

# $B \rightarrow \eta' K(K^*), \eta K(K^*)$ 衰变过程的分析\*

杜 东 生

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 对  $B \rightarrow \eta' K(K^*), \eta K(K^*)$  过程的最新实验结果及各种可能的理论解释做了系统分析, 并对某些衰变机制的实验检验做了简要讨论.

**关键词** B 介子衰变 标准模型 QCD 反常 双胶子聚变

## 1 实验概况

康奈尔大学 CLEO 实验组 1997 年以来公布的最新结果<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} Br(B^\pm \rightarrow \eta' X_s) &= (6.2 \pm 1.6 \pm 1.3) \times 10^{-4}, (2.0 < p_{\eta'}, < 2.7\text{GeV}); \\ Br(B^+ \rightarrow \eta' K^+) &= (6.5_{-1.4}^{+1.5} \pm 0.9) \times 10^{-5}; \\ Br(B^0 \rightarrow \eta' K^0) &= (4.7_{-2.0}^{+2.7} \pm 0.9) \times 10^{-5}. \end{aligned} \quad (1)$$

上面这些是新结果. 在以前公布的结果为:

$$\begin{aligned} Br(B^\pm \rightarrow \eta' X^s) &= (7.5 \pm 1.5 \pm 1.1) \times 10^{-4}; \\ Br(B^+ \rightarrow \eta' K^\pm) &= (7.1_{-2.1}^{+2.5} \pm 1.0) \times 10^{-5}; \\ Br(B^0 \rightarrow \eta' K^0) &= (5.3_{-2.2}^{+2.8} \pm 1.2) \times 10^{-5}. \end{aligned} \quad (2)$$

可见数据还在不断改进. 可以预言, 上述测量结果在近期内还会进一步提高精度.

按通常的夸克模型观念,  $\eta', \eta$  是由  $u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$  构成的.

(1) 式中三个过程都涉及树图或企鹅图. 树图 ( $b \rightarrow u$ ) 会有 KM 矩阵元  $|V_{ub}|$  压低. 而 Penguin 图虽可与树图贡献大小相比, 但总的来讲理论计算的分支比都  $\leq 10^{-5}$ . 上述实验结果大大超出了我们的“常规”. 因而引起了国际粒子物理界的极大兴趣. 下面将说明这种违反“常规”的结果如何从理论上解释.

1998-07-03收稿

\* 国家自然科学基金资助

## 2 理论解释

在夸克模型框架内,  $\eta', \eta$  由  $u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$  构成. 则可以计算出<sup>[2]</sup>

$$Br(B \rightarrow \eta' X_s) \sim 1 \times 10^{-5}. \quad (3)$$

对 exclusive 过程  $B \rightarrow \eta' K$ , 过去已有很多计算<sup>[3]</sup>. 结果均为

$$Br(B \rightarrow \eta' K) \sim 1 \times 10^{-5}. \quad (4)$$

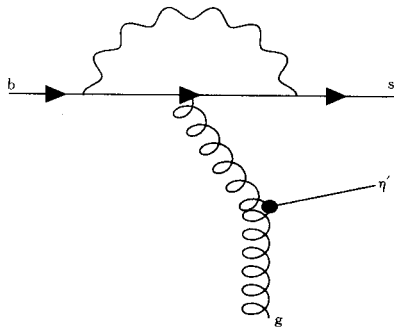


图 1

所以在老的“常规”框架内不可能解释 CLEO 的新实验结果 (1). 要想解释新结果需要引入新的机制. Atwood 和 Soni<sup>[4]</sup> 用 Penguin 图加上 QCD 反常来解释 inclusive  $B \rightarrow \eta' X_s$  过程 (图 1). 其机制为  $b \rightarrow sg^*$  是通过 Penguin 图进行, 虚胶子  $g^*$  再通过 QCD 反常放出胶子  $g$  和  $\eta'$ . 实际上  $\eta' \rightarrow gg$  耦合可由 QCD 反常顶点

$$H(q_1^2, q_2^2, m_{\eta'}^2) \varepsilon_{\mu\nu\alpha\beta} q_1^\mu q_2^\nu \varepsilon_1^\alpha \varepsilon_2^\beta$$

来描写, 其中  $(q_1, \varepsilon_1), (q_2, \varepsilon_2)$  分别是  $g^*$  和  $g$  的动量和极化,  $H(q_1^2, q_2^2, m_{\eta'}^2)$  为形状因子. 文献 [4] 中取

$$H(q_1^2, q_2^2, m_{\eta'}^2) \approx H(0, 0, m_{\eta'}^2), \quad (5)$$

并由  $\psi \rightarrow \eta' \gamma$  实验分支比定出  $H(0, 0, m_{\eta'}^2)$  的大小, 这种的机制可解释 CLEO 的实验  $B \rightarrow \eta' X_s$ . 但是 Hou 和 Tseng 指出<sup>[5]</sup>, 取  $H(q_1^2, q_2^2, m_{\eta'}^2) \approx H(0, 0, m_{\eta'}^2)$  是不合理的. 实际上  $H(q_1^2, q_2^2, m_{\eta'}^2) \propto \alpha_s(q^2)$  是跑动的. 这将使 QCD 反常的贡献减小,  $gg^* \eta$  的耦合需要有新的物理才能解  $B \rightarrow \eta' X_s$ .

Halperin 和 Zhitnitsky<sup>[2]</sup> 认为,  $B \rightarrow \eta' X_s$  可用下面的机制解释, 即  $b$  衰变到  $(c\bar{c})$  色单态和  $s$  夸克,  $(c\bar{c})$  色单态再通过双胶子与  $\eta'$  耦合:

$$b \rightarrow (c\bar{c})_1 s, (c\bar{c})_1 \rightarrow gg \rightarrow \eta' \quad (6)$$

但要求  $f_{\eta'}^{(c\bar{c})} \sim 140 \text{ MeV}$ . 这个数值比通常各种理论估计的要大的多. 一般而言取  $-40 \text{ MeV} < f_{\eta'}^{(c\bar{c})} < 40 \text{ MeV}$  较为合理.

Feng Yuan 和 K. T. Chao<sup>[6]</sup> 指出,  $\eta'$  内部可能含有很大的  $|(c\bar{c})_8 g\rangle$  的成分.  $b \rightarrow (c\bar{c})$  色 8 重态和  $s$  夸克,  $(c\bar{c})_8$  再通过双胶子  $gg$  与  $\eta'$  耦合. 这种机制也可解释  $B \rightarrow \eta' X_s$  的实验结果.

对  $B \rightarrow \eta' K(K^*), \eta K(K^*)$  过程, 通常采用因子化方法 (BSW) 来计算矩阵元. 这要涉及许多参数, 如跃迁形状因子,  $s$ -quark 质量  $m_s$ , 有效色因子  $N_c^{\text{eff}}$ , KM 矩阵元等, 还涉及流矩阵元

$$\left. \begin{aligned} \langle \eta' | \bar{s} \gamma_5 s | 0 \rangle &= i \frac{m_{\eta'}^2}{2m_s} f_{\eta'}^{(s\bar{s})} \\ \langle K^- | \bar{s} b | B^- \rangle &= \frac{p_{\eta'}^\mu}{m_b - m_s} \langle K^- | \bar{s} \gamma_\mu b | B^- \rangle \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

(7)式是利用 Dirac 方程导出的,当然也有别的方法计算. 以上这些参数可适当调节,但不能大动,大动就会与别的实验结果矛盾. 因而调节的范围很有限. H.Y.Cheng 在通常的框架内计算了  $B^\pm \rightarrow \eta' K^\pm$  [7]. 认为  $\eta$  由  $u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$  组成且  $\eta \rightarrow \eta'$  混合也考虑在内了. 取  $m_s = 105\text{MeV}$  (在  $\mu = m_b = 5\text{GeV}$  标度下). 得到

$$Br(B^\pm \rightarrow \eta' K^\pm) = \begin{cases} 1.4 \times 10^{-5} (m_s = 150\text{MeV}), \\ 3.87 \times 10^{-5} (m_s = 105\text{MeV}) \end{cases}, \eta = 0.35, \rho = 0.08;$$

$$Br(B^\pm \rightarrow \eta' K^\pm) = \begin{cases} 1.6 \times 10^{-5} (m_s = 150\text{MeV}), \\ 4.04 \times 10^{-5} (m_s = 105\text{MeV}) \end{cases}, \eta = 0.34, \rho = -0.12. \quad (8)$$

再加上树图 (见图 2)  $b \rightarrow (c\bar{c})s, (c\bar{c}) \rightarrow \eta'$  的贡献, 其中

$$\langle \eta' | \bar{c} \gamma^\mu \gamma_5 c | 0 \rangle = -i f_{\eta'}^{(c\bar{c})} p_{\eta'}^\mu, \quad (9)$$

文献 [7] 中取  $f_{\eta'}^{(c\bar{c})} = -15\text{MeV}$ . 则可完全解释  $B \rightarrow \eta' \text{CLEO}$  的实验结果 (见表 1, 文献 [7] 列的数字).

与  $\eta'$  耦合的双胶子  $gg$  可以出自一条 quark 线 (图 3). Simma et al. [8], Ali et al. [9] 都证明了这种

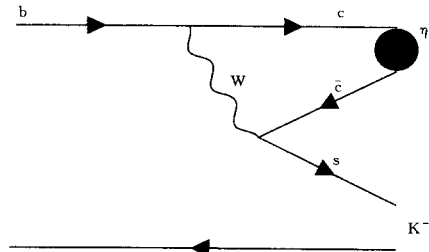


图 2

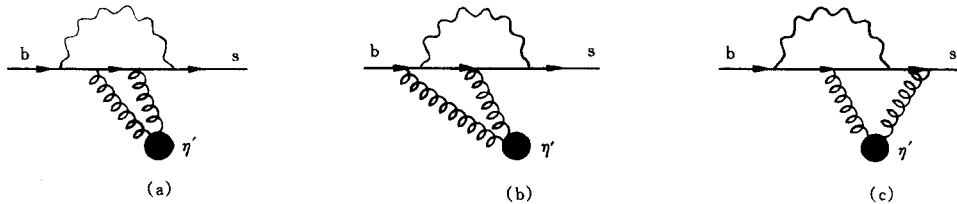


图 3

机制的贡献  $Br(B \rightarrow \eta' K) < 1 \times 10^{-5}$ . 如果与  $\eta$  耦合的两个胶子分别来自两条不同的 quark 线 [10], 如图 4 所示, 则这种机制的贡献远大于两胶子来自同一条线的情形. 这种机制单独可贡献  $Br(B \rightarrow \eta' K) \sim (2 - 3) \times 10^{-5}$ . 因而如果把普通 quark 模型机制及  $f_{\eta'}^{(c\bar{c})} \neq 0$  机制也考虑进来, 则可以很好地解释 CLEO 的实验 [10] (见表 1).

表1 B衰变道的数值结果与实验结果及其它文献中预言的比较

| Branching Ratio                | Ref[10]<br>$\epsilon_B=0.06(0.07)$ | $\epsilon_B=0.06(0.07)$<br>$f_{\eta'}^s=-15\text{MeV}$ | Ref.[7]               | Ref.[12]              | Ref.[7]+<br>Ref.[10]  | Exp.( $10^{-5}$ ) <sup>[11]</sup> |
|--------------------------------|------------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| $B^- \rightarrow \eta' K^-$    | $2.0(1.57) \times 10^{-5}$         | $4.63(4.10) \times 10^{-5}$                            | $5.69 \times 10^{-5}$ | $6.1 \times 10^{-5}$  | $8.31 \times 10^{-5}$ | $6.5^{+1.5}_{-1.4} \pm 0.9$       |
| $B^0 \rightarrow \eta' K^0$    | $2.0(1.57) \times 10^{-5}$         | $4.03(3.66) \times 10^{-5}$                            | $5.19 \times 10^{-5}$ | $5.69 \times 10^{-5}$ | $6.24 \times 10^{-5}$ | $4.7^{+2.7}_{-2.0} + 0.9$         |
| $B^- \rightarrow \eta' K^{*-}$ | $1.52(1.12) \times 10^{-5}$        | $3.18(2.61) \times 10^{-5}$                            | $3.24 \times 10^{-7}$ | $1.15 \times 10^{-5}$ | $7.41 \times 10^{-6}$ | <13                               |
| $B^0 \rightarrow \eta' K^{*0}$ | $1.52(1.12) \times 10^{-5}$        | $3.33(2.74) \times 10^{-5}$                            | $2.96 \times 10^{-7}$ |                       | $7.29 \times 10^{-6}$ | <3.9                              |
| $B^- \rightarrow \eta K^-$     | $3.46(2.77) \times 10^{-6}$        | $5.31(4.52) \times 10^{-6}$                            | $8.68 \times 10^{-7}$ | $5.13 \times 10^{-6}$ | $5.29 \times 10^{-6}$ | <1.4                              |
| $B^0 \rightarrow \eta K^0$     | $3.46(2.77) \times 10^{-6}$        | $5.02(3.90) \times 10^{-6}$                            | $3.28 \times 10^{-7}$ | $4.72 \times 10^{-6}$ | $4.80 \times 10^{-6}$ | <3.3                              |
| $B^- \rightarrow \eta K^{*-}$  | $2.76(2.05) \times 10^{-6}$        | $3.44(4.20) \times 10^{-6}$                            | $3.70 \times 10^{-6}$ | $1.31 \times 10^{-5}$ | $9.73 \times 10^{-7}$ | <3.0                              |
| $B^0 \rightarrow \eta K^{*0}$  | $2.76(2.05) \times 10^{-6}$        | $2.40(3.09) \times 10^{-6}$                            | $2.44 \times 10^{-6}$ |                       | $4.21 \times 10^{-7}$ | <3.0                              |

一个很有趣的结果是,利用 Fritzsche 最近提出的一个有效哈密顿量<sup>[11]</sup>

$$H_{\text{eff}} = a\alpha_s G_F \bar{s}_L b_R (G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu} + G_{\mu\nu} G^{\mu\nu}). \quad (10)$$

He et al.<sup>[12]</sup> 计算了  $B \rightarrow \eta' X_s, \eta' K, \eta K$ , 其结果可解释已有实验结果. (见表 1 所列数值). 这是非常令人吃惊的. 因 (10) 式的哈密顿量是如此简单, 但却如此有效! 当然我们需要进一步找出背后的基本理论.

### 3 讨论

从表 1 可以看出, 与  $\eta'$  耦合的两个胶子来自不同夸克线时<sup>[10]</sup> 所计算的  $B \rightarrow \eta' K$  与  $B \rightarrow \eta' K^*$  的两种衰变分支比有相同的量级. 因而给出的  $Br(B \rightarrow \eta' K^*)$  数值比其他所有机制的结果都大, 已接近实验上限, 但还没有超出. 因此, 进一步的实验结果能检验这种机制的合理性.

值得注意的是, 上述各种计算均有不确定性. 如形状因子, KM 矩阵的数值, quark 质量取值, 因子化方法, 波函数, PQCD 适用性等. 具体预言的分支比要有误差. 不管怎样, 通过以上的分析可以肯定在标准模型框架内完全可解释 CLEO 的新结果  $B \rightarrow \eta' K$ . 但对过程  $B \rightarrow \eta' X_s$ . 似乎需要新的物理.

### 参 考 文 献

- 1 CLEO Collab. CLNS 97/1536, CLEO 97—31; Smith J. (CLEO), talk at the 1997 Aspen winter. Conf. on particle physics, Aspen, Colorado, 1997; Godang R. et al. (CLEO), CLNS 97—1522, CLEO 97—27; Alam M S et al. (CLEO), CLEO Conf. 97—23
- 2 Halperin I, Zhitnitsky A. hep-ph/9705251
- 3 Du Dongsheng, Yang Maozhi. Phys. Rev., 1977, **D53**:294; Du Dongsheng, Guo Libo. Z. Phys., 1997, **C75**:9
- 4 Atwood D, Soni A. Phys. Lett., 1997, **B405**:150; hep-ph/9704357
- 5 Hou Wei-Shu, Tseng B. hep-ph/9705304
- 6 Yuan F, Chao K T. Phys. Rev., 1997, **D56**:R2495

- 7 Cheng H Y, Tseng B. hep-ph/9712244
- 8 Simma H, Wyler D. Nucl. Phys., 1990, **B344**:283
- 9 Ali A, Chay J, Greub C et al. hep-ph/9712372
- 10 Du D, Kim C S, Yang Y. hep-ph/9711428, Phys. Lett. 1998, **B426**, 133; Du D, Yang Y, Zhu G. hep-ph/9805451
- 11 Fritsch H. hep-ph/9708348
- 12 He Xiao-gang, Hou Wei-shu, Huang C S. hep-ph/9712478

## Analysis of $B \rightarrow \eta' K(K^*), \eta K(K^*)$ Decay Processes \*

Du Dongsheng

*(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)*

**Abstract** The new data of  $B \rightarrow \eta' K(K^*), \eta K(K^*)$  are presented and analysed. All possible theoretical explanations are briefly introduced. The experimental test of some decay mechanisms is discussed.

**Key words** B-meson decays, standard model, QCD anomaly, two gluon fusion

---

Received 3 July 1998

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China