

TC2 理论在LC实验中的可能物理迹象*

岳崇兴¹⁾

(辽宁师范大学物理系 大连 116029)

摘要 在高能 e^+e^- 碰撞实验(LC)中,研究了顶色辅助的人工色(TC2)理论所预言的中性 top 介子 π_t^0 的产生. 结果表明,在LC实验中通过过程 $e^+e^- \rightarrow \bar{t}c$, $e^+e^- \rightarrow \gamma \bar{t}c$ 和 $e^+e^- \rightarrow Z \bar{t}c$ 可以探测到 π_t^0 的物理迹象.

关键词 TC2 理论 LC 实验 中性 top 介子

电弱对称性破缺(EWSB)机制、费米子质量起源问题是现代粒子物理重要的前沿问题之一. 标准模型(SM)是非常成功的理论,但是此理论不能从根本上解释粒子质量产生原因,且它的标量部分存在平庸性、不自然性等问题,因此SM仅是一种在一定能标下成立的有效理论,在高能标处必然有新物理存在. 顶色辅助的人工色(TC2)理论^[1]是一种新的强相互作用的理论,它以简明的方式动力学地产生了EWSB和包括顶夸克在内的普通费米子质量,是目前人们感兴趣的新物理之一.

TC2 理论^[1]预言了一定数量的赝标格尔斯通玻色子(PGBs),包括technipions 和 top-pions; 另外TC2 理论还预言了两类新的规范玻色子:(1)ETC规范玻色子;(2)顶色规范玻色子 B_μ 和 Z' . 这些新粒子的存在可视为TC2 理论的主要特征,它们与EWSB有密切的关系,因此研究这些新粒子在高能对撞机上的可能物理迹象有非常重要的意义. 最近我们研究了这些新粒子在高能对撞机上的可能物理迹象^[2].

TC2 理论的基本相互作用(topcolor)是非普适的,仅与第三代夸克发生相互作用, top-pions可产生一些新的味改变标量耦合,由此可导致丰富的味混合唯象^[3]. 本文研究了中性top-pion π_t^0 在高能 e^+e^- 对撞机(LC)实验中的可能物理迹象,并讨论了探测此粒子的可能性.

中性top-pion π_t^0 与普通费米子的耦合可写为^[3]

$$\frac{m_t}{\sqrt{2F_t}} \frac{\sqrt{V_w^2 - F_t^2}}{V_w} \left[K_{UR}^u K_{UL}^{u*} \bar{t}_L t_R \pi_t^0 + K_{UR}^c K_{UL}^{c*} \bar{t}_L c_R \pi_t^0 + \frac{m_b - m_b'}{m_t} \bar{b} \gamma^5 b \pi_t^0 + \text{h.c.} \right], \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(19905004), 河南省杰出青年基金(9911)和河南省教育厅资助
1) E-mail: cxyue@public.xxptt.ha.cn

其中 $K_{UL}^t = 1, K_{UR}^t = -\varepsilon, K_{UR}^{tc} \leq \sqrt{2\varepsilon - \varepsilon^2}$, (ε 为自由参数), $v_w = 174\text{GeV}$, $F_t = 50\text{GeV}$ 是 π_t^0 的衰变常

数, m'_b 是ETC相互作用产生的b夸克的质量, $m'_b = \frac{m_s}{m_c} \varepsilon m_t \simeq 0.1 \varepsilon m_t$.

中性 top-pion π_t^0 可通过 top 夸克圈与弱电规范玻色子发生耦合,其一般的耦合形式可写为

$$\frac{1}{1 + \delta_{B_1 B_2}} \frac{\alpha S_{\pi_t^0 B_1 B_2}}{\pi F_t} \pi_t^0 \varepsilon_{\mu\nu\alpha\beta} (\partial^\mu B_1^\nu) (\partial^\alpha B_2^\beta), \quad (2)$$

若 B_1, B_2 为胶子, $\alpha = \alpha_s$; 若 B_1, B_2 为弱电规范玻色子 γ 或 Z , 则 $\alpha = \alpha_e$. 反常因子 $S_{\pi_t^0 B_1 B_2}$ 是与模型相关的, 其具体形式在文献[4]已给出.

从方程(2)可看出 π_t^0 可通过 $e^+e^- \rightarrow \gamma^*, Z^* \rightarrow \pi_t^0 \gamma, e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow Z^* \pi_t^0$ 产生. 其产生截面为^[4]

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi_t^0 \gamma) = \frac{\alpha^3}{24\pi^2 F_t^2} \left(1 - \frac{m_{\pi_t}^2}{S}\right)^3 \times \left[S_{\pi_t^0 \gamma \gamma}^2 + \frac{(1 - 4S_W^2 + 8S_W^4)}{8S_W^2 C_W^2} \frac{S_{\pi_t^0 \gamma Z}^2}{\left(1 - \frac{m_Z^2}{S}\right)^2} + \frac{1 - 4S_W^2}{2S_W C_W} \frac{S_{\pi_t^0 \gamma \gamma} S_{\pi_t^0 \gamma Z}}{1 - \frac{m_Z^2}{S}} \right], \quad (3)$$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi_t^0 Z) = \frac{\alpha^3}{24\pi^2 F_t^2} \left(1 - \frac{m_{\pi_t}^2}{S} - \frac{m_Z^2}{S}\right)^3 S_{\pi_t^0 Z \gamma}^2, \quad (4)$$

其中 \sqrt{S} 是LC实验的质心能量. 利用上述方程可以计算 $e^+e^- \rightarrow \gamma \pi_t^0, e^+e^- \rightarrow Z \pi_t^0$ 过程的产生截面. 计算结果表明: 产生截面 $\sigma_{\gamma \pi_t^0}, \sigma_{Z \pi_t^0}$ 随质心能量 \sqrt{S} 的增加而增加, 随 m_{π_t} 的增加而减少. 若取 $\sqrt{S} = 500\text{GeV}$, $m_{\pi_t} = 300\text{GeV}$, 则有 $\sigma_{\gamma \pi_t^0} = 2.5\text{fb}$, $\sigma_{Z \pi_t^0} = 0.47\text{fb}$. 对于 $m_{\pi_t} = 300\text{GeV}$, \sqrt{S} 从 500GeV 增至 1500GeV , 产生截面 $\sigma_{\gamma \pi_t^0}$ 从 2.5fb 增至 7.1fb . 若假设LC的积分亮度 $L = 100\text{fb}^{-1}$, 则每年可产生几十个甚至数百个 π_t^0 事例.

在SM中无树图味改变中性流(FCNC), 由于GIM机制的压低, 即使单圈级产生截面亦很小, 因此FCNC过程可作为探测新物理的有效过程. 在SM中 $\bar{t}c$ 产生截面很小, 不可被现在或将来的高能实验探测到, 若实验能探测到此事例, 则必然是新物理所致. 因此中性top-pion π_t^0 可通过 $e^+e^- \rightarrow \gamma \pi_t^0 \rightarrow \gamma \bar{t}c, e^+e^- \rightarrow Z \pi_t^0 \rightarrow Z \bar{t}c$ 探测.

我们计算了 π_t^0 对产生截面 $\sigma_{\gamma \bar{t}c}, \sigma_{Z \bar{t}c}$ 的贡献. 计算结果表明: 当 $\sqrt{S} = 500\text{GeV}$, $200\text{GeV} \leq m_{\pi_t} \leq 350\text{GeV}$ 时, $\sigma_{\gamma \bar{t}c}$ 从 1.29fb 变化到 2.05fb , $\sigma_{Z \bar{t}c}$ 从 0.20fb 变化到 0.45fb . 因此,

利用 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^0 \rightarrow Z\bar{t}c$ 过程很难探测到 π_t^0 , 但可通过 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_t^0 \rightarrow \gamma\bar{t}c$ 过程研究 π_t^0 的可能物理性质.

我们进一步研究了中性 top-pion π_t^0 通过过程 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow \pi_t^0 \rightarrow \bar{t}c$ 对 LC 实验中 $\bar{t}c$ 产生的贡献. 子过程 $\gamma\gamma \rightarrow \pi_t^0 \rightarrow \bar{t}c$ 的产生截面可写为^[5]

$$\hat{\sigma}(\hat{s}) = \frac{3e^4 A^2}{32\pi} \frac{\hat{s}(\hat{s} - m_t^2)^2}{\hat{s} + m_t^2}, \quad (5)$$

$$A = \frac{m_t^3(1 - \epsilon)k_{UR}^{tc}}{6\pi^2 F_t^2} \sqrt{\frac{\nu_w^2 - F_t^2}{\nu_w^2}} \frac{1}{\hat{s} - m_{\pi_t}^2 + im_{\pi_t} \Gamma} C_0, \quad (6)$$

其中 $\sqrt{\hat{s}}$ 是 $\gamma\gamma$ 碰撞的质心能量, Γ 是 π_t^0 的总衰变宽度.

过程 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow \bar{t}c$ 在 LC 实验中的产生截面可由子过程 $\gamma\gamma \rightarrow \bar{t}c$ 的产生截面 $\hat{\sigma}(\hat{s})$ 与 LC 实验中光子积分亮度卷积得到:

$$\sigma(s) = \int_{(m_t+m_c)/\sqrt{s}}^{s_{\max}} (dz)(dL_{\gamma\gamma})/(dz)\hat{\sigma}(\hat{s}), \quad \hat{s} = z^2 S, \quad (7)$$

其中 \sqrt{S} 是 LC 实验的质心能量, $(dL)_{\gamma\gamma}/(dz)$ 是光子 γ 的积分亮度.

相关参数取合理值, 利用上述公式可给出数值结果. 结果表明: (1) 产生截面 $\sigma(S)$ 随 π_t^0 质量 m_{π_t} 的增加而增加; (2) 当 $\sqrt{S} \leq 230\text{GeV}$ 时, $\sigma(S)$ 随 \sqrt{S} 的减少很快减少; (3)

当 $\sqrt{S} > 250\text{GeV}$ 时, $\sigma(S)$ 随 \sqrt{S} 的增加而增加, 但速度很小; (4) 若取 $\sqrt{S} = 500\text{GeV}$, 当 m_{π_t} 从 200GeV 增至 350GeV 时, $\sigma(S)$ 从 $8.5 \times 10^{-3}\text{pb}$ 增至 0.146pb . 因此中性 top-pion 介子 π_t^0 对 $e^+e^- \rightarrow \bar{t}c$ 的贡献很大, 每年在 LC 实验上可产生几百至几千个 $\bar{t}c$ 事例.

总之, 由于 SM 模型预言的 FCNC 过程 (如 $e^+e^- \rightarrow \gamma\bar{t}c$, $Z\bar{t}c$ 或 $e^+e^- \rightarrow \bar{t}c$) 产生截面很小, 不可能被现在或将来的 LC 实验观测到, 但新物理所预言的新粒子有可能对这些过程产生较大的贡献, 因此这些过程可用来检验新物理, 探测新粒子. 我们的研究结果是: 新的强相互作用理论——TC2 理论预言的中性 top-pion π_t^0 可对 FCNC 过程产生较大贡献, 在 LC 实验中可通过过程 $e^+e^- \rightarrow \bar{t}c$, $e^+e^- \rightarrow \gamma\bar{t}c$ 探测 π_t^0 的可能物理迹象.

参考文献 (References)

- 1 Hill C T. Phys. Lett., 1995, **B345**:483; Lane K, Eichten E. Phys. Lett., 1995, **B352**:383; Cvetič G. Rev. Mod. Phys., 1999, **71**: 513
- 2 YUE Chong-Xing et al. Phys. Lett., 2001, **B509**: 294; YUE Chong-Xing et al. Phys. Lett., 2001, **B508**: 290; YUE Chong-Xing et al. J. Phys., 2001, **G27**: 1043; YUE Chong-Xing et al. J. Phys., 2001, **G27**: 913
- 3 HE H J, YUAN C P. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**: 28; Burdman G. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**: 2888
- 4 YUE Chong-Xing et al. Phys. Rev., 2001, **D63**: 115002
- 5 YUE Chong-Xing et al. Phys. Lett., 2000, **B496**: 93

Signature of TC2 Theory in High Energy e^+e^- Colliders*

YUE Chong-Xing

(Department of Physics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract We study the production of the neutral top-pion π_t^0 predicted by topcolor-assisted Technicolor (TC2) theory in high energy e^+e^- collider (LC) experiments. Our results show that the production cross section is very large and the signatures of π_t^0 can be detected in LC experiments via the processes $e^+e^- \rightarrow \bar{t}c$, $e^+e^- \rightarrow \gamma \bar{t}c$ and $e^+e^- \rightarrow Z \bar{t}c$.

Key words TC2 theory, LC experiment, the neutral top-pion π_t^0

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19905004), Excellent Youth Foundation of Henan Scientific Committee (9911), and Foundation of Henan Educational Committee

1) E-mail: cxyue@public.xxptt.ha.cn