

研 究 報 告 書

「原子コヒーレンスによる微弱 QED 過程の極限制御」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 植竹 智

1. 研究のねらい

本研究では、光と物質のコヒーレント相互作用の極限操作により、弱い相互作用を含む電弱過程を人為的に制御する方法の確立を目指すことと、それにより標準理論を超えた物理の構築へ貢献することを長期的な目標としている。2012 年のヒッグス粒子発見により、建設から数十年を経て標準理論は確立した。数々の輝かしい成功の一方で、ニュートリノが質量を持つことや、宇宙の物質・反物質不均衡、暗黒物質・暗黒エネルギーの存在など、標準理論では説明できない現象も明らかになっており、これらの現象を説明できる新しい理論が必要とされている。標準理論を超えた物理の構築と、これと密接に関連したニュートリノの性質解明は、現代の基礎物理学における喫緊の課題と言える。本研究は、この課題に AMO (Atomic Molecular and Optical Physics) 分野で発達した「媒質のコヒーレンスによる放射レート増幅」の手法を用いて挑戦していく。具体的には、原子や分子の準安定励起状態から光子を伴ってニュートリノ対を放射する過程 (Radiative Emission of Neutrino Pair: RENP 過程) の発生レートを、媒質のコヒーレンスを用いて大幅に増強し観測する。これにより未解明のニュートリノ基本パラメータである質量絶対値や質量タイプ (ディラック型かマヨラナ型か) などを精密に測定することが究極的な目標である。

RENP 過程は理論的な可能性が指摘されているだけであり、実現は容易ではない。RENP 過程観測という長期目標の実現に向け、本研究ではその基盤技術開発を進めることを研究期間中の目標とする。具体的には、(1) 原子・分子集団にマクロスケールの大きなコヒーレンスを生成するために必要となる高品質レーザー光源開発を進め、(2) 開発したレーザーを用いて生成した「コヒーレントな物質」を用い、微弱な QED 過程である多光子放射過程の発生レートを大幅に増強し観測する。そして(3) Maxwell-Bloch 方程式による数値シミュレーションと実験結果の比較により、光と物質の非線形光学応答に対する理解を深めていくことが目標である。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、原子・分子集団に高いコヒーレンスを生成し、生成した「コヒーレントな物質」を用いて微弱な QED 過程である多光子放射過程の発生レートを増強して観測することが目標である。このために必要な狭線幅・ハイパワー光源は、その発振波長を原子・分子の遷移波長に合わせる必要があり、市販レーザーでは対応できない。このためまず、対象とする水素分子 (波長 4.8 μm) および Xe 原子 (波長 298 nm) の遷移波長に合わせた光源を独自に設計し、開発を進めた(研究項目 A)。開発した光源を用い、水素分子の振動励起状態からの E1 \times E1 二光子放射レートを高めて観測する。原子・分子コヒーレンスを使った 1 光子放射レートの大幅な増強は「超放射」として知られているが、本研究はそれを二光子放射過程に拡

張したもので、二光子対超放射 (Paired Super-Radiance: PSR)」と呼んでいる。パラ水素分子を用いた PSR 観測は本研究開始以前に成功していたが、本研究でさらにこの技術の応用可能性を探る研究や、Maxwell-Bloch シミュレーションとの比較により発生機構の理解を深める研究を進めた (研究項目 B)。また、基底状態とパリティの異なる準安定状態を持つ Xe 原子を対象に、開発したレーザーによりコヒーレンスを生成し、微弱な QED 過程である $E1 \times M1$ や $E1 \times E2$ 型の二光子放射観測を目指した研究を進めた (研究項目 C)。

(2) 詳細

研究テーマ A「原子・分子間コヒーレンス生成のための基盤技術開発」

高いコヒーレンスを持つ原子集団とは、個々の原子の基底-準安定励起状態間の重ね合わせの位相が、数 cm というマクロなスケールで一致した状態のことを指す。このような状態を実現するには、遷移に共鳴する波長で線幅の十分狭いコヒーレントなレーザーを用いる必要がある。また、多数の原子を準安定状態へ励起するには二光子励起が有利なため、ピーク強度の高い光源が必要である。この要求を満たす光源として、ナノ秒程度のパルス幅を持ち、線幅 100 MHz 程度 (フーリエ限界) の光源を独自に設計し開発を進めた。

パラ水素分子の振動励起状態への励起および PSR を誘起するために必要な光源として、本研究では波長 $4.8 \mu\text{m}$ 、パルス出力 5 mJ、パルス幅 5 ns、線幅 150 MHz (ほぼフーリエ限界) の中赤外パルス光源を開発した。光源は図 1 (a) に示すような 3 段構成になっている: 初段の注入同期光パラメトリック発生 (Injection-seeded OPG) では、線幅 1MHz 以下の外部共振器型半導体レーザー (ECDL) を光アンプ (TA) で増幅した連続波発振光を種光として非線形光学結晶 LBO へ入射し、波長 871 nm および 1367 nm の狭線幅パルス光を生成する。これを 2 段目の光パラメトリックアンプ (OPA) で増幅した後 1367 nm のみを取りだし、最終段で非線形光学結晶 KTA による差周波発生 (DFG) により $4.8 \mu\text{m}$ の中赤外光を発生させた。パラ水素分子にコヒーレンスを生成するために十分な性能を得ることができ

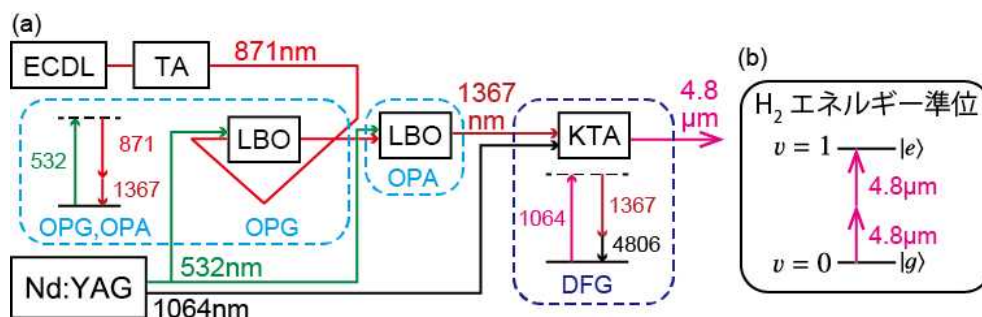


図 1(a) 開発した水素分子励起用狭線幅中赤外パルス光源、(b) 水素分子エネルギー準位

た。
次に Xe 原子のコヒーレンス生成に必要な波長 298 nm の光源開発を進めた。図 (a) に示す 4 段の構成になっている: 初段は水素分子励起用光源と同様の手法により、波長 875 nm の狭線幅パルス光を発生させる。これをチタンサファイア (Ti:S) 結晶を用いたマルチパスアンプにより増幅して LBO 結晶へ入射し、Nd:YAG レーザー 3 倍波 (波長 355 nm) との差周波である 596 nm のパルスを生成する。これを LBO 結晶により 2 倍波に変換し 298 nm を

得る。得られた 298 nm はパルス出力 8 mJ、パルス幅 2.7 ns、線幅 250 MHz (ほぼフーリエ

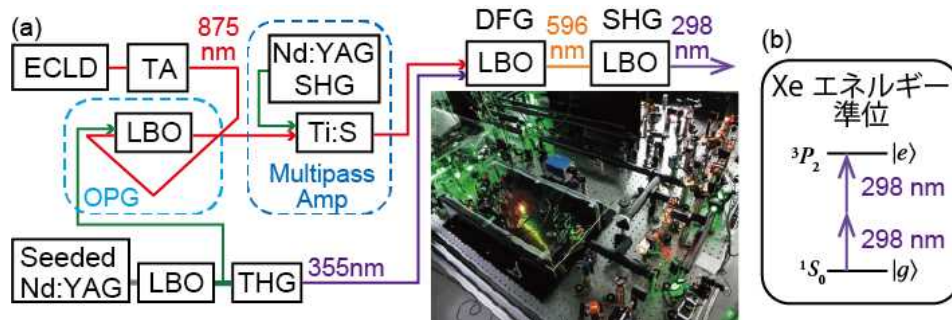


図 2 (a) 開発した Xe 原子励起用狭線幅紫外パルス光源, (b) Xe 原子エネルギー準位

限界) であり、目標とする Xe 原子のコヒーレンス生成に十分な性能を得られた。

研究テーマ B 「パラ水素分子による E1 × E1 二光子放射過程の詳細研究」

本研究では PSR を応用することで、数十テラヘルツ帯で線幅 100 MHz 程度の狭線幅かつハイパワーを得られるナノ秒パルス光源としても利用可能であることを示した (論文リスト 3)。この研究では、図 3 に示すように波長 532 nm と 683 nm のパルス光によるラマン励起でパラ水素

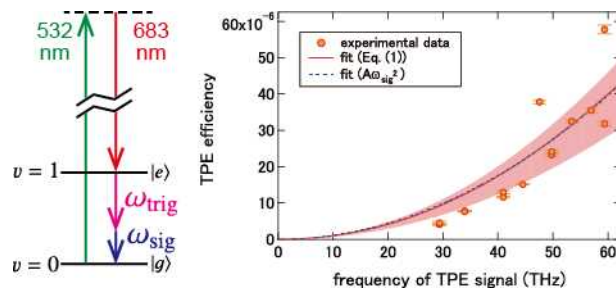


図 2 パラ水素による遠赤外波発生

のコヒーレンスを生成した。コヒーレンス生成と同時に 3.1 μm ~ 4.8 μm の範囲で波長可変な中赤外光源をトリガ光として入射することで、波長 4.9 μm ~ 10 μm (60 THz ~ 30 THz) のシグナル光を得た。図 3 に示すように理論的な予想とも良く一致している。現時点では変換効率が 10^{-5} 程度と低い、これはコヒーレンス生成光源の出力が 5mJ 程度しか無かったためである。光源パワーを上げることでさらに高い変換効率を得ることは可能である。

また、本研究で開発した波長 4.8 μm の中赤外光源を用いて、対向入射によるラダー型コヒーレンス生成 (図 1b) と PSR 観測にも成功した。同方向のラマン励起ではドップラー広がり decoherence の要因となるが、対向励起ではこれをキャンセルできる。また、RENP 過程実現やニュートリノの質量タイプ (ディラック粒子かマヨラナ粒子か) を判別するためには、対向励起が重要であることが理論家との共同研究でわかっている (論文リスト 4)。対向励起によるコヒーレンス生成と PSR 発生のメカニズムを詳細に理解するため、数値シミュレーションコードを開発し実験との比較を進めた。基本となる方程式は、Maxwell-Bloch 方程式と呼ばれる時間・空間の連立偏微分方程式である。入射レーザーと原子・

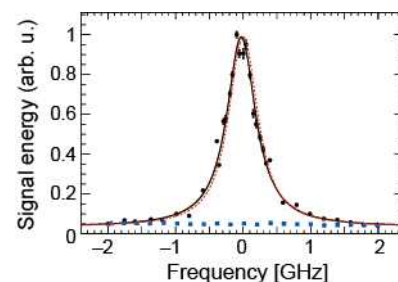


図 3 パラ水素の対向励起による PSR 発生。赤破線の Maxwell-Bloch シミュレーションと実験結果 (黒丸) は良く一致している。

分子の相互作用により生じる分極を Bloch 方程式で記述し、媒質中の電磁波伝搬を表す Maxwell 方程式と組み合わせた方程式である。本研究で Maxwell-Bloch 方程式による対向励起のシミュレーションコードを開発し、実験結果と比較した。図 4 に示すように、シミュレーションの結果（赤破線）は実験データ（黒丸）を良く再現しており、開発したシミュレーションコードが適切であることを示している。その他、水素分子密度と PSR 強度の関係や、コヒーレンス生成光とトリガ光の入射角度依存性などの詳細を調べ論文としてまとめた（論文リスト 1、2）。

研究テーマ C 「Xe 原子による $E1 \times (M1+E2)$ 二光子放射レート増幅の研究」

パラ水素分子は基底状態と準安定状態が同じパリティであり、 $E1 \times E1$ 二光子遷移許容である。一方、基底状態と準安定状態のパリティが異なる原子では $E1 \times E1$ 二光子遷移が禁制となり、 $E1 \times M1$ 二光子遷移などのより微弱な QED 過程のレート増幅を実現・観測するために適している。本研究では $E1 \times (M1+E2)$ 二光子放射レートの増幅を目指し、開発した 298 nm パルス光源を用いて Xe のコヒーレンス生成実験を進めた。現在 10^6 個以上の Xe 原子を準安定状態へ励起し、コヒーレンスを生成することには成功しているが、 $E1 \times (M1+E2)$ 二光子放出の検出はまだ実現に至っておらず、研究途上である。現在理論家との共同研究により、Xe 原子の様々な電子励起状態間の M1 遷移や E2 遷移レートの理論値から二光子励起レートを求め、実験との比較を進めている。

3. 今後の展開

本研究で得られた成果・知見を更に発展させ、微弱な QED 過程の放射レート増幅を実現する。また、将来的な RENP 過程の実現には、高密度かつ低デコヒーレンスである媒質を用いることが重要である。高密度化のため、デコヒーレンスの小さい固体結晶中の不純物イオン準位を使った研究を展開する。対象とするイオンの共鳴準位に合わせた高品質レーザー光源開発については、本研究で十分な経験を得ることができたので、今後の開発は容易である。

4. 自己評価

本研究の目標の一つである高品質レーザー光源開発については、中赤外（4.8 μm ）から紫外（298 nm）に至る様々な波長でほぼフーリエ限界のパルス光源開発に成功した。光源の高出力化についても様々な知見・経験を得ることができ、ほぼ当初の目標を達成できたと思う。また、Maxwell-Bloch 方程式に基づくシミュレーションについても、パラ水素による対向励起実験を良く再現するプログラムができており、光と物質の非線形光学応答に対する理解はかなり深めることができたと考えている。一方で、目標として掲げた微弱な QED 過程である $E1 \times M1$ 二光子遷移の放射レート実現にはまだもう少し時間を要する見込みである。本研究で実現した Xe の二光子励起は過去に例が無いもので、現在理論家との共同で論文を準備中であるが、原著論文での発表は研究期間終了後となる見込みである。

以上のように、当初の目標を全て達成するには至らなかったが、RENP 過程観測という大目標の実現に向け、着実に前進していることは貴重な成果だと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. H. Hara, Y. Miyamoto, T. Hiraki, K. Imamura, T. Masuda, N. Sasao, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura and M. Yoshimura, Geometry-dependent spectra and coherent transient measurement of nearly degenerate four-wave mixing using two-photon resonance, J. Phys. B (in press)
2. T. Hiraki, H. Hara, Y. Miyamoto, K. Imamura, T. Masuda, N. Sasao, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura and M. Yoshimura, Coherent two-photon emission from hydrogen molecules excited by counter-propagating laser pulses, J. Phys. B vol. 52, no. 4, 045401 (2019)
3. H. Hara, Y. Miyamoto, T. Hiraki, T. Masuda, N. Sasao, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura, and M. Yoshimura, Frequency dependence of coherently amplified two-photon emission from hydrogen molecules, Phys. Rev. A, vol. 96, no. 6, 063827 (2017)
4. M. Tanaka, K. Tsumura, N. Sasao, S. Uetake, and M. Yoshimura, Effects of initial spatial phase in radiative neutrino pair emission, Phys. Rev. D 96, 113005 (2017)

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

該当なし