

論文審査の結果の要旨

氏名 長倉 直樹

本論文は7章からなり、その研究内容は、基本的な素粒子である中性子の寿命をパルス化された冷中性子ビームを用いて精密に測定することを目指し、検出器システムの開発と測定データの詳細な解析により、約1%の精度の結果を得たものである。

第1章(序章)では、中性子の寿命と標準模型やビッグバン元素合成との関連が議論され、その精密測定の重要性が示されている。また、飛行中性子を用いた測定値と超冷中性子を用いた測定値に約 4σ (約1%)の不一致が示され、その要因としてそれぞれの手法の長所および短所が分析されている。本研究はその分析に基づいた新しい手法による精密測定である。当該研究の理論的背景および実験的現状の理解と研究の方向性およびその中における当該研究が明確に位置づけられており、論文提出者の科学的視点の確かさが示されている。

第2章では、実験のセットアップの詳細が記述されている。J-PARC 物質・生命科学実験施設のBL05で生成された偏極中性子ビームをスピン反転チョッパーによりパルス状にし、中性子束と中性子の崩壊を測定するタイムプロジェクションチェンバー(TPC)に導かれた。パルスの幅は速度の異なる中性子の飛行距離の差がTPCの内部に十分に含まれるように設定され、中性子パルスがTPCを通過している時間に起こる崩壊のみが測定された。TPC中には微量の ^3He ガスを混ぜ、断面積が精度よく決まっている $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 反応を同じ条件で測定することにより、中性子フラックスが決定された。この研究の要であるTPCは、バックグラウンドを減らすための材料の選定、長期測定の安定性とそのモニタリングシステムの開発が行われた。高精度測定のための検出器システムが着実に開発されており、論文提出者の開発能力の高さが示されている。

第3章では、2014年から2018年までに行われた実験の測定条件の詳細および取得されたデータの質の評価が行われている。特に、TPCのドリフト距離に対するパルス波高の減衰率の時間変化が詳細に分析されている。これらの情報はデータの補正の信頼度を高めており、論文提出者の実験遂行能力の高さが示されている。

第4章では、測定すべき事象およびバックグラウンド事象のシミュレーションが行われている。測定された中性子ビームのプロファイルを用いて、検出器内で想定される物理過程からの事象を発生させ、その事象に対する検出器の応答がシミュレートされ、第5章での解析で用いられる。想定される物理過程および検出器応答を決める要因に対する理解が深く、論文提出者の分析能力の高さが示されている。

第5章では、測定データの解析が記述されている。バックグラウンド事象を生成する10種類にのぼる物理過程の分析および第4章のシミュレーションに基づき、測定された時間情報、エネルギー情報、飛跡パターンの情報を用いて、崩壊事象とフラックスを決定するための ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ 反応からの事象数とバックグラウンド事象数が評価された。また、 ${}^3\text{He}$ の個数密度の決定のための2つの手法が開発され、それらの整合性が確認された。解析の多くの部分にオリジナリティーが示されており、論文提出者の優れた解析能力が示されている。

第6章では、第5章で見積もられた事象数に対する誤差の評価が行われ、中性子の寿命として、 $898.8 \pm 4.7(\text{stat.})_{-8.9}^{+7.7}(\text{sys.})$ 秒という結果を得た。この章で記述されているさまざまな事象に対する緻密な評価は結果の信頼性を担保するもので、当該研究の価値の高さを示している。

これらの内容は、第7章にまとめられ、あわせて、今後の精度向上のための開発が提案されている。

以上のように本研究は、中性子の寿命という基本的な物理量を1%の測定精度で実証したもので、また、系統誤差の向上のための開発課題を明確に示しており、今後のより高い精度測定のためのマイルストーンとして基礎物理研究に大きく貢献するものである。

なお、本論文は共同研究であるが、主たる測定システムの開発、実験、シミュレーション、解析を論文提出者が主体となって行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

従って、博士(理学)の学位を授与できると認める。