

平成30年6月5日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03660

研究課題名(和文) マクロコヒーレンスによる電弱過程の人工制御：ニュートリノ質量分光に向けて

研究課題名(英文) Control of electro-weak process by macro-coherence: towards the neutrino mass spectroscopy with atoms or molecules

研究代表者

植竹 智 (Uetake, Satoshi)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・准教授

研究者番号：80514778

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：光子随伴ニュートリノ対放射過程(RENP過程)発見によるニュートリノの性質詳細解明を目指し、以下の基礎研究を進めた：(1)マクロコヒーレント増幅機構の理解を深め、二光子対超放射(PSR)や多光子放射など高次の量子電気力学過程を制御する実験手法開発につなげる；(2)RENP過程に最適な高密度・低位相緩和の性質を併せ持つ標的を開発する。PSR過程の最適化により二光子放射レートを18桁以上増幅することに成功し、固体パラ水素結晶において入射光の10倍以上の長い時間に渡りコヒーレンスが成長する現象を観測した。RENP過程に適した標的としてXeガスに注目し、マクロコヒーレンス生成用光源開発などを進めた。

研究成果の概要(英文)：Radiative emission of neutrino pair (RENP) from atoms or molecules has been considered a novel tool to determine the yet unknown neutrino parameters. In order for a future RENP experiment, (1) we proceeded detail study of macro-coherent amplification mechanism for developing an experimental method to control higher order process of quantum electrodynamics such as two-photon paired superradiance or multiphoton emission; (2) search the best target that has high-density and long coherence time for RENP process. We have succeeded to enhance the emission rate to 18 orders of magnitude in the two-photon emission process by optimizing the experimental parameters. Also we have observed automatic development of coherence in the solid parahydrogen crystal. The coherence seems to increase 10 times longer time duration than the input pulse duration. We developed the excitation laser for Xe gas, which is a suitable candidate for the RENP experiment.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：ニュートリノ質量分光 マクロコヒーレント増幅

### 1. 研究開始当初の背景

我が国主導のニュートリノ振動実験の目覚ましい発展により、ニュートリノ混合角やニュートリノ質量二乗差が実験的に確定された。一方、ニュートリノ質量の絶対値・マヨラナ型かディラック型か・マヨラナ CP 位相などの重要なパラメータは未確定のままである。また、これらを解明するために最も有効な実験手段が確立しているとは言いがたい状況である。

未解明のニュートリノパラメータ決定を目指し、我々は原子・分子の電子励起状態から光子を伴いニュートリノ対を放射する過程 (Radiative Emission of Neutrino Pair: 以下 RENP と略す) を提案した。原子を使うメリットは、励起エネルギーが高々数 eV であるため、ニュートリノ由来のエネルギー変化を極めて敏感に検出できることである。RENP 過程はニュートリノ質量絶対値の決定や質量階層、質量様式、さらには宇宙背景ニュートリノ検出などに感度を持っているのが特徴である。RENP の発生レートは極めて小さいが、我々のアイデアであるマクロコヒーレント増幅機構を使うことで解決できる。

マクロコヒーレント状態とは、原子の基底状態  $|g\rangle$  と励起状態  $|e\rangle$  間の重ね合わせ状態の位相が、電磁波の電場  $E_c$  を介して媒質全体にわたって一致した巨視的量子状態である。マクロコヒーレント状態からの放射過程は通常自然放出と異なり、遷移確率は原子数密度の 2 乗に比例して増大する。これをマクロコヒーレント増幅と我々は呼んでいる。マクロコヒーレンスにより RENP 過程の発生レートを大幅に加速させて観測頻度を高め、ニュートリノパラメータの精密決定を目指すことが本研究の長期的な目標である。この鍵を握るのが原子・分子間の量子コヒーレンスの詳細研究である。

我々はマクロコヒーレント増幅の原理を実証するため、パラ水素分子気体を用い、QED 過程である 2 光子放出で実証実験を進めてきた。その結果、水素分子の振動励起状態からの 2 光子脱励起レートを 15 桁以上増幅することに成功するなど、研究開始当初までに大きな成果が得られていた。この現象を我々は 2 光子対超放射 (Paired Super-Radiance: PSR) と呼んでいる。

PSR の観測成功によりマクロコヒーレント増幅機構の基本的な実証は確認できたが、その詳細については十分な研究が進んでいなかった。また、RENP に適した標的開発に関しても理論・実験両面で十分な研究は進んでいなかった。これらの点を明らかにすることを目標として本研究課題をスタートさせた。

### 2. 研究の目的

本研究では、マクロコヒーレント増幅機構の詳細について PSR 過程を用いて調べるとともに、RENP 過程に適した標的を開発することが目的である。具体的には、(1) パラ水素

を用いた PSR 過程の詳細研究、(2) RENP 過程に適した標的の開発、(3) RENP 過程の競合バックグラウンドである高次 QED 過程を抑制する方法の理論的検討、の 3 点を目的とする。

### 3. 研究の方法

(1a) パラ水素を用いて PSR 過程の詳細を調べるためには、波長  $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$  の広い範囲を波長可変で、かつ狭線幅である外部トリガ光源が必要である。このような光源は市販されていないため、我々が独自に開発する。(1b) 開発した外部トリガ光源を用い、PSR 発生条件の最適化を行う。また、Maxwell-Bloch シミュレーションと実験を比較することで理論との整合性を確かめる。

(2a) RENP 過程に適した標的は、基底状態と準安定励起状態間の相対パリティが odd である原子である。パラ水素用に開発済の Maxwell-Bloch シミュレーションコードを 3 光子励起用に拡張し、最適な標的を選定する。(2b) コヒーレンス生成用の励起光源を、選定した原子種に合わせて新たに開発する。(2c) 選定した標的を用いて 3 光子励起によりコヒーレンスを生成し、 $E1\times M1$  二光子放射などの微弱 QED 過程を増幅して観測することにより生成したコヒーレンスを調べる。(2d) RENP 過程実現には高密度・低位相緩和という相反する要求を満たすターゲットが必要である。これを満たすターゲットの候補として、固体水素を用いた PSR の実証も進める。

(3) RENP 過程の競合である QED 過程を抑制するため、「Purcell 効果 (共振器に閉じ込められた原子の自然放出レートが抑制される効果)」の応用を理論的に検討する。

### 4. 研究成果

(1a) 開発したパラ水素用外部トリガ光源の出力対波長特性を図 1 に示す。パルス出力  $0.4\text{--}1\text{ mJ}$ 、波長掃引可能範囲  $3.1\mu\text{m}\sim 4.8\mu\text{m}$  (34 THz)、線幅は 1.4 GHz であり、要求を満たす光源開発に成功した。この光源はその後改良し、パルス出力  $5\text{ mJ}$ 、線幅 150 MHz とさらに高出力・狭線幅化に成功している。

【論文発表[6]、学会発表(21)(22)(27)(29-31)】

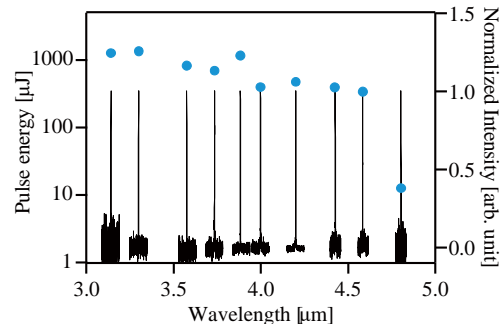


図 1 外部トリガ光源の掃引スペクトル

(1b) PSR 発生条件の最適化を行った結果、2

光子脱励起レートを 18 桁以上増幅することに成功した。研究開始前に比べレート増幅率を 3 桁向上した。また、PSR 出力のトリガ波長依存性を詳しく調べ、図 2 に示すように 30THz 以上の広範囲に渡り PSR 光が発生できることを明らかにした。理論的な予想ともよく一致している。これは THz 領域の狭線幅光源としても有望である。さらに、高出力化した中赤外トリガ光を用いて水素分子のラダー型励起によるコヒーレンス生成にも成功し、Anti Stokes 光 (3 次高調波発生) の観測にも成功した。

【論文発表[1][2][11][13], 学会発表(21) (22) (24) (27) (29) (30) (31)】

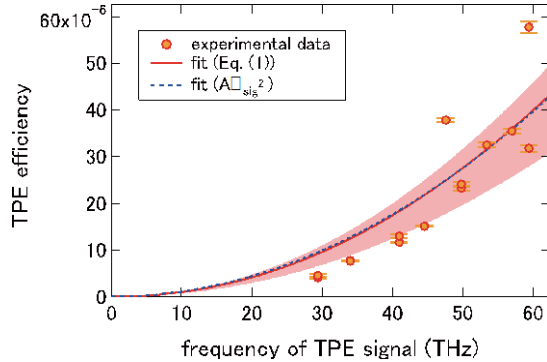


図 2 PSR のトリガ波長依存性

(2a) 基底状態と準安定励起状態の相対パリティが odd である原子種として、水銀および Xe を比較し検討した。3 光子励起用の Maxwell-Bloch シミュレーションコードを開発し、シミュレーションによる検討を進めた結果、Xe の方がより有利であることを明らかにした。

(2b) Xe のコヒーレンス生成に必要な光源は波長 596nm および 298nm の高出力・狭線幅パルス光である。市販レーザーではこの性能を得ることはできないため我々独自に設計し開発した。狭線幅パルス Nd:YAG レーザー(波長 1064nm)と狭線幅 876nm 半導体レーザー(連続発振)を用い、非線形波長変換技術を用いて必要な波長に変換した。最終的に生成した 596nm は 18mJ, 298nm は 8mJ であり、励起に十分な出力が得られた。線幅はフーリエ限界に近い 250MHz であり、当初の目標通りの性能を持つ光源開発に成功した。

【学会発表(1) (3) (4) (10) (13) (16) (21) (23) (25) (26)】

(2c) 開発した光源を用いて Xe を準安定励起状態へ励起する実験を進めた。入射光による Xe 原子のイオン化を観測し、励起に十分な光強度を入射できていることを確認した。微弱 QED 過程のレート増幅実験を引き続き進める。

(2d) 固体水素は量子固体として知られており、 $10^{23} \text{ cm}^{-3}$  の高密度でありながら位相緩和時間が非常に長い。マクロコヒーレント増幅は高密度・低位相緩和であるほど大きな増幅率が得られると理論的に予想されるため、固

体水素の環境において PSR の詳細を調べる研究も進めた。気体水素と比べ固体水素は高い入射レーザー光強度で容易に損傷してしまう点が欠点だが、アニーリングなどによりダメージを低減する工夫を行った。図 3 に示すように、入射パルス(パルス幅 $\sim 5\text{ns}$ )によるコヒーレンス生成後(横軸 0ns 付近), 100ns 以上にわたって PSR 光が観測できることが分かった。入射パルスが固体水素標的を完全に通り抜けた後に PSR 光強度が上昇しており、励起パルス照射後にコヒーレンスが発達するメカニズムが何らかの原因により働いていることがわかった。詳細な原因は調査中だが、非常に面白い現象として注目している。

【論文発表[4], 学会発表(10)(11)(12)(14)(22)】

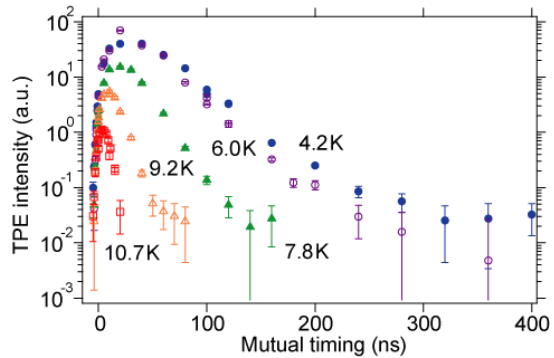


図 3 固体水素からの PSR 信号

(3a) 屈折率に周期構造を持たせた光ファイバ(フォトニッククリスタルファイバ)を使って QED 多光子放射過程を抑制する方法を理論的に検討した。屈折率比を適切に選ぶことでマクロコヒーレント増幅された 3 光子放射レートを、自由空間に比べ $10^{-10}$ 程度抑制できることを示した。

【論文発表[5][12], 学会発表(17)(20)】

(3b) また、ニュートリノ質量分光においてラダー型対向励起の励起波長を大きくアンバランスにすることにより、ニュートリノの質量様式や宇宙背景ニュートリノ検出に高い感度を持つ実験が可能になることを明らかにした。図 4 に示すように、ニュートリノが放出されるスレッシュホールド付近で背景ニュートリノによりレートが大きく抑制されている。

【論文発表[3], 学会発表(9)】

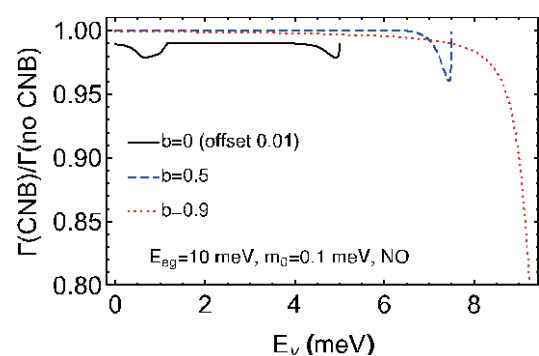


図 4 非対称励起による宇宙背景ニュートリノ検出感度の向上

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

以下論文は全て査読あり

- [1] "Vibrational excitation of hydrogen molecules by two-photon absorption and third harmonic generation", Y. Miyamoto, H. Hara, T. Hiraki, T. Masuda, N. Sasao, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura, and M. Yoshimura, *J. Phys. B* 51, 015401 (2018) [DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6455/aa9782>]
- [2] "Frequency dependence of coherently amplified two-photon emission from hydrogen molecules", H. Hara, Y. Miyamoto, T. Hiraki, T. Masuda, N. Sasao, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura, and M. Yoshimura, *Phys. Rev. A* 96, 063827 (2017) [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.063827>]
- [3] "Effects of initial spatial phase in radiative neutrino pair emission", M. Tanaka, K. Tsumura, N. Sasao, S. Uetake, and M. Yoshimura, *Phys. Rev. D* 96, 113005 (2017) [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.113005>]
- [4] "Vibrational Two-Photon Emission from Coherently Excited Solid Parahydrogen", Y. Miyamoto, H. Hara, T. Masuda, N. Sasao, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura, and M. Yoshimura, *J. Phys. Chem. A* 121, 3943 (2017) [DOI: [10.1021/acs.jpca.7b02011](https://doi.org/10.1021/acs.jpca.7b02011)]
- [5] "Toward background-free RENP using a photonic crystal waveguide", M. Tanaka, K. Tsumura, N. Sasao, and M. Yoshimura, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2017, 043B03 (2017) [DOI: [10.1093/ptep/ptx035](https://doi.org/10.1093/ptep/ptx035)]
- [6] "Injection-seeded tunable mid-infrared pulses generated by difference frequency mixing", Y. Miyamoto, H. Hara, T. Masuda, T. Hiraki, N. Sasao and S. Uetake, *Jpn. J. Appl. Phys.* 56, 032101 (2017) [DOI: [10.7567/JJAP.56.032101](https://doi.org/10.7567/JJAP.56.032101)]
- [7] "Recent progress of SPAN towards neutrino mass Spectroscopy", T. Masuda, H. Hara, Y. Miyamoto, N. Sasao, M. Tanaka, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura and M. Yoshimura, *Journal of Physics: Conference Series* 718, 062043 (2016) [DOI: [10.1088/1742-6596/718/6/062043](https://doi.org/10.1088/1742-6596/718/6/062043)]
- [8] "Determination of CP violation parameter using neutrino pair beam",

M. Yoshimura and N. Sasao, *Phys. Lett. B*, 753, 465-469 (2016) [DOI: [10.1016/j.physletb.2015.12.040](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2015.12.040)]

- [9] "Simultaneous Measurements of Superradiance at Multiple Wavelength from Helium Excited States: II. Analysis", C. Ohae, J. R. Harries, H. Iwayama, K. Kawaguchi, S. Kuma, Y. Miyamoto, M. Nagasono, K. Nakajima, I. Nakano, E. Shigemasa, N. Sasao, S. Uetake, T. Wakabayashi, A. Yoshimi, K. Yoshimura, and M. Yoshimura, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol.85,034301 (2016) [DOI: [10.7566/JPSJ.85.034301](https://doi.org/10.7566/JPSJ.85.034301)]
- [10] "Neutrino pair and gamma beams from circulating excited ions", M. Yoshimura and N. Sasao, *Physical Review D*, Vol.92, 073015 (2015) [DOI: [10.1103/PhysRevD.92.073015](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.073015)]
- [11] "Externally triggered coherent two-photon emission from hydrogen molecules", Y. Miyamoto, H. Hara, T. Masuda, N. Sasao, M. Tanaka, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, Vol.2015, 081C01 (2015) [DOI: [10.1093/ptep/ptv103](https://doi.org/10.1093/ptep/ptv103)]
- [12] "Radiative emission of neutrino pair free of quantum electrodynamic backgrounds", M. Yoshimura, N. Sasao, and M. Tanaka, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 053B06 (2015)
- [13] "Rate amplification of the two photon emission from para-hydrogen toward the neutrino mass measurement", T. Masuda, H. Hara, Y. Miyamoto, S. Kuma, I. Nakano, C. Ohae, N. Sasao, M. Tanaka, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura, *Hyperfine Interactions*, online (2015)

[学会発表] (計 31 件)

- (1) 今村慧, 原秀明, 平木貴宏, 宮本祐樹, 増田孝彦, 岡井晃一, 笹尾登, 佐藤帯子, 高江洲義太郎, 植竹智, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦, "ニュートリノ質量分光へ向けた Xe ガス対向励起実験の開発", 2018 年 3 月 23 日, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学 (千葉県)
- (2) 平木貴宏, 原秀明, 今村慧, 増田孝彦, 宮本祐樹, 笹尾登, 高江洲義太郎, 植竹智, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦, "ニュートリノ質量分光のためのパラ水素ガスを用いた対向レーザー励起実験", 2018 年 3 月 23 日, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学 (千葉県)
- (3) K. Okai (for the SPAN collaboration), "Study on control of higher-order QED processes using Xe atoms" (poster), The 10th International Workshop on

- Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2018), Jan. 8-9 (2018), Nagoya University (Nagoya)
- (4) O. Sato (for the SPAN collaboration), "A laser system for control of higher-order QED processes using Xe atoms" (poster), The 10th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2018), Jan. 8-9 (2018), Nagoya University (Nagoya)
- (5) H. Hara (for the SPAN collaboration), "Coherence Generation by Counter-Propagating Photons Towards Neutrino Mass Spectroscopy" (poster), The 10th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2018), Jan. 8-9 (2018), Nagoya University (Nagoya)
- (6) M. Tanaka, "Implication of initial spatial phase in the coherent radiative neutrino pair emission" (invited talk), The 10th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2018), Jan. 8-9 (2018), Nagoya University (Nagoya)
- (7) T. Hiraki (for the SPAN collaboration), "Coherently amplified multi-photon emission toward the neutrino mass spectroscopy" (invited talk), The 10th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2018), Jan. 8-9 (2018), Nagoya University (Nagoya)
- (8) 原秀明, 平木貴宏, 今村慧, 増田孝彦, 宮本祐樹, 笹尾登, 高江洲義太郎, 植竹智, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦, "中赤外光を用いたラダー型励起による水素分子振動準位間のコヒーレンス生成", 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 21 日, 岩手大学 (岩手県)
- (9) 笹尾登, 田中実, 津村浩二, 吉村太彦, "ニュートリノ質量分光における空間的振動位相印加のインパクト", 2017 年 9 月 12 ~15 日, 宇都宮大学 (栃木県)
- (10) 植竹智, 原秀明, 平木貴宏, 今村慧, 増田孝彦, 宮本祐樹, 岡井晃一, 笹尾登, 高江洲義太郎, 田中実, 津村浩二, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦, "原子を用いたニュートリノ質量分光のための対向レーザー励起実験の現状", 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 12~15 日, 宇都宮大学 (栃木県)
- (11) Hideaki Hara, for the SPAN collaboration, "Coherent Amplification of Two-Photon Emission from Hydrogen Molecules Towards Neutrino Mass Spectroscopy", Atomic Physics Gordon Research Conference, June 11-16 (2017), Slave Regina University (Newport, RI, US)
- (12) 平木貴宏, 原秀明, 増田孝彦, 宮本祐樹, 笹尾登, 高江洲義太郎, 植竹智, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦, "ニュートリノ質量分光のためのパラ水素対向レーザー励起実験の現状", 2017 年 3 月 19 日, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (大阪府)
- (13) K. Okai (for the SPAN collaboration), "Frequency stabilization of a transfer cavity by high-speed digital control using an FPGA" (poster), The 9th International Workshop on Fundamental Physics using Atoms (FPUA2017), Jan. 9-10 (2017), Kyoto University (Kyoto)
- (14) T. Hiraki (for the SPAN collaboration), "Recent study on two-photon emission from coherently-excited parahydrogen" (poster), The 9th International Workshop on Fundamental Physics using Atoms (FPUA2017), Jan. 9-10 (2017), Kyoto University (Kyoto)
- (15) M. Yoshimura, "Intense MeV gamma beam and fundamental physics applications to neutron and positronium" (invited talk), The 9th International Workshop on Fundamental Physics using Atoms (FPUA2017), Jan. 9-10 (2017), Kyoto University (Kyoto)
- (16) T. Masuda (for the SPAN collaboration), "Study on amplified multi-photon emission processes from macroscopically coherent media" (invited talk), The 9th International Workshop on Fundamental Physics using Atoms (FPUA2017), Jan. 9-10 (2017), Kyoto University (Kyoto)
- (17) M. Tanaka, "Towards Background-free RENP using a Photonic Crystal Waveguide" (invited talk), The 9th International Workshop on Fundamental Physics using Atoms (FPUA2017), Jan. 9-10 (2017), Kyoto University (Kyoto)
- (18) N. Sasao, H. Hara, T. Hiraki, Y. Honda, Y. Ichikawa, O. Kamigaito, Y. Kanai, T. Nagatomo, T. Nakagawa, T. Masuda, Y. Miyamoto, K. Sakae, S. Uetake, K. Yokoya, M. Yoshida, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura, "Photon and neutrino emission from quantum ions in circular motion", 2016 年 7 月 24 日~29 日, The 25th International Conference on Atomic Physics, Auditorium, COEX, Seoul, Korea
- (19) T. Masuda, H. Hara, T. Hiraki, Y. Kasamatsu, S. Kitao, Y. Kobayashi, K. Konashi, R. Masuda, Y. Miyamoto, K. Okai, S. Okubo, N. Sasao, T. Schumm,



- M. Seto, Y. Shigekawa, S. Stellmer, S. Uetake, M. Watanabe, A. Yamaguchi, Y. Yasuda, Y. Yoda, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura, "A search for the low-energy  $^{229}\text{Th}$  nuclear isomeric transition using nuclear resonant scattering", 2016年7月24日~29日, The 25th International Conference on Atomic Physics, Auditorium, COEX, Seoul, Korea
- (20) 笹尾登, 田中実, 津村浩二, 吉村太彦, "原子ニュートリノ観測のための誘電体導波路中の QED 過程の解析", 2016年9月21日~24日, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学(宮崎県)
- (21) 増田孝彦, 原秀明, 平木貴宏, 宮本祐樹, 笹尾登, 高江洲義太郎, 植竹智, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦, "SPAN 実験(原子を用いたニュートリノ質量分光)のための、多光子放出実験の進展", 2016年9月21日~24日, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学(宮崎県)
- (22) 宮本祐樹, 原秀明, 増田孝彦, 植竹智, 笹尾登, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦, "固体パラ水素振動準位を用いたコヒーレント二光子放出の観測", 2016年9月13日~16日, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学(石川県)
- (23) 岡井晃一, 原秀明, 増田孝彦, 宮本祐樹, 笹尾登, 植竹智, "FPGA を用いた高速デジタル制御によるトランスファー共振器の周波数安定化", 2016年9月13日~2016年9月16日, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学(石川県)
- (24) 増田孝彦, 原秀明, 宮本祐樹, 笹尾登, 田中実, 植竹智, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦, "SPAN 実験 (ニュートリノ質量分光実験) のための対向励起実験の進行状況", 2016年3月19日~2016年3月22日, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学(宮城県)
- (25) 岩崎達郎, 原秀明, 植竹智, 吉見彰洋, 吉田光宏, 笹尾登, 増田孝彦, 宮本祐樹, 吉村浩司, 吉村太彦, "ニュートリノ質量分光に向けた Xe 原子のコヒーレンス生成", 2016年3月19日~2016年3月22日, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学(宮城県)
- (26) T. Iwasaki for the SPAN collaboration, "Toward Production of Macro-Coherence in Metastable Xe" (poster), The 8th International Workshop on Fundamental Physics using Atoms (FPUA2015), Nov. 30 (2015) - Dec. 1(2015), Riken (Saitama)
- (27) Y. Miyamoto for the SPAN collaboration, "Detailed study on coherent two-photon emission toward the neutrino mass spectroscopy" (poster), The 8th International Workshop on

- Fundamental Physics using Atoms (FPUA2015), Nov. 30 (2015)-Dec. 1(2015), Riken (Saitama)
- (28) M. Yoshimura, "Neutrino physics using quantum coherent ion beam in circular motion", (invited talk), The 8th International Workshop on Fundamental Physics using Atoms (FPUA2015), Nov. 30 (2015)-Dec. 1(2015), Riken (Saitama)
- (29) H. Hara (for the SPAN collaboration), "Coherent Two-Photon Emission Towards Neutrino Mass Spectroscopy using Atoms" (invited talk), The 8th International Workshop on Fundamental Physics using Atoms (FPUA2015), Nov. 30 (2015)-Dec. 1(2015), Riken (Saitama)
- (30) 宮本祐樹, 植竹智, 原秀明, 増田孝彦, 笹尾登, 田中実, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦, "SPAN (原子を用いたニュートリノ質量分光実験) のためのマクロコヒーレント増幅機構の詳細研究 IV", 2015年9月25日~2015年9月28日, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学(大阪府)
- (31) 笹尾登, 植竹智, 原秀明, 増田孝彦, 宮本祐樹, 田中実, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦, "SPAN (原子を用いたニュートリノ質量分光実験) のためのマクロコヒーレント増幅機構の詳細研究 III", 2015年9月25日~2015年9月28日, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学(大阪府)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.xqw.okayama-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
植竹 智 (UETAKE, Satoshi)  
岡山大学・異分野基礎科学研究所・准教授  
研究者番号：80514778
- (2) 研究分担者  
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
- (3) 連携研究者  
なし
- (4) 研究協力者