

(論文内容の要旨)

本論文は、加速器を使ったニュートリノ振動実験において必要な情報となるニュートリノと原子核の反応、その中の荷電カレント π 中間子生成反応の研究について報告されている。ニュートリノ振動を測定する際にエネルギー決定精度が高い荷電カレント準弾性散乱事象を信号として選択するが、荷電カレント π 中間子生成反応事象がバックグラウンドとして混入してくる。このため、ニュートリノ振動を高精度で測定するためには、荷電カレント π 中間子生成反応の理解が必要不可欠である。しかし、現存する荷電カレント π 中間子生成反応のデータは、ニュートリノ振動の精密測定に必要な精度を満たしていない。本論文では、世界最高の感度で荷電カレント π 中間子生成反応を測定し、その理解を飛躍的に改善させた。

本研究は米国フェルミ国立加速器研究所で行われた SciBooNE 実験 (FNAL E954) からの結果である。SciBooNE 実験ではフェルミ研の 8GeV 陽子加速器により生成された数 GeV エネルギーのニュートリノビームを使って、ニュートリノと原子核の反応で生成した粒子を測定している。SciBooNE 実験の測定器は、陽子標的より 100m 下流に設置されており、高感度ニュートリノ測定器 (SciBar)、電磁カロリメータ (EC)、ミューオン飛程測定器 (MRD) で構成されている。ニュートリノ標的である SciBar 測定器は中心部分をシンチレータで作られており、その主成分は炭素である。よって、研究はニュートリノと炭素標的で生じた事象を選択し、その中から荷電カレント π 中間子生成反応を選択することで、この反応断面積を測定してある。

事象選択においては、まず荷電カレント反応の信号であるミューオンを MRD で測定し、その運動量を決定する。次に SciBar 測定器でニュートリノ反応で生成された荷電粒子群からミューオンに加えて π 中間子が生成された反応を選択する。荷電カレント π 中間子生成反応には 2 種類あり、一つはニュートリノと核子が反応し、 Δ 共鳴を通してミューオン、 π 中間子、陽子もしくは中性子が終状態として観測される CC1 π 反応、もう一つはニュートリノと炭素原子がコヒーレントに反応し、ミューオンと π 中間子が終状態として観測される CC コヒーレント π 反応である。論文ではミューオンと π 中間子を選択した後、ニュートリノ反応点近傍に CC1 π 反応の特徴である陽子によるエネルギー損失を同定することで、CC1 π 反応と CC コヒーレント π 反応を区別している。

この論文では、理論予想の不定性が大きい CC コヒーレント π 反応に的を絞り探索したが、優位な信号を観測できず、その反応断面積に上限値を設定した。具体的にはニュートリノビームフラックスの不定性を抑えるために、全荷電カレント反応に対する CC コヒーレント π 反応の割合を、ニュートリノエネルギー 1.1GeV 付近においては 0.67% 以下、ニュートリノエネルギー 2.2GeV 付近においては 1.36% 以下と決定した。この測定結果は、現在世界最高精度であり、以前日本で行われた K2K 実験で探索した上限値とも一致している。ただし、米国フェルミ研で行われている別のニュートリノ実験である MiniBooNE で測定された中性カレントコヒーレント π 生成反応の測定結果とは矛盾し、議論を呼んでいる。今後より多方面からの研究が必要である。最後に、この結果を受けて発表された新しい理論モデルとの比較も行われており、SciBooNE のデータでより高感度な解析の可能性も議論されている。

本結果は、ニュートリノと原子核の反応の研究において非常に重要な結果であり、ニュートリノによる π 中間子生成反応の理解を向上させた。

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、素粒子物理学で重要なニュートリノ振動研究の基礎データとなるニュートリノによる π 中間子生成反応を世界最高精度で測定した、重要な結果である。近年、ニュートリノ振動の精密測定において、ニュートリノと原子核の反応の詳細を理解することが重要と認識されている。特に、本学位論文のテーマであるニュートリノ荷電カレント荷電 π 中間子生成反応は、その中で、もっとも重要な反応形式である。荷電カレント π 中間子生成反応には、 Δ 共鳴を通して反応するものと、原子全体とコヒーレントに反応する形式がある。本論文では、特に荷電カレント・コヒーレント π 中間子生成反応に焦点を絞り、現在ニュートリノ振動の研究で広く活用されているライン&シーゲルモデルが予想する断面積ではコヒーレント π 中間子生成反応がないことを突き止め、ニュートリノ研究のコミュニティに大きなインパクトを与えた。論文中の随所に見られるように、平出氏は SciBooNE 実験初期の実験提案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。共同研究ではあるが、論文においても審査会においても平出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。

論文には、ニュートリノ振動の物理、ニュートリノと原子核反応の物理が大変わかりやすくまとめられている。実験に関しても、フェルミ研のニュートリノビームライン、SciBooNE 測定器に関して明確に記述されている。特に平出氏は、SciBooNE 実験のデザイン、提案、測定器制作、実験のデータ収集、物理解析、シミュレーション構築と実験全般について関わっており、実験に対する理解の深さが読み取れる。物理解析では、ニュートリノ反応事象を選択するための、荷電粒子のトラッキング手法の開発と改善、荷電粒子の識別手法の開発、ニュートリノ反応バーテックス近傍でのエネルギー測定による陽子識別法の開発が平出氏の主たる貢献である。その結果、SciBooNE 実験は世界最高感度でニュートリノ反応の研究を遂行できている。物理解析においては、全ニュートリノ荷電カレント反応中1%以下しか存在しない、コヒーレント π 中間子生成反応を識別する方法、特にバックグラウンド事象の推定方法の開発が特筆すべき点である。

結果は、SciBooNE 実験ではコヒーレント π 中間子生成反応は観測できず、現在世界でもっとも厳しい上限値を設定し、ニュートリノ振動の研究で広く活用されているライン&シーゲルモデルを変更する必要があることを確定した。本論文の結果は、加速器ニュートリノを使ったニュートリノ反応実験では、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、ニュートリノ振動の研究にも大きなインパクトを与える結果で、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。