

令和元年5月28日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14292

研究課題名（和文）ニュートリノ質量分光に向けた、対向型二光子放出増幅の実現

研究課題名（英文）Amplification of the counter propagating two-photon emission toward the neutrino mass spectroscopy

研究代表者

増田 孝彦（Masuda, Takahiko）

岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任講師

研究者番号：90733543

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：狭線幅中赤外パルスレーザーを用いてパラ水素ガス標的を対向パルスレーザーで第一振動励起準位に励起し、そこからのコヒーレント増幅された対向二光子放出の観測に成功した。数値計算では対向型励起放出の時間空間発展を解くため、Method of Lines法を用いた空間1次元時間1次元のMaxwell-Bloch方程式を実装した。実験結果と計算結果は定性的によく一致しており、対向二光子放出現象をよく理解できていると考えられる。特に強度依存性、離調依存性、圧力依存性などを比較し、定性的によく一致していることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子物理学の中でもニュートリノは未知の性質が多く残されている。特にその基本的性質である質量が未確定なのは特筆に値する。本研究は、従来の原子核崩壊を使った手法ではなく、原子を用いた高分解能測定によってニュートリノの質量を確認するという「ニュートリノ質量分光」実験のための基礎研究である。理論と矛盾しない実験結果が示され、数値計算による定量的定性的な理解も進めることができた。これにより将来のニュートリノ質量分光実験に近づいたと言える成果である。

研究成果の概要（英文）：We observed two-photon emission signal from the first vibrationally excited state of parahydrogen gas coherently excited by counter-propagating laser pulses. A single narrow-linewidth laser source has roles in the excitation of the parahydrogen molecules and the induction of the TPE process. We measured dependences of the signal energy on the detuning, target gas pressure, and input pulse energies. These results are qualitatively consistent with those obtained by numerical simulations based on Maxwell-Bloch equations with one spatial dimension and one temporal dimension. This study of the TPE process in the counter-propagating injection scheme is an important step toward neutrino mass spectroscopy.

研究分野：素粒子・原子核・原子

キーワード：ニュートリノ パラ水素 コヒーレント増幅

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子標準理論は 17 種類の素粒子とそれらの間の相互作用を記述する理論である。全 17 種の素粒子はその性質がよく調べられているが、唯一ニュートリノには未知の性質が多く残されている。ニュートリノ振動実験によって、その質量が有限であることが確認され、3 世代混合角も測定できたが、質量絶対値・CP 位相・ディラックかマヨラナか、などは未確定である。特に最も基本的な性質である質量が未確定なのは特筆に値する。そのためニュートリノの質量決定を目指し、 $^3\text{H}$  や  $^{163}\text{Ho}$  など崩壊核種を用いた直接測定や、ニュートリノレス二重崩壊の寿命測定による間接測定など、原子核の崩壊を利用した実験が精力的に進められている。

研究代表者の所属するグループは、原子や分子のエネルギー準位を用いた新しいニュートリノ質量探索実験を提案している。これには原子・分子の脱励起の際に {光子+ニュートリノ+反ニュートリノ} の三粒子を放出する過程(RENP: Radiative Emission of Neutrino Pair)を用いる。出てくる光子のエネルギーの最大値を求め、遷移準位間のエネルギーとの差分からニュートリノの質量を求めるという手法である。RENP は弱い相互作用による過程であるため発生レートが小さく、そのままでは測定が行えない。この問題を本グループは「マクロコヒーレント増幅機構」で克服する。励起原子・分子標的の集団を巨視的なコヒーレント状態においてやれば、RENP 発生確率は標的密度の 2 乗に比例して増大する。

## 2. 研究の目的

原子の脱励起に伴いニュートリノを放出する過程を観測することができれば、未だ確定できていないニュートリノの諸性質、特に質量絶対値、を網羅的に測定することが可能となる。本研究はそのため必要となると考えられる巨視的なコヒーレンスによる遷移確率の増幅効果を詳細に確認することを目的とする。本グループはこれまで、RENP よりも発生頻度が高い二光子放出を用いてマクロコヒーレント増幅機構の実証を進めてきた。

本研究課題に先立って、ラマン型の二光子放出の発生に成功し、トリガを導入することでその詳細を評価していた。これはコヒーレンスを生成する二色のポンプレーザーを同方向から入射し、二色のエネルギー差に相当する励起準位と基底準位間にコヒーレンスを生成するものである。しかし、ニュートリノを放出させるためには、対向型のコヒーレンス生成および放出過程の理解が重要である。これはニュートリノが質量を持つことに起因する。本課題ではこの対向励起

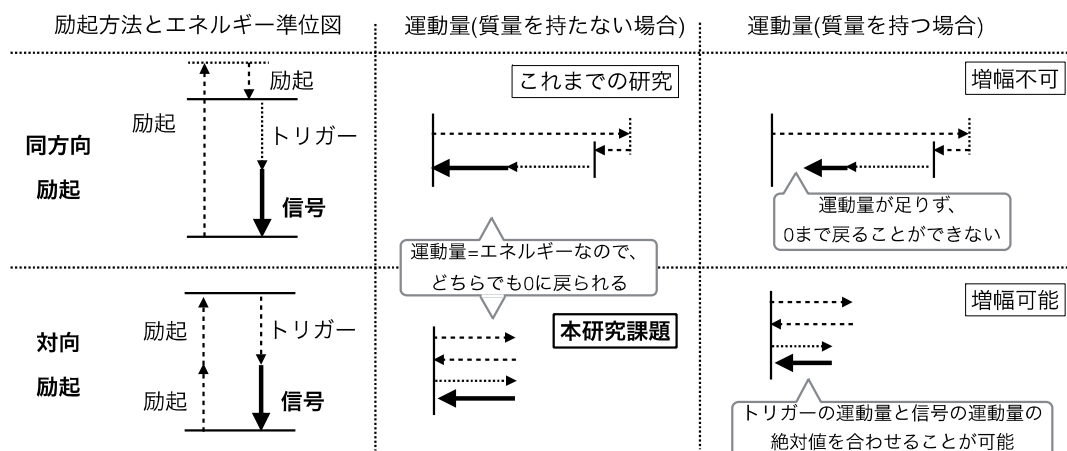


図 1 同方向励起(上)と対向励起(下)の比較。本研究課題では対向励起かつ質量を持たない場合を扱う。

によるコヒーレンス生成、および対向型の二光子放出を観測・評価することが目的である。図1にこれまでのラマン型二光子放出実験(図中「これまでの研究に対応」と)と、本研究課題で目的とする対向型二光子放出実験(図中「本研究課題」に対応)の比較を示す。対向型二光子放出が観測できれば、その各種パラメータ依存性を実験的に評価する。数値計算との比較によって現象の理解を進め、将来のニュートリノ質量分光実験の実験設計に活かす。

### 3. 研究の方法

本課題ではパラ水素ガス標的に中赤外レーザーパルス(ポンプ光)を入射することでコヒーレンスを生成し、同色のパルス(トリガ光)を別角度から入射して対向型二光子放出を誘導する。図2に実験セットアップの概要を示す。中赤外パルスレーザーをビームスプリッターで励起レーザー( $\times 2$ )とトリガレーザーに分離し、図のような偏光と位置関係で水素ガス標的に入射する。円偏光ビームを用いることで対向しない成分による励起を防ぐことができる。二光子放出を誘導するためのトリガをやや角度をつけて入射すると、二光子のうち一つはトリガと同方向に放出され、対となる光子が運動量保存によりトリガと逆向きに放出される。

最終的なニュートリノ質量分光の実験設計や測定感度の見積もりには、信頼できる数値シミュレーションが必須である。したがって本研究で得られる実験結果を再現する数値シミュレーションプログラムの構築も重要な研究目標となる。数値シミュレーションのベースはこれまでの同方向励起実験と同じ Maxwell-Bloch 方程式であるが、同方向励起の場合は光の進む向きが全て同じであるという特徴を使ってパラメータを減らし、少数の連立方程式の時間発展を解く単純な形に帰着することができていた。しかし対向型の場合はそのようなテクニックが使えないため、新しい数値計算法を開発する。

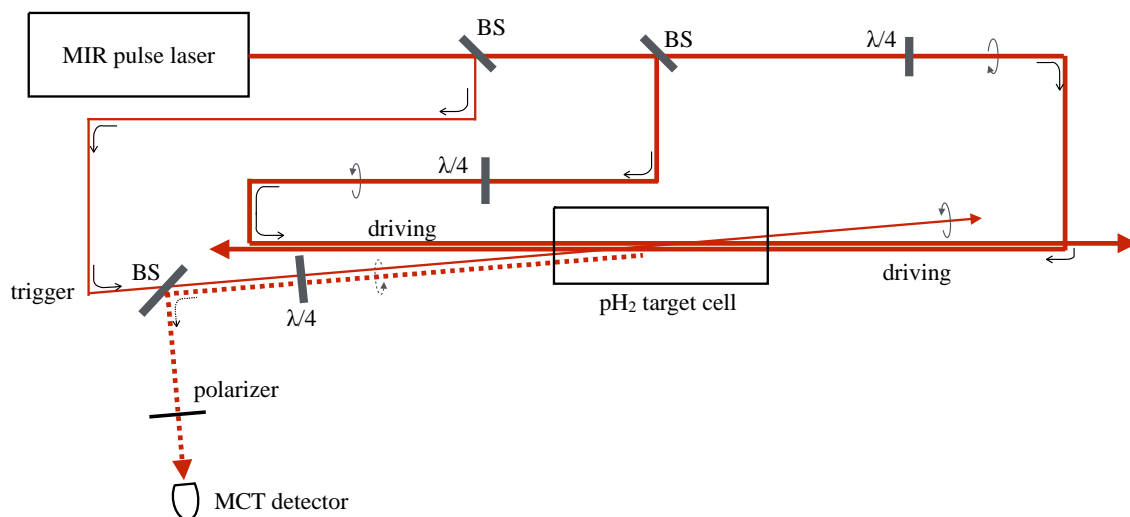


図2 対向励起実験セットアップ概要。左上の MIR pulse laser (中赤外パルスレーザー)からのパルス光をパラ水素ガス標的に入射している。BS:ビームスプリッター。  $\lambda/4$ :  $\frac{1}{4}$ 波長板。

### 4. 研究成果

パラ水素ガス標的を対向パルスレーザーで第一振動励起準位に励起し、そこからのコヒーレント増幅された対向二光子放出の観測に成功した。二光子放出レートの各種依存性(レーザー周

波数離調・標的ガス圧・励起パルスエネルギー)を評価した。

数値計算では対向型励起放出の時間空間発展を解くため、Method of Lines 法を用いた Maxwell-Bloch 方程式を実装した。空間離散化には Weighted Essentially Non-Oscillatory 法を、時間発展には Bulirsch-Stoer アルゴリズムを採用することで、安定した数値計算を実現した。この場合  $0(10^4)$  の連立常微分方程式を解く必要があるが、並列コンピューティングの手法を用いることで、汎用的なラップトップコンピュータでも短時間でパラメータスキャンすることを可能にした。

図 3 に実験結果と数値シミュレーションの比較例を載せる。共鳴ピークの線幅、パラ水素ガス圧依存性とも両者はよく一致しており、モデルの妥当性を示す結果と言える。本研究によって対向型ジオメトリにおけるマクロコヒーレント増幅機構の理解を進めることができた。これは将来のニュートリノ質量分光にとっての重要なステップである。

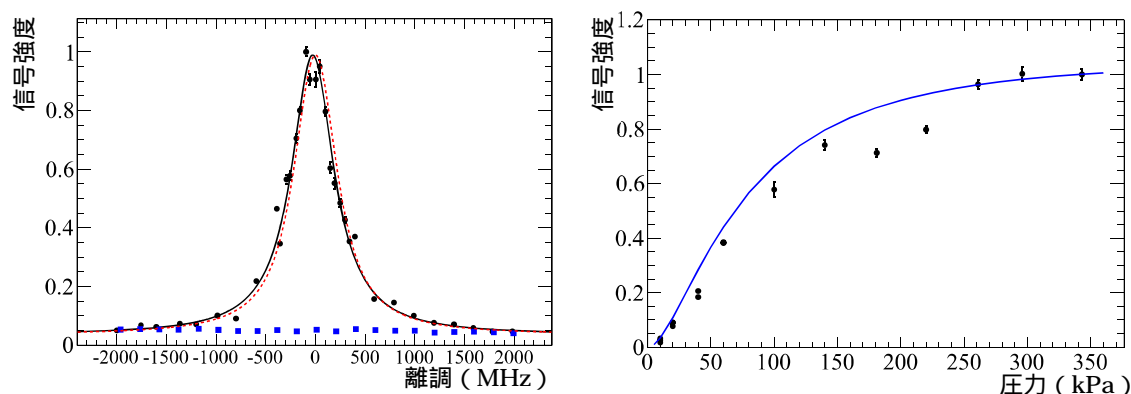


図 3 (左) 対向型二光子放出の共鳴ピーク。図 2 のような円偏光を入射した場合が黒点、一方のポンプ光の円偏光を逆向きにした場合が青点である。黒線はローレンツ型関数とオフセットの和でのフィット結果である。赤点線が数値シミュレーション結果を示している。(右) 対向型二光子放出信号強度のパラ水素ガス圧依存性。黒点が実験データ、青線が数値シミュレーション結果。両者とも 350kPa の値を 1 に規格化している。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

1. Takahiro Hiraki, Hideaki Hara, Yuki Miyamoto, Kei Imamura, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura, Motohiko Yoshimura,  
“Coherent two-photon emission from hydrogen molecules excited by counter-propagating laser pulses”,  
Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics **52** (2019) 045401.  
査読あり, doi:10.1088/1361-6455/aafbd0

[学会発表](計 6 件)

1. Kei Imamura, “Rate amplification of the multi-photon process toward neutrino mass spectroscopy”, Fundamental Physics Using Atoms 2019 (2019).
2. 平木貴宏、他、「ニュートリノ質量分光のための対向レーザーによるコヒーレント二光子放出実験」日本物理学会 2018 秋季大会 (2018)
3. 宮本祐樹、他、「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 秋季大会(2018)
4. Hideaki Hara for the SPAN collaboration, “Coherent two-photon emission from hydrogen molecules towards neutrino mass spectroscopy”, International Conference on Atomic Physics 2018 (2018)
5. 平木貴宏、他、「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)
6. Takahiko Hiraki for the SPAN collaboration, “Coherently amplified multi-photon emission toward neutrino mass spectroscopy”, 10<sup>th</sup> International workshop on Fundamental Physics Using Atoms (2018).

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、研究者個人に帰属されます。