

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400257

研究課題名(和文) 超低エネルギー過程によるニュートリノ物理

研究課題名(英文) Neutrino physics with very low energy processes

研究代表者

田中 実 (Tanaka, Minoru)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：70273729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：原子・分子からの光子を伴うニュートリノ対放射(REN P)の研究を行なった。REN Pの実現に必須であるマクロコヒーレント増幅機構の実証のために、REN Pのニュートリノ対を光子に置き換えた2光子過程である対超放射(PSR)の研究を進め、パラ水素を用いたPSR実験で、18桁の増幅を確認した。さらに、REN Pの背景事象となるマクロコヒーレントQED3光子放射過程(McQ3)の研究を行ない、McQ3の抑制がフォトニック結晶を用いて可能であることを示した。また、REN Pへの宇宙背景ニュートリノ(CNB)の影響についても研究を行ない、CNBの温度等の性質をREN Pの観測により原理的に決定できることを示した。

研究成果の概要(英文)：We studied radiative emission of neutrino pair (REN P) from atoms/molecules. To prove macrocoherent enhancement, which is necessary to observe REN P, we investigated a companion process, paired superradiance (PSR), in which the neutrino pair in REN P is replaced by a photon, and observed an amplification of eighteen digits in our PSR experiment of para-hydrogen. We also examined a macrocoherent QED three-photon process (McQ3), which is the most important background process of REN P, and showed that McQ3 could be suppressed by using a photonic crystal. In addition, effects of the cosmic neutrino background (CNB) on REN P were studied and we found that the nature of CNB such as its temperature could be determined by observing REN P spectra.

研究分野：particle physics

キーワード：atomic neutrino cosmic neutrino coherence photonic crystals

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動の発見によってニュートリノが質量を持つことが判明し、ニュートリノ混合についての理解が進んできた。特に、2012年までに Daya Bay 等の実験により $\sin^2\theta_{13} \approx 0.024 \pm 0.002$ と決定され、すべての混合角の大きさが判明した。

しかし、これでニュートリノの性質がすべて解明されたわけではない。まず、ニュートリノ振動実験ではニュートリノの質量の2乗差が測定されるので、ニュートリノの質量の絶対値については宇宙論的考察によってその総和がおよそ 0.6eV 以下であることが分かっていたにすぎない。また、ニュートリノの質量の階層性のパターンには normal hierarchy (NH) と inverted hierarchy (IH) の2つの可能性があり、現在でもどちらが実現しているか知られていない。

さらに、ニュートリノがディラック粒子かマヨラナ粒子かという根本的な問題が未解決である。ディラックの場合、ニュートリノ混合における CP の破れは小林・益川理論と同様に1つの複素位相(ディラック位相)で支配され、マヨラナの場合は新たに2つの複素位相(マヨラナ位相)が現われることが知られている。これらの CP を破る位相は、レプトジェネシスの枠組みの中で宇宙のバリオン数の問題に関係しているが、ニュートリノセクターでの CP の破れについての直接的な実験からの知識は極めて限定されている。また、これらのニュートリノの性質は超対称模型におけるレプトンフレーバーの破れや超対称大統一模型におけるフレーバー混合にも深く関係している。

2. 研究の目的

本研究ではこれらの問題に超低エネルギーのニュートリノ過程で迫る。ここで超低エネルギーとは、原子・分子のエネルギースケールで 0(1) eV 程度を指す。従来のニュートリノ実験の典型的なエネルギースケールは原子核のそれであり、MeV から keV の領域であるが、それに比べて原子・分子のエネルギースケールはニュートリノの質量スケールに極めて近い。このため、超低エネルギーのニュートリノ過程ではニュートリノ質量の効果が大きくなると期待される。

一方、このようなニュートリノ過程は4体フェルミ相互作用で記述される弱い相互作用によって起こることから、その反応率はエネルギーの5乗に比例する。従って超低エネルギー過程の反応率は単体では非常に小さく、その検出は事実上不可能である。この困難を克服するために、マクロな標的でのコヒーレントなニュートリノ反応を用いることが吉村らによって提案された。具体的な過程は、図1のような3準位系を考え、radiative emission of neutrino pair (RENP) と呼ばれる2次摂動によるニュートリノ対と光子の放出による準安定状態 $|e\rangle$ の脱励起、

$|e\rangle \rightarrow |g\rangle + \gamma + \nu_i + \nu_j$ である。ここで i, j はニュートリノの質量固有状態を表す。RENP 過程では、光子の放出が E1 遷移、ニュートリノ対の放出が M1 遷移になっているものが望ましく、そのような観点から標的原子・分子が検討されている。

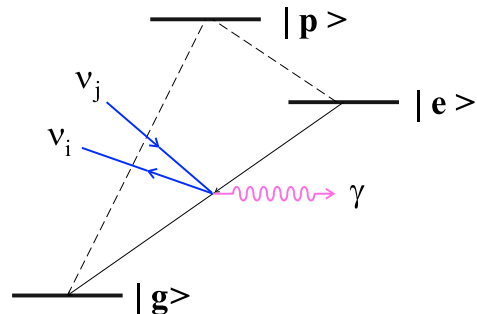


図1 RENP スキーム

これまでの研究で、私と共同研究者は上述の未知のニュートリノの性質が RENP 過程で観測される光子のスペクトルにどのように反映されるか調べた。その結果の一例が図2で、強い M1 遷移を有する Xe 原子について、NH(実線)と IH(破線)に対して、それぞれ最も軽いニュートリノの質量が右から 1meV(青)、5meV(赤)、50meV(緑)の場合が示されている。このように質量の絶対値、階層性のパターンは、Xe 気体で RENP 過程の光子スペクトルを観測すれば、決定できることが分かった。

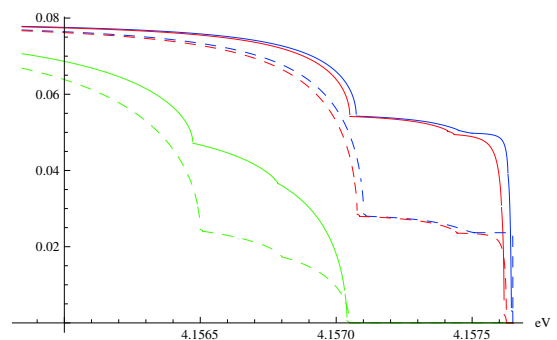


図2 RENP スペクトラム

この原子ニュートリノ分光実験を行なう前に、まずマクロコヒーレント増幅機構を実証する必要がある。そのために、我々は RENP 過程のニュートリノ対を光子で置き換えた過程、 $|e\rangle \rightarrow |g\rangle + \gamma + \gamma$ (対超放射, paired superradiance, PSR) について理論的な解析を行ない、高密度パラ水素気体標的を用いて適切な初期状態を用意してやれば、極めて弱いトリガーレーザーで爆発的な PSR が起こることを示した。

このようなマクロコヒーレント増幅機構による原子ニュートリノ分光実験に向けた研究の発展を踏まえ、本研究では RENP 過程

を中心とした超低エネルギー過程の観測のための理論のさらなる展開を行ないつつ、実験家と協力して PSR の観測によるマクロコヒーレント増幅機構の実証を目指す。

RENP については、その信号の理解をさらに深化させつつ、具体的な実験スキームを検討し、それに適した標的の探索を行う。これと並行して、実際の実験で問題となる背景事象の理論的研究を進める。

また、RENP 過程の観測が確立し精密な実験結果が得られるようになれば、超低エネルギー過程によるニュートリノ物理のさらなる発展が期待される。なかでも、新たな実験手法の確立により宇宙背景ニュートリノ (Cosmic Neutrino Background, CNB) の直接検出の可能性が出てくる。過去の文献ではマクロな物質と背景ニュートリノとのコヒーレントな相互作用を Cavendish 型の実験装置で測定する方法が提案されているが、本研究では RENP を応用する方法を探索し、可能な実験スキームを提案する。

本研究で期待される成果は超低エネルギーニュートリノ実験という新たな分野の立ち上げを加速するもので、ニュートリノの未知の性質の解明を可能にするという意味で、素粒子物理学のさらなる発展に寄与するものである。

3. 研究の方法

上述のように、RENP 観測にはマクロコヒーレント増幅機構が必要である。この機構の要点は初期状態として準安定状態 $|e\rangle$ と $|g\rangle$ の量子的重ね合わせ (コヒーレンス) をマクロな標的内に実現することである。これを実証するためのパラ水素標的を用いた PSR 実験の計画が進んでおり、実験家と協力して PSR の観測を目指す。本研究計画では、これまでの研究で得られている PSR の理論的側面の理解を深化させ、より実験に即した形で理論形式を整備し、実験データの解析に備える。

具体的には、マクロな標的内の電磁場と標的原子・分子の量子状態の時間発展を調べる必要がある。これを記述する電磁場と分極の相互作用を含むマクスウェル-ブロッホ方程式は既に導いてあるが、計画されているパラ水素 PSR 実験に適用できるように変更を加える。これに基づいて、数値シミュレーションを行う。ここで得られた知見は、将来の RENP 実験のデザインに必要な情報となる。

PSR の研究と平行して、RENP 過程の背景事象となる QED 過程について研究を行う。特に重要な過程は多光子過程で、これはマクロコヒーレントに増幅される可能性がある。このような QED 過程を制御し抑制する方法について調べる。この問題は過去に検討されたことがなく、ソリトン形成、cavity QED、導波路等、多方面からの検討を要する。

さらにそれまでに得られた知見をもとに、より困難な CNB の直接検出の可能性についても研究を行なう。過去の研究では、背景ニュ

ートリノとマクロな物質とのコヒーレントな相互作用によって生じる古典的な力を Cavendish 型の実験装置で測定する方法が提案されている。この既存のアイデアとは異なり、本研究では RENP という量子エレクトロニクス的手法により、CNB を検出する可能性について調べる。

4. 研究成果

RENP の観測の実現に向けて、研究を行なった。特に、RENP の実現に必要なマクロコヒーレント増幅機構の実証のために PSR についての研究を進めた。PSR は RENP のニュートリノ対を光子に置きかえた 2 光子過程で、マクロコヒーレント増幅機構の概念実証過程であると同時に、RENP に必要な初期状態を生成するための準備過程でもある。

共同研究を行っている岡山大学においてパラ水素の振動励起状態を用いた PSR 実験が行なわれ、実験データが得られた。本研究でもこれに対応して、PSR のダイナミクスについての理論的研究を優先して行なった。

具体的には、実際の実験で用いられるラマン過程による標的の初期コヒーレンスの生成過程に対応するように、我々が過去の研究で構築した PSR 理論を改良した。過去の研究では、トリガー光は対向して同じ波長のものを照射することを主に想定していた。一方、この実験ではポンプ光、ストークス光を同方向に入射するため、生成される標的中のコヒーレンスは空間的に振動するもの (grating mode) となる。そのため、トリガー光も同方向に入射する必要があり、単一方向入射に対応するように理論を改良した。

また、過去の研究では PSR シグナルは同波長のものが対向して出てくる場合について主に調べたが、この実験では、トリガー光として 4 次ストークス光あるいはより自由度の高い外部トリガーを用いるので、PSR シグナルは異なる波長の同方向のものとなる。これに合せて異なる波長の PSR を扱えるようなマスター方程式を導き、その解析のおよび数値的解を求めた。

岡山大学での PSR 実験の実データと理論計算を比較することで、データ解析を行なった。その結果、実験と理論がある程度一致することを確認し、シミュレーションとの比較により初期コヒーレンスが最大で 8% 程度であると見積った。この一連の実験で 18 桁の信号の増幅を確認し、マクロコヒーレント増幅機構の実証に成功した。さらに、トリガーのタイミングと信号強度の関係から、コヒーレンス発達の時間的遅れについて明らかにし、理論予想と一致することが分かった。これらの結果は RENP の実現に向けた第一歩であり、今後の RENP 研究の基礎となるものである。

また、RENP に過程に対する CNB の影響についても研究を行なった。ビッグバン宇宙論と素粒子の標準模型から、約 1.9K の CNB が予言され、その存在はパウリの排他律により

RENP で放出される光子のスペクトルに影響を与え得る。この影響について定量的に明らかにし、CNB の温度や化学ポテンシャルを RENP の観測により原理的に測定できることを示した。

さらに、RENP の背景事象となるマクロコヒーレントな QED 多光子放射過程 (macrocoherent QED process of n-photon emission, McQn) について研究を行なった。3 光子過程 McQ3 のレートを評価した結果、RENP に比べ 20 桁以上大きいことが判明し、その抑制が RENP 実現に必須であることが明らかになった。そのために、RENP 実験を導波管内で行なうことを提案した。導波管内では電磁波は切断周波数を持つが、これがニュートリノの質量よりも大きい場合、McQn は禁止されるが RENP は許されるようなトリガー周波数の領域があることを示した。

しかし、実際の実験を想定すると(可視)光領域の信号の RENP 過程では、光領域では超伝導体も完全導体からはほど遠いことから、超伝導導波管を用いたとしても十分な McQ3 過程の抑制は難しい。そこで、光領域で導波管の役割を果し得るものとして、フォトニック結晶を用いることを提案した。誘電率が周期的に変わる人工物質であるフォトニック結晶は、固体中の電子のバンド構造と同様に、光に対してバンド構造を示す。このバンド構造の禁止帯に McQ3 の光子が入るようにすれば、McQ3 を抑制できる。

具体的には、図 3 に示すような動径方向に屈折率の周期性をもつ同軸状の中空ファイバー(ブラッグファイバー)を考え、その中空コア内からの光子の放射について調べた。その結果、禁止帯中での放射率は周期層の数の増大とともに指数関数的に減少することを明らかにした。さらに、ブラッグファイバー中で McQ3 レートを評価し、屈折率比が十分に大きければ、数 10 から 100 層程度で必要な 20 桁以上の McQ3 の抑制が可能なることを示した。

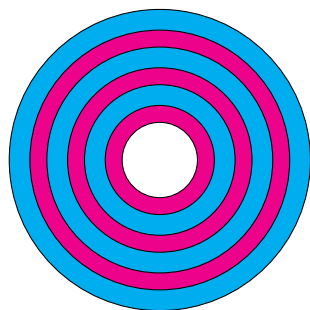


図 3 ブラッグファイバー

これらの研究と平行して、ニュートリノに関連するテーマとして、右巻き荷電カレント、レプトンフレーバーの普遍性、新しいニュートリノ源であるニュートリノペアビーム等について研究を行なった。

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 11 件)

- ① Towards background-free RENP using a photonic crystal waveguide, Minoru Tanaka, Koji Tsumura, Noboru Sasao, Motohiko Yoshimura, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 043B03, 2017.
DOI: 10.1093/ptep/ptx035
- ② Externally triggered coherent two-photon emission from hydrogen molecules, Y. Miyamoto, H. Hara, T. Masuda, N. Sasao, M. Tanaka, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 081C01, 2015.
DOI: 10.1093/ptep/ptv103
- ③ Radiative emission of neutrino pair free of quantum electrodynamic backgrounds, M. Yoshimura, N. Sasao, M. Tanaka, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 053B06, 2015.
DOI: 10.1093/ptep/ptv064
- ④ Experimental method of detecting relic neutrino by atomic de-excitation, M. Yoshimura, N. Sasao, M. Tanaka, Physical Review D91, 063516, 2015.
DOI: 10.1103/PhysRevD.91.063516
- ⑤ Observation of coherent two-photon emission from the first vibrationally excited state of hydrogen molecules, Y. Miyamoto, H. Hara, S. Kuma, T. Masuda, I. Nakano, C. Ohae, N. Sasao, M. Tanaka, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 113C01, 2014.
DOI: 10.1093/ptep/ptu152

[学会発表] (計 17 件)

- ① Towards Background-free RENP Using a Photonic Crystal Waveguide, M. Tanaka, Fundamental Physics using Atoms 2017 (FPUA2017), Kyoto, 2017/1/9-10.
- ② 原子ニュートリノ観測のための誘電体導波路中の QED 過程の解析, 田中実, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 東北学院大学, 2016 年 9 月 22 日.
- ③ 原子ニュートリノ過程における QED バックグラウンドの抑制, 田中実, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日.
- ④ Neutrino Physics with Atomic/Molecular Processes (invited), M. Tanaka, Beyond the Standard Model in Okinawa 2016, OIST, Mar. 1-8, 2016.
- ⑤ Radiative emission of neutrino pair free of QED backgrounds, M. Tanaka, Fundamental Physics using Atoms 2015 (FPUA2015), Riken, Nov. 30 - Dec. 1, 2016.
- ⑥ 原子・分子過程によるニュートリノ物理

- (招待講演), 田中 実, 素粒子物理学の進展 2015, 京都大学基礎物理学研究所, 2015 年 9 月 16 日.
- ⑦ 原子過程を用いた宇宙背景ニュートリノの測定法, 田中 実, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 03 月 21 日.
 - ⑧ 原子・分子過程によるニュートリノ物理 (招待講演), 田中 実, 新物理の実証策を考える会, 沖縄科学技術大学院大学 (OIST), 2015 年 03 月 12 日.
 - ⑨ Neutrino spectroscopy with atoms and molecules (invited), M. Tanaka, Neutrino Frontier Workshop 2014, Fujiyoshida, Dec. 23, 2014.
 - ⑩ Effect of the cosmic neutrino background in radiative emission of neutrino pair, M. Tanaka, KEK-PH 2014, KEK, Tsukuba, Oct. 23, 2014.
 - ⑪ 原子ニュートリノ分光に向けた対超放射ダイナミクスの研究, 田中 実, 笹尾 登, 吉村太彦, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学 湘南キャンパス, 2014 年 3 月 28 日.
 - ⑫ Radiative emission of neutrino pair from atoms/molecules (invited), M. Tanaka, Third Workshop on Flavor Symmetries, FLASY13, 1-5 July, 2013, Niigata, Japan.

[その他]

ホームページ等

<http://www-het.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~tanaka/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 実 (TANAKA, Minoru)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号 : 70273729