

(Form 4)

候補者氏名
木村 佑斗

大学院生リサーチ・アソシエイト候補者 研究計画の概要

1) 研究課題題目

「大立体角スペクトロメータを用いた反 K 中間子原子核 K^-ppn の研究」

2) 研究の目的及び概略

● 目的、背景

ストレンジクォークを含む系の研究として「ハイパー核」があり、核図表として整理が進められるほど多くの核種が調査されている。同じくストレンジクォークを含む粒子である反 K 中間子を含む原子核「反 K 中間子原子核」はまだ未開拓分野であり、“ K^-p ”と“ K^-pp ”しかその存在は確定されていない。ハイパー核は通常核と同様にバリオンのみで構成されているのに対し、反 K 中間子原子核はバリオンと「実粒子としての中間子」が共存した系である、という大きな違いがある。湯川秀樹氏の中間子論以来、整数のスピンの持つボソンである中間子はバリオン同士(核子同士)をつなぐ媒介粒子(仮想粒子)として存在し、実粒子として物質を構成するものはスピン 1/2 のフェルミオン(バリオン)だと理解されてきた。したがって反 K 中間子原子核の存在は我々の物質観を根底から覆すものである。このような観点から、反 K 中間子原子核の性質を詳しく調べていくことは新たな物質科学の扉を切り開くことにつながると考えている。

反 K 中間子原子核は世界で多くの探索実験が行われたが、生成・探索・存在確認までできたのは今のところ我々の手法である、in-flight K^- ビームを利用した反応によるのみである。J-PARC は大強度 K^- ビームを使える唯一の施設である。また、開発中の本スペクトロメータは、初めて反 K 中間子原子核 “ K^-pp ” の測定に成功した J-PARC E15 実験の手法をベースにデザインされた。さらに、立体角と中性子検出効率を向上させたことによって、“ K^-pp ”より多体の反 K 中間子原子核を測定することが可能になる。

このような反 K 中間子原子核探索をするのに世界で最も適した施設と検出器を用いて、本研究では、存在が予想される “ K^-ppn ” を実際に観測することで反 K 中間子原子核は “ K^-p ” (これは通常 $\Lambda(1405)$ という Λ の励起状態として記述される) や “ K^-pp ” だけではなく、より一般的に存在するものとして確立する。また、“ K^-pp ” は通常原子核に比べて深い束縛状態であることは先行研究 J-PARC E15 実験で明らかになったが、そこから示唆される「高密度・コンパクトな構造」については依然として未解明である。本研究が対象としている “ K^-ppn ” の 3 体崩壊を詳しく調べることで、通常核に比べてどれほどコンパクトかどうかを評価ができる可能性がある(以下「方法」で言及)。理論研究と密接に連携することにより、先行研究 J-PARC E15 実験では結論できなかった反 K 中間子原子核のサイズについても初めて実験的に明らかにすることを目指す。

● 方法

■ “ K^-ppn ” の探索

J-PARC K1.8BR で供給される -1.0 GeV/c の K^- ビームを液体 ^4He 標的に照射し、中性子を前方に放出する反応で “ K^-ppn ” を生成し、開発中の新スペクトロメータで崩壊粒子を検出する。“ K^-ppn ” 測定の概念図を図 1 に示す。“ K^-ppn ” は Λ と重陽子 (Λd)、または Λ + 陽子 + 中性子 (Λpn) に崩壊すると考えられている。反 K 中間子原子核からの全ての崩壊粒子を大立体角スペクトロメータで検出し、前方に放出される中性子をミッシングマスで識別をすることにより全粒子を特定、反

応の運動学を完全に再構成し、崩壊粒子の不変質量スペクトルから束縛状態に対応するピーク構造を探索する。

■ サイズの評価

まずは“ K^-ppn ” $\rightarrow \Lambda d$ と “ K^-ppn ” $\rightarrow \Lambda pn$ の崩壊分岐比に注目する。基本的に Λpn への崩壊の場合 2 核子吸収である。“ K^-ppn ” がコンパクトだと 3 核子に吸われやすくなるため、 Λd への崩壊が増え、崩壊分岐比 $BR(“K^-ppn” \rightarrow \Lambda d) / BR(“K^-ppn” \rightarrow \Lambda pn)$ が大きくなると考えられる。これはあくまで定性的な議論であるので、定量的な議論のためには理論家との協力が必要である。

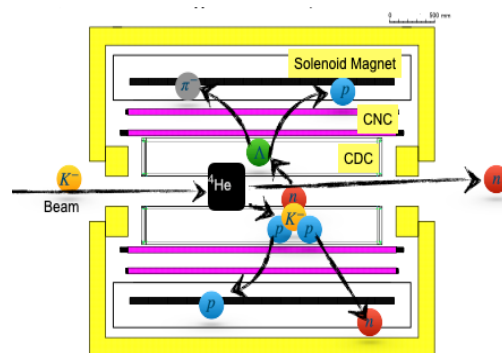


図 1. “ K^-ppn ” 探索の反応図

3) 年次計画 (標準修業年限が 4 年の場合は、4 年度目まで記載すること)

● 1 年度目(2025 年度)

申請者が修士課程次から動作試験に向けての準備をしている、CDC のコミッショニングを行なう。CDC に用いる充填ガスの決定が修士課程時の申請者の研究の 1 つであるが、そこで決定したガスを用いて実際に CDC を動かし宇宙線を測定する。非常にワイヤーが長いため、ノイズを拾いやすいはずであり、ノイズ低減を含めて全チャンネルをきちんと読み出してパフォーマンスを出せるようにする。2025 年度中に最終的な検出効率 (トラッキング効率) と位置分解能を導出する。

● 2 年度目(2026 年度)

共同研究者たちと協力して J-PARC E80 実験とその先の実験のためのスペクトロメータを実験エリアにインストールする。まずは電磁石が動くかの確認をし、磁場マッピングから始める。次に、検出器のインストールであるが、スペクトロメータは長尺であることから手順が難しく、慎重な検出器設置ジグのデザインや工程表の作成が必要となる。ビームライン検出器も CDC の奥深くに入れる必要がある。また、1 年度目に CDC の動作確認を行う場所とインストール先とは、ノイズ環境が異なる。再度丁寧にノイズ低減を含めて全チャンネルの読み出せるようにする必要がある。最終的に全ての検出器の全チャンネルの信号を確認する (スペクトロメータだけで 2,098 ch、ビームライン検出機を含めると 3,000 ch 以上)。これらを申請者が中心となって進める予定である。ソレノイド電磁石を励磁し、磁場ありの宇宙線データを取るなどしてスペクトロメータの性能評価後、ビームを用いたコミッショニングを行い、本実験の準備を完了させる。

● 3 年度目(2027 年度)

3 週間の J-PARC E80 実験を遂行する。取得した ${}^4\text{He}$ データを解析し、反 K 中間子原子核 “ K^-ppn ” の存在を世界で初めて決定する。これまでの $\Lambda(1405)$ および “ K^-pp ” の結果と合わせ、少数核子系における反 K 中間子の束縛エネルギーや崩壊幅、生成断面積の核子数依存性を明らかにする。また反 K 中間子原子核のサイズについて解析を進め、理論家と協力して結論づける。存在しなかった場合、むしろ不思議で興味深い。理論家ともに解析結果の物理的解釈を十分に議論し、最終的にその成果をまとめ、投稿論文(と博士論文)を執筆する。

同時に次の実験のプランを考えていく。2 つの方向性がある。核子数をさらに増やした “ K^-ppnn ” について調査を進めたい。非常に安定で中心密度も高い α に K^- を入れたらどうなるかが非常に興味深い。より高密度になるかもしれないし NN 斥力が勝り、深い束縛系を作らない可能性もある。 K^- の数を増やしたらどうなるのかについても関心がある。すなわち “ K^-K^-p ” や “ K^-K^-pp ” 探索である。直観的には K^- が 1 つの場合よりさらに深い束縛系になり、高密度、コンパクト化が進みそうである。いずれにせよ次の実験に進み成功させるには、検出器や標的にさらなる工夫は必須となるはずである。申請者は、その工夫を考えることが実験の面白み・醍醐味だと考えている。