

MWTCM 中 PGB 对 Top 夸克衰变的单圈修正*

曹义刚 焦正宽

(浙江大学物理系 杭州 310027)

鲁公儒

(河南师范大学物理系 新乡 453002)

摘要 在 Multiscale Walking Technicolor 模型 (MWTCM) 下, 计算赝标戈尔斯通玻色子 (PGB) 对 Top 夸克衰变的单圈修正, 发现 Top 夸克的衰变宽度被极大压低. 如果进一步引入 Topcolor, 在 Topcolor assisted MWTCM 中, Top 夸克衰变宽度明显提高; 且在参数的一定空间内, PGB 修正可达到 -7% , 可望在实验上被观测到.

关键词 MWTCM 衰变宽度 Topcolor assisted MWTCM

1 引言

费米实验室最近发现并测到 Top 夸克的质量 $m_t = 174.4 \pm 8.3^{[1]}$, 与电弱对称破缺标度 $\mu = (\sqrt{2} G_F)^{-1/2} = 246\text{GeV}$ 同一数量级. 与其它夸克相比, Top 夸克和电弱对称矢量的耦合更强. 新物理的效应在 Top 夸克参与的过程中表现得尤为突出. 此外, 实验上对 Top 夸克产生和衰变形状因子的测量可达到百分之几的量级^[2]. 因此, 对 Top 夸克产生和衰变过程的理论计算很有意义. 本文计算 Top 夸克衰变的辐射修正.

标准模型中, $t \rightarrow W^+ b$ 是主要衰变模式, 其它模式因有很小的混合角而被压低. 该过程的 QCD 和电弱修正早在几年前已经有人计算过^[3,4]. 在 Two-Higgs-Doublet 模型 (2HDM)^[5]、Minimal-Supersymmetric-Standard 模型 (MSSM)^[6] 下, 也有人计算过该过程的辐射修正^[7].

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) 理论中对该过程进行研究.

TC^[8] 理论是电弱对称自发破缺的重要候选者. 为了产生普通费米子质量, 人们又提

1997-11-21 收稿, 1998-03-09 收修改稿

* 国家自然科学基金资助

出了 Extended Technicolor (ETC) 模型^[9]. 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^[10]中可以得到解决. 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^[11]. 为了解释夸克质量的巨大等级, 又进一步提出了 Multiscale WTC 模型 (MWTCM)^[12]. 该模型预言有大量的 PGB 存在, 它们可望在实验中得到验证^[13]. 所以, 对该模型的唯一象研究很有意义.

本文计算了 MWTCM 中 PGB 对 $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ 的单圈修正. 将会看到, 由于模型中较小的参数 F_Q , $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ 被极大压低. 如果进一步引入 Topcolor, 在 Topcolor assisted MWTCM 中, $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ 明显提高.

第 2 节和第 3 节首先分别简单介绍一下 MWTCM 和 Topcolor assisted MWTCM, 然后在两个模型下分别计算 PGB 对 $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ 的单圈修正, 结果和讨论也分别置于上述两节中.

2 MWTCM 及 PGB 修正

首先考虑 Lane 和 Ramana 提出的 MWTCM^[12]. ETC 规范群为:

$$G_{\text{ETC}} = SU(N_{\text{ETC}})_1 \times SU(N_{\text{ETC}})_2, \quad (1)$$

这里 $N_{\text{ETC}} = N_{\text{TC}} + N_{\text{C}} + N_{\text{L}}$, 其中 N_{TC} , N_{C} 和 N_{L} 分别表示 TC 色数, 普通色数和色单态 TC 轻子数. 文献[12] 为确保 TC 耦合常数的跑动性质, 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:

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

从文献[12] 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 . 本文取荷电色单态 PGB P_8^\pm 的质量 $m_{P_8^\pm} = 100 \text{ GeV}$, 色八重态 PGB P_8^0 的质量 $m_{P_8^0} = (300 - 600) \text{ GeV}$.

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 Feynman 规则取自文献[12] (考虑到 $m_b \ll m_t$, 忽略了含 m_b 的项).

$t \rightarrow W^+ b$ 的裂变振幅

$$M = \bar{u}_b(P_b) \Gamma_\mu u_t(P_t) \varepsilon^\mu(k, \lambda). \quad (3)$$

其中 $\varepsilon^\mu(k, \lambda)$ 为 W 玻色子的极化矢量, Γ_μ 为荷电顶角.

树图近似下(图 1),

$$\Gamma_\mu^0 = -i \frac{g}{\sqrt{2}} \gamma_\mu L. \quad (4)$$

其中规范耦合常数 $g = e / S_w$, $S_w = \sin \theta_w$. 左、右手投影算符定义为:

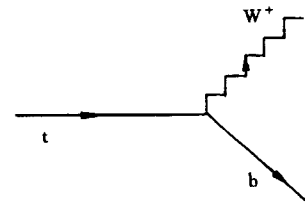
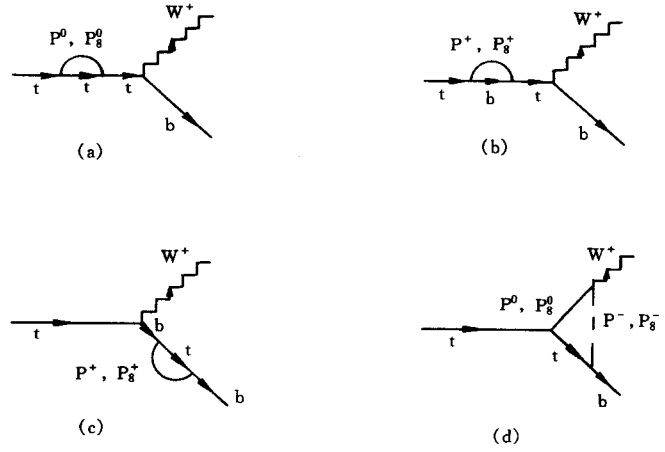


图1 树图近似下, 顶角 tW^+b 的 Feynman 图

图2 MWTCM中, 顶角 tW^+b 的PGB单圈修正的Feynman图

$$L, R = \frac{1}{2} (1 \mp \gamma_5) . \quad (5)$$

$O(m_t^2 / F_Q^2)$ 近似下, PGB对 tWb 顶角的单圈贡献来自图2. 根据维数正规化和质壳重整化^[5,14], 并考虑PGB的贡献, Γ_μ 为:

$$\Gamma_\mu = -i \frac{g}{\sqrt{2}} \left\{ \gamma_\mu L \left[1 + \frac{1}{2} \delta_{Z_b^L} + \frac{1}{2} \delta_{Z_t^L} + F_L \right] + P_{t\mu} H_R R \right\} . \quad (6)$$

其中形状因子 F_L 和 F_R 来自顶角修正(图2(d)); $\delta_{Z_b^L}$ 和 $\delta_{Z_t^L}$ 分别为 b 夸克和 t 夸克的左手场重整化常数. $\delta_{Z_b^L}$ 和 $\delta_{Z_t^L}$ 有下列形式:

$$\delta_{Z_f^L} = - \sum_f^L (m_f^2) - m_f^2 \left[\sum_f^L (p^2) + \sum_f^R (p^2) + 2 \sum_f^S (p^2) \right] \Big|_{p^2 = m_f^2} . \quad (7)$$

其中 $\sum_f^L (p^2) = \frac{\partial}{\partial p^2} \sum_f (p^2)$, 自能(虚部)可分解为:

$$\sum_f (p) = \sum_f^L (p) \not{p} L + \sum_f^R (p) \not{p} R + m_f \sum_f^S (p) . \quad (8)$$

顶角结构(6)式允许根据下列约化矩阵元进行自旋求和.

$$M_0 = \bar{u}_b(p_b) \gamma_\mu L u_t(p_t) e^\mu(k, \lambda) , \quad (9)$$

$$M_1 = \bar{u}_b(p_b) p_{t\mu} R u_t(p_t) e^\mu(k, \lambda) . \quad (10)$$

单圈近似下,

$$\sum_{\text{pol}} |M_0|^2 = m_t^2 - 2 m_W^2 + \frac{m_t^4}{m_W^2} \equiv G_0 , \quad (11)$$

$$\sum_{\text{pol}} M_0 M_1^* = m_t \left[\frac{1}{2} m_W^2 - m_t^2 + \frac{m_t^4}{m_W^2} \right] \equiv G_1 . \quad (12)$$

树图近似下的衰变宽度为

$$\Gamma^0 = \frac{\alpha m_t^2}{16M_W^2 S_W^2} \beta^4 (3 - 2\beta) = \frac{G_F m_t^2}{8\sqrt{2} \pi} \beta^4 (3 - 2\beta) . \quad (13)$$

其中 $\beta^2 = 1 - \frac{m_W^2}{m_t^2}$.

由 (11) — (13) 式, 得出单圈近似下的衰变宽度

$$\Gamma = \Gamma^0 \left\{ 1 + 2\text{Re} \left[\frac{1}{2} \delta_{z_t^L} + \frac{1}{2} \delta_{z_t^R} + F_L + \frac{G_1}{G_0} H_R \right] \right\} = \Gamma^0 [1 + \delta_p + \delta_{p_8}] = \Gamma^0 (1 + \delta_{\text{total}}) . \quad (14)$$

其中 $\delta_{\text{total}} = \delta_p + \delta_{p_8}$, δ_p, δ_{p_8} 分别代表色单态和色八重态 PGB 的贡献.

δ_p 和 δ_{p_8} 的显然形式为:

$$\delta_p = \frac{m_t^2}{24F_Q^2 \pi^2} \text{Re} [B_1(m_b, m_t, m_p) + B_1(m_t, m_t, m_p) + 2m_t^2 B_1'(m_t, m_t, m_p) + m_t^2 B_1'(m_t, m_b, m_p) + 2m_t^2 B_0'(m_t, m_t, m_p) + 4C_{24} + 4m_t \frac{G_1}{G_0} (C_{12} - C_{11} + C_{22} - C_{23})] . \quad (15)$$

这里 $C_{ij} = C_{ij}(m_b, m_t, m_p, m_t, m_p)$; $B_i' = \frac{\partial}{\partial p^2} B_i$. B_1, B_0 和 C_{ij} 取自文献 [15].

$$\delta_{p_8} = 18\delta_p |_{m_p \rightarrow m_{p_8}} . \quad (16)$$

(15), (16) 式中的紫外发散分别相互抵消, 结果是有限的.

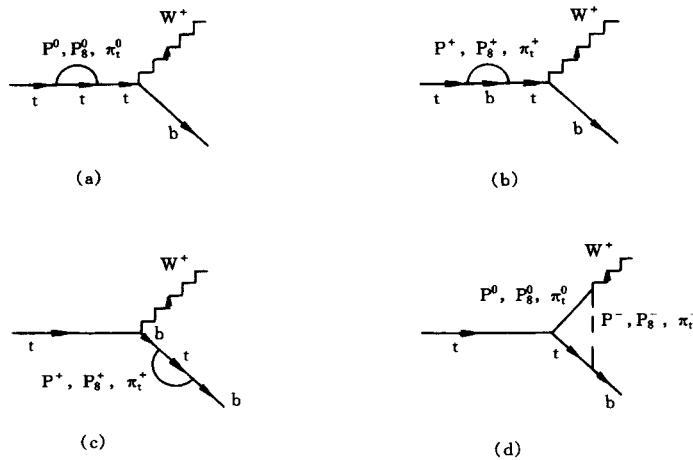


图3 Topcolor assisted MWTCM中, 顶角 tW^+b 的PGB单圈修正的Feynman图

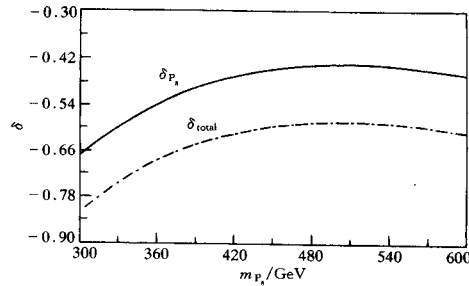


图 4 MWTCM 中, δ_{P_8} , δ_{total} 对 m_{P_8} 的函数曲线
其中实线代表 δ_{P_8} 对 m_{P_8} 的函数曲线; 点划线代表 δ_{total}
对 m_{P_8} 的函数曲线(取 $m_p = 100\text{GeV}$).

W^+b)明显提高.

3 Topcolor assisted MWTCM 及 PGB 修正

把 Topcolor 引入 MWTCM 的动机如下: 原始的 MWTCM 很难产生大的 Top 夸克质量, 甚至强的 ETC 也不能产生如此大的质量^[16]. 因此, 在大约 1TeV 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^[17]. 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^[18], 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, Top 夸克质量主要由 Topcolor 产生. Top 夸克质量中的 ETC 产生部分为 $m'_t = 66K\text{GeV}$, 其中 K 取 $1-10^{-1}$ ^[18]. 本文取 $m'_t = 15\text{GeV}$ 和 20GeV 分别作为输入参数.

文献 [18] 中详细地阐述了 Topcolor assisted MWTCM 在 1TeV 附近, 该模型的动力学破缺模式为

$$SU(3) \times SU(3)_2 \times U(1)_{Y_1} \times U(1)_{Y_2} \times SU(2)_L \rightarrow SU(3)_{\text{QCD}} \times U(1)_{\text{EM}}. \quad (17)$$

其中 $SU(3)_1 \times U(1)_{Y_1} [SU(3)_2 \times U(1)_{Y_2}]$ 主要在第三代 (第一代和第二代) 夸克中起作用. $U(1)_{Y_1}$ 在 1TeV 标度以上具有 $U(1)_Y$ 的形式. $SU(3)_1 \times U(1)_{Y_1}$ 在 1TeV 标度附近变强形成手征凝聚, 并自然地倾向于 Top 夸克方向. 该理论禁闭前在 1TeV 附近破缺到普通 $SU(3)_{\text{QCD}} \times U(1)_Y$. 因为同 $U(1)_{Y_1}$ 的耦合比普通规范耦合强, 所以理论上不需要精细调节来完成对称破缺. 对称破缺产生了“top-pion”介子, 表示为 π_t^+ , π_t^- 和 π_t^0 . 如果 Topcolor 的破缺标度为 1TeV, 那么 top-pion 的衰变常数 $F_t = 50\text{GeV}$, $m_{\pi_t} \approx 200\text{GeV}$ ^[18,19]. top-pion 同 Top, b 夸克的耦合形式为:

$$\frac{m_t - m'_t}{\sqrt{2} F_t} \left[i\bar{\gamma}_5 t\pi_t^0 + \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{t}(1 - \gamma_5)b\pi_t^+ + \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{b}(1 + \gamma_5)t\pi_t^- \right]. \quad (18)$$

文献 [18] 指出: 在 Topcolor assisted MWTCM 中, 色单态和色八重态 PGB 同普通费米子的耦合与原始的 MWTCM 一样 (仅仅 m_t 被 ETC 产生部分 m'_t 取代).

数值计算中, 取 $G_F = 1.166372 \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2}$, $m_W = 80.22\text{GeV}$, $m_t = 176\text{GeV}$, $V_{tb} = 1$ 作为输入参数.

图 4 给出了 δ_{P_8} 和 δ_{total} 对 m_{P_8} 的函数曲线. 从 (16) 式和图 4 可以看出: PGB 修正主要取决于色八重态的贡献. 并且可以从图 4 发现: 总的 PGB 修正太大, 以致 $\Gamma(t \rightarrow W^+b)$ 被极大压低. 鉴此, 第 3 节考虑 Topcolor assisted MWTCM (参见图 3), 将会发现, 在 Topcolor assisted MWTCM 中, $\Gamma(t \rightarrow$

类似于第 2 节中的计算 (图 3), 单圈修正后的 $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ 为:

$$\Gamma = \Gamma^0 (1 + \delta_p + \delta_{p_8} + \delta_{\pi_1}) \equiv \Gamma^0 (1 + \delta_{\text{total}}). \quad (19)$$

其中 $\delta_{\text{total}} = \delta_p + \delta_{p_8} + \delta_{\pi_1}$, δ_p , δ_{p_8} 和 δ_{π_1} 分别代表色单态, 色八重态 PGB 和 top-pion 的贡献.

δ_p , δ_{p_8} 和 δ_{π_1} 的显然形式为:

$$\begin{aligned} \delta_p = & \frac{m_t'^2}{24F_Q^2 \pi^2} \text{Re}[B_1(m_b, m_t', m_p) + B_1(m_t, m_t', m_p) + \\ & 2m_t^2 B_1'(m_t, m_t', m_p) + m_t^2 B_1'(m_t, m_b, m_p) + 2m_t^2 B_0'(m_t, m_t', m_p) + \\ & 4C_{24} + 4m_t' \frac{G_1}{G_0} (C_{12} - C_{11} + C_{22} - C_{23})]. \end{aligned} \quad (20)$$

其中 $C_{ij} = C_{ij}(m_b, m_t, m_p, m_t', m_p)$; $B_i' = \frac{\partial}{\partial p^2} B_i$.

$$\delta_{p_8} = 18\delta_p|_{m_p \rightarrow m_{p_8}}. \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \delta_{\pi_1} = & \frac{(m_t - m_t')^2}{16F_t^2 \pi^2} \text{Re}[B_1(m_b, m_t - m_t', m_{\pi_1}) + B_1(m_t, m_t - m_t', m_{\pi_1}) + \\ & 2m_t^2 B_1'(m_t, m_t - m_t', m_{\pi_1}) + m_t^2 B_1'(m_t, m_b, m_{\pi_1}) + 2m_t^2 B_0'(m_t, m_t - m_t', m_{\pi_1}) + \\ & 4C_{24}^* + 4(m_t - m_t') \frac{G_1}{G_0} (C_{12}^* - C_{11}^* + C_{22}^* - C_{23}^*)]. \end{aligned} \quad (22)$$

其中 $C_{ij}^* = C_{ij}(m_b, m_t, m_{\pi_1}, m_t - m_t', m_{\pi_1})$; $B_i' = \frac{\partial}{\partial p^2} B_i$. 显然, (20) — (22) 式中的紫外发散都已抵销.

δ_p 对 m_{p_8} 的函数曲线由图 5 给出. 图 6 给出了 δ_{π_1} 对 m_{π_1} 的函数曲线 (取 $m_{\pi_1} = 100$ — 300GeV). 图 7 给出 Topcolor assisted MWTCM 中总的 PGB 修正对 m_{p_8} 的函数曲线 (取

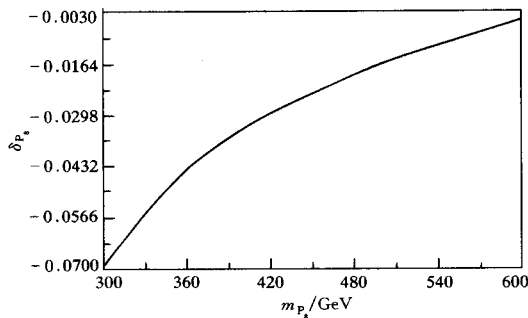


图5 Topcolor assisted MWTCM中, δ_{p_8} 对 m_{p_8} 的函数曲线

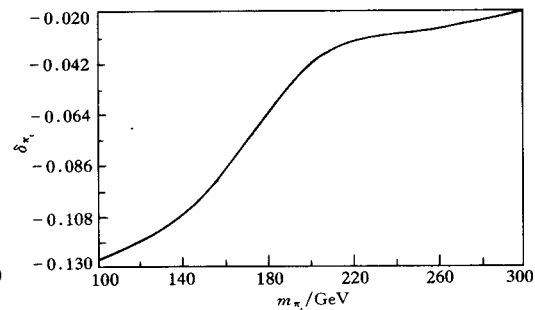


图6 Topcolor assisted MWTCM中, δ_{π_1} 对 m_{π_1} 的函数曲线

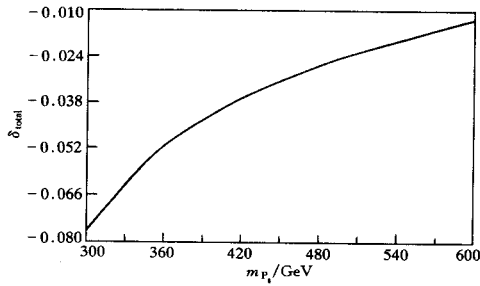


图7 Topcolor assisted MWTCM中, δ_{total} 对 m_p 的函数曲线(取 $m_p=100\text{GeV}$, $m_{\pi_1}=200\text{GeV}$)

assisted MWTCM 中, $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ 明显提高.

本文计算中, 忽略了 b 夸克质量. 考虑 b 夸克质量对结果影响很小.

参 考 文 献

- [1] Abe F, Akimoto H, Akopian A et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**(14):2626—2631; Abachi S, Abbott B, Abolins M et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**(14):2632—2637
- [2] Peskin E M. In: Physics and Experiments With Linear Collider, Proceedings of the Workshop, Saarikka, Finland, 1991. Singapore: World Scientific Press, 1992. 1
- [3] Li Chong Sheng, Oakes J R, Yuan C T. Phys. Rev., 1991, **D43**(11):3759—3762
- [4] Eilam G, Hewett L J, Soni A. Phys. Rev., 1991, **D44**(5):1473—1484
- [5] Grzadkowski B, Hollik W. Nucl. Phys., 1992, **B384**(1—2):101—112
- [6] Haber E H, Kane L C. Phys. Rep., 1985, **117**(2—4):75—263
- [7] Sun Lazhen, Liu Yao yang. Phys. Rev., 1996, **D53**(5):2411—2420
- [8] Weinberg S. Phys. Rev., 1979, **D19**(4):1277—1280
- [9] Eichten E, Lane K. Phys. Lett., 1980, **B90**(1—2):125—130
- [10] Appelquist T, Karabali D, Wijewardhana R C L. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**(8):957—960
- [11] Appelquist T, Terning J. Phys. Lett., 1993, **B315**(1—2):139—145
- [12] Lane K, Ramana V M. Phys. Rev., 1991, **D44**(9):2678—2700
- [13] Eichten E, Lane K. Phys. Lett., 1994, **B327**(1—2):129—135
- [14] Hollik W, Fortsch. Phys., 1990, **38**(1):165—170
- [15] Clements M, Footman C, Kronfeld A et al. Phys. Rev., 1983, **D27**(3):570—578
- [16] Appelquist T, Einhorn B M, Takeuchi T. et al. Phys. Lett., 1989, **B220**(1—2):223—228
- [17] Hill T C. Phys. Lett., 1991, **B266**(3—4):419—424
- [18] Hill T C. Phys. Lett., 1995, **B345**(4):483—489
- [19] Buidman G, Hill T C, Kominis D. FERMILAB-PUB-95/322-T; Lane K. BUHEP-96-2, hep-ph/9602221

$m_p = 100\text{GeV}$, $m_{\pi_1} = 200\text{GeV}$). 比较图 5 和图 6, 可以发现 top-pion 的贡献和色八重态 PGB 的贡献同样重要. 从图 7 可以看出 $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ 明显提高. 选取合适的模型参数, 总的修正可达到 -7%, 可望在实验上观测到.

总之, 在 MWTCM 下, 计算了 $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ 的 PGB 单圈修正, 并发现该修正太大, 以致 $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ 被极大压低. 进一步引入 Topcolor 后, 在 Topcolor

One-Loop Corrections to the Top-Quark Decay From PGBs in the MWTCM*

Cao Yigang Jiao Zhengkuan

(*Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

Lu Gongru

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

Abstract We calculate one-loop corrections to the top-quark decay width $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ from PGBs (Pseudo-Goldstone bosons) in the MWTCM (multiscale walking technicolor model). The corrections are found so large that $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ is decreased largely. If topcolor is further introduced into MWTCM, $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ is enhanced, and the PGBs' corrections in the topcolor assisted MWTCM may reach -7% for certain parameters in this model, which might be observable in the experiments.

Key words MWTCM, decay width, topcolor assisted MWTCM

Received 21 November 1997, Revised 9 March 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China