

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月24日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02093

研究課題名(和文)原子を用いたニュートリノ質量分光の基礎研究

研究課題名(英文)Basic studies on neutrino mass spectroscopy with atoms

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) 32,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の最終目標は原子を用いるという世界に先駆けた方法により、ニュートリノの未確定重要パラメータを包括的に決定することにある。そのため原子や分子の励起準位からの光を伴うニュートリノ対放出過程に注目する。実験で鍵を握るポイントは量子干渉効果によるレートの増幅である。本研究では水素分子振動励起準位からの二光子対超放射過程を用いて、当該増幅機構の詳細を実験的に研究した。その結果、通常のラマン型励起による対超放射過程に加え、対向型励起等によっても当該過程を観測することに成功した。これらの結果は理論予想と概ね一致する。また理論面では背景過程除去法や初期位相印加により実験感度が向上することを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の最終目標は、ニュートリノの未確定で重要な性質(例えば質量絶対値やマヨラナ・ティラック型の識別)を確定することにある。このために原子(あるいは分子)からのニュートリノ対放射過程に注目し、その頻度を増幅するため量子干渉効果を用いる。本研究では、水素分子の振動励起状態からの二光子遷移を観測することにより量子干渉性増幅機構の詳細を研究した。また実際のニュートリノ対観測にむけて、背景事象の低減法や感度向上法などを理論的に研究した。この結果、原子を用いるという新しい方法によるニュートリノ研究の基礎を確立した。

研究成果の概要(英文)：The ultimate goal of the studies is to measure neutrinos' important parameters yet to be determined. To this end, we focus on a process which emits neutrino pair and photon from excited states of atoms or molecules. Experimentally the most important point is to realize amplification of process rates due to quantum coherence. In this research, we studied experimentally this amplification mechanism using two photon coherent emissions from a vibrationally excited state of hydrogen molecules. As a result, we successfully observed coherently amplified two photon process in a counter-propagating excitation configuration in addition to usual Raman-type excitation configuration. The process rate was found to agree well with the expectation of the theory. Related theoretical studies were also performed: we proposed a method to remove background events, and found a way to improve sensitivity to determine neutrino parameters by imprinting an initial phase to a target system.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ニュートリノ マクロコヒーランス

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ実験は、高エネルギー衝突型実験と共に素粒子物理学の現在のフロンティアである。その現状を要約すると、3種類のニュートリノ(電子型ニュートリノ、ミュー型ニュートリノ、タウ型ニュートリノ)は互いに混合し有限の質量を持つこと、これにより質量ゼロを仮定する標準模型とは相容れないことが確定した、となるであろう。現在では、質量二乗差及び混合角はほぼ確定している。さて、著しい進歩を遂げたニュートリノ物理ではあるが、実は未だ重要な問い掛けに対し解答を見いだすに至っていない。特に、ニュートリノ質量がディラック型かマヨラナ型かの識別(質量様式)、荷電空間対称性(CP 対称性)の破れの有無とその大きさ、絶対質量の決定等は重要な未解決問題である。これらは実験のみが解答できる課題であるが、現在大別すると2つの実験手段が追求されている。即ち(a) 大強度ビームを使った高エネルギー振動実験、(b) ニュートリノが放出されない二重ベータ崩壊実験。前者は、レプトンセクターにおける小林益川型 CP 位相の測定を目指す実験であり、後者はニュートリノの質量様式を確定し、絶対質量平均値を測定する実験である。

本研究の最終目標は、ニュートリノの未確定重要パラメータをより組織的、かつ包括的に決定することにある。学術的特色は原子(または分子、以下同様)を利用する点にあり、日本発の独創的な着想に基づく。また大学施設で実現可能な"テーブルトップ実験"である点も特徴であると言えよう。

2. 研究の目的

本研究では、原子の励起状態からの光子を伴うニュートリノ対放出過程($|e\rangle \rightarrow |g\rangle + \gamma + \nu \bar{\nu}$)に着目する(図1参照)。以後、簡単のためこの過程を **REN**P(Radiative Emission of Neutrino Pair)と称す。実験における測定量は光子エネルギースペクトルである。この過程は反応頻度が小さいものの必ず存在し、ニュートリノのパラメータを仮定すれば、標準理論を用い計算可能である。逆に光子スペクトルからニュートリノの未知パラメータ(絶対質量、マヨラナ/ディラック識別、質量順序(NO/IO)、CP 位相等)が決定できる。図2にそのスペクトル例を示す。本提案の核心は **REN**P 反応頻度の増幅にあり、以下に説明する「**マクロコヒーラント増幅機構**」によりこれを実現する。一般に N 個の原子が脱励起過程に関与し、これらの原子間にコヒーランスが存在するとその過程は振幅段階で N 倍され、放射過程の単位時間当たり頻度(反応レート)は N^2 に加速される。この様な協同現象は、古くは超放射(R.H. Dicke: Phys.Rev.93 (1954) 99)として知られていた。超放射(**SR**; Super-Radiance)は数多くの実験により確かめられており、その存在は揺るぎがない。マクロコヒーラント増幅機構は、超放射に類似した協同現象であるが、重要な相違が存在する。マクロコヒーラント増幅機構は放出粒子が一定の位相整合条件(運動量保存に等価)を満足するとき、コヒーラント体積が巨視的になり得ることに起因する。一方、Dicke 超放射は一光子過程(多くは電気双極子遷移)を対象にしており、コヒーラント体積は放出される光波長程度の大きさに限定される。

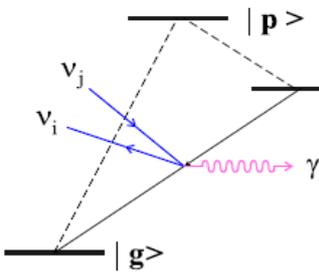


図 1 : 標的エネルギー準位及び **REN**P($|e\rangle \rightarrow |g\rangle + \gamma + \nu \bar{\nu}$)過程。

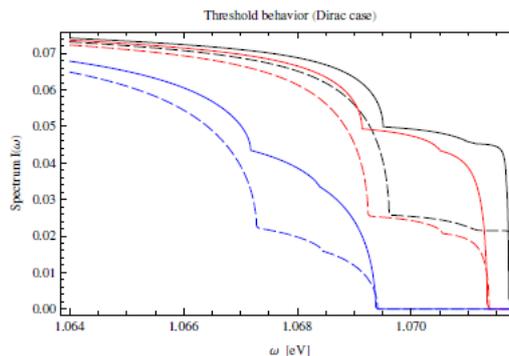


図 2: Yb 原子($^3P_0 \rightarrow ^1S_0$)よりの **REN**P 光子エネルギースペクトル。実線は正規順序(NO)、破線は逆順序(IO)。最小質量 $m_0 = \text{Min}(m_1, m_2, m_3)$ を 2meV(黒)、20 meV(赤)、50 meV(青)と仮定。各スペクトル線の折れ曲がり(閾値)はより重いニュートリノに起因する。

我々は以前に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ている。ここで **PSR** とは、ニュートリノ対が光子に置き換わった過程であり、反応レートはニュートリノを含む過程より格段に大きいのが特徴である。またマクロコヒーラント増幅機構によりエネルギー運動量保存則が成立するため、反応同定に有利な特徴をもつ。パラ水素分子(振動励起準位 $v=1$)からの二光子脱励起過程を、その自然放射レートに比較し大幅に増幅することができている。

本研究の目標は原子を用いたニュートリノ質量分光のための基礎的技術や知見を得ることにある。即ち、(i)「マクロコヒーラント増幅機構」研究の飛躍的深化と(ii) 原子ニュートリノ検出方法の基礎を築くことを目標とする。前者においては、外部トリガーPSR や対向型 PSR の研究を行う。また後者においては、原子ニュートリノ観測に必要な手段である PSR と RENP モードの制御やバックグラウンド過程の制御を行い、最適原子の選択やレーザー開発に繋げる。これらの成果を基礎に、究極的には 1.9K 宇宙背景ニュートリノ観測も視野に入れた、原子によるニュートリノ質量分光分野を開拓する。

3. 研究の方法

マクロコヒーラント増幅機構の根幹部は、パラ水素分子を用いた PSR 実験により既に検証されている。しかしニュートリノ質量分光に応用する観点からは、より詳しくその性質を調べ、これを自由に制御する必要がある。以下にその具体的研究方法を列記する。

- ① **外部トリガー光による PSR 研究**; 以前に行った PSR 実験においては、PSR 用トリガー光は簡単のためラマン高次光($q=4$)を使用した。本研究では、トリガー光を独立制御することにより、コヒーランスや増幅率に対するトリガー光のパワー依存性、タイミング依存性(励起とトリガーの時間差)、偏光依存性など明らかにする。
- ② **対向型励起 PSR 研究**; 以前に行った PSR 実験においては、二本の励起レーザーを同一方向より標的に入射した。これに対し、対向型励起 PSR では励起レーザーを対向方向より入射し、標的中に空間的に様な初期コヒーランスを作り出す。この結果、PSR は back-to-back に放射される二光子から成り立つ。これは新しい形態の PSR というだけでなく、ニュートリノ質量分光にはより本質的意義がある。
- ③ **三光子励起 PSR の研究と外場によるモード制御**; 励起準位と基底準位の相互パリティが負の場合、3 光子励起により標的中に空間的に様な初期コヒーランスを作り出すことが可能である。一般に、三光子の放射はニュートリノ過程に対する背景事象となり得る。従って背景事象を研究することは RENP の実現にとり重要である。
- ④ **PSR 及び RENP に関連する理論的研究**

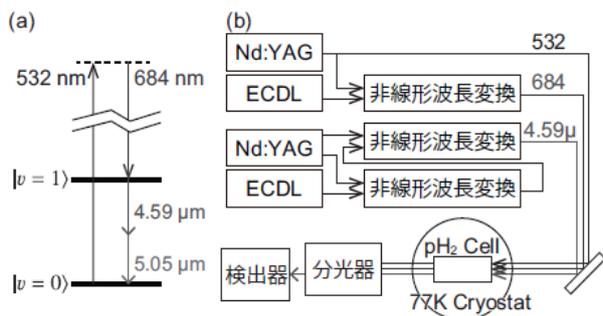


図 3 : (a) パラ水素準位及び関連する波長。Pump 光 (532nm), Stokes 光(684nm), トリガー光(4.59um), 及び信号光光 (5.05um)。 (b) 外部トリガー光による実験セットアップ図

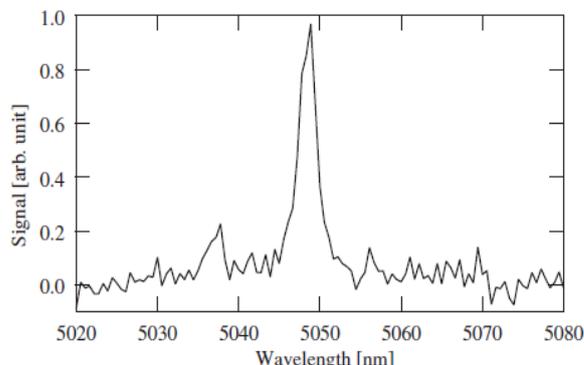


図 4: (1-1)外部トリガー光によるパラ水素実験の信号スペクトル。横軸波長(nm)、縦軸信号強度(任意目盛り)。予想された波長に信号光を観測した。

4. 研究成果

本研究では、水素分子の振動励起状態からの二光子対超放射遷移(PSR)を観測することにより量子干渉性増幅機構の詳細を研究した。より具体的には、外部トリガー光を用いた Raman 型励起(ガス及び固体標的)と対向型励起(ガス標的)の 3 つの異なる条件でパラ水素二光子遷移実験を行った。まず Raman 型励起ガス標的の実験について説明する。この場合、図 3 に示されるように、Pump 光(532nm)と Stokes 光(684nm)を同一方向から入射し、初期状態($v=1$ 振動励起状態)を用意した。実際の標的は長さ 15cm、圧力 60kPa であり、窒素温度に冷却されている。同軸同一方向からトリガー光(4587nm)を入射し、出てくる信号光をテルル化カドミウム水銀検出器 (Mercury Cadmium Telluride)にて観測した。図 4 に典型的信号スペクトルを表す。この結果、ピーク波長は理論予想と一致すること、マクロコヒーラント増幅機構により、自然放出による光に比べ 10^4 倍以上の増幅が確認された。

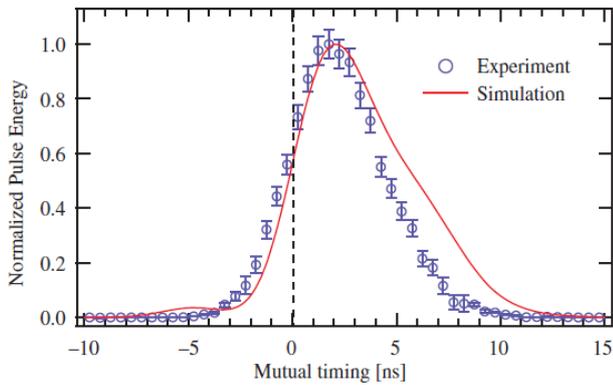


図 5: パラ水素からの二光子放出。横軸はポンプ光を基準としたトリガー光の入射時間(ns)。縦軸は信号強度(任意目盛り)を表す。Raman 型励起ガス標的。

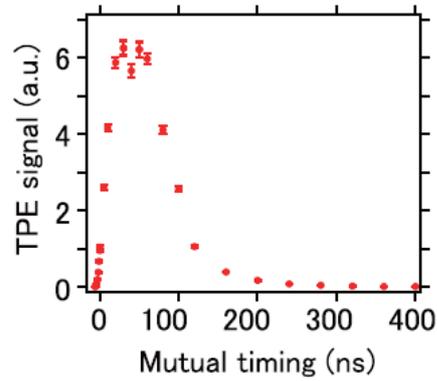
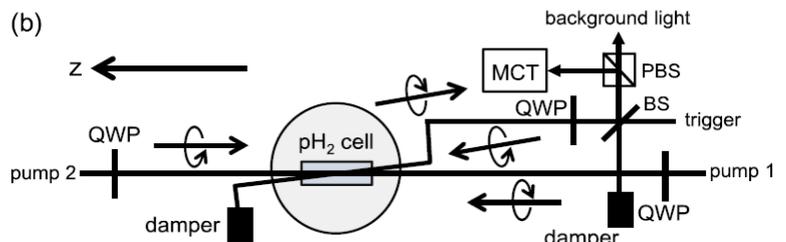


図 6: 固体水素からの二光子放出。横軸はポンプ光を基準としたトリガー光の入射時間(ns)。縦軸は信号光の強度(任意目盛り)を表す。コヒーレンス時間はガス標的に比べ10倍以上長い。

図 5 は、横軸がポンプ光を基準としたトリガー光の入射時間、縦軸に信号光の強度をプロットしたグラフである。図からも分かるように、信号強度はポンプ光より遅れた時間で最大値を示す。これは標的のコヒーレンスの発達に有限の時間が必要とされることを表す。コヒーレンスは分極光の消失や位相緩和の効果により低減する。ガス標的の場合、コヒーレンス維持の時間は $\sim 10\text{ns}$ 程度であることが判明した。図中の赤線はシミュレーションの結果を表している。以上の結果を総合すると、量子干渉性による増幅作用は概ね実証されたといつて良いだろう。[発表論文⑧参照]

次に固体水素標的の実験について説明する。固体水素はドップラー幅が無視できるうえに、衝突による位相緩和も小さい。これ故ガスに比較して、位相緩和時間が長いことが予測される。我々はトリガー光の入射タイミングを遅らせることにより、位相緩和時間を測定した。図 6 参照。その結果ガス標的に比較し、固体では 10 倍も長いことを確認した。また標的単位長さ当たりの増幅率は、ガス標的より大きくなることも判明した。但し固体水素標的は、レーザーの損傷閾値が低いために、上記したメリットを最大限に生かすためには、標的生成方法に工夫が要求される。[発表論文⑤参照]

図 7: 対向型励起実験のセットアップ図。pump 1/2: ポンプ用レーザー(4806nm), trigger: トリガ用レーザー(4806nm), MCT: テルル化カドミウム水銀検出器, PBS: 偏光ビームスプリッタ, QWP: 四分の一波長板。



最後に対向型励起実験について述べる。パラ水素分子を用いた Raman 型二光子対超放射実験 (PSR) においては、二本の励起レーザーを同一方向より標的に入射した。これに対し、対向型 PSR では励起レーザーを対向方向より入射し、空間的に一様な初期コヒーレンスを作り出す。この結果、PSR は運動量保存則より back-to-back に放射される二光子から成り立つ。これは新しい形態の PSR というだけでなく、ニュートリノ質量分光にとり、光凝縮体の生成が可能になるという本質的意義がある。図 7 に実験のセットアップの概略を示す。Raman 型とは異なり、入射レーザー波長は励起準位エネルギーの半分に対応する(4806nm)。実験の結果、理論の予想通り back-to-back に放射される光子の検出に成功

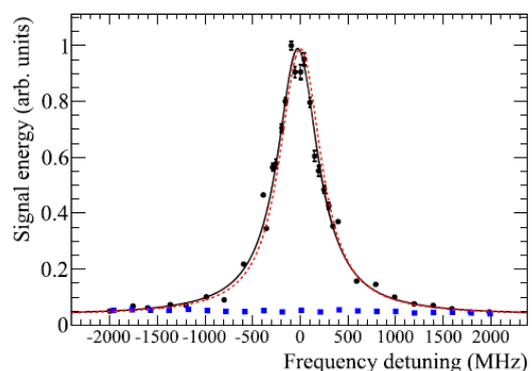


図 8: 対向型励起二光子対超放射実験の結果。横軸は離調、縦軸は信号強度(任意目盛り)。黒丸は実験結果。青四角は一方の励起レーザーの偏光方向を変化させた場合。赤破線及び黒線はシミュレーション結果。

した。図 8 の黒丸点は励起レーザーの円偏光を共に右偏光にした場合の二光子放射強度を離調の関数としてプロットしたデータを表す。縦軸は強度を表すが、データは概ねシミュレーション(図 7 中の実線)と一致することがわかった。これに対し一方の励起レーザーの偏光を変化させると、信号光は消滅する(青四角の点)。これは励起準位の角運動量固有値が $J=0$ であるため、レーザー光の持つ角運動量が $J=2$ のときは励起されないことに起因する。結果をまとめ論文に発表した[発表論文①]。

続いて主として理論面での成果を述べよう。理論面では(1)背景事象の抑制方法[発表論文④]、(2)初期位相の印加によるニュートリノ物理に対する感度の向上[発表論文③]、(3)二光子放出の RENP 過程などを中心に進展があった。以下では(2)についての研究成果を記述する。

標的原子や分子の励起状態を用意するときレーザーを用いるが、このときレーザーの持つ波数ベクトル[$\exp(ikx)$]が標的系に空間位相として転写される。もし複数のレーザーで標的を励起すると、レーザーの向きと波数ベクトルを変化させることにより、標的には様々な値をもつ位相を印加することが可能となる。マクロコヒーランス機構による増幅を考えると、この空間位相は標的がもつ初期運動量の役割を果たす。RENP 過程を用いて、ニュートリノの性質特に質量がマヨラナ型なのかディラック型なのかを定めるには、一般に標的粒子のもつ不変質量が小さいほど好都合である。図 9 では、初期位相因子を変化させて RENP スペクトルを比較したものである(標的は Yb)。実線は初期位相を印加した場合であり、また破線は初期位相がゼロの場合である。図からも分かるように、初期位相があるときはマヨラナとディラックの差異が大きくなり、区別がより明瞭となっている。

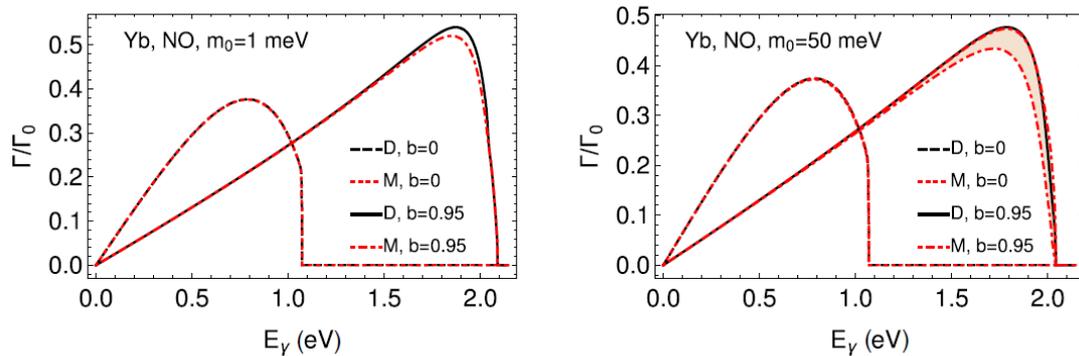


図 9: マヨラナ・ディラックの識別と初期位相の印加。実線は初期位相を印加した場合破線は初期位相がゼロの場合。最小のニュートリノ質量を $m_0=1$ meV (左)あるいは $m_0=50$ meV (右)と仮定。右図の2つの赤破線は CP パラメータを変化させたときの変動範囲を示す。すべて標的は Yb。正規質量順序を仮定。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

①“Coherent two-photon emission from hydrogen molecules excited by counterpropagating laser pulses”, Takahiro Hiraki, Hideaki Hara, Yuki Miyamoto, Kei Imamura, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura and Motohiko Yoshimura J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 52 (2019) 045401; <https://doi.org/10.1088/1361-6455/aafbd0> (査読有)

②“Vibrational excitation of hydrogen molecules by two-photon absorption and third harmonic generation”, Yuki Miyamoto, Hideaki Hara, Takahiro Hiraki, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura and Motohiko Yoshimura, J.Phys.B: At.Mol.Opt.Phys.51(2018)015401; <https://doi.org/10.1088/1361-6455/aa9782> (査読有)

③“Effects of initial spatial phase in radiative neutrino pair emission” Minoru Tanaka, Koji Tsumura, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, and Motohiko Yoshimura PHYSICAL REVIEW D 96, 113005 (2017); DOI: 10.1103/PhysRevD.96.113005 (査読有)

④“Toward background-free RENP using a photonic crystal waveguide” Minoru Tanaka, Koji Tsumura, Noboru Sasao, and Motohiko Yoshimura Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 043B03 (18 pages); DOI: 10.1093/ptep/ptx035 (査読有)

⑤ “Vibrational Two-Photon Emission from Coherently Excited Solid Parahydrogen”, Yuki Miyamoto, Hideaki Hara, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura, and Motohiko Yoshimura
J. Phys. Chem. A 2017, 121, 3943–3951; DOI: 10.1021/acs.jpca.7b02011 (査読有)

⑥ “Frequency dependence of coherently amplified two-photon emission from hydrogen molecules”, Hideaki Hara, Yuki Miyamoto, Takahiko Hiraki, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura, and Motohiko Yoshimura
PHYSICAL REVIEW A 96, 063827 (2017) DOI: 10.1103/PhysRevA.96.063827 (査読有)

⑦ “Simultaneous Measurements of Superradiance at Multiple Wavelength from Helium Excited States: II. Analysis”, Chiaki Ohae, James R. Harries, Hiroshi Iwayama, Kentarou Kawaguchi, Susumu Kuma, Yuki Miyamoto, Mitsuru Nagasono, Kyo Nakajima, Itsuo Nakano, Eiji Shigemasa, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Tomonari Wakabayashi, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura, and Motohiko Yoshimura, Journal of the Physical Society of Japan 85, 034301 (2016); <http://doi.org/10.7566/JPSJ.85.034301> (査読有)

⑧ “Externally triggered coherent two-photon emission from hydrogen molecules”, Yuki Miyamoto, Hideaki Hara, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Minoru Tanaka, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura, and Motohiko Yoshimura, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 081C01, DOI: 10.1093/ptep/ptv103. (査読有)

[学会発表] (計 7 件) 主要なもののみ

- ① Koji Tsumura, “Recent Theoretical Developments on RENP”, 11th International Workshop on Fundamental Physics Using Atom (2019) 国際学会
- ② Kei Imamura, “Rate amplification of the multi-photon process toward neutrino mass spectroscopy”, 11th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (2019) 国際学会
- ③ Noboru Sasao, “Atomic process in macroscopic coherence and its application to fundamental physics”, Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics, (2018) 国際会議・招待講演
- ④ 宮本祐樹, “ニュートリノ質量分光を目指した気体および固体水素振動準位間の位相共役二光子放出実験”, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018)
- ⑤ 平木貴宏, “ニュートリノ質量分光のための対向レーザー励起によるコヒーレント二光子放出実験”, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018)
- ⑥ 田中 実, “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”, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018)
- ⑦ Noboru Sasao, “Macroscopic coherent amplification and its application to neutrino physics”, Global Research Symposium on Coherent Quantum Control of Atom-Photon Interaction, (2017) 国際会議・招待講演

[その他]

ホームページ等: <http://www.riis.okayama-u.ac.jp/department/core1/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 吉村 浩司
ローマ字氏名: Yoshimura Koji
所属研究機関名: 岡山大学
部局名: 異分野基礎科学研究所
職名: 教授
研究者番号 (8 桁): 50272464

(2) 研究分担者

研究協力者氏名: 吉村 太彦
ローマ字氏名: Yoshimurara Motohiko
所属研究機関名: 岡山大学
部局名: 異分野基礎科学研究所
職名: 教授
研究者番号 (8 桁): 70108447

(3) 研究分担者

研究協力者氏名: 田中 実
ローマ字氏名: Tanak Minoru
所属研究機関名: 大阪大学
部局名: 理学研究科
職名: 助教
研究者番号 (8 桁): 70273729