九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

Development of a Detector System for Precise Neutron Lifetime Measurement using Magnetic Field

角, 直幸

https://doi.org/10.15017/4059985

出版情報：九州大学, 2019, 博士（理学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

（様式３）

氏　　名　：　角　直幸

論 文 名　：　Development of a Detector System for Precise Neutron Lifetime Measurement using Magnetic Field
(磁場を用いた中性子寿命精密測定装置の開発)

区　　分　：　甲

論　文　内　容　の　要　旨

原子核に束縛されていない中性子は弱い相互作用を介して、陽子と電子と反電子ニュートリノへとβ崩壊する。その寿命 $\tau_n = 879.6 \pm 0.8$ 秒 (Particle Data Group 2019) は、宇宙論において初期宇宙の元素合成量を予測する「ビッグバン元素合成理論」や標準理論においてクォークの混合の強さを表す「CKM 行列のユニタリ性」にとって重要なパラメータである。これまで大別して 2 種類の方法で測定されてきたが、それらの間には 8.4±2.1 秒 (4.0σ)の乖離が見られている。手法の一方は「貯蔵法」と呼ばれ、低エネルギーの中性子を容器に閉じ込め一定時間後に残っている中性子を数えて測定する。他方は「ビーム法」と呼ばれ、測定器に中性子ビームを通過させその流量とβ崩壊で発生する陽子や電子を測定する。

この乖離は、我々の未知の物理によって生まれるか、考慮されていない測定上の系統誤差によるものか議論が続けられている。前者の場合、中性子が検出不能な暗黒物質などの粒子へと崩壊すると、貯蔵法では見かけの寿命は短くなりビーム法との差を説明できる。一部の暗黒物質への崩壊モードは、既に実験的に排除されている。後者の場合、測定上の系統誤差を理解することが重要となる。貯蔵法では最も重要な貯蔵効率に対する理解のため、様々な方式の容器が開発され測定されている。ビーム法でも崩壊して生じた陽子を測定する方法と電子を測定する方法が存在し、本研究では電子を測定する手法を採っている。

本手法では、ガス検出器 Time Projection Chamber (TPC) の中央に中性子バンチを通過させβ崩壊で生じる電子と、ガスに微量に封入した ^{3}He ガスによる中性子吸収反応 ^{3}He(n,p)^{3}H から中性子ビームの流量を測定し、これらの比から中性子寿命を導出する。中性子吸収反応由来のγ線が生じる電子が、β崩壊で生じる電子信号に漏れ込むことが最も大きな不定性となっている。これらの背景事象は主に検出器や真空容器などの壁面で発生し、中性子ビーム軸上から発生するβ崩壊とは異なる飛跡を描くが一部の電子は区別がつかず、背景事象となっている。本論文では、ビーム法による中性子寿命測定実験のこれまでの課題を克服した新しい実験を提案し、磁場を用いた高精度な測定装置の開発と性能評価に関する研究をまとめる。

筆者らはビーム軸方向に一様な磁場を印加することにより壁面で発生する背景事象を退け、中央のビーム軸領域で背景事象を抑えて測定可能なシステムを考案した。モンテ・カルロシミュレーションを用いた原理検証を経て、必要な磁場の強度と検出器の寸法の具体的なデザインを行った。必要となる磁場の強度と寸法に適合する磁石として、宇宙線反粒子探索 BESS 実験のために準備された超伝導磁石の予備機を採用した。この超伝導磁石を元に、設置架台、真空容器、検出器、データ

収集システムを設計した。中でも検出器は最も重要な開発項目であり、九州大学にて総数 725 本にもおよぶワイヤーを張った。張力を 1 本 1 本測定し緩みのないことを確認し、ワイヤーへ高電圧を安定して印加するために放電箇所を特定し修正する試行錯誤を繰り返した。九州大学での X 線源(^{55}Fe)と宇宙線を用いた検出器の動作試験を経て、2019 年 4 月超伝導磁石のある高エネルギー加速器研究機構へと輸送し、検出器と磁石の統合試験を実施した。磁場を印加した環境下でも検出器は増幅率を落とさず問題なく動作することを確認した。

本研究で測定したい信号事象である中性子の β 崩壊電子を模擬するために、検出器中央に塩化カリウム粉末を設置しこれに含まれる ^{40}K から放出される β 線を用いた。磁場を印加すると β 線は検出器中央領域のみにとどまり周囲の領域では検出されないことを確認した。また、本研究で排除したい背景事象を模擬するために検出器の側に γ 線源(^{60}Co,^{137}Cs,^{152}Eu)を設置し磁場の有無による違いを比較した。磁場無しの環境と比べ、磁場有りの環境では γ 線源由来の背景事象を 2%程度まで抑えられた。これらの結果をモンテ・カルロシミュレーションと比べ、中性子ビームを用いた場合でも同様に β 崩壊電子を検出器中央領域に留めたまま、γ 線背景事象を排除できることを示した。

この測定システムを用いれば、大強度陽子加速器施設 J-PARC にて 100 日間の測定により手法間の差異を議論できる 0.1%の精度で中性子寿命を測定可能である。本研究により、これまでのビーム法で課題となっていた背景事象を抑え込み、高精度な中性子寿命測定を行えることがわかった。