

研究概要

木野 量子（素粒子・核物理学講座 原子核物理研究室）

2025 年 3 月 18 日

原子核は陽子と中性子から構成されているが、これらに加えて「ハイペロン」と呼ばれるストレンジクォークを含む粒子を取り入れると、より広い視点から原子核を形作る「核力＝強い相互作用」の性質を探ることができる。通常の原子核に Λ 粒子などのハイペロンが束縛されたものを「ハイパー核」と呼ぶ。ハイパー核の研究を通じて、ハイペロンを不純物プローブとして通常の原子核構造を精密に調べる研究や、ハイペロンが原子核内でどのように振る舞うかを調べ、ハドロンの核媒質中での性質変化を探る研究が行われてきた。さらに、宇宙の極限天体「中性子星」の内部にも、ハイペロンが存在すると考えられている。特に近年では天体観測により報告されている 2 倍の太陽質量を持つ重い中性子星について、その半径と質量に関する状態方程式を原子核物理の立場から説明するための試みとして、ハイペロン－核子間相互作用の情報が重要視されている。ハイパー核分光実験は、このストレンジクォークを含む系に拡張された核力である「バリオン間力（ NN 、 YN 相互作用）」を実験的に検証する最も有力な手法として、これまで精力的に進められてきた。

私は特に軽い系に着目し、 YN 相互作用の知見を得るための研究を行っている。研究対象は三重水素 Λ ハイパー核 (${}^3_{\Lambda}\text{H}$) である。 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ は陽子、中性子、 Λ 粒子の 3 体系であり、観測されている Λ ハイパー核のうち最もシンプルな系であるため、その基本的な物理量を知ることは非常に重要である。しかしながら、現状では、 Λ 粒子の束縛エネルギー (B_{Λ}) と、寿命 (τ) の両方に実験的な大きな不定性がある。そこで我々のグループは、これまでに報告されている手法とは独立した手法で、 B_{Λ} と τ をこれまでの 10 倍の精度で測定する実験プロジェクトを遂行している。

2022 年、独マインツ大学において「弱崩壊パイ中間子分光法による ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の B_{Λ} 測定実験」を実施した。この手法は、静止したハイパー核の二体崩壊により放出される単一運動量の π^- を、高分解能スペクトロメータで測定することで、 B_{Λ} を決定するものである。我々 A1 コラボレーションは、2012 年および 2014 年に 4 体系である ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の質量測定実験を行い、統計誤差 10 keV、系統誤差 80 keV 以下の精度で測定に成功した。本実験では、標的を従来の ${}^9\text{Be}$ から、高ルミノシティと高分解能を両立する ${}^7\text{Li}$ 標的 ($t = 2,403 \text{ mg/cm}^2$) に変更した。さらに、2 台のアンジュレータの放射光干渉法を用いた高精度電子ビームエネルギー測定法を導入し、20 – 30 keV の精度で束縛エネルギーの測定を可能にした [1]。2024 年には、スペクトロメータ運動量較正実験のデータ取得を実施した。現在はこの結果を活用した最終的なエネルギー較正解析を進めており、2025 年 5 月頃までに最終的な測定値を確定する予定である。

また、東北大学 RARiS において、「 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の直接寿命測定実験」を進めている。本手法では、1 GeV 領域の実光子ビームを ${}^3\text{He}$ 標的に照射し、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 生成時に放出される K^+ の生成時刻と、崩壊時に放出される π^- の生成時刻を両方測定することで、寿命を“直接”測定する。このとき、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の生成/崩壊位置は光子ビーム位置とこれらの放出粒子の飛跡を結ぶことによって得ることができる。この目的のために光子ビーム位置を高精度に即時測定するための検出器「Beam Profile Monitor (BPM)」の開発を行なった。BPM は応答時間の速いプラスチックシンチレーションファイバーと光検出器 SiPM を組み合わせ、その位置を定量的に読み出す。更に、データ収集系にストリーミング型の時刻測定システムを採用したことで、即時に十分な統計量を得ることができ、1 秒間の測定で 10 μm の位置精度を達成した [2]。データ収集のストリーミング化は素粒子・原子核物理実験において不可欠な技術であり、この標準化に向け日本では開発共同体「SPADI Alliance」が 2021 年に発足した。我々のグループはこの標準化に貢献するため、BPM への同システムの導入を進め、ユーザー視点でのフィードバックを提供しながらアップグレードに取り組んでいる。今後は、このシステムを単一検出器だけでなく、物理実験全体に応用する計画である。

[1] R. Kino *et al.*, “Advancements in High Precision Decay Pion Spectroscopy of s-shell Hypernuclei at MAMI”, J-PARC Symposium 2024 Proceedings

[2] R. Kino *et al.*, “Development of a real-time beam profile monitor for GeV photons and its application in accelerator facilities”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1070 1 (2025) 169992