

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21878

研究課題名（和文）ニュートリノ質量分光に向けたマクロコヒーレンス増幅における幾何学的効果の検証

研究課題名（英文）Verification of geometrical effect on macro-coherence amplification 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・研究准教授

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）：本研究では、ニュートリノ質量分光の検証としてキセノンガスからの三光子放出を用いた実験を計画していたが、初年度の実験結果からキセノンガスはニュートリノ質量分光の標的に不適格であることが判明し、急遽結晶中のエルビウムイオンを新標的として選定し、次年度にはそのコヒーレント放射を観測し、凝縮相中でのコヒーレント現象の理解を深め、ニュートリノ質量分光の標的としての可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、ニュートリノの性質は次々と解明されてきた。しかし「質量絶対値」などの未解決の問題が残っており、これらは標準理論をこえる物理を構築するための重要課題として、今なお世界中で盛んに研究が行われている。本研究はニュートリノの謎に迫る新しい手法であるニュートリノ質量分光の検証をキセノンおよび結晶中のエルビウムイオンで行った。エルビウムイオンの結晶中でのコヒーレント現象の観測に成功し、その標的としての可能性を見出した。

研究成果の概要（英文）：In this research, we had planned to conduct an experiment using three-photon emission from xenon gas as a verification of neutrino mass spectroscopy, but the results of the first year's experiment showed that xenon gas was not a suitable target for the neutrino mass spectroscopy, so we selected erbium ions in crystals as a new target and observed coherent emission in the target. It allows us to deepen our understanding of coherent phenomena in the condensed phase, and found its potential as a target for the neutrino mass spectroscopy.

研究分野：分子科学

キーワード：ニュートリノ コヒーレンス 多光子過程 超放射

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

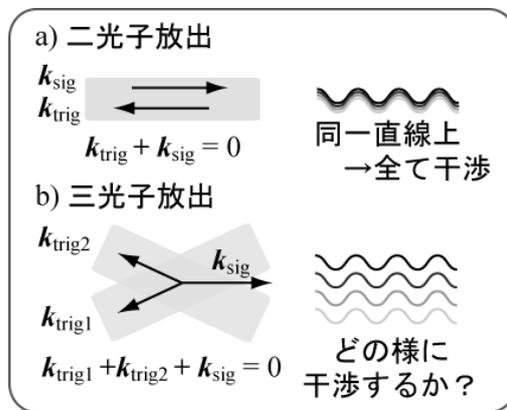
ヒッグス粒子の発見により素粒子の標準理論が完成した現在、素粒子研究は標準理論を超える物理(Physics Beyond the Standard Model; BSM)を探索するフェーズに移行したと言える。BSMへ挑戦する方法として有力なものの一つが、これまで観測されていない、つまり標準理論にない、粒子の発見である。実際 CERN の LHC をはじめとして多くの研究が新粒子発見を目指して稼働または準備中である。しかし新粒子の探索は、探すべき粒子がどういったパラメータ領域にあるのか分からず、その成否は不明である。そこでもう一つの突破口と考えられるのが、今をもって謎多き粒子であるニュートリノである。ニュートリノには、すでに観測されている粒子であるにも関わらず、その「質量絶対値」や「質量様式(マヨナラ/ディラック)」といった謎が残っており、その解明は BSM への手掛かりとして有力である。ニュートリノ研究も現在盛んになされており、例えばニュートリノ質量絶対値の決定を目指した実験としては、欧州で行われている KATRIN や日本の神岡鉱山で行われている KamLAND-ZEN などが挙げられる。これらは β 崩壊を用いた大規模実験である。しかし未だに宇宙論から決定される質量上限値を更新するに至っていない。

研究代表者はこれまで、近年新しく提案された実験手法である「ニュートリノ質量分光」の実現に向けて、マクロコヒーレンス増幅機構の実験的な検証を行ってきた。マクロコヒーレンス増幅機能はニュートリノと原子・分子の相互作用の弱さをコヒーレンスによって補うニュートリノ質量分光の根幹原理のひとつである。これまで研究によりコヒーレンス増幅機構の検証は最終段階に入っており、残すはニュートリノ質量分光と同じキネマティクスを持つ三光子過程での増幅の検証を残すのみである。本研究が問題とする幾何学的効果はニュートリノ質量分光のスペクトルにも影響を与えるため、ニュートリノ質量分光の実現に向けて欠くことのできないステップである(なぜなら、ニュートリノ質量分光ではそのスペクトルからニュートリノの質量をはじめとした性質を探索するからである)。

本研究は、ニュートリノ質量分光という新しく提案された手法の根幹原理であるマクロコヒーレント増幅機構を実際の形で検証するものであり、質量分光の実現へ向け重要なものであるとともに、現実的なターゲットの選択によりニュートリノ質量分光をより現実的にすることを目指している。ニュートリノ質量分光は、これまで大規模な実験をもってしても成し遂げられていないニュートリノの「質量絶対値」などの謎の解明を、原子分子科学、量子エレクトロニクスの技術で達成しようとするものであり、現代物理最大の謎のひとつに挑戦しようとするものである。

2. 研究の目的

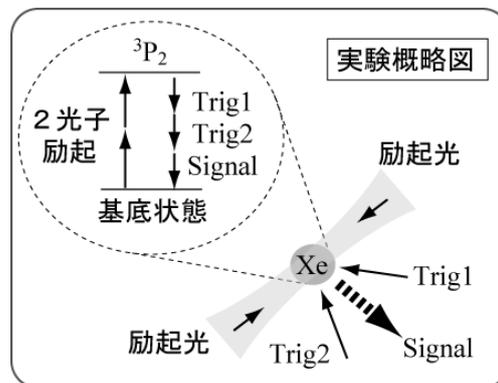
本研究では三光子放出過程を用いて三光子放出過程におけるコヒーレンス増幅の検証をすることとした。ニュートリノ質量分光で用いられる光子随伴ニュートリノ対放出は三光子放出過程であるため、この増幅は三光子放出過程と同じキネマティクスを持つ。三光子放出過程を用いて、本研究の重要性を説明する。簡単のため、励起過程により生成されたコヒーレンスの位相は空間的に一様とする。この時、コヒーレンス増幅の条件は放出粒子の全運動量 k_{emit} にたいして $k_{emit}=0$ と表される。二光子放出の場合はこの条件から、放出される二つの光子は「同じ大きさで逆向き」の運動量を持つ。片方の光子を外部からトリガー光として入射すると、対となる光子はトリガー光とは逆向き同一直線上に発生するため、常に空間的に重なり合っており、建設的に干渉し増幅される(上図 a)。しかし、三光子以上の放出が伴う場合、 $k_{emit}=0$ を満たすのは同一直線状とは限らないため、それぞれの光子は異なる領域を通過する。この時、干渉に幾何学的効果が表れ、その結果は自明ではない(図 b)。別の言い方をすると、増幅に関わる実効体積が放出のジオメトリに依存すると考えられる。このような研究は、研究代表者が知る限りこれまでなされておらず、実験的に確かめる必要がある。このコヒーレンス増幅の幾何学的効果はニュートリノ質量分光の時に観測されるスペクトルにも影響を与えるため、非常に重要である。以上のように、本研究の目標は三光子放出のコヒーレンス増幅の実現と、その幾何学的効果の検証である。



3. 研究の方法

上述のように本研究ではコヒーレント三光子過程の幾何学的効果を検証する。次頁の図に実験の概略を示す。当初、実験にはキセノン原子の電子励起準安定状態(3P_2)からの三光子放出を用いた。この状態は電気双極子 1 光子遷移では緩和することが出来ないため寿命が長く、電気双極子三光子遷移で基底状態に遷移できることから、三光子放出実験には最適である。対向型の高次二光子吸収で空間一様なコヒーレント励起を行い、そこにトリガー光として二本のレーザー

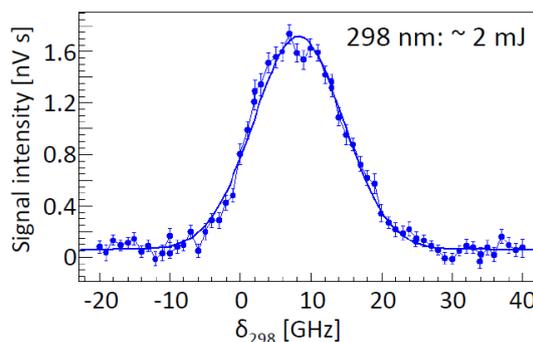
光を照射する(Trig1, Trig2)。三光子遷移はコヒーレンスにより増幅され、放出された三番目の光子を検出する。信号強度は先行研究で行ってきた二光子放出よりも弱い、光電子増倍管により充分検出可能と考えられる。 $k_{emit} = k_{trig1} + k_{trig2} + k_{signal} = 0$ という条件から入射するトリガー光の相対角や波長により三光子過程のジオメトリは変化するため、シグナル強度のそれらへの依存性を測定することでコヒーレンス増幅の幾何学的効果を検証することが出来る。得られた結果と幾何学的効果を考慮したモデル計算を比較することで、三光子放出過程のコヒーレンス増幅に関する理解を深めることが期待された。



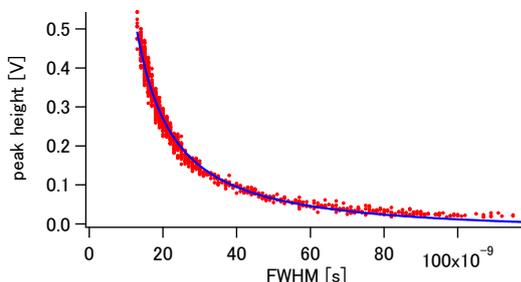
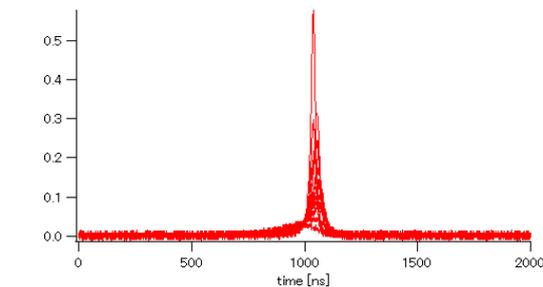
当初本研究でターゲットとして用いられたのはキセノンガスであった。これは三光子放出の観測が期待できただけでなく、ニュートリノ質量分光のターゲットとしても有望だったからである。ところが、初年度の実験の結果および理論的な考察により、気相キセノンターゲットではニュートリノ質量分光は難しいのではないかと予想された。そこで、ターゲットを三価エルビウムイオンが捕捉されたイットリウムオルソケイ酸結晶 ($Er^{3+}:YSO$) に変更し、まずはこの標的を用いてコヒーレント現象を観測することを目指した。YSO 結晶中の Er^{3+} は凝縮相であるにもかかわらず非常に長いコヒーレント時間を持つことが知られており、高コヒーレンスかつ高密度という、通常は相反する性質を併せ持つニュートリノ質量分光のターゲットとして期待できる系である。実験は電気冷凍機により 4 K 程度に冷却された標的結晶 (Er 濃度 0.1%) に狭線幅連続波チタンサファイアレーザー光 (~810 nm) を 100mW 程度標的に照射し、励起された Er^{3+} からのコヒーレント放射を測定し、その特性を調べるものである。

4. 研究成果

初年度の成果としては、三光子放出測定の前準備である標的準位 3P_2 への二光子励起に成功した。右図はガスセル中のキセノン原子に 298 nm のパルスレーザー光を照射し、キセノンから発せられた光を光増倍管で測定した励起スペクトルである。この図から目的の状態へ励起できていることがわかる。しかし、実はこのスペクトルで観測されているのは、 3P_2 に励起したキセノンがさらに一光子を吸収しイオン化し、電子と再結合したのちに高エネルギー状態から発せられた光であり、目的の準位への励起は確かにできているが、励起原子の一部は速やかにイオン化してしまっていることがわかった。その後、ポンブプローブ実験などを行い、 $3P_2$ 準位に長時間存在する原子の数をおおよそ見積もることを試みた。その結果は現在解析中ではあるが、予想より少なく、さらに、励起数を増やすためにレーザー強度をあげるとイオン化する原子が増えてしまい、いずれにせよ当初の予定した励起数は得られそうにないことがわかった。これによりニュートリノ質量分光の標的としてキセノン原子は適さないという結論にならざるを得なかった。

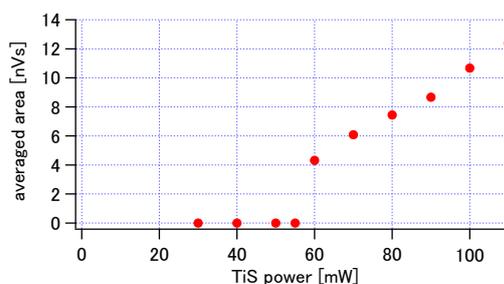


以上により、次年度から Er イオンのコヒーレント放射観測を行った。先行研究で Er イオンをチタンサファイアレーザーで励起すると、1.5 μm の超放射を発することが知られていた。超放射はコヒーレント放射のもっとも典型的な例であるため、本研究ではまずその観測を試みた。右の図が観測された超放射の時間波形である (10 パルスを重ねて表示している)。本来この遷移 ($^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$) の寿命は 10 ms のオーダーであるが、超放射によりコヒーレンスが自発的に発達するため、100 ns 程度の時間スケールで放射が起こっていることがわかる。また超放射は確率的な現象であるため、イベントごとのゆらぎが大きいのが一般的である。そのため、パルスごとに時間幅、強度が大きく異なっていることが見て取れる。イベントごとの時間幅と強度 (ピークの高さ) を図に表すと右の図のようになり、大きなゆらぎを持っていることがわかる。さらにピーク強度と時間幅は簡単なモデル計算では二乗の逆数になるが、実験結果は -1.3 乗程度の依存性となり、理論とある程度近い値になった。モデルからのずれに関しては



今後の検討課題である。

本研究ではさらに超放射強度の温度依存性や励起強度依存性などを調べ、Er イオンの凝縮相中でのコヒーレント現象に関する理解の深化を目指した。例として右図に励起強度依存性を示す。ある閾値を持って超放射が発生することがわかる。そのほかにも、超放射と自然放出増幅光 (Amplified Spontaneous Emission: ASE) が競争的に存在し、ASE から SR へと温度や励起強度を変化させることで移り変わっていくことがわかった。



さらに、条件によって超放射が規則正しいパルス列を形成することもわかり、これは新奇な現象である。これらの振る舞いも現在モデル計算との比較から理解を進めようとしている。

以上のように、Er イオンからのコヒーレント放出を観測することができ、この標的がニュートリノ質量分光の標的として可能性をもつことがわかった。残念ながらコヒーレンス増幅の幾何学的効果の検証までは出来なかったが、今後は、今回観測された実験結果の理解を進めるとともに、この標的を用いて多光子過程の観測や幾何学的効果の検証を進めていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮本祐樹, 原秀明, 今井康貴, 植竹智, 笹尾登, 平木貴宏, 増田孝彦, 吉見彰洋, 吉村浩司, 吉村太彦
2. 発表標題 Er:YSO結晶からの超放射の観測
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------