

TOPCMTC 模型中 PGBs 对 top 夸克 稀有衰变的贡献*

鲁公儒¹ 潘群娜² 黄金书^{1,2} 岳崇兴¹

1(河南师范大学物理系 新乡 453002)

2(河南南阳师范专科学校 南阳 473061)

摘要 计算了 top 人工色援助的多标度人工色模型下 top 夸克稀有衰变 $t \rightarrow cV$ ($V = Z, \gamma, g$) 的单圈过程. 发现在这个模型下, 扩展的人工色相互作用对这些衰变提供主要的贡献, 总的贡献能够把它们在标准模型下的分支比提高大约 5—6 个量级, 对于一般的参数值, 这些的结果分别是: $B(t \rightarrow cZ) \sim 10^{-6}$, $B(t \rightarrow c\gamma) \sim 10^{-7}$, $B(t \rightarrow cg) \sim 10^{-5}$.

关键词 TOPCMTC 模型 赝标哥尔斯通玻色子 稀有衰变

1 引言

随着 top 夸克的发现^[1], 对它的产生和衰变在理论和实践中的研究吸引了人们浓厚的兴趣, 这其中也包括对味改变相互作用诱导的 top 夸克稀有衰变 $t \rightarrow cV$ ($V = Z, \gamma, g$) 的研究. 在标准模型中^[2,3], 由于 top 夸克的稀有衰变很弱探测 top 夸克稀有衰变成为检验新物理效果的一个极好的试探器, 双 Higgs 二重态模型 (2HDM) 和超对称量子色动力学 (SUSY QCD) 中的带电的 Higgs 玻色子^[3,4], 最小超对称标准模型 (MSSM) 中的电荷耦^[5], 一代人工色 (OGTC) 模型中赝标哥尔斯通玻色子 (PGBs)^[6], 它们的贡献都能提高 $t \rightarrow cV$ 在标准模型下分支比大约 3—4 个量级.

top 人工色援助的多标度人工色 (TOPCMTC) 理论^[7] 在能量标度 $\Lambda \sim 1\text{TeV}$ 下是一个没有基本标量粒子的理论. 它预言了在 1TeV 以下有大量的 PGBs 的存在, 这些 PGBs 包括 techni 介子和 top 介子. 在这个模型中, 扩展的人工色 (ETC) 相互作用对所有的夸克和轻子的质量都有贡献, 而 top 夸克的质量主要由 top 人工色相互作用产生; 弱电对称性破缺则主要由 ETC 相互作用来执行. 对于 top 夸克的质量, ETC 相互作用对它的贡献 (标记为 m_t) 不到 top 夸克总质量的十分之一, $m_t = \epsilon m_t$ ($\epsilon = 0.03, 0.1$), 通常取为 $5\text{GeV} \leq m_t \leq 20\text{GeV}$, 而 top

1998-02-26收稿

* 国家自然科学基金和河南省自然科学基金资助

人工色相互作用的贡献(标记为 m_{t_2} , $m_{t_2} = m_t - m_{t'}$), 通常取为 $m_{t_2} \geq 150\text{GeV}$. 稀有衰变 $t \rightarrow cV$ ($V = Z, \gamma, g$) (Z, γ, g 分别表示 Z 玻色子, 光子和胶子) 能通过相互作用 $u_i \bar{d}_j (P^+, P_{8a}^+)$ (P^+, P_{8a}^+ 分别表示色单态和色八重态的 techni 介子) 和相互作用 $t \bar{t} (\pi^+)$ (π^+ 表示 top 介子) 被虚的 PGBs 所诱导. 一般认为, 这些相互作用与由它们产生的费米子质量的相应部分成正比, 它们比一般的 Higgs 粒子的作用要强许多. 因此对于相当重的 top 夸克来说, $t \rightarrow cV$ 在这个模型下的量级应该会有明显的加强, 这为在实验上探测这些稀有衰变提供一个可能的机会.

本文将给出在 TOPCMTC 模型下 techni 介子和 top 介子对 top 夸克稀有衰变贡献的计算. 在几种人工色理论当中, 每一种模型都有它自己的特点, 初期的人工色 (TC) 理论^[9] 提出对于弱电对称性自发破缺是一个激动人心的设想, 它给出了弱玻色子的质量. 进一步提出的 ETC 理论^[8] 为普通轻子和夸克的质量的产生提供了可能, 但是这个原始的 ETC 被太大的味改变的中性流所困扰, 而这个问题在走动的人工色 (WTC)^[10] 中得到了解决. 在 WTC 模型中, 弱电参数 S 比在 ETC 模型下要小许多, 它与其实验值的误差在实验允许的范围之内. 为了解释夸克质量的等级问题, 多标度的 WTC (MWTC) 模型被进一步的假定^[11]. 但是即使是在这个模型下, 也无法产生 Fermilab Tevatron 测得的那么大的 top 夸克的质量^[1], 同时由于这个模型的衰变常数 F_Q 较小, 它对 $Z \rightarrow b\bar{b}$ 的分支比 R_b 产生了比 LEP 实验记录大得多的修正. 对于上面提到的 TOPCMTC 模型, 它把 top 人工色相互作用引入 MWTC, 使其衰变常数仍保持较小的数值, $F_T = 50\text{GeV}$, 同时认为 top 夸克的质量主要由 top 人工色相互作用产生, 这样 TOPCMTC 理论对于它所遇到的问题就能给出比较理想的解释. 因此, 我们愿意在这个模型下来讨论 top 夸克的稀有衰变.

2 TOPCMTC 模型中 PGBs 对 $t \rightarrow cV$ 贡献的计算

由上所述, TOPCMTC 理论预言的大量 PGBs 包括 techni 介子和 top 介子, 它们都对衰变 $t \rightarrow cV$ 有贡献, 下面将分别予以讨论.

首先考虑 techni 介子的贡献. 在 techni 介子中, 只有色单态和色八重态的 techni 介子对这些衰变有贡献, 我们将只考虑它们而不计其它.

图 1 给出了所考虑的 techni 介子贡献的费曼图, 参考文献 [12, 13] 给出了计算中所用到的费曼规则, 列出如下:

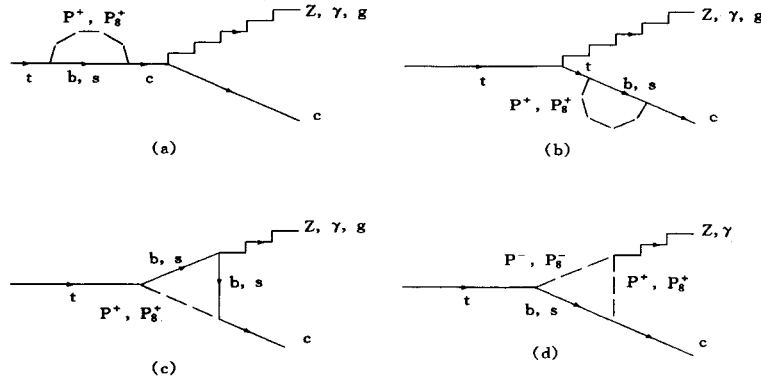
$$[Z - q - \bar{q}] = ie\gamma^\mu (v_t - a_t\gamma_5), \quad (1)$$

$$[\gamma - q - \bar{q}] = ieQ_t\gamma^\mu, \quad (2)$$

$$[g - q - \bar{q}] = -ig_s\gamma^\mu T^a, \quad (3)$$

$$[P^+ - u_i - d_j] = -\frac{3V_{u_i d_j}}{\sqrt{6}F_T} [m_{u_i}(1 - \gamma_5) - m_{d_j}(1 + \gamma_5)], \quad (4)$$

$$[P_{8a}^+ - u_i - d_j] = -\frac{3V_{u_i d_j}}{F_T} \lambda_a [m_{u_i}(1 - \gamma_5) - m_{d_j}(1 + \gamma_5)], \quad (5)$$

图1 techni介子对 $t \rightarrow cV$ 单圈贡献的费曼图

图中的虚线表示techni介子内线.

$$[Z - P^+ - P^-] = i \frac{1 - 2s_w^2}{2s_w c_w} e(p_1 - p_2)^\mu, \quad (6)$$

$$[Z - P_{8a}^+ - P_{8b}^-] = i \frac{1 - 2s_w^2}{2s_w c_w} e(p_1 - p_2)^\mu \delta_{ab}, \quad (7)$$

$$[\gamma - P^+ - P^-] = ie(p_1 - p_2)^\mu, \quad (8)$$

$$[\gamma - P_{8a}^+ - P_{8a}^-] = ie(p_1 - p_2)^\mu \delta_{ab}. \quad (9)$$

其中, λ_a 表示盖尔曼 $SU(3)$ 矩阵, $V_{u,d}$ 是 CKM 矩阵元, 矢量耦合常数 a_f 和轴矢量耦合常数 v_f 被记作 $a_f = I_3^f / 2s_w c_w$, $v_f = (I_3^f - 2Q_f s_w^2) / 2s_w c_w$, 对于 u 型夸克来说, $I_3^f = \frac{1}{2}$, $Q_f = \frac{2}{3}$, 对于 d 型夸克来说, $I_3^f = -\frac{1}{2}$, $Q_f = -\frac{1}{3}$.

对于色八重态 techni 介子的贡献, 写出它的有效顶角 tcZ , $tc\gamma$ 和 tcg 的形式为:

$$V^\mu(tcZ) = ie[F_{Z1}\gamma^\mu L + F_{Z2}\gamma^\mu R + F_{Z3}p_t^\mu L + F_{Z4}p_t^\mu R + F_{Z5}p_c^\mu L + F_{Z6}p_c^\mu R], \quad (10)$$

$$V^\mu(tc\gamma) = ie[F_{\gamma 1}\gamma^\mu L + F_{\gamma 2}\gamma^\mu R + F_{\gamma 3}p_t^\mu L + F_{\gamma 4}p_t^\mu R + F_{\gamma 5}p_c^\mu L + F_{\gamma 6}p_c^\mu R], \quad (11)$$

$$V^\mu(tcg) = ie[F_{g1}\gamma^\mu L + F_{g2}\gamma^\mu R + F_{g3}p_t^\mu L + F_{g4}p_t^\mu R + F_{g5}p_c^\mu L + F_{g6}p_c^\mu R]. \quad (12)$$

这里 $L, R = \frac{1}{2}(1 \mp \gamma_5)$ 是左右手算符. 形式因子 $F_{(V)_i} = \Sigma_{\xi=b, s} F_{(V)_i}(\xi)$, $F_{(V)_i}(b)$ 和 $F_{(V)_i}(s)$ 分别表示虚的 b 夸克和 s 夸克的贡献. 由于 $V_{ud}^* V_{cd}$ 的压制, 忽略虚的 d 夸克的贡献. 计算中采用费曼规则、维数正规化和质壳重整化方案^[14, 15]. 形式因子 $F_{(V)_i}(\xi)$ 是运用标准函数 B_0, B_1, C_0, C_j 来表示的, 参考文献 [16] 给出了标准基本函数的具体形式. 这些形式因子的具体表达式写出如下:

$$F_{V1}(\xi) = \frac{27V_{t\zeta}^* V_{c\zeta}}{4\pi^2 F_T^2} \{k_2^V [m_\zeta^2 B_0(m_\zeta, m_\xi, m_p) + (m_\xi^2 + m_c^2) B_1(m_\zeta, m_\xi, m_p)] -$$

$$m_\xi^2 B_0(m_c, m_\xi, m_p) - m_c^2 B_1(m_c, m_\xi, m_p)] - k_4^V m_t^2 [(m_c^2 - m_\xi^2) C_0 + m_c^2 C_{11} - m_\xi^2 C_{12}] - k_3^V m_\xi^2 [-B_0(m_v, m_\xi, m_\xi) + 2C_{24} - m_p^2 C_0] + 2k_5^V m_\xi^2 C_{24}^* \}, \quad (13)$$

$$F_{V_2}(\xi) = \frac{27V_\xi^* V_{c\xi}}{4\pi^2 F_T^2} m_t m_c \{k_1^V B_1(m_t, m_\xi, m_p) - k_4^V [2C_{24} - B_0(m_v, m_\xi, m_\xi) - m_p^2 C_0 - m_t^2 C_{12}] + 2k_5^V C_{24}^* \}, \quad (14)$$

$$F_{V_3}(\xi) = -\frac{27V_\xi^* V_{c\xi}}{2\pi^2 F_T^2} m_c \{k_3^V m_\xi^2 (C_{23} - C_{22}) + k_4^V [m_t^2 (C_{12} + C_{22}) - m_\xi^2 C_{12}] - \frac{1}{2} k_5^V [m_t^2 (2C_{22}^* + C_{12}^*) + m_\xi^2 (C_0^* + C_{11}^* + C_{12}^* - C_{22}^* - 2C_{23}^*)]\}, \quad (15)$$

$$F_{V_4}(\xi) = -\frac{27V_\xi^* V_{c\xi}}{2\pi^2 F_T^2} m_t \{k_3^V m_\xi^2 C_{22} + k_4^V m_c^2 (C_{23} - C_{22}) - \frac{1}{2} k_5^V [m_\xi^2 (C_0^* + 3C_{12}^* + 2C_{22}^*) + m_c^2 (C_{11}^* - C_{12}^* - 2C_{22}^* + 2C_{23}^*)]\}, \quad (16)$$

$$F_{V_5}(\xi) = -\frac{27V_\xi^* V_{c\xi}}{2\pi^2 F_T^2} m_c \{k_3^V m_\xi^2 (C_{21} + C_{22} - 2C_{23}) + k_4^V m_t^2 (C_{23} - C_{22}) + \frac{1}{2} k_5^V [m_t^2 (2C_{22}^* - C_{12}^* - 2C_{23}^*) - m_\xi^2 (C_0^* + 3C_{11}^* - 3C_{12}^* + 2C_{21}^* + 2C_{22}^* - 4C_{23}^*)]\}, \quad (17)$$

$$F_{V_6}(\xi) = -\frac{27V_\xi^* V_{c\xi}}{2\pi^2 F_T^2} m_t \{k_4^V [m_\xi^2 (C_{12} - C_{11}) + m_c^2 (C_{11} - C_{12} + C_{21} + C_{22} - 2C_{23})] + k_3^V m_\xi^2 (C_{23} - C_{22}) - \frac{1}{2} k_5^V [m_\xi^2 (C_0^* + 2C_{11}^* - C_{12}^* - 2C_{22}^* + 2C_{23}^*) + m_c^2 (C_{11}^* - C_{12}^* + 2C_{21}^* + 2C_{22}^* - 4C_{23}^*)]\}, \quad (18)$$

其中,

$$\begin{pmatrix} k_1^Z & k_1^Y & k_1^S \\ k_2^Z & k_2^Y & k_2^S \\ k_3^Z & k_3^Y & k_3^S \\ k_4^Z & k_4^Y & k_4^S \\ k_5^Z & k_5^Y & k_5^S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-\frac{4}{3} s_w^2}{2s_w c_w} & 2/3 & -1 \\ \frac{1 - \frac{4}{3} s_w^2}{2s_w c_w} & 2/3 & -1 \\ \frac{\frac{2}{3} s_w^2}{2s_w c_w} & -1/3 & -1 \\ \frac{-1 + \frac{2}{3} s_w^2}{2s_w c_w} & -1/3 & -1 \\ \frac{1 - 2s_w^2}{2s_w c_w} & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

这里, $C_{ij} = C_{ij}(m_c, m_v, m_p, m_\xi, m_\zeta)$, $C_{ij}^* = C_{ij}(m_c, m_v, m_\xi, m_p, m_p)$; $\xi = b, s$; $V = Z, \gamma, g$; m_ξ 表示 m_{b1} 和 m_s ; m_v 分别表示 Z, γ 和 g 的质量. 容易发现, 这些有效顶角中的紫外发散是可以抵消的.

因此, 色八重态的 techni 介子对 $t \rightarrow cV$ 贡献的衰变宽度写出为:

$$\begin{aligned} \Gamma(t \rightarrow cZ) = & \frac{\alpha_c}{4m_t^3} (m_t^2 - m_Z^2) \{ (m_t^2 - m_Z^2) \left[F_{Z1}^2 + F_{Z2}^2 - m_t \left(F_{Z1}F_{Z4} + F_{Z2}F_{Z3} + \frac{1}{2} m_t F_{Z3}^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{1}{2} m_t F_{Z4}^2 \right) - m_c \left(F_{Z1}F_{Z5} + F_{Z2}F_{Z6} + m_t F_{Z3}F_{Z6} + m_t F_{Z4}F_{Z5} + \frac{1}{2} m_c F_{Z5}^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{1}{2} m_c F_{Z6}^2 \right) - \frac{1}{2} (m_t^2 - m_Z^2) (F_{Z4}F_{Z6} + F_{Z3}F_{Z5}) \right] - 2m_t m_c^2 (F_{Z1}F_{Z6} + F_{Z2}F_{Z5} + \\ & m_c F_{Z5}F_{Z6}) - 2m_c m_t^2 (F_{Z1}F_{Z3} + F_{Z2}F_{Z4} + m_t F_{Z3}F_{Z4}) + \frac{1}{2m_Z^2} [m_c(m_t^2 + m_Z^2)^2 \\ & (F_{Z1}F_{Z3} + F_{Z2}F_{Z4} + m_t F_{Z3}F_{Z4}) + m_c(m_t^2 - m_Z^2)^2 (F_{Z1}F_{Z6} + F_{Z2}F_{Z5} + \\ & m_c F_{Z5}F_{Z6}) + (m_t^4 - m_Z^4)(m_t F_{Z1}F_{Z4} + m_t F_{Z2}F_{Z3} + m_c F_{Z1}F_{Z5} + m_c F_{Z2}F_{Z6} + \\ & m_c m_t F_{Z3}F_{Z6} + m_c m_t F_{Z4}F_{Z5}) + \frac{1}{4} (m_t^2 + m_Z^2)^2 (m_t^2 - m_Z^2) (F_{Z3}^2 + F_{Z4}^2) + \\ & \left. \frac{1}{4} (m_t^2 - m_Z^2)^3 (F_{Z5}^2 + F_{Z6}^2) + \frac{1}{2} (m_t^2 + m_Z^2) (m_t^2 - m_Z^2)^2 (F_{Z3}F_{Z5} + F_{Z4}F_{Z6}) \right] \}, \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Gamma(t \rightarrow c\gamma) = & \frac{\alpha_c}{8} \{ m_t [2F_{\gamma 1}^2 + 2F_{\gamma 2}^2 - 2m_t (F_{\gamma 1}F_{\gamma 4} + F_{\gamma 2}F_{\gamma 3}) - m_t^2 (F_{\gamma 4}F_{\gamma 6} + F_{\gamma 3}F_{\gamma 5} + F_{\gamma 3}^2 + \\ & F_{\gamma 4}^2) - m_c^2 (F_{\gamma 5}^2 + F_{\gamma 6}^2)] + 2m_c [m_t^2 (2F_{\gamma 3}F_{\gamma 4} - F_{\gamma 3}F_{\gamma 6} - F_{\gamma 4}F_{\gamma 5}) - \\ & 2m_c^2 (F_{\gamma 1}F_{\gamma 6} + F_{\gamma 2}F_{\gamma 5} + F_{\gamma 5}F_{\gamma 6}) - 2m_t (F_{\gamma 1}F_{\gamma 3} + F_{\gamma 2}F_{\gamma 4} + F_{\gamma 1}F_{\gamma 5} + \\ & F_{\gamma 2}F_{\gamma 6}) - 2F_{\gamma 1}F_{\gamma 2}] \}, \quad (21) \end{aligned}$$

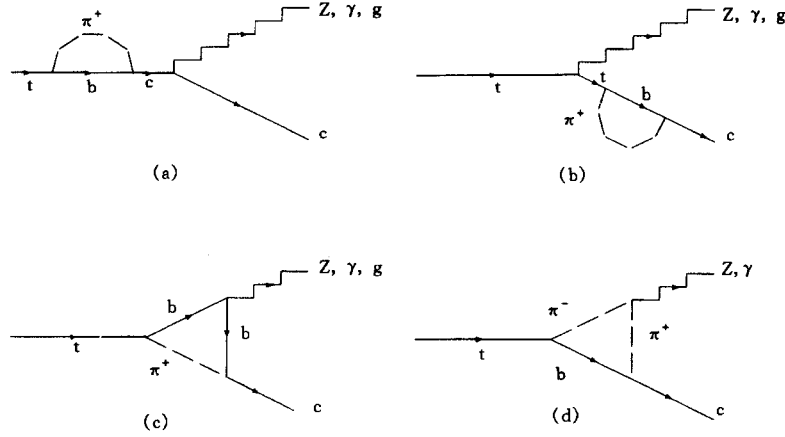
$$\begin{aligned} \Gamma(t \rightarrow cg) = & \frac{\alpha_s}{6} \{ m_t [2F_{g1}^2 + 2F_{g2}^2 - 2m_t (F_{g1}F_{g4} + F_{g2}F_{g3}) - m_t^2 (F_{g4}F_{g6} + F_{g3}F_{g5} + F_{g3}^2 + \\ & F_{g4}^2) - m_c^2 (F_{g5}^2 + F_{g6}^2)] + 2m_c [m_t^2 (2F_{g3}F_{g4} - F_{g3}F_{g6} - F_{g4}F_{g5}) - 2m_c^2 (F_{g1}F_{g6} + \\ & F_{g2}F_{g5} + F_{g5}F_{g6}) - 2m_t (F_{g1}F_{g3} + F_{g2}F_{g4} + F_{g1}F_{g5} + F_{g2}F_{g6}) - 2F_{g1}F_{g2}] \}. \quad (22) \end{aligned}$$

这里, m_t 表示 top 夸克质量中被 ETC 相互作用产生的那一部分, 即相当于 m_t .

对于色单重态的 techni 介子对 $t \rightarrow cV$ 的贡献, 由于在形式因子 $F_{(v)i}$ 中它比色八重态的少了一个 18 倍的相乘因子, 它的贡献至少比色八重态的低 2 个量级, 因此在计算中忽略色单重态的贡献.

下面, 讨论 top 介子对 $t \rightarrow cV$ 的贡献. 图 2 给出了所考虑的 top 介子贡献的费曼图, 所使用的费曼规则文献 [7, 13] 中给出, 列出如下:

$$[\pi^+ - t - \bar{b}] = \frac{m_t - m_t}{2F_T} (1 + \gamma_s), \quad (23)$$

图2 top介子对 $t \rightarrow cV$ 单圈贡献的费曼图

图中的虚线表示top介子内线.

$$[\pi^+ - b - \bar{c}] = \frac{m_t}{2F_T} (1 - \gamma_5) U_{Rc}^*, \quad (24)$$

$$[Z - \pi^+ - \pi^-] = i \frac{1 - 2s_w^2}{2s_w c_w} e(p_1 - p_2)^\mu, \quad (25)$$

$$[\gamma - \pi^+ - \pi^-] = ie(p_1 - p_2)^\mu. \quad (26)$$

一些与前面相同的不再列出. 通过计算得到有效顶角形式与公式(10)–(12)一致, 为便于区别将它们分别表示为 $V^\mu(tcZ)$, $V^\mu(tc\gamma)$ 和 $V^\mu(tcg)$. 仍然采用费曼规则、维数正规化和质壳重整化方案, 它们的形式因子 $F'_{(V)_i}$ 的具体表示为:

$$F'_{V1} = \frac{U_{Rc}^*}{16\pi^2 F_T^2} [k_2^Y m_c m_{t2} (B_1(m_c, m_{b2}, m_\pi) - B_1(m_{t2}, m_{b2}, m_\pi)) + k_4^Y m_c m_{t2}^3 (C_0 + C_{11})], \quad (27)$$

$$F'_{V2} = \frac{U_{Rc}^*}{16\pi^2 F_T^2} [-k_1^Y m_{t2}^2 B_1(m_{t2}, m_{b2}, m_\pi) + k_3^Y m_{b2} m_{t2}^2 C_0 - k_4^Y m_{t2}^2 (m_c^2 C_{11} + m_{t2}^2 C_{12} + B_0(m_\nu, m_{b2}, m_{b2}) + m_\pi^2 C_0 - 2C_{24}) - 2k_5^Y m_{t2}^2 C_{24}^*], \quad (28)$$

$$F'_{V3} = \frac{U_{Rc}^* m_{t2}^3}{8\pi^2 F_T^2} [k_4^Y (C_{12} + C_{22}) - k_5^Y (C_{12}^* + C_{22}^*)], \quad (29)$$

$$F'_{V4} = \frac{U_{Rc}^* m_c m_{t2}^2}{8\pi^2 F_T^2} [k_4^Y (C_{23} - C_{22}) + \frac{1}{2} k_5^Y (C_{12}^* - C_{11}^* + 2C_{22}^* - 2C_{23}^*)], \quad (30)$$

$$F'_{V5} = \frac{U_{Rc}^* m_{t2}^3}{8\pi^2 F_T^2} [k_4^Y (C_{23} - C_{22}) + \frac{1}{2} k_5^Y (2C_{22}^* - C_{23}^* - C_{12}^*)], \quad (31)$$

$$F'_{V6} = \frac{U_{Rc}^* m_c m_{t2}^2}{8\pi^2 F_T^2} [k_4^Y (C_{11} - C_{12} + C_{21} + C_{22} - C_{23}) + \frac{1}{2} k_5^Y (C_{12}^* - C_{11}^* - 2C_{21}^* - 2C_{22}^* + 4C_{23}^*)]. \quad (32)$$

这里 k_i^Y 的取值与公式(19)一致; $C_{ij} = C_{ij}(m_c, m_\nu, m_\pi, m_{b2}, m_{b2})$, $C_{ij}^* = C_{ij}^*(m_c, m_\nu, m_{b2})$,

m_π, m_π). 可以发现, 这些有效顶角中的紫外发散也是可以抵消的.

由 top 介子引起的衰变宽度的表达式与公式 (20)–(22) 一致, 分别记为 $\Gamma'(t \rightarrow cZ)$, $\Gamma'(t \rightarrow c\gamma)$ 和 $\Gamma'(t \rightarrow cg)$. 自然这时 m_t 表示 t 夸克的被 top 人工色相互作用产生的那一部分质量, 即 m_t 表示 m_{t_2} .

3 计算说明与数值结果

采用的分支比 $B(t \rightarrow cV)$ 定义为^[3]:

$$B(t \rightarrow cV) = \Gamma(t \rightarrow cV) / \Gamma(t \rightarrow W^+ b). \quad (33)$$

与前面的计算相对应, 也分别给出 techni 介子和 top 介子贡献的数值结果.

对于 techni 介子的贡献, 先对所用到的参数做些说明. 取 $F_T = 50\text{GeV}^{[6]}$, $V_{tb} = V_{cs} = 1$, $V_{cb} = V_{ts} = 0.06^{[17]}$, $m_c = 1.5\text{GeV}$, $m_s = 0.18\text{GeV}$, $m_Z = 91.187\text{GeV}$, $m_W = 80.33\text{GeV}$, $s_w^2 = 0.23$, $G_F = 1.16639 \times 10^{-5} (\text{GeV})^{-2}$, $\alpha_e = 1/128.8$, $\alpha_s = 1.4675 / \ln(m_t^2 / \Lambda_{\text{QCD}}^2)$ 相应地取 $\Lambda_{\text{QCD}} = 180\text{MeV}$. 在 TOPCMTC 理论中^[7], 第一代和第二代夸克的质量都有 ETC 相互作用来产生, 由于产生 ξ_U 和 ξ_D 的机制之间有差别^[18], 从而导致 c 夸克和 s 夸克的质量不同, 参照文献 [19] 有 $m_t = (m_c/m_s)m_{t_b}$, 这里 m_t 和 m_{t_b} 分别表示 ETC 相互作用产生的 t 夸克和 b 夸克的质量. 对于 $m_s = 0.18\text{GeV}$, $m_c = 1.5\text{GeV}$, 有 $m_t \simeq 10m_{t_b}$. 如果取 $m_t = 17.5\text{GeV}$ ($\varepsilon = 0.1$), 则有 $m_{t_b} = 1.75\text{GeV}$. 色八重态的 techni 介子的质量理论上给出为 $m_{p_8} = 246\sqrt{4/N_{\text{TC}}}\text{GeV}$, 当 $N_{\text{TC}} = 4$ 时有 $m_{p_8} = 246\text{GeV}$. 由于忽略了色单态的 techni 介子的贡献, 选择 m_t 作为自由参数: $5\text{GeV} \leq m_{t_1} \leq 20\text{GeV}$.

图 3 中画出了分支比 $B(t \rightarrow cV)$ 随参数 m_t 的变化曲线, 这时取 $m_{t_b} = 0.1m_t$, $m_{p_8} = 246\text{GeV}$. 从这个图中可以看出: (a) 所有的分支比都随着 m_t 的增长比较快地下降; (b) 这些分支比的量级分别为:

$$B(t \rightarrow cZ) \sim 10^{-6}, \quad B(t \rightarrow c\gamma) \sim 10^{-7}, \quad B(t \rightarrow cg) \sim 10^{-5}. \quad (34)$$

对于 top 介子的贡献, 所用到的参数 $m_c, m_Z, m_W, s_w^2, G_F, \alpha_e$ 和 α_s 与上面的取值一致. 取

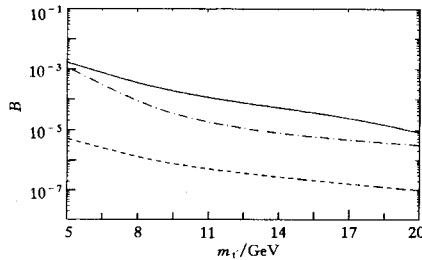


图 3 $B(t \rightarrow cV)$ 随变量 m_t 的变化曲线
 $m_{t_b} = 0.1m_t$, $m_{p_8} = 246\text{GeV}$. 其中—— $t \rightarrow cZ$,
--- $t \rightarrow c\gamma$, - $t \rightarrow cg$.

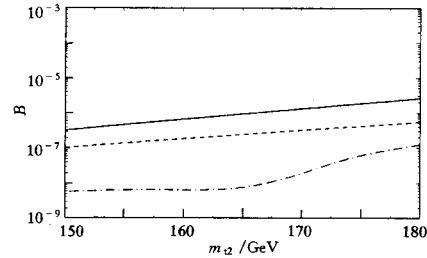


图 4 $m_\pi = 220\text{GeV}$ 时 $B(t \rightarrow cV)$ 随变
量 m_{t_2} 的变化曲线
其中—— $t \rightarrow cZ$, --- $t \rightarrow c\gamma$, - $t \rightarrow cg$.

$U_{\text{Rtc}}^* = 0.06$, $m_{b_2} = 6.6\text{GeV}^{[7]}$ (这里, m_{b_2} 表示被 top 人工色相互作用产生的 b 夸克的质量). 被 top 人工色相互作用产生的 top 夸克的质量 m_{t_2} 取为 $m_{t_2} = (150, 180)\text{GeV}$. top 介子的质量被预言为 $m_\pi = (180, 240)\text{GeV}^{[6]}$. 取 m_{t_2} 作为自由参数.

图 4 画出的是在 $m_\pi = 220\text{GeV}$ 时 $B(t \rightarrow cV)$ 随 m_{c_2} 的变化曲线. 可以看出 (a) 所有的分支比都随着 m_{c_2} 的增长而增长, 其中 $B(t \rightarrow c\gamma)$ 和 $B(t \rightarrow cg)$ 的增长较缓慢, 而 $B(t \rightarrow cZ)$ 的增长在 m_{c_2} 的开始阶段也比较慢, 但是从 $m_{c_2} = 165\text{GeV}$ 开始迅速地变快; (b) 这些分支比的量级分别是:

$$B(t \rightarrow cZ) \sim 10^{-9} - 10^{-8}, \quad B(t \rightarrow c\gamma) \sim 10^{-7}, \quad B(t \rightarrow cg) \sim 10^{-7} - 10^{-6}. \quad (35)$$

4 讨论与结论

前面分别给出了 TOPCMTC 模型下 techni 介子和 top 介子对 top 夸克稀有衰变的贡献, 然而它们都不是这些稀有衰变物理的结果. 在 TOPCMTC 理论中, techni 介子和 top 介子同时存在同时起作用, 因此对这些衰变物理的结果应当是两者贡献的总和. 在满足 $m_{c_1} + m_{c_2} = m_t$ 的条件下 (m_t 表示 t 夸克的总质量), 写出分支比物理结果的形式为:

$$B_{\text{total}} = B(m_{c_1}) + B(m_{c_2}). \quad (36)$$

根据上面的讨论, 图 5 中画出了总的分支比 $B_{\text{total}}(t \rightarrow cV)$ 随 m_{c_1} ($5-20\text{GeV}$) 的变化曲线, 这里我们取 $m_t = 175\text{GeV}$. $B(m_{c_2}) = B(175\text{GeV} - m_{c_1})$ 的贡献也已被包括. 从这个图中, 可以看出 (a) top 夸克稀有衰变 $t \rightarrow cV$ 分支比的量级分别是:

$$B(t \rightarrow cZ) \sim 10^{-6}, \quad B(t \rightarrow c\gamma) \sim 10^{-7}, \quad B(t \rightarrow cg) \sim 10^{-5}. \quad (37)$$

(b) 特别地, 当 $m_{c_1} = 5\text{GeV}$, $m_{c_2} = 170\text{GeV}$ 时, 分支比 $B(t \rightarrow cZ)$ 和 $B(t \rightarrow cg)$ 均达到 10^{-3} .

基于经验和我们的工作¹⁾, 认为当 $\varepsilon = 0.03$ ($m_{c_1} = \varepsilon m_t$) 时, $B(t \rightarrow cV)$ 的值太大了. 因此考虑给 ε 以限定 $\varepsilon = (0.06, 0.1)$.

通过公式 (34), (35) 和 (37), 比较 ETC 相互作用和 top 人工色相互作用对 $t \rightarrow cV$ 的贡献. (a) 对于 $t \rightarrow cZ$, 前者的贡献占主导地位, 后者的贡献太小了完全可以被忽略; (b) 两者对 $t \rightarrow c\gamma$ 的贡献的量级相同, 它们的数值也是相当的; (c) 对于 $t \rightarrow cg$, 前者是主要的, 而后者要比前者低 1—2 个量级; (d) 总的来说, ETC 相互作用对 $t \rightarrow cV$ 的贡献是主要的.

表 1 中列出了标准模型^[2], 2HDM 和 SUSY QCD 中的带电的 Higgs 玻色子^[2], MSSM 中的电荷耦^[4], OGTC 模型中的 PGBs^[5] 及 TOPCMTC 模型中的 PGBs 对 t 夸克稀有衰变贡献的 (分支比) 量级:

可以看出, TOPCMTC 模型中 PGBs 的贡献将能把这些衰变在标准模型下的分支比提高 5—6 个量级.

欧洲核子研究中心强子对撞机 (CERN LHC) 每年大约能产生 10^7-10^8 对 $t\bar{t}$, 那么

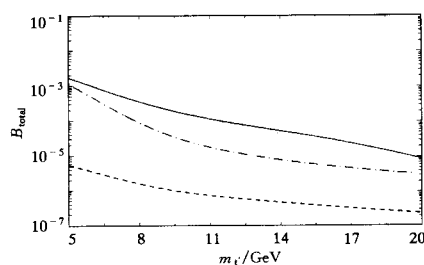


图 5 总的分支比 $B(t \rightarrow cV)$ 随变量 m_{c_1} 的变化曲线

$m_{p_1} = 246\text{GeV}$, $m_\pi = 220\text{GeV}$, $m_{b_2} = 6.6\text{GeV}$,
 $m_{c_2} = 175\text{GeV} - m_{c_1}$ 以及 $m_{c_1} = 0.1m_t$,
 其中——— $t \rightarrow cZ$, --- $t \rightarrow c\gamma$, - $t \rightarrow cg$.

1) 在 Constraints on multiscale walking technicolor models from radiative decays of B meson 一文中, 我们给出对 ε 的限制为 $\varepsilon = (0.06, 0.1)$, 该文已投往 Physical Review D

表 1

	SM	2HDM	SUSY QCD	MSSM	OGTC	TOPCMTC
$B(t \rightarrow cZ)$	10^{-12}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}
$B(t \rightarrow c\gamma)$	10^{-12}	10^{-8}	10^{-8}	10^{-8}	10^{-8}	10^{-7}
$B(t \rightarrow cg)$	10^{-10}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}

$t \rightarrow cZ$ 和 $t \rightarrow c\gamma$ 是不能被探测到的,然而 $t \rightarrow cg$ 的分支比能够达到 10^{-5} ,这意味着在 CERN LHC 上能够产生数十个 $t \rightarrow cg$ 的衰变.当然在观察这个衰变之前,必须找到一种方法,使它的信息能够从相当强的辐射背景中分离出来.原则上说,高能 e^+e^- 碰撞机能够做到这一点, top 夸克已经清晰地从 top 半轻子衰变中被分离出来了,因此 $t \rightarrow cg$ 能够被探测到的可能性是存在的.

作为结论,我们计算了 TOPCMTC 模型下 PGBs 对 top 夸克稀有衰变的单圈贡献.发现在这个模型下,ETC 对这些衰变提供主要的贡献,总的贡献能够把它们在标准模型下的分支比提高大约 5—6 个量级.能够产生数十个 top 夸克的稀有衰变对计划中的高能加速器探测这些稀有衰变进而检验 TOPCMTC 理论有很大的吸引力.

参 考 文 献

- 1 Abe F et al (CDF Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1995, **74**:2626—2631;
Abachi S et al (D0 Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1995, **74**:2632—2637
- 2 Diaz Cruz J L et al. Phys. Rev., 1990, **D41**:891—894;
Dutta Roy B et al. Phys. Rev. Lett., 1990, **65**:827—830; Fritzsche H. Phys. Lett., 1989, **B224**:423—425
- 3 Eilam G, Hewett J L, Soni A. Phys. Rev., 1991, **D44**:1473—1483
- 4 Grzadkowski B, Gunion J F, Krawczyk P. Phys. Lett., 1991, **B268**:106—111
- 5 Li C S, Oakes R J, Yang J M. Phys. Rev., 1994, **D49**:293—298
- 6 Wang X L et al. Phys. Rev., 1994, **D50**:5781—5786
- 7 Hill C T. Phys. Lett., 1995, **B345**:483—489
- 8 Weinberg S. Phys. Rev., 1976, **D13**:974—996; 1979, **19**:1277—1280; Susskind L. Phys. Rev., 1979, **D20**:2619—2625
- 9 Dimopoulos S, Susskind L. Nucl. Phys., 1979, **B155**:237—252;
Eichten E, Lane K. Phys. Lett., 1980, **B90**:125—130
- 10 Holdom B. Phys. Rev., 1981, **D24**:1441—1444;
Appelquist T, Karabali D, Wijewardhana L C R. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**:957—960
- 11 Lane K, Eichten E. Phys. Lett., 1989, **B222**:274—280;
Lane K, Ramana M V. Phys. Rev., 1991, **D44**:2678—2700
- 12 Farhi E, Susskind L. Phys. Rev., 1979, **D20**:3404—3411
- 13 Kaul R K. Rev. Mod. Phys., 1983, **55**:449—476;
Eichten E et al. Phys. Rev., 1986, **D34**:1547—1566; Rev. Mod. Phys., 1984, **56**:579—708
- 14 Bohm M, Hollik W, Spiesberger H. Fortschr. Phys., 1986, **34**:687—695;
Hollik W. Fortschr. Phys., 1990, **38**:165—178
- 15 Grzad B, Hollik W. Nucl. Phys., 1992, **B384**:101—112
- 16 Axelrod A. Nucl. Phys., 1982, **B209**:349—371
- 17 Gilman F J et al. Particle Data Group. Phys. Rev., 1996, **D54**:94—97
- 18 Yue C X. et al. Phys. Rev., 1995, **D52**:5314—5317; Kitazawa N. Phys. Rev., 1995, **D52**:5347—5350
- 19 Yue C X, Kuang Y P, Lu G R. J. Phys., 1997, **G23**:163—167

Contributions From PGBs in TOPCMTC Model to the Top-Quark Rare Decay *

Lu Gongru¹ Pan Qunna² Huang Jinshu^{1,2} Yue Chongxing¹

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

2(Henan Nanyang Teachers' College, Nanyang 473061)

Abstract The decays $t \rightarrow cV$ ($V = Z, \gamma, g$) induced through loop processes are calculated in Topcolor-Assisted Multiscale Technicolor model. We find that the extended technicolor interactions provide the main contribution to these decays, and the total contribution can enhance the Standard Model branching ratios by as much as 5 to 6 orders of magnitude, i. e., $B(t \rightarrow cZ) \sim 10^{-6}$, $B(t \rightarrow c\gamma) \sim 10^{-7}$, $B(t \rightarrow cg) \sim 10^{-5}$, for the favorable parameter values.

Key words topcolor-assisted multiscale technicolor, pseudo Goldstone boson, rare decay

Received 26 February 1997

* Supported by the National Natural Science Foundation of China and the Natural Foundation of Henan Scientific Committee