

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19204028
 研究課題名（和文） 長寿命励起原子によるニュートリノ質量の基礎研究
 研究課題名（英文） Fundamental study of neutrino mass spectroscopy using long lived excited atoms

研究代表者
 吉村 太彦（YOSHIMURA MOTOHIKO）
 岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
 研究者番号：70108447

研究成果の概要：

未知の混合角とすべてのニュートリノ質量値を決定する、原子を利用した、新たなニュートリノ質量分光の実験手法を確立するために、実験原理の理論研究と基礎的な開発実験研究を行った。輻射を伴うニュートリノ対生成プロセスを増幅して大きなレートをえるために、固体マトリックス等に埋め込んだ標的原子集団をアヴォガドロ数程度作成して、準安定状態にレーザー励起し、下位へのレベル間隔の半分に相当するパルスレーザートリガーにより、コヒーランスを成長させる。この重要課題に対して、(1) マックスウェル・ブロッホ方程式を該当する3準位ラムダ型レベル系に適用した基礎方程式を導き、トリガーによる光ソリトン形成が巨大な増幅を起し得ることを見いだした。(2) パラ水素分子結晶中にXeを単体で埋め込むことに成功した。(3) アルカリ原子気体をセル中に封じ込めて、通常の1光子超放射現象の観測に成功した。(4) ニュートリノ質量分光に対してマーカ的役割を果たす2光子超放射に最適な原子である、バリウム原子のD-準安定状態を、気体セル中で生成することに成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	25,000,000	7,500,000	32,500,000
2008年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
年度			
年度			
年度			
総計	31,800,000	9,540,000	41,340,000

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、マヨラナ粒子、超放射、レプトン数非保存、宇宙のバリオン数、光ソリトン、マックスウェル・ブロッホ方程式

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ質量のマヨラナ性と質量絶対値を決定することは、ミクロ素粒子世界とマクロ宇宙をつなぐ、基礎科学が直面する問題解明への鍵である。ニュートリノの未解明な性質が宇宙の物質・反物質不均衡問題の解決として注目されているレプトジェネシス理論の根幹部分に直接的に関わるためである。

この課題解明への、従来からの実験手法は原子核を標的とする実験計画に限定されていた。これらの手法では大量の標的を数年以上注意深く監視して検出する必要があり、感度限界に近づきつつある。しかし、日本が主導したニュートリノ振動実験により示唆されるニュートリノ質量は非常に小さく原子核崩壊による解放エネルギーは大きすぎてミスマッチがあり、新た

な実験手段が求められる。

当該計画では、世界に類を見ない、原子を用いた新たな研究手段を開発したい。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ラナ粒子かの判定は、同種フェルミオンによる干渉効果がマヨラナの時にのみ現れ、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。

また、この手法を用いて最小質量閾値付近で測定することにより、1,9Kの宇宙背景ニュートリノ検出への道が開く。

2. 研究の目的

ニュートリノ質量のマヨラナ性とその大きさを実験的に測定するために、世界に存在しない、原子を用いた新たな研究手段を提案し、研究開発を行う。この研究開発の目標とする実験では、想定されるニュートリノ質量値、100 meV以下の質量を測定するために、このエネルギーに近い低励起原子レベル間の遷移を利用して、光子+ニュートリノ対生成、RNPE（未発見プロセスながら存在は間違いない）を検出して、光子の連続エネルギー分布を測定する。6つの閾エネルギーの位置から3つのニュートリノ質量絶対値、閾値の立ち上がり強度から混合角が測定できる。

本計画では、この目的に沿って、複数レーザー照射による励起と、別なトリガーレーザーによるプロセス誘起を行い、RNPEニュートリノ対崩壊を大幅に促進させる。増幅機構の解明に焦点をあてて、これより容易な既知の2光子輻射過程の増幅の検証から実施したい。さらに、増幅に本質的に重要なマクロコヒーランスを起こしうる、標的状態を解明し、これを作成する実験研究を行う。

3. 研究の方法

世界に類例のない実験方法となるので、理論・計算面の研究に加えて、実験原理に関わる開発研究が必要になる。そのために、小さなレートの巨大な増幅機構を解明し、実験手段を構築する必要があるが、当該研究では、標的のコヒーランスが鍵となる。コヒーラント標的原子をアヴォガドロ数程度作成する、最良の手段は分子性結晶（希ガス、パラ水素分子など）中に標的原子を埋め込み、これをレーザー励起することである。そのために、化学者の標的作成技術・ノウハウを最大限利用したい。大きなレートを得る観点から、最良の標的

原子候補は希ガス原子がよいことを既に明らかにした。

基底状態希ガス原子の励起エネルギーは紫外領域に入るので、3光子過程等で初段励起ののち、目的とする準安定状態にもう一本のレーザーを使う。分光に使う過程は、この準安定状態からの1光子+ニュートリノ対生成である。このプロセスの誘発に、レベル間隔の半分エネルギーに相当するトリガーレーザー照射が有効なことを理論的に解明した。

4. 研究成果

(1) いかにしてマクロコヒーランスが発展するかの研究を行い、マックスウェル・ブロッホ方程式を該当する3準位ラムダ型レベル系に適用した場合の基礎方程式を導いた。数値計算を開始するとともに、トリガーによる光ソリトン形成が巨大な増幅を起こし得ることを見いだした。また、希ガス低励起準位が標的原子として最適候補の一つであることを確立し、プロセスのレートを計算した。

実験面では、大量のコヒーラント標的の作成と超放射に関連する増幅機構の実験的確認とその詳細の解明に主眼をおいて、共同研究を展開した。

(2) カナダブリッティッシュ・コロンビア大学との共同研究により、パラ水素分子結晶中にXeを単体で埋め込むことに成功した。パラ水素の振動回転レベルが不純物によりサテライト構造を持つことにより、Xe埋め込みを確認した。引き続き紫外領域の励起を白色光で行った。固体内の原子レベルのエネルギーシフト、エネルギー幅の増大について研究を続行している。

(3) 次に、アルカリ原子気体をセル中に封じ込めて、関連するプロセスである、通常の1光子超放射現象の観測を行い、その測定に成功した。今後、レーザーをアップグレードして超放射機構を詳細に解明する予定である。

(4) さらに、ニュートリノ質量分光に対してマーカー的役割を果たす、2光子超放射はマクロコヒーランスを該当環境で証明する重要なステップである。2光子超放射に最適な原子として、バリウム原子のD-準安定状態がある。気体セル中でこの状態の生成に成功した。上位レベルからの誘導放出を利用した手法を用いた。さらにストークス光照射による効率的な励起法を研究している。

理論面の論文を発表するとともに、岡山大学・近畿大学・カナダブリッティッシュ・コロンビア大学の化学者との共同実験研究ネ

ットワークを構築した。

原子を利用した基礎科学の推進は、我が国で立ち後れている分野であるので、京大グループと共同で、物理関係研究者を結集して数回にわたるワークショップを組織・運営した。

これを基盤に2009年春の日本物理学会で、“原子を利用した基礎物理学の進展”を主題とするシンポジウムを開催し、講演した。

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 6 件)

①吉村太彦, “素粒子物理学変革期の南部先生” 日本物理学会誌特別企画, 64巻, 76-79, (2009). 査読有

②M. Yoshimura and N. Sasao “Photonic soliton and its relevance to radiative neutrino pair emission” 0901. 2769 (2009). 査読無

③A. 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

④M. Yoshimura, C. Ohae, A. Fukumi, et al. “Macro-coherent two photon and radiative neutrino pair emission” 805.1970 [hep-ph] (2008). 査読無

⑤M. Yoshimura “Neutrino Spectroscopy using Atoms (SPAN)” Proceedings of 4th NO-VE International Workshop. March 6-9, (2007). 査読有

⑥M. Yoshimura “Generation of Cosmological Asymmetry -(B-L)- genesis-” Journal of Phys. Soc. Japan, 76, 111018 (2007). 査読有

[学会発表] (計 12 件)

①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

②吉村太彦 “C P 対称性の破れと物質反物質非対称性の問題、発展と展望” 特別企画シンポジウム “小林誠氏・益川敏英氏ノーベル物理学賞受賞記念” 招待講演、2009/3/28、立教大学

③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

④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

⑤M. 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

⑥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

⑦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

⑧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

⑨M. Yoshimura, “Neutrino Spectroscopy using Atoms (SPAN)” NO-VE International Workshop, 2008/4/15, Venice

⑩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

⑪M. Yoshimura, “Towards ν spectroscopy and measuring relic ν ” Search for Baryon and Lepton Number Violation, 2007/2/22, Berkeley

⑫M. Yoshimura, “Majorana Neutrino Spectroscopy and Measuring Relic Neutrino” LAUNCH, 2007/3/22, Heidelberg

[その他]

岡山大学理学部附属量子宇宙研究センターホームページ

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

新聞報道 (計 3 件)

吉村太彦研究紹介記事

①読売新聞 “反物質消滅 最大の謎” 2009/4/7 科学欄記事

②山陽新聞 “宇宙誕生の謎解明を” 2008/10/26

③朝日新聞 “物質宇宙の創成に迫る” 2008/1/14 探求人欄記事

アウトリーチ情報活動 (計 2 件)

吉村太彦

①2008年ノーベル物理学賞、2008/12/19、岡山大学仁科祭講演

②朝日放送 (大阪) 放映番組出演

南部陽一郎先生の思いで、2008/10/16
17:00～

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

中野 逸夫 (NAKANO ITSUO)
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号：90133024
福見 敦 (FUKUMI ATSUSHI)
岡山大学・理学部・助教
研究者番号：40426656
中嶋 享 (NAKAJIMA KYO)
岡山大学・理学部・特別契約職員助教
研究者番号：80400240

(3) 研究協力者

川口建太郎
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
久保園芳博
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
佐藤晴一
岡山大学・大学院自然科学研究科・博士
1年
大饗千彰
岡山大学・大学院自然科学研究科・修士
2年
内音坊僚平
岡山大学・大学院自然科学研究科・修士
1年
山口琢也
岡山大学・大学院自然科学研究科・修士
1年
笹尾登
京都大学・大学院理学研究科・教授
南條創
京都大学・大学院理学研究科・助教
百瀬孝昌
ブリッティッシュコロンビア大学・化学
科・教授
若林知成
近畿大学・理工学部・准教授