

高能 e^+e^- 对撞机上 top 介子辅助的 b 夸克对产生*

黄金书¹⁾ 潘群娜 宋太平 吕林霞

(河南南阳师范学院物理系 南阳 473061)

摘要 在顶色辅助的人工色模型下计算了高能 e^+e^- 对撞机上 top 介子辅助的 b 夸克对产生过程 $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\pi_1^0$ 的产生截面. 发现在一定的参数范围内, 这个过程的产生截面大于 10fb, 比标准模型下标量 Higgs 粒子辅助的 b 夸克对产生过程大许多, 与最小超对称模型下标量和赝标量 Higgs 粒子 h^0, H^0, A^0 的相应产生截面大致相当. 人工色理论的信息可能在下一代正负电子对撞实验中探测到.

关键词 顶色辅助的人工色模型 top 介子 产生截面

1 引言

尽管粒子物理的标准模型同高能物理实验结果比较取得了很大的成功, 但 Higgs 粒子的发现仍未被确证, 弱电对称性破缺 (EWSB) 机制仍然是一个开放的问题. 在探索超出标准模型的新物理时, 人工色 (TC) 理论^[1,2] 是一个重要的候选者. 尽管一些 TC 模型^[3] 与实验结果有矛盾而被排除, 但还有一些 TC 模型值得认真考察, 因为它们根据当前高能物理实验的进展而提出, 并且在与实验相协调方面已经取得了一定的成功, 如顶色辅助的人工色 (TC2) 模型^[4] 和顶夸克上下浮动模型^[5]. 这些模型预言的一些新粒子与第三代费米子存在较强的 Yukawa 耦合, 如 TC2 模型预言的 top 介子 (π_1^+, π_1^0), 直接与 EWSB 相关, 研究这些粒子的信息有助于理解 EWSB 机制和尝试 TC2 模型.

Higgs 玻色子辅助的 b 夸克对产生在标准模型和最小超对称模型中已经被研究^[6]. 标准模型中由于 Higgs 粒子和费米子的耦合与费米子的质量成比例, $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}H^0$ 模式的 H^0 产生被 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H^0$ 压制. 而最小超对称模型中标量和赝标量 Higgs 粒子 h^0, H^0, A^0 辅助的 b 夸克对产生有很大加强. 本文将在 TC2 模型下考察赝标 top 介子 π_1^0 辅助的 b 夸克对

产生过程, 文献 [7] 已经在 TC2 模型下对 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}\pi_1^0$ 和 $e^+e^- \rightarrow t\bar{c}\pi_1^0$ 过程进行了计算, 本文将同它们一起对 e^+e^- 对撞条件下 π_1^0 的产生提供较全面考察.

2 TC2 模型的一般特征和 $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\pi_1^0$ 过程的产生截面

TC2 模型假定^[4,8], EWSB 主要由扩展的人工色 (ETC) 相互作用负责, 而顶夸克的质量主要由顶色 (TOPC) 相互作用产生 $m_t^* = (1 - \epsilon)m_t$, ETC 相互作用只提供其很小一部分 $m_t' = \epsilon m_t$ ($0.03 \leq \epsilon \leq 0.1$). 1 TeV 标度下 TOPC 的规范结构为

$$SU(3)_1 \times SU(3)_2 \times U(1)_{Y_1} \times U(1)_{Y_2} \rightarrow SU(3)_{\text{QCD}} \times U(1)_{\text{EM}}, \quad (1)$$

这里 $SU(3)_1 \times U(1)_{Y_1}$ ($SU(3)_2 \times U(1)_{Y_2}$) 分别表示 TOPC 与第三代 (第一、二代) 费米子的耦合. 它相当强是指其通过 $U(1)_{Y_1}$ 耦合与 $\langle \bar{t}t \rangle$ 而非 $\langle \bar{b}b \rangle$ 凝聚. 遗留的对称性 $SU(3) \times U(1)$ 暗示有较重质量色单态 Z' 和色八重态 B_μ^A 规范粒子存在. 而破缺的对称性将产生 3 个质量与顶夸克质量相近的 TOPC 介子 π_1^+, π_1^0 , 它们不是弱电规范玻色子 W^\pm, Z 的分量

2002 - 12 - 30 收稿

* 国家自然科学基金和河南省教育厅自然科学基金资助

1) E-mail: jshuang@vip.sina.com

而可能成为可观察的物理粒子.

TOPC 规范玻色子 Z' 与 e^+e^- , $b\bar{b}$ 的 Yukawa 耦合为

$$\frac{1}{2}g_1\left[\frac{1}{3}\cot\theta'(\bar{b}_L\gamma^\mu b_L - 2\bar{b}_R\gamma^\mu b_R) + \tan\theta'(\bar{e}_L\gamma^\mu e_L + 2\bar{e}_R\gamma^\mu e_R)\right], \quad (2)$$

其中 $R(L) = (1 \pm \gamma_5)/2$ 是手征算符, $g_1 = \alpha_{EM}/\cos\theta_w$ 是 1 TeV 标度下 $U(1)_Y$ 的耦合常数, θ' 是正交转动的混合角 $\tan\theta' = g_1/(2\sqrt{\pi}k_1)$, k_1 是模型依赖的常数^[4,7].

这个模型的 ETC 部分是一代人工色模型, 有 60 个衰变常数为 $f_\pi = 123$ GeV 的 TC 介子, 同时其 TOPC 部分有 3 个衰变常数约为 $f_{\pi_i} = 60$ GeV 的 TOPC 介子. TOPC 介子与 t, b 夸克的相互作用为

$$\frac{iV_{tb}}{f_{\pi_i}}\left[\frac{1}{\sqrt{2}}m_t^*\bar{t}\gamma_5 t\pi_i^0 + \frac{1}{\sqrt{2}}m_b^*\bar{b}\gamma_5 b\pi_i^0 + i(m_t^*L + m_b^*R)b\pi_i^+ + \bar{b}(m_t^*R + m_b^*L)t\pi_i^-\right], \quad (3)$$

其中 m_t^* , m_b^* 表示 TOPC 相互作用产生的 t 夸克和 b 夸克的质量.

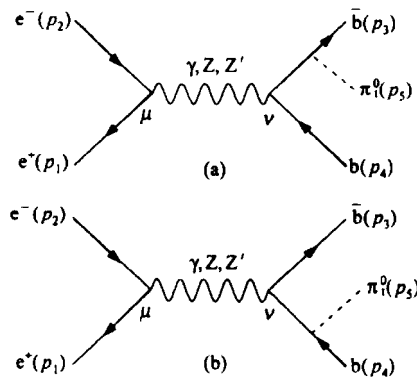


图 1 $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\pi_0^0$ 过程的费曼图

Z' 是 TOPC 相互作用的规范玻色子, π_0^0 是中性 top 介子.

$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\pi_0^0$ 过程的费曼图如图 1 所示, 其不变振幅为

$$M = M_a^Y + M_b^Y + M_a^Z + M_b^Z + M_a^{Z'} + M_b^{Z'}, \quad (4)$$

其中

$$M_a^Y = -\frac{1}{3}e^2\frac{V_{tb}m_b^*}{\sqrt{2}f_{\pi_i}}\bar{v}(p_1)\gamma^\mu u(p_2) \cdot \frac{1}{s}u(p_3)\gamma_5\frac{\not{p}_3 + \not{p}_5 + m_b}{(p_3 + p_5)^2 - m_b^2}\gamma_5 v(p_4), \quad (5)$$

$$M_b^Y = -\frac{1}{3}e^2\frac{V_{tb}m_b^*}{\sqrt{2}f_{\pi_i}}\bar{v}(p_1)\gamma^\mu u(p_2) \cdot$$

$$\frac{1}{s}u(p_3)\gamma_5\frac{\not{p}_4 + \not{p}_5 + m_b}{(p_4 + p_5)^2 - m_b^2}\gamma_5 v(p_4),$$

$$M_a^Z = -e^2\frac{V_{tb}m_b^*}{\sqrt{2}f_{\pi_i}}\bar{v}(p_1)\gamma^\mu(a_e L + v_e R)u(p_2) \cdot$$

$$\frac{1}{s - m_Z^2 + im_Z\Gamma_Z}\bar{u}(p_3)\gamma_5\frac{\not{p}_3 + \not{p}_5 + m_b}{(p_3 + p_5)^2 - m_b^2}\gamma_5(a_b L + v_b R)v(p_4), \quad (7)$$

$$M_b^Z = -e^2\frac{V_{tb}m_b^*}{\sqrt{2}f_{\pi_i}}\bar{v}(p_1)\gamma^\mu(a_e L + v_e R)u(p_2) \cdot$$

$$\frac{1}{s - m_Z^2 + im_Z\Gamma_Z}\bar{u}(p_3)\gamma_5(a_b L + v_b R) \cdot \frac{\not{p}_4 + \not{p}_5 + m_b}{(p_4 + p_5)^2 - m_b^2}\gamma_5 v(p_4), \quad (8)$$

$$M_a^{Z'} = \frac{\alpha_{EM}^2}{\cos^2\theta_w}\frac{V_{tb}m_b^*}{\sqrt{2}f_{\pi_i}}\bar{v}(p_1)\gamma^\mu\left(\frac{1}{2}L + R\right)u(p_2) \cdot$$

$$\frac{1}{s - m_Z^2 + im_Z\Gamma_Z}\bar{u}(p_3)\gamma_5\frac{\not{p}_3 + \not{p}_5 + m_b}{(p_3 + p_5)^2 - m_b^2}\gamma_5\left(\frac{1}{6}L - \frac{1}{3}R\right)v(p_4),$$

$$M_b^{Z'} = \frac{\alpha_{EM}^2}{\cos^2\theta_w}\frac{V_{tb}m_b^*}{\sqrt{2}f_{\pi_i}}\bar{v}(p_1)\gamma^\mu\left(\frac{1}{2}L + R\right)u(p_2) \cdot$$

$$\frac{1}{s - m_Z^2 + im_Z\Gamma_Z}\bar{u}(p_3)\gamma_5\left(\frac{1}{6}L - \frac{1}{3}R\right) \cdot \frac{\not{p}_4 + \not{p}_5 + m_b}{(p_4 + p_5)^2 - m_b^2}\gamma_5 v(p_4). \quad (10)$$

式中 \sqrt{s} 是对撞机的质心能量, m_Z 表示 TOPC 规范玻色子 Z' 的质量, 衰变宽度 Γ_Z , Γ_Z 由文献[9]给出. 而系数 a_e, v_e, a_b, v_b 分别为

$$a_e = \frac{\sin\theta_w}{\cos\theta_w}, \quad v_e = \frac{-1 + 2\sin^2\theta_w}{2\sin\theta_w\cos\theta_w}, \quad (11)$$

$$a_b = \frac{\sin\theta_w}{3\cos\theta_w}, \quad v_b = \frac{-1 + \frac{2}{3}\sin^2\theta_w}{2\sin\theta_w\cos\theta_w}. \quad (12)$$

由不变振幅 M 可以计算 $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\pi_0^0$ 过程的产生截面.

3 数值结果与结论

作为数值计算, 首先说明用到的特殊参数. $m_Z = 91.187$ GeV, $f_{\pi_i} = 60$ GeV, $\sin^2\theta_w = 0.2315$, $\alpha_{EM} = 1/128.8$, $V_{tb} = 1$, $\Gamma_Z = 2.495$ GeV, $\Gamma_{Z'} = \frac{1}{3}m_Z$ ^[9]. 由公式(2)可知产生截面与混合角 θ' 无关. 按照 TC2 理论的思想, 第一、二代夸克的质量主要由 ETC 相

相互作用产生,则由 ETC 相互作用产生的第三代夸克的质量(m'_c, m'_b)应与第二代夸克的质量(m'_s, m'_d)相一致^[10],因此有 $m'_c = (m_c/m_s) m'_s$. 由于 m'_c, m'_b 很小,这里,近似认为 b 夸克的质量只有 TOPC 相互作用产生,取 $m'_b = 4.5 \text{ GeV}$. TOP 介子 π_1^0 和 TOPC 相互作用规范玻色子 Z' 的质量是模型依靠的,文献 [2,4] 表明它们的期望值分别在 220 GeV, 600 GeV 左右,本文分别取 180—450 GeV, 200—1000 GeV 来考察它们的效果.

具体的数值结果如图 2—4 所示. 图 2 给出了 $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\pi_1^0$ 过程的产生截面随 m_{π_1} 的变化规律,其中 $\sqrt{s} = 1500 \text{ GeV}$, $m_{Z'} = 600 \text{ GeV}$. 可以看出,产生截面随 m_{π_1} 的增大而减小. 在 180—280 GeV 之间, $b\bar{b}\pi_1^0$ 的产生截面大于 10 fb, 相当明显.

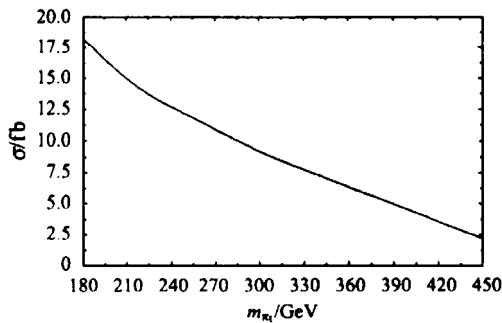
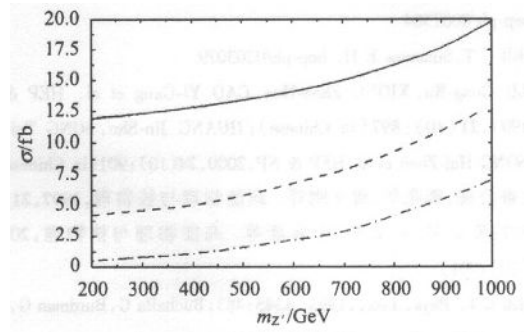


图 2 $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\pi_1^0$ 过程的产生截面随 m_{π_1} 的变化规律
 $\sqrt{s} = 1500 \text{ GeV}$, $m_{Z'} = 600 \text{ GeV}$.

质心能量 $\sqrt{s} = 1500 \text{ GeV}$ 时产生截面随 TOPC 规范玻色子 Z' 质量的变化关系在图 3 中给出. 可以看出, (1) $b\bar{b}\pi_1^0$ 的产生随 $m_{Z'}$ 的增加而缓慢增加; (2) 对于 $m_{\pi_1} = 220, 350, 450 \text{ GeV}$ 的不同情形, 产生截面的差别比较明显; (3) 特别是在 $m_{\pi_1} = 220 \text{ GeV}$ 情形, σ 相当大, 从 11.9 fb 增加到 19.8 fb.

图 4 考察了产生截面随质心能量的变化情况.

发现 σ 随 \sqrt{s} 也是缓慢增加. 对于 $m_{\pi_1} = 220 \text{ GeV}$ 的情形 $b\bar{b}\pi_1^0$ 的产生截面较大.



3 $\sigma_{e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\pi_1^0}$ 随 $m_{Z'}$ 的函数变化关系
 $\sqrt{s} = 1500 \text{ GeV}$, 实线, 虚线和点线分别对应
 $m_{\pi_1} = 220, 350, 450 \text{ GeV}$.

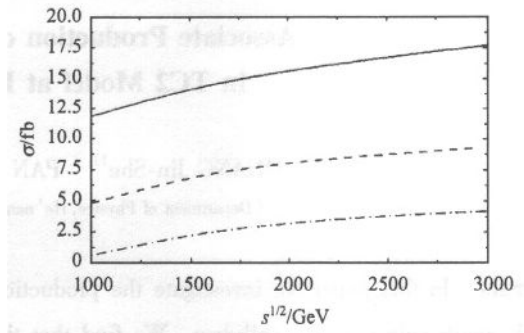


图 4 产生截面 σ 随质心能量 \sqrt{s} 的变化
 $m_{Z'} = 600 \text{ GeV}$, 实线, 虚线和点线分别对应
 $m_{\pi_1} = 220, 350, 450 \text{ GeV}$.

作为结论, 本文在顶色辅助的人工色模型下计算了高能 e^+e^- 对撞机上 top 介子辅助的 b 夸克对产生过程 $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\pi_1^0$ 的截面. 发现在一定的参数范围内, 特别是 top 介子 π_1^0 的质量在 220 GeV 左右时, 这个过程的产生截面大于 10 fb. 这样大的产生截面有可能在下一代的正负电子对撞机上探测到.

参考文献 (References)

- 1 Weinberg S. Phys. Rev., 1976, **D13**:974; 1979, **D19**:1277; Lane K. hep-ph/0007304
- 2 Hill C T, Simmons E H. hep-ph/0203079
- 3 LU Gong-Ru, XIONG Zhao-Hua, CAO Yi-Gang et al. HEP & NP, 1997, **21** (10): 897 (in Chinese); HUANG Jin-Shu, SONG Tai-Ping, SONG Hai-Zhen et al. HEP & NP, 2000, **24**(10):901 (in Chinese) (鲁公儒, 熊兆华, 曹义刚等. 高能物理与核物理, 1997, **21**(10): 897; 黄金书, 宋太平, 宋海珍等. 高能物理与核物理, 2000, **24** (10):901)
- 4 Hill C T. Phys. Lett., 1995, **B345**:483; Buchalla G, Burdman G, Hill C T et al. Phys. Rev., 1996, **D53**:5185
- 5 Dobrescu B A, Hill C T. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**:2634; Chivukula R S, Dobrescu B A, Georgi H et al. Phys. Rev., 1999, **D59**:075003; Collins H, Grant A, Georgi H. Phys. Rev., 2000, **D61**:055002
- 6 Dawson S, Reina L, Phys. Rev., 1999, **D60**: 015003; Gutiérrez-Rodríguez A, Hernández-Ruíz M A, Sampayo O A. hep-ph/0110289
- 7 YUE Chong-Xing, JIA Yong, ZHANG Yan-Ming et al. Phys. Rev., 2002, **D65**:095010; WANG Xei-Lei, YANG Yue-Ling, LI Bing-Zhong et al. hep-ph/0206182
- 8 HUANG Jin-Shu, XIONG Zhao-Hua, LU Gong-Ru. Commun. Theor. Phys., 2002, **37**(2): 209; HUANG Jin-Shu, LU Gong-Ru. Commun. Theor. Phys., 2002, **38**(5):566; LU Gong-Ru, PAN Qun-Na, HUANG Jin-Shu et al. HEP & NP, 1999, **23**(3):226 (in Chinese) (鲁公儒, 潘群娜, 黄金书等. 高能物理与核物理, 1999, **23**(3): 226)
- 9 Hill C T, Parke S T. Phys. Rev., 1994, **D49**:4454
- 10 WU Guo-Hong. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**:4137; YUE Chong-Xing, LU Gong-Ru. J. Phys., 1997, **G23**:163

Associate Production of the top-Pion with b Quark Pair in TC2 Model at High Energy e^+e^- Colliders*

HUANG Jin-Shu¹⁾ PAN Qun-Na SONG Tai-Ping LÜ Lin-Xia

(Department of Physics, He'nan Nanyang Normal College, Nanyang 473061, China)

Abstract In this paper we investigate the production of top-pion π_0^0 of the topcolor assisted technicolor (TC2) model with b quark pair at e^+e^- colliders. We find that the cross section of the process $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\pi_0^0$ is larger than that of $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}H^0$ in the standard model, and is approximately the same as that of the process $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}h^0$ ($b\bar{b}H^0$, $b\bar{b}A^0$) in the minimal supersymmetric model. With reasonable values of the parameter, the cross section can reach 10fb. The neutral top-pion π_0^0 may be observed directly via this process at the next linear colliders.

Key words topcolor assisted technicolor model, top-pion, cross section

Received 30 December 2002

* Supported by National Natural Science Foundation of China and Natural Science Foundation of the Educational Department of He'nan Province

1) E-mail: jshuang@vip.sina.com