

人工色荷电 PG 玻色子对 B 介子衰变中 η' 单举产率的增强*

鲁公儒 肖振军 郭宏凯 吕林霞

(河南师范大学物理系 新乡 453002)

摘要 计算了人工色荷电 PG 玻色子 π_1^\pm 和 π_8^\pm 对稀有衰变过程 $B \rightarrow \eta' X_s$ 中 η' 单举产率的贡献. 计算结果表明: QCD 胶子反常和人工色新物理贡献能够提供较大的分枝比, 以解释 CLEO 实验结果.

关键词 B 介子稀有衰变 荷电 PG 玻色子 QCD 胶子反常

1 引言

最近美国 CLEO 实验组发现, 在 B 介子衰变中 η' 有很高的单举产率, 其分枝比为^[1]

$$Br(B \rightarrow \eta' X_s; 2.0 \text{ GeV} \leq E_{\eta'} \leq 2.7 \text{ (GeV)}) = (6.2 \pm 1.6 \pm 1.3) \times 10^{-4}, \quad (1)$$

该实验值远高于原来的标准模型理论期望值^[2]. 根据目前已有的相关讨论^[2-7], 下述各点已基本清楚:

- Atwood 和 Soni 认为^[3], η' 的高单举产率可能是由于增强的 $b \rightarrow sg^* \rightarrow s\eta' g$ 过程造成的. 当考虑 QCD 胶子反常时, 如果把 $gg^* \eta'$ 顶角耦合因子 $H(k^2, q^2, m_\eta^2)$ 取为常数, 则可以给出和 (1) 式相符的结果. 但 Hou 和 Tseng^[4] 指出, 如果考虑 α_s 的跑动对顶角耦合因子 H 的影响, 那么文献 [3] 中给出的理论预言值将降低为原来的 1/3, 因此应当考虑新物理对 $b \rightarrow sg$ 的增强.

- Kagan 和 Petrov^[5] 指出, 应当考虑 $gg^* \eta'$ 耦合对压低因子 $m_\eta^2 / (q^2 - m_\eta^2)$ 的依赖性, 这样文献 [3] 给出的理论预言值将降低为 $\sim 1.6 \times 10^{-5}$, 仅为实验值的大约 1/30. 这样新物理的贡献或其它机制的影响就变得非常重要.

- 袁烽和赵光达指出^[6], 在标准模型框架内, 有可能通过 $b \rightarrow (c\bar{c})_8 s$ 衰变和 $(c\bar{c})_8 \rightarrow \eta' X$ 两个过程来解释 CLEO 实验结果.

- CLEO 实验组测量了不变质量谱 $M(X_s)$ 的分布^[1], 发现峰值出现在 $M(X_s) \geq 2 \text{ GeV}$ 的

1998-10-05 收稿

* 国家自然科学基金资助项目 (19575015, 19775012)

区域, 与 $b \rightarrow sg^* \rightarrow sg\eta'$ 三体末态分布相符合.

• 由标准模型因子化近似. 考虑旁观夸克的非旁观效应^[7], 大体上可以解释较大的遍举分枝比 $Br(B \rightarrow \eta' K^\pm)$ ^[1]. 但相关计算仍然有较大的误差. 另外, 根据文献 [5] 的讨论, 对短距离的 $b \rightarrow \eta' sg$ 过程的新物理贡献基本上不影响 η' 的遍举产率.

综上所述, 如果考虑压低因子 $m_\eta^2 / (q^2 - m_\eta^2)$ 对 η' 单举产率的影响, 新物理的影响就变得非常重要. 文中我们将在人工色 (Technicolor) 理论框架下计算色单态和色八重态荷电 PG 玻色子 π_1 和 π_8 通过单圈电弱企鹅图对 $B \rightarrow \eta' X_s$ 衰变过程的贡献. 计算结果表明, π_1 和 π_8 可以提供较大的增强以解释 CLEO 实验结果.

在第二节, 将计算包含 π_1 和 π_8 内线传播子的电弱企鹅图, 抽出形状因子 F_1^{New} 和 F_2^{New} . 在第三节, 将给出数值计算结果并进行简短的讨论.

2 标准模型和人工色模型中的形状因子 F_1 和 F_2

在标准模型理论框架下, 由单圈企鹅图引起的 bsg 有效耦合为^[8]

$$\Gamma_\mu^{\text{SM}} = g_s \frac{G_F}{4\sqrt{2}\pi^2} \lambda_i \bar{s} T^a [F_1(x_i)(q^2 \gamma_\mu - q_\mu \not{q}) - iF_2(x_i) \sigma_{\mu\nu} q^\nu (m_s L + m_b R)] b, \quad (2)$$

其中 g_s 是 QCD 耦合常数, $\lambda_i = V_{is}^* V_{ib}$, $T^a = \lambda^a / 2$, λ^a 是 Gell-Mann 矩阵, $q = p_b - p_s$. 形状因子 $F_1(x_i)$ 和 $F_2(x_i)$ ($i = u, c, t$) 的表达式为:

$$F_1(x_i) = \frac{x_i}{12} [y_i + 13y_i^2 - 6y_i^3] + \left[\frac{2y_i}{3} - \frac{x_i}{6} (4y_i^2 + 5y_i^3 - 3y_i^4) \right] \ln[x_i], \quad (3)$$

$$F_2(x_i) = -\frac{x_i}{4} [-y_i + 3y_i^2 + 6y_i^3] + \frac{3x_i^2 y_i^4}{2} \ln[x_i], \quad (4)$$

其中 $x_i = m_i^2 / M_W^2$ ($i = u, c, t$), $y_i = 1 / (x_i - 1)$.

在人工色理论框架下^[9], 非最小的人工色模型均包含色单态和色八重态荷电 PG 玻色子 π_1 和 π_8 , 荷电 PG 玻色子与规范玻色子 (γ, Z, gluon) 的规范耦合由其量子数确定, 是普通的. 荷电 PG 玻色子参与的有效 Yukawa 耦合是模型相关的, 其一般形式已在文献 [10] 中给出. 把标准模型框架下单圈企鹅图中的 W 玻色子换成 π_1 和 π_8 , 做解析计算得到由荷电 PG 玻色子 π_1 和 π_8 引起的有效 bsg 顶角耦合为:

$$\Gamma_\mu^{\text{New}} = g_s \frac{G_F}{4\sqrt{2}\pi^2} \lambda_i \bar{s} T^a [F_1^{\text{New}}(q^2 \gamma_\mu - q_\mu \not{q}) - iF_2^{\text{New}} \sigma_{\mu\nu} q^\nu (m_s L + m_b R)] b, \quad (5)$$

其中 $\lambda_i = V_{is}^* V_{ib}$, 形状因子 F_1^{New} 和 F_2^{New} 为:

$$F_1^{\text{New}}(x_i, y_i) = \frac{D'(x_i)}{3\sqrt{2} G_F F_\pi^2} + \frac{8D'(y_i)}{3\sqrt{2} G_F F_\pi^2}, \quad (6)$$

$$F_2^{\text{New}}(x_i, y_i) = - \left[\frac{D(x_i)}{3\sqrt{2} G_F F_\pi^2} + \frac{8D(y_i) + E(y_i)}{3\sqrt{2} G_F F_\pi^2} \right], \quad (7)$$

$$D(x) = \frac{-5 + 19x - 20x^2}{24(1-x)^3} + \frac{x^2 - 2x^3}{4(1-x)^4} \ln[x], \quad (8)$$

$$D'(x) = \frac{7 - 29x + 16x^2}{72(1-x)^3} + \frac{3x^2 - 2x^3}{12(1-x)^4} \ln[x], \quad (9)$$

$$E(y) = \frac{12 - 15y - 5y^2}{8(1-y)^3} + \frac{9y - 18y^2}{4(1-y)^4} \ln[y], \quad (10)$$

其中 $x_i = m_{p_i}^2 / m_i^2$, $y_i = m_{p_8}^2 / m_i^2$ ($i = u, c, t$), m_{p_1} 和 m_{p_8} 表示 π_1 和 π_8 的质量, $G_F = 1.16639 \times 10^{-5}(\text{GeV})^{-2}$ 是费米耦合常数. 在一代人工色模型下^[9], $F_\pi = 123\text{GeV}$. 在其它人工色模型下, F_π 的数值将减小. 把式(5)中的 Γ_μ^{New} 和(2)式中的 Γ_μ^{SM} 加以比较, 可以看出 F_1^{New} 和 F_2^{New} 与标准模型中的 F_1 和 F_2 相对应. 新的形状因子表示荷电 PG 玻色子通过企鹅图对 bsg 有效顶角的贡献.

3 数值计算结果与讨论

在数值计算中, 使用文献 [4] 所给公式,

$$\frac{d^2 Br(b \rightarrow \eta' sg)}{dx dy} = 0.2 \left[\frac{g_s(m_b)}{4\pi^2} \right]^2 \frac{a_g^2 m_b^2}{4} \left[|\Delta F_1|^2 c_0 + \text{Re}(\Delta F_1 F_2^*) \frac{c_1}{y} + |F_2|^2 \frac{c_2}{y^2} \right], \quad (11)$$

其中已取 $(V_{cb}^* G_F^2 m_b^2) / (192\pi^3) \approx 0.2\Gamma_B$ (见文献 [3]). 系数 c_0 , c_1 和 c_2 为:

$$\begin{aligned} c_0 &= [-2x^2y + (1-y)(y-x')(2x+y-x')] / 2, \\ c_1 &= -(1-y)(y-x')^2, \\ c_2 &= [2x^2y^2 - (1-y)(y-x')(2xy-y+x')] / 2, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $x = m^2 / m_b^2$, m 是与 η' 相关的反冲质量, $y = q^2 / m_b^2$ ($q = p_b - p_s$), $x' = m_{\eta'}^2 / m_b^2$. $\Delta F_1 = F_1(x) - F_1(x')$. 因子 $a_g = \sqrt{N_f} \alpha_s(\mu) / (\pi f_{\eta'})$ 是有效 QCD 反常耦合^[3], $f_{\eta'} = 131\text{MeV}$. 对 $\alpha_s(\mu)$ 的跑动使用双圈表达式.

计算结果表明, 色八重态的 π_8 对新物理贡献起主要作用, 色单态的 π_1 的影响较小. 在数值计算中取: $m_t = 180\text{GeV}$, $m_w = 80.2\text{GeV}$, $m_c = 1.4\text{GeV}$, $m_b = 4.5\text{GeV}$, $m_{p_1} = 100\text{GeV}$, $m_{p_8} = 250 - 600\text{GeV}$. 经计算得到, $F_2^{\text{SM}}(m) = 0.2$, $\Delta F_1^{\text{SM}} = -5.25$, $\Delta F_1^{\text{New}} = -4.5$, $F_2^{\text{New}} = -8.2 \sim -0.7$.

对 η' 单举产生的分枝比 $Br(B \rightarrow \eta' X_s)$, 本文考虑两种不同情况.

对第一种情况, 只考虑 α_s 跑动效应和荷电 PG 玻色子的贡献. 若只考虑 α_s 跑动, 可得 $Br(B \rightarrow \eta' X_s) = 3.4 \times 10^{-4}$ (如图 1 中点线). 图 1 中两条短划线之间的区域对应 CLEO 实验数据, 实线表示包含了 PG 玻色子贡献以后分枝比 $Br(B \rightarrow \eta' X_s)$ 对 m_{p_8} 的依赖关系. 当取 $m_{p_1} = 100\text{GeV}$, $m_{p_8} = 250 - 600\text{GeV}$ 时, $Br(B \rightarrow \eta' X_s) = (48.9 - 5.7) \times 10^{-4}$, 理论预言值可以和 CLEO 实验结果符合的很好. 色单态 PG 玻色子的贡献只占总贡献的大约 10%.

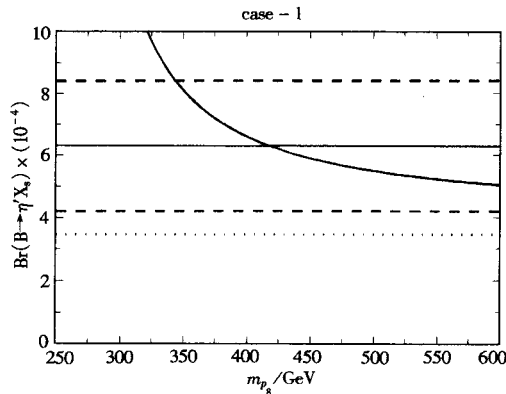


图 1 考虑 α_s 跑动效应和荷电 PG 玻色子贡献时
分枝比 $Br(B \rightarrow \eta' X_s)$ 对 m_{p8} 的依赖关系

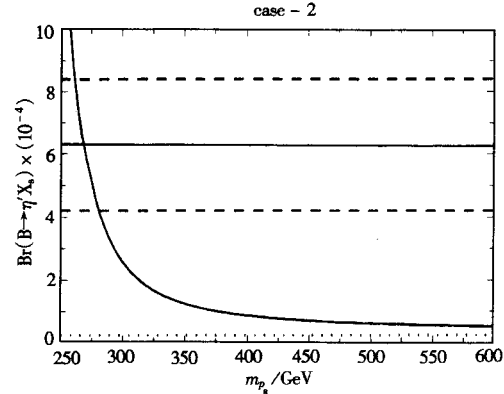


图 2 考虑压低因子 $m_{\eta'}^2 / (q^2 - m_{\eta'}^2)$ 的影响和荷
电 PG 玻色子贡献时分枝比 $Br(B \rightarrow \eta' X_s)$ 对 m_{p8}
的依赖关系

对第二种情况, 考虑压低因子 $m_{\eta'}^2 / (q^2 - m_{\eta'}^2)$ 的影响和荷电 PG 玻色子的贡献. 若只考虑 $m_{\eta'}^2 / (q^2 - m_{\eta'}^2)$ 的影响, 那么有 $Br(B \rightarrow \eta' X_s) = 2.3 \times 10^{-5} (2.0 \text{ GeV} \leq E_{\eta'} \leq 2.7 \text{ GeV})$, 比 CLEO 数据低一个量级. 如果包含 PG 玻色子贡献 (如图 2 所示), 可以得到与 CLEO 实验符合的理论预言值. 当取 $m_{p1} = 100 \text{ GeV}$, $m_{p8} = 250 - 600 \text{ GeV}$ 时, $Br(B \rightarrow \eta' X_s) = (15.2 - 0.7) \times 10^{-4} (2.0 \text{ GeV} \leq E_{\eta'} \leq 2.7 \text{ GeV})$. 与第一种情况相同, 色八重态 PG 玻色子的贡献起主要作用.

由上述计算可以看出, $gg^* \eta'$ 反常耦合因子 $H(k^2, q^2, m_{\eta'}^2)$ 的大小和性质对解释 η' 高单举产率起着关键的作用. 但对 H 因子的大小及其对 q^2 的依赖性质目前仍有较多的争论. 如果目前关于 α_s 和压低因子 $m_{\eta'}^2 / (q^2 - m_{\eta'}^2)$ 影响的理论估计是基本合理的, 那么新物理的贡献对解释 CLEO 实验结果将起关键作用. 另外根据目前的讨论, 在 TeV 能标的新物理对 bsg 耦合的增强与其对电偶极 $bs\gamma$ 有效耦合的增强并不矛盾^[11]. 作者将在另一篇论文中考虑 CLEO 实验数据 $Br(b \rightarrow sg) < 6.8\%$ ^[12] 对人工色模型的限制.

作者在人工色模型框架下计算了荷电 PG 玻色子 π_1 和 π_8 对 η' 单举产生过程分枝比 $Br(B \rightarrow \eta' X_s)$ 的贡献. 数值计算表明, 可以在人工色理论框架下对 CLEO 发现的 η' 高单举产率给出一种简单的新物理解释. 如图 1 和图 2 所示, 在所考虑两种情况下, 荷电 PG 玻色子均可以给出所需要的增强, 以解释 CLEO 实验结果. 尤其是第二种情况, 新物理贡献对解释 CLEO 实验结果起着重要作用.

作者感谢和杜东生教授, 赵光达教授, 杨亚东博士进行的讨论.

参 考 文 献

- 1 CLEO Collaboration, Browder T E et al. *phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**:1786
- 2 Halperin I, Zhitnitsky A. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**:438; Halperin I, Zhitnitsky A, *Phys. Rev.*, 1997, **D56**:7247
- 3 Atwood D D, Soni A, *Phys. Lett.*, 1997, **B405**:150; Fritzsche H. *Phys. Lett.* 1997, **B415**:83
- 4 Hou W S, Tseng B. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **80**:434
- 5 Kagan A L, Petrov A A. hep-ph / 9707354
- 6 Yuan F, Chao K T. *Phys. Rev.*, 1997, **D56**:R2459
- 7 Du D S, Kim C S, Yang Y D. *Phys. Lett.*, 1998, **B426**:133; Ahmady M R, Kou E, Sugamoto A. *Phys. Rev.*, 1998, **D58**: 014015
- 8 Hou W S. *Nucl. Phys.*, 1988, **B308**:561
- 9 Farhi E, Susskind L. *Phys. Rev.*, 1979 **D20**:3404
- 10 Ellis J, Gailaard M K, Nanopoulos D V et al. *Nucl. Phys.* 1981, **B187**:541; Eichten E, Hinchliffe I, Lane K et al. *Rev. Mod. Phys.*, 1984, **56**:579; *Phys. Rev.*, 1986, **D34**:1547; For the Current status of Technicolor Theories see paper: K. Lane, ICHEP96, 1996, 367—378
- 11 Lü C D, Xiao Z J. *Phys. Rev.* 1996, **D53**:2529
- 12 CLEO Collaboration, Coan T E et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**:1150

Inclusive η' Production in B Decays and the Enhancement Due to Charged Technipions *

Lu Gongru Xiao Zhenjun Guo Hongkai Lü Linxia

(*Department of Physics, Henan Normal University, Xinxiang, 453002*)

Abstract We calculate the new contributions to the charmless B decay $B \rightarrow X_s \eta'$ via the QCD gluon anomaly and the enhanced $b \rightarrow sg$ decay due to the charged technipions appeared in Technicolor Model. Within the considered parameter space the new physics contribution can result in a large enhancement to the inclusive η' production and in turn to account for the CLEO data of $Br(B \rightarrow \eta' X_s)$.

Key words rare B-decays, charged PG bosons, QCD gluon anomaly

Received 5 October 1998

* Project (19575015, 19775012) Supported by National Natural Science Foundation of China