

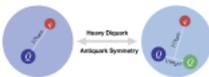
A Lattice QCD study of the low-energy interactions of doubly charmed baryons

Jing-Yu Yi (义景宇) 湖南大学

Collaborators: Ze-Rui Liang (梁泽锐), Qu-Zhi Li (李衢智), Liuming Liu (刘黎明), Xiaonu Xiong (熊小努), Yi-Bo Yang (杨一斌), Peng Sun (孙鹏), De-Liang Yao (姚德良)

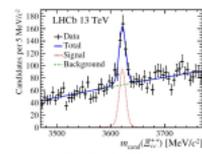
Introduction

双夸克重子在理论上早有预言,但实验上在17年前由LHCb合作组确定发现,其质量约为3600MeV.近年来,基于夸克模型、格点QCD、QCD求和规则和手征有效场论等方法对双夸克重子的质量、磁矩、形状因子等有散射长度等量有大量计算.



在这些理论研究工作中,格点QCD的计算只包含了双夸克重子的质量.由于缺少实验和格点数据的支持,在手征有效场论的一些工作中,需要利用Heavy diquark-antiquark对称性(HDAS)来确定手征拉氏量中的低能常数.

- 因此,本工作的主要动机为:
- 提供格点数据以确定手征拉氏量中的低能常数.
 - 帮助检验Heavy diquark-antiquark对称性的适用性.
 - 为双夸克重子质量谱的研究提供支持.



LHCb R. Aaij and others. Phys. Rev. Lett. 118, 122002 (2017)

Lattice setup

表 4.1: 在本工作中,对关联函数的计算总共用到了 3 个组态,它们有着相同的格距和两种不同的 pion mass.按照格子的大小和 pion mass 对不同的组态进行命名区分.

ID	β	a (fm)	am_π	am_ρ	M_π (MeV)	$L^3 \times T$	$N_{\beta, \text{spin}}$
L32P30	6.41	0.0805(14)	-0.2295	-0.2050	294.5(0.9)	$32^3 \times 96$	371
L48P30	6.41	0.0805(06)	-0.2295	-0.2050	294.2(0.5)	$48^3 \times 96$	201
L48P22	6.41	~ 0.08	-0.2320	-0.2050	~ 220	$48^3 \times 96$	223

Preliminary results

基于上述方法,我们在四个组态中对双夸克重子与Goldstone粒子的有效质量、能级和S波散射长度等量进行计算,得到了初步的结果.考虑到双夸克重子中含有两个c夸克可能带来的格点误差,我们在五个最低动量下分别计算了 π 、K、 Ξ_c 和 Ω_c 的有效质量,对色散关系的拟合结果列在表4.3中.其中, π 和K的 c^2 对L的偏离较小,而 Ξ_c 和 Ω_c 的 c^2 对L有略微偏离,这部分偏离将作为系统误差考虑在最终的结果里.

通过两粒子系统在自由与相互作用情况下的有效质量对比,可以判断两粒子之间的相互作用类型.例如由图4.8中的结果可知,(1,0)道中两粒子有相互作用的能级在自由情况的下面,说明为吸引的相互作用,而其余三个道为排斥的相互作用.

π		K		Ξ_c		Ω_c		
m_π (GeV)	c^2	m_K (GeV)	c^2	m_{Ξ_c} (GeV)	c^2	m_{Ω_c} (GeV)	c^2	
L32P30	0.259(10)	1.024(46)	0.505(16)	1.0124(25)	3.608(10)	0.905(6(8))	3.651(4)	0.892(50)
L48P30	0.2944(3)	1.0095(27)	0.5058(3)	1.0070(19)	3.628(11)	0.842(29)	3.6952(10)	0.890(31)
L48P22	0.2818(7)	1.0152(38)	0.4790(3)	1.0687(23)	3.529(12)	0.888(31)	3.6108(9)	0.883(19)

表 4.3: π 、K、 Ξ_c 和 Ω_c 的有效质量对色散关系拟合的结果. 其中 c^2 为充速转动 m_π 为粒子在 0 动量时的有效质量. 单位为 GeV.

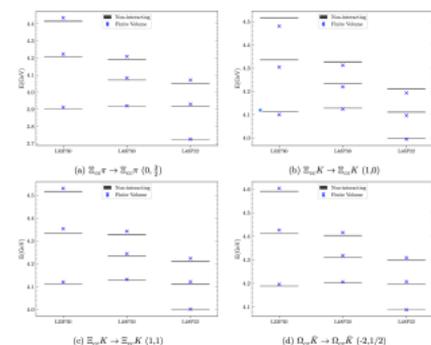


图 4.3: 四个散射道在三个组态下的能级. 其中黑色的线为两粒子无相互作用情况下的能级. 蓝色的点为有相互作用的能级.

在得到了单粒子与两粒子系统的有效质量之后,通过Lüscher的有限体积法和有效力程展开,我们分别在 $M_\pi \sim 300$ 和 $M_\pi \sim 200$ 的非物理质量下拟合得到了四个道的S波散射长度(见图4.9),与手征有效场论的计算结果对比列在表4.4中.

De-Liung in Lattice QCD

考虑到双夸克重子和Goldstone粒子散射长度在手征有效场论中已有的计算结果,可以通过格点QCD的计算来拟合确定低能常数.在格点QCD中,对散射长度的计算已经有着一套成熟的方法,其主要步骤为:

- 根据粒子的夸克成分和狄拉克结构构造态与相互作用的粒子算符.
- 数值计算相应的两点四点关联函数,拟合得到有效质量、能级.
- 进一步,通过Lüscher的有限体积方法,可以将能级与无限体积中的散射信息联系起来.

$$\det[1 + i\rho \cdot \Gamma \cdot (1 + iM)] = 0$$

- 对于一个近简的问题,得到散射相移后可以通过有效力程展开来确定S波的散射参数,即散射长度和有效力程.

$$p \cot \delta_0 = \frac{1}{a_0} + \frac{1}{2} r_0 p^2$$

- 计算中所使用的是中图格点组自主产生的规范组态.
- 为了获得更好的信号,使用了disillation的smearing方法,并取 $N_E = 100$.

$$-V_{ij}^0(a) = 6A_c - \sum_{\text{spin}} (f_{ij}^0 \Omega_{ij}^0 + f_{ij}^1 \Omega_{ij}^1 - \Omega_{ij}^0) \quad \square \square \square \rightarrow \sum_{\text{spin}} 6A_c \Omega_{ij}^0(a)$$

$$N_1 \times N_2^c \times N_{\text{color}} \times N_{\text{spin}} \rightarrow N_1 \times N_2 \times N_c$$

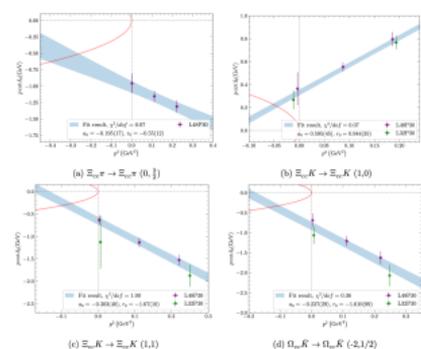


图 4.9: S 波散射长度 a_0 在 $M_\pi \sim 300$ 组态的拟合结果. 其中紫色和绿色的点分别组态 L48P30 和 L32P30 的 $pc\bar{c}\bar{c}$ 计算结果. 蓝色的 band 是有效力程展开的拟合结果.

(S, I)	Processes	$M_\pi \sim 300$	$M_\pi \sim 200$	EOMS	HB
(-2, 1/2)	$\Omega_c^- K^- \rightarrow \Omega_c^- K^-$	-0.237(29)	-0.154(18)	-0.09 \pm 0.13	-0.20(1)
(1, 1)	$\Xi_c^- K^- \rightarrow \Xi_c^- K^-$	-0.303(40)	-0.226(61)	-0.60 \pm 0.13	-0.25(1)
(1, 0)	$\Xi_c^- K^- \rightarrow \Xi_c^- K^-$	0.595(45)	0.626(71)	1.03 \pm 0.19	0.92(2)
(0, 0)	$\Xi_c^- \pi^- \rightarrow \Xi_c^- \pi^-$	-0.195(17)	-0.167(22)	-0.16 \pm 0.02	-0.10(2)

表 4.4: S 波散射长度 a_0 在两种非物理 M_π 下的拟合结果. 其中第四和第五列分别为手征 EOMS 和 HB 方法的计算结果. Z.-R. Liang, P.-C. Gu, and D.-L. Yao, JHEP 07, 124 (2022). L. Meng and S.-Z. Zhu, Phys. Rev. D 100, 014006 (2019).

Summary and outlook

- 对双夸克重子与Goldstone粒子的S波散射长度做出了计算(四个单道).
- 我们的计算结果可以帮助确定BChPT中的低能常数,以及检验HDAS对称性的适用性.
- 在(1,0)道中存在一个可能的virtual state.
- 未来将考虑赝混合道的计算.