

修士論文要旨

格子 QCD を用いたダブルチャーム・テトラクォーク探索

Search for doubly-charmed tetraquark states using lattice QCD

物理学専攻 原子核理論研究室
C2SM2057 長塚正人

エキゾティックハドロン研究の現状

素粒子物理学における多くの実験や検証によって、素粒子の分類はクォーク、レプトン、ゲージ粒子、ヒッグス粒子が相互作用を行う標準模型という形で洗練されてきた。特に、クォーク同士の相互作用をグルーオンと呼ばれるゲージ粒子によって記述する理論は量子色力学 (Quantum Chromodynamics : QCD) と呼ばれる。

QCD は「カラーの閉じ込め」と呼ばれる特徴的な現象のため、観測される状態は必ず、ハドロンと呼ばれるカラー中性なクォーク・グルーオン多体系である。E. Rutherford による陽子の発見以来、数百ものハドロンが発見されているが、多くはカラー中性な最も単純な構造として、3つのクォークからなるバリオンや、クォーク・反クォーク対のメソンに分類される。一方で、カラー中性であれば4つ以上のクォーク・反クォークやグルーオンを陽に含む状態も物理的には存在することができ、これらの粒子をエキゾティックハドロンと呼ぶ。特に、ダブルチャーム・テトラクォーク T_{cc} は消滅チャンネルがないクォークフレーバ $cc\bar{u}\bar{d}$ を持つテトラクォーク状態で、2021年の実験的観測 [1] に伴い盛んに議論が行われるようになった。

しかし、QCD は低エネルギー領域において強結合な理論であるため、摂動論を用いてハドロンの物理を理解することはできない。そこで用いられるのが格子 QCD と呼ばれる非摂動的な解析手法 [2] であり、コンピュータの大規模計算による QCD の現象の第一原理的な理解を目的とする。近年では劇的なコンピュータ性能の向上や、計算アルゴリズムの洗練により高精度な計算が可能になっており、メソンやバリオンの性質の計算は実験精度に追いつきつつある。一方で、エキゾティックハドロンについても格子 QCD による研究がなされているが、未だ質量の計算に留まり、構造に関する計算を行うことはできていない。

ただし、ハドロン同士の有効相互作用モデルによる解析も行われているが、実験的に測定されるのは質量と崩壊幅のみであり、ハドロン構造に関する性質を測定することはできていないため、モデルの不定性は大きい。そのため、格子 QCD を用いてエキゾティックハドロンに関する情報を第一原理的に与えることは、モデルによる物理的な理解という側面において重要な役割を果たす。

本研究内容および結果

本研究では、ダブルチャーム・テトラクォーク T_{cc} が D 中間子と D^* 中間子のハドロン分子状態であると考え、ツイストした境界条件下での格子 QCD 計算と Lüscher 公式を用いて、 DD^* の低エネルギー散乱位相の詳細な計算を行った。散乱位相は DD^* の束縛状態や共鳴状態の存在に対して重要な情報を与える。

Lüscher の公式とは有限体積のエネルギー E と散乱位相の値を関連づけるために重要である。特に同じ質量 m を持つ粒子間での S 波散乱位相 $\delta_0(k)$ は周期境界条件下において

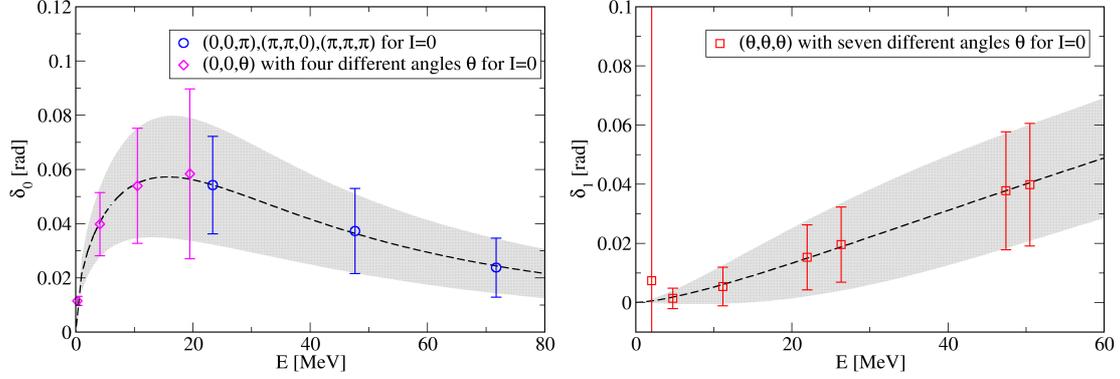


図 1: アイソスピン 0 のチャンネルでの (左)S 波散乱位相と (右)P 波散乱位相。周期境界条件のみを考慮する場合、第一励起状態は $E \approx 97$ [MeV] に相当する。ツイストした境界条件を用いることで低エネルギーでの散乱位相を詳細に読み取ることができている。

$$\cot \delta_0(k) = \frac{2}{\sqrt{\pi} L k} \mathcal{Z}_{00} \left(1; \left(\frac{Lk}{2\pi} \right)^2 \right), \quad E = 2\sqrt{k^2 + m^2} \quad (1)$$

$$\mathcal{Z}_{00}(s; q^2) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \sum_{\mathbf{n} \in \mathbb{Z}} (\mathbf{n}^2 - q^2)^{-s} \quad (2)$$

と表され格子 QCD 計算が既に行われている。しかし、一辺 L の立方体の空間に対し周期境界条件を課すと、運動量は $2\pi/L$ を単位として離散化され、計算できるのは特定の相対運動量 $k = k(E)$ での散乱位相のみである。本研究では、空間方向にツイストした境界条件を課し [2]、境界条件の連続なパラメーター θ によって $(2\pi + \theta)/L$ と表される運動量を、 θ を制御することで任意の k における低エネルギーの散乱位相を計算する。

一方で、ツイストした境界条件はパリティ対称性を破るため S 波と P 波散乱状態の混合が起こる。本研究では、独立な二つのツイスト境界条件下に拡張された Lüscher の公式を用いることで、S 波と P 波散乱位相の寄与を分離する計算を行った。図 1 が計算された (左)S 波 (右)P 波の散乱位相である。周期境界条件での計算では $E \approx 0$ [MeV] の次に計算できるのは $E \approx 97$ [MeV] だが、本研究は S 波散乱位相のピークが見える程に低エネルギーな E での詳細な計算を行った。

ツイストした境界条件での計算は、より大きな体積での数値計算の計算コストの削減や、レフトハンド・カット問題と呼ばれる DD^* 散乱位相の特異的な振る舞いを格子 QCD で研究する手段になると期待される。

参考文献

- [1] LHCb collaboration, Nat. Commun. 13, 3351 (2022), arXiv:2109.01056 [hep-ex].
- [2] S. Ozaki, S. Sasaki, Phys. Rev. D 87, 014506 (2013), arXiv:1211.5512 [hep-lat].

発表論文リスト

- [1] M. Nagatsuka, K. Sakai, S. Sasaki, Phys. Rev. D108 (2023) 094506, arXiv:2303.09938 [hep-lat].