

転送行列対角化法による チャーモニウム励起状態の格子 QCD 計算

Lattice Study of Charmonium Excited States
using the Variational Method

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻 原子核理論研究室
B3SM2016 大野真央

近年、チャーモニウムのエネルギー領域の実験において、これまでのクォークモデルでは説明できない粒子が多く発見されている [1]。それらは日本の Belle 実験で発見された $X(3872)$ [2] を筆頭に X 、 Y 、 Z という名前がついて、これまでに知られていたチャーモニウムの励起状態と区別されている。それらの粒子は 2 つのクォーク、2 つの反クォークからなるテトラクォーク状態やグルーオンの自由度を陽に含んだハイブリッド状態といった新しいタイプの間接子候補として考えられている [3]。こういった新しい粒子が続々発見されている一方、理論、実験ともに既存のチャーモニウムの高い励起状態について詳しい研究が進んでいるとは言いがたい。現在、高次の励起状態に関しては理論計算としてクォークポテンシャルモデルを用いたものがあるが、この修士論文では、格子 QCD に基づいた第一原理計算を用いてチャーモニウムの励起状態の質量について研究を行った。

本研究では筑波大学の PACS-CS ゲージ配位 [4] を用いた格子 QCD 数値解析計算により、物理点近傍 ($m_\pi = 156\text{MeV}$) におけるチャーモニウムのエネルギースペクトルを格子サイズ $L^3 \times T = 32^3 \times 64$ 、格子間隔 $a = 0.093\text{fm}$ の格子上で計算を遂行した。格子 QCD 計算による質量計算では、伝統的な手法としてハドロン虚時間相関関数の虚時間遠方での漸近的な指数関数的減衰の振る舞いから基底状態の質量を算出している。この研究では励起状態の質量を計算するために転送行列対角化法 [5,6] を用いた。転送行列対角化法は空間的な広がりを変えたハドロン演算子 O_i を複数用意し、相関関数で行列 $C(t)$ を形成する。

$$C(t)_{ij} = \langle O_i(t) O_j^\dagger(0) \rangle \quad (1)$$

添字の i, j は演算子の種類 ($i, j = 1, \dots, N$) を表す。この $N \times N$ 行列 $C(t)$ から

$$M_{ij}(t, t_0) = \sum_{k,l} C(t_0)_{il}^{-1/2} C(t)_{lk} C(t_0)_{kj}^{-1/2} \quad (2)$$

で定義される転送行列 M_{ij} を計算し、それを対角化することで、固有値 $\lambda^{(k)}(t, t_0)$ として

$$\lambda^{(k)}(t, t_0) = e^{-tE_k} [1 + \mathcal{O}(e^{-t\Delta E_k})] \quad (k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (3)$$

を得る。この固有値 ($\lambda^{(0)} > \lambda^{(1)} > \dots > \lambda^{(N-1)}$) から基底状態の質量 E_0 に加え、励起状態の質量 E_k も得ることが可能となる。また、本研究では転送行列対角化法におけるより良い演算子の選び方や高次の励起状態に対する考察も行った。

図1は解析の最終結果と最新の Particle Data Group(PDG)[7] に記載された実験値を比較した図である。 η_c と J/ψ は理論のパラメータを決定する際にインプットとして用いた。 h_c 、 χ_{c0} 、 χ_{c1} の基底状態および全ての励起状態はそれに基づく理論の計算である。この研究で初めて PACS-CS ゲージ配位上で η_c 、 J/ψ の第一励起状態 $\eta_c(2S)$ 、 $\psi(2S)$ を計算することに成功し、誤差の範囲内で PDG の実験結果と一致していることを確認した。また、 h_c 、 χ_{c0} 、 χ_{c1} に対しても励起状態を計算し、定性的にクォークポテンシャルモデルの結果との一致を確認した。また、PDG の $\chi_{c0}(2P)$ の最新の実験値とも誤差の範囲内で一致していることから、実験的に未発見の $\chi_{c1}(2P)$ 、 $h_c(2P)$ の状態も本研究の格子 QCD 第一原理計算によって理論的に予言されるエネルギー領域に存在するものと結論づけられる。

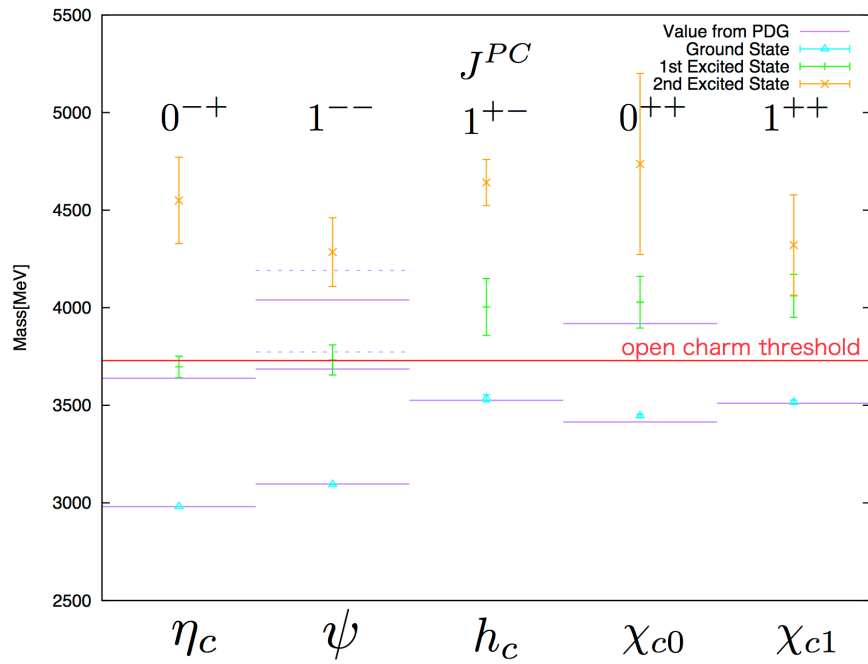


図 1: PDG 値と今回の解析結果 (誤差は統計誤差と系統誤差も含む) の比較 (赤線は open charm threshold)。点線で表示されているものは $\psi(3770)$ 、 $\psi(4260)$ である。この二つのデータは $J^{PC} = 1^{--}$ であるものの崩壊モードなどから $1D$ 、 $2D$ 状態だと考えられている。

- [1] M.B. Voloshin, Prog. Part. Nucl. Phys. 61, 455-511(2008).
- [2] S.K. Choi et al. [Belle Collaboration], Phys. Rev. Lett. 91, 262001 (2003).
- [3] S. Godfrey and S. L. Olsen, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 58, 51 (2008).
- [4] S.Aoki et al. [PACS-CS Collaboration], Phys. Rev. D **79**, 034503 (2009)
- [5] C. Michael, Nucl. Phys. B259, 58 (1985).
- [6] M. Luscher and U. Wolff, Nucl. Phys. B339, 222 (1990).
- [7] K.A. Olive et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014).