

## 在高能 $e^+e^-$ 对撞机上探测 top-Higgs 的可能性\*

岳崇兴<sup>1;1)</sup> 马秀艳<sup>2</sup> 柳国丽<sup>1</sup> 徐庆君<sup>1</sup>

1 (河南师范大学物理与信息工程学院 河南新乡 453002)

2 (安阳师范学院物理系 河南安阳 455000)

**摘要** 计算了 top-Higgs  $h_1^0$  对过程  $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\nu_e\nu_e$ ,  $e^+e^- \rightarrow \gamma(Z)\bar{t}c$  的贡献, 并进一步讨论了在高能线性  $e^+e^-$  对撞机(LC)上探测此粒子的可能性. 结果表明:  $h_1^0$  对过程  $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\nu_e\nu_e$  的贡献很大, 通过此过程可在 LC 实验中探测 top-Higgs; 另外  $e^+e^- \rightarrow \gamma\bar{t}c$  也是探测  $h_1^0$  的有效过程.

**关键词** top-Higgs 产生截面 味改变耦合

质量起源是粒子物理的一个重要问题. 顶夸克的质量与电弱对称性破缺(EWSB)标度在同一量级, 因此 EWSB 和顶夸克质量产生有可能是同样原因所致. 就顶夸克质量的产生和 EWSB 的关系方面人们作了大量的工作, 提出了一些具体模型, 如顶色辅助的人工色(TC2)模型<sup>[1]</sup>, top see-saw 模型<sup>[2]</sup> 及味不变的 coloron<sup>[3]</sup> 模型等. 一般此类模型预言了与第三代夸克有较大 Yukawa 耦合的标量场, 例如, TC2 理论预言 top-pion( $\pi_t^+$ ,  $\pi_t^0$ ) 和中性 top-Higgs  $h_1^0$  的存在性. 这些“新”粒子与 EWSB 有直接的联系, 因此在高能对撞机上研究这些粒子的可能物理迹象将为 EWSB 和味物理提供重要信息.

在标准模型(SM)中, 没有树图级味改变中性流(FCNC), 由于 CKM 机制的压低, 即使在单圈级这些过程的产生截面也很小, 在 SM 中观察到任何味改变耦合都意味着新物理的存在, 因此, 可以用 FCNC 过程来探测新物理. TC2 理论中的基本相互作用, topcolor 相互作用, 是非普适的, 因而无 GIM 压低, 它预言的标量场引起味改变标量耦合, 表现出在低能高能下都可测的味混合现象<sup>[4]</sup>. 本文计算了  $h_1^0$  对  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-\nu_e\nu_e \rightarrow t\bar{c}\nu_e\nu_e$  的贡献, 并与其对  $e^+e^- \rightarrow Zh_1^0 \rightarrow Ztc$  和  $e^+e^- \rightarrow \gamma h_1^0 \rightarrow \gamma\bar{t}c$  的贡献相比. 结果表明  $h_1^0$  对  $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\nu_e\nu_e$  的贡献很大, 在质心能量  $\sqrt{s} = 500-1500\text{GeV}$  的高能线性  $e^+e^-$  对撞机(LC)上, 只要  $h_1^0$  的质量小于  $2m_t$ , 就可以探测到  $h_1^0$ ; 在 LC 实验中,  $h_1^0$  也可通过  $e^+e^- \rightarrow \gamma\bar{t}c$  过程探测.

根据 TC2 理论的基本思想, 有以下关系式成立:

2001-12-17 收稿

\* 国家自然科学基金(19905004), 河南省杰出青年基金(9911)和河南省教育基金资助

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

$$V_w^2 + F_t^2 = V_w'^2, \quad (1)$$

其中  $V_w$  表示 TC 或其他相互作用对 EWSB 的贡献,  $F_t \approx 50\text{GeV}$  是 TC 理论预言的标量场 (top-pions 或 top-Higgs) 的衰变常数,  $V_w = v/\sqrt{2} \approx 174\text{GeV}^{[1]}$ . 因此 W, Z 质量的大部分来自 TC 费米子凝聚, 与 SM 预言 Higgs 粒子相比  $h_i^0$  与 W, Z 的树图耦合被因子  $F_t/V_w$  压低

$$h_i^0 \text{WW}: \frac{F_t}{V_w} g m_w g_{\mu\nu}, \quad h_i^0 \text{ZZ}: \frac{F_t}{V_w} \frac{g m_Z}{\cos\theta_w} g_{\mu\nu}, \quad (2)$$

$h_i^0$  与第三代夸克的耦合强度为<sup>[1,4]</sup>

$$h_i^0 \text{tt}: \frac{m_t}{\sqrt{2} F_t} \frac{\sqrt{V_w'^2 - F_t^2}}{V_w} K^{tt}, \quad h_i^0 \text{tc}: \frac{m_t}{\sqrt{2} F_t} \frac{\sqrt{V_w'^2 - F_t^2}}{V_w} K^{tc}, \quad h_i^0 \text{bb}: \frac{m_b^*}{\sqrt{2} F_t} \frac{\sqrt{V_w'^2 - F_t^2}}{V_w} \quad (3)$$

$m_b^*$  是由瞬子效应产生的顶夸克质量, 取  $m_b^* = 0.8 m_b$ . 已知  $K^{tt} = 1 - \epsilon$ ,  $K^{tc} = \sqrt{(K_{UR}^{tc})^2 + (K_{UL}^{tc})^2} \approx K_{UR}^{tc} \leq \sqrt{\epsilon - \epsilon^2}$ ,  $\epsilon$  是与模型相关的自由参量,  $\epsilon \ll 1$ . 本文假定 topcolor 相互作用产生的顶夸克质量占  $m_t$  的 99%, 即  $\epsilon = 0.01$ ,  $K^{tc}$  取为自由参数.

与  $\pi_i^0$  相似,  $h_i^0$  可通过顶夸克圈与规范玻色子对  $gg, \gamma\gamma$  或  $Z\gamma$  相耦合, 其耦合的一般形式为<sup>[5,6]</sup>

$$\frac{1}{1 + \delta_{B_1 B_2}} \frac{\alpha S_{\pi_i^0 B_1 B_2}}{\pi F_t} \pi_i^0 \epsilon_{\mu\nu\alpha\beta} (\partial^\mu B_1^\nu) (\partial^\alpha B_2^\beta) \quad (4)$$

当  $200\text{GeV} \leq m_{h_i} \leq 400\text{GeV}$  时, 其各衰变道  $bb, \bar{t}c, \text{WW}, \text{ZZ}, gg, \gamma\gamma, Z\gamma$  及  $t\bar{t}$  (动力学允许范围内) 的衰变宽度为

$$\Gamma(h_i^0 \rightarrow bb) = \frac{3}{16\pi} \frac{V_w'^2 - F_t^2}{V_w^2} \frac{(m_b - 0.1\epsilon m_t)^2}{F_t^2} m_{h_i} \sqrt{1 - \frac{4m_b^2}{m_{h_i}^2}}, \quad (5)$$

$$\Gamma(h_i^0 \rightarrow \bar{t}c) = \frac{3(1 - \epsilon)^2}{16\pi} \frac{V_w'^2 - F_t^2}{V_w^2} \frac{m_t^2 m_{h_i}}{F_t^2} (K_{UR}^{tc})^2 \sqrt{1 - \frac{m_t^2}{m_{h_i}^2}}, \quad (6)$$

$$\Gamma(h_i^0 \rightarrow \text{WW}) = \frac{G_f m_{h_i}^3}{8\pi\sqrt{2}} \left(1 - \frac{4m_w^2}{m_{h_i}^2} + \frac{12m_w^4}{m_{h_i}^4}\right) \frac{F_t^2}{V_w^2} \sqrt{1 - \frac{4m_w^2}{m_{h_i}^2}}, \quad (7)$$

$$\Gamma(h_i^0 \rightarrow \text{ZZ}) = \frac{G_f m_{h_i}^3}{16\pi\sqrt{2}} \left(1 - \frac{4m_Z^2}{m_{h_i}^2} + \frac{12m_Z^4}{m_{h_i}^4}\right) \frac{F_t^2}{V_w^2} \sqrt{1 - \frac{4m_Z^2}{m_{h_i}^2}}, \quad (8)$$

$$\Gamma(h_i^0 \rightarrow gg) = \frac{\alpha_s^2 (1 - \epsilon)^2}{64\pi^3} \frac{m_{h_i}^3}{F_t^2} \frac{V_w'^2 - F_t^2}{V_w^2} J^2(R_{h_i}), \quad (9)$$

$$\Gamma(h_i^0 \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{\alpha_e^2 (1 - \epsilon)^2}{18\pi^3} \frac{V_w'^2 - F_t^2}{V_w^2} \frac{m_{h_i}^3}{F_t^2} J^2(R_{h_i}), \quad (10)$$

$$\Gamma(h_i^0 \rightarrow t\bar{t}) = \frac{3}{16\pi} \frac{V_w'^2 - F_t^2}{V_w^2} \frac{m_t^2}{F_t^2} m_{h_i} \sqrt{1 - \frac{4m_t^2}{m_{h_i}^2}}, \quad (11)$$

其中

$$J(R_{h_i}) = \frac{1}{R_{h_i}^2} \int_0^1 \frac{dx}{x(x-1)} \ln[1 - R_{h_i}^2 x(1-x)], \quad (12)$$

这里  $R_{h_i} = m_{h_i}/m_t$ .

$e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\nu_e\nu_e$  过程的截面可通过计算子过程  $W_{\lambda_+}^+ W_{\lambda_-}^- \rightarrow t\bar{c}$  给出. 本文用有效 W 近似 (EWA) 计算  $h_i^0$  对  $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\nu_e\nu_e$  的贡献, 并讨论在 LC 实验上探测  $h_i^0$  的可能性.  $h_i^0$  对子过程  $W_{\lambda_+}^+ W_{\lambda_-}^- \rightarrow t\bar{c}$  的产生截面的贡献为

$$\hat{\sigma}(W_{\lambda_+}^+ W_{\lambda_-}^- \rightarrow t\bar{c}) = \frac{N_c \alpha}{4S_w^2} \frac{V_w^2 - F_t^2}{V_w^4} (K^{tc})^2 |\epsilon_{\lambda_+}^{W^+} \cdot \epsilon_{\lambda_-}^{W^-}|^2 \frac{m_w^2 m_t^2}{(\hat{s} - m_{h_i}^2)^2 + m_{h_i}^2 \Gamma^2} \cdot \frac{\beta_t^4}{\beta_w}, \quad (13)$$

其中

$$\beta_t = \sqrt{1 - \frac{m_t^2}{\hat{s}}}, \quad \beta_w = \sqrt{1 - \frac{4m_w^2}{\hat{s}}}, \quad (14)$$

其中  $\Gamma$  是  $h_i^0$  衰变的总宽度,  $\sqrt{\hat{s}}$  是 WW 质心系的质心能量, 由于 CKM 压低, SM 预言的截面  $\hat{\sigma}(W_{\lambda_+}^+ W_{\lambda_-}^- \rightarrow t\bar{c})$  是很小的, 在  $\sqrt{s} = 500-2000\text{GeV}$  时  $\sigma_{\text{SM}}^{t\bar{c}} \sim 10^{-5}-10^{-4}$ , 因此在上面公式中忽略了 SM 的贡献.

由上式可得  $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\nu_e\nu_e$  的截面

$$\sigma^{t\bar{c}\nu\nu} = \sum_{\lambda_+, \lambda_-} \iint dx_+ dx_- f_{\lambda_+}(x_+) f_{\lambda_-}(x_-) \hat{\sigma}(W_{\lambda_+}^+ W_{\lambda_-}^- \rightarrow t\bar{c}), \quad (15)$$

其中  $W^+$  的旋度  $\lambda_+$  的取值为 1, 0, -1;  $f_{\lambda_+}(x_+), f_{\lambda_-}(x_-)$  分别为  $W^+, W^-$  的分布函数, 在计算中用文献[7]给出的完全分布函数, 它包含 W 玻色子的所有极化.

图 1 给出了截面  $\sigma^{t\bar{c}\nu\nu}$  在  $\sqrt{s} = 0.5\text{TeV}$  时随  $m_{h_i}$  的变化曲线, 参数  $K^{tc}$  取 4 个值 (0.1, 0.08, 0.05, 0.02), 从图 1 可看出  $\sigma^{t\bar{c}\nu\nu}$  随  $K^{tc}$  的增加而增加, 且在  $m_{h_i} = 215\text{GeV}$  时达到最大值, 当  $m_{h_i} > 2m_t$  时,  $t\bar{t}$  道打开,  $Br(h_i^0 \rightarrow t\bar{c})$  降低, 因而  $\sigma^{t\bar{c}\nu\nu}$  显著减小, 如果 LC 实验在  $\sqrt{s} = 500\text{GeV}$  时的年积分亮度为  $50\text{fb}^{-1}$ , 则在大多数参数空间 ( $m_{h_i}, K^{tc}$ ) 中,  $\sigma^{t\bar{c}\nu\nu}$  有几十个到几百个事例. 如当  $m_{h_i} = 300\text{GeV}, K^{tc} = 0.05$  时, 就产生 25 个此类事例.

图 2 给出了  $\sigma^{t\bar{c}\nu\nu}$  在  $K^{tc} = 0.05\sqrt{s}$  取 3 个值 (1500GeV, 1000GeV, 500GeV) 时随  $m_{h_i}$  的变化

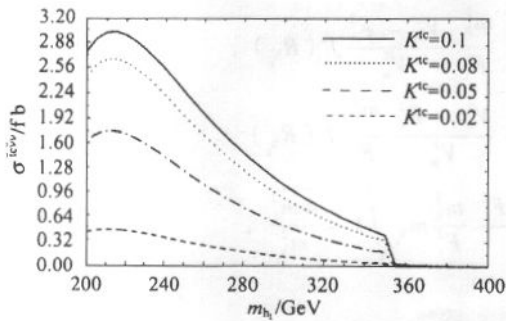


图 1  $\sigma^{t\bar{c}\nu\nu}$  随  $m_{h_i}$  的变化曲线

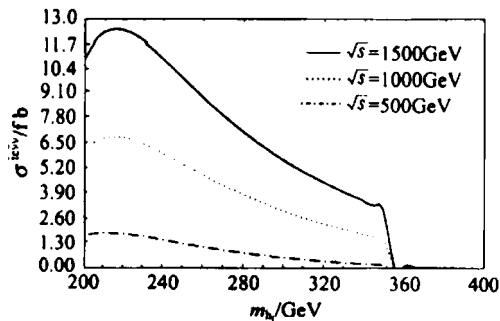


图 2  $\sigma^{t\bar{c}\nu\nu}$  随  $m_{h_i}$  的变化曲线

曲线. 在  $m_{h_1} = 250\text{GeV}$  时, 当  $\sqrt{s}$  从  $500\text{GeV}$  增至  $1500\text{GeV}$ ,  $\sigma^{\text{icv}}$  随之从 1.24 增至 9.97. 显然, 当积分亮度  $L \geq 100\text{fb}^{-1}$  时,  $h_1^0$  将产生上千个  $\bar{t}c\nu_e\nu_e$  事例. 因此在  $\sqrt{s} \geq 1000\text{GeV}$  的 LC 实验中, 很容易通过此过程探测到  $h_1^0$ .

top-Higgs  $h_1^0$  对  $e^+e^- \rightarrow \bar{t}ce^+e^-$  也有贡献, 这是通过子过程  $ZZ \rightarrow \bar{t}c$  来实现的.  $\sigma^{\text{icv}}$  和  $\sigma^{\text{icc}}$  的主要不同在于 W, Z 玻色子的配分函数不同, Z 的配分函数小于 W 的,  $\sigma^{\text{icc}}$  比  $\sigma^{\text{icv}}$  小约一个数量级<sup>[8]</sup>. 因此本文不考虑  $h_1^0$  对  $e^+e^- \rightarrow \bar{t}ce^+e^-$  的贡献.

$h_1^0$  通过过程  $e^+e^- \rightarrow h_1^0 Z, h_1^0 \rightarrow \bar{t}c$  对过程  $e^+e^- \rightarrow \bar{t}cZ$  产生贡献, 其表达式为

$$\sigma^{\bar{t}c} = \frac{\pi\alpha^2}{24\sin^4\theta_W\cos^4\theta_W} (1 + (1 - 4\sin^2\theta_W)^2) \frac{F_1^2 k(k^2 + 3m_Z^2)}{V_W^2 \sqrt{s}(s - m_Z^2)^2} \quad (16)$$

其中  $s$  是质心能量,

$$k = \sqrt{s - m_{h_1}^2} \quad (17)$$

为了比较  $e^+e^- \rightarrow \bar{t}c\nu_e\nu_e$  与  $e^+e^- \rightarrow \bar{t}cZ$  的截面大小, 在图 3 中给出当  $K = 0.05$  时, 比率  $R_1 = \frac{\sigma^{\text{icv}}}{\sigma^{\bar{t}c}}$  随  $m_{h_1}$  的变化曲线. 从图 3 可以看出  $\sigma^{\bar{t}c}$  随  $m_{h_1}$  或  $\sqrt{s}$  的增加而降低. 在  $\sqrt{s} \geq 500\text{GeV}$ ,  $R_1$  在大多数参数空间中是大于 1 的. 如在  $m_{h_1} = 300\text{GeV}$ ,  $K^{\text{ic}} = 0.05$  且  $\sqrt{s} = 500\text{GeV}$  时,  $R_1$  近似等于 2. 因此很难通过  $e^+e^- \rightarrow \bar{t}cZ$  过程探测  $h_1^0$ .

由于  $h_1^0$  可以通过顶夸克圈与规范玻色子对耦合, 故亦可对  $e^+e^- \rightarrow h_1^0 \gamma \rightarrow \bar{t}c$  有贡献. 在文献[4,5]中已经研究过  $\pi_1^0$ . 为了讨论  $h_1^0$  能否可由  $e^+e^- \rightarrow \bar{t}c$  探测, 图 4 画出了在  $K^{\text{ic}} = 0.05$  时的比率  $R_2 = \frac{\sigma^{\text{icv}}}{\sigma^{\bar{t}c}}$  随  $m_{h_1}$  的变化. 从图 4 可以看出,  $\sigma^{\bar{t}c}$  也随  $\sqrt{s}$  的增加而增加, 但比  $\sigma^{\text{icv}}$  增加得慢. 当  $m_{h_1} = 250\text{GeV}$ ,  $K^{\text{ic}} = 0.05$ ,  $\sqrt{s}$  从  $500\text{GeV}$  增至  $1500\text{GeV}$  时,  $R_2$  从 1.08 增至 4.00. 当  $\sqrt{s} = 500\text{GeV}$  时,  $200\text{GeV} \leq m_{h_1} \leq 350\text{GeV}$ ,  $0.30 \leq R_2 \leq 1.05$ . 因此可在 LC 实验上用  $e^+e^- \rightarrow \bar{t}c$  过程探测  $h_1^0$ .

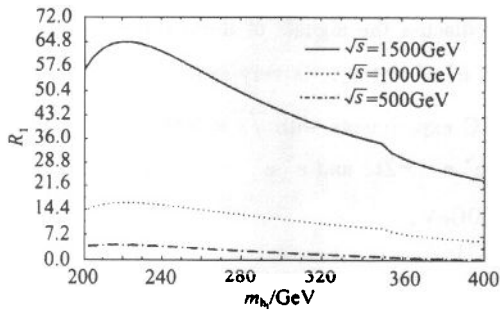


图 3  $R_1 = \sigma^{\text{icv}}/\sigma^{\bar{t}c}$  随  $m_{h_1}$  的变化曲线

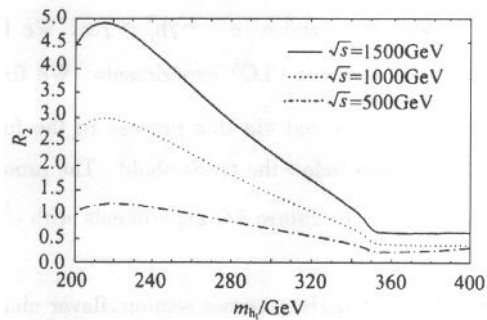


图 4  $R_2 = \sigma^{\text{icv}}/\sigma^{\bar{t}c}$  随  $m_{h_1}$  的变化曲线

在 TC2 理论中, 基本相互作用, topcolor 相互作用是非普适的, 因而没有 GIM 机制,  $h_1^0$  可产生包括  $t-c$  转化的味改变标量耦合. 考虑到在 SM 中 FCNC 过程是非常小的, 可以用

FCNC 过程来探测  $h_1^0$ . 本文计算了  $h_1^0$  对  $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\bar{\nu}_c\nu_c$ ,  $e^+e^- \rightarrow \gamma tc$  及  $e^+e^- \rightarrow Ztc$  过程的贡献. 结果表明在 LC 实验上,  $\sqrt{s} \geq 500\text{GeV}$  时, 可以用  $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\bar{\nu}_c\nu_c$  和  $e^+e^- \rightarrow \gamma tc$  过程探测  $h_1^0$ , 只是  $h_1^0$  对  $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\bar{\nu}_c\nu_c$  的贡献更大.

### 参考文献 (References)

- 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
- Dobrescu B, Hill C. H. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**:2634—2636; Chivukula R. S, Dobrescu B, Georgi H et al. Phys. Rev., 1999, **D59**:075003 - 1—14
- Popovic M. B, Simmons E. H. Phys. Rev., 1998, **D58**:095007 - 1—14; Lane K. Phys. Lett., 1998, **B433**:96—101; Burdman G, Evans N. Phys. Rev., 1999, **D59**:115005 - 1—22
- YUE Chong-Xing, LU Gong-Ru, LI Jian-Tao. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, **25**(12):1140 (in Chinese); (岳崇兴, 鲁公儒, 李建涛. 高能物理与核物理, 2001, **25**(12):1140).
- YUE Chong-Xing, XU Qing-Jun. High Phys. and Nucl. Phys., 2002, to be published (in Chinese); (岳崇兴, 徐庆君. 中性 top-pion 的产生和衰变. 高能物理与核物理, 2002, 待发表)
- YUE Chong-Xing et al. Phys. Rev., 1997, **D55**:5541—5548; YUE Chong-Xing et al. Phys. Rev., 1998, **D57**:4205—4218
- Chanowitz M, Gaillard M. K. Phys. Lett., 1984, **B142**:85—90; Kane G, Repko W, Rolick W. Phys. Lett., 1984, **B148**:367—372; Dawson S. Nucl. Phys., 1985, **B249**:42—55
- Bar-Shalom S, Eilam G, Soni A et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**:1217—1220; Phys. Rev., 1998, **D57**:2957—2964

## Possibility of Detecting the top-Higgs at High Energy $e^+e^-$ Colliders\*

YUE Chong-Xing<sup>1,1)</sup> MA Xiu-Yan<sup>2</sup> LIU Guo-Li<sup>1</sup> XU Qing-Jun<sup>1</sup>

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

2 (Department of Physics, Anyang Teachers College, Henan Anyang 455000, China)

**Abstract** In the context of topcolor-assisted technicolor (TC2) models, we calculate the contributions of the top-Higgs  $h_1^0$  to  $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\bar{\nu}_c\nu_c$  and compare the results with that of  $h_1^0$  to the processes  $e^+e^- \rightarrow Zh_1^0 \rightarrow Ztc$  and  $e^+e^- \rightarrow \gamma h_1^0 \rightarrow \gamma tc$ . We further discuss the signals of these process at high-energy  $e^+e^-$  collider (LC) experiments. We find that  $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\bar{\nu}_c\nu_c$  is very sensitive to  $h_1^0$ , which can be easily detected via this process in the future LC experiments with  $\sqrt{s} = 500—1500\text{GeV}$ , as long as its mass below the  $t\bar{t}$  threshold. The processes  $e^+e^- \rightarrow Ztc$  and  $e^+e^- \rightarrow \gamma tc$  can also be used to detect  $h_1^0$  in the future LC experiments with  $\sqrt{s} = 500\text{GeV}$ .

**Key words** top-Higgs, cross section, flavor changing couplings

Received 17 December 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