

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 13 日現在

機関番号：15301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26887026

研究課題名(和文)ニュートリノ質量測定のための、水素ガスからの二光子対超放射の制御方法開発

研究課題名(英文) Research and development of external control of paired-superradiance from hydrogen gas toward the neutrino mass measurement

研究代表者

増田 孝彦 (Masuda, Takahiko)

岡山大学・極限量子研究コア・助教

研究者番号：90733543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：原子を用いたニュートリノ質量測定を目指し、原理実証の一つである、外部トリガによって誘導されたコヒーレントな二光子放出を観測した。実験では78Kに冷却した60kPaのパラ水素ガスに532nm, 684nm, 4587nmの3色のパルスレーザーを入射し、二光子放出の信号である5048nmを観測する方法を用いた。検出信号強度は自然放出に比べ10の18乗以上の増幅を示した。レーザーパワー依存性や時間依存性などを検証し、数値計算による定性的な理解が得られた。

研究成果の概要(英文)：The externally-triggered coherent two-photon emission has been observed. This phenomenon is one of essential parts of future neutrino mass measurement using atoms. In the experiment, three-color laser pulses (532, 684, 4587 nm) were simultaneously irradiated into 60-kPa para-hydrogen gas cooled down to 78K, and the pulses of 5048 nm which is two-photon emission signal were detected by photo-detectors. The resulting amplification factor against the spontaneous emission rate has been more than 10^{18} . Laser power dependence and trigger timing dependence were also studied, and they were able to be explained by a numerical simulation qualitatively.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：二光子放出 ニュートリノ パラ水素

1. 研究開始当初の背景

現在知られている素粒子の中でニュートリノには特に未知の性質が多く残されている。近年のニュートリノ振動実験の進歩によって3世代の混合角は測定できたが、その他重要なパラメータである、質量・粒子型(ディラック型かマヨラナ型か)・CP位相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、 ^3H や ^{187}Re など、 β 崩壊核種を用いた直接測定、 ^{136}Xe や ^{76}Ge などを用いた、ニュートリノレス二重 β 崩壊($0\nu\beta\beta$)の寿命測定による間接測定など、世界中で実験が進められている。

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。

本グループはこれまで、RENPよりも発生頻度が高い、二光子対超放射に着目し、マクロコヒーレント増幅機構の実証を進めてきた。二光子対超放射とは、RENPのニュートリノ対の代わりに光子を放出する過程である。本グループは本研究課題に先だて、水素ガス標的と2色のレーザーを用いて、この二光子対超放射の発生に成功していた。

2. 研究の目的

本研究課題では、新たに外部トリガを導入することでコヒーレンス生成条件と二光子対超放射誘導条件を切り分け、二光子対超放射の強度や時間応答の実験条件依存性を系統的に測定する。得られた依存性を数値シミュレーションで評価し、増幅機構の詳細の解明と、今後の実験立案のための数値計算コードの整備を目的としている。

3. 研究の方法

本課題では、パラ水素ガス・コヒーレンス生成用532 nmレーザー及び684 nmレーザー(以下ドライビングレーザー)・トリガ用中赤外パルスレーザー(以下、トリガレーザー)を用いる。3色のパルスレーザーをパラ水素ガス標的に打ち込むと、二光子放出が増幅され5048nmの信号光が発生する。概念図を図1に示す。

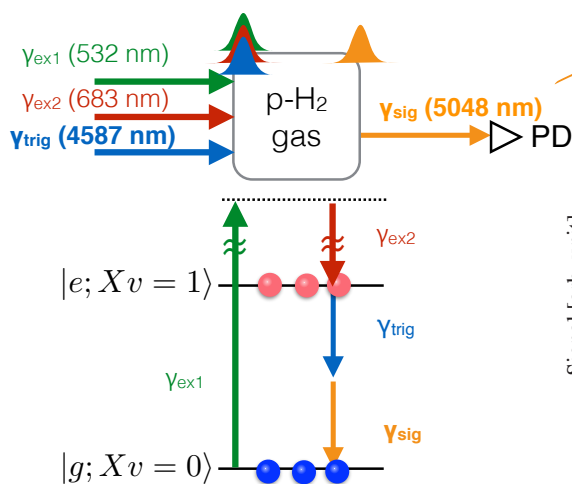


図1 外部トリガ実験概念図

このうちパラ水素ガス・ドライビングレーザーは既存設備を使用するため、本研究においての主要な技術開発要素はトリガレーザーである。

二光子放出の信号はMCT(Hg-Cd-Te)検出器で測定し、分光器による波長測定と、波長選択フィルタによる絶対強度測定を併用して、数値シミュレーションと比較するためのデータ取得を行う。

数値シミュレーションは、コヒーレンスによるラマン光発生の先行研究でも用いられていたMaxwell-Bloch方程式を応用する。これは原子集団の発達を密度行列で表すBloch方程式と電磁波の伝播を表すMaxwell方程式を組み合わせたものであり、本研究の現象にも応用可能であると考えられる。

4. 研究成果

(1) 中赤外パルスレーザー開発

当初の実験セットアップでは、トリガレーザーのポンプ光源に、ドライビングレーザーと同じNd:YAGレーザーを使用し、非線形光学結晶を用いてPPLN+LBO+PPLNの3段階の波長変換を行い、そのシード光に865nm及び1068nmの自作外部共振器型CWレーザーを用いた。約20uJの中赤外光の発生に成功したが、一方で安定性に問題があることもわかった。

2015年初頭から、パワー増強と安定性の向上を目的に、新規セットアップの構築を開始した。新しいセットアップではトリガレーザーのポンプ光源に、他と独立のNd:YAGレーザーを用意し、非線形光学結晶をPPLN+LBO+KTAの組に交換、シード光には864nmの自作外部共振器型CWレーザーを用いた。前回のセットアップでの不安定性の主要因は開口部が0.5×0.5mmしかないPPLNを2つ使用していたことであったため、開口部4×4mmのバルクのKTAを用いることにより安定性の改善を見込んだ。またPPLNは波長変換効率が高過ぎ、ポンプ光をあまり導入でき

ないという問題もあったため、バルクの KTA で強いポンプ光を入れられるようにすることで高出力化も見込んだ。結果、トリガレーザー出力 400uJ を超え、一週間以上にわたり調整不要の安定なトリガレーザーの開発に成功した。開発したトリガレーザーの概要と写真を図 2 に示す。

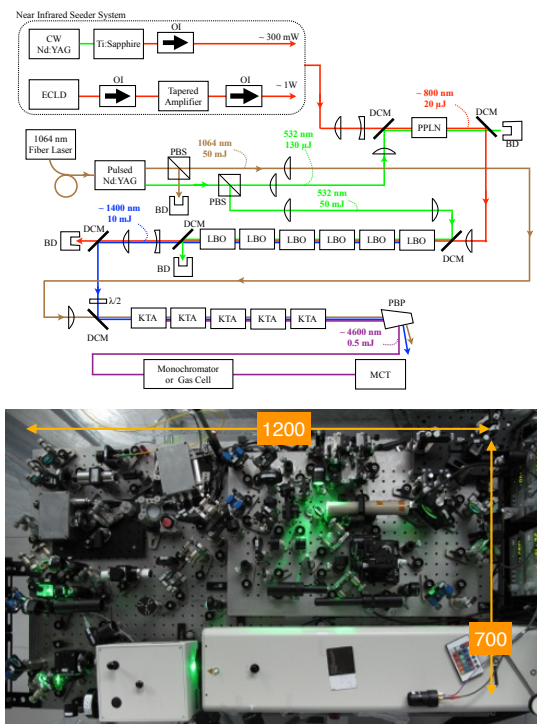


図 2 トリガレーザー概要(上)と写真(下)

(2) 外部トリガによるコヒーレントな二光子放出の確認

開発したトリガレーザーを、既存のドライビングレーザーに同期させ、パラ水素ガスターゲットに打ち込んだ。実験セットアップを図 3 に示す。

分光器による波長測定では、計算と一致する 5048nm の発生を確認(図 3)し、二光子放出が起きていることを実証した。さらに波長選択フィルタを用いた強度測定の結果、自然放出に比べ 10^{18} 倍の強度が出ていることを確認した。

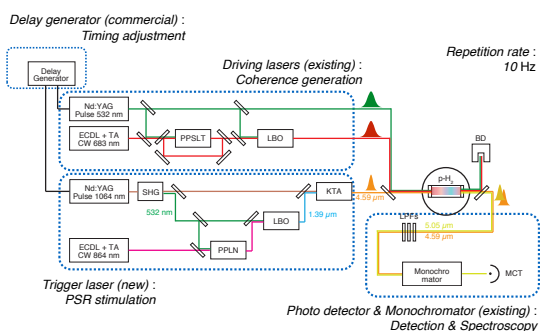


図 3 外部トリガ実験セットアップ

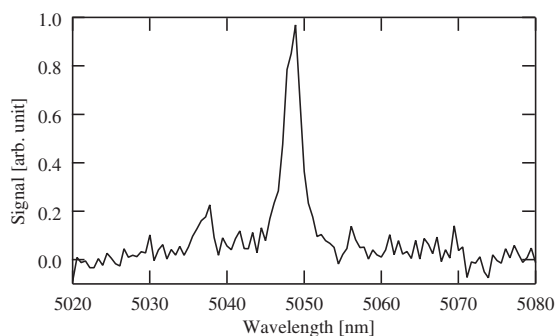


図 4 外部トリガによる二光子放出のスペクトル

(3) 数値シミュレーション

外部トリガの導入によって、パラメータの自由度が増え、数値シミュレーションとの詳細比較が可能となった。本研究では主に外部トリガの時間と強度が、信号にどのように影響するかを考察した。数値計算では外部トリガの強度と信号強度には線形の関係があることが示されるが、実験でも測定精度の範囲内で線形である結果が得られた。また外部トリガを、ドライビングレーザーからやや(2ns程度)遅らせて入射すると最も信号が強くなるという現象も計算と実験で一致する結果が得られ、コヒーレンスによる信号増幅に矛盾しない実験であることが示された。

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 2 件)

1. 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. **2015** 081C01, doi:10.1093/ptep/ptv103 (2015) [査読有].
2. T. Masuda, H. Hara, Y. Miyamoto, S. Kuma, I. Nakano, C. Ohae, N. Sasao, M. Tanaka, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura, "Rate amplification of the two photon emission from para-hydrogen toward the neutrino mass measurement", Hyperfine Interactions **236** 73, doi:10.1007/s10751-015-1177-1 (2015) [査読有].

[学会発表] (計 5 件)

1. 増田孝彦、「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」日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 21 日、東北学院大学(宮城県

- 仙台市).
2. T. Masuda, “Recent progress of SPAN towards neutrino mass spectroscopy”, 14th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, 2015/9/9, Trin (Italy).
 3. 増田孝彦, 「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ス増幅機構の詳細研究 I」 日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 22 日、早稲田大学(東京都新宿区).
 4. 増田孝彦, 「ニュートリノ質量分光に向けた、コヒーレンスによる二光子対超放射の観測」 21th ICEPP シンポジウム、2015 年 2 月 10 日、長野県白馬村.
 5. T. Masuda, “Rate amplification of the two photon emission from para-hydrogen toward the neutrino mass measurement”, The 6th international conference on Trapped Charged Particle and Fundamental Physics, 2014/12/2, Kagawa (Japan).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 孝彦 (MASUDA TAKAHIKO)
岡山大学・極限量子研究コア・助教
研究者番号：90733543