

$b \rightarrow s\gamma$ 在 Multiscale Walking Technicolor 模型中的研究 *

鲁公儒 曹义刚 熊兆华 肖振军

(河南师范大学物理系 新乡 453002)

1996-12-09 收稿

摘 要

研究 Multiscale Walking Technicolor 模型 (MWTCM) 中赝标戈尔斯通玻色子 (PGB) 对 $b \rightarrow s\gamma$ 分支比的修正, 发现修正太大以致很难解释最近 CLEO 的实验数据. 如果进一步引入 Topcolor, 在 Topcolor assisted MWTCM 中, $BR(b \rightarrow s\gamma)$ 在参数的一定空间内同 CLEO 的实验数据一致.

关键词 MWTCM, 分支比, Topcolor assisted MWTCM.

1 引 言

CLEO 实验室最近观测到单举辐射衰变 $B \rightarrow K^* \gamma$ 的分支比: $BR(B \rightarrow K^* \gamma) = (4.5 \pm 1.0 \pm 0.9) \times 10^{-5}$ [1] 之后, 遍举过程 $b \rightarrow s\gamma$ 的分支比也被得到 [2]:

$$BR(B \rightarrow X_s \gamma) = (2.32 \pm 0.57 \pm 0.357) \times 10^{-4}. \quad (1)$$

该过程分支比的上下限为:

$$1.0 \times 10^{-4} < BR(B \rightarrow X_s \gamma) < 4.2 \times 10^{-4}, \text{ 95\% 的置信度.} \quad (2)$$

由于遍举衰变 $b \rightarrow s\gamma$ (夸克水平) 是一个圈图导致的味改变中性流过程, 所以对新物理的贡献特别敏感 [3]. 研究该过程很有意义.

$b \rightarrow s\gamma$ 衰变以及对它的 QCD 领头阶对数修正已经被许多理论组计算过 [4]. 理论研究的巨大进展和实验精度的不断提高激发我们在 Technicolor (TC) 理论中重新对该过程进行研究.

TC [5] 理论是电弱自发对称破缺的重要候选者. 为了产生普通费米子质量, 人们又提出了 Extended Technicolor (ETC) [6] 模型. 原始的 ETC 模型存在大的味改变中性流问题, 进一步研究表明, 该问题在 Walking Technicolor (WTC) 理论中 [7] 可以得到解决. 此外, WTC 模型中的电弱参数 s 也比简单 ETC 模型中的小, 它同标准模型的偏离值都落在实验误差的范围之内 [8]. 为了解释夸克质量的巨大等级, 又进一步提出了 Multiscale WTC 模型

* 国家自然科学基金资助.

(MWTM)^[9]. 该模型预言有大量的 PGB 存在, 它们可望在将来的实验中得到验证^[10]. 因此, 对该模型的唯一研究很有意义.

本文考察了 MWTM 中带电 PGB 对 $b \rightarrow s\gamma$ 衰变宽度的修正. 我们将会看到, 由于模型中较小的参数 F_Q , 原始的 MWTM 给出 $b \rightarrow s\gamma$ 分支比的修正太大. 如果进一步引入 Topcolor, 在 Topcolor assisted MWTM 中, $BR(b \rightarrow s\gamma)$ 能够在参数的一定范围内同 CLEO 实验数据保持一致.

第二节简单介绍一下 MWTM, 然后计算 PGB 对 $b \rightarrow s\gamma$ 衰变宽度的修正 (并且考虑全部 QCD 领头阶对数修正). 结果和讨论置于第三节.

2 MWTM 及 PGB 修正

首先考虑 Lane 和 Ramana 提出的 MWTM^[9]. ETC 规范群为:

$$G_{\text{ETC}} = SU(N_{\text{ETC}})_1 \times SU(N_{\text{ETC}})_2, \quad (3)$$

这里 $N_{\text{ETC}} = N_{\text{TC}} + N_{\text{C}} + N_{\text{L}}$, 其中 N_{TC} , N_{C} 和 N_{L} 分别代表 TC 色数, 普通色数和色单态 TC 轻子数. 文献 [9] 为确保 TC 耦合常数的跑动, 选择最小的 N_{TC} 和 N_{L} : $N_{\text{TC}} = N_{\text{L}} = 6$. G_{ETC} 构造为在某一能标处破缺到对角 ETC 规范群 $SU(N_{\text{ETC}})_{1+2}$. 衰变常数 F_Q 满足下列关系:

$$F = \sqrt{F_\psi^2 + 3F_Q^2 + N_{\text{L}} F_{\text{L}}^2} = 246 \text{ GeV}. \quad (4)$$

从文献 [9] 中可以发现: $F_Q = F_{\text{L}} = 20-40 \text{ GeV}$. 取 $F_Q = 40 \text{ GeV}$ 作为计算的输入参数. 该模型预言 PGB 的质量大于 100 GeV . 本文取带电色单态 PGB P^\pm 的质量 $m_{P^\pm} = 100 \text{ GeV}$, 色八重态 PGB P_8^\pm 的质量 $m_{P_8^\pm} = (300-600) \text{ GeV}$.

MWTM 中, 带电的色单态 PGB 类似于双 Higgs 二重态模型 (2HDM) Type-I^[11] 中基本的带电 Higgs H^\pm . 它对 $b \rightarrow s\gamma$ 的贡献也类似于 2HDM 中带电 Higgs 的贡献. 至于带电色八重态 PGB 的贡献比较复杂, 因为这涉及到色相互作用. 其它中性 PGB 对 $b \rightarrow s\gamma$ 无贡献.

PGB 的规范耦合由它们的量子数决定. ETC 相互作用导致 PGB 同普通费米子的 Yukawa 耦合. 计算中需要的耦合为:

$$[P^+ - u_i - d_j] = i \frac{1}{\sqrt{6} F_Q} V_{u,d} [m_u (1 - \gamma_5) - m_d (1 + \gamma_5)], \quad (5)$$

$$[P_8^\pm - u_i - d_j] = i \frac{1}{F_Q} V_{u,d} \lambda^a [m_u (1 - \gamma_5) - m_d (1 + \gamma_5)], \quad (6)$$

其中, $u = (u, c, t)$, $d = (d, s, b)$; $V_{u,d}$ 为 Kobayashi-Maskawa 矩阵元; λ^a 为 Gell-Mann $SU(3)_c$ 矩阵.



图1 对 $b \rightarrow s\gamma$ 有贡献的 Feynman 图

图 1 给出了对 $b \rightarrow s\gamma$ 有贡献的 Feynman 图. 其中的圆斑代表光子企鹅算符 (包括标准模型中的 W 规范玻色子和 MWTM 中的带电 PGB). 计算时, 首先在 $\mu = m_w$ 标度积掉 top 夸克和弱 W 玻色子, 产生一个有效的五夸克理论. 利用重整化群方程, 把有效理论跑动到 b 夸克标度, 给出 QCD 领头阶对数修

正. 然后在此标度上计算 $b \rightarrow s\gamma$ 的衰变宽度.

利用 QCD 运动方程^[12], 可以得到与 $b \rightarrow s\gamma$ 相关的一组完备的 6 量纲算符:

$$\begin{aligned}
 O_1 &= (\bar{C}_{L\beta} \gamma^\mu b_{L\alpha})(\bar{S}_{L\alpha} \gamma_\mu C_{L\beta}); \\
 O_2 &= (\bar{C}_{L\alpha} \gamma^\mu b_{L\alpha})(\bar{S}_{L\beta} \gamma_\mu C_{L\beta}); \\
 O_3 &= (\bar{S}_{L\alpha} \gamma^\mu b_{L\alpha}) \sum_{q=u,d,s,c,b} (\bar{q}_{L\beta} \gamma_\mu q_{L\beta}); \\
 O_4 &= (\bar{S}_{L\alpha} \gamma^\mu b_{L\beta}) \sum_{q=u,d,s,c,b} (\bar{q}_{L\beta} \gamma_\mu q_{L\alpha}); \\
 O_5 &= (\bar{S}_{L\alpha} \gamma^\mu b_{L\alpha}) \sum_{q=u,d,s,c,b} (\bar{q}_{R\beta} \gamma_\mu q_{R\beta}); \\
 O_6 &= (\bar{S}_{L\alpha} \gamma^\mu b_{L\alpha}) \sum_{q=u,d,s,c,b} (\bar{q}_{R\beta} \gamma_\mu q_{R\alpha}); \\
 O_7 &= (e / 16\pi^2) m_b \bar{S}_L \sigma^{\mu\nu} b_R F_{\mu\nu}; \\
 O_8 &= (g / 16\pi^2) m_b \bar{S}_L \sigma^{\mu\nu} T^a b_R G_{\mu\nu}^a.
 \end{aligned} \tag{7}$$

W 标度的有效哈密顿为:

$$H_{\text{eff}} = \frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \sum_{i=1}^8 C_i(m_W) O_i(m_W). \tag{8}$$

计算得出八个算符的系数为:

$$\begin{aligned}
 C_1(m_W) &= 0, \quad i = 1, 3, 4, 5, 6; \quad C_2(m_W) = -1; \\
 C_7(m_W) &= \frac{1}{2} A(x) + \frac{1}{3\sqrt{2} G_F F_Q^2} [B(y) + 8B(z)]; \\
 C_8(m_W) &= \frac{1}{2} C(x) + \frac{1}{3\sqrt{2} G_F F_Q^2} [D(y) + 8D(z) + E(z)],
 \end{aligned} \tag{9}$$

其中 $x = \left(\frac{m_t}{m_W}\right)^2$, $y = \left(\frac{m_t}{m_{P^*}}\right)^2$, $z = \left(\frac{m_t}{m_{P_s^*}}\right)^2$. 函数 A 和 C 产生于 W 交换图, 是熟知的标准模

型的贡献. 函数 B, D 和 E 产生于 MWTCM 中带色单态和色八重态 PGB. 它们的表达式为:

$$\begin{aligned}
 A(x) &= -\frac{x}{12(1-x)^4} [(1-x)(8x^2 + 5x - 7) + 6x(3x - 2)\ln x]; \\
 B(x) &= \frac{x}{72(1-x)^4} [(1-x)(22x^2 - 53x + 25) + 6(3x^2 - 8x + 4)\ln x]; \\
 C(x) &= -\frac{x}{4(1-x)^4} [(1-x)(x^2 - 5x - 2) - 6x\ln x]; \\
 D(x) &= \frac{x}{24(1-x)^4} [(1-x)(5x^2 - 19x + 20) - 6(x - 2)\ln x]; \\
 E(x) &= -\frac{x}{8(1-x)^4} [(1-x)(12x^2 - 15x - 5) + 18x(x - 2)\ln x].
 \end{aligned} \tag{10}$$

文献 [4] 中, 作者很好地描述了算符系数从 $\mu = m_w$ 到 $\mu = m_b$ 标度的跑动. 经过重整化群方程演化后, 得到 $\mu = m_b$ 标度 QCD 修正的算符系数为:

$$C_7^{\text{eff}}(m_b) = \eta^{-\frac{16}{23}} \left[C_7(m_w) + \frac{8}{3} \left(\eta^{\frac{2}{23}} - 1 \right) C_8(m_w) \right] + C_2(m_w) \sum_{i=1}^8 h_i \eta^{-a_i}, \quad (11)$$

其中 $\eta = \frac{\alpha_s(m_b)}{\alpha_s(m_w)}$;

$$h_i = \left(\frac{626126}{272277}, -\frac{56281}{51730}, -\frac{3}{7}, -\frac{1}{14}, -0.6494, -0.0380, -0.0186, -0.0057 \right);$$

$$a_i = \left(\frac{14}{23}, \frac{16}{23}, \frac{6}{23}, -\frac{12}{23}, 0.4086, -0.4230, -0.8994, 0.1456 \right).$$

3 结果和讨论

根据文献 [4], 利用旁观者模型,

$$BR(\mathbf{B} \rightarrow X_s \gamma) / BR(\mathbf{B} \rightarrow X_c e \bar{\nu}) \approx \Gamma(\mathbf{b} \rightarrow s \gamma) / \Gamma(\mathbf{b} \rightarrow c e \bar{\nu}). \quad (12)$$

取实验结果^[13], $BR(\mathbf{B} \rightarrow X_c e \bar{\nu}) = 10.8\%$, $\mathbf{B} \rightarrow X_s \gamma$ 的分支比为:

$$BR(\mathbf{B} \rightarrow X_s \gamma) \approx 10.8\% \times \frac{|V_{tb} V_{ts}^*|^2}{|V_{cb}|^2} \cdot \frac{6\alpha_{\text{QED}} |C_7^{\text{eff}}(m_b)|^2}{\pi g(m_c / m_b)} \cdot \left(1 - \frac{2\alpha_s(m_b)}{3\pi} f(m_c / m_b) \right)^{-1}, \quad (13)$$

其中相因子 $g(x)$ 为:

$$g(x) = 1 - 8x^2 + 8x^6 - x^8 - 24x^4 \ln x. \quad (14)$$

单圈 QCD 对半轻衰变的修正因子 $f(m_c / m_b)$ 为:

$$f(m_c / m_b) = (\pi^2 - 31/4)(1 - m_c^2 / m_b^2) + 3/2. \quad (15)$$

数值计算中, 取 $m_w = 80.22 \text{ GeV}$, $\alpha_s(m_z) = 0.117$, $m_c = 1.5 \text{ GeV}$, $m_b = 4.8 \text{ GeV}$,

$$\frac{|V_{tb} V_{ts}^*|}{|V_{cb}|^2} = 0.95^{[13]}.$$

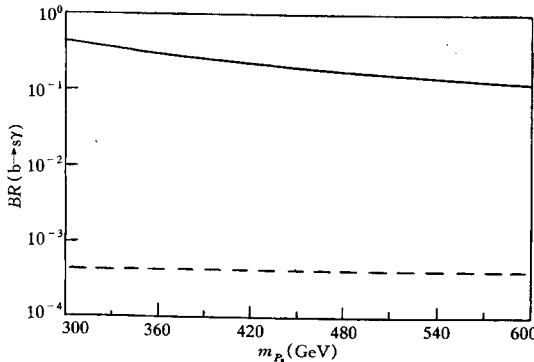


图 2 MWTCM 中的 $BR(\mathbf{b} \rightarrow s \gamma)$ 对 m_{p_s} 的函数曲线
— $m_t = 174 \text{ GeV}$, $m_{p_s} = 100 \text{ GeV}$; — CLEO 实验上限.

图 2 是 $BR(\mathbf{B} \rightarrow X_s \gamma)$ 对 m_{p_s} 的函数曲线 (取 $m_t = 174 \text{ GeV}$, $m_{p_s} = 100 \text{ GeV}$). 其中长破折线代表最新 CLEO 上限. 从图 2 可以看出, MWTCM 中带电 PGB 的贡献的确太大. 鉴此, 引入 Topcolor. 其动机如下: 原始的 MWTCM 很难产生大的 top 夸克质量^[14], 甚至强的 ETC 也不能产生如此大的质量^[15]. 因此, 在大约 1 TeV 的能量标度似乎需要在第三代夸克中

起作用的 Topcolor 相互作用^[16], 在 Topcolor assisted MWTCM 中, Topcolor 被看作是普通的渐近自由的规范理论. 为避免出现大的味改变中性流问题^[17], Technicolor 仍应为 Walking 理论. 电弱对称破缺主要由 Technicolor 相互作用导致 (Technicolor 在接近 1TeV 标度时变强). ETC 相互作用对所有的夸克和轻子都有贡献, 大的 top 夸克质量主要由 Topcolor 产生. top 夸克质量中的 ETC 产生部分为: $m_t' = 66K$. 其中 K 取 $1 - 10^{-1}$ ^[17]. 本文取 $m_t' = 15\text{GeV}$ 和 20GeV 作为输入参数. (即在上面的计算中, $m_t = 174\text{GeV}$ 分别换成 $m_t' = 15\text{GeV}$ 和 20GeV , 其它的参数和计算同原始 MWTCM 一样). Topcolor assisted MWTCM 中的 $BR(b \rightarrow s\gamma)$ 由图 3 所示. 从图 3 可以看出, 对于一定的参数空间, $BR(b \rightarrow s\gamma)$ 同 CLEO 实验数据一致.

在本文的计算中, 没有考虑其它不确定因素的影响: 像 $\alpha_s(m_Z)$ 的不确定性, QCD 的次领头阶对数贡献^[18], m_t 到 m_W 的 QCD 修正^[19], 等等. 加上这些不确定因素的影响将减轻对模型的限制.

参 考 文 献

- [1] R. Ammar *et al.*, CLEO Collaboration, *Phys. Rev. Lett.*, **71**(1993)674.
- [2] M.S. Alam *et al.*, CLEO Collaboration, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995)2885.
- [3] J.L. Hewett, SLAC Report No. SLAC-PUB-6521, 1994(unpublished).
- [4] M. Misiak, *Phys. Lett.*, **B269**(1991)161; K. Adel, Y.P. Yao, *Phys. Rev.*, **D49**(1994)4945; M. Ciuchini *et al.*, *Phys. Lett.*, **B316**(1993)127.
- [5] S. Weinberg, *Phys. Rev.*, **D19**(1979)1277; L. Susskind, *Phys. Rev.*, **20**(1979)2619.
- [6] S. Dimopoulos, L. Susskind, *Nucl. Phys.*, **B155**(1979)237; E. Eichten, K. Lane, *Phys. Lett.*, **B90**(1980)125.
- [7] T. Appelquist, D. Karabali L. C. R. Wijewardhana, *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986)957.
- [8] T. Appelquist, J. Terning, *Phys. Lett.*, **B315**(1993)139.
- [9] K. Lane, M. V. Ramana, *Phys. Rev.*, **D44**(1991)2678.
- [10] E. Eichten, K. Lane, *Phys. Lett.*, **B327**(1994)129.
- [11] J. F. Gunion, H. E. Haber, *Nucl. Phys.*, **B278**(1986)449.
- [12] H.D. Politzer, *Nucl. Phys.*, **B172**(1980)349.
- [13] Particle Data Group, *Phys. Rev.*, **D50**(1994)1173.
- [14] CDF collaboration, F. Abe *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995)2626; D0 Collaboration, S. Abachi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995)2632.
- [15] T. Appelquist, M. B. Einhorn, T. Takeuchi *et al.*, *Phys. Lett.*, **B220**(1989)223.
- [16] C. T. Hill, *Phys. Lett.*, **B266**(1991)419.
- [17] C. T. Hill, *Phys. Lett.*, **B345**(1995)483.

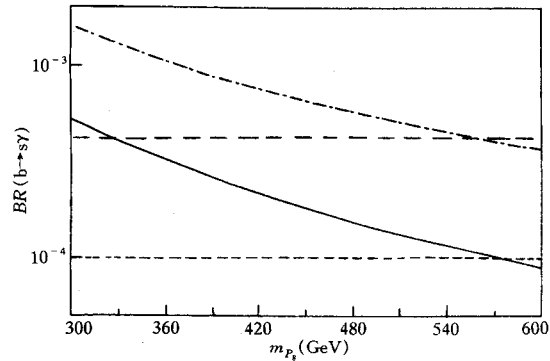


图 3 Topcolor assisted MWTCM 中的 $BR(b \rightarrow s\gamma)$ 对 m_{p_s} 的函数曲线 (取 $m_{p_s} = 100\text{GeV}$)
 — $m_t = 15\text{GeV}$ 时的函数曲线; - - - 和 - - - 分别对应 CLEO 实验的上、下限; - · - · $m_t = 20\text{GeV}$ 时的函数曲线.

- [18] M. Ciuchini *et al.*, *Phys. Lett.*, **B301**(1993)263; *Nucl. Phys.*, **B415**(1994)403.
[19] C. S. Gao, J. L. Hu, C. D. Lü *et al.*, *Phys. Rev.*, **D52**(1995)3978.

Study on the Decay $b \rightarrow s\gamma$ in the Multiscale Walking Technicolor Model

Lu Gongru Cao Yigang Xiong Zhaohua Xiao Zhenjun

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

Received 9 December 1996

Abstract

We investigate the correction to the branching ratio of decay $b \rightarrow s\gamma$ from the Pseudo-Goldstone bosons (PGBs) in the multiscale walking technicolor model (MWTCM). The correction is found so large that we can not explain the recent CLEO data. If topcolor is further introduced, the branching ratio in the topcolor assisted MWTCM will be in agreement with the CLEO data for a certain range of the model-allowed parameter space.

Key words MWTCM, branching ratio, Topcolor assisted MWTCM.