

格子QCDによるチャームクォークを含むハドロンの電磁形状因子の研究

群馬高専 高橋徹

共同研究者：岡真(東工大), U. Can(東工大), G. Erkol(Ozyegin)

— 概要 —

Belle などでの電子衝突や、LHC を始めとするハドロン実験で、クォークoniumの励起状態として、単純なクォーク・反クォーク対の束縛状態としては説明できない新しい状態が次々に発見された。X, Y, Z メソンなどと呼ばれるこれらの状態は、ハドロン分子共鳴状態やテトラクォーク状態の候補と目されている。また、Charm quark を含むハドロンのダイナミクスには、heavy quark(HQ)対称性など、これまでの軽いクォークのセクターにおけるハドロンの世界では見られなかった対称性が現れ、どのように励起状態スペクトルに影響するかなどの観点から、興味を引いている。本講演では、強い相互作用の第一原理計算である格子QCDを用いた、ヘビークォークと軽いクォークの複合系であるチャームメソンやバリオンの研究結果を報告する。スペクトル、電磁形状因子、内部波動関数等を計算して、ヘビークォークのダイナミクスがどのように反映しているかを解析する[1]。

— 手法 —

格子QCD計算において、ゲージ配位はPACS-CS collaborationの生成した2+1 flavor ゲージ配位を用いる[1, 2]。格子間隔は0.0907 fm (cut off は 2.176 GeV), 格子サイズは $32^3 \times 64$ である。Up, down クォークの Hopping parameter(クォーク質量に対応)は0.13700, 0.13727, 0.13754, 0.13770を採用する。対応するパイ中間子の質量は700 MeV から290 MeVとなる。Quark actionはWilson-Clover actionであり、gauge actionはIwasaki improved actionである。ハドロン質量は格子上の2点関数から、form factorは3点関数から求める。

— 問題点 —

Cut off artifact : Charm quark propagator を計算する際に問題となるのは、cut off effect である[3, 4]。Charm quark の質量は1.3 GeV程度と、格子 cut off と比較して無視できない値であり、cut off effect が強く現れると予想される。

計算量 : form factor の計算には格子上の3点関数を計算することになるが、通常のsequential source methodを用いると、3点関数を構成するpropagatorのうちbackward propagatorが計算するチャンネルに依存し、チャンネルごとに求めなおす必要があり、必然的に計算量が増える。

— 改善点 —

Cut off artifact : relativistic heavy quark action を用いることにより、cut off artifact の軽減を試みる。具体的には、fermilab method[5] に基づき、charmed hadron の dispersion relation を満たすよう、パラメータのチューニングを行った[1]。

計算量 : backward propagator の解き直しを避けるため、3 点関数を構成する sink operator(ハドロンの消滅演算子)に wall type の quark operator を採用する[1, 2]。これにより計算前に backward propagator を一度求めておけば、あらゆるチャンネルについて 3 点関数の計算が可能になる。デメリットとしては、空間的に広がった wall type の operator は基底状態ハドロンとのオーバーラップが小さく、シグナルが励起状態シグナルに影響を受けやすくなることである。

— 結果 —

・ハドロンスペクトル

表 1 は、格子 QCD 計算により得られた各種ハドロンの質量を示す[1]。「Ours」が我々の結果であり、「PACS-CS」は PACS-CS グループによる計算結果[3]、「Exp」は実験値である。今回用いた heavy quark action は PACS-CS グループが採用する action に比べ、パラメータ数も少なく、cut off effect が完全に切り除けたとはいえないが、しかしながら、実験値とのずれは数パーセントであり、比較的良いと考えられる。ハドロン中のバレンスチャームクォークの数が増すと、予想通り実験値とのずれは大きくなるが、これは今後の課題である。

・荷電半径、磁気能率等

表 2 は、左から、格子 QCD 計算により得られた各種チャームハドロンの Electric charge radii, Magnetic form factors at $Q^2=0$, Magnetic moments in nuclear magneton, Magnetic charge radii を表す[1]。単位は全て物理単位である。

荷電二乗半径の結果から、チャームハドロンは非常にコンパクトなハドロンであると言え、特に doubly charmed baryon のサイズが小さくなっている。(※ Ω_{cc} の荷電二乗半径がひととき小さいのは、s-quark の寄与が逆符号になるからであり、表 3 にあるように各クォークの荷電二乗半径への寄与を個別に見ると、 Ω_{cc} と Ξ_{cc} は大きな差は無い。) heavy-heavy-light quark の系では、軽いクォークの運動が積分され、cc 間の effective string tension を変化させた結果、effective な heavy quark 2 体系と見なすことができると予想される[6]が、これらの結果を charmonium やクォーク模型の結果と比較することにより、ハドロン内部の「閉じ込め力」の変化を調べるのも興味深い。

また、軽いクォークとチャームクォークの磁気能率等への寄与を個別に考察し、ハドロン内部でのクォークスピンの揃い方なども調べた。詳細は論文[1]を参照。

・磁気能率の値の比較

表 4 は、格子 QCD 計算から得られた磁気能率の値を、他のモデル計算の結果と比較したものである。(モデルの詳細は論文[1]を参照)

符号や絶対値は他のモデル計算とコンシステントな結果となっている。しかしながら、全体的にモデル計算より絶対値が小さくなる傾向にあり、今後の詳細な計算が待たれる。

— 図表等 —

	η_c	J/Ψ	D	D^*	D_s
Ours	2.977(4)	3.064(5)	1.893(9)	2.035(22)	2.022(7)
PACS-CS	2.986(1)(13)	3.094(1)(14)	1.871(10)(8)	1.994(11)(9)	1.958(2)(9)
Exp	2.980	3.097	1.865	2.007	1.968

	D_s^*	Σ_c	Ω_c	Ξ_{cc}	Ω_{cc}
Ours	2.156(13)	2.525(38)	2.740(67)	3.687(24)	3.791(36)
PACS-CS	2.095(3)(10)	2.467(39)(11)	2.673(5)(12)	3.603(15)(16)	3.704(5)(15)
Exp	2.112	2.455	2.695	3.519	-

表 1：各種チャームハドロンの質量の計算結果・実験値（単位は GeV）

	$\langle r_E^2 \rangle$	G_M	μ	$\langle r_M^2 \rangle$
Σ_c^{++}	0.234(37)	6.017(1385)	2.220(505)	0.696(153)
Σ_c^0		-2.891(736)	-1.073(269)	0.650(126)
Ξ_{cc}^{++}	0.165(12)	1.670(110)	0.425(29)	0.154(19)
Ω_{cc}	0.034(11)	1.662(87)	0.413(24)	0.148(21)
Ω_c		-1.903(276)	-0.639(88)	0.354(54)

表 2：格子 QCD 計算により得られた各種チャームハドロンの荷電半径等（全て物理単位）

	$\langle r_E^2 \rangle_q$	$\langle r_E^2 \rangle_Q$	$\langle r_M^2 \rangle_q$	$\langle r_M^2 \rangle_Q$
Σ_c^{++}	0.390(86)	0.066(32)	0.604(118)	0.236(183)
Ξ_{cc}^{++}	0.410(46)	0.095(9)	0.612(115)	0.089(11)
Ω_{cc}	0.422(51)	0.104(13)	0.534(72)	0.101(16)

表 3：軽いクォークとチャームクォークの荷電半径への寄与を個別に見たもの。(軽いクォークの寄与は q で、チャームクォークの寄与は Q で示される。)

	Our result		[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]	[24]
	Lin. fit	Quad. fit									
$\mu_{\Sigma_c^0}$	-0.875(103)	-1.117(198)	-1.78	-1.04	-	-1.043	-1.60	-1.391	-1.17	-1.015	-1.6(2)
$\mu_{\Sigma_c^{++}}$	1.499(202)	2.027(390)	3.07	1.76	-	1.679	2.20	2.44	2.18	2.279	2.1(3)
$\mu_{\Xi_{cc}^+}$	0.411(15)	0.425(29)	0.94	0.72	$0.785^{+0.050}_{-0.030}$	0.722	0.84	0.774	0.77	-	-
$\mu_{\Omega_c^0}$	-0.608(45)	-0.639(88)	-0.90	-0.85	-	-0.774	-0.90	-0.85	-0.92	-0.960	-
$\mu_{\Omega_{cc}^+}$	0.405(13)	0.413(24)	0.74	0.67	$0.635^{+0.012}_{-0.015}$	0.668	0.697	0.639	0.70	0.785	-

表 4 : 格子 QCD 計算、および、モデル計算により得られた各種チャームハドロンの磁気能率の値 (核磁子を基準とする)

- [1] arXiv:1310.5915, K.U. Can et al.
- [2] Phys.Lett. B719 (2013) 103-109, Phys.Lett. B726 (2013) 703-709, K.U. Can et al.
- [3] Phys.Rev. D84 (2011) 074505, PACS-CS Collaboration (Y. Namekawa et al.)
- [4] Phys.Rev. D87 (2013) 094512, PACS-CS Collaboration (Y. Namekawa et al.)
- [5] Phys. Rev. D55, (1997) 3933, A. X. El-Khadra et al.
- [6] Phys.Lett. B664 (2008) 129-132, Phys.Rev. D78 (2008) 014513, A. Yamamoto et al.