

TC2 模型下的顶夸克稀有衰变 $t \rightarrow cV$ *

鲁公儒 殷复荣 王学雷¹⁾ 万陵德

(河南师范大学物理与信息工程学院 新乡 453002)

摘要 在顶色辅助的人工色(TC2)理论框架下,研究了顶夸克稀有衰变 $t \rightarrow cV$ 过程. 结果表明 TC2 模型预言的标量粒子 top-pions 和 top-Higgs 对顶夸克稀有衰变分支比的贡献可以使其比标准模型预言值大 6—9 个数量级. 在大多数参数范围内,分支比的数量级为: $Br(t \rightarrow cg) \sim 10^{-5}$, $Br(t \rightarrow cZ) \sim 10^{-5}$, $Br(t \rightarrow c\gamma) \sim 10^{-7}$. 在合理的参数范围内,顶夸克稀有衰变 $t \rightarrow cV$ 过程能够被未来的对撞机实验探测到. 因此,顶夸克稀有衰变过程为我们提供了一种检验 TC2 理论的方法.

关键词 顶色辅助的人工色(TC2)模型 顶夸克稀有衰变 分支比

1 引言

顶夸克是迄今为止实验上发现的最重的粒子,其质量与电弱对称性破缺的标度在同一数量级上. 这意味着顶夸克与电弱对称性破缺部分的耦合要强于轻夸克与电弱对称破缺部分的耦合. 由于顶夸克质量大,对某些味改变(FC)相互作用非常敏感,新物理效应明显,所以人们一般利用顶夸克的性质来探测新物理.

顶色辅助的人工色(TC2)^[1]模型是目前人们比较感兴趣的一种人工色(TC)理论,它包含了 TC 理论和顶夸克凝聚模型两种理论的优点,把顶夸克和电弱对称性破缺机制(EWSB)两方面结合起来,不仅为电弱对称性破缺提供了一种动力学破缺机制,同时解决了重的顶夸克问题. 在 TC2 模型中,电弱对称性破缺主要由 TC 相互作用产生,ETC 给出所有普通夸克和轻子质量,也产生顶夸克质量的很小一部分: $m'_t = \epsilon m_t$ ($0.03 \leq \epsilon \leq 0.1$)^[2]. Topcolor 相互作用对电弱对称性破缺只有很小的贡献,同时,贡献出顶夸克质量的主要部分: $(1 - \epsilon) m_t$. TC2 模型的最重要的预言是,在几百个 GeV 能量区域内,存在 3 个色单态同位旋三重态的 top-pions (Π_t^\pm, Π_t^0) 和一个

同位旋单态的 top-Higgs (h_t^0) 介子,这些标量粒子可被认为是 TC2 模型的典型特征. 因此,研究这些粒子存在的可能的物理迹象对于检验 TC2 理论的正确性和发展、完善 TC2 理论有非常重要的意义. 许多理论工作围绕着这个主题展开^[3-5],并取得了一定的成果. 在 TC2 模型中,由于 topcolor 相互作用仅与第三代夸克发生作用,不具有普适性,所以 TC2 理论没有 GIM 机制^[4]. 这是 TC2 模型的一个基本特点. 当在夸克质量本征态中描述非普适的相互作用时会导致味改变耦合. 因此 $\Pi_t^\pm, \Pi_t^0, h_t^0$ 和第三代夸克有很强的耦合,且有新的味改变耦合. 文献[6]研究了通过味改变过程探测 TC2 模型中的中性 top-pion 介子的可能性. 这些味改变耦合也会对顶夸克稀有衰变 $t \rightarrow cV$ 分支比有很大贡献. 在标准模型(SM)中,由于 GIM 压低,顶夸克稀有衰变 $t \rightarrow cV$ ($V = Z, \gamma, g$) 的分支比很小^[7],很难被实验探测到^[8]. 如果在新物理中它的衰变分支比明显增加,则有可能在未来的对撞机上探测到 top 夸克的稀有衰变,这将为探测新物理提供有利的证据. 我们已研究了一代 TC 模型下的 top 夸克稀有衰变^[9]. 本文系统地计算了 TC2 模型预言的新粒子 top-pions (Π_t^\pm, Π_t^0) 和 top-Higgs (h_t^0) 对顶夸克稀有衰变 $t \rightarrow cV$ 的贡献. 结

2003-06-27 收稿

* 国家自然科学基金(10175017),河南省科委杰出青年基金(02120000300)和河南省高校杰出科研人才创新工程(2002KYCX009)资助

1) E-mail: wangxuelei@263.net

果显示, TC2 模型确实可以对顶夸克稀有衰变产生大的修正效应. 在合理的参数范围内, 顶夸克稀有衰变过程可以被未来实验探测到.

2 $t \rightarrow cV$ 过程分支比的计算

TC2 模型预言了 top-pions (Π_i^+ , Π_i^0) 的存在, top-pions 在树图上给出新的味改变耦合. top-pion 介子与 b, t, c 夸克的耦合为^[1,4]

$$\begin{aligned} & \frac{m_t}{\sqrt{2}F_t} \frac{\sqrt{v_\omega^2 - F_t^2}}{v_\omega} [iK_{UR}^{tt} K_{UL}^{t*} \bar{t}_L t_R \Pi_t^0 + \\ & \sqrt{2}K_{UR}^{tt} K_{DL}^{bb*} \bar{b}_L t_R \Pi_t^- + iK_{UR}^{tc} K_{UL}^{t*} \bar{t}_L c_R \Pi_t^0 + \\ & \sqrt{2}K_{UR}^{tc} K_{DL}^{bb*} \bar{b}_L c_R \Pi_t^- + \text{h.c.}], \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $v_\omega = v/\sqrt{2} \approx 174\text{GeV}$, F_t 为 top-pions 的衰变常数. K_{UL}^u 是么正矩阵 K_{UL} 的矩阵元, 而 CKM 矩阵可以表示为 $V = K_{UL}^{-1} K_{DL}$, K_{UR}^j 是右手旋转矩阵 K_{UR} 的矩阵元, 它们的值分别是:

$$K_{UL}^{tt} = K_{DL}^{bb} = 1, K_{UR}^{tt} = 1 - \epsilon, K_{UR}^{tc} \leq \sqrt{2\epsilon - \epsilon^2}. \quad (2)$$

在计算中, 取 $K_{UR}^{tc} = \sqrt{2\epsilon - \epsilon^2}$, ϵ 为自由参数, 取值范围为 0.03—0.1.

TC2 模型还预言了一个类似于低能 QCD 中的 σ 粒子的标量粒子 top-Higgs h_i^0 . h_i^0 和夸克的耦合形式与 Π_i^0 和夸克的耦合形式类似, 只是 Π_i^0 为 CP 偶宇称而 h_i^0 为 CP 奇宇称.

这些强 Yukawa 耦合使得 top-pions 和 top-Higgs 对顶夸克稀有衰变 $t \rightarrow cV$ 产生单圈修正, 相应费曼图如图 1 所示. 由图 1 和相应的费曼规则, $t \rightarrow cV$ 的振幅可以写成

$$M_V = \bar{u}_c L (F_{V1} \gamma^\mu + F_{V2} p_1^\mu + F_{V3} p_c^\mu) u_t \epsilon_\mu(\lambda), \quad (3)$$

其中 $L = (1 - \gamma_5)/2$ 为左手投影算符, F_{Vi} ($V = Z, \gamma, g$; $i = 1, 2, 3$) 的表达形式可以由图 1 直接推导出. 由于 $m_t \gg m_c$ (m_b), 在计算中忽略了正比于 m_c, m_b 的项. 由此, 得出顶夸克稀有衰变宽度的表达式为

$$\begin{aligned} \Gamma(t \rightarrow cZ) &= \frac{1}{16\pi m_t} \left(1 - \frac{M_Z^2}{m_t^2}\right) \frac{1}{8M_Z^2} [F_{Z1}^2 (4m_t^2 M_Z^2 - \\ & 8M_Z^4 + 4m_t^4) + F_{Z2}^2 (-3m_t^4 M_Z^2 + m_t^6 + \\ & 3m_t^2 M_Z^4 - M_Z^6) + F_{Z3}^2 (m_t^2 - M_Z^2)^3 + \\ & (F_{Z1} \cdot F_{Z2}^* + F_{Z2} \cdot F_{Z1}^*) (-4m_t^3 M_Z^2 + \end{aligned}$$

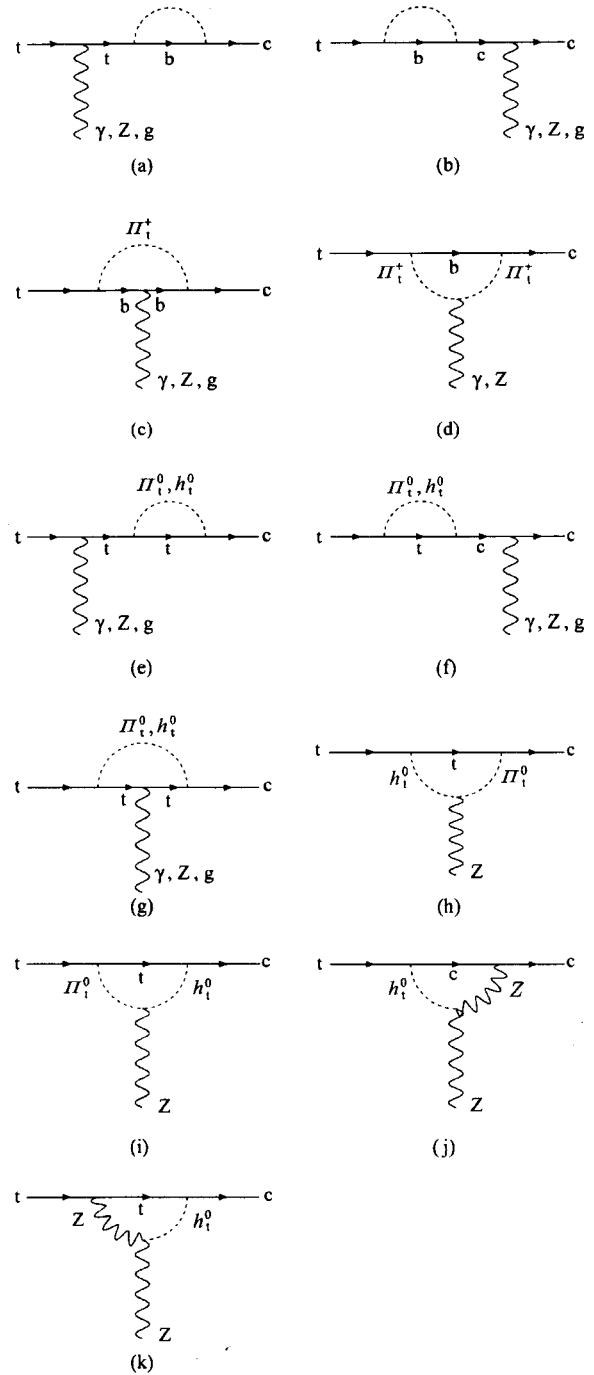


图 1 Top-pions 和 top-higgs 对顶夸克稀有衰变 $t \rightarrow cV$ 单圈贡献的费曼图

$$\begin{aligned} & 2m_t^5 + 2M_Z^4 m_t) + (F_{Z2} \cdot F_{Z3}^* + \\ & F_{Z3} \cdot F_{Z2}^*) (-3m_t^4 M_Z^2 + m_t^6 + \\ & 3m_t^2 M_Z^4 - M_Z^6) + 2(F_{Z1} \cdot F_{Z3}^* + F_{Z3} \cdot F_{Z1}^*) \times \\ & (m_t^2 - M_Z^2)^2 m_t], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(t \rightarrow c\gamma) &= \frac{1}{16\pi m_t} \left[F_{\gamma1}^2 m_t^2 - \frac{1}{2} F_{\gamma2}^2 m_t^4 - \right. \\ & \left. \frac{1}{2} (F_{\gamma1} F_{\gamma2}^* + F_{\gamma2} F_{\gamma1}^*) m_t^3 - \right. \end{aligned}$$

$$\frac{1}{4} (F_{\gamma 2} F_{\gamma 3}^* + F_{\gamma 3} F_{\gamma 2}^*) m_t^4 \Big], \quad (5)$$

$$\Gamma(t \rightarrow cg) = \frac{1}{16\pi m_t} \left[F_{g1}^2 m_t^2 - \frac{1}{2} F_{g2}^2 m_t^4 - \frac{1}{2} (F_{g1} F_{g2}^* + F_{g2} F_{g1}^*) m_t^3 - \frac{1}{4} (F_{g2} F_{g3}^* + F_{g3} F_{g2}^*) m_t^4 \right], \quad (6)$$

m_t, M_Z 为顶夸克和 Z 玻色子的质量.

3 数值结果与讨论

取顶夸克稀有衰变分支比的定义为^[7]

$$Br(t \rightarrow cV) = \frac{\Gamma(t \rightarrow cV)}{\Gamma(t \rightarrow W^+ b)}, \quad (7)$$

$\Gamma(t \rightarrow W^+ b) = 1.56\text{GeV}^{[10]}$ 为顶夸克主要衰变道 $t \rightarrow W^+ b$ 的衰变宽度. 从前面推导的结果可以看出, 计算所涉及到的参数较多, 不过大部分参数已由实验或理论给出明确的数值, 只有 $\epsilon, m_{\Pi_t^\pm}, m_{\Pi_t^0}, m_{h_t^0}$ 为自由参数. 在我们的计算中, 取 $m_t = 175\text{GeV}, M_Z = 91.18\text{GeV}, \alpha_e = 1/128.9, \alpha_s = 0.118, s_w^2 = \sin^2 \theta_w = 0.23$. ϵ 为模型参数, 其范围为 $0.03-0.1$; $m_{\Pi_t^\pm}, m_{\Pi_t^0}, m_{h_t^0}$ 分别为荷电 top-pions Π_t^\pm , 中性 top-pion Π_t^0 和 top-Higgs h_t^0 的质量, 由于 Π_t^\pm 和 Π_t^0 的质量分裂只来源于电弱相互作用, 其质量差很小, 可以忽略, 文献[11]指出 top-pions 的质量不依赖于理论的参数值, 可以为几百个 GeV. 因此, 本文中取 $m_{\Pi_t^0} = m_{\Pi_t^\pm} = m_{\Pi_t}$, top-pions 的质量变化范围为 $200\text{GeV} \leq m_{\Pi_t} \leq 500\text{GeV}$. 文献[12]指出 top-Higgs 的质量在大部分情况下应该小于 $t\bar{t}$ 阈值, 计算中, h_t^0 的质量分别取为 $200\text{GeV}, 250\text{GeV}$ 和 300GeV . 由于分支比 $Br(t \rightarrow cV)$ 正比于 $(2\epsilon - \epsilon^2)(1 - \epsilon)^2$, 为了消除模型参数 ϵ 的影响, 图 2—4 中给出了 $\frac{Br(t \rightarrow cV)}{(2\epsilon - \epsilon^2)(1 - \epsilon)^2}$ 随 m_{Π_t} 的变化曲线.

从图 2—4 中, 可以看出 TC2 模型预言的标量场确实对顶夸克稀有衰变有很大贡献. 整体上, $Br(t \rightarrow c\gamma)$ 比 $Br(t \rightarrow cZ)$ 和 $Br(t \rightarrow cg)$ 要小两个数量级. 对小质量 m_{Π_t} , $Br(t \rightarrow c\gamma)$ 随 m_{Π_t} 的增加和 $m_{h_t^0}$ 的减小而减小, 而在大质量区域它随 m_{Π_t} 的增加和 $m_{h_t^0}$ 的减小而增加; 分支比 $Br(t \rightarrow cZ)$ 对 top-pions 的质量 m_{Π_t} 很敏感, 随 m_{Π_t} 和 $m_{h_t^0}$ 的增加而减小, 对大

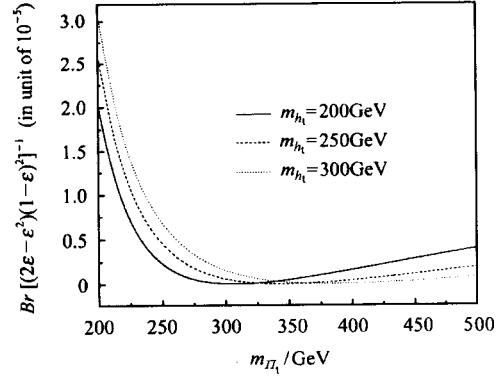


图 2 分支比 $\frac{Br(t \rightarrow c\gamma)}{(2\epsilon - \epsilon^2)(1 - \epsilon)^2}$ 随 top-pions 质量 m_{Π_t} 的变化曲线

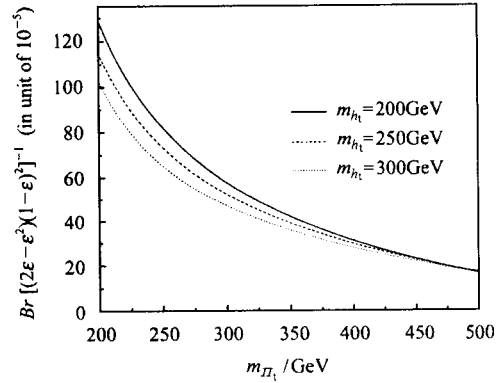


图 3 分支比 $\frac{Br(t \rightarrow cZ)}{(2\epsilon - \epsilon^2)(1 - \epsilon)^2}$ 随 top-pions 质量 m_{Π_t} 的变化曲线 (图示同图 1)

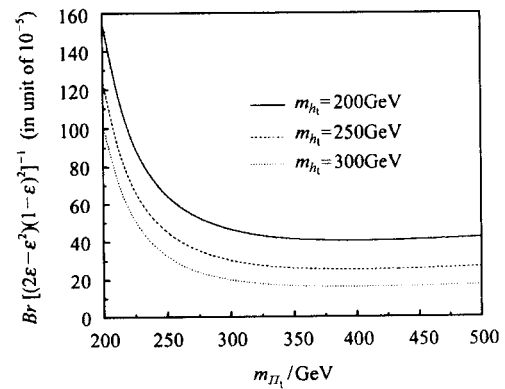


图 4 分支比 $\frac{Br(t \rightarrow cg)}{(2\epsilon - \epsilon^2)(1 - \epsilon)^2}$ 随 top-pions 质量 m_{Π_t} 的变化曲线 (图示同图 1)

质量 m_{Π_t} 区域, $Br(t \rightarrow cZ)$ 几乎不随 $m_{h_t^0}$ 变化; 对 $t \rightarrow cg$, 其分支比在小质量区随 m_{Π_t} 的增加快速减小. 在大多数参数范围内, 顶夸克稀有衰变分支比的数量

级为: $Br(t \rightarrow c\bar{g}) \sim 10^{-5}$, $Br(t \rightarrow c\bar{Z}) \sim 10^{-5}$, $Br(t \rightarrow c\bar{\gamma}) \sim 10^{-7}$.

为了把我们的数据结果同其他模型比较,在表 1 中列出了标准模型 SM^[7], 最小超对称理论 MSSM^[13], TC2 模型预言的顶夸克稀有衰变分支比 $Br(t \rightarrow c\bar{V})$ 的最大数量级.

表 1 顶夸克稀有衰变 $t \rightarrow c\bar{V}$ 分支比的理论预言值

	SM	MSSM	TC2
$Br(t \rightarrow c\bar{Z})$	$O(10^{-13})$	$O(10^{-7})$	$O(10^{-4})$
$Br(t \rightarrow c\bar{\gamma})$	$O(10^{-13})$	$O(10^{-7})$	$O(10^{-6})$
$Br(t \rightarrow c\bar{g})$	$O(10^{-11})$	$O(10^{-4})$	$O(10^{-4})$

从表 1 可以看出, TC2 模型预言顶夸克稀有衰变分支比 $Br(t \rightarrow c\bar{V})$ 要比 SM 和 MSSM 预言值大几个数量级. H_t 和 h_t^0 的贡献可以使顶夸克稀有衰变分支比 $Br(t \rightarrow c\bar{V})$ 比 SM 预言值大 6—9 个数量级. 而且, TC2 模型预言的 $Br(t \rightarrow c\bar{Z})$ 值比 MSSM 预言值要大 3 个数量级, 因此, 过程 $t \rightarrow c\bar{Z}$ 可以用来区分 TC2 模型和 MSSM.

为了讨论在未来对撞机上能否探测顶夸克稀有衰变, 看一下各种对撞机的探测精度范围^[14]:

Run II (for 100fb^{-1} of integrated luminosity):

$$Br(t \rightarrow q(u, c)\bar{\gamma}) \geq 8.4 \times 10^{-5},$$

$$Br(t \rightarrow q(u, c)\bar{Z}) \geq 6.3 \times 10^{-4};$$

Run II (for 10fb^{-1} of integrated luminosity):

$$Br(t \rightarrow q(u, c)\bar{\gamma}) \geq 4 \times 10^{-4},$$

$$Br(t \rightarrow q(u, c)\bar{Z}) \geq 3.8 \times 10^{-3};$$

LHC (for 100fb^{-1} of integrated luminosity):

$$Br(t \rightarrow q(u, c)\bar{\gamma}) \geq 10^{-4} \text{ (ATLAS)},$$

$$Br(t \rightarrow q(u, c)\bar{\gamma}) \geq 3.4 \times 10^{-5} \text{ (MS)},$$

$$Br(t \rightarrow q(u, c)\bar{Z}) \geq 2 \times 10^{-4};$$

LC (for 100fb^{-1} of integrated luminosity):

$$Br(t \rightarrow c\bar{V}) \geq 5 \times 10^{-4}. \quad (8)$$

与上面列出的实验探测精度比较, 可以看出, TC2 模型预言的顶夸克稀有衰变 $t \rightarrow c\bar{V}$ 分支比在实验的阈值范围内, 特别是对 $t \rightarrow c\bar{Z}$, $t \rightarrow c\bar{\gamma}$ 过程.

综上所述, 我们计算了 TC2 理论框架下顶夸克稀有衰变 $t \rightarrow c\bar{V}$ 的分支比. 研究结果发现, 在合理的参数范围内, 过程 $t \rightarrow c\bar{Z}$, $t \rightarrow c\bar{g}$ 分支比可以达到 10^{-4} , 能够被未来高能实验所探测到. 因此, 顶夸克稀有衰变 $t \rightarrow c\bar{V}$ 过程为我们提供一条检验 TC2 模型的方法. 而且, 由于 TC2 模型预言的 $Br(t \rightarrow c\bar{Z})$ 值比 MSSM 预言值要高 3 个数量级, $t \rightarrow c\bar{Z}$ 过程可以用来区分 TC2 模型和 MSSM.

参考文献 (References)

- Hill C T. Phys. Lett., 1995, **B345**:483; Lane K, Eichten E. Phys. Lett., 1995, **B352**:382; Lane K. Phys. Lett., 1998, **B433**:96
- Buchalla G et al. Phys. Rev., 1996, **D53**:5185
- YUE C X. Phys. Rev., 2001, **D64**:095004
- HE H J, YUAN C P. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**:28; Burdman G. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**:2888
- WANG X L et al. Phys. Rev., 2000, **D66**:075009; WANG X L et al. Phys. Rev., 2000, **D66**:075013; CAO J J et al. Phys. Rev., 2003, **D67**:071701
- ZHANG Jin-Yu et al. HEP & NP, 2002, **26**:1209 (in Chinese) (张晋宇等. 高能物理与核物理, 2002, **26**:1209)
- Eilan G, Hewett J L, Soni A. Phys. Rev., 1991, **D44**:1473
- Frey R et al. FERMIAB-CONF-97-085, hep-ph/9704243; Aguilar-Saavedra J A, Branco G C. Phys. Lett., 2000, **B495**:347; Aguilar-Saavedra J A. Phys. Lett., 2001, **B502**:115
- WANG Xue-Lei et al. HEP & NP, 1995, **19**:534 (in Chinese) (王学雷等. 高能物理与核物理, 1995, **19**:534)
- Ahmadov A et al. Top Quark Physics, hep-ph/0003033; Simmons E H. Top Physics, hep-ph/0011244
- YUE Chong-Xing et al. TUHEP-TH-99109; Phys. Rev., 2000, **D62**:055005; YUE Chong-Xing et al. Phys. Rev., 2000, **D62**:055005; YUE Chong-Xing et al. Phys. Rev., 2001, **D64**:095004
- Chivukula R S et al. Phys. Rev., 1999, **D59**:075003
- Diaz R A, Martine R, Alexis Rodriguez J. hep-ph/0103307
- Guasch J, Sola J. Nucl. Phys., 1999, **B562**:3; Diaz R A, Martinez R, Rodriguez J A. hep-ph/010330; Simmons E H. hep-ph/0211335; Bejar S, Guasch J, Sola J. hep-ph/0101294

Rare Top Quark Decays $t \rightarrow cV$ in the Topcolor-Assisted Technicolor Model *

LU Gong-Ru YIN Fu-Rong WANG Xue-Lei¹⁾ WAN Ling-De

(College of Physics and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453002, China)

Abstract We consider the rare top quark decays in the framework of topcolor-assisted technicolor (TC2) model. We find that the contributions of top-pions and top-Higgs predicted by the TC2 model can enhance the SM branching ratios by as much as 6—9 orders of magnitude. i. e., in the most case, the orders of magnitude of branching ratios are $Br(t \rightarrow cg) \sim 10^{-5}$, $Br(t \rightarrow cZ) \sim 10^{-5}$, $Br(t \rightarrow c\gamma) \sim 10^{-7}$. With the reasonable values of the parameters in TC2 model, such rare top quark decays may be testable in the future experiments. So, rare top quark decays provide us a unique way to test TC2 model.

Key words topcolor-assisted technicolor (TC2) model, top quark rare decay, branching ratio

Received 27 June 2003

* Supported by National Natural Science Foundation of China(10175017), Excellent Youth Foundation of Henan Scientific Committee(02120000300) and Henan Innovation Project for University Prominent Research Talents(2002KYCX009)

1) E-mail: wangxuelei@263.net