

Title	Chamonium-Nucleon Scattering with Spin-Dependent Forces from Lattice QCD
Author(s)	杉浦, 拓也
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/72641
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (杉浦 拓也)

論文題名

Chamonium-Nucleon Scattering with Spin-Dependent Forces from Lattice QCD
(格子QCDによるスピン依存力を考慮したチャーモニウム-核子相互作用の研究)

論文内容の要旨

2015年にLHCbコラボレーションによって報告された新粒子候補、 $P_c^+(4380)$ と $P_c^+(4450)$ は、最小のクォーク構造として $uudcc^{bar}$ を持つペンタクォーク状態であると考えられている(Aaij *et al.*, 2015)。これら P_c^+ の存在形態に関して多くの理論的研究が行われている。実験的発見に先立つチャネル結合モデルによる研究(Wu *et al.*, 2010)は、 P_c^+ をハドロン2体がゆるく束縛した分子的状态とする見方を支持するものであった。それに対しEidesら(2016)は、 ϕ (2S)と核子(N)が非常に強く束縛したコンパクトな状態として P_c^+ が現れる可能性を示唆した。一方で、実験で観測されたピーク構造が、 P_c^+ に相当する共鳴状態を仮定せずに運動学的特異性として説明できる可能性も議論されている(Guo *et al.*, 2015)。このように相反する可能性が考えられるのはチャーモニウムを含んだハドロン間の相互作用に関して実験的情報がほとんどないためであり、 P_c^+ の存在形態を解明するためにさらなる実験が必要とされるのが現状である。このような中で、格子QCDにより第一原理からハドロン間散乱を計算することは非常に重要な課題である。特に、ハドロン間の相互作用をポテンシャルとして計算する手法がHAL QCDコラボレーションにより精力的に開発されており、本研究ではこれを用いる。

P_c^+ の探索においてチャネル結合を考慮することが重要となるが、本研究では実験的に P_c^+ が発見された J/ψ Nチャネルをそのための第一歩として精査する。チャーモニウム(本研究では J/ψ および η_c)と核子は共通のクォーク構造を持たないため、QCDファンデルワールス力と呼ばれるグルーオン交換力で記述される。この現象論的記述の正しさはチャーモニウムの質量がQCDのエネルギースケールより非常に重いという点に立脚しており、Eidesらの提唱したコンパクトな状態としての P_c^+ もその極限で現れる。本研究ではこの点を定量的に確かめるために、 J/ψ Nのスピン依存力を導出する。我々は微分展開の最低次における J/ψ Nポテンシャルには、中心力、スピン-スピン力、そして2種類のテンソル力があることを示した。さらに、格子QCDの数値計算によりこれらを計算した。4つのうち、中心力が最も強く引力的であること、スピン-スピン力がその次に強く、全スピン $S=1/2$ に対しては引力を強める向きに、 $S=3/2$ に対しては引力を弱める向きに働くこと、一方テンソル力はどちらも非常に弱いということがわかった。 J/ψ Nのスピン依存力を格子QCDから計算した本研究の結果は、QCDファンデルワールス力に基づいた現象論的記述の定量的な議論を可能にするものである。また、これは今後さらに上のチャネルとの結合を考慮した計算をしていく上で重要な結果である。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (杉浦 拓也)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	保坂 淳
	副 査	教 授	大野木 哲也
	副 査	教 授	青井 考
	副 査	准教授	緒方 一介
	副 査	准教授	石井 理修

論文審査の結果の要旨

量子色力学のカラー閉じ込めは、3 個のクォークでできたバリオン (qqq) やクォークと反クォークでできたメソン (qq^{bar}) の他に、4 個のクォークでできたテトラクォーク ($qqq^{\text{bar}}q^{\text{bar}}$) や 5 個のクォークでできたペンタクォーク ($qqqqq^{\text{bar}}$) のようないわゆるエキゾチックハドロンの存在も許すため、世界中の加速器実験でエキゾチックハドロンの探索が繰り返されている。これらの中に、LHCb で見つかったペンタクォーク候補の $P_c(4450)$ と $P_c(4380)$ があり、実験・理論の双方から注目が集まっている。

申請者は、 P_c を調べる第一段階として、核子-チャーモニウム間ポテンシャルを HAL QCD 法に基づいて格子 QCD で決定した。HAL QCD 法は、格子 QCD 第一原理計算によってハドロ間ポテンシャルを決定する方法である。核子-チャーモニウム間ポテンシャルの HAL QCD 法による研究では河内-佐々木の先行研究があるが、クエンチ近似を採用した点、古い HAL QCD 法に直接基づくため ground state saturation に問題がある点、D 波成分を無視して有効中心力しか議論していない点等、いくつか不満な点が残る。申請者は、JLDG から公開されている $2+1$ flavor QCD ゲージ配位を用い、ground state saturation の問題を起こさず精度よくポテンシャルを計算できる時間依存型 HAL QCD 法を採用して、核子-チャーモニウム間ポテンシャルを決定した。結果は先行研究と定性的に一致し、先行研究で問題であった ground state saturation の分だけ引力の強いポテンシャルが得られた等、定量的に大きく前進した。また、ポテンシャルを逆算する際、D 波成分も尊重することで、 NJ/ψ 間ポテンシャルを二つの中心力と二つのテンソル力成分に分解して決定している。ここで、二つ目のテンソル力は、 NJ/ψ 系の対称性に基づくポテンシャルの一般形の議論から初めて導入されたもので、 J/ψ のスピン演算子のみ依存する形をしている。結果は、heavy quark spin 対称性と consistent で、二つのテンソル力は非常に弱く、先の有効中心力近似の妥当性を定量的に裏付ける。さらに、ペンタクォーク候補 P_c の研究への次のステップとして、オープンチャームのチャンネルを加えたハドロ分子の構造を持つ可能性と、カラーファンデルワールス力に基づく核子- ψ ($2S$) の深い束縛状態である Hadro-charmonium としての構造を持つ可能性について触れ、今回の結果を使って簡単な estimate を行なっている。この研究は明らかな新規事項を有し、また、これまでの計算を精度と信頼性の両方において大幅に改善するものである。将来的にペンタクォーク候補 P_c の構造解明にむけた重要な一步に繋がる可能性を秘めている。

これにより、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値あるものと認める。