

格子 QCD 計算に基づくエキゾチックハドロンの研究

Search for exotic hadrons based on lattice QCD

代表者氏名 長塚 正人

所属 東北大学

1. 研究目的

本研究の目的はエキゾチックハドロン状態に対する第一原理的な理解である。物質は「カラーの閉じ込め」の性質を持つクォークにより構成される。従って観測される多くのハドロンはカラーが中性な基本的な表現のメソンかバリオンに分類される。エキゾチックハドロンとはそのような基本的なハドロンに分類できない粒子のことである。特に本研究ではダブルヘビーテトラクォーク($QQ\bar{u}\bar{d}$)を対象に研究を行う。チャームクォークを含むダブルチャームテトラクォーク($cc\bar{u}\bar{d}$)は 2021 年に LHCb において観測され理論研究が盛んに行われるようになった。またボトムクォークを含むダブルボトムテトラクォーク($bb\bar{u}\bar{d}$)は非常に深い束縛状態が理論的に予想されているという点で着目される物理系である。

2. 研究成果の内容

QCD を用いてエキゾチックハドロンの性質を理解したい一方で、低エネルギーでの強結合性のために摂動展開による解析は困難である。そこで数値計算による QCD の第一原理計算「格子 QCD」によってテトラクォークのエネルギー準位の計算を行った。経路積分においてサンプリングされた背景ゲージ場に対応する「ゲージ配位」として、PACS-CS コラボレーションによって生成されアップ、ダウン、ストレンジクォークを動的に取り入れ、 3fm の空間的サイズを持つ PACS-CS 配位を利用した。ただし物理点パイオン質量での計算は非常に計算コストが高いため、パイオン質量が 410MeV に対応する物理系での数値シミュレーションを行った。

本年度の計算では異なるソース演算子を選んだ時の有効質量の振る舞いがどのように変化するかを調査した。これまでの計算ではソース演算子として、空間座標を均等な重みで足し合わせたウォールソース演算子(Wall)を用いた。またシンク演算子としては二つのメソンを想定しそれぞれで空間和をとる分離型演算子(Sep)と、全てのクォークを同一点で足し合わせるコンパクト型演算子(Comp)の二通りを、それぞれダブルチャーム、ダブルボトムテトラクォークの場合で計算を行っていた (図 1 中の Wall-Sep 及び Wall-Comp に対応)。今年度の計算ではソース演算子として、フェルミオンをガウス形にスミアしたガウスソース演算子(Gsmr)をソースとして選び、Sep 及び Comp をシンク演算子として選んだ時に見られるエネルギー準位を、ダブルチャーム、ダブ

ルボトムテトラクォークのそれぞれに対して計算を実行した(図 1 中の Gsmr-Sep 及び Gsmr-Comp に対応)。ダブルボトムテトラクォークのチャンネルでは、新たに計算を行った Gsmr-Sep の場合と既存の Wall-Comp の場合が、 $14 \leq t/a \leq 17$ 付近で合致する振る舞いを見せた。一方、ダブルチャームテトラクォークの Gsmr-Sep の場合ではそのような合致は見られなかった。また、Gsmr-Comp の場合ではどちらのチャンネルにおいても閾値よりも上に状態が見られ、大きな励起状態の寄与が示された。

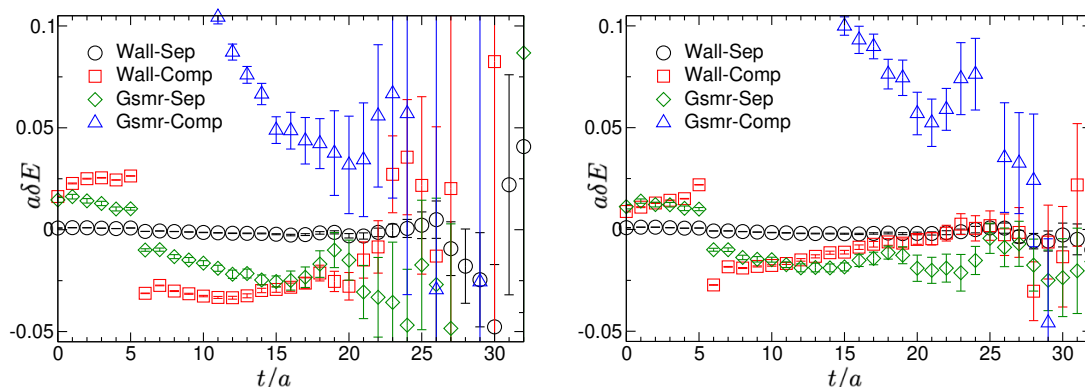


図 1. 二つの中間子の閾値から測定した有効エネルギーシフト。ダブルボトムテトラクォーク(左)とダブルチャームテトラクォーク(右)のチャンネル。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究では格子 QCD を用いるため数値計算を行う際にゲージ配位を保持できる十分なメモリが必要であり、またフェルミオンの逆行列計算では、フェルミオンの質量が軽くなるほど多くの計算時間を必要とする。従って、Pegasus や Miyabi-C といった高性能計算機を用いることで本研究は初めて可能になった。

4. 今後の展望

本年度の数値計算を総括すると、コンパクト型演算子をシンクとして選んだ時は、励起状態混合が非常に大きく、閾値よりも下にある状態にアクセスできない一方で、シンク演算子を分離型演算子(Sep)にとったときであればソースをガウススミア演算子にとると閾値以下に有効エネルギーシフトが現れることがわかった。一方で励起状態混合の影響については未だ不明確である。従って今後は、異なる幅を持つガウススミア演算子や、ボックス演算子のようなソース演算子を取った時に、有効エネルギーシフトの振る舞いがどのように変化するかを計算することで、励起状態混合の程度を定量的に理解し、閾値以下に存在する束縛状態の数について議論したい。特にダブルチャームテトラクォークでは実験的に浅い状態の存在が報告されているが、本研究では有効エネルギーシフトが深い位置に現れている。これが物理的なものであるか、励起状態混合に起因した偽プラトーであるか判定したい。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- Masato Nagatsuka, Shoichi Sasaki, “Lattice study of scattering phase shifts for DD* and BB* systems using twisted boundary conditions: search for bound state formation”, Phys. Rev. D 112 (2025) 114510

(2) 学会発表

- Masato Nagatsuka, Shoichi Sasaki, Analysis of the scattering phase shifts for DD* and BB* using Lattice QCD, GPPU School 2025, Tohoku University, September 1-4
- Masato Nagatsuka, Shoichi Sasaki, 格子 QCD による DD*および BB*散乱位相の解析, 「富岳」成果創出加速プログラム 超大規模格子 QCD による新物理探索と次世代計算に向けた AI 技術開発 総括研究会, 田町, 9月 9-11 日
- 長塚正人, 佐々木勝一, 格子 QCD を用いた DD*および BB*の束縛状態形成の探索, 日本物理学会年次大会(2025), 広島大学, 9月 16-19 日

(3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	4000		
Miyabi-G				
Miyabi-C	○	6400		
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				