

通过味改变过程探测 TC2 理论中的 中性 top pion 介子*

张晋宇 万陵德 王学雷¹⁾ 杨悦玲 李炳中

(河南师范大学物理与信息工程学院 新乡 453002)

摘要 在 Topcolor 辅助的 Technicolor(TC2)模型下,研究了一个产生中性 top pion 介子(Π_0^0)的味改变过程: $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi_0^0$. 研究结果表明,在 TESLA 对撞机上,当质心能量高时,在大多数参数区间, $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi_0^0$ 的产生截面可达到 0.1fb 量级,每年可有数十个 Π_0^0 介子事例产生. 当 Π_0^0 质量较小时,由于共振效应,产生截面可达几个 fb. 由于背景干净,有可能在 TESLA 对撞机上探测到 Π_0^0 介子事例. 另一方面,研究发现,可以在实验中清晰地探测到 top pion-charm 不变质量分布中的共振峰. 因此, Π_0^0 介子的产生过程 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi_0^0$ 为人们提供了一个极好的机会,来探测中性 Π_0^0 介子,从而检验 TC2 模型.

关键词 人工色模型 顶色辅助的人工色(TC2)模型 中性 top pion 介子 电弱对称性破缺

1 引言

基于规范群 $SU_c(3) \times U_Y(1)$, Glashow-Weinberg-Salam (GWS) 理论对电弱相互作用作出了统一的、较完善的描述. 大量实验成功地验证了这个模型. 但是,此模型的电弱对称性破缺部分还不清晰. 探测电弱对称性破缺机制是未来高能对撞机的最重要任务之一.

电弱对称性动力学破缺理论,例如 TC (Technicolor) 理论^[1], 是解决电弱对称性破缺机制问题的重要候选者. TC 理论避免了 GWS 理论中基本标量 Higgs 场带来的平庸性、不自然性问题. 人们早先提出的简单的类 QCD 扩展 TC (ETC) 模型^[2] 对 S 参数有大的正的修正^[3], 已经被 CERN 的 LEP 电弱精确测量数据排除^[4,5]. 后来人们提出了多种改进方法,

2002-05-31 收稿

*国家自然科学基金(10175017), 河南省科委杰出青年基金(2104)和河南省高校杰出科研人才创新工程(2002KYCX009)资助

1) E-mail: wangxuelei@sina.com

以便使理论预言与实验结果相符. 其中一种比较现实的 TC 模型是 Topcolor 辅助的 Technicolor (TC2) 模型^[6], 它同时解决了重的顶夸克问题. 在 TC2 理论中, 电弱对称性破缺主要由 Technicolor 部分产生, ETC 相互作用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; $m'_t = \epsilon m_t$ ($0.03 \leq \epsilon \leq 0.1$)^[7]. Topcolor 对电弱对称性破缺也有贡献, 同时, 贡献出顶夸克质量的大部分: $(1 - \epsilon) m_t$. TC2 理论最重要的预言是, 在几百个 GeV 能量区域内, 存在着 3 个赝哥尔斯通玻色子 (Pseudo-Goldstone Boson), 也就是所谓的 toppion 介子: Π^0, Π^+, Π^- . toppion 介子的存在可认为是 TC2 模型的典型特征. 因此, 在高能对撞机上探测 toppion 介子产生的信号和 toppion 介子对某些过程的贡献, 就成为检验 TC2 模型的极好途径. 因此从理论上开展这一方面的研究, 为实验的探测提供理论指导也就显得非常重要. 有关这一方面的研究, 已有很多的相关文献^[8-12]. TC2 理论的另一个特征是, 存在中性 toppion 介子 Π^0 与 top-charm 夸克的味改变耦合. 众所周知, 对标准模型 (SM), 在树图水平, 不存在味改变中性流 (FCNC). 在 SM 中几乎不可能探测到 FCNC 过程. 因此, 如果将来能在高能对撞机上探测到味改变的过程, 这将成为新物理存在的显著信号. 所以, 在 TC2 模型框架下, 研究包含 Π^0 -t-c 顶角的某些味改变过程, 将为我们提供味改变耦合的信息, 同时也为探测 toppion 介子提供一种可行方法.

本文研究了 e^+e^- 对撞机上中性 toppion 介子的产生过程: $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi^0$, 该过程包含了味改变顶角 Π^0 -t-c. 结果表明, 我们有可能在 DESY 的高能量、高亮度的 TESLA 对撞机上探测到 toppion 产生的信号.

2 产生截面的计算

对 TC2 模型, topcolor 相互作用只存在于第三代夸克之间, 因此不存在 GIM 机制, 这是 TC2 模型的基本特征. 当用夸克的质量本征态表示相互作用时, 将产生味改变耦合. Π^0 介子与 top-charm 夸克之间的味改变耦合为^[10]

$$i \frac{m_t \tan \beta}{\nu_w} K_{tR}^{t*} K_{cL}^{t*} \bar{t}_L c_R \Pi_t^0 + \text{h.c.}$$

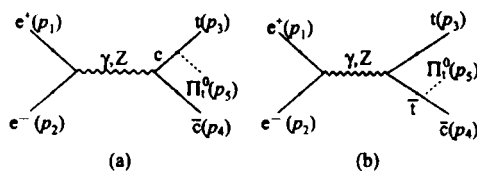


图 1 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi^0$ 过程的费曼图

其中 $\tan \beta = \sqrt{\left(\frac{\nu_w}{\nu_t}\right)^2 - 1}$, $\nu_w = 246$ GeV 是电弱对称破缺标度, $\nu_t = 60-100$ GeV^[10] 是 toppion 介子的衰变常数. K_{tL}^{t*} 是么正矩阵 K_{tL} 的矩阵元, 而 CKM 矩阵 V_{KM} 可表示为 $V_{KM} = K_{tL}^{t*} K_{tL}$, 它们的值分别是:

$$K_{tL}^{t*} = 1, K_{tR}^{t*} = 1 - \epsilon, K_{tR}^{c*} \leq \sqrt{1 - (K_{tR}^{t*})^2} \approx \sqrt{2\epsilon - \epsilon^2}.$$

由于存在味改变耦合 Π^0 -t-c, 可在 e^+e^- 对撞机上通过味改变过程 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi^0$ 产生中性的 Π^0 , 并同时伴随生成一个单 top 夸克, 此过程的费曼图如图 1 所示. 产生振幅的表达式如下:

$$\begin{aligned}
M &= M_a^L + M_b^L + M_a^T + M_b^T, \\
M_a^L &= \frac{\sqrt{2} m_t \tan \beta}{2 \nu_w} G_F m_Z^2 K_{UR}^{lc} K_{UL}^{u*} G(p_3 + p_5, m_c) G(p_1 + p_2, m_Z) \bar{u}_l(p_3) \left[-\frac{8}{3} s_w^2 (\not{p}_3 + \not{p}_5) \gamma^\mu R + \right. \\
&\quad \left. m_c \left(2 - \frac{8}{3} s_w^2 \right) \gamma^\mu L \right] \nu_c(p_4) \bar{\nu}_c(p_1) \gamma_\mu (-L + 2s_w^2) u_c^-(p_2), \\
M_b^L &= \frac{\sqrt{2} m_t \tan \beta}{2 \nu_w} G_F m_Z^2 K_{UR}^{lc} K_{UL}^{u*} G(p_4 + p_5, m_t) G(p_1 + p_2, m_Z) \bar{u}_l(p_3) \gamma^\mu \cdot \\
&\quad \left[\left(2 - \frac{8}{3} s_w^2 \right) L (\not{p}_4 + \not{p}_5) - \frac{8}{3} s_w^2 m_t R \right] \nu_c(p_4) \bar{\nu}_c(p_1) \gamma_\mu (-L + 2s_w^2) u_c^-(p_2), \\
M_a^T &= -\frac{8\sqrt{2} m_t \tan \beta}{3 \nu_w} G_F m_W^2 s_w^2 K_{UR}^{lc} K_{UL}^{u*} G(p_3 + p_5, m_c) G(p_1 + p_2, 0) \bar{u}_l(p_3) [(\not{p}_3 + \not{p}_5) \gamma^\mu \cdot \\
&\quad R + m_c \gamma^\mu L] \nu_c(p_4) \bar{\nu}_c(p_1) \gamma_\mu u_c^-(p_2), \\
M_b^T &= -\frac{8\sqrt{2} m_t \tan \beta}{3 \nu_w} G_F m_W^2 s_w^2 K_{UR}^{lc} K_{UL}^{u*} G(p_4 + p_5, m_t) G(p_1 + p_2, 0) \bar{u}_l(p_3) \cdot \\
&\quad \gamma^\mu (\not{p}_4 + \not{p}_5 + m_t) R \nu_c(p_4) \bar{\nu}_c(p_1) \gamma_\mu u_c^-(p_2),
\end{aligned}$$

这里 $G(p, m) = \frac{1}{p^2 - m^2}$ 是粒子的传播子, $L = \frac{1}{2}(1 - \gamma_5)$, $R = \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)$, $s_w^2 = \sin^2 \theta_w$ (θ_w 是温伯格角). 可以看到, top 夸克传播子在 $p^2 = m_t^2$ 时出现极点, 即产生共振效应. 因此, 计算中应该考虑 top 夸克衰变宽度的影响. 即在 top 夸克传播子中, 需要用复数质量项 $m_t^2 - i\Gamma_t m_t$ 来代替 m_t^2 . $-im_t \Gamma_t$ 的效应体现在共振峰附近. 大家知道, top 夸克几乎都衰变成 $W^+ b$. 所以, 在计算中, 近似用 $\Gamma(t \rightarrow W^+ b)$ 来代替总的 top 夸克衰变宽度. 利用上面的产生振幅, 可直接得到产生截面.

3 数值结果及结论

在计算中, 取 $m_t = 174 \text{ GeV}$, $m_c = 1.5 \text{ GeV}$, $\nu_t = 60 \text{ GeV}$. 产生截面中还包含有两个自由参数: ϵ , M_{Π} (topion 的质量). 为分析 M_{Π} 和 ϵ 对产生截面的影响, 取 $150 \text{ GeV} \leq M_{\Pi} \leq 350 \text{ GeV}$, $\epsilon = 0.03, 0.06, 0.1$. 德国的 TESLA 是下一代 $e^+ e^-$ 对撞机之一^[13], 在第一阶段运行, TESLA 的质心能量是 $\sqrt{S} = 500 \text{ GeV}$, 以后将提高到 1 TeV 以上, 预计其最大亮度可达 $500 \text{ fb}^{-1}/\text{a}$. 本文将研究在 TESLA 对撞机上发现 Π_t^0 的可能性. 为此, 分别取 $\sqrt{S} = 500, 800, 1600 \text{ GeV}$, 截面的数值结果在图 2 中给出.

图 2(a—c) 为总截面随 M_{Π} 变化的情况, 其中 $\sqrt{S} = 500, 800, 1600 \text{ GeV}$, $\epsilon = 0.03, 0.06, 0.1$. 可以看到, $e^+ e^- \rightarrow t \bar{c} \Pi_t^0$ 的产生截面随 M_{Π} 的减小而增大. 尤其是当 $M_{\Pi} < m_t - m_c$ 时, 截面急剧增加, 这归因于图 1(b) 将产生共振效应. 对于小的 M_{Π} , 截面可达几个 fb, 在 TESLA 上, 以其预计的年积分亮度 $L \sim 500 \text{ fb}^{-1}/\text{a}$ 来估算, 我们每年至少可观测到几千个 Π_t^0 事例. 而在大部分参数区间, 能量高时 ($\sqrt{S} = 800, 1600 \text{ GeV}$), 截面的量级在 0.1 fb , 每年也可有几十个 Π_t^0 事例产生. 大家知道, 在标准模型中, charm 夸克和 top 夸克之间不存在

味改变的耦合,所以 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi^0$ 的背景非常干净. 因此,在 TESLA 上,由过程 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi^0$ 探测 Π^0 是可行的,尤其是较轻的 Π^0 . 将 $\sqrt{S} = 500, 800, 1600\text{GeV}$ 时的 3 种情况进行比较,可以看出, $\sqrt{S} = 500\text{GeV}$ 是探测较轻的 Π^0 事例的理想能量. 但是对于重的 Π^0 介子,质心能量高时可提高截面值,因此,探测重的 Π^0 介子需要较高的能量.

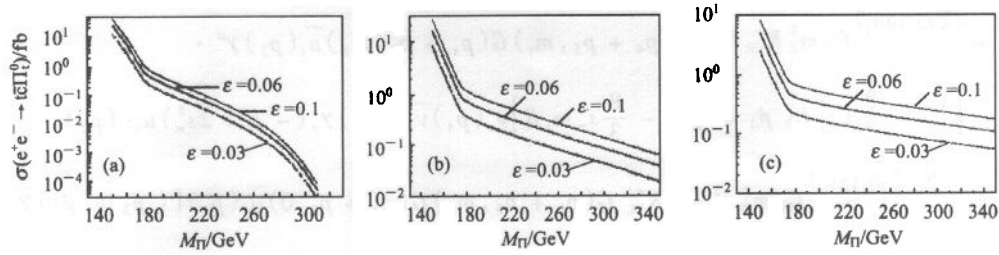


图 2 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi^0$ 总截面随 M_π 变化曲线
(a) $\sqrt{S} = 500\text{GeV}$; (b) $\sqrt{S} = 800\text{GeV}$; (c) $\sqrt{S} = 1600\text{GeV}$.

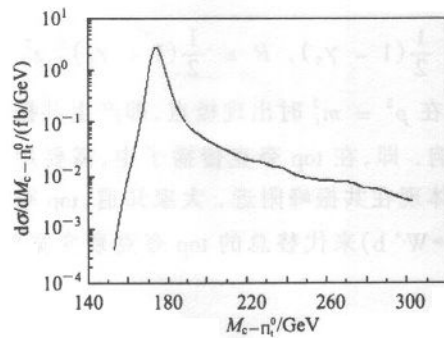


图 3 top pion-charm 夸克不变质量分布曲线
 $\sqrt{S} = 500\text{GeV}$, $M_\pi = 150\text{GeV}$, $\epsilon = 0.1$.

图 3 给出当 $\sqrt{S} = 500\text{GeV}$, $M_\pi = 150\text{GeV}$, $\epsilon = 0.1$ 时, top pion-charm 夸克不变质量分布曲线. 可以看出,由于共振效应,在 $m_t - m_c$ 附近有一共振峰,这一共振峰是能观测的. 由此可见,研究不变质量分布是探测 Π^0 介子的又一方法.

综上所述,在 TC2 模型下,我们研究了味改变过程 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi^0$,发现此过程有如下特征:(1)对于轻的 Π^0 介子 ($M_\pi < m_t - m_c$),存在共振效应,该效应使产生截面显著增大. 所以,通过 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi^0$ 过程探测轻的 Π^0 是可行的.

探测重的 Π^0 需要较高的能量. 当 $\sqrt{S} = 800, 1600\text{GeV}$ 时, $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi^0$ 的产生截面一般在 0.1fb 量级,即可产生几十个 Π^0 事例. (2)在标准模型中,树图水平不存在 top-charm 夸克之间的味改变耦合,所以味改变过程 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi^0$ 的背景非常干净. 即使对每年几十个 Π^0 事例,实验也是有希望探测到的. 所以,通过 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\Pi^0$ 过程来探测中性 top pion 介子,从而检验 TC2 模型,是非常有意义的.

参考文献 (References)

- 1 Weinberg S. Phys. Rev., 1976, D13:974; 1979, D19:1277
- 2 Suskind L. Phys. Rev., 1976, D20:2619; Dimopoulos S, Suskind L. Nucl. Phys., 1979, B155:237; Eichten E, Lane K. 1980, Phys. Lett., 1980, 90B:125
- 3 Peskin M, Takeuchi T. Phys. Rev. Lett., 1990, 65:964
- 4 Erler J, Langacker P. Eur. Phys. J., 1998, C3:90

- 5 Hagiwara K, Haidt D, Matsumoto S. *Eur. Phys. J.*, 1995, **C2**:95
- 6 Hill C T. *Phys. Lett.*, 1995, **B345**:483; Lane K, Eichten E. *Phys. Lett.*, 1995, **B352**:382; Lane K. *Phys. Rev.*, 1996, **D54**:2204; Chivukula R S et al. *Phys. Rev.*, 1999, **D59**:075003
- 7 Buchalla G et al. *Phys. Rev.*, 1996, **D53**:5185
- 8 YUE C X et al. *Phys. Rev.*, 2001, **D63**:115002
- 9 YUE C X, LI H, WANG X L. hep-ph/0111316; WANG X L et al. Submitted to *Commun. Theor. Phys.*; YUE C X et al. hep-ph/0011112
- 10 HE H J, YUAN C P. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**:28
- 11 LU G R et al. *HEP & NP*, 2001, **25**:101(in Chinese)
(鲁公儒等. *高能物理与核物理*, 2001, **25**:101)
- 12 YUE C X et al. *HEP & NP*, 2001, **25**:289(in Chinese)
(岳崇兴等. *高能物理与核物理*, 2001, **25**:289)
- 13 Monig K. hep-ex/0112001

Searching for Neutral Toppion in TC2 Model via a Flavor-Changing Process

ZHANG Jin-Yu WAN Ling-De WANG Xue-Lei¹⁾
YANG Yue-Ling LI Bing-Zhong

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

Abstract We study a flavor-changing toppion production process $e^+ e^- \rightarrow t \bar{c} \Pi_t^0$ in the topcolor-assisted technicolor(TC2) model. The studies show that, with high centre of mass energy in TESLA collider, the production cross section of $e^+ e^- \rightarrow t \bar{c} \Pi_t^0$ is about 0.1 fb in most parameter regions of TC2 model and a few tens events of toppion can be produced each year. The resonance effect can enhance the cross section to a few fb when toppion mass is small. With clean background, the toppion events can possibly be detected at TESLA collider. On the other hand, we find that there exists a narrow peak in the toppion-charm invariant mass distribution which could be clearly detected. Therefore, the toppion production process $e^+ e^- \rightarrow t \bar{c} \Pi_t^0$ provides a unique chance to detect toppion events and test the TC2 model.

Key words technicolor model, the topcolor-assisted technicolor(TC2) model, neutral toppion, electroweak symmetry breaking

Received 31 May 2002

* Supported by National Natural Science Foundation of China(10175017), Excellent Youth Foundation of Henan Scientific Committee(2104), Henan Innovation Project for University Prominent Research Talents(2002KYCX009)

1)E-mail: wangxuelei@sina.com