

Top-Higgs 和 Top-Charm 在 高能正负电子对撞机上的联合产生*

贾永¹⁾ 王如梅 项仕标

(郑州轻工业学院技术物理系 郑州 450002)

摘要 在顶色辅助的人工色 (TC2) 模型框架下, 研究了 top-Higgs 和 t-c 夸克的联合产生过程 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}h_t^0$. 结果显示此过程的产生截面在合理的参数空间内可达到 10fb, 在 高能直线对撞机 (LC) 上每年可产生几百个事例. 通过此过程可用来探测 top-Higgs.

关键词 top-Higgs 新物理 TC2 模型

人们普遍相信顶夸克对超出标准模型的新物理是敏感的. 在一些流行的新物理模型如最小超对称模型和 TC2 模型中^[1], 顶夸克有一些奇特的产生和衰变道, 其中包含味改变中性流过程, 这些过程在 SM 中被压低, 但在一些新物理模型中被有意义地提高^[2, 3]. 研究这些过程对探测新物理模型是一个好的方法. LHC 在 TeV 标度可以直接探测超出标准模型的新物理 (NP), 同时高能直线 e^+e^- 对撞机 (LC) 将作为 LHC 的补充. 除此以外, 一些新物理预言, 如果质心能量足够高, 在 LC 上一些新粒子效应将被放大, 甚至可放大到即使一些粒子质量超出质心能量也可对真实的电弱可观测量产生间接的影响. 对研究新物理来说, LC 是理想的工具^[4].

TC2 模型是非常有吸引力的一种新物理模型, 它在通过 (tt) 凝聚产生大的顶夸克质量的同时, 提供了一种可能的电弱对称性破缺机制. 在 TC2 模型中, EWSB 主要由 TC 相互作用产生, ETC 相互作用对所有的夸克和轻子质量都有贡献, 包括对顶夸克质量有一非常小的贡献, 即 $m'_t = \epsilon t$, 这里 $\epsilon \ll 1$ ^[5]. topcolor 相互作用对 EWSB 有小的贡献, 同时给出顶夸克质量的主要部分 $m_t - m'_t = (1 - \epsilon)m_t$, 这和 QCD 中轻夸克形成是相似的. TC2 模型预言了 3 个 top-pion 介子 π_t^0 , π_t^\pm 和一个中性 top-Higgs h_t^0 等新粒子, 这些新粒子和 EWSB 有直接的关联, 这样在现在和将来的对撞机上,

研究这些新粒子的物理迹象可以揭示 EWSB 和验证 TC2 模型. 文献[6,7]已经研究了 top-pions 的产生和衰变规律. 在本文中, 将研究包括味改变耦合顶角 h_t^0 -t-c 的 top-Higgs 产生过程 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}h_t^0$. 结果表明, 在合理的参数空间内此过程产生截面可达 10fb, 可用来探测 top-Higgs 和验证 TC2 模型.

在 TC2 模型中, 为了在顶夸克和底夸克之间不产生 $m_b \approx m_t$ 而得到电弱对称性, topcolor 规范群被取 $SU(3) \otimes U(1)$ 强耦合. 在 1TeV 的标度, TC2 模型的动力学结构是如下形式^[5]:

$$SU(3)_1 \otimes SU(3)_2 \otimes U(1)_{Y_1} \otimes U(1)_{Y_2} \otimes SU(2)_L \rightarrow SU(3)_{\text{QCD}} \otimes U(1)_{\text{EM}}, \quad (1)$$

$SU(3)_1 \otimes U(1)_{Y_1} (SU(3)_2 \otimes U(1)_{Y_2})$ 只与第三代 (一, 二代) 费米子耦合, $U(1)_{Y_2}$ 是 $U(1)_Y$ 简单的强度增加, 方程(1)描述的破缺方式预言了包括色八重态规范玻色子 topgloun B_μ^A 和色单态规范玻色子 Z' . 新规范玻色子 Z' 和一般的费米子的耦合为

$$\frac{1}{2}g_1 \left[\frac{1}{3} \cot \theta' Z'_\mu (\bar{t}_L \gamma^\mu t_L + 2\bar{t}_R \gamma^\mu t_R) + \frac{1}{3} \tan \theta' Z'_\mu (\bar{c}_L \gamma^\mu c_L + 2\bar{c}_R \gamma^\mu c_R) + \tan \theta' Z'_\mu (\bar{e}_L \gamma^\mu e_L + 2\bar{e}_R \gamma^\mu e_R) \right], \quad (2)$$

2005 - 01 - 19 收稿

* 河南省自然科学基金(0311012300)资助

1) E-mail: yongjia@zzuli.edu.cn

在 TeV 标度, g_1 是 $U(1)_{Y_1}$ 耦合参数, θ' 是混合角, 且 $\tan\theta' = g_1/(2\sqrt{\pi k_1})$, 为了在产生 $(t\bar{t})$ 的同时不产生 $(b\bar{b})$, 耦合参数 k_1 应该满足 $k_1 \leq 1$ 的条件^[8]. 在下面的计算中取 $k_1 = 1$, 相应的 $\tan^2\theta' = 0.01$. 对 TC2 模型来说, topcolor 相互作用不是普适的, 没有 GIM 机制. 非普适规范相互作用导致大的味改变耦合顶角, 因此 top-pion 和第三代夸克有大的 Yukawa 耦合和新的味改变标量耦合. 对 top-Higgs h_t^0 , 其相应耦合为^[1]

$$h_t^0 \bar{t} c: \frac{m_t}{\sqrt{2}F_t} \frac{\sqrt{\nu_w^2 - F_t^2}}{\nu_w} K^{tc}, \quad (3)$$

这里 $F_t = 50\text{GeV}$ 是 top-Higgs 的衰变参数, $\nu_w = \nu/\sqrt{2} = 174\text{GeV}$. 其他参数为

$$K_{UL}^{tt} = K_{DL}^{bb} = 1, \quad K_{UR}^{tt} = 1 - \varepsilon, \quad K_{UR}^{tc} \leq \sqrt{2\varepsilon - \varepsilon^2}. \quad (4)$$

由上边的讨论可以把 $t\bar{c}h_t^0$ 产生道写成如下过程:

$$e^+e^- \rightarrow \gamma^*, Z^*, Z'^* \rightarrow t\bar{c}h_t^0. \quad (5)$$

使用方程(2)—(4)和相应的费曼规则, $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\pi_t^0$ 过程的不变振幅可写为

$$\mathcal{M} = \mathcal{M}_a^\gamma + \mathcal{M}_b^\gamma + \mathcal{M}_a^Z + \mathcal{M}_b^Z + \mathcal{M}_a^{Z'} + \mathcal{M}_b^{Z'}, \quad (6)$$

其中

$$\mathcal{M}_a^\gamma = \bar{v}(p_2)(-i)e\gamma_\mu u(p_1) \frac{-ig^{\mu\nu}}{s} \times \bar{u}(p_3)i\beta \frac{i}{\not{p}_3 + \not{p}_5 - m_c} ie\frac{2}{3}\gamma_\nu v(p_4), \quad (7)$$

$$\mathcal{M}_b^\gamma = \bar{v}(p_2)(-i)e\gamma_\mu u(p_1) \frac{-ig^{\mu\nu}}{s} \times \bar{u}(p_3)ie\frac{2}{3}\gamma_\nu \frac{i}{\not{p}_4 + \not{p}_5 - m_t} i\beta v(p_4), \quad (8)$$

$$\mathcal{M}_a^Z = \bar{v}(p_2)i\gamma_\mu(v_e + a_e\gamma_5)u(p_1) \frac{-ig^{\mu\nu}}{s - m_Z^2 + im_Z\Gamma_Z} \times \bar{u}(p_3)i\beta \frac{i}{\not{p}_3 + \not{p}_5 - m_c} i\gamma_\nu(v_c + a_c\gamma_5)v(p_4), \quad (9)$$

$$\mathcal{M}_b^Z = \bar{v}(p_2)i\gamma_\mu(v_e + a_e\gamma_5)u(p_1) \frac{-ig^{\mu\nu}}{s - m_Z^2 + im_Z\Gamma_Z} \times \bar{u}(p_3)i\gamma_\nu(v_t + a_t\gamma_5) \frac{i}{\not{p}_4 + \not{p}_5 - m_t} i\beta v(p_4), \quad (10)$$

$$\mathcal{M}_a^{Z'} = \bar{v}(p_2)i\gamma_\mu(v'_e + a'_e\gamma_5)u(p_1) \frac{-ig^{\mu\nu}}{s - M_{Z'}^2 + iM_{Z'}\Gamma_{Z'}} \times \bar{u}(p_3)i\beta \frac{i}{\not{p}_3 + \not{p}_5 - m_c} i\gamma_\nu(v'_c + a'_c\gamma_5)v(p_4), \quad (11)$$

$$\mathcal{M}_b^{Z'} = \bar{v}(p_2)i\gamma_\mu(v'_e + a'_e\gamma_5)u(p_1) \frac{-ig^{\mu\nu}}{s - M_{Z'}^2 + iM_{Z'}\Gamma_{Z'}} \times \bar{u}(p_3)i\gamma_\nu(v'_t + a'_t\gamma_5) \frac{i}{\not{p}_4 + \not{p}_5 - m_t} i\beta v(p_4). \quad (12)$$

上式中,

$$\beta = \frac{m_t}{\sqrt{2}F_t} \frac{\sqrt{\nu_w^2 - F_t^2}}{\nu_w} K^{tc},$$

$$v_e = \frac{e}{4S_W C_W} (4S_W^2 - 1), \quad a_e = \frac{e}{4S_W C_W},$$

$$v_t = v_c = \frac{e}{4S_W C_W} \left(1 - \frac{8}{3}S_W^2\right), \quad a_t = a_c = -\frac{e}{4S_W C_W},$$

$$v'_e = \frac{3}{4}\sqrt{4\pi k_1} \tan^2\theta', \quad a'_e = -\frac{1}{4}\sqrt{4\pi k_1} \tan^2\theta',$$

$$v'_t = \frac{5}{12}\sqrt{4\pi k_1}, \quad a'_t = \frac{1}{4}\sqrt{4\pi k_1},$$

$$v'_c = \frac{5}{12} \tan^2\theta' \sqrt{4\pi k_1}, \quad a'_c = \frac{1}{4} \tan^2\theta' \sqrt{4\pi k_1}.$$

\sqrt{s} 是 LC 的质心能量, 耦合常数取 $k_1 = 1$, 相应的混合角取 $\tan^2\theta' = 0.01$. 对于 topcolor 规范玻色子 Z' , 它的主要衰变模式是 $t\bar{t}$, $b\bar{b}$, 其宽度为^[9]

$$\Gamma_{Z'} \approx \frac{g_1^2 \cot^2\theta'}{12\pi} M_{Z'} = \frac{1}{3} M_{Z'}, \quad (13)$$

为得到数值结果, 取标准模型参数 $\sin^2\theta_W = 0.2315$,

$\alpha = \frac{1}{128.8}$, $m_Z = 91.2\text{GeV}$, $\Gamma_Z = 2.495\text{GeV}$, $m_t = 175\text{GeV}$ ^[10]. 在 TC2 模型中, m_{h_t} , K^{tc} , $M_{Z'}$ 是自由参数, 为了显示这些参数对数值结果的影响, 取 $150\text{GeV} \leq m_{\pi_t} \leq 350\text{GeV}$, $0.01 \leq K^{tc} \leq 0.1$, $2\text{TeV} \leq M_{Z'} \leq 6\text{TeV}$ ^[11].

在图 1 中, 绘制了 $t\bar{c}h_t^0$ 的产生截面 σ 随着 m_{h_t} 变化的曲线, 质心能量取 $\sqrt{s} = 1.5\text{TeV}$, $M_{Z'} = 2.5\text{TeV}$, ε 分别取 0.03, 0.05, 0.08. 结果显示, $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}h_t^0$ 的产生截面随 m_{h_t} 的增大而减小, 对于小的 m_{h_t} , 截面可达 10fb 量级. 图 2 还显示截面 σ 对参数 K^{tc} 不敏感, 因此在下面的计算中将取 $K^{tc} = 0.05$.

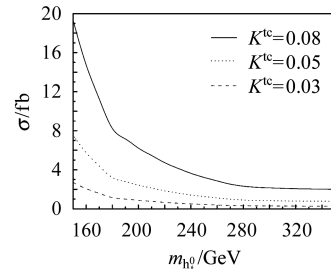


图 1 当 $\sqrt{s} = 1.5\text{TeV}$ 时, σ 随着 $m_{h_t^0}$ 变化的曲线图 $m_{Z'} = 2.5\text{TeV}$ 和 $K^{tc} = 0.03, 0.05, 0.08$.

为了明确显示新规范玻色子 Z' 对 $t\bar{c}h_t^0$ 产生截面的影响, 在图 2 中取 $\sqrt{s} = 1.5\text{TeV}$, 让 σ 作为 $M_{Z'}$ 的函数. 3 条曲线分别代表 $m_{h_t^0} = 150\text{GeV}$, 250GeV , 350GeV . 从图 2 可以得出 σ 随 $M_{Z'}$ 的增大而减小, 在大部分参数空间内产生截面大于 1fb. 图 3 给出当

$\sqrt{s} = 1.5\text{TeV}$, $K^{tc} = 0.05$ 时, $c\text{-}h_t^0$ 不变质量分布曲线. 可以看出, 由于共振效应在 $m_t + m_c$ 附近有一个共振峰, 这一共振峰可以在将来的 LC 实验中观测到.

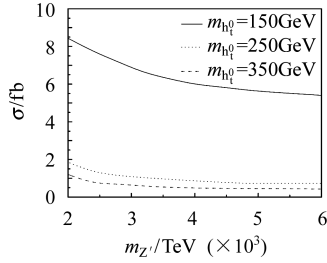


图 2 σ 作为 $M_{Z'}$ 的函数的曲线图

$K^{tc} = 0.05$, $\sqrt{s} = 1.5\text{TeV}$ 和 $m_{h_t^0} = 250\text{GeV}$, 350GeV , 450GeV .

综上所述, 在 TC2 模型中我们研究了味改变过程 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}h_t^0$. 对于轻的 h_t^0 , 存在共振效应, 该效应使产生截面显著增大, 可以通过 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}h_t^0$ 过程探测轻的

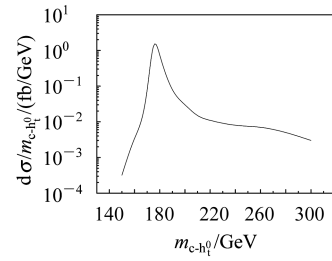


图 3 $m_{c\text{-}h_t^0}$ 不变质量分布曲线

$\sqrt{s} = 1.5\text{TeV}$, $m_{Z'} = 2.5\text{TeV}$, $K^{tc} = 0.05$ 和 $m_{h_t^0} = 150\text{GeV}$.

top-Higgs. 在标准模型中, 树图水平不存在味改变耦合, 所以味改变过程 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}h_t^0$ 的背景非常清晰, 即使对小的产生截面, 少的 h_t^0 事例也可能被将来的 LC 实验探测到. 因此, 通过 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}h_t^0$ 过程探测 top-Higgs, 从而检验 TC2 模型是非常有意义的.

参考文献(References)

- Hill C T. Phys. Lett., 1995, **B345**: 483; Lane K, Eichten E. Phys. Lett., 1995, **B352**: 383
- HE H J, YUAN J P. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**: 28; Burdman G. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**: 2888
- WANG X L et al. Phys. Rev., 2002, **D66**: 075009; YUE C X et al. Phys. Lett., 2001, **B508**: 290
- Battaglia M et al. hep-ph/0101114; Dominici D. hep-ph/0110084; Battaglia M et al. hep-ph/0112270
- Buchalla G et al. Phys. Rev., 1996, **D53**: 5185
- ZHANG Jin-Yu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2002, **26**(12): 1209 (in Chinese)
(张晋宇等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(12): 1209)
- YUE Chong-Xing et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2002, **26**(7): 672 (in Chinese)
(岳崇兴等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(7): 672)
- Popovic M B, Simmons E H. Phys. Rev., 1998, **D58**: 095007
- Hill C T, Parke S T. Phys. Rev., 1994, **D49**: 4454
- Green D et al(Particle Data Group). Eur. Phys. J., 2000, **C115**: 1
- Burdman G et al. Phys. Lett., 2001, **B514**: 41

Associated Production of Top-Higgs with Top-Charm at the High Energy e^+e^- Colliders*

JIA Yong¹⁾ WANG Ru-Mei XIANG Shi-Biao

(Department of Technology and Physics, Zhengzhou Institute of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract We study a top-Higgs production process $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}h_t^0$ in the topcolor assisted technicolor(TC2) model. The studies show that the production cross section of $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}h_t^0$ is at the order of magnitude 10fb in the reasonable parameters space of TC2 model. A few hundred events of top-Higgs can be produced each year at the high energy linear e^+e^- colliders(LC). The top-Higgs may be directly observed via this process.

Key words top-Higgs, new physics, topcolor-assisted technicolor (TC2) model

Received 19 January 2005

*Supported by Natural Science Foundation of Henan Province (0311012300)

1) E-mail: yongjia@zzuli.edu.cn