精度で mHz という驚異的なものである。

2. 研究の目的

本研究では、精密分光を中心とした原子・分子・イオンを用いた量子エレクトロニクス技術による標準模型を越える新しい物理の発見を目指して、理論・実験の両面から基礎研究を行なう。原子・分子およびレーザーを用いた新たなニュートリノ物理の研究を進めてきた素粒子論分野の研究代表者と、単一イオントラップによる精密分光技術を持つ量子エレクトロニクス分野の研究分担者が、一体となって研究を進めるという独自のアプローチで、新たな高精度フロンティアと言うべき最先端の新物理探索法を創造し、その後の更なる展開の基礎となる具体的な成果により、新物理探索の限界を押し広げることを目的とする。

具体的には、原子の遷移スペクトルにおける同位体シフト(isotope shift, IS)の精密測定による原子内で作用する新たな相互作用の探索を主要な研究課題とする。

3. 研究の方法

(1) 同位体シフト(IS)による新物理探索原理: 例として、新しい相互作用ではないが、Z 粒子の電子・原子核間交換で生じる湯川ポテンシャルによる原子エネルギー準位のずれを考えると、Yb イオンの基底状態でおよそ 800Hz であり、現在可能な分光精度よりも大きい。しかし、これにより弱い相互作用を検出できる訳ではない。通常のコロン力を含む QED による準位計算の精度が、多体効果のためにこれに及ばないためである。この困難を克服するために IS を用いることが考えられている。原子核を点電荷とみなし、その反跳を無視すれば、同位体間のスペクトルの違いはない。従って、電子・中性子間に新しい相互作用があれば、IS の測定によりその効果を取り出すことができる。現実には、原子核は広がりを持ち、その質量も有限であるから、QED の範囲内でも IS は存在する。この通常の IS と新物理による IS を分離することが必要になるわけであるが、2 種類の遷移の IS の間に成り立つ「キングの線形性」を用いることが提案されている。質量数 A と A' の同位体ペアの IS を $1/(A \text{ の質量}) - 1/(A' \text{ の質量})$ で規格化したものを modified IS(mIS)と呼び、複数の同位体ペアについて、第 1 の遷移の mIS を横軸に、第 2 の遷移の mIS を縦軸にプロットすると、各同位体ペアを表す点が直線上に乗ることが知られており、これが「キングの線形性」である。通常の IS は、原子核の反跳に由来する mass shift(MS)と field shift(FS)と呼ばれる原子核の有限サイズ効果で表わされる。線形性が成り立つ理由は、MS が実験的に非常に良い精度で決まっている $1/(A \text{ の質量}) - 1/(A' \text{ の質量})$ に比例していることと、FS が質量数に依存する因子と電子状態で決まる遷移に依存する因子の積で書けることにある。(そのような近似の範囲で線形になると言うこともできる。) 未知の相互作用による IS が加わると、一般にはキングの線形性が成り立たなくなる。従って、2 種類の遷移について 3 つ以上の同位体ペアで IS を測定して、線形性の破れを見ることで新物理の情報を得ることができる。これが IS 非線形性による新物理探索の原理である。

(2) 理論的研究(代表者): 代表者らはこれまでの研究で Ca イオンおよび Yb イオンの IS データが存在する遷移を用いて、IS 非線形性の解析と新物理への制限について調べ、上の原理が機能することを実証してきた。本研究ではこれを拡張し新物理探索を進める。非線形性における相対論効果を明らかにするとともに、2 つの遷移を考えるキングの線形性を 3 つ以上の遷移に拡張した一般化線形性の方法について研究を進める。一般化線形性の方法による新物理と標準模型による非線形性の分離、同定方法について研究を行う。

(3) 実験的研究(分担者): Yb イオンの生成と捕捉は、Yb 原子に共鳴するレーザー光を照射しイオン化エネルギー以上に励起する共鳴光イオン化法で行う。分担者らは、この際に Yb 原子の IS を利用して、天然同位体混合物から同位体 170-176 の単一イオンを選択して捕捉することに既に成功している。IS 非線形性への感度を上げるために、存在比が 0.13%と小さいが最も軽い同位体 168 の選択捕捉の実現を目指す。IS 測定の高精度化しのために、GPS 時計に光周波数コムを

位相同期させ、ISを測定する。さらに、411nmの遷移の0(1)Hz精度でのIS測定のために、2台目の単一イオン分光装置をゼーマンシフトの小さい同位体 171 の時計遷移に固定し、この遷移との周波数差の測定によってGPS時計の不確かさに制限されない0(1)Hzレベルの測定を目指す。偶数同位体では1次のゼーマンシフトを取り除く必要がある。各準位は磁気副準位に分裂するが、絶対値が等しく符号が逆の磁気副準位のシフトは符号のみ反転するので、両者の平均をとり遷移周波数を決定する。

4. 研究成果

(1) 2018年度：代表者は、これまでの研究で用いていた非相対論的近似を越える相対論的解析手法の開発を行なった。CaイオンおよびYbイオンについて、Thomas-Fermiポテンシャル中の電子状態のエネルギー固有値と波動関数をディラック方程式を数値的に解くことにより求めた。また、QEDでのFSを支配する原子核近傍の波動関数を、ディラック方程式から解析的に求め、先行研究の結果と矛盾がないことを確かめた。分担者は、光イオン化を利用してYbイオンの安定同位体の選択的トラップの準備を進めた。過去に実績にある直径5mmのトラップを再立ち上げし、最大存在比の同位体174について、単一イオンのトラップと蛍光検出を確認した。また、時計遷移分光に用いる直径0.8mmのトラップ装置について、原子源であるオープンに充填する金属Ybを天然同位体混合物に交換し、超高真空中に復帰させた。こちらはまだ多数個ではあるが、光イオン化による 174Yb^+ のトラップに成功した。

(2) 2019年度：代表者は、FSを支配する原子核内の相対論的波動関数を数値的に求め、前年度の成果と合わせて、必要な全領域での波動関数を得た。これを用いてIS非線形性の相対論的評価を行ない、非相対論的解析と比較することにより、相対論効果について明らかにした。その結果、 $p^{1/2}$ 状態を含む遷移を用いると高次FSによる非線形性が大きくなり、新物理探索の重大な障害となり得ることを発見した。分担者は、天然存在比が0.13%と希少な同位体168のYbイオンの単一イオントラップ技術を確立した。さらに、ラム・ディッケ領域に閉じ込めるために、直径0.8mmのトラップ装置のオープンに天然同位体混合物を装填し、 168Yb イオンを含むすべての偶数同位体の単一イオンを、選択的にトラップすることに成功した。

(3) 2020年度：代表者は、IS非線形性を用いた新物理探索における相対論効果についての論文を出版した。さらに、Ybイオンにおける2種類の遷移と中性Yb原子の1つの遷移を組み合わせ、最新のIS実験データをもとに、一般化線形性についての解析を進めた。分担者は、同位体選択トラップ装置の補正電極短絡の問題を解決して、少数個のYbイオンのトラップを再現させた。さらに、単一イオンを十分冷却するために必要となる2方向目の冷却ビームを導入し、蛍光観測に成功した。2本の冷却ビームを用いて観測される蛍光強度を最大にすることで、過剰マイクロ運動を3次元とも最小化する補正電圧の組み合わせを見出した。もう1台の基準トラップ装置においても、2方向の冷却ビームの導入と、補正電圧のおよその設定まで再現させた。

(4) 2021年度：代表者は、Ybイオンにおける2つの遷移と中性Yb原子の1つの遷移を組み合わせ、最新のIS実験データを用いて世界で初めて一般化線形性解析を行い、標準模型の範囲内で2種類以上の高次効果がこれらのデータ中に存在することを発見した。さらにこれに基づき、新粒子への制限を得た。この研究は世界的に当該分野をリードするものである。分担者は、コロナ前に一度は達成できたラム・ディッケ領域閉じ込めの再現を目指した。ラム・ディッケ領域閉じ込めは完全には再現できていないものの、冷却レーザーのパワーを適切に設定することにより、キャリアが最強となる冷却状態まで再現性よく達成できるようになった。

(5) 2022年度以降：代表者は、前年度までの一般化線形性の研究をさらに発展させた。Ybイオンにおけ3つの遷移と中性Yb原子の2つの遷移を組み合わせ、最新のIS実験データを用いて一般化線形性解析による新物理探索を行い、観測されている非線形性の原因となるFSを同定する方法を考案した。代表者と分担者は国際会議 Fundamental Physics Using Atoms 2024 (FPUA2024)の組織委員を務め、その運営に貢献した。また、分担者はYbイオントラップ開発についてポスター発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Deng Xiaolong, Jaffredo Florentin, Tanaka Minoru	4. 巻 843
2. 論文標題 Rare leptonic processes induced by massless dark photon	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 138035 ~ 138035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2023.138035	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 Ono Koki, Saito Yugo, Ishiyama Taiki, Higomoto Toshiya, Takano Tetsushi, Takasu Yosuke, Yamamoto Yasuhiro, Tanaka Minoru, Takahashi Yoshiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Observation of Nonlinearity of Generalized King Plot in the Search for New Boson	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 021033 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.12.021033	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Tashiro Motomichi, Sasao Noboru, Tanaka Minoru	4. 巻 534
2. 論文標題 Generation of Twisted Gamma Rays via Two Photon Transition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Annalen der Physik	6. 最初と最後の頁 2200168 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/andp.202200168	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Yoshimi Akihiro, Tanaka Minoru, Yoshimura Motohiko	4. 巻 76
2. 論文標題 Quantum dots as a probe of fundamental physics: deviation from exponential decay law	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 113 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjd/s10053-022-00437-z	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 田中 実、小野 滉貴、山本 康裕、高橋 義朗	4. 巻 77
2. 論文標題 同位体シフトによる新物理探索 精密分光で迫る基本法則	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 355 ~ 360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.77.6_355	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Tanaka Minoru, Sasao Noboru	4. 巻 30
2. 論文標題 Alternative method of generating gamma rays with orbital angular momentum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics E	6. 最初と最後の頁 2150040 ~ 2150040
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218301321500403	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Tanaka Minoru, Yamamoto Yasuhiro	4. 巻 2020
2. 論文標題 Relativistic effects in the search for new intra-atomic force with isotope shifts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 103B02 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa121	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 Mitaki Masatoshi, Sugiyama Kazuhiko	4. 巻 60
2. 論文標題 Phase-locking of octave-spanning optical frequency comb based on Kerr-lens mode-locked Yb:KYW laser to reference laser	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 022003 ~ 022003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abd86c	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Tanaka Minoru, Tsumura Koji, Sasao Noboru, Uetake Satoshi, Yoshimura Motohiko	4. 巻 135
2. 論文標題 QED background against atomic neutrino process with initial spatial phase	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal Plus	6. 最初と最後の頁 283
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjp/s13360-020-00290-2	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Asaka Takehiko, Okui Hisashi, Tanaka Minoru, Yoshimura Motohiko	4. 巻 785
2. 論文標題 Tomography by neutrino pair beam	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 536 ~ 542
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.09.004	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Tanaka Minoru, Watanabe Ryouitaro	4. 巻 HQL2018
2. 論文標題 Theory on $\$B \to D^{(*)} \tau \nu\$$ anomaly	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.332.0009	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 Mitaki Masatoshi, Sugiyama Kazuhiko, Kitano Masao	4. 巻 57
2. 論文標題 Octave-spanning optical frequency comb based on a laser-diode pumped Kerr-lens mode-locked Yb:KYW laser for optical frequency measurement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 5150 ~ 5150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.57.005150	査読の有無 有
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23件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Kazuhiko Sugiyama
2. 発表標題 Development of second Yb+ ion trap for frequency comparison
3. 学会等名 Fundamental Physics Using Atoms 2024 (FPUA2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中 実
2. 発表標題 イッテルビウム同位体シフトデータの一般化線形性同時解析による新物理探索
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Minoru Tanaka
2. 発表標題 Isotope shift as a probe of new physics
3. 学会等名 The 8th Quantum Science symposium, ICCMSE 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minoru Tanaka
2. 発表標題 Generation of Twisted Gamma-Rays Using Accelerated Ions
3. 学会等名 Mie Meeting of Quantum Science 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 実, 鄧 曉龍, Florentin Jaffredo
2. 発表標題 質量のないダークフォトンのレプトンとの相互作用への制限
3. 学会等名 日本物理学会 2023 年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中 実
2. 発表標題 原子スペクトルの同位体シフトによる新物理探索
3. 学会等名 冷却分子・精密分光シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 実, 他
2. 発表標題 同位体シフトによる新物理探索における新展開
3. 学会等名 日本物理学会 2021 年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 実, Wang Jing, 宮本祐樹, 笹尾 登
2. 発表標題 量子コヒーレンスを用いたレート増幅と暗黒物質探索
3. 学会等名 日本物理学会 第 76 回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 趙花純, 杉山和彦, 今井康貴
2. 発表標題 RFトラップに閉じ込めた単一イオンのマイクロモーション最小化とラム・ディッケ領域への閉じ込め
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 実, 笹尾 登
2. 発表標題 加速された水素様重イオンからの高エネルギー光渦の放射
3. 学会等名 日本物理学会 2020 年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 実, 吉見彰洋, 吉村太彦
2. 発表標題 人工原子における電子間相互作用によるパリティの破れ
3. 学会等名 日本物理学会 第 76 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 湯川慎之介, 藤崎広豊, 杉山和彦
2. 発表標題 リニアRF トラップに捕捉されたBa ⁺ のレーザー冷却
3. 学会等名 日本物理学会 第 76 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 実
2. 発表標題 同位体シフトで探る素粒子の新しい相互作用
3. 学会等名 新テラスケール研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中 実
2. 発表標題 同位体シフトを用いた新物理探索における相対論効果
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中 実
2. 発表標題 重イオン加速器を用いた高エネルギー光渦の生成
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 Y. Ueno, K. Sugiyama, and Y. Imai
2. 発表標題 Isotope-selective loading of Yb ⁺ in a RF trap by photoionization for precise measurement of isotope shifts
3. 学会等名 The 12th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上野佑介, 杉山和彦, 今井康貴
2. 発表標題 同位体シフトの精密測定のための希少天然存在比168イッテルビウムイオンの選択的トラップ
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minoru Tanaka
2. 発表標題 Theory on $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ anomaly
3. 学会等名 XIV International Conference on Heavy Quarks and Leptons (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 実
2. 発表標題 初期空間位相を用いた原子ニュートリノ過程における 誘電体導波路によるQED背景過程の抑制
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 実
2. 発表標題 原子スペクトルの同位体シフトで探る素粒子の新しい相互作用
3. 学会等名 第二回琉球大学計算科学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Fujisaki, Y. Imai, and K. Sugiyama
2 . 発表標題 Spectroscopy of the clock transition and odd-isotope-selective loading of single Ba ⁺ ions towards realization of an optical frequency standard
3 . 学会等名 European Conference on Trapped Ions (ECTI2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Fujisaki, Y. Imai, and K. Sugiyama
2 . 発表標題 Measurement of deexcitation rate from the 2D5/2 state using optical frequency comb and laser cooling of odd-isotope Ba ⁺ ions
3 . 学会等名 The 11th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Imai, Y. Ueno, and K. Sugiyama
2 . 発表標題 Spectroscopy of the clock transitions of trapped Yb ⁺ towards search for temporal variation of the fine structure constant
3 . 学会等名 The 11th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Research http://www-het.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~tanaka/research.html

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	杉山 和彦 (Sugiyama Kazuhiko) (10335193)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	

	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	山本 康裕 (Yamamoto Yasuhiro)		

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1件

国際研究集会 Fundamental Physics Using Atoms 2024 (FPUA2024)	開催年 2024年～2024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			
その他の国・地域	國家理論科學研究中心物理組、 台湾			
ポーランド	National Centre for Nuclear Research			
韓国	Yonsei U			
イタリア	INFN, Pisa			