

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19340060

研究課題名（和文） 原子過程を用いたニュートリノ質量の測定法開発

研究課題名（英文） Development of a neutrino mass measurement method using atoms.

研究代表者

笹尾 登(SASAO NOBORU)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10115850

研究成果の概要：

一連のニュートリノ振動実験によりニュートリノは質量を有することが判明した。ただし、これらの実験においては質量の二乗差が測定され、その絶対値を決定することはできない。ニュートリノの質量絶対値や型式(ディラック型 vs マヨラナ型)を確定することは標準模型を超える素粒子物理学において本質的重要性を持つ。本研究は、原子過程を用いたニュートリノ質量の測定法を開発することにある。本研究では、全く新しい原理「マクロコヒーラント増幅機構」を用いた原子からのニュートリノ対放射を考案し、これによる質量分光を提案した。この方法は、原子準位のエネルギースケールが対象とする質量スケールと同程度であり、原理的に小質量に感度が良いこと、同種粒子効果を使いマヨラナ型かディラック型かを決定することが可能な事、宇宙背景ニュートリノ観測に道を拓く可能性がある事などの特徴を持つ。新しい原理と関連する現象である超放射について、マックスウェル-プロッホ方程式に基づくシュミレーションを行なった。更に「マクロコヒーラント増幅機構」に対する原理検証実験を明確した。原理検証実験の一部となる、Rb 原子の超放射実験、Ba 原子準安定状態生成実験を遂行し、成功した。更にニュートリノ対生成実験において標的となる希ガス・マトリックスを試作した。なお、副産物として、束縛状態へのベータ崩壊過程を使えば単色の反ニュートリノ・ビームが作れることに注目し、レプトンセクターにおける CP 非保存パラメータを測定するに適したニュートリノ・ビーム生成法を考案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2008 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：素粒子論、宇宙論

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理 4301

キーワード：ニュートリノ質量、マヨラナ粒子、超放射、マクロコヒーランス、レーザー、光ソリトン、マックスウェル・プロッホ方程式

1. 研究開始当初の背景

一連のニュートリノ振動実験によりニュートリノは質量を有することが判明した。但し、これらの実験においては質量の二乗差が測定され、その絶対値を決定することはできない。一方、現在の宇宙は、反物質ではなく、大部分が物質から構成されているが知られている。何故物質優勢の宇宙が成立したのかを説明する有力理論、レプトジェネシス理論によれば、宇宙はその高温時代に非常に重い ($>10^9$ GeV) 右巻きニュートリノが崩壊し、その際にレプトン数と反レプトン数の非対称性が作られたとする。現在の物質優勢宇宙は、宇宙が冷却する過程で、レプトン数非対称性がバリオン数非対称性に転化した結果であると理解する。このシナリオが成立するための本質的な与件は、ニュートリノはマヨナラ粒子であること、荷電パリティ (CP) 対称性を破ること、レプトン数を保存しないこと、の3性質を有することである。ニュートリノの質量やその性格(ディラック型 vs マヨナラ型)を確定することは標準模型を超える素粒子物理学を目指す上で本質的に重要である。本研究は、ニュートリノの諸性質を解明することを通し、レプトジェネシス理論の根幹部を直接的に検証したいという動機に基づく。本研究の最終目標はここにある。

2. 研究の目的

現在までもニュートリノの絶対質量測定を目指した実験は数多くある。しかしいずれもその上限値を与えるにとどまり、確定した値を得ることに成功していない。その代表例はトリチウムのベータ崩壊における電子エネルギースペクトル測定(エンドポイントエネルギー 18 keV)と言えよう。3種類のニュートリノについては、振動実験の結果から、 $m_3=50$ meV、 $m_2=10$ meV、 $m_1 \ll m_2$ 、程度と考えるのが自然であろう。我々は、実験手段のエネルギースケールとこれらのニュートリノ質量のスケールを一致させることが「成功」への鍵であると考え。即ち実験手段に原子核崩壊ではなく原子過程を用いることが重要である。

残念ながら原子過程においては一般的に関与するエネルギーが小さいが故に弱い相互作用を含む過程の頻度は極端に小さい。最近、吉村らは原子からのニュートリノ対放出過程を研究し、新しい増幅機構を提案している。本研究では、この新しい増幅機構「マクロコ

ヒーランス増幅機構」に注目し、それを実現する基礎的な研究を行う。この研究方法の開発に成功すれば、3つのニュートリノ質量のすべてと未知の混合角のすべてを決める、ニュートリノ質量分光への道を開く。ディラック粒子かマヨナラ粒子かの判定は、同種フェルミオンによる干渉効果がマヨナラの時にのみ現れ、レーザーエネルギーの閾値付近でレートが異なることを決定原理に利用する。

3. 研究の方法

励起された原子集団からの放射を考えると、通常、指数関数的時間依存性を持ち、励起原子数 N に比例する放射レートで自発崩壊する。ところが、原子数密度が大きい場合、 N^2 に比例するレートで崩壊する、超放射と呼ばれる現象が起こることが知られている。この原因は、放射光子の波長程度のサイズに存在する原子については、いずれからの放射が区別できないことからコヒーランスが発展することによる。

我々は、二光子放射過程($\gamma\gamma$)や一光子 + ニュートリノ対放射過程($\gamma\nu\nu$)について、放射される粒子の運動量配位が特殊な条件を満たすとき、コヒーラント状態は領域体積に比例してマクロスコピックになり、注目する過程の増幅因子は巨大となることを発見した[発表論文]。この増幅機構(マクロコヒーラント増幅機構)は、従来の超放射が光波長に制約されていることに対し、その限界を突破する可能性を持つ。二光子超放射過程より光子は、原子準位間隔(Δ)の $1/2$ のエネルギーを持ち back-to-back に放出される。これに対し、 $\gamma\nu\nu$ 超放射過程は、共存する $\gamma\gamma$ 超放射過程による一光子ピークを基準として、ここから離れてニュートリノ対質量の2乗に比例した閾値エネルギー以下に、広いスペクトル分布をもつ。

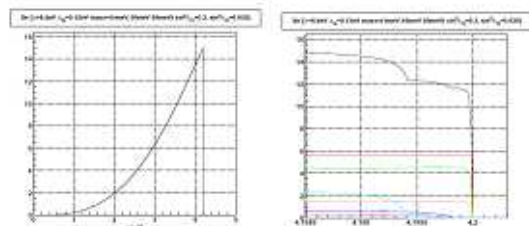


図1 縦軸：放射レート(任意単位)、横軸：放射光エネルギー(原子間隔エネルギー=8.4 eV Xe 原子想定)

図 1(左)はスペクトル全体図、図 1(右)は閾値近辺の拡大図である(標的は Xe)。このスペクトルの発見が未発見ニュートリノ対生成の同定となる。また閾値の確定とその強度からニュートリノ質量と混合角の決定が可能となる。我々は、また、標的内に光ソリトン(トリガー用レーザー光の周辺に確定した"winding number"をもつ位相的ソリトン)が形成される可能性があることを解明した[発表論]。光ソリトンが形成されると、増大率は超放射の場合より更に大きくなる。また標的原子を偏極させることにより、パリティ非保存量も観測可能であることが判明した。パリティ非保存は弱相互作用に特徴的な現象であるので、他のバックグラウンド・プロセスからの分離に有効である。ニュートリノ対放射レートは下に示した式で表されるが、数密度 n の二乗に比例し、体積 V に比例する ($n^2V=nN$)。例えば、Xe 原子に対しては、 $V=100\text{cc}$ の標的が実現できれば、全レートは $1/\text{hour}$ 程度となることが期待される。

閾値 :
$$\omega_{ij} = \frac{\Delta}{2} - \frac{(m_i + m_j)^2}{2\Delta}$$

レート :

$$\frac{d\Gamma}{d\omega} = \frac{2G_F^2 d^2 n N \omega^2}{3\pi^3 (\Delta - \omega)^2} \sum_{ij} \int dE_1 (\Delta - \omega - E_1) F_{ij}(E_1, \Delta - \omega - E_1)$$

F_{ij} : factor containing v mass m_i , θ_{ij} , M/D effect etc.
 Δ : atomic level total energy, ω : photon energy
 d : electric dipole moment, G_F : Fermi constant

4. 研究成果

(1) Rb 原子からの超放射観測

我々は Rb 原子からの超放射を観測した。下図 2(左)に関連準位を示す。温度 91 度 C の Rb に対し、421.5nm (青)のレーザーを照射し、基底状態($5s^2 \ ^2S_{1/2}$)より 2P_1 に励起した。

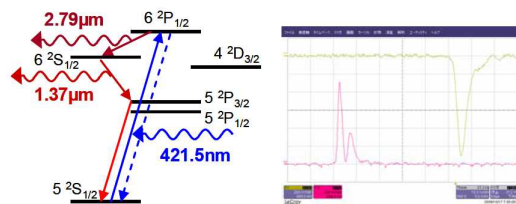


図 2 (左) Rb 超放射観測の関連準位 (右) InGaAs 検出器からの典型的オシロスコープ信号

InGaAs 検出器からの、典型的オシロスコープ信号を図 2(右)に掲げる。正方向の信号(赤色トレース)が検出器信号である(負方向信号はトリガー用 PMT 信号、人為的に遅延)。Double peak 信号のうち、少し遅れた信号が超放射信号である(直前の信号は入力レーザー信号、1.4 ミクロンのバンドパスフィルタを挿入すると検出されない)。レーザー入力から超放射までの時間(遅延時間)は、この事象では 5nsec 程度であり、自然寿命(51.3nsec)とは全く異なる。実は、この超放射はカスケードで脱励起する。第一段階(2.79 ミクロン、110nsec)の放射は検出器を入手次第、同時計測する予定である。この信号が、超放射であることの確認は、(i) 遅延時間が自然寿命(51.3nsec)とは異なること、(ii) 逆にパルスが大きさと遅延時間の相関が超放射の理論通りであること(図 3 参照)、(iii)放射角分布(超前方及び超後方に集中)等による。

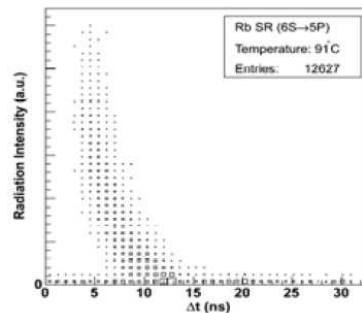


図 3 放射相関：縦軸は光強度(任意強度)、横軸は遅延時間(nsec)

(2) Ba 原子の準安定状態生成

Ba は二光子超放射の観測に都合の良い準安定状態($1/8$ 秒)を持った原子である。この研究においては、準安定状態の生成を試みた。

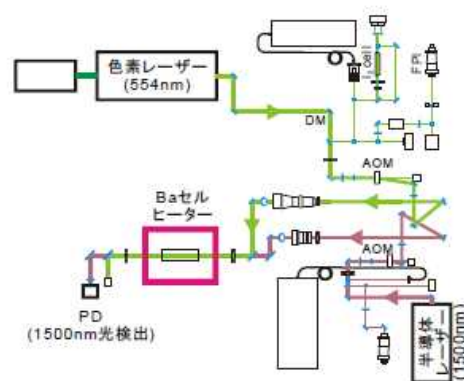


図 4 : Ba 実験セットアップ図

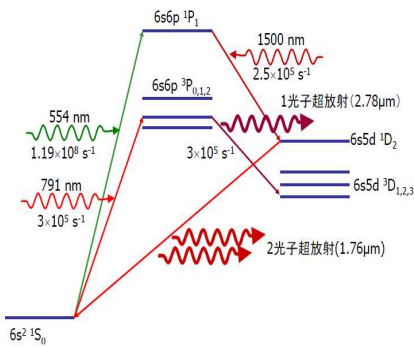


図 5 : Ba 原子の関連準位

実験のセットアップおよび関連する Ba 原子準位を各々図 4 及び図 5 に示す。実験においては、基底状態にある原子を 554nm レーザーを用い $6s6p\ ^1P_1$ に励起し、そこから自然放射または誘導放射を使って、準安定状態である $6s5d\ ^1D_2$ を生成した。図 6 は $6s6p\ ^1P_1$ 状態から準安定状態に脱励起するとき放つ蛍光 (1500nm) を観測した信号 (赤色) である。横軸は、入射レーザー波長の変化を表す。554nm に対応する波長のときに蛍光が観測されている。なお緑色の信号は周波数基準信号である。また同時に 1500nm レーザーを入射し、誘導ラマン過程により準安定状態を生成することにも成功した。

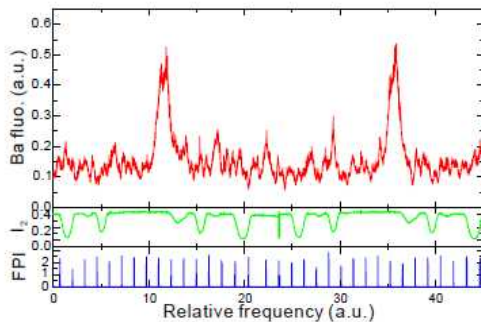


図 6 : Ba 脱励起蛍光スペクトル

(3) マトリックス固体への標的原子貯蔵

マトリックス固体への標的原子貯蔵のテスト実験として、Ar 固体およびパラ水素固体中の Xe 原子の分光測定を近畿大学ならびに UBC で行った。Xe ガス濃度 10-300ppm のマトリックスガスを冷却基板に吹き付けて作成したマトリックス固体の真空紫外分光および FT-IR による吸収スペクトルを取得した。真空紫外分光では Ar 固体中の Xe の電子遷移に対応する吸収ピークを測定した。その結果を図 7 に示す。また、FT-IR ではパラ水素の振動回転遷移の吸収ピークに Xe 原子に

よって現れるサテライト構造を測定した。その結果を図 8 に示す。

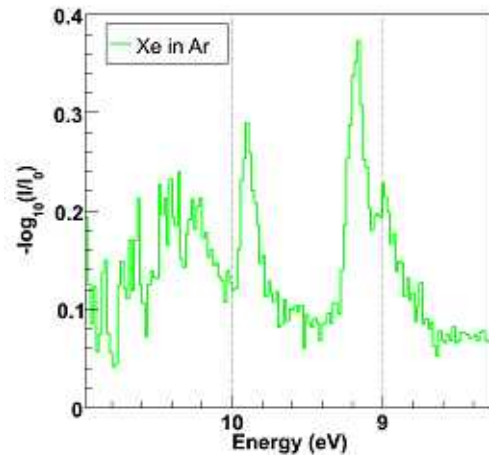


図 7 : Ar 固体マトリックス中の Xe 原子スペクトル : 縦軸は吸収、横軸は光エネルギー

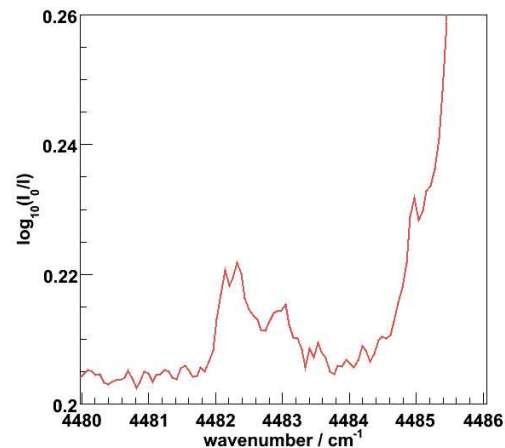


図 8 : パラ水素マトリックス中の Xe (FT-IR)

これらの結果から Xe 原子の濃度を見積もることが出来る。計算結果を下表にまとめた。

	試料サイズ	原子数密度	原子数
Xe/Ar	10cm ²	10 ¹⁵ /cm ²	10 ¹⁶
Xe/p-H ₂	10cm ²	10 ¹⁶ /cm ²	10 ¹⁷

(4) 研究成果のまとめ

以上の研究成果をまとめる。

新しい原理「マクロコヒーラント増幅機構」を用いた原子からのニュートリノ対

放射を考案し、これによる質量分光を提案した。新しい原理と関連する現象である超放射について、マックスエループロツホ方程式に基づくシュミレーションを行なった。

「マクロコヒーラント増幅機構」に対する原理検証実験を検討し、その一部となる基礎実験に成功した。特に、Rb 原子からの超放射観測及び Ba 原子準安定状態の生成に成功した。またニュートリノ対生成実験において標的となる希ガス・マトリックスを試作した。

副産物として、束縛状態へのベータ崩壊過程を使えば単色の反ニュートリノ・ビームが作れることに注目し、レプトンセクターにおける CP 非保存パラメータを測定するに適したニュートリノ・ビーム生成法を考案した[発表論]。

以上より、本研究の目的である「原子を利用したニュートリノ質量の測定法開発」に成功し、質量分光に向けて大きく前進した。

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3件)

M. Yoshimura and N. Sasao "Photonic soliton and its relevance to radiative neutrino pair emission" arXiv 0901.2769 [hep-ph] (2009). 査読無

A. Fukumi, H. Nanjo, I. Nakano, N. Sasao, S. Sato, and M. Yoshimura, "Towards CP-even Neutrino Beam" J.Phys.Soc.Jpn, 78, 013201(2009). 査読有

M. Yosimura, C.Ohae, A.Fukumi, K. Nakajima, I. Nakano, H. Nanjo, and N. Sasao, "Macro-coherent two photon and radiative neutrino pair emission", arXiv 805.1970 [hep-ph](2008). 査読無

[学会発表](計9件)

吉村太彦 “ニュートリノ質量分光への道” 日本物理学会シンポジウム “原子を利用した基礎物理学の進展” 招待講演、2009/3/30、立教大学

大饗千彰ら “マクロコヒーランス増幅機構を用いたニュートリノ質量分光(IV) - 気体標的からの超放射研究 - ” 日本物理学会素粒子物理分科会 2009/3/28、立教大学

中野逸夫ら “マクロコヒーランス増幅機構を用いたニュートリノ質量分光(V) 固体マトリックス標的の量子干渉性の研

究 ” 日本物理学会素粒子物理分科会 2009/3/28、立教大学

M. Yoshimura, "Coherent target effects for atomic neutrino mass spectroscopy and detection of relic neutrino"

Workshop on New Instruments in Neutrino Relics and Mass, 2008/12/08, CERN

笹尾登ら “マクロコヒーランス増幅機構を用いたニュートリノ質量分光(I) - 二光子および一光子+ニュートリノ対放射の理論 - ” 日本物理学会素粒子物理分科会、2008/9/23、山形大学

福見敦ら “マクロコヒーランス増幅機構を用いたニュートリノ質量分光(III) - コヒーラント標的の基礎研究 - ” 日本物理学会素粒子物理分科会、2008/9/23、山形大学

南條創ら “マクロコヒーランス増幅機構を用いたニュートリノ質量分光(II) - 気体セルを用いた超放射の基礎研究 - ”

日本物理学会素粒子物理分科会、2008/9/23、山形大学

M. Yoshimura, "Neutrino Spectroscopy using Atoms(SPAN)"

NO-VEInternational Workshop, 2008/4/15, Venice

中嶋享ら “原子を利用したニュートリノ対生成の基礎研究 III - 赤外・マイクロ波分光の利用 - ” 日本物理学会 2008/3/26、近畿大学

[その他]

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

6 . 研究組織

(1)研究代表者

笹尾 登(SASAO NOBORU)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10115850

(2)研究分担者

南條創 (NANJO HAJIME)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：70108447

吉村 太彦 (YOSHIMURA MOTOHIKO)

岡山大学・理学部・特別契約職員教授

研究者番号：70108447