

平成21年4月30日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007-2008

課題番号：19340062

研究課題名 (和文) レプトンフレーバー混合構造決定法に関する理論的研究

研究課題名 (英文) Theoretical Investigation of How to Determine Structure of Lepton Flavor Mixing

研究代表者

南方 久和 (MINAKATA HISAKAZU)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：00112475

研究成果の概要：

スーパー神岡実験によって質量とフレーバー混合が存在することが発見されたニュートリノという素粒子が未知の非標準的相互作用 (NSI) をもつ可能性について研究した。NSI が存在する系におけるニュートリノ振動の全般的性質を明らかにし、全く新しいタイプの多重解の存在を見いだした。ニュートリノファクトリーを用いる NSI 探索における積年の問題である 1-3 角と NSI との混同の問題の解決方法を提示し、NSI の最も感度の高い探索方法を明らかにした。さらに、ミュー・タウニュートリノチャンネルにおける非標準的相互作用の探索には数年前に提唱した神岡・韓国2検出器系が有利であることを指摘し、この感度評価を行った。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2007年度 | 5,700,000 | 1,710,000 | 7,410,000 |
| 2008年度 | 4,900,000 | 1,470,000 | 6,370,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 10,600,000 | 3,180,000 | 13,780,000 |

研究分野：素粒子物理学

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：ニュートリノ振動 フレーバー混合 CP非保存 MSW機構 非標準的相互作用
ニュートリノ質量階層性 長基線ニュートリノ実験 超新星ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

1998年のスーパーカミオカンデ (以下SKと略称) によるニュートリノ質量とレプトンフレーバー混合の発見以後の重要なステップは1-3セクターの構造を明らかにすること、とくにCP非保存とニュートリノ質量階層性の解明である。2005年、研究代表者南方は連携研究者梶田等とともにJ-PARCからのニュートリノビームを使うT2K実験の更なる拡張版として「神岡・韓国2検出器系」のA

アイデアを提唱した。研究開始時においてはこれに関する研究はすでに成熟した時期に当たっていて、残された課題は韓国検出器の最適化問題だけであった。

この段階においてレプトンCP非保存とニュートリノ質量階層性の解明にとって最も重要な問題は、結果の信頼性をどう保証するかという問題にあった。さらには、発見・検証されたニュートリノ質量・フレーバー混合以外のニュートリノに関する未知の性質の

存否を決定するという課題があった。

2. 研究の目的

CP 非保存の発見の信頼性の保証の問題にとって最も重要な理論的課題は真の CP 非保存と紛らわしい効果を生じる物質効果をどれだけの信頼性をもって排除ないし区別することができるかという点にある。

ニュートリノに関する未知の性質の探索の課題に関して、具体的には、牧・中川・坂田行列のユニタリー性の検証、さらには標準模型の彼方の物理に由来するニュートリノの非標準的相互作用の探索の問題がある。

3. 研究の方法

CP 非保存測定信頼性の保証をどう担保するかという問題を解決するため、ニュートリノの地球中の伝播における物質効果の系統的研究を行う。

さらに、全く新しい課題であるニュートリノの非標準的相互作用の探索、ユニタリーの性の破れの検出については、種々のビーム・利用可能なあらゆるチャンネル等のすての可能な設定でこの問題に取り組む。これに先立って、ニュートリノの非標準的相互作用が存在する系におけるニュートリノ振動現象の性質を明らかにする。

4. 研究成果

「神岡・韓国2検出器系」における残された課題である韓国検出器の最適化問題は詳しい事象モンテカルロの生成が必要とされることが判明したため、SK グループのファニー・デュフォー、梶田、奥村によって組み込まれた。この結果は2007年9月末に開催された第3回 T2KK ワークショップでファニー・デュフォーによって報告された。

ニュートリノ伝播における物質効果の研究の第一歩として、フレーバー混合パラメータの精密測定実験施設として最も有望なニュートリノファクトリーを使って地球マントル層内の物質密度の測定感度の評価を行った。魔法基線として知られる7000 km程度の基線長に検出器を置くと(1-3)角が3度の場合には1%程度の高い精度で密度測定が可能であることを示した。これは地球物理学的意義の他にMSW効果のテストとしての利用可能性を示唆している。(論文番号12)

ニュートリノの非標準的相互作用(NSI)が存在する場合のニュートリノ振動現象の多

様性を統一的に理解できるような摂動論的枠組みを提出した。セルベラ達の公式として知られる摂動論の枠組みを拡張し、NSIを含めた定式化を行い、全てのチャンネルの2次(電子ニュートリノ関係3次)の振動確率公式を導いた。驚くべきことに結果は簡単で、標準的な場合の大気・太陽変数を、それぞれNSIを含む一般化されたもので置き換えるだけでよいことが分った。この枠組みの中でパラメータ決定の問題、標準的・非標準的相互作用パラメータ間の混乱の問題についての一般的・包括的理解を得た。さらに、NSIを含む系におけるパラメータ縮退の問題を議論し、通常型の縮退がNSIパラメータを含む形で拡張されることを示すとともに、NSI系の特徴に由来する全く新しい形のパラメータ縮退を発見した。(論文番号1)

「神岡・韓国2検出器系」の設定で上記のNSIの他、ローレンツ不変性の破れなどの新しい物理の効果がどう取り出せるかについて議論し、またこの感度評価を行った。量子論的なコヒーレンスの破れに対して高い感度が期待できることを示した。

更にミュー・タウニュートリノチャンネルにおける非標準的相互作用の探索には神岡・韓国2検出器系が有利であることを指摘し、これを用いて非標準的相互作用の探索感度に関する研究を行った。(論文番号2)

ニュートリノファクトリーを用いてニュートリノが持ち得る可能性がある非標準的相互作用(NSI)の探索法について検討した。高いエネルギースケールに存在する新しい物理の反映としての高次元演算子の形を仮定し、この効果を3000 km・7000 kmにおいた2検出器系による電子ニュートリノの出現モードの観測によって、(1-3)角の効果とNSI効果間の混乱を解き、高精度でNSI効果を検出できること、さらに、(1-3)角やCP非保存位相測定の精度が大幅には損なわれないことを示した。(論文番号10)

3種類の軽いニュートリノのみがある場合について、将来のニュートリノファクトリーにおけるニュートリノ振動実験においてユニタリー性の破れが測定できるかどうかを検討した。基線の長さ100kmでミュー型-電子型ニュートリノのチャンネルを測定すれば、ユニタリー性の破れのパラメータの位相が測定できる可能性があることを示した。(論文番号15)

将来起きると期待される天の川銀河内の超新星爆発のニュートリノ観測に関する研

究を行った。水チェレンコフ検出器を用い、支配的である反電子ニュートリノを捉えるチャンネルに限った議論を行った。スペクトルのゆがみパラメータを含むイベント再構成フィットを行うと連続的なパラメータ縮退が生じることを発見した。この縮退は真剣にその計画が議論されているハイパーカミオカンデなどのメガトン級の水チェレンコフ検出器によっても解けない「頑健」なものであることも見いだした。(論文番号3)

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 19 件) 全て査読あり

① T. Kikuchi, H. Minakata, S. Uchinami: Perturbation Theory of Neutrino Oscillation with Nonstandard Neutrino Interactions, *Journal of High Energy Physics*, 03 (2009) 114-1-49.

② N. Cipriano Ribeiro, T. Kajita, P. Ko, H. Minakata, S. Nakayama, H. Nunokawa: Probing Nonstandard Neutrino Physics by Two Identical Detectors with Different Baselines, *Physical Review D* 77 (2008) 073007-1-12.

③ H. Minakata, H. Nunokawa, R. Tomas, J. W. F. Valle: Parameter Degeneracy in Flavor-Dependent Reconstruction of Neutrino Fluxes in Supernova, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 12 (2008) 006-1-23.

④ H. Minakata: Long Baseline Neutrino Experiments with Two-Detector Setup, *International Journal of Modern Physics A*, 23 (2008) 3388-3394.

⑤ H. Minakata: Looking for Leptonic CP Violation with Neutrinos, *Acta Physica Polonica B* 39 (2008) 283-294.

⑥ S. Desai, T. Kajita et al. [Super-Kamiokande Collaboration]: Study of TeV Neutrinos with Upward Showering Muons in Super-Kamiokande, *Astroparticle Physics* 29 (2008) 42-54.

⑦ S. Mine, T. Kajita et al. [Super-Kamiokande Collaboration]: Experimental study of the atmospheric neutrino backgrounds for proton decay to positron and neutral pion searches in water Cherenkov detectors, *Physical*

Review D 77 (2008) 032003-1-13.

⑧ K. Abe, T. Kajita et al. [Super-Kamiokande Collaboration]: Search for Matter-Dependent Atmospheric Neutrino Oscillations in Super-Kamiokande, *Physical Review D* 77 (2008) 052001-1-6.

⑨ J. P. Cravens, T. Kajita et al. [Super-Kamiokande Collaboration]: Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-II, *Physical Review D* 78 (2008) 032002-1-11.

⑩ N. Cipriano Ribeiro, H. Minakata, H. Nunokawa, S. Uchinami, and R. Zukanovich Funchal: Probing Nonstandard Neutrino Interactions with Neutrino Factories, *Journal of High Energy Physics*, 12 (2007) 002-1-46.

⑪ H. Minakata, H. Nunokawa, S. J. Parke, R. Zukanovich Funchal: Determination of the Neutrino Mass Hierarchy via the Phase of the Disappearance Oscillation Probability with a Monochromatic ν_e Source, *Physical Review D* 76 (2007) 053004-1-14.

⑫ H. Minakata and S. Uchinami: In situ Determination of Earth Matter Density in a Neutrino Factory, *Physical Review D* 75 (2007) 073013-1-12.

⑬ T. Kajita, H. Minakata, S. Nakayama, H. Nunokawa: Resolving Eight-Fold Neutrino Parameter Degeneracy by Two Identical Detectors with Different Baselines, *Physical Review D* 75 (2007) 013006-1-12.

⑭ O. Yasuda: New Physics Effects in Long Baseline Experiments, *Acta Physica Polonica B* 38 (2007) 3381-3388.

⑮ E. Fernandez-Martinez, M. B. Gavela, J. Lopez-Pavon, O. Yasuda: CP-violation from non-unitary leptonic mixing, *Physics Letters B* 649 (2007) 427-435.

⑯ H. Sugiyama and O. Yasuda: A formula for the sensitivity to $\sin^2(2\theta_{13})$ in reactor experiments with a spectral analysis, *International Journal of Modern Physics A* 22 (2007) 3407-3428.

⑰ M. Ikeda, T. Kajita et al. [Super-Kamiokande Collaboration]: Search for Supernova Neutrino Bursts at Super-Kamiokande, *Astrophysical Journal* 669 (2007) 519-524.

⑱ M. Honda, T. Kajita, K. Kasahara, S. Midorikawa, T. Sanuki: Calculation of atmospheric neutrino flux using the interaction model calibrated with atmospheric muon data, *Physical Review D* 75 (2007) 043006-1-26.

⑲ T. Sanuki, M. Honda, T. Kajita, K. Kasahara and S. Midorikawa, Study of cosmic ray interaction model based on atmospheric muons for the neutrino flux calculation, *Physical Review D* 75 (2007) 043005-1-17.

[学会発表] (計 12 件)

① H. Minakata: Phenomenology of Future Long-Baseline Neutrino Experiments, Invited Talk at XXIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Christchurch, New Zealand, May 25-31, 2008.

② T. Kajita: Future Possibilities With The J-Parc Neutrino Beam, Invited Talk at XXIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Christchurch, New Zealand, May 25-31, 2008.

③ H. Minakata: Probing Non-Standard Neutrino Physics at Neutrino Factory and T2KK, IV International Workshop on Neutrino Oscillations in Venice, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Palazzo Franchetti, Campo S. Stefano, Venice, April 15-18, 2008.

④ O. Yasuda: Signatures of sterile neutrino mixing in high-energy cosmic neutrino flux, A topical conference on elementary particle physics and cosmology, Fort Lauderdale, Florida, USA, 16 - 21 December 2008.

⑤ O. Yasuda: Non oscillation flavor physics at future neutrino oscillation facilities, 10th International Workshop on the Neutrino Factories, Superbeams, and Beta Beams, Valencia, Spain, June 30-July 5, 2008.

⑥ N. Cipriano Ribeiro, T. Kajita, P. Ko, H. Minakata, S. Nakayama, H. Nunokawa: Probing Nonstandard Neutrino Physics at T2KK, 3rd International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam, Tokyo, Japan, Sep. 30-Oct. 1 2007.

⑦ H. Minakata: Prospects of Supernova Neutrino Observation by Large Detectors, Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors 2007, Hamamatsu, Japan, October 2 - 5, 2007.

⑧ N. Cipriano Ribeiro, T. Kajita, P. Ko, H. Minakata, S. Nakayama, H. Nunokawa: Non-Standard Neutrino Physics Probed by Tokai-to-Kamioka-Korea Two-Detector Complex, 13th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State University, Moscow, Russia, August 23-29, 2007.

⑨ H. Minakata: What Can Double Beta Decay Experiments Do? International Workshop on Double Beta Decay and Neutrinos, Osaka, Japan, June 11-13, 2007.

⑩ O. Yasuda: Summary of WG1 (Theoretical Part), 9th International Workshop on the Neutrino Factories, Superbeams, and Beta Beams, Okayama University, Okayama, August 6-11, 2007.

⑪ O. Yasuda: Neutrino Phenomenology INO - KEK Meeting, 高エネルギー加速器研究機構, つくば市, November 27, 2007.

⑫ T. Kajita: Future neutrino oscillation experiment with 2 detectors at Kamioka and Korea, 10th International Conference On Topics In Astroparticle And Underground Physics (TAUP 2007) 11-15 Sep 2007, Sendai, Japan

[図書] (計 2 件)

① T. Kajita and S. B. Kim 編 Universal Academy Press, "Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam", 2008 年、173 ページ。

② O. Yasuda, N. Mondal, C. Ohmori 編、American Institute for Physics, "Neutrino Factories, Superbeams And Betabeams. Proceedings of 9th International

Workshop”, Okayama, Japan, 2008 年、389
ページ。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

南方 久和 (MINAKATA HISAKAZU)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号：00112475

(2) 研究分担者

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

(3) 連携研究者

梶田 隆章 (KAJITA TAKAAKI)
東京大学・宇宙線研究所・教授
研究者番号：40185773