

ILC 上 Z 玻色子与荷电 top-pion 对联合产生过程的研究*

韩金钟^{1)†} 秦臻²⁾ 王学雷^{1)‡}

1) (河南师范大学物理与信息工程学院, 新乡 453007)

2) (华北水利水电学院, 郑州 450011)

(2011 年 4 月 20 日收到; 2011 年 5 月 9 日收到修改稿)

在国际直线对撞机 (ILC) 上顶色辅助的人工色 (TC2) 模型下对 Z 玻色子与荷电 top-pion 对联合产生过程 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ 进行了研究. 计算了过程 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ 的产生截面, 发现在 TC2 模型所允许的参数空间范围之内该过程的截面最大可达到 1 fb. 考虑到荷电 top-pion 的主要的衰变模式 $\pi_t^+ \rightarrow t\bar{b}$, 发现该截面在 ILC 能产生很可观的事例数.

关键词: 顶色辅助人工色模型, 直线对撞机, 散射截面

PACS: 12.60.Nz, 13.66.Hk, 14.80.Va

1 引言

粒子物理的标准模型 (SM), 是描述基本粒子及其强相互作用和电弱相互作用的规范理论, 创建 40 多年来, 虽然已被大量的精确实验所检验, 但其所预言的 Higgs 玻色子至今还没找到. 此外, 它还不能解释电弱对称性破缺的来源, 而且其标量场部分存在平庸性、不自然性等问题. 寻找 Higgs 玻色子和解释电弱对称性自发破缺机理成了粒子物理学中目前和未来一段时间中相当重要的任务.

平庸性和不自然性源自标准模型中的基本黑格斯场, 作为避免这种缺陷的一种可能方法, 人工色理论被引入, 时至今日该理论仍是超出标准模型之外的新物理模型中深受欢迎的候选者之一^[1]. 在各种各样的人工色 (technicolor) 模型中, 顶色辅助的人工色 (TC2) 模型^[2] 是其中最为理想的一个, 它不但能和目前的实验检验数据相符合, 而且还把 top 夸克和电弱对称性破缺联系在一起. 在该模型中, 顶色相互作用对电弱对称性破缺所起的贡献很小, 但它负责产生 top 夸克的大部分质量, $m_t' = (1 - \varepsilon)m_t$ ($\varepsilon = 0.03-0.1$)^[3], ε 是

一个与模型有关的混合参数. 人工色相互作用在电弱自发破缺中起主导作用, 扩充的人工色 (ETC) 则负责产生轻质量的费米子质量, 而对 top 夸克仅仅产生大小为 εm_t 的贡献. TC2 模型的一个最为重要的特色就是它预言了三个 CP 奇宇称的标量粒子 top-pions (π_t^+, π_t^0) 和一个 CP 偶宇称标量粒子 top-higgs (h_t^0), 它们的质量都在几百个 GeV. 因此, 在高能对撞机上寻找这些典型的粒子将会为探求电弱对称性自发破缺和费米子味物理提供重要的信息. 此外, 发现这些典型的新粒子也将会为检验 TC2 模型提供直接的证据.

如果新粒子或者相互作用被目前正在运行的大型强子对撞机 (LHC) 探测到, ILC 在精确测量分析方面将为 LHC 提供更为重要的有价值的信息. 在高能对撞机上新物理模型下已有很多学者进行了很广泛的唯象研究^[4-6]. 到目前为止, 对于双 Higgs 产生过程 $e^+e^- \rightarrow hh$ 以及 Higgs 和 Z 玻色子的联合产生过程 $e^+e^- \rightarrow Zhh$ 在标准模型的框架内在文献[7]中已进行了研究, 并且在超出标准模型的新物理模型中对于类似的中性和荷电标量粒产生过程在文献 [8] 中也有研究. 在 TC2

* 国家自然科学基金 (批准号: 10775039) 和教育部博士点基金 (批准号: 20094104110001) 资助的课题.

† E-mail: hanjinzhong0373@sohu.com

‡ E-mail: wangxuelei@sina.com

模型中, 文献 [9] 研究了直线对撞机上荷电 top-pion 对的产生过程, 即 $e^+e^- \rightarrow \pi_t^+\pi_t^-$. 为了寻找探测荷电 top-pion 对的最佳产生过程, 我们研究了 ILC 上 Z 玻色子与荷电 top-pion 对的联合产生过程 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$.

2 过程 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ 的不变产生振幅的计算

在图 1 中我们给出了过程 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ 的费曼图, 在 TC2 模型中对于耦合 $A^\mu\pi_t^+\pi_t^-$

和 $Z^\mu\pi_t^+\pi_t^-$ 的费曼规则能在文献 [9] 中找到

$$A^\mu\pi_t^+\pi_t^- : e(p_+ - p_-)^\mu, \quad (1)$$

$$Z^\mu\pi_t^+\pi_t^- : \frac{e(1 - 2s_W^2)}{s_W c_W}(p_+ - p_-)^\mu, \quad (2)$$

式中, $s_W = \sin\theta_W$, $c_W = \cos\theta_W$, θ_W 是温伯格角, p_+ 和 p_- 表示末态粒子 π_t^+ 和 π_t^- 的动量, 规定向外为正方向.

利用上面的耦合, 过程 $e^-(p_1)e^+(p_2) \rightarrow \pi_t^+(p_3)\pi_t^-(p_4)Z(p_5)$ 的不变产生振幅可写成如下形式:

$$M_{e^+e^-} = M_a^\gamma + M_a^Z + M_b^\gamma + M_b^Z + M_c^\gamma + M_c^Z + M_d^\gamma + M_d^Z, \quad (3)$$

$$M_a^\gamma = -ie^3 \frac{1 - 2s_W^2}{s_W c_W} G(p_4 + p_5, m_\pi) G(p_1 + p_2, 0) \times (2p_4 + p_5)_\nu \varepsilon^\nu(p_5) \bar{v}_{e^+}(p_2) \gamma^\mu u_{e^-}(p_1) (p_4 + p_5 - p_3)_\mu, \quad (4)$$

$$M_a^Z = ie^3 \frac{(1 - 2s_W^2)^2}{s_W^3 c_W^3} G(p_4 + p_5, m_\pi) G(p_1 + p_2, m_Z) (2p_4 + p_5)_\nu \times \varepsilon^\nu(p_5) \bar{v}_{e^+}(p_2) \gamma^\mu \left[\left(-\frac{1}{2} + s_W^2 \right) P_L + s_W^2 P_R \right] u_{e^-}(p_1) (p_4 + p_5 - p_3)_\mu, \quad (5)$$

$$M_b^\gamma = -ie^3 \frac{1 - 2s_W^2}{s_W c_W} G(p_3 + p_5, m_\pi) G(p_1 + p_2, 0) \times (2p_3 + p_5)_\nu \varepsilon^\nu(p_5) \bar{v}_{e^+}(p_2) \gamma^\mu u_{e^-}(p_1) (p_3 + p_5 - p_4)_\mu, \quad (6)$$

$$M_b^Z = ie^3 \frac{(1 - 2s_W^2)^2}{s_W^3 c_W^3} G(p_3 + p_5, m_\pi) G(p_1 + p_2, m_Z) (2p_3 + p_5)_\nu \times \varepsilon^\nu(p_5) \bar{v}_{e^+}(p_2) \gamma^\mu \left[\left(-\frac{1}{2} + s_W^2 \right) P_L + s_W^2 P_R \right] u_{e^-}(p_1) (p_3 + p_5 - p_4)_\mu, \quad (7)$$

$$M_c^\gamma = \frac{e^3}{s_W c_W} G(p_3 + p_4, 0) G(p_5 - p_2, m_e) \varepsilon_\mu(p_5) (p_4 - p_3)_\nu \times \bar{v}_{e^+}(p_2) \gamma^\mu \left[\left(-\frac{1}{2} + s_W^2 \right) P_L + s_W^2 P_R \right] (\not{p}_5 - \not{p}_2 + m_e) \gamma^\nu u_{e^-}(p_1), \quad (8)$$

$$M_c^Z = -\frac{e^3}{s_W^3 c_W^3} (1 - 2s_W^2) G(p_3 + p_4, m_Z) G(p_5 - p_2, m_e) \times \bar{v}_{e^+}(p_2) \gamma^\mu \left[\left(-\frac{1}{2} + s_W^2 \right) P_L + s_W^2 P_R \right] (\not{p}_5 - \not{p}_2 + m_e) \times \gamma^\nu \left[\left(-\frac{1}{2} + s_W^2 \right) P_L + s_W^2 P_R \right] u_{e^-}(p_1) \varepsilon_\mu(p_5) (p_4 - p_3)_\nu, \quad (9)$$

$$M_d^\gamma = \frac{e^3}{s_W c_W} G(p_3 + p_4, 0) G(p_1 - p_5, m_e) \bar{v}_{e^+}(p_2) \gamma^\mu (\not{p}_1 - \not{p}_5 + m_e) \times \gamma^\nu \left[\left(-\frac{1}{2} + s_W^2 \right) P_L + s_W^2 P_R \right] u_{e^-}(p_1) \varepsilon_\nu(p_5) (p_4 - p_3)_\mu, \quad (10)$$

$$M_d^Z = -\frac{e^3}{s_W^3 c_W^3} (1 - 2s_W^2) G(p_3 + p_4, m_Z) G(p_1 - p_5, m_e) \times \bar{v}_{e^+}(p_2) \gamma^\mu \left[\left(-\frac{1}{2} + s_W^2 \right) P_L + s_W^2 P_R \right] (\not{p}_1 - \not{p}_5 + m_e) \times \gamma^\nu \left[\left(-\frac{1}{2} + s_W^2 \right) P_L + s_W^2 P_R \right] u_{e^-}(p_1) \varepsilon_\nu(p_5) (p_4 - p_3)_\mu, \quad (11)$$

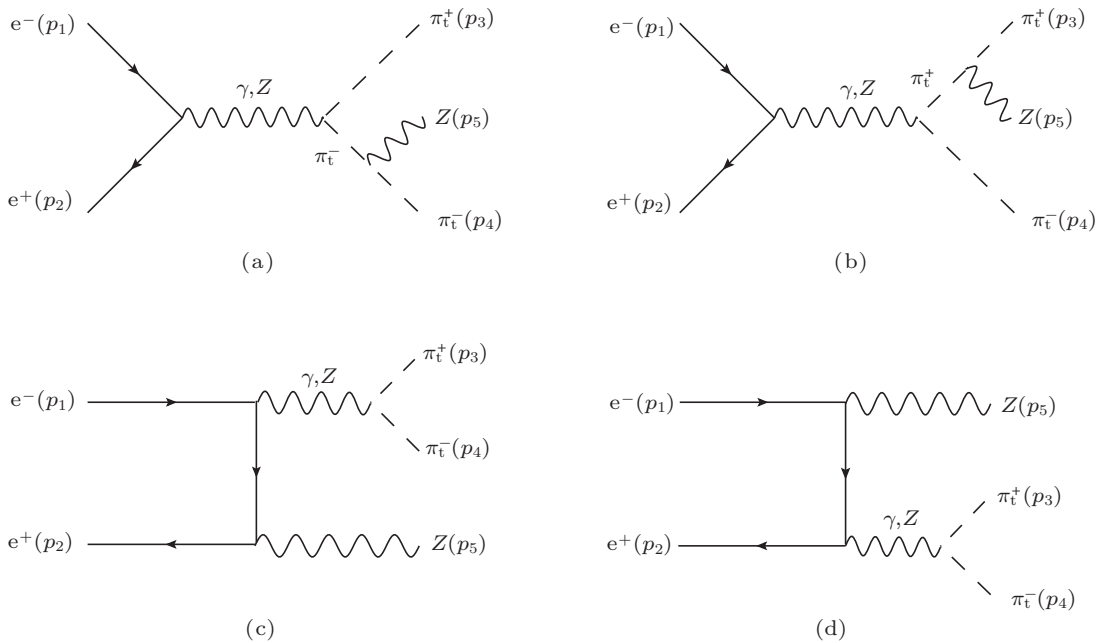


图1 TC2模型下过程 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ 的费曼图

这里, $P_L = \frac{1}{2}(1 - \gamma_5)$ 和 $P_R = \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)$ 分别是左、右手征投影算符; p_1, p_2 分别是初态入射粒子 e^-, e^+ 的动量, 方向是向内的; p_3, p_4 和 p_5 分别表示末态出射粒子 π_t^+, π_t^- 和 Z 玻色子的动量, 方向是向外的. 为了简化, 我们还定义 $G(p, m) = \frac{1}{p^2 - m^2}$.

为了得到截面的数值结果, 我们采用文献 [10] 的方法来计算振幅, 直接对振幅进行数值计算, 而不是先给出振幅模方的解析结果, 采用这种方法可大大简化我们的计算. 最后, 我们还用 CalcHEP 计算程序 [11] 检验了我们的结果.

3 联合产生截面的数值分析

为了得到截面的数值结果, 我们取标准模型中的一些参数值为: $m_Z = 91.87 \text{ GeV}$, $m_e = 0.0051 \text{ GeV}$, $\Gamma_Z = 2.49 \text{ GeV}$, $s_W^2 = 0.231$, $\alpha_e = 1/128.8$, $\nu = 246 \text{ GeV}$ [12].

除了上述参数外, 在产生振幅之中也包含与 TC2 模型有关的参数 m_π . TC2 模型理论预言的 m_π 的质量大致在 $100\text{--}300 \text{ GeV}$. 在该文中, 为了给出更为普遍的预测, 计算过程 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ 的产生截面时我们把 m_π 的质量取为 $150\text{--}400 \text{ GeV}$.

在图 2 中, 我们画出了过程 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ 随 m_π 变化的曲线图, 图中的三条曲线分别对应

质心能量取为固定值为 $1000, 1500, 2000 \text{ GeV}$. 从该图我们能看出产生截面 σ 随着质量 m_π 的增加而减小, 这是由于相空间被大质量的 m_π 压低的缘故. 此外, 我们还发现该过程的产生截面的贡献主要来自于图 1(c),(d), 这是因为图 1(a),(b) 受到一个质心能量很大时的 S 道传播子的强烈压低. 然而, 在图 1(c),(d) 存在的 T 道的贡献能抬高该过程的截面. 总之, 在合理的参数空间范围之内, 总的产生截面在 $10^{-1}\text{--}1 \text{ fb}$ 的量级. 当对应的质心能量取 $\sqrt{s} = 1000 \text{ GeV}$ 和 $\sqrt{s} = 1500 \text{ GeV}$ 时, 产生截面 σ 的范围分别在 $0.07\text{--}1.03 \text{ fb}$ 和 $0.27\text{--}1.29 \text{ fb}$. 如果我们假定 ILC 的积分亮度 $\mathcal{L} = 500 \text{ fb}^{-1}$, 那么在 ILC 上每年将会产生几十甚至几百个事例数.

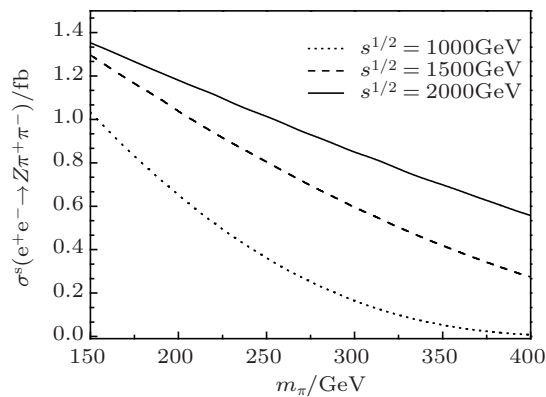


图2 TC2模型下总产生截面 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ 随 m_π 变化的曲线

为了看出产生截面随质心能量的变化, 在图 3

画出了质量 m_π 分别取为 150, 250 和 350 GeV 时产生截面随质心能量 \sqrt{s} 的变化曲线图. 如上所述, 产生截面的主要贡献来自 T 道的图 1(c),(d), 因此随着质心能量的增加截面值增加, 同时我们很容易看出在合理的参数空间范围其截面值最大能达到 1 fb.

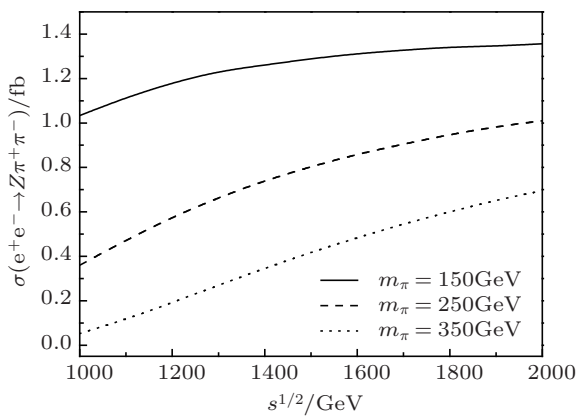


图 3 TC2 模型下总产生截面 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ 随 \sqrt{s} 变化的曲线

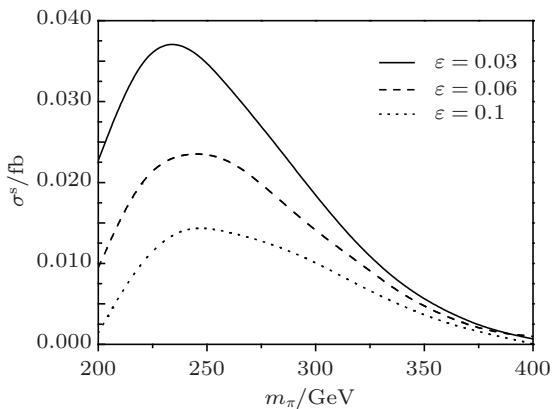


图 4 TC2 模型下过程 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ 的 $t\bar{t}b\bar{b}b\bar{b}$ 末态产生截面随 m_π 变化的曲线

由于标量粒子 π_t^+ 和 top 夸克的主要衰变道是 $\pi_t^+ \rightarrow t\bar{b}$ [13] 和 $t \rightarrow W^+b \rightarrow l^+\nu b$, 在 Z 的轻子衰变模式 $Z \rightarrow l^+l^-$ 下, $Z\pi_t^+\pi_t^-$ 末态信号是 4 个 b

夸克喷注 +4 个带电轻子 (e 或 μ) + 丢失能量 E_T , 而在 Z 的强子衰变模式 $Z \rightarrow q\bar{q}$ 下, $Z\pi_t^+\pi_t^-$ 末态信号表现为 6 个喷注 $q\bar{q}b\bar{b}b\bar{b}$ + 2 个轻子 + 丢失能量 E_T . 对于末态的 Z 玻色子通过它的轻子衰变可获得一个较为清晰的鉴别信号. 在 $Z \rightarrow b\bar{b}$ 的情况下, 对于 $t\bar{t}b\bar{b}b\bar{b}$ 末态, 通过 $\sigma^s \approx \sigma \times [\text{Br}(Z \rightarrow b\bar{b}) \times \text{Br}(\pi_t^+ \rightarrow t\bar{b}) \times \text{Br}(\pi_t^- \rightarrow \bar{t}b)]$ 能容易的估计. 利用文献 [16] 计算出的分支比 $\text{Br}(\pi_t^+ \rightarrow t\bar{b})$ 的数值结果, 在图 4 给出了 $t\bar{t}b\bar{b}b\bar{b}$ 产生率的数值结果, 我们能可以看出产生率能达到 0.0375 fb. 因为标准模型的 Higgs 玻色子衰变分支比强烈的依靠 Higgs 玻色子的质量, 当 Higgs 玻色子质量小于 140 GeV 时主要衰变为 b 夸克对 [14], 主要的不可约化的 $t\bar{t}b\bar{b}b\bar{b}$ 末态主要来自于标准模型中的过程 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}h$, $t\bar{t}Zh$ 和 $t\bar{t}ZZ$, 同时 Higgs 和 Z 玻色子的衰变形式分别为 $h \rightarrow b\bar{b}$ 和 $Z \rightarrow b\bar{b}$. 在 CalcHEP [12] 程序包的帮助下, 我们计算了如此背景, 并且发现当 ILC 的质心能量 $\sqrt{s} = 1000$ GeV 时该背景截面约为 0.01 fb. 因此, 通过考虑动力学分布信号我们应该很有可能从标准模型背景中提取出信号. 当然, 要想获得极为详细的关于过程 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ 的观测信号, 将依赖于对信号和背景的蒙特卡洛模拟, 这些超出了我们的讨论范围.

4 讨论和结论

在 ILC 上 TC2 模型下, 我们对 Z 玻色子与 top-pion 对联合产生过程 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ 进行了研究. 我们计算了该过程的产生截面随质量 m_π 和质心能量 \sqrt{s} 的变化, 并且发现该过程的截面在理想的情况下最大可达到 1 fb. 考虑到荷电 top-pion 的主要衰变道, 我们发现在合理的参数空间范围之内在实验上是很有可能探测到荷电 top-pion 信号的.

[1] Weinberg S 1976 *Phys. Rev. D* **13** 974
Weinberg S 1979 *Phys. Rev. D* **19** 1277
[2] Hill C T 1995 *Phys. Lett. B* **345** 483
Lane K, Eichten E 1995 *Phys. Lett. B* **352** 382
[3] Buchalla G, Burdman G, Hill C T, Komins D 1996 *Phys. Rev. D* **53** 5185
Hill C T, Simmons E H 2003 *Phys. Rep.* **381** 235
[4] Cao J J, Xiong Z H, Yang J M 2003 *Phys. Rev. D* **67** 071701
Cao J J, Liu G L, Yang J M 2004 *Phys. Rev. D* **70** 114035
Cao J J, Liu G L, Yang J M 2005 *Eur. Phys. J. C* **41** 381
[5] Yue C X, Zong H J, Wang S Z 2003 *Phys. Lett. B* **575** 25
Yue C X, Wang L N 2007 *J. Phys. G* **34** 139
Yue C X, Zong Z J, Xu L L, Chen J X 2006 *Phys. Rev. D* **73** 015006
Huang J S, Lu G R, Xu W, Wang S W 2010 *Chin. Phys. C* **34** 1057
[6] Cao J J, Xiong Z H, Yang J M 2003 *Nucl. Phys. B* **651** 87
Cao J J, Heng Z X, Wu L, Yang J M 2009 *Phys. Rev. D* **79** 054003
Lu G R, Li X, Li P Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 778 (in Chinese) [鲁公儒, 李祥, 李培英 2008 物理学报 **57** 778]
Lu G R, Han J Z 2010 *Commun. Theor. Phys.* **54** 1091
[7] Lopez-Villarejo J J, Vermaseren J A M 2009 *Phys. Lett. B* **675** 356

- Djouadi A, Driesen V, Junger C 1996 *Phys. Rev. D* **54** 759
 [8] Yue C X, Feng H L, Ma W 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 011202
 Liu Y B, Wang X L 2010 *Nucl. Phys. B* **839** 294
 [9] Leibovich A K, Rainwater D 2002 *Phys. Rev. D* **65** 055012
 [10] Barger V, Han Tao, Zeppenfeld D 1990 *Phys. Rev. D* **41** 2782
 [11] Pukhov A hep-ph/9908288; hep-ph/0412191
 [12] Amsler C 2008 *Particle Data Group, Phys. Lett. B* **667** 1
 [13] Wang X L, Xu W N, Du L L 2004 *Commun. Theor. Phys.* **41** 737
 [14] Yasuhiro Okada 2007 *J. Phys. Soc. Jap.* **76** 111011

Joint production of Z boson and charged top-pion pair at the ILC*

Han Jin-Zhong^{1)†} Qin Zhen²⁾ Wang Xue-Lei^{1)‡}

1) (College of Physics and Information Engineering, Henan Normal University, Xixiang 453007, China)

2) (North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

(Received 20 April 2011; revised manuscript received 9 May 2011)

Abstract

In this paper, we investigate the joint production of charged top-pions pair and Z gauge boson in the topcolor-assisted technicolor (TC2) at the International Linear Collider (ILC) via the process $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$. We calculate the production cross section of the process $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ and find that the cross section of the process $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^+\pi_t^-$ can reach 1 fb in a reasonable parameter space of the TC2 model. Considering the main decay mode of charged top-pion $\pi_t^+ \rightarrow t\bar{b}$, we find that such a production may provide copious events at the ILC.

Keywords: topcolor-assisted technicolor model, international linear collider, cross section

PACS: 12.60.Nz, 13.66.Hk, 14.80.Va

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10775039), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 20094104110001).

† E-mail: hanjinzhong0373@sohu.com

‡ E-mail: wangxuelei@sina.com