

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月28日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18779

研究課題名(和文)ニュートリノ質量分光に向けた位相共役波観測によるマクロコヒーレント増幅機構の検証

研究課題名(英文)Test of macro-coherent amplification by observing phase conjugate wave toward neutrino mass spectroscopy

研究代表者

宮本 祐樹 (Miyamoto, Yuki)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任講師

研究者番号：00559586

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題ではニュートリノ質量分光の構成要素の一つであるコヒーレンス増幅の原理検証として、対向する二つの光子で励起された気相水素分子の振動状態からの位相共役二光子放出を観測した。観測された二光子放出の振る舞いはマクスウェル・ブロッホ方程式やそれを簡略化したモデルによる計算で良く再現され、コヒーレンス増幅の理解が深まった。さらにターゲットを固体水素とすることで、高密度・高コヒーレンス状態における検証も行った。同時に観測される三倍波と二光子放出では時間的振る舞いに相違があることがわかり、コヒーレンス増幅におけるジオメトリの重要性を示す結果が得られた。この現象の詳細な理解は今後の課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒッグス粒子の発見により素粒子の標準理論が完成した現在、素粒子研究は標準理論を超える物理を探求するフェーズに移行した。そこで突破口の一つと考えられるのが、未だ謎の多いニュートリノである。そのためニュートリノ質量分光によりニュートリノの未知の性質を明らかにすることは重要である。本研究によりニュートリノ質量分光の重要要素であるコヒーレンス増幅の検証は十分なレベルに達し、今後、研究は新たな段階に進むことになる。本研究の成果の意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Coherence amplification is an essential process for neutrino mass spectroscopy. We have verified the mechanism under the same geometry as the neutrino mass spectroscopy by observing phase-conjugate two-photon emission from vibrational state of gaseous hydrogen molecules excited by counter-propagating laser pulses. The observed results agree with calculations by Maxwell-Bloch equations or their simplified versions. Furthermore, we observed the two-photon emission from solid hydrogen. Solid hydrogen is known as quantum solid and have high density and long coherence time. It was found that mutual timing dependence of the two-photon emission is different from that of the third harmonics which is observed simultaneously. This result indicates the importance of the geometry on coherence amplification. Further works are desired to understand this phenomenon.

研究分野：分子科学

キーワード：ニュートリノ質量分光 位相共役波 水素分子 二光子放出

1. 研究開始当初の背景

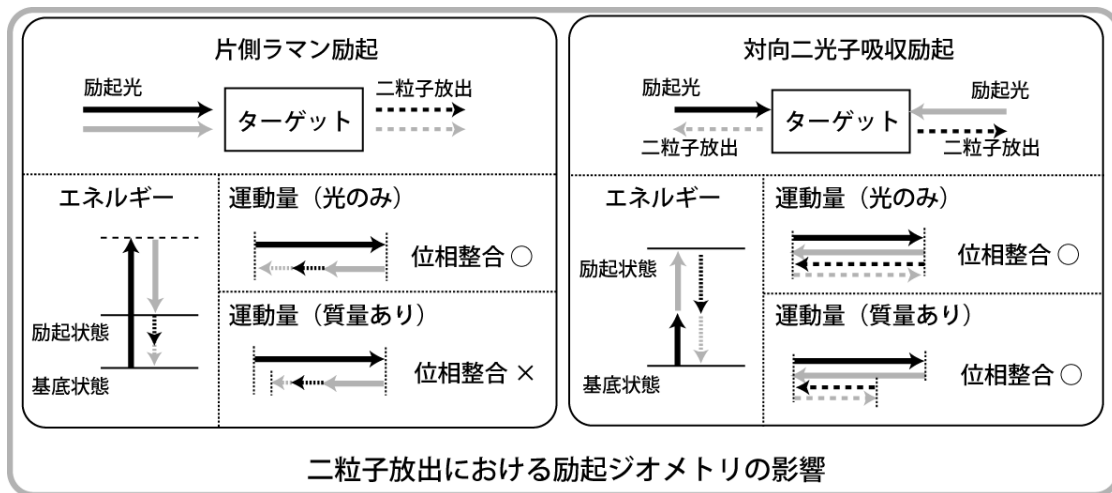
近年、振動実験による混合角の決定などニュートリノの性質は次々と解明されてきた。しかし未解決の「質量絶対値」や「質量様式(マヨナラ/ディラック)」といった問題は、標準理論をこえる物理を構築するための重要課題であり、今なお世界中で盛んに研究が行われている。

これらニュートリノ物理に残る課題を解決する手法として、吉村らは原子を利用する「ニュートリノ質量分光」を提案した。この手法では、励起された原子からニュートリノ対と光子が同時に放出される過程(光子随伴ニュートリノ対放出)において、光子スペクトルに、ニュートリノの「質量絶対値」や「質量形式」などの豊富な情報が含まれることを利用する。光子のスペクトルは分光学的手法により比較的容易に測定できるため、上記の未解決課題に対する有力な手法となりうる。一方で、光子随伴ニュートリノ対放出はレートが小さいという欠点を持つが、この欠点は原子系のコヒーレンスを利用することによって克服することができる(マクロコヒーレント増幅)。これはコヒーレントなN粒子系のイベントレートが N^2 に比例することを用いたもので、ニュートリノ質量分光の実現にとって必須の原理である。

光子随伴ニュートリノ対放出は標準理論の枠内で存在が確実であるが、マクロコヒーレント増幅が理論通りに機能するかは不明であった。そこで申請者らはその検証のため、二光子放出の増幅を試み、水素分子の振動準位間の二光子放出レートを 10^{18} 以上増幅することに成功した。これはニュートリノ質量分光に向けた最初の実験的成果である。

2. 研究の目的

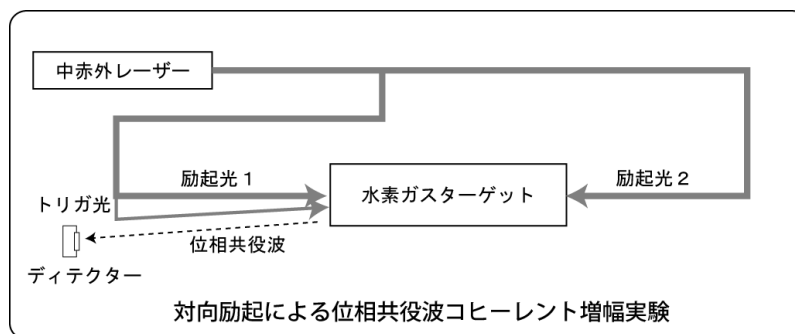
しかし、この検証実験には問題があった。検証で使われた励起ジオメトリはニュートリノ質量分光に適用できないのである。下図に二粒子放出における励起ジオメトリの影響を示す。これまでの検証実験では、コヒーレンス生成に片側から2本のレーザー光を入射しラマン散乱により行っていた(下図左)。このような励起方法では、質量を持つ粒子を放出するとエネルギーと運動量の保存則を同時に満たす解が存在しない(光子随伴ニュートリノ対放出は3粒子放出であるが、同様である)。これは量子光学の言葉でいえば「位相整合が満たされない」ということであり、コヒーレント増幅が起こらない(建設的干渉しない)。そこで本課題の目標は、ニュートリノ質量分光に直接適用可能なジオメトリ(対向二光子吸収励起)でのマクロコヒーレント増幅機構の検証であった。



3. 研究の方法

上記の位相整合の問題を解決する方法として、励起に対向二光子吸収を用いることが挙げられる。対向二光子吸収励起の場合にはエネルギーと運動量両方の保存則を満たす解が存在するのである(上図右)。このようにニュートリノ質量分光に用いるマクロコヒーレント増幅において、励起ジオメトリによる違いは本質的なものであり、これまで単一のジオメトリでしか検証されていなかった本機構を、ニュートリノ質量分光に対応したジオメトリで検証することは、ニュートリノ質量分光へ向けた重要なステップである。検証はこれまで同様に二光子放出を用いる。このとき放出される二つの光子は位相共役の関係にあり、進行方向は完全に逆向きになる。この位相共役波発生のマクロコヒーレント増幅を観測することで検証を行う。

実験の模式図を示す(下図)。中赤外パルスレーザー光を二つの励起パルスとトリガパルスに分け、水素ガスターゲットに入射する。励起パルスにより十分なコヒーレンスが得られれば、トリガ光によって位相共役波発生が誘導され、トリガ光と逆向きのパルスが発生する。



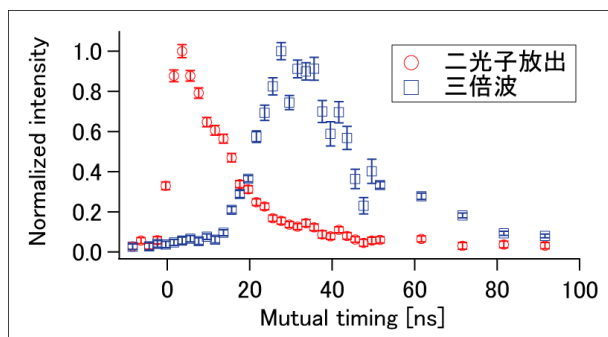
4. 研究成果

本課題のためには高強度かつ狭線幅な中赤外パルス光源が必要であった。しかし必要な性能を有するレーザー装置は市販では手に入らず、また代表者がこれまでに作成してきた装置でも不十分であるため、まず光源開発を行った。中赤外光パルスは、大強度 Nd:YAG レーザーのパルス波長を非線形光学結晶により多段階に変換することで生成した。初段では光パラメトリック発生により波長可変の近赤外光を発生させる。この時に線幅の狭い連続波を同時に入射し、線幅を狭窄化した。これまで用いていたレーザーシステムでは初段に疑似位相整合を用いていたため、線幅がフーリエ限界よりも大きくなっていた。本課題で作成したシステムでは温度位相整合を用いることで線幅の大幅な狭窄化(およそ5倍程度)を達成した。ただし、利得が以前よりも小さいため、非線形結晶をキャビティ内に設置した。発生させた近赤外光を光パラメトリック増幅した後、Nd:YAG レーザーとの間で差周波発生を行い、目的の中赤外光を得た。得られた中赤外光は出力およそ 5 mJ、線幅 200 MHz であり、本研究に十分な性能が得られた。この中赤外光を用いてすでに位相共役波の発生を確認した。

上記で開発した光源から得られる中赤外パルスを二つの励起光とトリガ光の三つに分け、位相共役コヒーレント増幅実験を行い、想定通りにトリガ光と逆行する形の二光子放出の観測に成功した。得られた二光子放出シグナルからディテクターの感度などを使って二光子放出強度を見積もると、現在の実験条件下ではおよそパルスあたり 20 nJ の二光子放出パルスが放出されていることがわかった。これはマクスウェル・ブロッホ方程式を用いて行った数値計算のおよそ 10% である。数値計算が実験的な不完全性や空間的広がりを無視していることなどを考慮すると妥当であると言えよう。観測された二光子放出強度の波長依存性や励起強度依存性、ガス圧依存性などを、マクスウェル・ブロッホ方程式による計算で定性的に再現することが出来、対向励起におけるコヒーレンス増幅の理解を深めた。これらの結果は論文として発表している(5. 主な発表論文等[雑誌論文]の2)。

さらに理解を深めるため、トリガ光を別の赤外パルス光源から得る事でポンプ・プローブ式の測定を行った。トリガ光を別光源にしたことで、二光子放出強度のトリガ光波長依存性と励起パルスとトリガパルス間の時間差に対する依存性を測定することが出来た。得られたトリガ光波長依存性は空間次元モデルから予想されるスペクトル形よりも線幅が数倍広がっていた。この観測結果は空間的な広がりの位相整合条件への影響を考慮することで再現できることが、シンプルな幾何学的モデルを取り入れて近似した数値計算により明らかにした。励起・トリガ間の時間差への依存性も近似計算により再現され、対向励起型コヒーレンス増幅を記述するシンプルな描像を得ることが出来た。これらの結果については現在論文投稿中である。

ターゲットを気相の水素分子ガスから固体水素に変更した実験も行った。固体水素は量子固体と言われ、高密度かつコヒーレンス時間が長いという特徴を持つ。励起光、トリガ光ともに直線偏光にすることで、三倍波と二光子放出を同時に観測することが出来る。この時二光子放出はトリガ光と逆向きに発生するが、三倍波はトリガ光と同方向に発生する。二光子放出と三倍波の強度の励起光とトリガ光の時間差に対する依存性を右図に示す。



二光子放出は励起光とトリガ光をほぼ同時に入れた場合に強度が最大になるが、三倍波は励起光からトリガ光を 40 ns 程度遅れて入射した場合に信

号強度が強い。つまり同時に観測される二光子放出と三倍波が異なる依存性を示すことがわかった。これは、三倍波と二光子放出では関与するコヒーレンスが位相の異なるものであることから（なぜならば二光子放出に関わるコヒーレンスは対向して進むパルスによって作られる一方で、三倍波に関わるコヒーレンスは同方向に進むパルスによって作られるからである）位相の異なるコヒーレンスが異なる時間発展をしていると考えることが出来る。その詳細については未だ理解が出来ておらず今後の課題であるが、本課題が目指すコヒーレンス増幅の理解の上で重要な現象である。この結果については論文準備中である。

以上のように、対向型コヒーレンス増幅の理解は本課題により大きく深化し、ニュートリノ質量分光のための検証としてはすでに十分なレベルに到達したと言ってよい。今後、ニュートリノ質量分光研究は新たなステージに進み、具体的なターゲット探索やバックグラウンドの研究などを行うことで、その実現を目指していきたい。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. Takahiro Hiraki, Hideaki Hara, Yuki Miyamoto, Kei Imamura, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura, and Motohiko Yoshimura
“Coherent two-photon emission from hydrogen molecules excited by counterpropagating laser pulses”

J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 52, 045401 (2019).

doi: 10.1088/1361-6455/aafbd0

査読あり

2. 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).

doi: 10.1103/PhysRevA.96.063827

査読あり

〔学会発表〕(計 8 件)

1. 宮本祐樹、SPAN コラボレーション 「固体パラ水素のコヒーレント二光子遷移」第 19 回分子分光研究会 (2019)

2. Kei Imamura, “Rate amplification of the multi-photon process toward neutrino mass spectroscopy”, Fundamental Physics Using Atoms 2019 (2019).

3. 平木貴宏、原秀明、今村慧、増田孝彦、宮本祐樹、笹尾登、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)

4. 宮本祐樹、原秀明、平木貴宏、今村慧、増田孝彦、笹尾登、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)

5. Hideaki Hara for the SPAN collaboration, “Coherent two-photon emission from hydrogen molecules towards neutrino mass spectroscopy”, International conference on atomic physics 2018 (2018).

6. Yuki Miyamoto for the SPAN collaboration, “Coherence in a cold quantum matrix”, International conference on atomic physics 2018 (2018).

7. 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)

8. Takahiko Hiraki for the SPAN collaboration, “Coherently amplified multi-photon emission toward neutrino mass spectroscopy”, 10th International workshop on Fundamental Physics Using Atoms (2018).

〔その他〕
ホームページ等
岡山大学 異分野基礎科学研究所 量子宇宙研究コア
<https://www.xqw.okayama-u.ac.jp/>

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。