

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13486

研究課題名(和文) ニュートリノ質量分光に向けた二光子凝縮体の生成

研究課題名(英文) Soliton generation for neutrino mass spectroscopy

研究代表者

笹尾 登 (Sasao, Noboru)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任教授

研究者番号：10115850

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の究極目標は、ニュートリノの未確定重要パラメータを測定することにある。このため我々は原子励起状態からの光子を伴うニュートリノ対放出過程に着目した。本研究に於いては、パラ水素標的の振動励起準位と基底状態間のコヒーランスを対向型と呼ばれる励起配位で実現し、それからの対超放射過程信号を観測することに成功した。また信号強度やその共鳴幅等の性質は、ほぼシミュレーションで再現することも判明した。これより原子を用いたニュートリノ分光に向けて、その基礎となるマクロコヒーラント増幅原理を実験的にも理論的にも飛躍的に深化させた。この成果を基に二光子凝縮体の理論的実験的研究を継続している。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this research is to measure neutrino's unknown parameters. To this end, we focus on an atomic relaxation process by emitting a neutrino pair and photon from excited states. We have realized generation of macroscopic coherence between vibrational excited and ground states of para-hydrogen molecules in a counter-propagating excitation configuration, and have succeeded in observing two-photon emission (paired super-radiance emission). We also confirmed the observed signal properties, such as intensity and resonance width are consistent with simulation results. The research has deepened both theoretically and experimentally understandings of macro-coherent amplification principle, which is the key notion of atomic neutrino spectroscopy. We continue research works toward realization of two photon condensate states.

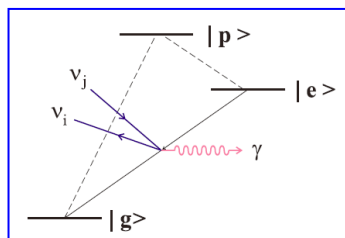
研究分野：素粒子物理学

キーワード：ニュートリノ 光凝縮体

1. 研究開始当初の背景

本研究の究極目標は、絶対質量、質量様式(マヨラナ/ディラックの識別)、質量階層(NH/IH)、CP位相等のニュートリノ未確定重要パラメータを組織的、かつ包括的に測定することにある。これより、標準模型を超えた素粒子物理学や物質優勢宇宙の謎の解明に至る手掛かりを得ることを期待している。この目標を実現するため、我々は原子励起状態からの光子を伴うニュートリノ対放出過程に着目した[引用文献1-2]。図1参照($|e\rangle \rightarrow |g\rangle + \gamma\nu\nu$)。この過程は極めて低頻度と予想されるが、これを新たな増幅機構「マクロコヒーラント増幅原理」を用いて検出可能にまで増幅する。上述したニュートリノの諸性質は光子のエネルギースペクトルより決定する。我々は、マクロコヒーラント増幅原理の根幹部を、量子電磁力学過程である二光子対超放射過程(PSR; Paired Super-Radiance)を用いて、実験的に検証することに成功した[引用文献3-5]。即ち、パラ水素分子の振動励起準位から基底状態($v=1 \rightarrow v=0$)への二光子脱励起過程を、その自然放射レートに比較し 10^{18} 倍以上に増幅することに成功した。本研究はこうした背景の下で開始された。

図1: 光子を伴うニュートリノ対放射過程、本研究ではニュートリノを伴わない二光子過程(PSR)を研究。



[引用文献]

- 1) A. Fukumi, S. Kuma, Y. Miyamoto, K. Nakajima, I. Nakano, H. Nanjo, C. Ohae, N. Sasao, M. Tanaka, T. Taniguchi, S. Uetake, T. Wakabayashi, T. Yamaguchi, A. Yoshimi, M. Yoshimura, “Neutrino spectroscopy with atoms and molecules”, Prog. Theor. Exp. Phys., Vol.2012, pp.04D002 (79pages) (2012)
- 2) D. N. Dinh, S. T. Petcov, N. Sasao, M. Tanaka, and M. Yoshimura, “Observables in Neutrino Mass Spectroscopy Using Atoms”, Phys. Lett. B, Vol. 719, pp. 154-163 (2013)
- 3) M. Yoshimura, N. Sasao and M. Tanaka, “Dynamics of two-photon paired superradiance”, Phys. Rev. A., Vol. 86, pp. 013812 (14 pages) (2012)}
- 4) Y. Miyamoto, H. Hara, S. Kuma, T. Masuda, I. Nakano, C. Ohae, N. Sasao, M. Tanaka, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura and M.

Yoshimura, “Observation of coherent two-photon emission from the first vibrationally excited state of hydrogen molecules”, Prog. Theor. Exp. Phys., Vol. 2014, 113C01 (1-12) (2014)

5) Y. Miyamoto, H. Hara, T. Masuda, N. Sasao, M. Tanaka, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura, “Externally triggered coherent two-photon emission from hydrogen molecules”, Prog. Theor. Exp. Phys., Vol.2015, 081C01 (1-7) (2015)

2. 研究の目的

本研究の目的は、原子を用いたニュートリノ分光に向けて、その基礎となるマクロコヒーラント増幅原理を実験的にも理論的にも飛躍的に深化させることにある。より具体的には、パラ水素標的を用いて対向型と呼ばれるPSRを世界で初めて実現する。このため標的中に空間的に一様な初期コヒーランスを作り出し、反対方向(back-to-back)に放射される二光子を観測する。有限質量をもつニュートリノ放出が運動学的に禁止される同軸入射のラマン型励起と異なり、対向型はニュートリノ放出を可能にする。またこの過程自体PSRの新しい幾何配置であり意義深い。本研究では、これに加えて新しい二光子凝縮体の生成を試みる。更にこれらの研究に平行し、固体標的の開発やシミュレーションを含む理論研究を進展させる。

3. 研究の方法

本研究計画に於いては、パラ水素を標的として用い、 $v=1$ と $v=0$ 状態のエネルギー差に対応するレーザー光を対向型入射する。これにより標的中に空間的に一様な初期コヒーランスが生まれる。これに更にトリガー・レーザー光を入射し、back-to-backに放射される二光子を観測する。これ自体PSRの新しい幾何配置であり、世界で初めての成果である。本研究に於ける技術的挑戦は、高性能大強度中赤外励起レーザーの製作にある。また損傷閾値の高い固体水素標的の開発にも挑む。

続いて二光子凝縮体の生成を試みる。このため励起レーザーを空間変調し、予想される二光子凝縮体の幾何構造に近い配位を実現する。二光子凝縮体の生成に成功したならば、その寿命や実際のコヒーランス分布、内部電場分布を測定する。研究期間を通してシミュレーションを含む理論研究を継続する。

4. 研究成果

(1) 中赤外レーザー製作と三次光放射実験

本研究で中心的な役割を果たす装置は、高性

能中赤外レーザー(波長 4.8 マイクロメータ)である。市販品は存在しないため自作した。図 2 にレーザー・システムの概略を示す。鍵となる性能仕様は、広い周波数掃引領域(波長にして 3142nm-4806nm)、高いパルスエネルギー(~1 mJ/pulse)、狭線幅(~1.3GHz)である。我々は、非線形素子を用いた差周波生成法でこれらの仕様を実現することに成功した[発表論文 6]。

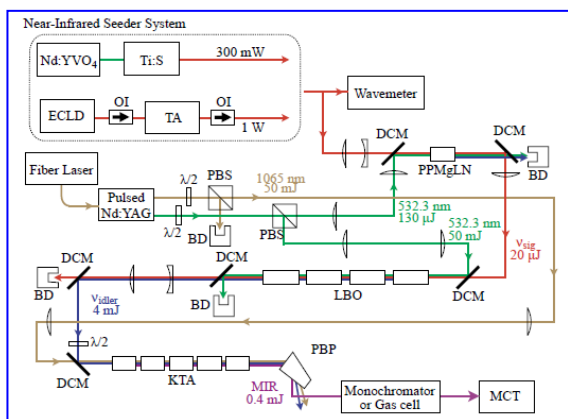


図 2: 中赤外レーザー・システム。λ/2(half-wave plate), BD(Beam dump), ECLD(external cavity laser diode), KTA(potassium titanyl arsenate crystals), LBO(lithium triborate crystals), MCT(mercury cadmium telluride infra-red detector), Nd:YVO4(Nd:YVO4-laser, Coherent), OI(optical-isolator), PBP(Pellin-Borca type prism), PBS(polarization beam splitter), PPMgLN(MgO-doped periodically poled lithium niobate), TA(tapered amplifier), Ti:S(Ti sapphire ring laser)

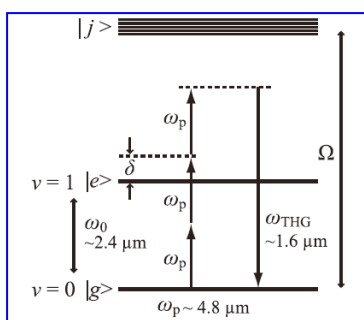


図 3: パラ水素分子振動準位エネルギー図、及び三次光放射の原理。励起準位(v=1)と基底準位(v=0)間のコヒーレンスが高い場合、励起準位はレーザー光を吸収して三倍波を生み出す。

これを用いて、コヒーレント現象である、三次光生成の実験を行った。図 3 に水素分子の振動準位図を示す。この場合、レーザー光を入射すると、同一方向の光子 2 つを吸収し、 $v = 1$ に遷移する。もしレーザーの輝度が高く、線幅が狭いと(高性能条件)、励起状態が更に光子を吸収し、3 倍波(ω_{THG})が生まれる。図 4 に実験の模式図を示す。本実験では標的にパラ水素ガスを採用した。実験の結果、3 倍波(波長 1.6 ミクロンに相当)の信号を観測することに成功した。図 5 参照。実験で得られた知見は以下の通りである。(i) 信号強度は、

予想通りほぼ入射レーザー強度の 3 乗に比例する。(ii) 離調共鳴曲線の幅は、レーザーの線幅、ドップラー効果、ガスの圧力による効果などで説明することが可能である。この結果をまとめ発表した[発表論文 1]。

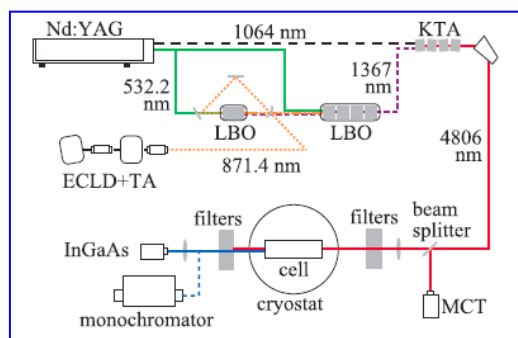


図 4: 実験装置模式図。ECLD: external cavity laser diode, InGaAs: indium gallium arsenide detector, KTA: potassium titanyl arsenate crystals, LBO: lithium triborate crystals, MCT: mercury cadmium telluride infra-red detector, TA: tapered amplifier.

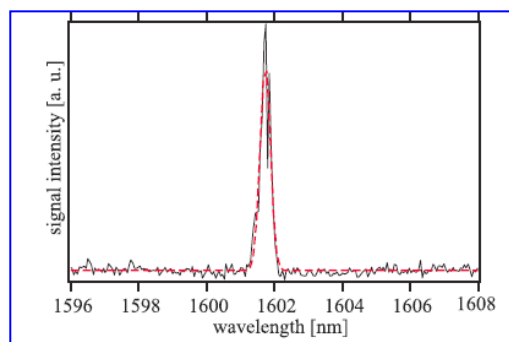


図 5: 得られた信号の波長スペクトル図。横軸は波長[nm]、縦軸は信号光の強度。

(2) 対向型 PSR の観測実験

次に本研究の主要な課題である対向入射 PSR 実験を記す。まず実験装置の概略を図 6 に示した。図からも分かるように二本のレーザー光を対向型で入射する。これに加えてトリガー・レーザー光をやや角度をつけて入射し、反対方向に生まれる信号光を検出器(MCT)で測定する。なお本実験においてもパラ水素ガスを標的とした。またレーザーはいずれも円偏光状態を用いた。ポンプ・レーザーは共に右円偏光(RH)であり、トリガーは左円偏光(LH)である。

次に得られた実験結果を説明する。図 7 に離調共鳴曲線を示す。黒丸は信号強度、青四角は一方のポンプ・レーザー光の円偏光を RH から LH に変更した場合の信号強度を表す。この場合、角運動量保存より励起状態は生じないと予想される(従ってバックグラウンドを表

す)。これからも分かるように、きれいな PSR 信号を観測することに成功した。信号強度やその幅は、ほぼシミュレーションで再現することも判明した(図中の曲線を参照)。なお本実験では、ポンプ及びトリガー・レーザは同一のレーザを分岐して使用しているため、レーザ周波数を単独に変化させることはできない。従って離調は全てに共通である。

続いてレーザ入射強度依存性を測定した。この結果を図 8 に示す。図中の曲線は、関数 AxI^B を用いたフィットである。この結果 B はほぼ 3 であることが判明し、予想通りコヒーレンス現象により信号光が生まれていることを確認した。最後に離調共鳴曲線の幅を標的ガス圧の関数として測定した。その結果を図 9 に示す。圧力と共にその幅は増加するが、これはレーザ線幅、圧力幅(分子同士が衝突することによる)、ドップラー効果による幅などからほぼ理解できることが判明した。本実験の結果は現在論文にまとめており、順次投稿する計画である。

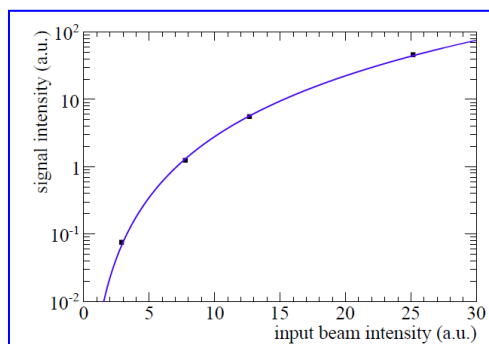


図 8: 対向型 PSR 実験におけるレーザ強度依存性。曲線は、関数 AxI^B を用いたフィット。

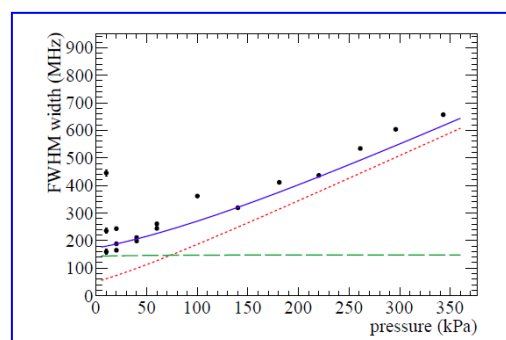


図 9: 離調共鳴曲線における共鳴幅の圧力依存性。青曲線はシミュレーション結果、赤点線及び緑線は、各々、ローレンツ及びガウス成分。

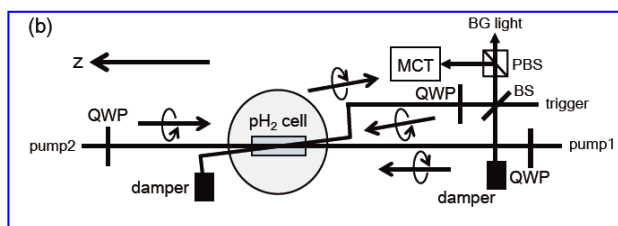


図 6: 実験装置概略図。

MCT (Mercury cadmium telluride detector), QWP (Quarter wavelength plate), BS (Beam splitter), PBS (Polarizing beam splitter), pump1, 2/trigger (4.8 μm lasers)

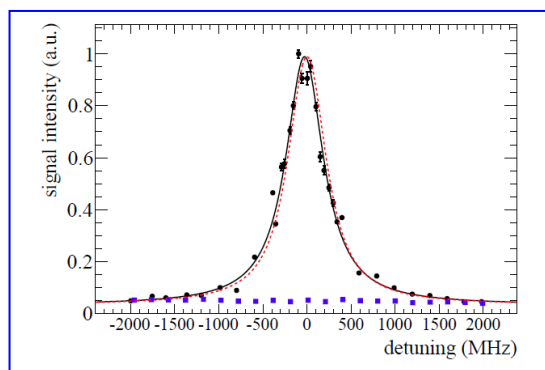


図 7: 離調共鳴曲線。横軸はレーザ周波数の共鳴周波数からのずれ(離調)を表す。縦軸は信号強度。青点は、ポンプ・レーザの一方を円偏光を LH にした場合の信号強度である。この場合角運動量の選択則により、励起されない。曲線はローレンツ曲線と定数による fit 結果(黒線)、あるいはシミュレーション結果(赤線)を表す。ガス圧 280kPa。

(3) その他の実験的成果

以上の実験では標的としてパラ水素ガスを用いた。一方、固体標的は密度が高いだけでなく、コヒーレンスを持続する時間が長いことが知られている。但し、大強度レーザ光による損傷があり、この克服が課題となっている。我々は、固体標的の上述した特性を実際に実験で確かめるため、ラマン型の二光子放射実験を行った。励起スキームを図 10 に示す。励起には異なる 2 つの波長(532nm 及び 683nm)をもつレーザを同一方向から標的に入射した。また同時にトリガー・レーザ(4586nm)も同一方向から入射し、二光子過程で生ずる信号光を観測した。この実験の結果を説明する。当該実験では、トリガー・レーザは別途準備した。このため入射時間を独自に調整することが可能である。図 11 は横軸にトリガー・レーザの入射時間(励起レーザの照射時間を基準点とする)、縦軸は二光子の信号強度を示している。様々なデータ点があるが、赤丸に注目する。このデータは二光子の放出強度が数百 nsec にわたり持続していることを表している。ガス標的ではこの時間は数十 nsec であり、10 倍以上もコヒーレンスが長く続くことを証明した。[発表論文 4]

ニュートリノ質量分光にとって、標的密度が高いことが望ましい。この観点から、カーボンフラーレンに内包された原子の可能性を探った。具体的には ECR イオン源を用いて、加速された窒素原子をカーボンフラーレンに入射し、内包フラーレンを作成することに成功した。

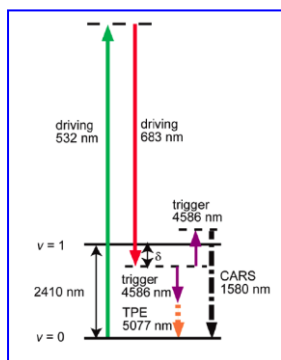


図 10: 固体パラ水素標的実験の模式図。励起は波長異なる二本のレーザー(532nm 及び 683nm)を用いたラマン型励起方法を採用。二光子のパートナーとなるトリガー光を同一方向から入射し、信号光を観測した。

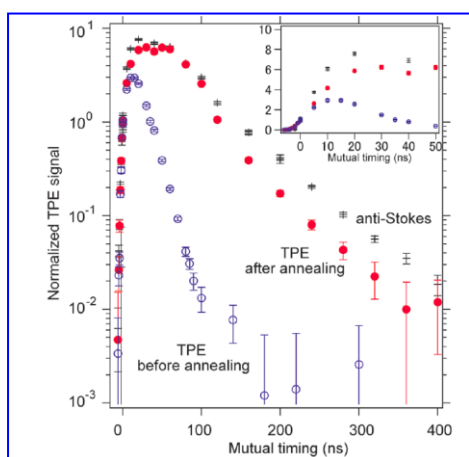


図 11: 固体パラ水素標的実験の結果。縦軸は信号強度、横軸は励起光を機銃としたトリガー光の入射時間を表す。TPE は二光子過程による信号、anti-Stokes は図 11 に示された CARS と呼ばれる高次過程信号を表す。固体標的の場合、標的のアニーリング(annealing)が重大な影響を及ぼす。

(4) 理論的成果

続いて理論研究の成果を述べる。まず対向型に励起されたパラ水素標的の分子状態における soliton(光凝縮状態)と電磁波の振る舞いを記述する Maxwell-Bloch 方程式を立式した。この方程式は非線形偏微分方程式であるため適当な仮設(ansatz)を設定し、そのもとに soliton 解(空間的にエネルギーが局所化する解)を求めることとした。この結果、設定した仮設のもとでは“dark soliton”の可能性はあるものの“bright soliton”の可能性はないとの結論を得た。実験の立場からは bright soliton が望ましいので、他の仮設の

採用、寿命の長い近似的な soliton 等を追及している。

励起の方法により、コヒーランスの空間分布が異なることは既に述べた。素粒子の言葉でこのことを解釈すると、原子分子系に初期運動量を与えることに対応する。即ち対向励起で同一波長のレーザーを用いると、初期運動量は零(空間的には一様なコヒーランス)となる。また同軸のラマン励起は、準位のエネルギー差に等しい運動量が付与される。一般に初期状態運動量は、励起のレーザーの波長や配位を変えることにより任意に操作可能である。この自由度を利用すると、原子ニュートリノの質量分光の感度を増大し、バックグラウンドの抑制にも役立つ。この発見を理論的に解明し、これを論文にまとめた[発表論文 2]。

原子を用いたニュートリノ質量分光実験の重要バックグラウンドに、多数の光子が放出される過程がある。標的原子の始状態と終状態の相互パリティが偶の場合には、2 あるいは 4 光子放射過程が、奇の場合には、3 光子あるいは 5 光子放射が重要である。これらのバックグラウンドを取り除く 1 つの方法として、ブラッグ・ファイバーを用いる方法を提案した[発表論文 5]

(5) 今後の方向性

本研究により数多くの成果が生み出された。この成果に基づく今後の研究を展望する。喫緊の課題として、固体標的を用いた対向型二光子放射実験がある、これについては既に開始されており、信号光も観測されている。レーザーによる標的損傷についても作成方法やアニーリング方法を工夫し、損傷閾値の高い標的を作成し、更に高い増幅率を追及する。固体標的については、窒素以外の原子を内包するフラーレンの作製を目指す。ソリトン解の理論的研究を継続しつつ、二光子凝縮相の実験的研究はその後に行う。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- 1) Yuki Miyamoto, Hideaki Hara, Takahiro Hiraki, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura and Motohiko Yoshimura, “Vibrational excitation of hydrogen molecules by two-photon absorption and third harmonic generation”, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 51 (2018) 015401 (7pp) 査読有 <https://doi.org/10.1088/1361-6455/aa9782>
- 2) Minoru Tanaka, Koji Tsumura, Noboru

- Sasao, Satoshi Uetake, and Motohiko Yoshimura, “Effects of initial spatial phase in radiative neutrino pair emission”, Phys. Rev. D 96, 113005 (2017) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.96.113005
- 3) Hideaki Hara, Yuki Miyamoto, Takahiro Hiraki, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura, and Motohiko Yoshimura, “Frequency dependence of coherently amplified two-photon emission from hydrogen molecules”, Phys. Rev. A 96, 063827 (2017) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevA.96.063827
- 4) Y. Miyamoto, H. Hara, T. Masuda, N. Sasao, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura, and M. Yoshimura, “Vibrational Two-Photon Emission from Coherently Excited Solid Parahydrogen”, 査読有
DOI: 10.1021/acs.jpca.7b02011
J. Phys. Chem. A 2017, 121, 3943–3951
- 5) Minoru Tanaka, Koji Tsumura, Noboru Sasao, and Motohiko Yoshimura, “Toward background-free RENP using a photonic crystal waveguide”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 043B03 (18 pages) 査読有
DOI: 10.1093/ptep/ptv064
- 6) Yuki Miyamoto, Hideaki Hara, Takahiko Masuda, Takahiro Hiraki, Noboru Sasao and Satoshi Uetake, “Injection-seeded tunable mid-infrared pulses generated by difference frequency mixing”, Japanese Journal of Applied Physics, Volume 56, 032101, 2017 査読有
<https://doi.org/10.7567/JJAP.56.032101>

[学会発表] (計 11 件)

- 1) 菅谷優輝, 豊田雅之, 斎藤晋, 若林知成, 金井保之, 笹尾登, 吉村太彦
“ニュートリノ質量分光に向けた異種原子内包 C60 の安定性と電子物性の予測研究”, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018 年) 東京理科大、千葉県野田市)
- 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”, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018 年) 東京理科大、千葉県野田市)
- 3) Takahiro HIRAKI,

- “Coherently amplified multi-photon emission toward the neutrino mass spectroscopy”, 10th International workshop on fundamental Physics Using Atoms Jan 8-9, 2018 (Japan)
- 4) Minoru TANAKA,
“Implication of initial spatial phase in the coherent radiative neutrino pair emission”, 10th International workshop on fundamental Physics Using Atoms Jan 8-9, 2018 (Japan)
- 5) Noboru SASAO
“Neutrino mass spectroscopy with atoms”, Global Research Symposium on Coherent Quantum Control of Atom-Photon Interaction, October 30 – 31, 2017 (Seoul, Korea).
- 6) Noboru SASAO
“Atomic process in macroscopic coherence and its application to fundamental physics”, Seminar at Seoul National University, November 2, 2017 (Seoul, Korea).
- 7) M. Yoshimura
“Neutrino mass spectroscopy”, EIGHTEENTH LOMONOSOV CONFERENCE ON ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS, Moscow State University, Moscow, 24 – 30 August, 2017

[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

笹尾 登 (SASAO, Noboru)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任教授
研究者番号：10115850

(3) 連携研究者

吉村 太彦 (YOSHIMURA, Motohiko)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任教授
研究者番号：70108447

宮本 祐樹 (MIYAMOTO, Yuki)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・講師
研究者番号：00559586