

Studies on improvement of neutron lifetime measurement

富田, 龍彦

<https://hdl.handle.net/2324/1959072>

出版情報 : Kyushu University, 2018, 博士 (理学) , 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 富田 龍彦

論 文 名 : Studies on improvement of neutron lifetime measurement
(中性子寿命測定の高精度化に関する研究)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

中性子寿命は、ビッグバン元素合成理論における宇宙初期の軽元素合成比や素粒子標準理論におけるクォークの混合を表す CKM 行列の要素 V_{ud} に影響を与える重要なパラメータである。現在、中性子寿命 (880.2 ± 1.0 sec) は主に 2 つの手法により決定されている。一つは陽子計数法と呼ばれる手法であり、この手法では原子炉で生成した中性子を減速させ、電場と磁場が掛かった筒状の領域に導入する。この領域中で中性子崩壊により生成した陽子は電場と磁場で拘束され、一定時間後に電場を変更することで領域外へと取り出される。この時取り出された陽子数と、導入した中性子流量の比から中性子の寿命を決定する。この手法では中性子の流量と崩壊生成物である陽子とを異なる検出器で測定するために、検出効率の評価に起因する不定性が大きな系統誤差となっている。もう一つの手法は超冷中性子貯蔵法と呼ばれる。この手法では原子炉で生成した中性子を超冷中性子領域まで減速させ、特殊な溶剤を壁面に塗布した貯蔵容器に導入する。一定時間貯蔵した後、容器から中性子を取り出し残存する中性子数を計数することで、導入中性子数と残存中性子数および貯蔵時間から中性子寿命を決定する。この手法では超冷中性子と容器壁面との間の相互作用の評価に起因する不定性が主要な系統誤差となっている。これら 2 手法において中性子寿命は独立に高精度で求められているが、その間には 3.8σ (8.4 ± 2.2 sec) のずれが存在している。

これら 2 手法における差異の検証のために、我々は茨城県東海村にある J-PARC/BL05 においてパンチ化された冷中性子とガス検出器である Time Projection Chamber (TPC) を用いた第 3 の手法による中性子寿命測定実験を行っている。本実験では、TPC に冷中性子ビームパンチを導入し、崩壊電子数と中性子流量の比から中性子寿命を決定する。TPC の動作ガスには ^4He と CO_2 の混合ガスを用いており、通常は全圧 100 kPa ($^4\text{He} : \text{CO}_2 = 85 : 15$) で運用している。また、少量の ^3He を同時に封入しており、 $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 反応により中性子流量を測定することができる。本実験では崩壊電子数と中性子流量の両者を同一の検出器で測定することが可能なため、既存の 2 手法における主要な系統誤差の要因を排除することができ、高精度での中性子寿命測定が可能となる。我々は 2016 年までに取得したデータから $899 \pm 10(\text{stat.}) +9/-11(\text{sys.})$ sec の初期物理結果を得た。本データの解析から、本実験では中性子が TPC 動作ガスにより散乱される事象が主要な背景事象であることが判明した。現在の実験の精度は統計で制限されているが、本実験の最終目標である 0.1% の精度を達成するためには、このガス散乱から生じる背景事象による不定性を 0.1% より十分小さくする必要がある。

そこで、本研究では散乱核となる動作ガスの圧力を減らすことにより、ガス散乱背景事象の低減を試みることを検討した。2016 年 9 月に動作ガス圧 25 kPa での試験運転を行い、低ガス圧運転時には TPC のゲイン低下とアンプの発熱が問題となることを明らかにした。そこで本研究では発熱の問題を解決するために低発熱の ASIC アンプを開発した。開発したアンプの性能評価を行い、チャ

ンネルあたりの発熱量を既存のアンプの 1/50 に低減できることを確認した。また、ASIC アンプの開発に合わせて後段の読み出しシステムも再設計し、差動出力回路を導入することで外来ノイズへの耐性を高め、ゲイン値を実験の要求に合わせて変更できるような改良も行った。これらの評価および開発から、今後の低ガス圧での運転において低発熱 ASIC アンプの使用が可能であることを示した。また、現在使用している測定系および解析手法の低ガス圧環境下での頑健性を確認するため、2017 年 6 月と同年 11 月に J-PARC にて動作ガス圧 50 kPa でのデータ収集を行った。本研究ではこの取得データの物理解析を中性子寿命導出まで一貫して行った。先述のゲイン低下に伴う検出効率の見積もり、モンテカルロ・シミュレーションの調整、信号選択条件の最適化、および各種不定性を見積もりを行い、最終的に動作ガス圧 100 kPa での結果と統計の範囲で矛盾のない中性子寿命の値を得ることができた。

本研究の結果から、今後の中性子寿命測定で主要な背景事象となるガス散乱事象を低減するための低ガス圧運転において、新しく開発した ASIC アンプを用いることにより課題となる発熱の問題を解決できることを確認し、また、解析手法の最適化により低ガス圧運転であっても正しく中性子寿命の値を導出できることが示せた。以上、低ガス圧での運転を通して今後 J-PARC における中性子寿命測定を高精度化できることがわかった。