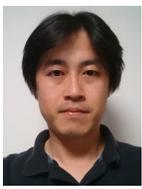


反K中間子原子核の解明へ向けた新たな展開

	研究代表者	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・専任研究員	
		佐久間 史典 (さくま ふみのり)	研究者番号：10455347
	研究課題情報	課題番号：24H00029	研究期間：2024年度～2028年度
		キーワード：加速器実験、反K中間子、新しい原子核の形態、量子色力学 (QCD)、量子多体系	

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像

我々の究極の目標は、「物質の起源と進化」、すなわち、素粒子であるクォークから我々の身の回りの物質がどのように作り出され、その物質の最終形である“巨大な原子核”と見られる中性子星へはどのように至るのか、を解き明かすことである。このような量子色力学 (QCD) が生み出す物質の謎に挑むべく、クォークの複合体であるハドロンを研究するハドロン物理学から、宇宙を研究する天体物理学まで、様々な時間・空間・エネルギースケールでの研究が多方面に進められている。

本研究では、陽子と中性子 (核子と呼ばれる) で構成される原子核に、クォークと反クォークで構成される反K中間子 - 基本的に加速器でしか作ることの出来ない粒子 - を埋め込んだ全く新しい原子核「反K中間子原子核」を用いて、「物質の起源と進化」の謎に新たなアプローチで挑む。この反K中間子原子核では、反K中間子と核子の間の非常に強い引力相互作用のために、中間子質量の変化や原子核密度の上昇など、新しい物性が出現すると考えられている。これらの事象を系統的かつ定量的に捉えることにより、“軽いクォーク3つを組み合わせるとどのように重い陽子が出来上がるのか?”、“角砂糖1個分で数億トンにもなる中性子星内部はどのような状態なのか?”などの謎に挑み、QCDによって支配される量子多体系を細解く (図1)。

反K中間子を埋め込んだ全く新しい原子核 = 反K中間子原子核

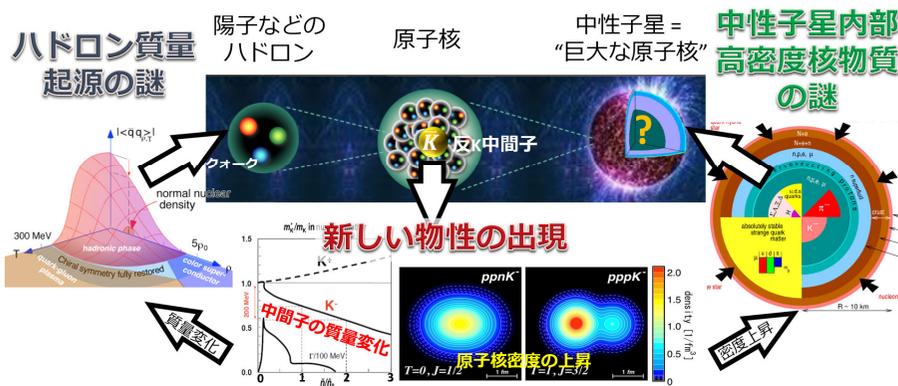


図1 研究全体のイメージ図

●反K中間子原子核の系統的研究のねらい

我々はこれまで、反K中間子原子核のうち、最も基本的な構造である陽子 (p) 2つと反K中間子 (K-) 1つが束縛した“K-pp”束縛状態を、J-PARCの実験において発見した。この“K-pp”束縛状態はコンパクトで密度の高い状態である可能性を示唆しており、より詳細で系統的な実験結果が待ち望まれている。

本研究では、反K中間子原子核に関する研究をさらに進める。具体的には、反K中間子原子核の陽子や中性子の数 (核子数) を増やしていき、それらがどれくらい強く結合するか (束縛エネルギー)、どの粒子にどのような確率で崩壊するか (崩壊分岐比) などの核子の数に依存した性質 (核子数依存) を詳細に調べ、反K中間子原子核の基礎的な性質を明らかにする。それにより、反K中間子を内包する全く新しい原子核像の確立、さらには、ハドロン間の相互作用が作り出すまでに知られていない様々な物性の探究を目指す。

●大強度反K中間子ビーム+大型検出器+詳細理論計算

J-PARCが誇る世界最大強度K-ビームと、新たにハドロン実験施設に建設する大型超伝導ソレノイド・スペクトロメータ (図2) を用いて、反K中間子原子核の生成・崩壊の包括的な測定を行う。特に本研究では、円筒形中性子検出器を新たに導入することにより、内部構造を強く反映する崩壊分岐比についての精密測定を実現する。スペクトロメータは現在製作中で、実験は2026年度の開始予定である。

さらに、詳細な理論計算手法に基づいた構造計算・反応計算と、実験により得た質量スペクトル、束縛エネルギー、崩壊分岐比などの核子数依存性を系統的・多次的に比較することにより、反K中間子原子核の空間サイズなどの内部構造を解明する。

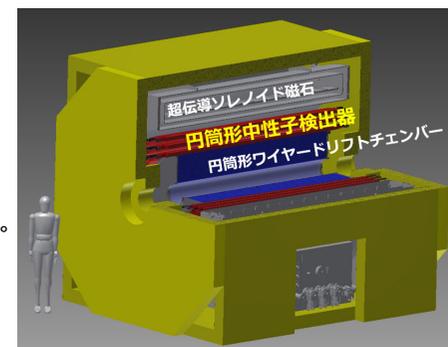


図2 大型超伝導ソレノイド・スペクトロメータ概念図

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●反K中間子原子核“K-ppn”及び“K-ppnn”束縛状態の確立

図3に示すように、反K中間子であるK-ビームをヘリウム4標的に照射し、標的の中の1つの中性子をドリヤードのように前方に弾き飛ばしてKと置き換え、“K-ppn”束縛状態を生成する。“K-ppn”束縛状態の同定は、ラムダ粒子と重陽子への崩壊の測定・再構築により行う。また、“K-ppn”束縛状態のラムダ粒子、陽子、中性子など3つ以上の粒子を含む崩壊も測定し、各々の崩壊への分岐比を導出する。

さらに、リチウム6標的にK-ビームを照射し、重陽子をはじき出して“K-ppnn”束縛状態を生成し、そのラムダ粒子と三重水素への崩壊などの測定・再構築により“K-ppnn”束縛状態の情報を引き出す。

このようにして“K-ppn”及び“K-ppnn”束縛状態の存在を確立する。本研究で得た結果とこれまでの我々の研究で得た結果を総合し、核子数が2から4までの反K中間子原子核の核子数依存性を実験的に始めて導出する。図4は、理論的に予想されている束縛エネルギーの核子数依存性であり、核子数が増えるほど大きな束縛エネルギーを持つ - より強固な束縛状態になる - と予想されている。

●反K中間子原子核の内部構造の解明

実験的に得た結果に基づいて、反K中間子原子核の詳細を理論的に明らかにする。

- ① カイラル動力学に基づいて反K中間子と原子核から構成される系での精密な光学ポテンシャルを構築し、反K中間子原子核の内部構造 (配置、サイズ、密度など) を理論的に予想する。
- ② 実際の実験に即した反応計算を行い、実験で測定される予想質量スペクトルを導出する。
- ③ 実験と理論で得た質量スペクトルの詳細な比較を行うとともに、反応の運動量移行量や崩壊の分岐比などの核子数依存性の観測量と理論予想とを系統的に調べる。

これにより、反K中間子原子核内部での反K中間子の振る舞いや空間サイズ・密度など、反K中間子原子核の内部構造を解明する。

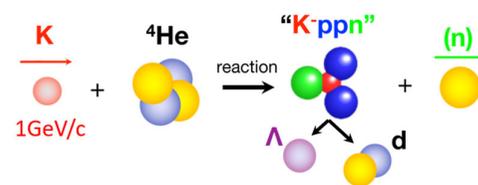


図3 “K-ppn”束縛状態生成・崩壊反応の概念図

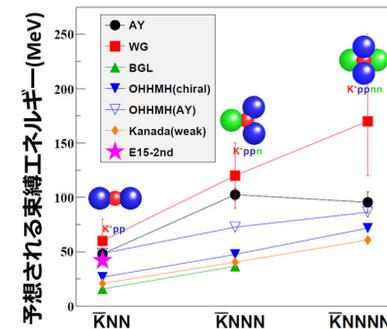


図4 理論的に予想されている束縛エネルギーの核子数依存性