

$\Upsilon(1S) \rightarrow DP$ 和 $J/\psi \rightarrow PP$ 衰变过程的唯象研究

学科、专业 : 物理学、 粒子物理与原子核物理
答 辩 人 : 段明非
指 导 教 师 : 杨悦玲 副教授

College Of Physics, Henan Normal University

December 04, 2021

Outline

1 $\Upsilon(1S) \rightarrow DP$ 衰变过程的研究

- 研究背景
- 理论框架
- 数值结果与分析

2 $J/\psi \rightarrow PP$ 衰变过程的研究

- 研究背景
- 理论框架
- 数值结果与分析

3 总结与展望

4 致谢

$\Upsilon(1S)$ 介子的性质:

- $\Upsilon(1S)$ 介子是正反底夸克组成的重夸克偶素粒子。
- $\Upsilon(1S)$ 介子的质量位于 $B\bar{B}$ 阈值之下。

$\Upsilon(1S)$ 介子的衰变模式:

- $\Upsilon(1S)$ 介子主要是通过强相互作用和电磁相互作用的过程发生衰变。

$$Br(\Upsilon(1S) \rightarrow ggg) = (81.7 \pm 0.7)\%$$

$$Br(\Upsilon(1S) \rightarrow gg\gamma) = 2.2(6)\%$$

.....

- 标准模型中, $\Upsilon(1S)$ 介子能够发生弱衰变, 预计其弱衰变分支比会比较小, 约为 $2/\tau_B \Gamma_{\Upsilon(1S)} \sim \mathcal{O}(10^{-8})$ 。

- $\Upsilon(1S)$ 介子的 J^{PC} 量子数为 1^{--}
- 正负电子对撞机上的 $\Upsilon(1S, 2S, 3S)$ 事例数（单位： 10^6 ）

Experiment	$\Upsilon(1S)$	$\Upsilon(2S)$	$\Upsilon(3S)$
CLEO	21	10	5
BaBar	-	99	122
Belle	102	158	12

- $Br(\Upsilon(2S) \rightarrow \pi\pi\Upsilon(1S)) = 26\%$
 $Br(\Upsilon(3S) \rightarrow \pi\pi\Upsilon(1S)) = 6.5\%$

- $\Upsilon(1S)$ 介子的弱衰变有 W 发射与 W 交换两种方式。
- 我们组内已经对 W 发射过程 $\Upsilon(1S) \rightarrow B_c \rho$ 进行过研究。
$$Br(\Upsilon(1S) \rightarrow B_c \rho) = 8.34 \times 10^{-9}$$



J. Sun, Y. Yang, Q. Li, et al. Nucl. Phys. B 909, 186-196 (2016).

- 低能有效哈密顿量是计算 $\Upsilon(1S) \rightarrow DP$ 过程的出发点:

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{ub} V_{cb}^* \sum_{i=1} C_i(\mu) O_i(\mu) + \text{H.c.}$$

- 由低能有效哈密顿量, 我们进一步写出衰变振幅的表达式:

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(\Upsilon \rightarrow DP) &= \langle DP | \mathcal{H}_{\text{eff}} | \Upsilon \rangle \\ &= \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{ub} V_{cb}^* \sum_{i=1} C_i(\mu) \langle DP | O_i(\mu) | \Upsilon \rangle \end{aligned}$$

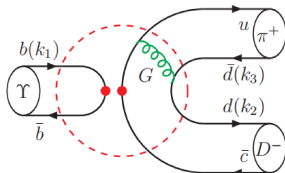
- 强子矩阵元通常写成硬散射部分和强子波函数的卷积:

$$\mathcal{A}_i = \int dx_1 dx_2 dx_3 C_i(t_i) \mathcal{H}_i(x_1, x_2, x_3) \Phi_\Upsilon(x_1) \Phi_D(x_2) \Phi_P(x_3)$$

- 微扰 QCD 方法中, 衰变振幅表示如下:

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_i = \int dx_1 dx_2 dx_3 db_1 db_2 db_3 C_i(t_i) \mathcal{H}_i(x_1, x_2, x_3, b_1, b_2, b_3) \\ \Phi_\Upsilon(x_1, b_1) e^{-S_\Upsilon} \Phi_D(x_2, b_2) e^{-S_D} \Phi_P(x_3, b_3) e^{-S_P} \end{aligned}$$

■ 以 $\Upsilon(1S) \rightarrow D^- \pi^+$ 过程为例



$$\mathcal{A}_a^{LL} = C \int_0^1 dx_2 dx_3 \int_0^\infty db_2 db_3 \alpha_s(t_a) H_{ab}(\alpha_g \beta_a, b_2, b_3) C_i(t_a) S_t(x_2) \phi_D \{ \phi_P^a (1 - r_D^2) x_2 + 2 r_D \phi_P^p [x_2 - (1 - r_D^2)] \}$$

■ D介子分布振幅

模型一：

$$\phi_D(x) = Cx\bar{x} \exp \left\{ -\frac{1}{8\beta_2^2} \left(\frac{m_q^2}{x} + \frac{m_c^2}{\bar{x}} \right) \right\}$$

模型二：

$$\phi_D(x, b) = 6x\bar{x} \{1 - C_D\xi\} \exp \left\{ -\frac{1}{2}\omega_D^2 b^2 \right\}$$



R. Li, C. Lü and H. Zou. Phys. Rev. D 78, 014018 (2008).

■ $\Upsilon(1S) \rightarrow DP$ 衰变过程的分支比数值结果（单位： 10^{-18} ）

mode	$D^-\pi^+$	$\bar{D}^0\pi^0$	$D_s^-K^+$
scenario I	$1.157^{+0.013+0.049+0.167}_{-0.012-0.048-0.135}$	$0.579^{+0.006+0.025+0.084}_{-0.006-0.024-0.068}$	$1.775^{+0.018+0.071+0.273}_{-0.017-0.067-0.220}$
scenario II	$0.774^{+0.009+0.084+0.107}_{-0.009-0.080-0.087}$	$0.387^{+0.004+0.042+0.054}_{-0.004-0.039-0.043}$	$1.294^{+0.014+0.148+0.182}_{-0.013-0.138-0.148}$

- $\Upsilon(1S)$ 强相互作用与电磁相互作用强度大约在 $\alpha_s \sim 10^{-1}$, $\alpha_{em} \sim 10^{-2}$, 弱衰变过程被费米耦合常数 $G_F \sim 10^{-5}$ 压低。
- $\Upsilon(1S) \rightarrow DP$ 过程会被 CKM 因子 $|V_{ub}V_{cb}^*| \sim 10^{-4}$ 压低

J/ψ 介子的性质:

- J/ψ 介子是正反粲夸克组成的重夸克偶素粒子。
- J/ψ 介子的质量低于 $D\bar{D}$ 阈值。

J/ψ 介子的衰变模式:

- J/ψ 介子主要是通过强相互作用和电磁相互作用的过程发生衰变:

$$Br(J/\psi \rightarrow ggg) \approx 64\%$$

$$Br(J/\psi \rightarrow \gamma^* \rightarrow \ell^+ \ell^- + q\bar{q}) \approx 25\%$$

.....

- 标准模型中, J/ψ 介子也能够发生弱衰变, 预计其弱衰变分支比会比较小, 约为 $2/\tau_D \Gamma_\psi \sim \mathcal{O}(10^{-8})$ 。

- 以低能有效哈密顿量作为计算 $J/\psi \rightarrow PP$ 过程的出发点:

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_{q_1, q_2} V_{cq_1} V_{cq_2}^* \{C_1(\mu) O_1(\mu) + C_2(\mu) O_2(\mu)\} + \text{H.c.}$$

- 由低能有效哈密顿量, 我们进一步写出衰变振幅的表达式:

$$\mathcal{A}(J/\psi \rightarrow PP) = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_{q_1, q_2} V_{cq_1} V_{cq_2}^* \sum_{i=1}^2 C_i(\mu) \langle PP | O_i(\mu) | J/\psi \rangle$$

- 微扰 QCD 方法中, 衰变振幅可以表示如下:

$$\mathcal{A}_i = \prod_j \int dx_j db_j C_i(t_i) \mathcal{H}_i(t_i, x_j, b_j) \Phi_j(x_j, b_j) e^{-S_j}$$

■ $J/\psi \rightarrow PP$ 过程的分支比结果

mode	Br	mode	Br
$J/\psi \rightarrow \pi^- K^+$	$(0.99^{+0.33}_{-0.15}) \times 10^{-12}$	$J/\psi \rightarrow K^0 \eta$	$(0.84^{+0.25}_{-0.55}) \times 10^{-13}$
$J/\psi \rightarrow \pi^0 K^0$	$(0.49^{+0.16}_{-0.08}) \times 10^{-12}$	$J/\psi \rightarrow K^0 \eta'$	$(1.94^{+0.30}_{-0.25}) \times 10^{-12}$
$J/\psi \rightarrow \pi^0 \eta$	$(2.32^{+0.81}_{-0.24}) \times 10^{-14}$	$J/\psi \rightarrow \eta \eta'$	$(3.01^{+0.78}_{-0.55}) \times 10^{-11}$
$J/\psi \rightarrow \pi^0 \eta'$	$(1.45^{+0.50}_{-0.15}) \times 10^{-14}$		

总结与展望

- (1) $\Upsilon(1S) \rightarrow DP$ 过程各个衰变道的分支比都很小, 大约在 10^{-18} 量级, 目前无法在 Belle 和 LHCb 上被测量到。
- (2) $J/\psi \rightarrow \eta\eta'$ 过程的分支比达到了 10^{-11} 量级, 这一结果超出了目前 BESIII 实验的探测能力, 但是将来有望在 STCF 实验中被观测到。

感谢各位专家老师批评指正！