

中性 top-pion 的产生和衰变*

岳崇兴¹⁾ 徐庆君 柳国丽
(河南师范大学物理与信息工程学院 新乡 453002)

摘要 研究了顶色辅助的人工色(TC2)理论预言的中性 top-pion π_t^0 的产生和衰变. 结果表明:在高能正负电子对撞(LC)实验中,通过 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_t^0$ 和 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^0$ 过程可以产生大量的 π_t^0 粒子,通过 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_t^0 \rightarrow \gamma\bar{t}c$ 和 $e^+e^- \rightarrow \pi_t^0 Z \rightarrow \bar{t}cZ$ 过程可以探测中性 top-pion π_t^0 的可能物理迹象.

关键词 top-pion 产生截面 味改变耦合

1 引言

电弱对称性破缺(EWSB)和费米子质量起源是现代粒子物理的重要问题之一. 标准模型(SM)为使费米子和规范玻色子获得质量引入标量 Higgs 二重态,但是 SM 不能解释质量产生的动力学原因,而且它的标量部分存在平庸性,不自然性等问题. 因此 SM 仅是一种低能有效理论.

为解决人工色(TC)理论的惟象困难,人们提出了顶色辅助的人工色(TC2)^[1]理论. 在 TC2 理论中, topcolor 相互作用主要负责产生 top 夸克质量,TC 相互作用主要负责 EWSB,扩展人工色(ETC)相互作用产生轻夸克及轻子的质量,并对 m_t 有小的贡献,即 ϵm_t ^[2], (ϵ 是与模型相关的自由参量, $\epsilon \ll 1$). TC2 理论预言了大量的赝标 Goldstone 玻色子(PGBs)的存在,包括 TC 部分的 technipions 和 topcolor 部分的 top-pions. 这些新粒子和电弱对称性破缺的动力学机制有直接的关系,因此研究它们在高能对撞机上的产生和衰变具有特殊的意义. 本文研究了中性 top-pion 在高能正负电子对撞(LC)实验中的产生和衰变,讨论了它的可能物理迹象.

作为同位旋三重态的中性 top-pion π_t^0 可以通过 top 夸克三角图和一对规范玻色子耦合,因此可以通过 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_t^0$ 和 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^0$ 两过程产生. 我们具体计算了这两个过程的产生截面,并给出了在将来 LC 实验中的事例数. 结果表明:在 LC 实验中,对中性 top-pion π_t^0 产生截面的贡献主要来自于 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_t^0$ 道. 假定积分亮度 $L = 100\text{fb}^{-1}$,则通过这个道

2001-09-11 收稿

* 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

每年可产生几百个 π_t^0 事例.

对于 TC2 理论,基本的相互作用是 topcolor 相互作用. 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,会导致味改变耦合. 因此 top-pions 和第三带夸克有很强的耦合,且有新的味改变标量耦合. 在 SM 中,无树图味改变中性流(FCNC)过程,即使在单圈级其产生截面亦非常小,因此可以通过 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_t^0 \rightarrow \gamma tc$ 或 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^0 \rightarrow Ztc$ 过程来探测中性 top-pion π_t^0 . 结果表明: π_t^0 的产生截面非常大,可在将来的 LC 实验中观测到.

2 中性 top-pion π_t^0 和普通粒子的耦合

在 TC2 理论中,topcolor 相互作用产生 top 夸克质量的主要部分 $(1-\epsilon)m_t$,对 EWSB 也有很小的贡献,因此 TC2 理论有下面的关系:

$$\alpha_x^2 + F_t^2 = \alpha_w^2, \quad (1)$$

其中 α_x 代表 TC 相互作用对 EWSB 的贡献. $F_t = 50\text{GeV}$ 是 top-pion 的衰变常数. $\alpha_w = \alpha/\sqrt{2} = 174\text{GeV}$.

TC2 理论预言了 3 个 top-pions,它们和第三代夸克有强的耦合,且有新的味改变标量耦合. 中性 top-pion π_t^0 和夸克的耦合为^[1,3]

$$\frac{m_t}{\sqrt{2}F_t} \frac{\sqrt{\alpha_w^2 - F_t^2}}{\alpha_w} [K_{UR}^{tt} K_{UL}^{t*} t_L^- t_R \pi_t^0 + K_{UR}^{tc} K_{UL}^{t*} t_L^- c_R \pi_t^0 + \text{h.c.}], \quad (2)$$

K_{UL}^{ij} 和 K_{UR}^{ij} 分别是么正矩阵 K_{UL} , K_{UR} 的矩阵元,CKM 矩阵为 $\epsilon = K_{UL}^{-1} K_{DL}$. 文献[3]给出了它们的值

$$K_{UL}^{tt} = 1, \quad K_{UR}^{tt} = 1 - \epsilon, \quad K_{UR}^{tc} \leq \sqrt{2\epsilon - \epsilon^2}. \quad (3)$$

若 $\epsilon = 0.01$,那么 $K_{UR}^{tc} \leq 0.14$. 在下面的计算中,取 $\epsilon = 0.01$,把 K_{UR}^{tc} 视为自由参量. π_t^0 和 bottom 夸克的耦合可近似为

$$\frac{m_b - m'_b}{\sqrt{2}F_t} \frac{\sqrt{\alpha_w^2 - F_t^2}}{\alpha_w} b\gamma^5 b\pi_t^0,$$

这里 m'_b 是 ETC 相互作用产生的 bottom 夸克质量的一部分. $(m_b - m'_b)$ 是瞬子产生的 bottom 夸克质量. 由 TC2 理论的基本思想可知:第一代和第二代费米子的质量都由 ETC 相互作用产生,故有 $\epsilon m_i = \frac{m_c}{m_s} m'_i$ ^[4]. 如果取 $m_s = 0.156\text{GeV}$, $m_c = 1.56\text{GeV}$,则有 $m'_b =$

$0.1 \times \epsilon m_t$.

π_t^0 可以通过 top 夸克三角图和一对规范玻色子耦合, π_t^0 - B_1 - B_2 耦合的一般形式为

$$\frac{1}{1 + \delta_{B_1 B_2}} \frac{\alpha S_{B_1 B_2}^{\pi_t^0}}{\pi F_t} \pi_t^0 \epsilon_{\mu\alpha\beta} (\partial^\alpha B_1^\mu) (\partial^\beta B_2^\mu), \quad (5)$$

这里 B_1^μ 和 B_2^μ 分别代表规范玻色子场. 如果 B_1 和 B_2 代表胶子,那么 α 为强相互作用耦合常数 α_s ;如果 B_1 和 B_2 代表电弱规范玻色子,那么 α 为电弱精细结构常数,其表示式可

写为 $\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$. 反常因子 $S_{\pi_1^0 B_1 B_2}$ 的形式与模型有关, 由文献[5]的公式可得到

$$S_{\pi_1^0 \epsilon_3 \epsilon_3} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\alpha_w^2 - F_t^2}}{\alpha_w} K_{UR}^{11} J_R, \quad (6)$$

$$S_{\pi_1^0 \gamma \gamma} = \frac{16}{3\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\alpha_w^2 - F_t^2}}{\alpha_w} K_{UR}^{11} J_R, \quad (7)$$

$$S_{\pi_1^0 Z \gamma} = \frac{16}{3\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\alpha_w^2 - F_t^2}}{\alpha_w} K_{UR}^{11} \tan \theta_w L(m_\pi), \quad (8)$$

其中

$$L(m_\pi) = \int_0^1 dx \int_0^1 dy \left[1 + \left(\frac{m_\pi}{m_t} \right)^2 x(x-1)y^2 + \left(\frac{m_Z}{m_t} \right)^2 yx(y-1) \right]^{-1}, \quad (9)$$

$$J(R_{\pi_1^0}) = \frac{1}{R_{\pi_1^0}^2} \int_0^1 \frac{dx}{x(x-1)} \ln[1 - R_{\pi_1^0}^2 x(1-x)]. \quad (10)$$

这里 $R_{\pi_1^0} = \frac{m_{\pi_1^0}}{m_t}$, θ_w 是 Weinberg 角. 上面的公式忽略了 π_1^0 和一对规范玻色子 Z 的耦合, 认为 $S_{\pi_1^0 Z Z} \approx 0$.

若 $200\text{GeV} \leq m_{\pi_1^0} \leq 350\text{GeV}$, π_1^0 可能的衰变模有 $\bar{t}c$, bb , gg , $\gamma\gamma$ 和 $Z\gamma$. 因此有

$$\Gamma_{\text{total}}(\pi_1^0) = \Gamma(\pi_1^0 \rightarrow \bar{t}c) + \Gamma(\pi_1^0 \rightarrow b\bar{b}) + \Gamma(\pi_1^0 \rightarrow gg) + \Gamma(\pi_1^0 \rightarrow \gamma\gamma) + \Gamma(\pi_1^0 \rightarrow Z\gamma). \quad (11)$$

利用上述方程, 可以估算中性 top-pion π_1^0 各种衰变道的分支比^[6]. 结果表明: 衰变道 $\pi_1^0 \rightarrow \bar{t}c$ 的分支比最大; 当 π_1^0 的质量在 200GeV 到 350GeV 之间时, $\pi_1^0 \rightarrow \bar{t}c$ 的分支比在 45% 和 64% 之间变化; 对于大的 $m_{\pi_1^0}$ 值, 反常衰变道 $\pi_1^0 \rightarrow gg$ 也有相当大的分支比, 当 $m_{\pi_1^0} = 300\text{GeV}$ 时, $Br(gg) \approx 16\%$.

3 π_1^0 在 LC 上的产生

本文主要研究 LC 上 π_1^0 的产生. 在 LC 实验中, π_1^0 主要由以下两个过程产生:

$$e^+ e^- \rightarrow \gamma \pi_1^0, \quad e^+ e^- \rightarrow Z \pi_1^0. \quad (12)$$

文献[7]已给出上面两个过程产生截面的一般形式. 对于中性 top-pion π_1^0 , 若 $200\text{GeV} \leq m_{\pi_1^0} \leq 350\text{GeV}$, 方程(12)所表示过程的产生截面为

$$\begin{aligned} \sigma(e^+ e^- \rightarrow \gamma \pi_1^0) &= \frac{\alpha^3}{24\pi^2 F_t^2} \left(1 - \frac{m_{\pi_1^0}^2}{S} \right)^3 \cdot \\ &\quad \left[S_{\pi_1^0 \gamma \gamma}^2 + \frac{(1 - 4S_w^2 + 8S_w^4)}{8S_w^2 C_w^2} \frac{S_{\pi_1^0 Z \gamma}^2}{\left(1 - \frac{m_Z^2}{S} \right)^2} + \frac{1 - 4S_w^4}{2S_w C_w} \frac{S_{\pi_1^0 \gamma \gamma} S_{\pi_1^0 Z \gamma}}{1 - \frac{m_Z^2}{S}} \right], \\ \sigma(e^+ e^- \rightarrow Z \pi_1^0) &= \frac{\alpha^3}{24\pi^2 F_t^2} \left(1 - \frac{m_{\pi_1^0}^2}{S} - \frac{m_Z^2}{S} \right)^3 S_{\pi_1^0 Z \gamma}^2. \end{aligned}$$

其中 \sqrt{S} 是质心能量. 利用上述方程可以计算 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_1^0$ 和 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_1^0$ 过程的产生截面.

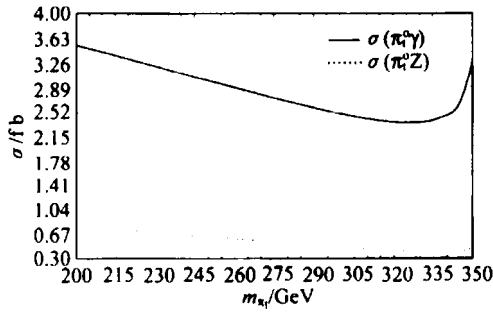


图 1 π_1^0 的产生截面随 m_{π_1} 的变化曲线

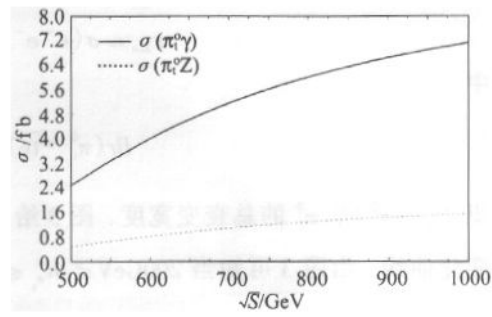


图 2 截面 $\sigma_{\pi_1^0 \gamma(Z)}$ 随 \sqrt{S} 的变化曲线

图 1 给出了 $\sqrt{S} = 500\text{GeV}$, $\epsilon = 0.01$ 时, π_1^0 的产生截面随 m_{π_1} 的变化曲线. 由图 1 可知在大部分参数空间内, 产生截面随着 m_{π_1} 值的减小而增加, 截面 $\sigma_{\pi_1^0 \gamma}$ 大于截面 $\sigma_{\pi_1^0 Z}$. 但是, 当 $m_{\pi_1} > 320\text{GeV}$ 时, 产生截面 $\sigma_{\pi_1^0 \gamma}$ 随着 m_{π_1} 的增加而增加. 这是由于当 $R_{\pi_1^0} = \frac{m_{\pi_1}}{m_t}$ 趋近于 $R_{\pi_1^0} = 2$ 时, 因子 $S_{\pi_1^0 \gamma}$ 迅速增加. 当 $m_{\pi_1} = 300\text{GeV}$ 时, 截面 $\sigma_{\pi_1^0 \gamma} = 2.5\text{fb}$, $\sigma_{\pi_1^0 Z} = 0.47\text{fb}$. 为观察质心能量 \sqrt{S} 对产生截面的影响, 图 2 给出了 $\epsilon = 0.01$, $m_{\pi_1} = 300\text{GeV}$ 时, 截面 $\sigma_{\pi_1^0 \gamma(Z)}$ 随 \sqrt{S} 的变化曲线. 由图 2 可知产生截面随着 \sqrt{S} 值的增加而增加. 对于 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_1^0$ 过程, 当 \sqrt{S} 由 500GeV 增加到 1000GeV 时, 产生截面相应地从 2.5fb 增加到 7.1fb .

以质心能量 $\sqrt{S} = 500\text{GeV}$, 年积分亮度 $L = 50\text{fb}^{-1}$ 和质心能量 $\sqrt{S} = 1000\text{GeV}$, 年积分亮度 $L = 100\text{fb}^{-1}$ 的两个 LC 实验为例, 我们计算了 π_1^0 的年产生事例数. 具体数值结果在表 1 中给出. 从表 1 可以看出在将来的 LC 实验中, 通过 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_1^0$ 过程每年约产生几百个 π_1^0 事例. 除外, 通过 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_1^0$ 过程也可产生 π_1^0 , 对于 $\sqrt{S} = 1000\text{GeV}$ 的 LC 实验, 每年可产生几十个 π_1^0 事例. 在将来的 LC 实验中也许可观测到此事例.

表 1 LC 实验中 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_1^0$ 和 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_1^0$ 过程中 π_1^0 的年产生事例数

\sqrt{S}	$m_{\pi_1} = 250\text{GeV}$	$m_{\pi_1} = 300\text{GeV}$	$m_{\pi_1} = 350\text{GeV}$	\sqrt{S}	$m_{\pi_1} = 250\text{GeV}$	$m_{\pi_1} = 300\text{GeV}$	$m_{\pi_1} = 350\text{GeV}$
	$ \pi_1^0 \gamma, \pi_1^0 Z $	$ \pi_1^0 \gamma, \pi_1^0 Z $	$ \pi_1^0 \gamma, \pi_1^0 Z $		$ \pi_1^0 \gamma, \pi_1^0 Z $	$ \pi_1^0 \gamma, \pi_1^0 Z $	$ \pi_1^0 \gamma, \pi_1^0 Z $
500GeV	150, 31	125, 23	163, 22	1000GeV	582, 136	713, 153	1650, 269

在 SM 中, 由于 CKM 矩阵元的么正性, $\bar{t}c$ 的产生截面非常小, 不能在现在或将来的高能实验中观测到, 因此探测到 $\bar{t}c$ 产生的物理迹象可视为新物理存在的证据. 由第二部分的讨论可知 $\bar{t}c$ 是中性 top-pion π_1^0 的主要衰变道, 新的味改变标量耦合 $\pi_1^0 \bar{t}c$ 可能对 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_1^0 \rightarrow \gamma\bar{t}c$ 和 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_1^0 \rightarrow Z\bar{t}c$ 过程有较大的贡献. 研究这些过程可探测中性 top-pion π_1^0 的可能物理迹象.

由 π_t^0 贡献的 $e^+e^- \rightarrow \gamma tc$ 和 $e^+e^- \rightarrow Ztc$ 过程的产生截面为

$$\sigma_{\gamma tc} \approx \sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma \pi_t^0) \times Br(tc), \quad (15)$$

$$\sigma_{Ztc} \approx \sigma(e^+e^- \rightarrow Z \pi_t^0) \times Br(tc), \quad (16)$$

其中

$$Br(\pi_t^0 \rightarrow tc) = \frac{\Gamma(\pi_t^0 \rightarrow tc)}{\Gamma_{\text{total}}(\pi_t^0)}. \quad (17)$$

这里 $\Gamma_{\text{total}}(\pi_t^0)$ 是 π_t^0 的总衰变宽度. 图 3 给出了 $\sqrt{S} = 500\text{GeV}$ 时, 截面 $\sigma_{\gamma tc}$ 和 σ_{Ztc} 随质量 m_{π_t} 的变化曲线. 由图 3 可知当 $200\text{GeV} \leq m_{\pi_t} \leq 350\text{GeV}$ 时, 截面 $\sigma_{\gamma tc}$ 从 1.29fb 变化到 2.05fb , σ_{Ztc} 从 0.20fb 变化到 0.45fb . 对于 $\sqrt{S} = 500\text{GeV}$ 的 LC, TC2 模型可以预言几十个到上百个 γtc 事例, 极少的 Ztc 事例. 因此, 利用 $e^+e^- \rightarrow Z \pi_t^0 \rightarrow Ztc$ 过程很难探测到中性 top-pion π_t^0 , 但是可以通过 $e^+e^- \rightarrow \gamma \pi_t^0 \rightarrow \gamma tc$ 过程来探测 π_t^0 的物理迹象. 图 4 给出了当 $m_{\pi_t} = 300\text{GeV}$ 时, $\sigma_{\gamma tc}$ 和 σ_{Ztc} 随 \sqrt{S} 的变化曲线. 由图 4 可知截面随着 \sqrt{S} 的增加而增加. 对于 $\sqrt{S} = 1000\text{GeV}$, $L = 100\text{fb}^{-1}$ 的 LC 实验, 每年产生大约 443 个 γtc 事例, 95 个 Ztc 事例. 因此, 在 $\sqrt{S} = 1000\text{GeV}$ 的 LC 上, 也可通过 $e^+e^- \rightarrow Ztc$ 过程来探测中性 top-pion π_t^0 的可能物理迹象.

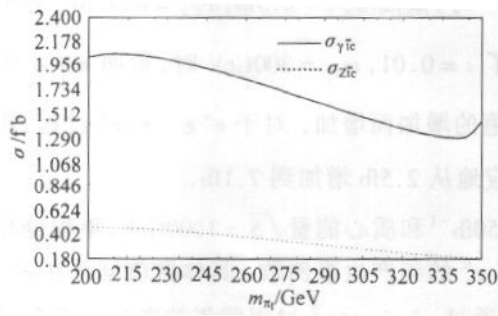


图 3 $\sigma_{\gamma tc}$ 和 σ_{Ztc} 随 m_{π_t} 的变化曲线

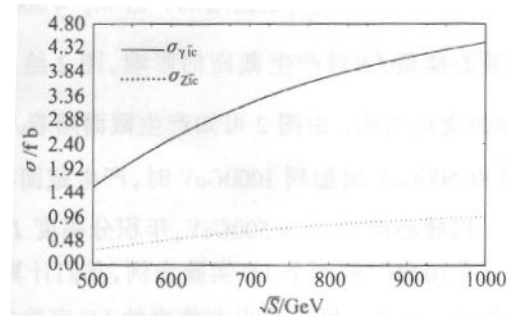


图 4 当 $\sigma_{\gamma tc}$ 和 σ_{Ztc} 随 \sqrt{S} 的变化曲线

4 总结

为了避免基本 Higgs 标量场引起的平庸性, 不自然性等问题, 人们提出了许多电弱对称性动力学破缺模型, 其中 TC2 理论是一个有吸引力的方案. TC2 理论预言了 top-pions 的存在, 这些新粒子和对称性动力学破缺机制有直接的关系, 可以视为 TC2 理论的主要特征, 因此研究 top-pions 的物理性质具有重要意义.

本文研究了中性 top-pion π_t^0 在 LC 上的产生和衰变. 结果表明: π_t^0 的主要衰变模是 tc 和 gg , 因此, 在强子对撞机上可产生大量的 π_t^0 , 同时在 Tevatron 上也可研究中性 top-pion π_t^0 的性质. 这与文献[3]的结果一致. 除主要衰变模 tc 和 gg 外, π_t^0 还可以衰变为 $\gamma\gamma$ 和 $Z\gamma$,

因此在 LC 实验中,通过 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_t^0$ 和 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^0$ 过程可以产生 π_t^0 . 当 $\sqrt{S} = 1000\text{GeV}$ 时, 截面 $\sigma_{\pi_t^0\gamma}$ 和 $\sigma_{\pi_t^0 Z}$ 的值分别达到 7.1fb 和 1.5fb, 每年可能产生几百个 $\gamma\pi_t^0$ 和 $Z\pi_t^0$ 事例. 所以在将来的 LC 实验中可能观测到中性 top-pion π_t^0 .

由于在 SM 中, $t\bar{c}$ 的产生截面非常小, 因此探测到 $t\bar{c}$ 产生的物理迹象可视为新物理存在的证据. 味改变标量耦合 $\pi_t^0 t\bar{c}$ 对 $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_t^0 \rightarrow \gamma t\bar{c}$ 和 $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^0 \rightarrow Z t\bar{c}$ 过程有较大的贡献, 通过研究这些过程可以探测中性 top-pion π_t^0 , 从而验证 TC2 理论.

参考文献 (References)

- 1 Hill C T. Phys. Lett., 1995, **B345**:483—485; Lane K, Eichten E. Phys. Lett., 1995, **B352**:382—387; Lane K. Phys. Lett., 1998, **B433**:96—101
- 2 Buchalla G et al. Phys. Rev., 1996, **D53**:5185—5200
- 3 HE Hong-Jian, YUAN C P. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**:28—32; Burdman G. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**:2888—2892
- 4 YUE Chong-Xing, KUANG Yu-Ping, LU Gong-Ru. J. Phys., 1997, **G23**:163—167
- 5 Slaven D, YANG Bing-Ling, ZHANG X. M. Phys. Rev., 1992, **D45**:4349—4352; YUE Chong-Xing, WANG Xue-Lei, LU Gong-Ru. J. Phys., 1993, **G19**:821—826
- 6 LU Gong-Ru, YUE Chong-Xing, LI Wei-Bin et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, **25**(2):101—107 (in Chinese); YUE Chong-Xing, LI Jian-Tao. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, **25**(10):945 (in Chinese) (鲁公儒, 岳崇兴, 李卫彬等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(2):101—107; 岳崇兴, 李建涛. 高能物理与核物理, 2001, **25**(10):945)
- 7 Randall L, Simmons F H. Nucl. Phys., 1992, **B380**:3—40

Production and Decay of the Neutral Top-Pion in High Energy e^+e^- Colliders

YUE Chong-Xing¹⁾ XU Qing-Jun LIU Guo-Li

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

Abstract We study the production and decay of the neutral top-pion π_t^0 in topcolor-assisted technicolor (TC2) theory. Our results show that, except for the dominant decay modes $b\bar{b}$, $t\bar{c}$ and $g\bar{g}$, the π_t^0 can also decay into $\gamma\gamma$ and $Z\gamma$ modes. It can be significantly produced at high energy linear e^+e^- collider (LC) experiments via the processes $e^+e^- \rightarrow \pi_t^0\gamma$ and $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^0$. We further calculate the production cross sections of the processes $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi_t^0 \rightarrow \gamma t\bar{c}$ and $e^+e^- \rightarrow Z\pi_t^0 \rightarrow Z t\bar{c}$. We find that the signatures of the neutral top-pion π_t^0 can be detected via these processes.

Key words top-pion, cross section, flavor changing couplings

Received 11 September 2001

* 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