

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800128

研究課題名(和文)水チェレンコフ検出器を用いた電子ニュートリノ測定の高精度化の研究

研究課題名(英文)High-precision measurement of electron-neutrino with a water Cherenkov detector

研究代表者

田中 秀和 (TANAKA, Hidekazu)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：00402769

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：東海のJ-PARCで生成したほぼ純粋なミュオンニュートリノビームを295km離れた後置検出器 スーパーカミオカンデ(SK)に照査する長基線ニュートリノ振動実験T2Kは、ニュートリノ混合角1-3角がゼロである仮説を7%以上の精度で排除し、1-3角が揺るぎないものとした。1-3角がゼロではない値であることが明らかになったことにより、ニュートリノの粒子と反粒子対称性(CP対称性)の破れの研究から物質優勢宇宙の解明の糸口になるものと期待されている。本研究は、SKの詳細な較正とそれを基にした事象再構成アルゴリズムの開発によりCP対称性の測定に重要な(反)電子型ニュートリノ出現現象の測定の高精度化を行った。

研究成果の概要(英文)：T2K experiment is a long baseline neutrino experiment using high quality neutrino beam generated at J-PARC and Super-Kamiokande as the far detector. T2K obtained a definitive results on electron neutrino appearance. That is a breakthrough to measure the neutrino CP symmetry which could explain the matter dominant universe. This study aims to improve the measurement precision of electron neutrino appearance, in order to measure the CP symmetry first time, by carrying out detailed SK detector calibrations and by improving the SK event reconstruction algorithm based on the calibration results.

研究分野：素粒子物理実験

キーワード：ニュートリノ CP対称性 光電子増倍管

1. 研究開始当初の背景

スーパーカミオカンデ (SK) による発見に始まったニュートリノ振動、すなわちニュートリノの質量と混合に関する研究が世界中で進行している。その中でも、3世代のニュートリノ間の3つの混合角 (1-2角、2-3角、1-3角) のうち、唯一未測定であった1-3角について、加速器ニュートリノ実験である T2K 実験 (日本) や MINOS 実験 (米国)、原子炉ニュートリノ実験である Double CHOOZ 実験 (フランス)、Daya Bay 実験 (中国)、RENO 実験 (韓国) が先を競って実験を進めてきた。

そのなかで、東海の J-PARC で生成したほぼ純粋なミューニュートリノビームを 295km 離れた後置検出器 SK に照査する長基線ニュートリノ振動実験 T2K は、2011年に世界に先駆けてミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動事象を観測し、1-3角がゼロではない値であることを示した。その後、MINOS 実験、原子炉ニュートリノ実験からも次々と1-3角の測定結果が与えられている。2013年にはT2K実験が1-3角がゼロである仮説を 7σ 以上の精度で排除し、1-3角が揺るぎないものとした。

1-3角がゼロではない有限の値であることが明らかになったことにより、レプトンセクターでの粒子と反粒子対称性 (CP 対称性) の破れの研究、すなわち CP 位相 δ_{CP} の測定が可能となり物質優勢宇宙の解明の糸口になるものと期待されている。

2. 研究の目的

δ_{CP} の測定を目標にした実験は T2K だけではなく、米国の NOvA 実験も 2013 年からデータ収集を開始している。本研究は、T2K 実験で世界に先駆けて δ_{CP} を測定するために電子ニュートリノ出現事象の更なる高精度測定を実現し、T2K 実験の δ_{CP} 測定感度を最大限に引き上げることを目的としている。

3. 研究の方法

電子ニュートリノ出現事象の更なる高精度測定のために、主に2つの研究に取り組む。

(1) SK で用いられている 50cm 径の光電子増倍管 (PMT) には光電面上の光の入射位置に依存して PMT の応答が異なることが知られている。本研究では、まず光の入射位置依存した PMT の応答の詳細を測定する。

(2) 電子ニュートリノ出現現象から生成されるチェレンコフ光は指向性があるため、上述の PMT 応答の光入射位置依存性の影響が大きいことが考えられる。そこで、PMT 応答の光入射位置依存性の測定結果をもとに、その影響を考慮した事象再構成アルゴリズムを開発する。これにより電子ニュートリノ出現事象測定の更なる高精度化を実現する。

(3) T2K 実験のニュートリノ・ビームと反ニュートリノ・ビームのデータで統合解析を

実施し、ニュートリノ混合角 1-3 角の測定精度を向上させると共に世界に先駆けて δ_{CP} を測定することを目指す。

4. 研究成果

(1) PMT 応答の光入射位置依存性の測定

SK で用いられている 50cm 径の大型 PMT の応答を測定するための測定装置を開発し (図1)、SK と同型の PMT の光電面の光入射位置に依存した応答の違いを詳細に測定した。



図1: PMT 応答の光入射位置依存性測定装置の一部。写真中央にあるのが 50cm 径 PMT で、その光電面に複数の光ファイバを取り付け光電面上の異なる位置に光を入射して測定を行なった。本装置全体は地磁気補償コイル中に設置している。

この測定の結果、光の入射位置に依存して、増幅率で約 40%、光検出効率で約 30%、時間応答で約 4 ナノ秒という大きな違いがあることが明らかになった。図2に増幅率の測定結果の一部として光入射位置の異なる1光電子分布を示す。

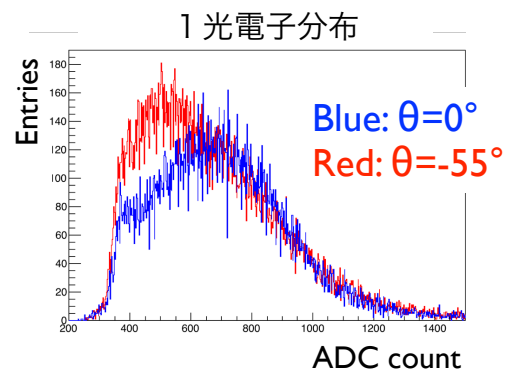


図2: 1 光電子分布。赤いヒストグラムは PMT 光電面の天頂部に光を入射させた場合、青いヒストグラムは天頂部からの角度 (天頂角) 55 度の位置に光を入射させた場合の 1 光電子分布。二つの 1 光電子分布に明らかな違いが見られ、光の入射位置によって増幅率が異なることが分かる。

図2に示したような測定を他の光入射位置についても繰り返した結果をまとめたものを図3に示す。

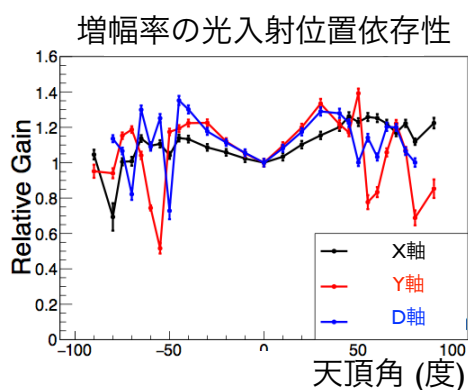


図3：PMT増幅率の光入射位置依存性の結果。PMTの増幅部（ダイノード）に対して平行（黒、X軸）、垂直（赤、Y軸）、斜め45度（青、D軸）の軸に添って異なる天頂角で光を入射して測定した結果を示す。

図3に示したように、PMT天頂角50度前後のところで増幅率が最大約40%低下していることが分かる。

次に、SKに実際に導入されているPMTにも同様の光の入射位置依存性があることを確認するために、SK検出器の詳細な検出器較正を実施した。この結果から、SKに実際に導入されているPMTにも同様の光の入射位置依存性があることを確認した。

(2) SKの事象再構成精度の改良

上記の測定・較正結果を受けて、PMT応答の光入射位置依存性をSKの検出器シミュレーションに導入した。その検出器シミュレーションを用いて、電子型ニュートリノ出現現象の測定およびCP対称性の測定で重要な、電子の測定精度に与える影響を詳細に研究した。その結果、PMT応答の光入射位置依存性の影響は、検出器の中心よりも検出器の端（壁際）で発生した事象の方が大きいことが分かった。この結果から、PMT応答の光入射位置依存性を考慮した事象再構成アルゴリズムを開発することにより、電子の再構成精度が向上できることが明らかになった。

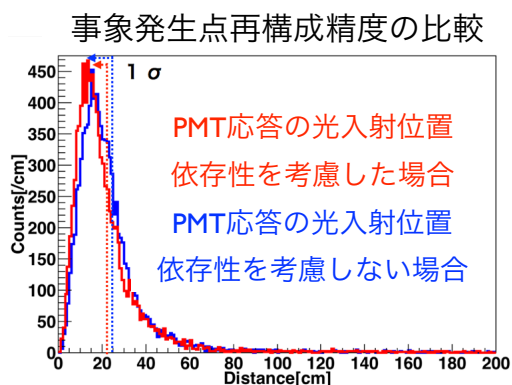


図4：事象発生点（vertex）再構成精度の比較。赤（青）ヒストグラムはPMT応答の光入射位置依存性を考慮した（考慮

していない）場合。

上述した全ての研究結果を統合して、PMT応答の光入射位置依存性を考慮した事象再構成アルゴリズムの開発を行なった。その結果、例えば電子の発生点（vertex）決定精度で約1cm、電子の運動量再構成精度で約6%の改良に成功した。図4に電子の発生点（vertex）の再構成精度の比較を示す。

(3) ニュートリノCP対称性測定

T2K実験で収集したニュートリノ・ビームと反ニュートリノ・ビームの全データの統合解析を実施した。これにより世界で初めてニュートリノCP対称性について制限を与えることに成功し、CP対称性が破れていない仮説を90%以上の信頼度で排除することに成功した[1]。さらに、研究の結果は、CP対称性が最大限に破れていることを示唆しており、世界中の研究者が注目している。

【参考文献】

[1] K. Abe et al, (The T2K Collaboration), “Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino Oscillation at T2K,” Physical Review Letters 118 (2017) 151801, DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.151801

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) K. Abe et al, (The Super-Kamiokande Collaboration) “Calibration of the Super-Kamiokande,” Nuclear Inst. And Method in Physics Research, A737C (2014) 253, DOI: 10.1016/j.nima.2013.11.081

(2) K. Abe et al, (T2K collaboration), “Neutrino oscillation potential of the T2K experiment,” Prog. Theor. Exp. Phys, (2015) 043C01, DOI: 10.1093/ptep/ptv031

(3) K. Abe et al, (The T2K Collaboration), “Measurement of neutrino oscillation in appearance and disappearance by the T2K experiment with 6.6×10^{20} protons on target,” Physical Review D91 (2015) 72010, DOI: 10.1103/PhysRevD.91.072010

(4) K. Abe et al, (The T2K Collaboration), “Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino Oscillation at T2K,” Physical Review Letters 118 (2017) 151801, DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.151801

(5) K. Abe et al, (The T2K Collaboration), “Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 1.5×10^{21} protons on target,” Physical Review D96 no.1 (2017) 11102, DOI: 10.1103/PhysRevD.96.011102

(6) K. Abe et al, (The Super-Kamiokande

Collaboration), “Search for nucleon decay into charged antilepton plus meson in 0.316 megaton years exposure of the Super-Kamiokande water Cherenkov detector,”Physical Review D96 (2017) 12003, DOI: 10.1103/PhysRevD.96.012003

[学会発表] (計 10 件)

(1) 田中秀和, 「T2K 実験の反ニュートリノ出現現象探索」, 日本物理学会, 2015 年 3 月 22 日~3 月 22 日

(2) Hide-Kazu TANAKA, “Neutrino Interaction Physics,”International Workshop on Neutrino Factories and Future Neutrino Facilities (NuFact2017), 2014 年 8 月 30 日

(3) Hide-Kazu TANAKA, “Hyper-Kamiokande Detector,”The 26th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 2014 年 6 月 3 日

(4) Hidekazu TANAKA, “Overview of neutrino oscillation measurements,”Neutrino Oscillation Tomography Workshop, 2016 年 1 月 7 日

(5) Hide-Kazu TANAKA, “Hyper-Kamiokande,” International Workshop for the next generation nucleon decay and neutrino detector (NNN15), 2016 年 10 月 28 日

(6) Hide-Kazu TANAKA, “Neutrino Interaction Generators,”10th International Workshop on Neutrino Nucleus Interactions in the Few GeV Region (Nuint15), 2015 年 11 月 16 日

(7) Hide-Kazu TANAKA, “Hyper-Kamiokande detector design and calibration,”International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detector (NNN16), 2016 年 11 月 3 日

(8) 田中秀和, 「スーパーカミオカンデにおける荷電レプトンとメソンへの核子崩壊探索」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21 日

(9) Hide-Kazu TANAKA, “Hyper-Kamiokande,” Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2017), 2017 年

(10) 竹中彰, 塩澤真人, 田中秀和, 「スーパーカミオカンデ有効体積拡張に向けた検出器較正と再構成アルゴリズムの開発」, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 2018 年

[その他]

ホームページ等

T2K Experiment:

<https://www.t2k.org/>

Super-Kamiokande:

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index.h>

tml

Hyper-Kamiokande

<http://www.hyperk.org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 秀和 (TANAKA, Hidekazu)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号: 00402769