

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月25日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540274

研究課題名（和文）ニュートリノ実験で探求できる物理の現象論

研究課題名（英文）Phenomenology of physics which can be probed by neutrino experiments

研究代表者

安田 修（YASUDA OSAMU）

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：50183116

研究成果の概要（和文）：3種類のニュートリノの間には混合が存在することが知られており、その混合を表すパラメーターがある程度決定されてきている。そのパラメーターをさらに精密に測定するために、さらなる実験が現在進行中か、計画中となっている。一方、3種類のニュートリノ間の混合では説明が出来ない現象も報告されている。この研究では、加速器や原子炉による将来の実験で、標準的シナリオを越える物理に関してどのような情報が得られるかを研究した。

研究成果の概要（英文）：It is known that there exist mixings among three neutrinos, and the parameters which describe the mixings have been determined to some extent. Further experiments are either now running or are planned to measure the parameters more precisely. On the other hand, phenomena which cannot be explained by the three neutrino mixings have been reported. In this research it was investigated what kind of information on physics beyond the standard scenario can be obtained at future experiments with accelerators or reactors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ニュートリノ振動、フレーバー混合、ニュートリノ質量、長基線ニュートリノ実験、CP非保存

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準模型は、後述のニュートリノ質量を除いては、これまでの多くの実験によりその正しさが検証されてきている。一方、ニュートリノ（以下 $\nu$ と略記）に関しては、大気 $\nu$ ・太陽 $\nu$ +KamLAND等の実験結果により $\nu$ に質量とフレーバー混合の存在が確立され、素粒子の標準模型を超える物理による記述が必要であることがわかってきてい

る。さらには3世代の $\nu$ 混合の枠組みで、大気 $\nu$ は $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ の振動( $e, \mu, \tau$ の3つのフレーバーの間の転換現象)で、太陽 $\nu$ は $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu}$ と $\nu_e \rightarrow \nu_{\tau}$ の半々の振動で、それぞれ説明されることが明らかにされ、これらの事実とCHOOZの原子炉 $\nu$ 振動実験により、3つの混合角のうち2つ( $\theta_{12}$ と $\theta_{23}$ )と2つの質量二乗差( $\Delta m_{21}^2$ と $|\Delta m_{32}^2|$ )が決定されるに至っている。いまだに測定されていない

量は3つ目の混合角  $\theta_{13}$ 、CP非保存の位相  $\delta$ 、質量ヒエラルキーのパターン( $=\Delta m^2_{32}$ の符号)である。それら未定パラメータを測定するための手段として加速器  $\nu$  による長基線実験や原子炉  $\bar{\nu}$  の測定実験が提案され、上述の未定パラメータの決定に関して活発に研究された結果、標準的な  $\nu$  混合の枠組みに関する問題は、現象論的な側面に関する限り、ほぼ解決されるに至っていると云える。

## 2. 研究の目的

2009年から開始している CERN の LHC 実験は従来よりも高い粒子のエネルギーにより標準模型を越える物理を探る試みである。一方、それとは相補的な方法として、ニュートリノを中心としたレプトンセクターにおける新しい物理を探索する可能性が考えられる。後者の方法により標準理論を越える物理をレプトンセクターにおいて現象論的に研究するのが本研究の目的である。

(1) 標準的な3世代の  $\nu$  混合の枠組みに関してはある程度、 $\nu$  の質量と混合が解明されてきている一方、3世代の枠組みでは説明できない現象もいくつか知られている。1995年頃に発表された LSND 実験の結果やその追試のために行われている MiniBooNE の結果の一部、大気  $\nu$  の sub-GeV エネルギー領域の e-like イベントの増大等である。これら謎の現象の説明を試みると同時に、新しい物理に関する知見をニュートリノにより得ようというのが本研究の目的である。

(2) 一方、将来の大強度の長基線実験は、3世代の  $\nu$  混合の振動パラメータを精密に決定するだけではなく、標準的な枠組みからのずれを探ることもできると期待されている。将来の大強度の長基線実験でどのような新物理(3種類以上のニュートリノの混合や非標準的相互作用など)の知見が得られるかを研究することも本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

(1) 将来の長基線ニュートリノ実験における新物理探求の現象論

非標準的な相互作用がある場合、3世代のニュートリノ混合の枠組みでも生成・伝播・検出の各過程に新たな効果が現れることが期待される。特に伝播過程に現れる  $\nu_e$  と  $\nu_\tau$  の成分は、現時点では非常に弱い制限しかないため、1000km以上の長基線実験で強い制限を与えられると期待される。本研究ではその制限を議論する。

(2) ニュートリノ振動確率の解析的表式の吸収がある場合への拡張

木村-高村-横枕によるニュートリノ振動確率の厳密公式は、ハミルトニアンがエルミートの場合にしか議論されていないが、実際には、ニュートリノもわずかながら物質と非弾性散乱して吸収の項も存在することが知

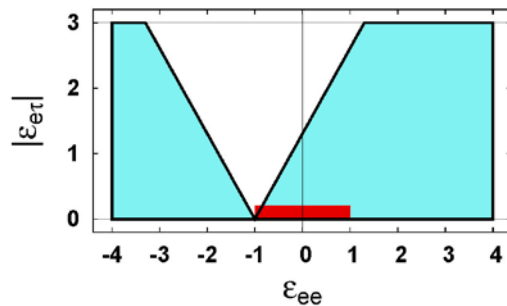
られている。本研究では吸収の効果がある場合に木村-高村-横枕の定式化を拡張し、その現象論を議論する。

(3) ステライルニュートリノ探索の現象論  
原子炉ニュートリノのエネルギースペクトル解析により  $\theta_{13}$  の測定の最適化は、筆者らの研究により数年前に議論されているが、それと同じ議論で  $1eV^2$  程度の質量二乗差のステライルニュートリノのニュートリノ振動を観測できるかどうかを議論する。

## 4. 研究成果

(1) ニュートリノの伝播中の物質効果に新物理の効果がある場合、現在の T2K 長基線ニュートリノ実験の拡張構想である T2KK 計画で、どの程度まで新物理のパラメータに感度があるかを、電子ニュートリノとタウニュートリノの成分だけに注目して数値的に解析した。その結果、現在の制限より一桁ほど改善できることがわかった(下図参照;  $\varepsilon_{ee} - |\varepsilon_{e\tau}|$  平面における現在の許容領域が水色で、T2KK による許容領域は赤色)。

又、この場合、標準的な CP 非保存位相と新物理によるものが2種類存在するが、標準的混合角  $\theta_{13}$  と新物理のパラメータがある程度大きければ、別々に測定が可能であることを示した。

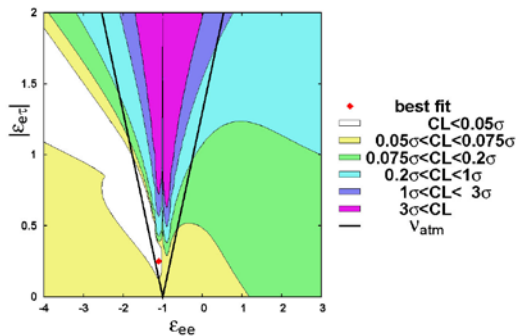


(2) 大気ニュートリノに対して同様な新物理の効果を考え、特に高エネルギーニュートリノのデータからの制限により、ミューニュートリノの成分が小さくなる必要があることを解析的に示した。さらに、新物理のパラメータが比較的大きくても  $\theta_{13} \neq 0$  ならば  $\theta_{23} = 45^\circ$  となる解が存在し、大気ニュートリノのあらゆるエネルギー領域で実験と矛盾しない可能性があることを見出した。これは現象論的なものではあるが、将来の長基線実験で排除できるかどうかを試せる興味深い可能性を与える。

(3) 木村-高村-横枕によるニュートリノ振動確率の厳密公式を、ニュートリノエネルギーが高くて吸収の効果がある場合に拡張した。この結果は従来知られていた Naumov による結果の一般化となっている。その結果を適用し、ステライルニュートリノ振動が存在する場合に、天体起源の宇宙ニュートリノが

地球を貫通する様子から、どれだけステライルニュートリノ混合に制限をつけられるかを考察した。残念ながら結果は現在の制限を越えるほどではないことがわかった。

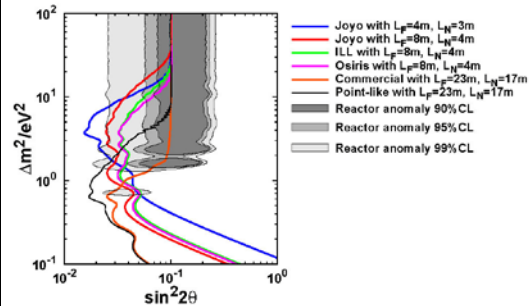
(4) 2010年6月のNeutrino2010の会議で、MINOS実験のニュートリノと反ニュートリノのデータが、標準的な枠組みでは $2\sigma$ で矛盾するという報告があった。大気ニュートリノと太陽ニュートリノ観測の結果と矛盾なくこの事象を説明するには、ニュートリノに非標準的物質効果の電子成分を $\tau$ 成分を導入するという可能性と、ステライルニュートリノを加える可能性が考えられる。そこで、それぞれの可能性について、数値計算による詳細な検討を行った。前者に関しては、得られた最善のフィットが、標準的なシナリオの場合と比べて $0.07\sigma$ しか改善せず、しかもその最善のフィットを与えるパラメータは大気ニュートリノのデータから好ましくない領域にあり、MINOSのデータを説明するには至らないことがわかった(下図参照;  $\epsilon_{ee} - |\epsilon_{e\tau}|$  平面における大気 $\nu$ による許容領域は黒実線の下側で最良点が黒実線の上側に存在)。



一方、後者に関しては、いわゆる(3+1)-スキームの範囲内で、大気ニュートリノ振動で最大の質量二乗差 $\Delta m_{41}^2$ の寄与の割合を表す角度 $\theta_{24}$ を0とおき、 $\Delta m_{41}^2$ を $1eV^2$ に固定してその他のパラメータに関してフィットした所、標準的な三代目の場合が最善となることがわかった。これは少し前に行われたNelsonたちの結果を正すものである。

(5) 原子炉ニュートリノのフラックスの理論値が最近見直され、従来よりも3%増加したものが正しいフラックスであるという主張が専門家間で出されるようになり、質量二乗差が $1eV^2$ 程度のニュートリノ振動に関与するステライルニュートリノの存在の可能性(原子炉アノマリーと呼ばれている)が、再び脚光を浴びてきている。そこで、 $1eV^2$ 程度の質量二乗差のステライルニュートリノのニュートリノ振動を探るための方法として、至近距離に測定器を置いた原子炉ニュートリノ振動実験の現象論を考察した。仮定としては、同一な

前置検出器と後方検出器がそれぞれ一基で、Bugey実験と同じ体積・系統誤差をもつこと、前置検出器と後方検出器の炉心からの距離を自由に変えられるとしてこれらの距離について最適化すること、ステライルニュートリノは1種類で、いわゆる(3+1)-スキームを考へること、である。結果は、商業炉の場合、炉心の直径が3~4mあり、基線の平均化により $2eV^2$ 以上の質量二乗差に対して感度が劣化することがわかった。



一方、炉心の大きさが比較的小さな実験原子炉(高速中性子炉の常陽、ILLの実験炉、Osirisの実験炉等)の場合には、数 $eV^2$ 程度の質量二乗差に対して $\sin^2 2\theta$ (混合角)が0.03程度まで達成できることがわかった(図参照; 灰色部分が原子炉アノマリーから示唆される領域で、曲線右側が排除可能領域)。

(6) LSNDの実験結果や原子炉アノマリーから示唆される現象をニュートリノ振動で説明しようとする試みには、多くの場合、物質と一切相互作用のないステライルニュートリノが関与すると仮定されているが、その枠組みを少し広げ、新しい物理により物質とある程度相互作用する、準ステライルニュートリノの現象論を考察した。その結果は、物質とのポテンシャルが電子ニュートリノの標準的ポテンシャルよりも数倍程度以上に大きい場合には、太陽・大気ニュートリノからの制限により、LSNDの結果を説明することは出来ないことがわかった。

## 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9件)

- ① 安田修, T2K実験, 第三レプトン混合角 $\theta_{13}$ の兆候をついに発見か?, 日本物理學會誌, 査読無, Vol.66, No.11, 2011, 810-812, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110008762005>.
- ② O. Yasuda, Search for sterile neutrinos at reactors with a small core, Acta Phys. Polon., 査読無, Vol.B42, No.11, 2011, 2379-2387,

<http://dx.doi.org/10.5506/APhysPolB.42.2379>.

- ③ O. Yasuda, Search for sterile neutrinos at reactors, Journal of High Energy Physics, 査読有, Vol.2011, No.9, 2011, 036 (1-18), [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP09\(2011\)036](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP09(2011)036).
- ④ O. Yasuda, Some attempts to explain MINOS anomaly, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1382, 2011, 103-105, <http://dx.doi.org/10.1063/1.3644281>.
- ⑤ O. Yasuda, Sensitivity of T2KK to non-standard interactions, Nucl. Phys. Proc. Suppl., 査読無, Vol. 217, 2011, 220-222, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2011.04.107>.
- ⑥ O. Yasuda, Sensitivity to sterile neutrino mixings and the discovery channel at a neutrino factory, Proceedings of the Fifth International Conference - Beyond 2010, 査読無, 2011, 300-313.
- ⑦ H. Oki, O. Yasuda, Sensitivity of the T2KK experiment to the non-standard interaction in propagation, Physical Review D, 査読有, Vol.82, No.7, 2010, 073009 (1-18), <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.82.073009>.
- ⑧ A. Bandyopadhyay, O. Yasuda et al., Physics at a future Neutrino Factory and super-beam facility, Report of Progress in Physics, 査読有, Vol.72, No.10, 2009, 106201(1-185).
- ⑨ A. Donini, K. Fuki, J. Lopez-Pavon, D. Meloni, O. Yasuda, The Discovery channel at the Neutrino Factory:  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  pointing to sterile neutrinos, Journal of High Energy Physics, 査読有, Vol.2009, No.08, 2009, 041(1-54), <http://dx.doi.org/10.1088/1126-6708/2009/08/041>.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 安田修, 小さな炉心の原子炉によるステライルニュートリノ探索の現象論, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日, 関西学院大.
- ② O. Yasuda, Search for sterile neutrinos at reactors, A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2011), 2011 年 12 月 16 日, Fort Lauderdale, FL, USA.
- ③ O. Yasuda, Search for sterile neutrinos at reactors (poster), Sterile Neutrinos at the Crossroads, 2011 年 9 月 27 日, Blacksburg,

VA, USA.

- ④ O. Yasuda, Search for sterile neutrinos at reactors, 5th International Conference of Theoretical Physics (Ustron'11), 2011 年 9 月 13 日, Ustron, Poland.
- ⑤ O. Yasuda, Sensitivity to sterile neutrino mixings at a Neutrino Factory, A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2010), 2010 年 12 月 17 日, Fort Lauderdale, FL, USA.
- ⑥ O. Yasuda, MINOS anomaly and non-standard interactions etc., 6th Plenary Meeting of the International Design Study for the Neutrino Factory, 2010 年 9 月 23 日, Rutherford Appleton Laboratory, Didcot, UK.
- ⑦ O. Yasuda, Sensitivity of T2KK to non-standard interactions, Neutrino Oscillation Workshop (NOW 2010), 2010 年 9 月 10 日, Otranto, Italy.
- ⑧ O. Yasuda, Constraints on new physics from neutrinos, 6th Open Meeting of the Belle II Collaboration, 2010 年 7 月 6 日, KEK, Tsukuba, Japan.
- ⑨ O. Yasuda, Some constraints on new physics by atmospheric neutrinos (poster), 24th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2010), 2010 年 6 月 18 日, Athens, Greece.
- ⑩ O. Yasuda, The Discovery Channel at a Neutrino Factory, 5th International Conference on beyond the Standard Models of Particle Physics, Cosmology and Astrophysics (Beyond2010), 2010 年 2 月 2 日, Cape Town, South Africa.
- ⑪ O. Yasuda, Sensitivity to sterile neutrino mixings at a Neutrino Factory, A topical conference on elementary particles, astrophysics, and cosmology (Miami2009), 2009 年 12 月 18 日, Fort Lauderdale, USA.
- ⑫ O. Yasuda, Sterile neutrino mixings and near detectors, Madrid Neutrino NSI Workshop, 2009 年 12 月 11 日, Madrid, Spain.
- ⑬ O. Yasuda, Tau detection and new physics, 4th Plenary Meeting of the International Design Study for the Neutrino Factory, 2009 年 10 月 12 日, Mumbai, India.

[図書] (計 1 件)

山田作衛 他4名 編 (2.10 章執筆者: 安田修), 朝倉書店, 素粒子物理学ハンドブック (2.10 章: ニュートリノ質量), 2010, 688 (2.10 章: 9 ページ).

6. 研究組織
- (1) 研究代表者

安田 修 (YASUDA OSAMU)  
首都大学東京・理工学研究科・准教授  
研究者番号:50183116