

氏名	はせがわ まさや 長谷川 雅也
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	理博第2986号
学位授与の日付	平成18年3月23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	Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with Neutrino-Nucleus Interaction Studies in the K2K Experiment (K2K実験におけるニュートリノ-核子散乱の研究とその結果を用いたニュートリノ振動パラメータの測定)
論文調査委員	(主査) 助教授 中家 剛 教授 今井 憲一 教授 西川公一郎

論文内容の要旨

本論文は、「ニュートリノ振動」現象を世界で初めて加速器ニュートリノを使って測定し、素粒子物理学の最重要課題の一つである「有限のニュートリノ質量」を確立したことについて報告している。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)12GeV陽子加速器でニュートリノビームを生成し、250km離れた岐阜県飛騨氏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観測するという大規模な国際共同実験である。

論文ではまず、申請者が開発した新型ニュートリノ測定器について詳細に報告されている。測定器は全領域が粒子に対して高感度を持つシンチレータでできており、更にシンチレータは総数15,000チャンネルに細分割されていて高解像度でニュートリノ反応事象を捕らえることができる。申請者が独自に開発した1%以下の高精度で測定器性能をモニターできる画期的な実験装置についても詳しく記述されている。特に新型測定器の粒子識別能力は大変優れており、その性能により次に述べる物理解析を可能としている。

次に、これまで実験データが存在しなかった低エネルギー「荷電カレントコヒーレント π 生成反応」の探索が本論文の柱の一つとして詳細に報告されている。新型ニュートリノ測定器で探索された「コヒーレント π 生成反応」は理論モデルの予想470に対し、観測値は 7.64 ± 50.4 事象と優位に少ないことが判明した。明確な信号が観測されなかったため、「荷電カレントコヒーレント π 生成反応」の反応断面積は全荷電カレント反応断面積に対して0.6%以下という結果を導いている。この結果は、過去の高エネルギーでの「コヒーレント π 生成」の実験結果や「中性カレントコヒーレント π 生成」の実験結果と矛盾しており、理論モデルに大きな変更を要求している。この結果はニュートリノ反応の研究分野において非常に重要であり、既に申請者を第1著者として、Physical Review Letters誌に掲載されている。

次にこの実験結果を基に、KEK側のニュートリノ測定器と遠方のスーパーカミオカンデ検出器を使って、ニュートリノ振動現象の測定が行われた。スーパーカミオカンデ検出器で観測されたビーム起源のニュートリノ事象は112事象で、KEK側ニュートリノ測定器から予測された $155.9 + 11.6 - 10.2$ 事象より優位に少ない。この測定から、99.8%の確率でニュートリノ振動を実証している。また独立にニュートリノ振動確率のエネルギー依存性を測定し、ニュートリノ振動を99.5%の確率で実証している。両測定を合わせて99.996%以上で、世界で初めて加速器ニュートリノを用いてニュートリノ振動現象を確立した。またニュートリノ振動はニュートリノ質量が存在してはじめて起こる現象であり、本結果は「有限のニュートリノ質量」の存在を確立したと言える。

次にニュートリノ振動のパラメータ：混合角 θ と質量二乗差 Δm^2 の測定を行っている。混合角 θ は 45° 、 Δm^2 は90%の確率で 1.9×10^{-3} と $3.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ の領域と、現存するデータでは最高精度で振動パラメータを決定することに成功している。この結果は、最初にニュートリノ振動の徴候を発見したスーパーカミオカンデの大気ニュートリノの結果と良く一致しており、「ニュートリノ質量」を確立した歴史に残る重要な研究結果である。

論文の最後では、K2K 実験の結果がニュートリノ振動以外の新現象、特にニュートリノ崩壊やニュートリノがコヒーレント状態から解ける新現象で説明できるかどうか考察されている。結果としては、現データはニュートリノ振動がもっとも実験データを良く再現するモデルであると確認され、まとめられている。

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「ニュートリノ振動」現象の実験結果についてまとめてあり、世界的に見ても超一流の結果である。また論文中の随所に見られるように、申請者は K2K 実験の初期の頃からグループの中心として活躍し、多大な功績を積み上げている。研究内容においても、申請者の独創性が十分に見出される。以下に申請者の成果を順にまとめる。

申請者は、K2K 実験においてニュートリノビーム生成と KEK 側のニュートリノ測定器の専門家として 5 年間にわたり実験を行ってきた。またその途中にスーパーカミオカンデの事故等があり、スーパーカミオカンデの普及作業にも従事している。特筆すべきことは、申請者が中心となり新型ニュートリノ測定器の開発を成功させたこと、その新型ニュートリノ測定器を使ってニュートリノと原子核反応の研究を進展させたこと、最後に 5 年にわたる K2K 実験の全データを使ったニュートリノ振動解析をまとめたことである。申請者は新型ニュートリノ検出器を使って、ニュートリノエネルギーを特定する際に重要なニュートリノと原子核反応の理解を飛躍的に発展させた。特にニュートリノと原子核反応の大きな謎の一つ、運動量移行 (Q^2) が小さい領域で実験データと理論モデルの間に存在する不一致、を新型ニュートリノ測定器のデータを使って解明した。申請者の研究結果は、世界で初めてニュートリノエネルギー 1GeV 領域で「ニュートリノ荷電カレント反応におけるコヒーレント π 生成反応」を最高感度で探索し、その反応断面積にもっとも厳しい上限値を設けたことである。この成果により、1GeV 領域のニュートリノのエネルギーを高精度で測定することが可能となり、ニュートリノ振動現象最大の特徴である「振動確率のエネルギー依存性」をスーパーカミオカンデで明確に観測することを可能とした。またこの実験結果は、原子核物理学の分野でも重要な成果の一つである。

ついで K2K 実験の全データを用いてニュートリノ振動の解析を行い、世界で初めて加速器ニュートリノを使って「ニュートリノ振動」現象の明確な (4.2σ) 証拠を実証した。解析は、KEK 側の全てのニュートリノ測定器のデータを組み合わせ、高精度でニュートリノのフラックスとそのエネルギースペクトラムを決定している。そして、その測定値を基に、スーパーカミオカンデにおける観測値を予測した。次いで、スーパーカミオカンデでビーム起源のニュートリノ事象を選択し、ニュートリノ振動で予想されていたニュートリノ事象の欠損とそのエネルギー分布を確認した。更に同データを使って、ニュートリノ質量の情報として重要なニュートリノ間の質量の二乗差を世界最高精度で $1.9 \times 10^{-3} \leq \Delta m^2 \text{ (eV}^2\text{)} \leq 3.5 \times 10^{-3}$ と決定した。この研究成果は将来のニュートリノ研究、特にニュートリノ振動実験において非常に重要であり、申請者のこの分野に対する貢献は注目に値する。

よって、本論分は博士（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。