


QCDから解き明かす重クォークエキゾチック粒子の謎

	研究代表者	国立研究開発法人理化学研究所・数理論創プログラム・専任研究員
		土井 琢身 (どい たくみ) 研究者番号: 70622554
研究課題情報	課題番号: 23H05439 研究期間: 2023年度~2027年度	キーワード: エキゾチック新粒子、重クォーク、格子QCD、フェムトスコープ、ハドロン理論

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

この世界の物質は素粒子クォークから構成されている。それでは一体どのようなクォーク多体系が存在しているのだろうか？そしてそれらはどのような構造をしているのだろうか？従来のクォーク多体系（ハドロンと呼ばれる）の理論では、クォーク2個からなるメソンとクォーク3個のバリオンという分類で理解されてきた。しかし、現在世界各地の大型加速器実験において、チャームクォーク、ボトムクォークといった（質量の大きい）重クォークを含むハドロンについて、新粒子の発見が続々と報告されている。これらは通常型ハドロンとは異なり、クォーク4個、クォーク5個などからなるエキゾチックな新粒子と考えられているが、その物理機構は謎に包まれており、クォークの基礎理論である量子色力学（QCD）に基づいた新たな理論枠組みの構築が急務となっている。本研究では、新粒子の性質を支配する物理量として重クォークハドロンの中に働く相互作用に着目し、そのQCD第一原理計算による導出、原子核衝突実験によるハドロン相関を通じた研究、重クォークハドロン理論による研究のタイアップにより、相互作用とエキゾチック新粒子の統一的解明を目指す。

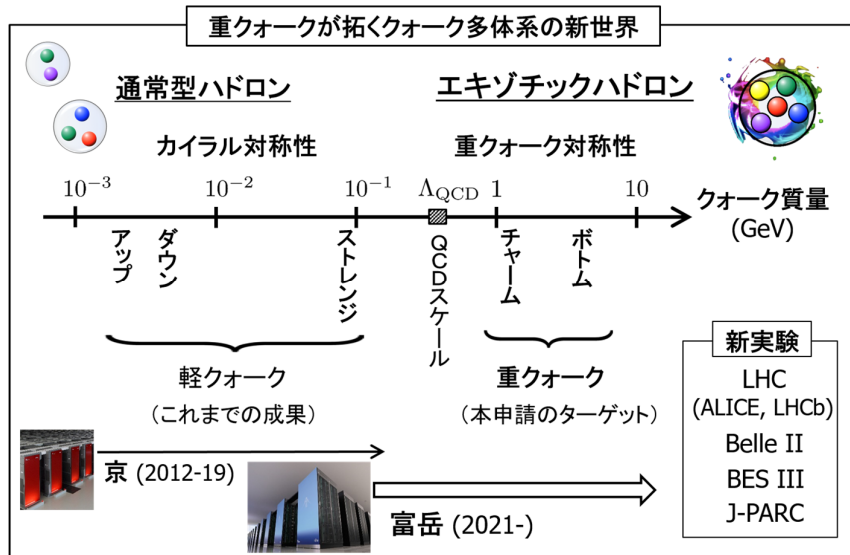


図1 重クォークと新たなクォーク多体系（エキゾチックハドロン）の全体像

●研究の手法

本研究では、QCDに基づき重クォークハドロン間相互作用を系統的に導出し、またその実験的検証に繋げると共に、得られた相互作用に基づいて重クォークエキゾチック新粒子を解明する。そのために、次の3つのテーマを設定して研究を進める。

(1) 格子QCDによる重クォークハドロン間相互作用の第一原理計算  
スーパーコンピュータ（スパコン）を用いたQCDの大規模数値計算（格子QCD）により、重クォークハドロン間の相互作用をQCDから第一原理的に（近似なしに）導出する。理論手法としては我々が独自に開発し

た手法（HAL QCD法）を用いる。既に、「京」スパコンを用いた軽クォークハドロン間相互作用の計算で実績があり、本研究では日本の誇る最新鋭スパコン「富岳」を用いて重クォークハドロン間相互作用を計算する。

(2) 重クォークハドロン間相互作用のフェムトスコープ研究

フェムトスコープとは、高エネルギー原子核衝突実験におけるハドロン相関の観測結果から、ハドロン間の相互作用の情報を引き出す手法である。我々のこれまでの理論研究に触発されて、LHCをはじめとする加速器でフェムトスコープの大規模実験が進められており、これらの国際共同実験グループと協力してデータの解析を進め、ハドロン間相互作用の実験的検証を行う。

(3) 重クォークハドロンの有効理論・現象論研究。

QCDの持つ理論的性質（対称性など）や、物理的に重要な自由度（相互作用に関わるハドロンなど）に着目し、重クォークを含むハドロンに関する有効理論や現象論の研究を行う。数多くの相互作用のうち、格子QCDで計算すべき特に物理的に重要なものを抽出すると共に、逆に得られた相互作用の情報をを用いることで、QCDに基礎付けられた重クォークハドロン理論を構築する。

これら、(1) 格子QCD (2) フェムトスコープ (3) 重クォークハドロン理論という三本柱の研究を強力に連携させる（図2）ことで、相互作用とエキゾチック新粒子の解明を行う。

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

●QCDに基づいた重クォークエキゾチック粒子の解明

- ・格子QCDにおいては、スパコン「富岳」を用い、大体積・物理的クォーク質量におけるQCD第一原理計算により、重クォークハドロン間相互作用の計算を行う。得られた結果をフェムトスコープ研究、重クォークハドロン理論と組み合わせることで、相互作用とその物理描像を確立する。
- ・フェムトスコープにおいては、格子QCDの結果と加速器実験、特に LHC ALICEのRUN3実験の結果を組み合わせ、格子計算の実験的検証を行う。また、格子・実験の情報を所与のものとして用いることで、どちらか単独では導出困難な未知相互作用や、原子核衝突における未知パラメータの決定に繋げる。
- ・重クォークハドロン理論では、QCDの持つ対称性（重クォーク対称性・カイラル対称性）に基づく有効理論、ハドロン分子模型やクォーク模型等の現象論模型の研究を推進する。さらに格子QCD、フェムトスコープの研究と比較することで理論の未知パラメータを決定し、QCDに基づく理論を構築する。
- ・これら3テーマの結果を統合することで、重クォークハドロン間相互作用を定量的に決定すると共に、得られた相互作用に基づき、エキゾチック新粒子の物理描像を明らかにし、その構造を決定する。

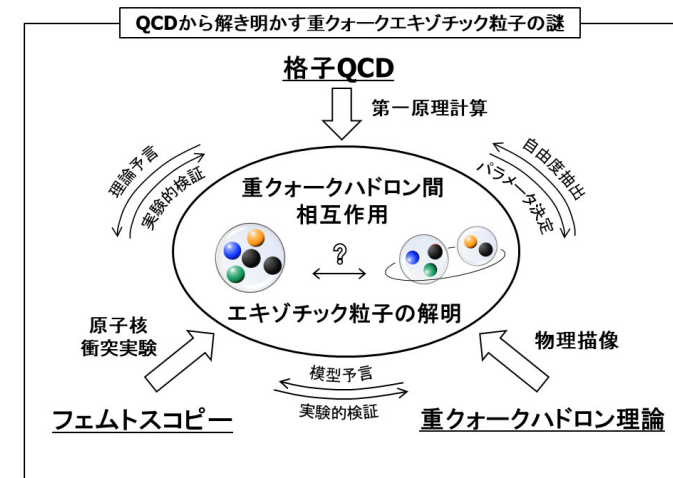


図2 格子QCD、フェムトスコープ、重クォークハドロン理論のタイアップによる重クォークハドロン間相互作用とエキゾチック新粒子の統一的解明