

pQCD方法中次扭度强子波函数对 $B \rightarrow PV$ 过程的影响

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 : 赵旭乐
指导教师 : 孙俊峰 教授、杨悦玲 副教授

School Of Physics, Henan Normal University

May 14, 2022

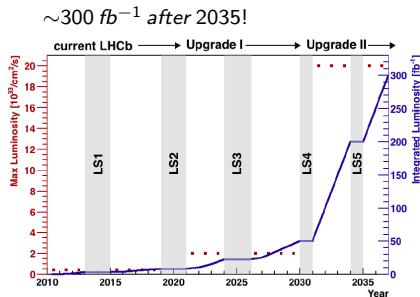
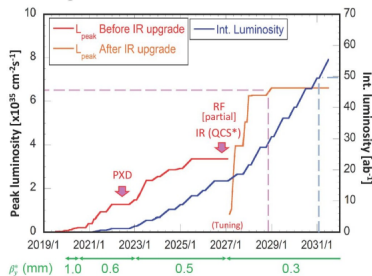
目录

- 选题背景与意义
- 研究方法
- 结果与分析
- 总结与展望
- 致谢

选题背景与意义

Belle II and LHCb luminosity

- $L_{\text{peak}} > 6 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ after modification of SuperKEKB (partial RF, IR, ...) and Belle II
- Reach 50ab^{-1} goal around 2030



选题背景与意义

Table: $\bar{B}_s \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 和 $B^- \rightarrow \bar{K}^0 \rho^-$ 的衰变分支比 $\mathcal{O}(10^{-6})$

	2003 ^[1]	2005 ^[2] $\sim$ 2006 ^[3]	2014 ^[4] $\sim$ 2015 ^[5]	2021 ^[6] $\sim$ 2022
$\bar{B}_s \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$0.024^{+0.165}_{-0.024}$	$0.057^{+0.18}_{-0.16}$	0.61 ± 0.70	0.798 ± 0.092
Exp.	—	< 1.36	0.73 ± 0.14	0.700 ± 0.100
$B^- \rightarrow \bar{K}^0 \rho^-$	$0.3^{+0.1}_{-0.1}$	—	$0.38^{+0.16}_{-0.27}$	$1.36^{+0.12}_{-0.05}$
Exp.	—	< 48	-12 ± 17	7.3 ± 1.2



M. Beneke, M. Neubert. Nucl. Phys. B **675**, 333 (2003).



Y. Li, C. Lü. Commun. Theor. Phys. **44**, 659 (2005).



H. Li, M. Satoshi. Phys. Rev. D **74**, 094020 (2006).



Q. Chang, J. Sun, Y. Yang, *et al.* Phys. Rev. D **90**, 054019 (2014).



G. Bell, M. Beneke, T. Huber, *et al.* Phys. Lett. B **750**, 348 (2015).



J. Hua, H. Li, C. Lü, *et al.* Phys. Rev. D **104**, 016025 (2021).

选题背景与意义

- $B \rightarrow PV$ 过程的衰变振幅为:

$$\begin{aligned} & \mathcal{A}(B \rightarrow PV) \\ &= \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_i V_i C_i(\mu) \langle PV | O_i(\mu) | B \rangle \\ &= \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_i \int dx_1 dx_2 dx_3 db_1 db_2 db_3 \mathcal{T}_i(t_i, x_1, b_1, x_2, b_2, x_3, b_3) \\ & \quad C_i(t_i) \Phi_B(x_1, b_1) e^{-S_B} \Phi_P(x_2, b_2) e^{-S_P} \Phi_V(x_3, b_3) e^{-S_V}. \quad (1) \end{aligned}$$

- B 介子波函数的定义为:

$$\langle 0 | \bar{q}_\alpha(z) b_\beta(0) | \bar{B}(p_1) \rangle = -\frac{i}{4} f_B \int d^4 k e^{-i k_1 \cdot z} \left\{ (\not{p}_1 + m_B) \gamma_5 \left(\phi_{B1} + \frac{\not{h}_-}{\sqrt{2}} \phi_{B2} \right) \right\}_{\beta\alpha}, \quad (2)$$

其中:

$$\phi_B^+(x_1, b_1) = N x_1^2 \bar{x}_1^2 \exp \left\{ - \left(\frac{x_1 m_B}{\sqrt{2} \omega_B} \right)^2 - \frac{1}{2} \omega_B^2 b_1^2 \right\}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \phi_B^-(x_1, b_1) = N \frac{2 \omega_B^4}{m_B^4} \exp \left(- \frac{1}{2} \omega_B^2 b_1^2 \right) & \left\{ \sqrt{\pi} \frac{m_B}{\sqrt{2} \omega_B} \text{Erf} \left(\frac{m_B}{\sqrt{2} \omega_B}, \frac{x_1 m_B}{\sqrt{2} \omega_B} \right) \right. \\ & \left. + \left[1 + \left(\frac{m_B \bar{x}_1}{\sqrt{2} \omega_B} \right)^2 \right] \exp \left[- \left(\frac{x_1 m_B}{\sqrt{2} \omega_B} \right)^2 \right] - \exp \left(- \frac{m_B^2}{2 \omega_B^2} \right) \right\}. \quad (4) \end{aligned}$$



T. Huang, X. Wu. Phys. Rev. D **71**, 034018 (2005).



T. Kurimoto. Phys. Rev. D **74**, 014027 (2006).

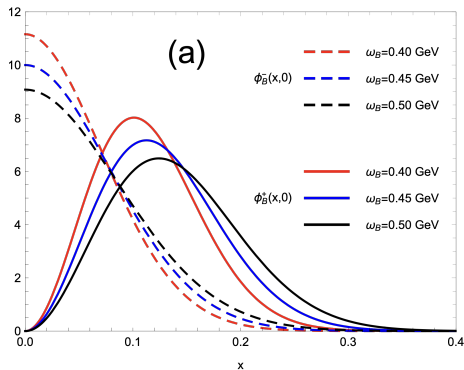


Figure: 分布振幅 ϕ_B^+ 和 ϕ_B^- 的图像。

- 赝标量介子 P 和矢量介子 V 波函数的定义为:

$$\begin{aligned} & \langle P(p) | \bar{q}_i(0) q_j(z) | 0 \rangle \\ = & -i \frac{f_B}{4} \int_0^1 dx_2 e^{+ik_2 \cdot z} \{ \gamma_5 [\not{p}_2 \phi_P^a(x) + \mu_P \phi_P^p(x) - \mu_P (\not{p}_- \not{p}_+ - 1) \phi_P^t(x)] \}_{\beta\alpha}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \langle V(p, \epsilon_{\parallel}) | \bar{q}_i(0) q_j(z) | 0 \rangle \\ = & \frac{1}{4} \int_0^1 dx_3 e^{+ik_3 \cdot z} \left\{ \not{\epsilon}_{\parallel} m_V f_V^{\parallel} \phi_V^v + \not{\epsilon}_{\parallel} \not{p}_3 f_V^{\perp} \phi_V^t - m_V f_V^{\perp} \phi_V^s \right\}_{ji}. \end{aligned} \quad (6)$$

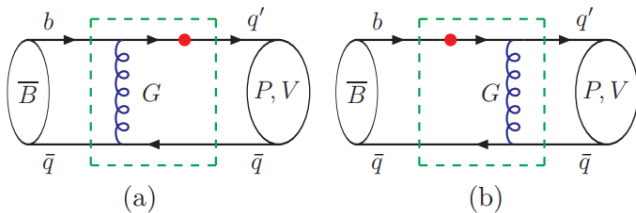


P. Ball, V. Braun and A. Lenz. JHEP **05**, 004 (2006).



P. Ball and G. W. Jones. JHEP **03**, 069 (2007).

- $B \rightarrow PV$ 过程中的跃迁形状因子:



结果分析

- 不同扭度的分布振幅对形状因子 $F_1(0)$ 和 $A_0(0)$ 的贡献:

$F_1^{B \rightarrow \pi}(0)$	ϕ_π^a	ϕ_π^p	ϕ_π^t	Σ_π	ϕ_π^a / Σ_π	ϕ_π^p / Σ_π	ϕ_π^t / Σ_π
ϕ_{B1}	0.064	0.106	0.019	0.188	34.0	56.0	9.9
ϕ_{B2}	0.045	-0.003	-0.000	0.042	107.5	-6.8	-0.7
Σ_B	0.109	0.103	0.018	0.230	47.4	44.7	8.0
ϕ_{B2} / Σ_B	41.1	-2.8	-1.6	18.1			
$A_0^{B \rightarrow K^*}(0)$	$\phi_{K^*}^v$	$\phi_{K^*}^t$	$\phi_{K^*}^s$	Σ_{K^*}	$\phi_{K^*}^v / \Sigma_{K^*}$	$\phi_{K^*}^t / \Sigma_{K^*}$	$\phi_{K^*}^s / \Sigma_{K^*}$
ϕ_{B1}	0.098	0.106	0.052	0.256	38.1	41.4	20.5
ϕ_{B2}	0.070	-0.003	-0.001	0.067	104.5	-3.7	-0.8
Σ_B	0.168	0.104	0.052	0.323	52.0	32.0	16.0
ϕ_{B2} / Σ_B	42.0	-2.4	-1.1	20.9			

结果与分析

- 利用最小 χ^2 的方法对参数 ω_B 进行筛选:

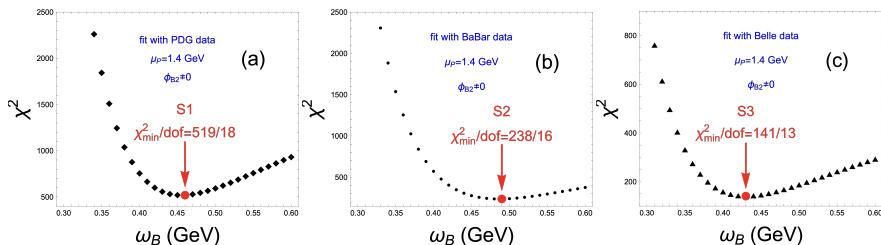


Figure: χ^2 随参数 ω_B 的分布，其中箭头处的红色点对应于最优值。

- 在 B 介子静止系, $B \rightarrow PV$ 衰变分支比的定义如下:

$$\mathcal{B} = \frac{\tau_B}{16\pi} \frac{p_{cm}}{m_B^2} \{ |\mathcal{A}(B \rightarrow f)|^2 + |\mathcal{A}(\bar{B} \rightarrow \bar{f})|^2 \}, \quad (7)$$

$|p_{cm}|$ 是在 B 介子静止系中两个末态强子的质心动量, τ_B 为 B 介子的寿命。

结果与分析

- 分支比的理论计算结果如下表所示:

Table: $B_d \rightarrow PV$ 衰变过程的分支比, 第一和第二个理论的不确定性分别来自于 $\omega_B \pm 0.01\text{GeV}$ 和 $\mu_p \pm 0.1\text{GeV}$ 的变化(单位: 10^{-6})。

	mode	$\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^0 K^{*0}$	$\bar{B}^0 \rightarrow K^0 \bar{K}^{*0}$	$\bar{B}^0 \rightarrow \rho^+ K^-$	$\bar{B}^0 \rightarrow \pi^0 \bar{K}^{*0}$
data	PDG	< 0.96	< 0.96	7.5 ± 0.4	3.3 ± 0.6
S1	$\phi_{B1} + \phi_{B2}$	$0.23^{+0.02+0.04}_{-0.02-0.03}$	$0.16^{+0.01+0.12}_{-0.01-0.12} \times 10^{-2}$	$3.61^{+0.24+0.34}_{-0.22-0.33}$	$1.30^{+0.09+0.16}_{-0.08-0.15}$
	ϕ_{B1}	$0.15^{+0.01+0.03}_{-0.01-0.03}$	$0.12^{+0.01+0.02}_{-0.01-0.02} \times 10^{-2}$	$2.52^{+0.17+0.29}_{-0.16-0.17}$	$0.94^{+0.07+0.13}_{-0.06-0.13}$
S2	BaBar	< 1.9	< 1.9	8.0 ± 1.4	3.3 ± 0.6
	$\phi_{B1} + \phi_{B2}$	$0.19^{+0.01+0.03}_{-0.01-0.03}$	$0.14^{+0.01+0.02}_{-0.01-0.01}$	$2.99^{+0.19+0.29}_{-0.18-0.27}$	$1.07^{+0.07+0.13}_{-0.06-0.13}$
	ϕ_{B1}	$0.12^{+0.01+0.02}_{-0.01-0.02}$	$0.11^{+0.00+0.02}_{-0.00-0.01}$	$2.09^{+0.13+0.24}_{-0.12-0.23}$	$0.77^{+0.05+0.11}_{-0.05-0.01}$
S3	Belle			8.4 ± 1.5	
	$\phi_{B1} + \phi_{B2}$	$0.28^{+0.02+0.04}_{-0.02-0.04}$	$0.18^{+0.01+0.02}_{-0.01-0.02}$	$4.40^{+0.30+0.42}_{-0.28-0.40}$	$1.60^{+0.12+0.20}_{-0.11-0.19}$
	ϕ_{B1}	$0.19^{+0.01+0.04}_{-0.01-0.03}$	$0.14^{+0.01+0.02}_{-0.01-0.02}$	$3.10^{+0.23+0.35}_{-0.21-0.34}$	$1.15^{+0.09+0.17}_{-0.08-0.16}$

结果与分析

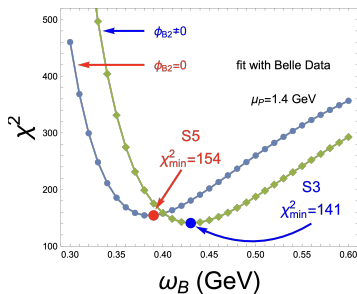
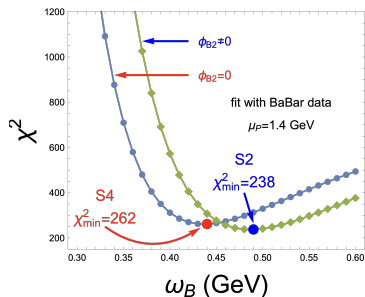


Figure: 在包含和不包含 ϕ_{B2} 贡献时 χ^2 随参数 ω_B 的分布。

结果与分析

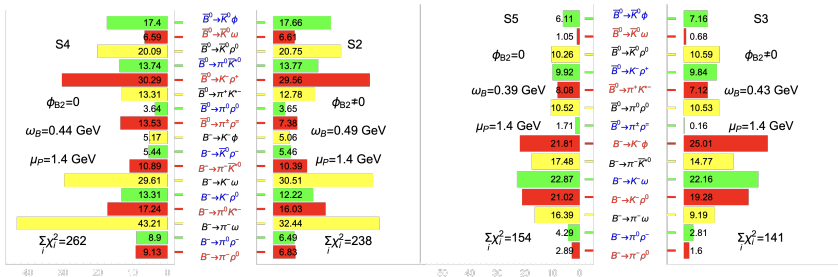


Figure: 在包含和不包含 ϕ_{B2} 贡献时分支比的 χ_i^2 分布。

总结与展望

- 高扭度强子波函数和 ϕ_{B2} 部分对跃迁形状因子有很明显的影响。
- ϕ_{B2} 的贡献可以提高大部分衰变道衰变分支比的理论结果。
- ϕ_{B2} 的参与有助于提高 pQCD 方法理论计算结果与实验数据之间的一致性。
- 从 pQCD 计算结果与实验结果之间存在的差异可以看出, B 介子非轻衰变在实验和理论上都有进一步努力的价值, 值得人们为其进行更加深入的研究。

感谢各位老师 and 同学们!