

Top 介子与 HERA 和 THERA 对撞机上的 单顶夸克产生*

宗红杰¹ 岳崇兴^{2;1)}

1 (河南师范大学物理与信息工程学院 新乡 453002)

2 (辽宁师范大学物理系 大连 116029)

摘要 讨论计算了 TC2 模型预言的 Top 介子在 HERA 和构想中的 THERA 对撞机上对 t 道 $eq \rightarrow et$ 过程中的单顶夸克产生的贡献. 结果表明: 中性 Top 介子对 $ec \rightarrow et$ 过程中的单顶夸克产生有较大的贡献. 在绝大部分参数空间内, 过程的产生截面在 1—6pb 范围内, 因此, 在 HERA 和 THERA 对撞机上通过 $eq \rightarrow et$ 过程可探测中性 Top 介子的可能物理迹象.

关键词 Top 介子 单顶夸克产生 HERA 对撞机 THERA 对撞机

1 引言

top 夸克质量与电弱对称性破缺(EWSB)的标度在同一数量级上, 这就意味着 top 夸克可用于探索 EWSB 机制和超出标准模型的新物理^[1]. 单顶夸克产生对反常 top 夸克耦合 tqV 非常敏感. 因此, 研究反常 top 夸克耦合 tqV 对单顶夸克产生的贡献, 有利于检测标准模型味结构和超出标准模型的新物理. 在标准模型中, 无树图级反常 top 夸克耦合 tqV , 即使在单圈级上由于受到 GIM 机制的压低其耦合亦非常小, 不能被正在或即将运行的高能实验观测. 因此, 任何偏离标准模型的反常 top 夸克耦合 tqV 均可作为超出标准模型的新物理存在的强有力的依据.

在质心能量分别为 $\sqrt{s} = 320\text{GeV}$ 和 1000GeV 的 HERA 和 THERA(构想阶段)对撞机^[2]上可以研究高能电子-质子、正电子-质子相互作用. 在标准模型中, 单顶夸克在这些对撞机上产生的几率很小^[3]. 文献[4]中已经研究了单顶夸克产生, 结果表明单顶夸克产生是可以探测的, 在 HERA 和 THERA 对撞机上可以找到反常 top 夸克 $tq\gamma$ 和 tqZ . 为了看是否可以通过 $eq \rightarrow et$ 过程探测 Top 介子(π_t^0, π_t^\pm)的可能物

理迹象, 本文在 TC2 模型下讨论了 Top 介子对 HERA 和 THERA 对撞实验中单顶夸克产生的贡献. 结果表明, 中性 Top 介子 π_t^0 对单顶夸克产生有较大的贡献. 在绝大部分参数空间内, 产生截面在 1—6pb 范围内, 因此, 在 HERA 和 THERA 对撞机实验中有可能探测到中性 Top 介子 π_t^0 对单顶夸克产生的贡献.

2 Top 介子和反常 top 夸克耦合 tqV

为了避免由标准模型中的基本 Higgs 标量场引起的平庸性、不自然性等问题, 人们提出了许多动力学 EWSB 模型, 其中 TC2 理论是一个有吸引力的方案. 在 TC2 模型^[5]下, 电弱对称性动力学破缺(EWSB)主要是由 TC 相互作用产生的, ETC 相互作用产生了一小部分的顶夸克质量, 即 ϵm_t , (ϵ 是与模型相关的自由参量, $\epsilon \ll 1$). top 夸克质量主要是由 topcolor 相互作用在 1TeV 能标下动力学产生的, TC2 理论的动力学对 EWSB 的贡献很小. 这就意味着, Top 介子(π_t^0, π_t^\pm)不会被规范玻色子 W 和 Z“吃掉”, 它们是 topcolor 部分所独有的可观测的物理粒子. Top 介子与费米子的味对角耦合可以写为^[5-7]

2003-09-01 收稿

* 国家自然科学基金(90203005)资助

1) E-mail: cxyue@lnnu.edu.cn

$$\frac{m_t(1-\epsilon)}{\sqrt{2}F_t} \frac{\sqrt{\nu_w^2 - F_t^2}}{\nu_w} [i\bar{t}\gamma^5 t\pi_i^0 + \sqrt{2}\bar{t}_R b_L \pi_i^+ + \sqrt{2}\bar{b}_L t_R \pi_i^-], \quad (1)$$

其中 $\nu_w = \nu/\sqrt{2} = 174\text{GeV}$, $F_t \approx 50\text{GeV}$ 是 Top 介子的衰变常数, 可以由 Pagelsstokar 公式估算出.

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相互作用, 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 介子与第三代夸克有很强的 Yukawa 耦合, 且有新的树图级味改变标量耦合^[8,9]:

$$\frac{m_t}{\sqrt{2}F_t} \frac{\sqrt{\nu_w^2 - F_t^2}}{\nu_w} [iK_{UR}^{lc} K_{UL}^{u*} \bar{t}_L c_R \pi_i^0 + iK_{UL}^{lc} K_{UR}^{u*} \bar{t}_R c_L \pi_i^0 + \sqrt{2}K_{UR}^{lc} K_{DL}^{bb} \bar{c}_R b_L \pi_i^+ + \sqrt{2}K_{UR}^{lc} K_{DL}^{bb*} \bar{b}_L c_R \pi_i^-], \quad (2)$$

其中 $K_{UL}(R)$ 和 $K_{DL}(R)$ 是么正矩阵, 可以使 up 夸克和 down 夸克的质量矩阵 M_U 和 M_D 对角化, CKM 矩阵为 $V = K_{UL}^\dagger K_{DL}$. 上述各参量有如下关系式

$$K_{UR}^{uc} \approx K_{DL}^{bb} \approx 1, K_{UL}^{lc} \approx 0, K_{UR}^{lc} \leq \sqrt{2\epsilon - \epsilon^2}. \quad (3)$$

在下面的数值计算中, 假设 $K_{UR}^{lc} = \sqrt{2\epsilon - \epsilon^2}$, ϵ 在 0.03—0.1^[5,6] 范围内变化.

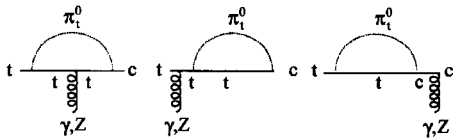


图 1 中性 Top 介子对反常 top 夸克耦合 $tc\gamma$ 和 tcZ 的贡献的费曼图

中性 Top 介子对反常 top 夸克耦合 $tc\gamma$ 和 tcZ 的贡献的费曼图如图 1 所示. 由(1)—(3)式和其他相关的费曼规则可以得到反常 top 夸克耦合顶点 Ztc 和 γtc 的有效形式:

$$\Lambda_{Ztc}^\mu = ie[\gamma^\mu(F_{1Z} + F_{2Z}\gamma^5) + P_t^\mu(F_{3Z} + F_{4Z}\gamma^5) + P_c^\mu(F_{5Z} + F_{6Z}\gamma^5)], \quad (4)$$

$$\Lambda_{\gamma tc}^\mu = \Lambda_{Ztc}^\mu |_{F_{iZ} \rightarrow F_{i\gamma}}, F_{i\gamma} = F_{iZ} |_{v_i = \frac{2}{3}, a_i = 0}. \quad (5)$$

形状因子 $F_{i,\nu}$ 可以用费曼两点和三点标准积分函数^[10]来表示

$$F_{1Z} = g[B_0 + m_{\pi_t}^2 C_0 - 2C_{24} + m_t^2(C_{11} - C_{12}) - B_0^* - B_1']v_t, \\ F_{2Z} = g[B_0 + m_{\pi_t}^2 C_0 - 2C_{24} -$$

$$m_t^2(C_{11} - C_{12}) + B_0^* + B_1' - 4\overline{C_{24}}]a_t, \\ F_{3Z} = 2m_t g(C_{21} + C_{22} - 2C_{23})v_t, \\ F_{4Z} = 2m_t g(-C_{21} - C_{22} + 2C_{23} - 2\overline{C_{22}} + \overline{C_{12}} + \overline{C_0})a_t, \\ F_{5Z} = 2m_t g(C_{22} - C_{23} + C_{12})v_t, \\ F_{6Z} = 2m_t g(-C_{22} + C_{23} + C_{12} - 2\overline{C_{22}} + 3\overline{C_{12}} + 2\overline{C_{23}} - 2\overline{C_{11}} - \overline{C_0})a_t.$$

其中,

$$g = \frac{1}{16\pi^2} \left[\frac{m_t}{\sqrt{2}F_t} \frac{\sqrt{\nu_w^2 - F_t^2}}{\nu_w} \right]^2 K_{UR}^{lc} K_{UL}^{u*}, \\ v_t = \frac{1}{4S_w C_w} \left(1 - \frac{8}{3} S_w^2 \right), \quad a_t = \frac{1}{4S_w C_w}.$$

中性 Top 介子 π_i^0 通过树图级味改变耦合 $\pi_i^0 tu$ 也可以产生反常 top 夸克耦合 $tu\gamma$ 和 tuZ , 可是最大的味混合发生在第三代和第二代费米子之间, 味改变耦合 $\pi_i^0 tu$ 非常小可以忽略不计^[9]. 因此, 不考虑 top 夸克耦合 $tu\gamma$ 和 tuZ , 下面仅仅计算中性 Top 介子通过反常 top 夸克耦合 $tc\gamma$ 和 tcZ 对 t 道过程 $ec \rightarrow et$ 的产生截面的贡献.

荷电的 Top 介子 π_i^\pm 对反常 top 夸克耦合 $tc\gamma$ 和 tcZ 的贡献非常小可以忽略不计^[11]. 因此, 在下面的计算中, 将不考虑荷电 Top 介子在 HERA 和 THERA 对撞机上通过 $ec \rightarrow et$ 过程对单顶夸克产生的贡献.

3 中性 Top 介子和单顶夸克产生

以上讨论可以看出, 中性 Top 介子可以产生较大的反常 top 夸克耦合 $tc\gamma$ 和 tcZ . 因此, 在 HERA 和 THERA 对撞机上通过 t 道过程 $ec \rightarrow et$, π_i^0 对单顶夸克产生可以做出较大贡献. 相应的费曼图如图 2 所示.

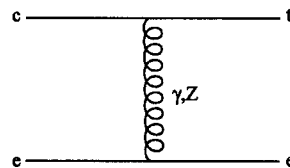


图 2 HERA 和 THERA 对撞机上的单顶夸克产生的费曼图

由(4)式和(5)式的有效顶角 Λ_{Ztc} 和 $\Lambda_{\gamma tc}$ 可以得到子过程 $ec \rightarrow et$ 的截面 $\sigma(\hat{s})$:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{64\pi} \frac{1}{\hat{s}(m_c^2 - \hat{s})} \left(\sum |M_Z|^2 +$$

$$\sum |M_\gamma|^2 + 2 \sum \text{Re} M_Z M_\gamma^\dagger), \quad (6)$$

其中

$$M_Z = \frac{1}{m_Z^2 - t} \bar{u}_i \Lambda_{Zc}^\sigma u_c \bar{u}'_c [\gamma_\sigma (v_e - a_e \gamma_5)] u_e, \quad (7)$$

$$M_\gamma = \frac{1}{t} \bar{u}_i \Lambda_{\gamma c}^\sigma u_c \bar{u}'_c \gamma_\sigma u_e, \quad (8)$$

$$v_e = \frac{e}{4S_W C_W} (-1 + 4S_W^2), \quad a_e = \frac{e}{4S_W C_W}, \quad (9)$$

\sqrt{s} 是 ep 碰撞子过程 $ec \rightarrow et$ 的质心能量. 由于截面 σ 和 charm 夸克在质子中的分部函数 $f_c(x)$ 的卷积, 可以得到 HERA 和 THERA 对撞机上的单顶夸克总产生截面 σ :

$$\sigma = \int_{x_{\min}}^1 f_c(x) dx \int_{t_-}^{t_+} \frac{d\sigma}{dt} dt, \quad (10)$$

其中 $\hat{s} = xs$, $x_{\min} = \frac{m_i^2 + m_e^2}{s}$, $t_+ = \frac{(m_i^2 - \hat{s})(\hat{s} - m_e^2)}{\hat{s}}$, $t_- = t_{\text{cut}} = -0.001(\text{GeV})^2$. 在上述计算中, 取 charm 夸克在质子中的分布函数 $f_c(x)$ 为 CTEQ5 部分子分部函数^[12], $\alpha_e = \frac{1}{128.8}$, $S_W^2 = 0.2315$, $m_i = 175\text{GeV}$, $m_e = 1.2\text{GeV}$, $M_Z = 91.18\text{GeV}$, $\Gamma_Z = 249\text{GeV}$ ^[13].

在图 3 和图 4 中, HERA 和 THERA 对撞机上的单顶夸克产生截面 $\sigma(s)$ 是中性 Top 介子 π_t^0 的质量 m_{π_t} 的函数, 并随着 \sqrt{s} 的增大、 m_{π_t} 的减小而增大, 当 $200\text{GeV} \leq m_{\pi_t} \leq 400\text{GeV}$, $\epsilon = 0.05$ 时, HERA 和 THERA 对撞机上的产生截面分别由 0.99pb 变为 2.35pb 和由 1.7pb 变为 4.1pb .

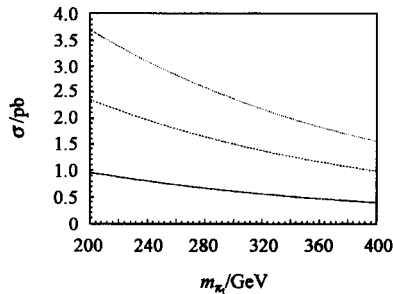


图 3 当 $\epsilon = 0.02$ (—), 0.05 (---), 0.08 (\cdots) 时, π_t^0 对 HERA 对撞机上产生截面 $\sigma(s)$ 的贡献随 m_{π_t} 的变化曲线

以 HERA 对撞机 ($\sqrt{s} = 300\text{GeV}$, $L = 160\text{pb}^{-1}$) 和 THERA 对撞机 ($\sqrt{s} = 1000\text{GeV}$, $L = 470\text{pb}^{-1}$)^[2] 为例, 很容易就可以计算出这两种对撞机上单顶夸克的年

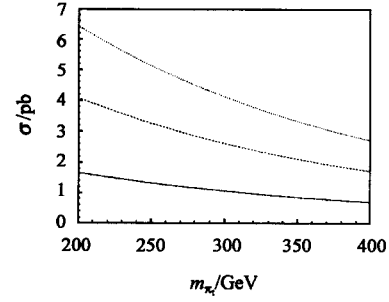


图 4 当 $\epsilon = 0.02$ (—), 0.05 (---), 0.08 (\cdots) 时, π_t^0 对 THERA 对撞机上产生截面 $\sigma(s)$ 的贡献随 m_{π_t} 的变化曲线

产生事例数. 在绝大部分参数空间内, HERA 对撞机上可以产生几百个单顶夸克产生事例, THERA 对撞机上可以产生上千个单顶夸克产生事例. 例如, 当 $m_{\pi_t} = 300\text{GeV}$, $\epsilon = 0.05$ 时, 在 HERA 对撞机上可以产生 240 个单顶夸克产生事例, 在 THERA 对撞机上可以产生 1250 个单顶夸克产生事例. 因此, 在 HERA 和 THERA 对撞机上可以探测到中性 Top 介子对单顶夸克产生的贡献, 并进一步研究 π_t^0 的可能物理迹象.

4 结论

FC 相互作用产生的反常 top 夸克耦合 tqV ($q = u$ 或 c 夸克, $V = Z$ 或 γ 规范玻色子) 为寻找超出标准模型的新物理提供了理想空间. 在 HERA 和 THERA 对撞机上, 单顶夸克产生对 tqV 耦合非常敏感. 因此, 研究 tqV 耦合对单顶夸克产生的贡献有利于检测标准模型中的味结构和超出标准模型的新物理.

本文研究了 TC2 模型预言的 Top 介子在 HERA 和 THERA 对撞机上对 ep 碰撞中的单顶夸克产生的贡献. 结果表明:

(1) 虽然, 从在质子中的分布来看, up 夸克对单顶夸克产生的贡献比 charm 夸克的贡献大, 但是 TC2 模型下的反常 top 夸克耦合 tuV 对 ep 碰撞中的单顶夸克产生的贡献比 tcV 耦合的贡献小, 可以忽略不计.

(2) 荷电 Top 介子 π_t^\pm 可以通过 FC 耦合 $\pi_t^\pm bc$ 产生反常 top 夸克耦合 tcV , 但是和通过 $\pi_t^0 tc$ 由中性 Top 介子 π_t^0 产生的 tcV 耦合相比可以忽略不计, 所以 π_t^\pm 在 HERA 和 THERA 对撞机上对单顶夸克产生截面没有较大的贡献.

(3) 中性 Top 介子 π_0^0 对 t 道过程 $ec \rightarrow et$ 的产生截面的贡献较大. 因此, 可能有几百乃至上千个单顶夸克产生事例在这两种对撞机上产生. 可以在

HERA 和 THERA 对撞机上通过 $ec \rightarrow et$ 过程研究 π_0^0 的可能物理迹象.

参考文献 (References)

- 1 Beneke M, Ahmadov A et al. hep-ph/0003033; Simmons E H. hep-ph/0011244
- 2 Cifci A K, SuHansoy S, Yavas Ö. Proc. of EPAC2000, 2000, 388; Bussey P J. Int. J. Mod. Phys., 2002, **A17**:1065
- 3 Baur U, van der Bij J J. Nucl. Phys., 1988, **B304**:451
- 4 Fritzsche H, Holtmannspötter D. Phys. Lett., 1999, **B457**:186; Cakir O, Sultansoy S, Yilmaz M. hep-ph/0105130; Alan A T, Senol A. Europhys. Lett., 2002, **57**:669
- 5 Hill C T. Phys. Lett., 1995, **B345**:483; Lane K, Eichten T. Phys. Lett., 1995, **B352**:382; Lane K. Phys. Lett., 1998, **B433**:96; Cvetic G. Rev. Mod. Phys., 1999, **71**:513
- 6 Lane K. Technicolor 2000, published in Frascati 2000, Nuclear, Sub-nuclear and Astroparticle Physics, 235—280; Hill C T, Simmons E H. hep-ph/0203079
- 7 Burdman G, Kominis D. Phys. Lett., 1997, **B403**:101
- 8 HE H J, YUAN C-P. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**:28
- 9 Burdman G. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**:2888
- 10 Passarino G, Veltman M. Nucl. Phys., 1979, **B160**:151; Axelrod A. Nucl. Phys., 1982, **B209**:349; Clements M et al. Phys. Rev., 1983, **D27**:570
- 11 YUE Chong-Xing et al. Phys. Lett., 2000, **B496**:93; YUE Chong-Xing et al. Phys. Lett., 2002, **B525**:301
- 12 LAI H L et al. Eur. Phys. J., 2000, **C12**:375; Pumplin J et al. JHEP, 2000, **0207**:012 [hep-ph/0201195]
- 13 Groom D E et al. [Particle Data Group]. Eur. Phys. J., 2000, **C15**:1

Top-Pions and Single top Production at the HERA and THERA Colliders*

ZONG Hong-Jie¹ YUE Chong-Xing^{2;1)}

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

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

Abstract We consider the contributions of the physical top-pions predicted by topcolorassisted technicolor (TC2) models to the single top production via the t-channel process $eq \rightarrow et$ at the HERA and THERA colliders. We find that the neutral top-pion can generate large contributions to the process $ec \rightarrow et$. In most of the parameter space, the production cross section is in the range of 1—6pb. The signals of the neutral top-pion can be studied in the HERA and THERA colliders.

Key words Top-pions, single top production, the HERA colliders, the THERA colliders