

平成22年5月11日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20740138

研究課題名（和文） ニュートリノ対生成実験に向けたリドベリ原子の高効率生成

研究課題名（英文）

Efficient preparation of Rydberg atoms toward neutrino pair emission

研究代表者

福見 敦（FUKUMI ATSUSHI）

岡山大学・理学部・助教

研究者番号：40426656

研究成果の概要（和文）：岡山大学では、励起原子からのニュートリノ対生成を利用したニュートリノ質量の精密測定を計画している。本研究では、リドベリ原子のような寿命の長い準安定励起状態の原子集団を効率的に生成する手法の開発を行った。標的は気体のバリウム原子を用い、554nmと1500nmの2本のレーザーを使用した。標的原子のコヒーラントな協同現象である超放射を利用することで、7%のバリウム原子を、数nsの時間で基底状態から準安定状態へ移行させることに成功した。

研究成果の概要（英文）：We started a project of neutrino mass spectroscopy by means of the neutrino pair emission from metastable atoms. It is necessary to prepare the initial metastable state rapidly and efficiently. Atomic barium in a heat pipe oven was used as a target. Making use of super-radiance, which is known as a cooperative radiative effect, the population transfer to the metastable state was achieved with the efficiency of 7% and the duration of a few ns.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（実験）、ニュートリノ、原子分光、レーザー、超放射

## 1. 研究開始当初の背景

近年のスーパーカミオカンデに代表されるニュートリノ振動実験の成功により、ニュートリノが質量を有することは明確になり、質

量二乗差や混合角といったパラメータが決められつつある。その一方で、質量の絶対値や、ニュートリノの質量型の決定、Dirac型か

Majorana型かについては未だ解明されておらず、主に原子核の崩壊を利用した実験によって探索が行われている。現在、ニュートリノ質量は100meV以下、軽いものでは1meV以下とも予測されており、エネルギースケールがkeVからMeVの原子核崩壊を用いてこのように小さな質量を測定するには、極めて高精度な実験が要求される。

岡山大学では、原子の長寿命励起状態からのニュートリノ対生成を利用した新しい質量測定法を提案し、ニュートリノ質量分光計画を開始した。励起状態にある原子内電子は、非常に小さな崩壊幅ではあるが、ニュートリノ対と1光子を放出して、下位準位へ遷移することができる。放出される光子のエネルギースペクトルから、ニュートリノ質量に関する情報を引き出すことができる。原子の励起エネルギーはeVオーダーであり、レーザー等の分光技術を利用すれば $\mu$ eV以下のエネルギー分解能を得ることができる。これにより、ニュートリノ質量を精密に測定し、さらには質量型を決定することが期待できる。

## 2. 研究の目的

原子の励起状態からのニュートリノ対生成は、極めて稀な過程であり、何らかの増幅機構が必要となる。一方、原子の放射過程においては、コヒーラントな原子同士が協同して放射を増幅する超放射という現象がある。岡山大学では、この超放射に類似したマクロコヒーラント増幅機構を提唱し、ニュートリノ対生成に適用しようと考えている。そのためには、大量の原子集団を、リドベリ状態のような準安定状態に効率的に励起させる必要がある。

本研究では、まず、気体原子の高密度標的の作成を行う。続いて、超放射を利用して、標的原子を短時間で効率的に準安定状態へ移

行させる手法の開発を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 高密度標的の開発を行う。計画当初、準安定状態としてルビジウム原子のリドベリ状態を想定していたが、励起レーザーの波長や準安定状態の寿命、検出方法等を勘案し、バリウム原子の $6s5d\ ^1D_2$ 準位(寿命125ms)を用いることにした。図1にバリウム原子の準位図を示す。

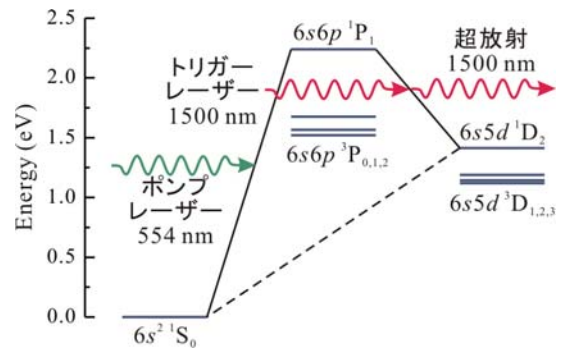


図1 バリウム原子準位図

バリウムは融点が729°Cと高温で、石英と反応性が高いため、分光実験で通常使われるガラスセルと相性が良くない。そこで、1000°C近くまで加熱しても劣化しにくい、ヒートパイプオープンを作成する。ヒートパイプ内の原子密度を測定するため、波長554nmのCW色素レーザーを $6s^2\ ^1S_0 \rightarrow 6s6p\ ^1P_1$ 準位にチューンし、レーザーの吸収から、ヒートパイプの原子密度を評価する。

(2) 1レーザーによる準安定状態の生成を行う。大強度の短パルスレーザー(ポンプレーザー)で554nm遷移を励起させる。ヒートパイプ内のバリウムが高密度でコヒーランスが發展すれば、波長1500nm( $6s6p\ ^1P_1 \rightarrow 6s5d\ ^1D_2$ )の超放射が観測される。この超放射の信号から準安定状態への移行を確認する。

(3) 2レーザーによる準安定状態の生成を行う。(2)の方法では、自然放出を通じてターゲット

ットのコヒーランスが自発的に発展するため、超放射に遅延時間が生じる。そこで、ポンプレーザーに加えて、1500nmのトリガーレーザーを入射してやることで、コヒーランスの発展を促し、より短い時間で、効率的に準安定状態へ占有数移すことができる。1500nmの超放射強度、遅延時間から、準安定状態への励起効率、励起時間を評価する。

#### 4. 研究成果

(1) 高密度バリウム標的としてヒートパイプを作成した。ヒートパイプは、SUS管の両端に光学窓を取り付けたもので、内部にウィックと呼ばれる金属メッシュ管が取り付けられている。固体のバリウムとアルゴンガスを入れ、中心部を加熱、両端を空冷した。中心部で蒸気となったバリウムは、端で冷却されてウィックに付着、中心部に帰還するサイクルが生じ、一様なバリウム標的が実現される。

CW色素レーザーをヒートパイプに照射し、透過光強度をSiPINフォトダイオードで測定した。レーザー波長を554nmの共鳴近辺でスキャンし、吸収曲線から、内部の原子数密度を評価した。温度条件を変えて、得られた原子数密度を図2に示す。従来のガラスセルと比較し、飽和蒸気圧曲線からの計算値に近い原子数密度が達成された。

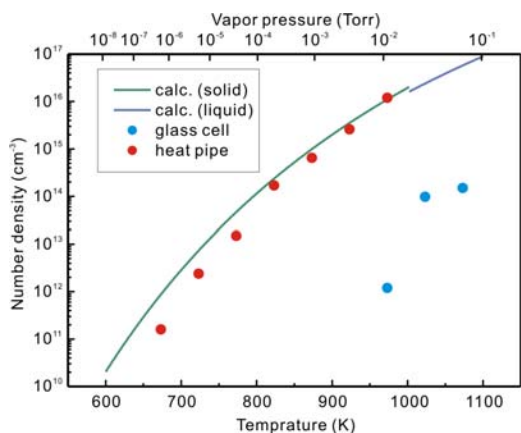


図2 標的バリウム原子数密度  
ガラスセルとヒートパイプの比較

(2) 続いて1光子レーザーによる準安定状態の生成を行った。YAGレーザーの3倍波をパラメトリック発振器によって波長変換し、発生した波長554nm、パルス幅3ns、エネルギー数mJのポンプレーザーをヒートパイプに照射した。ヒートパイプ前方でダイクロイックミラーにより、ポンプレーザーと1500nm超放射を分離する。超放射の測定には、1500nmのバンドパスフィルターと高速InGaAsフォトダイオードを使用した。実験セットアップを図3に示す。

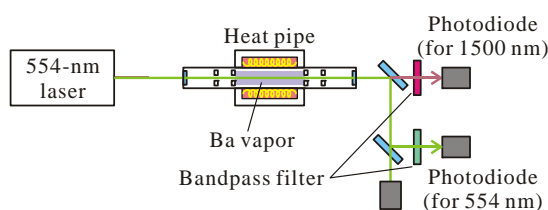


図3 超放射実験セットアップ (1レーザー)

ポンプレーザーによって励起される6s6p <sup>1</sup>P<sub>1</sub>の崩壊先としては、基底状態の6s<sup>2</sup> <sup>1</sup>S<sub>0</sub>、準安定状態の6s5d <sup>1</sup>D<sub>2</sub>、6s5d <sup>3</sup>D<sub>1</sub>があり、それぞれの準位への寿命は8.4ns、4μs、9.1μsとなっている。ポンプ光の照射により、自然放出の寿命より短い、数nsの遅延時間で、1500nmのパルス光が観測された。ヒートパイプの温度を上げ、原子数密度を高めることで、遅延時間が短くなり、放射強度も強くなっていくことから、この放射が超放射と確認された。

(3) 続いて2レーザーによる準安定状態の生成を行った。実験は(2)のセットアップに加え、さらに1500nmのトリガーレーザーを追加した(図4)。トリガーレーザーは、外部共振器型半導体レーザーを使用し、CW発振、パワー10mWのものを使用した。トリガーレーザーをヒートパイプに照射している状態で、(2)と同様に554nmのポンプレーザーを照射した。その結果、(2)の1レーザーの実験と比べて、より短い遅延時間で、強い超放射が観測され

た(図5)。

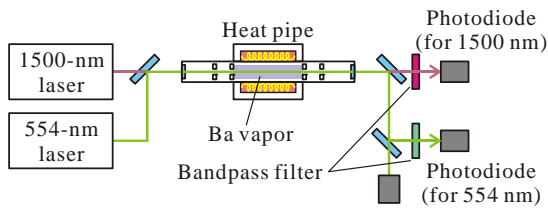


図4 超放射実験セットアップ(2レーザー)

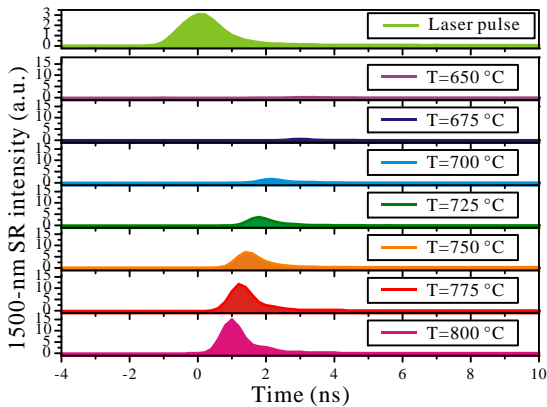


図5 1500nm超放射強度

さらに、超放射検出用のフォトダイオードを2次元駆動のステージに設置し、超放射の空間分布を測定した。結果、トリガーレーザーの照射により、超放射の強度分布は、立体角にして $1.5 \times 10^{-4}$ から $1.6 \times 10^{-5}$ srへと指向性が高まった。立体角を考慮して、 $6s5d^1D_2$ 準位に移行した原子数を評価すると、 $900^\circ\text{C}$ において、 $2 \times 10^{14}$ 個、励起効率にして7%が達成できた。

以上のように、ルビジウム原子のリドベリ状態からバリウム原子の準安定状態への標的変更はあったが、ニュートリノ質量生成実験に向けた研究の第一段階、原子の準安定状態の効率的生成は達成された。今後の展望として、ニュートリノ質量分光に向け、その鍵となるマクロコヒーラント増幅機構の実証へと展開する。マクロコヒーラント増幅機構は、既存の超放射現象と異なり、マクロスコピックな原子集団のコヒーラント現象であり、こ

の原理が実証されれば、素粒子物理のような基礎物理学以外にも多くの応用研究が期待できる。

#### 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3件)

① Motohiko Yoshimura, Atsushi Fukumi, Noboru Sasao and Takuya Yamaguchi, Parity Violating Observables in Radiative Neutrino Pair Emission from Metastable Atoms, Prog. Theor. Phys., 査読有, Vol. 123, 2010, pp. 523-532.

② A. Fukumi, H. Nanjo, I. Nakano, N. Sasao, S. Sato, and M. Yoshimura, Towards CP-even Neutrino Beam, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 78, 2009, pp. 013201 1-3.

③ M. Yoshimura, C. Ohae, A. Fukumi, K. Nakajima, I. Nakano, H. Nanjo, and N. Sasao, Macro-coherent two photon and radiative neutrino pair emission, arXive, 査読無, 0805.1970 [hep-ph] 2008.

[学会発表] (計1件)

① 福見敦, 内音坊僚平, 大饗千彰, 川口建太郎, 久保園芳博, 幸田康成, 笹尾登, 佐藤晴一, 唐健, 中嶋享, 中野逸夫, 南條創, 百瀬孝昌, 吉村太彦, マクロコヒーラント増幅機構を用いたニュートリノ質量分光(III)ーコヒーラント標的の基礎研究ー日本物理学会 2008年秋季大会, 2008年9月23日, 山形大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://fphy.hep.okayama-u.ac.jp/center-qu/majolennon/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福見 敦 (FUKUMI ATSUSHI)

岡山大学・理学部・助教

研究者番号：40426656