

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 8 月 20 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02895

研究課題名(和文) マヨラナニュートリノ質量分光実験設計に向けた基礎研究

研究課題名(英文) Design of Majorana neutrino mass spectroscopy experiments

研究代表者

吉村 太彦 (Yoshimura, Motohiko)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・教授

研究者番号：70108447

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：原子またはイオンの脱励起過程の一つである、ニュートリノ対放出は同時に光子が放出されるとき、光子の角度分布に特徴があり、これを利用してニュートリノの未知の性質、マヨラナ粒子かディラック粒子か、および質量絶対値の測定に利用できる。本研究では、量子電磁力学過程による雑音を消去する最良の方法として、ニュートリノ対放出が弱い相互作用による特性を使ってパリティ非保存量を測定する手段を定量的に理論計算を行った。測定量として固体中のランタノイド3価イオンのスピン偏極の発生光子方向の成分がパリティ非保存であり、発生磁場をナノガウス程度の精度で測定することがニュートリノ研究に有望であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノは宇宙初期から大量に存在し、宇宙の物質・反物質不均衡の謎を解く鍵であるにも拘わらず、その根幹になるマヨラナ性すら実験で証明されていない不思議な、依然として謎の多い基本粒子である。著者らは15年以上前から、将来のニュートリノ研究の中心は原子核を標的とした振動実験等ではなく、原子・分子・イオンが最重要である、ことを指摘し、実験原理の研究を遂行してきた。ようやく必要なイオン標的数を確保したうえで物性的手法で測定する方法を提案することができた。この方法を実証することにより、宇宙背景ニュートリノの測定も視野に入り、宇宙開闢1秒後に迫れる筋道を得たことにより、学術をこえた社会的意義に到達した。

研究成果の概要(英文)：Magnetization generated at radiative neutrino pair emission was found to be the best experimental method to explore still unknown neutrino property and quantity, namely determination of neutrino mass type, Majorana or Dirac type, and absolute masses of three neutrinos. Atomic de-excitation from laser-excited lanthanoid ions doped in host crystals gives a favorable situation in terms of angular distribution shape and magnitude of generated magnetic field. Detailed study was carried out for trivalent Er ion doped in host crystals such as YLF. A new calculation method beyond the infinite size limit of target system has been developed with success, yielding quantitative numerical results. In order to achieve measurable rates, one needs a high degree of coherence within participating ions, which was confirmed by detailed numerical study based on four-level optical Bloch equation.

研究分野：素粒子物理

キーワード：マヨラナ粒子 ニュートリノ質量絶対値 ランタノイドイオン SQUID パリティ非保存 CP対称性の破れ 物質・反物質不均衡

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

我が国を中心とするニュートリノ振動実験は、ニュートリノに質量があること、相互作用には一定質量の3つの状態が線形結合で混合していることを明らかにした。この成果は梶田隆章氏のノーベル賞受賞につながる歴史的快挙を生んだ。しかし、振動実験で測定できる物理量には厳しい制約がある。その大きな制約が、ニュートリノ質量の絶対値測定が不可能であり、質量2乗差のみ測定対象となること、ニュートリノの質量タイプの2つの可能性、マヨラナ粒子かディラック粒子か、を決定できないこと、である。これら2つに対して、原子核のベータ崩壊とニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊が測定方法となるが、これまでの実験では、現実的な実験目標をはるかに下回るレベルで測定限界が示されたのみである。これらの限界は原子核変換による解放エネルギーが数百万電子ボルトと大きく、想定される50ミリ電子ボルトの小さなニュートリノ質量への感度が低いことによる。

代表者は既に本計画に先立つ研究によって、原子核に代わって原子・分子・イオンが有力な標的となることを指摘し、数々の実験原理の提案を行ってきた。

代表者の所属する岡山大学の研究グループは原子物理の実験手段である、レーザー作成技術に長けており、原子物理、原子核物理、高エネルギー物理、化学の実験物理家を擁し、将来、原子を利用するニュートリノ物理の実験に取り組む予定である。これらの実験家と理論家である代表者とのコミュニケーションが実験原理の研究に理想的かつ必須の環境である。

2. 研究の目的

本計画の代表者は10数年前から、原子核に代わって原子・分子・イオンの脱励起過程により解放される電子ボルト程度のエネルギーが光子とニュートリノ対に共有される事象に注目して、ニュートリノの性質を解明する研究に従事してきた。しかし、単純な解放エネルギー差が小さいだけでは起こる事象の確率ははるかに小さくなるので、何らかの事象増幅機構が必要である。代表者らはレーザー光による励起で原子等の間に位相整合（コヒーランス）を起こし、事象確率が位相整合した原子数だけ増幅することを理論的に解明した。また、岡山大学の実験室で量子電磁力学の2光子脱励起過程で通常ならきわめて微弱な信号を18桁増幅することに成功した。この増幅機構を利用してニュートリノの謎を解明するのが最大の目標であるが、実験原理の確立に理論計算が必要になる。どんな標的が最良か、どのような測定量が未知のニュートリノ質量に最適か、を明らかにするのが研究目的である。

具体的な研究対象として、発生光子の測定量からニュートリノ質量、マヨラナかディラックかの識別を行う実験原理を解明した。標的原子への要求として固体環境に近い原子数が必要となるので、以下の標的に特化して、具体的な実験提案に向けた研究を進めた：(1) フラールエンに内包した金などの原子、(2) 透明誘電体中にドープしたランタノイドイオン。さらに、(3) ニュートリノ対発生が電子スピントリフリップではなくダイポール遷移によりおこる脱励起過程、(4) photonic crystal wave guide による QED 雑音の低減、などの理論研究を先導した。

3. 研究の方法

将来の本格実験を視野に実験研究者と共同研究を行うことがきわめて重要であり、所属する岡山大学、わが国内外の理論・実験研究者と共同の研究を遂行してきた。研究対象(1)に関しては、所属大学、東工大、理研、近畿大学の理論・実験研究者、(2)に関しては所属大学の実験研究者、(3)では所属大学の実験研究者、東工大、東洋大学、スウェーデンマラルメ大学、の理論研究者、(4)は大阪大学と九州大学の理論研究者と岡山大学の実験研究者、との共同を行った。また、(2)への着想はイタリアパドヴァ大学の実験研究者からの触発によるところが大きく、パドヴァと岡山大学でミニワークショップを3回ほど行った。

また、原子を利用した基礎物理の研究全般に関して、沖縄を含む全国の大学でほぼ毎年国際会議を組織委員として開催してきた。

4. 研究成果

以下の報告は末尾の参考資料にその詳細を記述する。

研究の目的に掲げた項目に従い、記述を進める。

(1) フラールエンに内包された金原子はフラールエンによる吸収を被らないレーザー波長で励起可能であることを理論的に確認した。その成果を実験で示す予定であったが、コロナ禍により共同研究が中断されて、研究成果をとりまとめるに至っていない。しかし、日本物理学会の年会などで3回ほど共同研究者から中間結果の発表を行った。

(2) は最近重要な部分の仕事が完成しウェブ上に成果を公表した。それが参考資料11である。この研究では、これまでニュートリノ対生成に伴う輻射の事象測定を実験手段としてきたの

を蓄積磁化の測定に変更する手法を提案した。蓄積磁化の光子放出方向の成分はパリティを保存しないので、量子電磁気力学過程の雑音消去に最適である。さらに、標的結晶の空間サイズが有限であることを正確に計算する方法を考案し、そのシミュレーションを実行した。この理論研究により現実的な実験提案に近づいたと評価できる。

(3)は幸い完了して参考資料9に雑誌投稿し受理された論文がある。新たなタイプのニュートリノ対放出過程を同定し、具体例の金原子等に適用した。重い原子では相対論的効果が大きく、これを取り入れた数値計算の専門家であるスウェーデングループの支援を共同研究により実現した。

(4)は参考資料3で公表済み。関連研究の成果は参考資料2、4、5、7、8、10にある。Photonic crystalを使うと、雑音となる純粋の軟光子を含む量子電磁気学過程が排除されるという、代表者らの過去の指摘を定量化して、どのような photonic crystal 中に標的を注入すると、実験が可能になるかを理論計算で示した。

参考資料

田中実、笹尾昇、吉村太彦共著 日本物理学会誌 2018年1号、最近の研究から
“原子からニュートリノを引き出せるカーコヒーランスの新奇な応用”

は2017年以前の成果の一般的な物理学者一般に向けた総説である。

また、共同研究者の、田中実氏、津村浩二氏、原秀明氏、吉見彰洋氏らが複数回、日本物理学会で共同研究の成果を講演発表した。

ニュートリノ対生成と同様に、原子を使って暗黒物質の有効候補である、アクシオンを探索できる。これに関連した研究を参考資料4等で展開してきたが、同時にアクシオン検出の実験現状を俯瞰する目的で国際会議を主催した。開催場所は参加者の便宜を考慮して、大阪大学の南部陽一郎ホールとした。

本計画での最大の成果は、弱い相互作用固有のニュートリノ対発生に伴い発生するパリティ非保存効果を同定して測定量とする新しい提案をしたことである。3価ランタノイドイオンのスピン成分のシグナル光方向成分はこのようなパリティ非保存量であり、かつ同時に生じる磁化はスピン緩和の長いランタノイドでは事象の蓄積量の測定が可能になり、有望な測定手段となる。測定方法のレイアウトは添付図のようになり、その結果、図のような磁化の角分布が得られる。磁化の大きさは磁場に換算して10ナノガウス程度となり、SQUIDなどで測定可能な範囲となる。

参考資料

2. H. Hara and M. Yoshimura, Eur. Phys. J. C 79, 684 (2019)

“Raman stimulated neutrino pair emission”

3. M. Tanaka, K. Tsumura, N. Sasao, and M. Yoshimura, PTEP 043B03(2017)

“Toward background-free RENP using a photonic crystal waveguide”

4. N. Sasao and M. Yoshimura, Eur. Phys. J. C78, 949 (2018).

“New method of galactic axion search”

5. M. Tanaka, K. Tsumura, N. Sasao, S. Uetake, and M. Yoshimura, Phys. Rev. D96, 113005(2017).

“Effects of initial spatial phase in radiative neutrino pair emission”

6. H. Hara, A. Yoshimi, and M. Yoshimura, arXiv” Parity violating magnetization at neutrino pair emission using trivalent lanthanoid ions” arXiv2105.11114(2021).

7. M. Yoshimura, arXiv:2004.03812[hep-ph] (2020)

“Persistent magnetization at neutrino pair emission”

8. G-Y. Huang, N. Sasao, Z-Z. Xing, M. Yoshimura, Int. J. Modern Phys. A35. 2050004(2020)

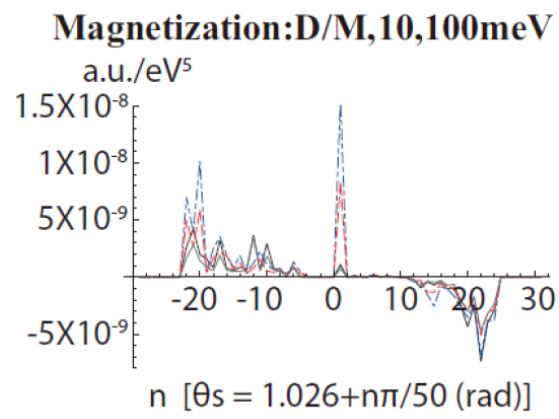
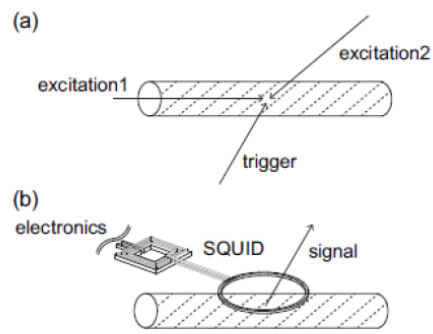
“Testing unitarity of the 3x3 neutrino mixing matrix in an atomic system”

9. M. Tashiro, B. P. Das, J. Ekman, P. Joensson, N. Sasao, and M. Yoshimura,

Eur. Phys. J. C79, 11(2019). “Macro-coherent radiative emission of neutrino pair between parity-even atomic states”

10. T. Asaka, H. Okui, M. Tanaka, and M. Yoshimura, Phys. Lett. B785, 536(2018).

11. H. Hara, A. Yoshimi, and M. Yoshimura, arXiv2105.11114v1 “Parity violating magnetization at neutrino pair emission using trivalent lanthanoid ions”



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 M. Tashiro, B. P. Das, J. Ekman, P. Jönsson, N. Sasao, M. Yoshimura	4. 巻 79
2. 論文標題 Macro-coherent radiative emission of neutrino pair between parity-even atomic states	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Eur. Phys. J. C	6. 最初と最後の頁 907
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Guo-Yuan Huang, Noboru Sasao, Zhi-Zhong Xing, and Motohiko Yoshimura	4. 巻 35
2. 論文標題 Testing unitarity of the 3×3 neutrino mixing matrix in an atomic system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics A	6. 最初と最後の頁 50004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0217751X20500049	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 Hideaki Hara and Motohiko Yoshimura	4. 巻 79
2. 論文標題 Raman stimulated neutrino pair emission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Eur. Phys. J. C	6. 最初と最後の頁 684
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1140/epjc/s10052-019-7148-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 該当する
1. 著者名 1.Minoru Tanaka, Koji Tsumura, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Motohiko Yoshimura	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 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 T. Masuda, A. Yoshimi and M. Yoshimura	4. 巻 26, No. 11
2. 論文標題 A new method of creating high intensity neutron source	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics E	6. 最初と最後の頁 0076-0089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 M. Tanaka1,,K .Tsumura2, N. Sasao, and M.Yoshimura	4. 巻 B03
2. 論文標題 Toward background-free RENP using a photonic crystal waveguide	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 043 - 061
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx035	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 Kyoko Mikami, Minoru Tanaka, Yasuhiro Yamamoto	4. 巻 C77.
2. 論文標題 Probing new intra-atomic force with isotope shifts	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Eur. Phys. J.	6. 最初と最後の頁 896-907
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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5件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Motohiko Yoshimura
2. 発表標題 Neutrino mass spectroscopy using atoms/ions (SPAN)
3. 学会等名 Neutrino Mass Workshop at Trento< Italy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Motohiko Yoshimura
2. 発表標題 Galactic axion search using lanthanoid ions (RAX)
3. 学会等名 Axion workshop at Technical University of Muenchen (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Yoshimura
2. 発表標題 Neutrino mass spectroscopy
3. 学会等名 "Particle Physics in the Year of 25th Anniversary of Lomonosov Conferences", (Moscow State University, August 24-30, 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Yoshimura
2. 発表標題 New method of galactic axion detection
3. 学会等名 International workshop on "Axion physics and dark matter cosmology", 20-21 December 2017, Osaka University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Yoshimura
2. 発表標題 New method of galactic axion detection
3. 学会等名 10th international workshop on FPUA (Fundamental Physics using Atoms), January 8-9, 2018, Nagoya University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	田中 実 (Tanaka Minoru) (70273729)	大阪大学・理学研究科・助教 (14401)	
研究分担者	齋藤 晋 (Saitoh Susumu) (00262254)	東京工業大学・理学院・教授 (12608)	

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	開催年
International workshop on "Axion physics and dark matter cosmology", 20-21 December 2017, Osaka University	2017年～2017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
---------	---------