

氏 名	やま もと しん べい 山 本 真 平
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3086 号
学位授与の日付	平 成 18 年 9 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillation in a long-baseline accelerator experiment (長基線加速器実験における $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の探索)
論文調査委員	(主 査) 助教授 中 家 剛 教 授 笹 尾 登 助教授 鶴 剛

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、未発見のミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動を世界最高感度で探索し、ニュートリノ混合行列の新たな知見を得た研究について報告されている。大気ニュートリノ、太陽ニュートリノ、加速器ニュートリノ、原子炉ニュートリノの研究から、ミューオンニュートリノからタウニュートリノへ、電子ニュートリノから別のニュートリノへのニュートリノ振動が確立された。しかし、3つのニュートリノが存在することから、ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動（電子ニュートリノ出現現象）が予言され、この振動モードの発見がニュートリノ物理学の重要な課題となっている。特に、電子ニュートリノ出現によりニュートリノでの粒子・反粒子対称性の研究が可能となるので、宇宙創成の謎につながる可能性があり大変重要である。

論文中のニュートリノ振動実験（K2K 実験）は、つくばにある高エネルギー加速器研究機構（KEK）の12GeV陽子加速器でニュートリノビームを生成し、250km離れた岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデ検出器でニュートリノビームを測定するという大規模な国際共同実験である。申請者はこのK2K実験で5年間にわたり収集した全データを解析し、その結果を論文としてまとめた。論文の中では、ニュートリノビームの性質の詳細な研究、前置ニュートリノ検出器におけるニュートリノ反応の研究、スーパーカミオカンデでのニュートリノ事象の測定について詳細に説明されている。また、ニュートリノビームの性質を決める、陽子標的での π 中間子生成に関して、ヨーロッパCERN研究所でのハドロン生成実験HARPの最新データを採用することで、スーパーカミオカンデでのニュートリノビームの性質をより高精度で決定している。

次にスーパーカミオカンデのニュートリノ事象選択において、バックグラウンド除去能力を飛躍的に向上させ、信号の探索感度を向上させている。シミュレーションから、電子ニュートリノ出現事象に対する最大のバックグラウンドは中性カレント π^0 生成反応であると予想される。申請者は大気ニュートリノが π^0 を生成した事象を解析し、その特徴を詳細に調べることで、新しいバックグラウンド除去方法を確立した。この新方法を使うことで、電子ニュートリノ出現事象に対し高い検出効率を維持しながら、 π^0 バックグラウンド事象の70%を除去することに成功している。結果、112加速器ニュートリノ事象中から1電子ニュートリノ事象を信号の候補として選択することに成功した。しかし、シミュレーションから予測されるバックグラウンド総数は1.7事象で、電子ニュートリノ出現事象の信号を確立するには至らなかった。

ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動が発見できなかったため、その振動確率に現時点でもっとも厳しい制限を与えた。K2K実験でニュートリノ振動が観測されているニュートリノ質量の二乗差 $\Delta m^2 = 0.0028 \text{ eV}^2$ において、振動の混合角 $\theta_{\mu e}$ が $\sin^2 2\theta_{\mu e} < 0.13$ という制限を与えた。また、より大きな Δm^2 の範囲においては、 $\sin^2 2\theta_{\mu e} < 0.10$ とより厳しい制限を与えている。3世代ニュートリノ混合モデルにおける混合角についても、 $\Delta m^2 = 0.0028 \text{ eV}^2$ で $\sin^2 2\theta_{13} < 0.26$ と、電子ニュートリノ出現事象探索でもっとも厳しい制限の一つを与えるに至った。最後に、今回得られた結果を、原子炉反ニュートリノ消滅の探索実験の結果と比較し、両結果が良く一致していることを確かめ、電子ニュートリノ出現の兆候が

まだ得られていないことを確認した。最後に、次世代のニュートリノ振動実験（例えば東海村 J-PARC 陽子加速器で準備中の T2K 実験）での探索感度の向上について、申請者が開発した π^0 バックグラウンド除去方法の有効性を実証し、今後の実験成功に向けての重要な情報を提供した。

論文審査の結果の要旨

本学位申請論文は素粒子物理学の重要課題である「ニュートリノ質量とその混合」の研究に関したもので、世界的に見ても超一流の研究結果である。特に、ニュートリノ物理学のもっとも重要な研究課題の一つである、ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動の探索について研究されている。論文中の随所に見られるように、山本氏は K2K 実験の初期からグループの中心で活躍し、多大な功績を積み上げている。共同研究であるが、論文中でも審査会においても山本氏の研究の独創性が十分に見出せる。以下に本論文での重要な結果とその意義についてまとめ、最後に審査結果を示す。

山本氏は、K2K 実験においてニュートリノビーム生成、前置ニュートリノ検出器の開発とその検出器を使った研究、大型水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデのデータ収集と物理解析と、5 年間にわたり K2K 実験の中心で活躍してきた。特筆すべきは、水チェレンコフ検出器の事象構築（Event Reconstruction）で、新しいアルゴリズムを開発し、 π^0 バックグラウンド事象の除去能率を大幅に改善したことである。結果として、電子ニュートリノ出現事象の探索感度を向上させることに成功している。山本氏は、この π^0 除去方法の新アルゴリズムを確立するために、大気ニュートリノ事象を詳細に解析した。特に大気ニュートリノ π^0 事象の解析、大気電子ニュートリノ候補事象中からの π^0 事象の選択、2 チェレンコフリング事象からのミューオン + π^0 事象の研究は、山本氏の独創的アイデアによる素晴らしい成果である。また、「陽子 + アルミニウム衝突における π 中間子生成」の最新データをニュートリノビームシミュレーションの中に採用することで、スーパーカミオカンデでのニュートリノビームの決定精度を向上させたことも特筆すべき点である。

結果は、K2K 実験の探索感度では、電子ニュートリノ出現事象は発見できず、ニュートリノ振動について厳しい制限を加えることとなった。特にバックグラウンド事象はデータとシミュレーションの両方を使い計 1.7 事象と精度良く予測した。結果として、ニュートリノ質量の二乗差 $\Delta m^2 = 0.0028 \text{ eV}^2$ で、その混合角は $\sin^2 2\theta_{\mu e} < 0.13$ 、つまりミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの変換は 13% 以下の確率でしか起こっていないことを確定した。本論文の結果は、加速器ニュートリノを使った、電子ニュートリノ出現事象探索では、世界最高感度の結果であり、学位論文として非常に高い価値を有している。

また、山本氏の研究は、現在の結果を超え、将来のニュートリノ実験に対しても重要な意義がある。将来の加速器ニュートリノ実験は、ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの変換確率を 1% 以下の感度で探索することを目指している。しかし、実験の成否は水チェレンコフ検出器の持つ π^0 バックグラウンド除去能力に強く依っているので、山本氏が開発した新しい π^0 除去方法は有効である。また世界各地で大型の次期水チェレンコフ測定装置建設の計画が考えられている現状では、水チェレンコフ検出器での電子ニュートリノ出現探索を研究した本論文に対する注目度は非常に高い。

以上より、本論文は博士（理学）の学位論文として、大変高い価値があることを認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、申請者は多数の難問にも明確な回答をした。よって論文審査合格と認めた。