

光前夸克模型和QCD因子化框架下 $B \rightarrow SS$ 衰变唯象研究

学科、专业 : 物理学、 粒子物理与原子核物理

申请学位 : 理学硕士

答辩人 : 康悦杨

指导教师 : 常钦 教授、 陈丽丽 副教授

河南师范大学 物理学院

2023年5月7日

目录

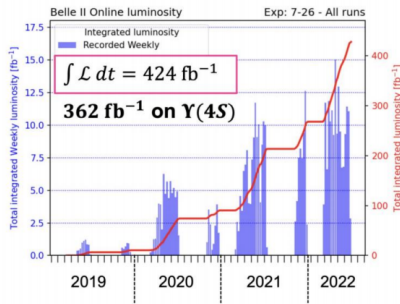
- 研究背景
- 非微扰输入参数的计算
- QCD因子化框架下 $B \rightarrow SS$ 衰变唯象研究
- 总结与展望
- 致谢

研究背景

- S1: 将质量在1GeV以下的标量介子看作基态 $q\bar{q}$;
将质量在1GeV以上的标量介子看作 $q\bar{q}$ 的第一激发态
- S2: 将质量在1GeV以下的标量介子看作 $qq\bar{q}\bar{q}$;
将质量在1GeV以上的标量介子看作 $q\bar{q}$ 的基态

研究背景

Belle合作组已经对B介子衰变到末态为两个标量介子的过程做了初步的测量。那随着高能物理实验的发展，未来有望在Belle-II和LHCb上观测到更多的末态为两个标量介子的B介子衰变模式。



[1]C. C. Chiang *et al.* [Belle], Phys. Rev. D **81** (2010), 071101.

研究背景

- 末态为一个标量介子的B介子两体非轻衰变过程已经被QCDF、pQCD等方法系统的研究
- pQCD对 $B \rightarrow SS$ 的衰变过程进行了研究，发现这些过程有着较大的分支比 ($10^{-6} - 10^{-4}$)
- 目前， $B \rightarrow SS$ 的衰变在QCDF框架下还并没有被系统地研究

[2]H. Y. Cheng, C. K. Chua and K. C. Yang, Phys. Rev. D **77** (2008), 014034.

[3]Z. T. Zou, Y. Li and X. Liu, Eur. Phys. J. C **80** (2020) no.6, 517.

[4]X. Liu, Z. J. Xiao and Z. T. Zou, J. Phys. G **40** (2013), 025002.

非微扰输入参数——形状因子

$P \rightarrow S$ 跃迁形状因子的定义:

$$\langle S(p'') | \bar{q} \gamma_\mu \gamma_5 b | B(p') \rangle = -i \left[\left(P_\mu - \frac{m_B^2 - m_S^2}{q^2} q_\mu \right) U_1(q^2) + \frac{m_B^2 - m_S^2}{q^2} q_\mu U_0(q^2) \right]$$

其中, $P_\mu = (p' + p'')$, $q_\mu = (p' - p'')$

参数化方法:

$$F(q^2) = \frac{F(0)}{1 - a(q^2/m_{B^*}^2) + b(q^2/m_{*B}^2)^2}$$

非微扰输入参数的计算——形状因子

Table: $B_{u,d,s} \rightarrow K_0^*(1430), a_0(1450)$ 在S1和S2方案下跃迁过程的形状因子

F	$F(0)$	a	b	F	$F(0)$	a	b
$U_1^{B \rightarrow K_0^*}$	$0.29 \pm 0.02(S2)$	1.27	0.33	$U_0^{B \rightarrow K_0^*}$	$0.29 \pm 0.02(S2)$	0.16	0.11
	$0.18 \pm 0.01(S1)$	1.03	0.15		$0.18 \pm 0.01(S1)$	-0.23	0.29
$U_1^{B_s \rightarrow K_0^*}$	$0.28 \pm 0.02(S2)$	1.58	0.84	$U_0^{B_s \rightarrow K_0^*}$	$0.28 \pm 0.02(S2)$	0.55	0.20
	$0.23 \pm 0.02(S1)$	0.92	0.29		$0.23 \pm 0.02(S1)$	-0.23	0.36
$U_1^{B \rightarrow a_0}$	$0.29 \pm 0.02(S2)$	1.33	0.38	$U_0^{B \rightarrow a_0}$	$0.29 \pm 0.02(S2)$	0.32	0.06
	$0.19 \pm 0.01(S1)$	1.01	0.16		$0.19 \pm 0.01(S1)$	-0.17	0.30

非微扰输入参数的计算——衰变常数

标量介子衰变常数的定义为:

$$\langle S(p) | \bar{q}_1 \gamma^\mu q_2 | 0 \rangle = f_S p_\mu, \quad \langle S(p) | \bar{q}_1 q_2 | 0 \rangle = m_S \bar{f}_S(\mu) \quad (1)$$

$\bar{f}_S(\mu)$ 和 f_S 之间有以下关系:

$$\bar{f}_S = \bar{\mu}_S(\mu) f_S, \quad \bar{\mu}_S(\mu) = \frac{m_S}{m_1(\mu) - m_2(\mu)} \quad (2)$$

$\bar{f}_{K_0^*(1430)} = 234_{-87}^{+85} \text{MeV},$	$\bar{f}_{a_0(1450)} = 256_{-54}^{+56} \text{MeV},$	S1
$\bar{f}_{K_0^*(1430)} = 542_{-190}^{+180} \text{MeV},$	$\bar{f}_{a_0(1450)} = 456_{-56}^{+57} \text{MeV},$	S2

QCD SR的计算结果:

$\bar{f}_{K_0^*(1430)} = -300 \pm 30 \text{MeV},$	$\bar{f}_{a_0(1450)} = -280 \pm 30 \text{MeV},$	S1
$\bar{f}_{K_0^*(1430)} = 445 \pm 50 \text{MeV},$	$\bar{f}_{a_0(1450)} = 460 \pm 50 \text{MeV},$	S2

非微扰输入参数的计算——分布振幅

通常，leading-twist的分布振幅可以通过盖根鲍尔多项式展开：

$$\Phi_M(x, \mu) = 6x(1-x) \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n^M(\mu) C_n^{3/2}(x - \bar{x}) \right] \quad (3)$$

其中， $a_n^S(\mu) = \bar{\mu}_S(\mu) b_n^S(\mu)$ ，对于标量介子来说，我们采用的衰变常数为 $\bar{f}_S$ ，对应标量介子的分布振幅由盖根鲍尔矩 b_n^S 展开，也就是下面的形式

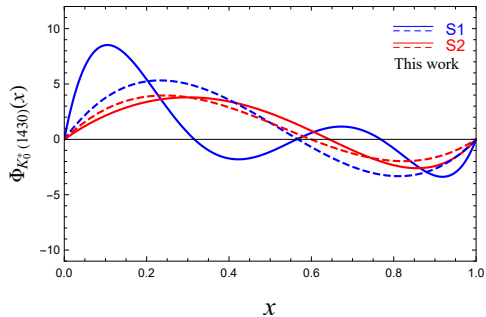
$$\Phi_S(x, \mu) = 6x(1-x) \left[b_0^S + \sum_{n=1}^{\infty} b_n^S(\mu) C_n^{3/2}(x - \bar{x}) \right] \quad (4)$$

非微扰输入参数的计算——分布振幅

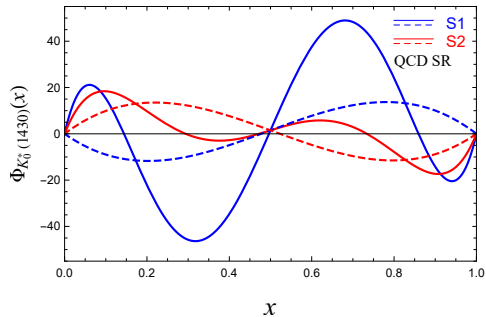
Table: S1和S2方案下标度为 $\mu = 1\text{GeV}$ 时的盖根鲍尔矩 b_n^S

	b_0	b_1	b_2	b_3
$K_0^*(1430)$ Thiswork	0.08 ± 0.01	-0.13 ± 0.05	-0.03 ± 0.00	-0.01 ± 0.00
	0.08 ± 0.01	-0.15 ± 0.05	0.06 ± 0.01	-0.09 ± 0.05
QCD SR	0	-0.57 ± 0.13	0	-0.42 ± 0.22
	0	0.58 ± 0.07	0	-1.20 ± 0.08
$a_0(1450)$ Thiswork	0	-0.17 ± 0.03	0	-0.03 ± 0.01
	0	-0.17 ± 0.06	0	-0.19 ± 0.03
QCD SR	0	-0.28 ± 0.12	0	-0.49 ± 0.15
	0	0.89 ± 0.20	0	-1.83 ± 0.18

非微扰输入参数的计算——分布振幅

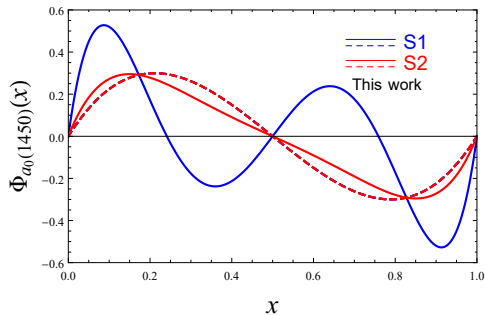


(a)

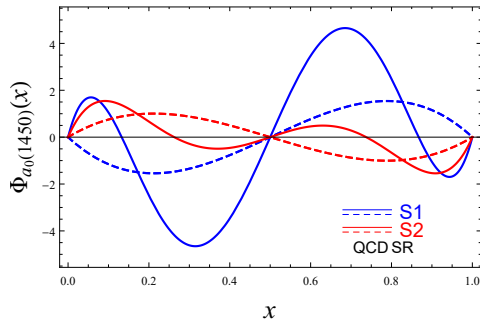


(b)

非微扰输入参数的计算——分布振幅



(c)



(d)

QCD因子化框架下 $B \rightarrow SS$ 衰变唯象研究

Table: $B \rightarrow SS$ 衰变的分支比(10^{-6}), $(\rho_A^i, \phi_A^i) = (\rho_A^f, \phi_A^f) = (1, -55^\circ)$

Decay modes	Class	S1	S2
$B^- \rightarrow a_0^- a_0^0$	T	$0.01^{+0.00+0.01}_{-0.00-0.01}$	$0.04^{+0.00+0.03}_{-0.00-0.02}$
$\bar{B}_d^0 \rightarrow a_0^+ a_0^-$	T	$0.19^{+0.01+0.12}_{-0.01-0.09}$	$0.55^{+0.03+0.17}_{-0.02-0.15}$
$\bar{B}_s^0 \rightarrow K_0^{*+} a_0^-$	T	$0.14^{+0.01+0.09}_{-0.01-0.07}$	$0.04^{+0.03+0.23}_{-0.02-0.19}$
$\bar{B}_d^0 \rightarrow a_0^0 a_0^0$	C	$0.27^{+0.02+0.27}_{-0.01-0.16}$	$0.83^{+0.04+0.38}_{-0.04-0.30}$
$\bar{B}_s^0 \rightarrow K_0^{*0} a_0^0$	C	$0.09^{+0.01+0.06}_{-0.01-0.05}$	$0.36^{+0.02+0.18}_{-0.02-0.15}$
$B^- \rightarrow a_0^0 K_0^{*-}$	P	$0.98^{+0.05+0.91}_{-0.04-0.66}$	$6.65^{+0.30+5.26}_{-0.24-3.97}$
$B^- \rightarrow a_0^- K_0^{*0}$	P	$2.05^{+0.09+1.88}_{-0.07-1.36}$	$14.13^{+0.64+11.16}_{-0.50-8.42}$
$\bar{B}_d^0 \rightarrow a_0^+ K_0^{*-}$	P	$1.87^{+0.09+1.73}_{-0.07-1.26}$	$12.40^{+0.56+9.81}_{-0.44-7.40}$
$\bar{B}_d^0 \rightarrow a_0^0 \bar{K}_0^{*0}$	P	$0.97^{+0.04+0.75}_{-0.03-0.50}$	$6.56^{+0.30+5.18}_{-0.23-3.91}$
$\bar{B}_s^0 \rightarrow \bar{K}_0^{*0} K_0^{*0}$	P	$1.88^{+0.09+1.70}_{-0.07-1.23}$	$14.99^{+0.68+12.14}_{-0.54-9.18}$
$\bar{B}_s^0 \rightarrow K_0^{*-} K_0^{*+}$	P	$1.73^{+0.08+1.57}_{-0.06-1.14}$	$13.98^{+0.64+11.39}_{-0.50-8.61}$
$\bar{B} \rightarrow K_0^{*-} K_0^{*0}$	P	$0.07^{+0.00+0.07}_{-0.00-0.05}$	$0.30^{+0.02+0.24}_{-0.01-0.18}$
$\bar{B}_d^0 \rightarrow \bar{K}_0^{*0} K_0^{*0}$	P	$0.06^{+0.00+0.06}_{-0.00-0.04}$	$0.29^{+0.02+0.23}_{-0.01-0.17}$
$\bar{B}_d^0 \rightarrow \bar{K}_0^{*-} K_0^{*+}$	A	$0.016^{+0.001+0.020}_{-0.001-0.014}$	$0.101^{+0.008+0.112}_{-0.007-0.085}$
$\bar{B}_s^0 \rightarrow a_0^0 a_0^0$	A	$0.049^{+0.002+0.064}_{-0.002-0.036}$	$0.117^{+0.006+0.074}_{-0.005-0.052}$
$\bar{B}_s^0 \rightarrow a_+^0 a_-^0$	A	$0.098^{+0.004+0.074}_{-0.003-0.060}$	$0.234^{+0.011+0.094}_{-0.010-0.084}$

QCD因子化框架下 $B \rightarrow SS$ 衰变唯象研究

Table: $B \rightarrow SS$ 衰变的分支比(10^{-6}), $(\rho_A^i, \phi_A^i) = (2.98, -105^\circ), (\rho_A^f, \phi_A^f) = (1.18, -40^\circ)$

Decay modes	Class	S1	S2
$B^- \rightarrow a_0^- a_0^0$	T	$0.03^{+0.00+0.02}_{-0.00-0.01}$	$0.10^{+0.01+0.06}_{-0.01-0.05}$
$\bar{B}_d^0 \rightarrow a_0^+ a_0^-$	T	$0.37^{+0.02+0.12}_{-0.02-0.11}$	$0.63^{+0.05+0.25}_{-0.04-0.21}$
$\bar{B}_s^0 \rightarrow K_0^{*+} a_0^-$	T	$0.14^{+0.01+0.04}_{-0.01-0.04}$	$0.49^{+0.03+0.30}_{-0.03-0.22}$
$\bar{B}_d^0 \rightarrow a_0^0 a_0^0$	C	$0.63^{+0.05+0.31}_{-0.04-0.25}$	$1.17^{+0.09+0.73}_{-0.08-0.53}$
$\bar{B}_s^0 \rightarrow K_0^{*0} a_0^0$	C	$0.12^{+0.01+0.04}_{-0.01-0.03}$	$0.51^{+0.04+0.33}_{-0.03-0.26}$
$B^- \rightarrow a_0^0 K_0^{*-}$	P	$0.82^{+0.04+0.26}_{-0.03-0.22}$	$5.07^{+0.23+1.03}_{-0.16-3.03}$
$B^- \rightarrow a_0^- K_0^{*0}$	P	$1.64^{+0.07+0.49}_{-0.05-0.42}$	$10.58^{+0.47+8.37}_{-0.33-6.29}$
$\bar{B}_d^0 \rightarrow a_0^+ K_0^{*-}$	P	$1.70^{+0.08+0.56}_{-0.05-0.47}$	$10.42^{+0.46+8.29}_{-0.33-6.23}$
$\bar{B}_d^0 \rightarrow a_0^0 \bar{K}_0^{*0}$	P	$0.86^{+0.04+0.27}_{-0.03-0.23}$	$5.44^{+0.24+4.30}_{-0.17-3.23}$
$\bar{B}_s^0 \rightarrow \bar{K}_0^{*0} K_0^{*0}$	P	$0.54^{+0.02+0.15}_{-0.02-0.12}$	$5.94^{+0.26+5.81}_{-0.19-3.77}$
$\bar{B}_s^0 \rightarrow K_0^{*-} K_0^{*+}$	P	$0.61^{+0.03+0.17}_{-0.02-0.13}$	$6.65^{+0.30+6.56}_{-0.21-4.39}$
$\bar{B} \rightarrow K_0^{*-} K_0^{*0}$	P	$0.07^{+0.00+0.03}_{-0.00-0.03}$	$0.25^{+0.01+0.22}_{-0.01-0.16}$
$\bar{B}_d^0 \rightarrow \bar{K}_0^{*0} K_0^{*0}$	P	$0.05^{+0.00+0.02}_{-0.00-0.01}$	$0.11^{+0.01+0.12}_{-0.01-0.07}$
$\bar{B}_d^0 \rightarrow \bar{K}_0^{*-} K_0^{*+}$	A	$0.107^{+0.008+0.143}_{-0.007-0.105}$	$0.562^{+0.042+0.619}_{-0.040-0.464}$
$\bar{B}_s^0 \rightarrow a_0^0 a_0^0$	A	$0.383^{+0.017+0.509}_{-0.012-0.258}$	$0.659^{+0.032+0.415}_{-0.027-0.288}$
$\bar{B}_s^0 \rightarrow a_+^0 a_-^0$	A	$0.766^{+0.035+0.596}_{-0.026-0.482}$	$1.318^{+0.064+0.527}_{-0.054-0.463}$

QCD因子化框架下 $B \rightarrow SS$ 衰变唯象研究

实验上, Belle合作组对 $\bar{B}_d^0 \rightarrow K_0^*(1430)\bar{K}_0^*(1430)^0$ 衰变的分支比的初步测量做出了报告:

$$\mathcal{B}(\bar{B}_d^0 \rightarrow K_0^*(1430)\bar{K}_0^*(1430)^0) = (3.21_{-2.85}^{+2.89+2.31}) \times 10^{-6}$$

从表中我们可以发现QCDF在S2方案下对这个衰变模式预言的中心值为:

$$\mathcal{B}(\bar{B}_d^0 \rightarrow K_0^*(1430)\bar{K}_0^*(1430)^0) \approx 0.29 \times 10^{-6}$$

[1]C. C. Chiang *et al.* [Belle], Phys. Rev. D **81** (2010), 071101.

总结与展望

- 在自洽的协变光前夸克模型下计算了 $B \rightarrow SS$ 衰变过程所必须的非微扰物理量
- 在QCD因子化框架下对 $B \rightarrow SS$ 衰变进行唯象研究
- 随着实验测量精度的大幅提高，希望可以观测到更多的末态为两个标量介子的B介子衰变模式

谢谢各位评委批评指正