

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540315

研究課題名(和文) 近未来のニュートリノ実験におけるCP非保存感度最大化

研究課題名(英文) Maximizing Sensitivity to CP Violation in Near Future Neutrino Experiments

研究代表者

南方 久和 (MINAKATA, Hisakazu)

首都大学東京・理工学研究科・名誉教授

研究者番号：00112475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：CP非保存位相はレプトンフレーバー混合構造決定における唯一の未決定量である。原子炉実験による1-3角の精密測定の下で、日本のT2Kおよび米国NOVA両加速器ニュートリノ実験のそれぞれに、またそれらの組み合わせによって達成されるCP位相の到達感度についての研究を行った。横山将志氏の協力の下で作成された信頼度の高いコードを使用してCP位相感度の評価を行い、我々が初めて提案した表示法「CP-exclusion fraction」によって感度を表示した。この結果、T2K実験の10年間の稼働によって90%の信頼度でCP位相空間の約半分を排除できることを示した。T2K・NOVA実験の相補性も示された。

研究成果の概要(英文)：CP violating phase is the unique unknown quantity among the lepton flavor mixing parameters. Given precision measurement of θ_{13} by the reactor measurement, we have investigated the sensitivity to the Kobayashi-Maskawa type lepton CP phase which can be reached by T2K (in Japan) or NOVA (in USA) experiments alone, and when they are combined. We used a reliable analysis code written with kind help of Masashi Yokoyama (T2K collaborator) and the results were presented with use of the newly proposed "CP exclusion fraction" by us. Assuming the operation of 10 years of each experiment, it was shown that T2K is able to exclude about a half of CP phase space at 90% CL, while NOVA's sensitivity is slightly less. Complementarity between T2K and NOVA experiments is also illuminated.

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：CP非保存 ニュートリノ振動 フレーバー混合 牧-中川-坂田行列 レプトン混合角 加速器ニュートリノ 原子炉ニュートリノ パラメータ縮退

1. 研究開始当初の背景

本研究計画が23年度初頭に開始された時点でCP非保存位相測定可能性を議論するための前提条件たるべきレプトンフレーバー混合の1-3角の決定は未だなされていなかった。Chooz-Palo Verde原子炉実験によるこの上限値約10度が知られているのみであった。しかし、国際会議Neutrino2008での私の講演で指摘されたように、理論的な観点からは1-3角が非常に小さな値をとることは不自然であった。他の二つのレプトン混合角、1-2角および2-3角が大きいこと、にもかかわらず1-3角が非常に小さいためには、これを保証する対称性が存在しなければならないが、これに相当する対称性がクォークセクターには存在していないことなどの理由によるものである。これらの理由から、1-3角はCP非保存位相測定を議論する前提条件を満たすために必要な程度には大きい値を持つことが推測でき、23年度以前の研究計画立案の時点で近未来でのCP非保存位相測定の方法論を議論することに意味があることが予想できた。

なお、この1-3角の大きさの問題は23年6月のT2K(Tokai-to-Kamioka)実験による電子ニュートリノ出現事象の発見によって解決された。1-3角がChooz-Palo Verde上限程度程度の大きい値を持つことが示唆されたからである。

研究計画の当初、レプトンセクターのCP非保存位相については何も知られていなかった。

2. 研究の目的

牧-中川-坂田行列に存在する小林-益川型CP非保存位相はレプトンセクターの3世代混合構造の決定というプログラムにおいて唯一最後に残された未決定量である。素粒子の標準模型がヒッグス粒子の発見によって完成をみた現在、「ニュートリノ質量標準模型」(ニュートリノ質量を付与して改良された素粒子の標準模型)の完成が求められている。後世に残すべき完成度の高い自然科学理論としてのエポックを画し、素粒子物理学の今後の発展への確たる展望を切り開くためである。

レプトンセクターのCP非保存位相測定は素粒子物理学の基礎を理解するために重要な役割を演じると期待される。クォーク族とレプトン族は自然界に存在する基本粒子の二種族で、ともに3世代繰り返しの形で存在する。レプトンCP非保存位相は、クォークセクターの小林-益川位相とともに、クォーク・レプトンの統一的理解のカギを握っているものと思われる。さらに、マヨラナ位相を含めたレプトンセクターのCP非保存は、レプトジェネシスによる宇宙のバリオン数非対称性の理解にとって不可欠の要素である。

本研究計画の目的は10年程度の近未来的視野におけるレプトンセクターの小林-益川型位相測定の方法論を確立し、可能であれば、実験に対する提言を行うことである。CP非保存位相の精密測定には超高輝度のニュートリノビームとメガトン級の水チェレンコフ検出器を要する。しかし、この計画は大掛かりな検出装置の建設に要する長い期間を考えると、既存の実験およびその延長運転によって達成できるCP非保存感度を信頼のおける仕方で評価しておくことが望ましい。この結果次第では、精密測定を目指す本格的なCP位相測定実験の立案に何らかの影響を与えるかも知れない。

3. 研究の方法

本研究計画の進行と時を同じくして、原子炉ニュートリノ実験および加速器ニュートリノ実験によってゼロでない1-3角の発見とこれに続く高精度の測定がなされるに至った。これは本研究計画に確かな基礎を提供してくれるものであった。CP非保存位相の測定感度を議論する際の前提条件として、この1-3角原子炉実験の測定結果を理解するための独自のシミュレーションコードを開発した。

1-3角の精密測定の条件下で、日本のT2K実験および米国NOVA実験のそれぞれがCP非保存位相に対する感度を持つか、また、それらの組み合わせによっていかなるCP非保存感度が達成されるかについての研究を行った。T2K実験グループの東京大学・横山将志准教授の協力の下、電子ニュートリノ出現モード、ミューニュートリノ逶減モードのそれぞれについて信頼のおける解析コードを作成した。このコードをハイパーカミオカンデ計画の提案書に(T2K実験の最新の解析に基いて)記述された結果と対照し、外部から利用できる情報を基に得られる限りで十分な信頼性のあるものであることを確かめた。

4. 研究成果

T2KおよびNOVA両実験の最長10年間の稼働を仮定して、CP非保存感度についての(当該実験グループの内部情報を使用しない範囲で)最も信頼度の高い評価を行った。

本研究においてはCP位相感度の定量的表示方法として新たに「CP-exclusion fraction」を提案した。この結果、ある実験的測定がどのようなCP位相感度を持つかを特定の値(通常の方法を採る場合には0度、180度)に依拠することなく表示することが可能になった。

CP-exclusion fractionを用いたCP位相感度の表示は、T2K実験の10年間のデータ取得によってCP位相空間の約半分の領域が90%の信頼度で排除できることが明らかになった。ニュートリノと反ニュートリノモードそれぞれの年数配分については3:7と5:5の間

であればほぼ同じ CP 位相感度が得られることが分かった。NOVA 実験についても同様であるが、T2K 実験と比較して CP 位相に対する感度は少し劣るようである。さらに、T2K と NOVA 両実験の各 10 年間の稼働によって得られる CP 位相感度は T2K 実験のみの 20 年間の稼働によって得られる感度より大きく、両実験の相補性が確かめられた。これらの結果は論文にまとめられて Journal of High Energy Physics 誌に発表済みである。

上記研究の過程において、CP 非保存感度の改善には 23 角の測定精度の向上が本質的に重要であることが判明した。米国フェルミ国立加速器研究所の Stephen Parke シニア研究員と共同で、2-3 角と CP 非保存位相の同時測定への新しい戦略を提案した。この研究の中で、これまでに認識されていない新しいパラメータ縮退構造を見出し、この解決方法を提案した。(Physical Review D 誌に掲載済み) 現在このパラメータ縮退の全体構造の解明と、ミューニュートリノ逓減モードと電子ニュートリノ出現モードのどちらが 2-3 角測定感度に寄与するかについての研究を実行中である。

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 9 件)

1. K. Asano and H. Minakata, Large-theta13 Perturbation Theory of Neutrino Oscillation for Long-Baseline Experiments, Journal of High Energy Physics、査読有、Vol. 1106 (2011) 022-1-26
2. P. Coloma, A. Donini, J. Lopez-Pavon, and H. Minakata, Non-Standard Interactions at a Neutrino Factory: Correlations and CP Violation, Journal of High Energy Physics、査読有、Vol. 1108 (2011) 036-1-41
3. H. Minakata and C. Pena-Garay, Solar Neutrino Observables Sensitive to Matter Effects, Advances in High Energy Physics、査読有、Vol. 2012 (2012) 349686-1-15
4. P. A. N. Machado, H. Minakata, H. Nunokawa, and R. Zukanovich Funchal, Combining Accelerator and Reactor Measurements of theta13: The First Result, Journal of High Energy Physics、査読有、Vol. 1205 (2012) 023-1-13
5. H. Minakata and A. Yu Smirnov, Neutrino Velocity and Neutrino Oscillations, Physical Review D、査読有、Vol. 85 (2012) 113006-1-14
6. H. Minakata and S. J. Parke, Correlated, Precision Measurements of theta23 and delta Using only the Electron Neutrino Appearance Experiments, Physical Review D、査読有、Vol. 87 (2013) 113005-1-12
7. P. A. N. Machado, H. Minakata, H. Nunokawa, and R. Zukanovich Funchal, What can we learn about the lepton CP phase in the next 10 years?, Journal of High Energy Physics、査読有、Vol. 1405 (2014) 109
8. 南方久和、最後の混合角 13 の発見 ハリティ、査読無、特集「物理科学、この 1 年」Vol. 27, No. 01 (2012) pp 52-53.
9. 南方久和、レプトンフレーバー混合とニュートリノ質量: 到達点と近未来 日本物理学会誌、査読有、Vol. 68, No. 11 (2013) pp 723-733.

[学会発表](計 10 件)

1. H. Minakata, "If theta13 is Large, then What?", Talk at 13th International Workshop on Neutrino Factories, Superbeams and Betabeams (NuFact11), 1-6 August 2011, CERN-University of Geneva, Geneva, Switzerland.
2. H. Minakata, "I Era of the accelerator and reactor theta13 experiments", Invited talk at International Workshop on Double Beta Decay and Neutrinos, 14-17, November 2011, Osaka, Japan.
3. H. Minakata, "Looking for Nonstandard Neutrino-Matter Interactions with Large theta13", Invited talk at Nu Horizons V "Neutrinos in Physics, Astrophysics and Cosmology", 1-3, February 2012, Harish-Chandra Research Institute, Allahabad, India.
4. H. Minakata, "theta13 is large: what is next?", Invited Talk at

- NuTURN2012-Neutrino at the Turning Point, 8-10 May 2012, INFN - Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Assergi, Italy.
5. H. Minakata, "Phenomenology of Future Neutrino Experiments with Large θ_{13} ", Invited Talk at XXIV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2012), Kyoto, Japan, June 3-9, 2012. Published in Nuclear Physics B - Proceedings Supplements Vol. 235-236 (2013) 173-179.
 6. H. Minakata, "Neutrino Oscillation and Neutrino Velocity", Invited Talk at Alexei Smirnov Fest and "What is ν ": From new experimental neutrino results to a deeper understanding of theoretical physics and cosmology, The Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics, Arcetri, Florence, Italy, June 11-July 14, 2012.
 7. H. Minakata, "Introduction to the Standard Model I-II", Invited Lecture at The 4th International Summer School on Neutrino Physics (INSS2012), Blacksburg, Virginia, USA, July 10-21, 2012.
 8. H. Minakata, "Precision measurement of mixing angles and CP", Invited Talk at International workshop on RENO-50 toward Neutrino Mass Hierarchy, 13-14, June 2013, Seoul National University, Seoul, Korea.
 9. H. Minakata, " θ_{23} and δ can be measured accurately at the same time", Talk at XXIV International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos - WIN'13, Natal, Brazil, September 16-21, 2013.
 10. H. Minakata, "Neutrino Physics Now and in the Near Future", Invited Talk at 10th International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics (CosPA2013), Honolulu, Hawaii, November 12-15, 2013.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 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 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

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・名誉教授
 研究者番号：00112475

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：