

# 强子对撞机上中性top-pion介子产生过程

## $pp(p\bar{p}) \rightarrow \Pi_t^0 \Pi_t^0, b\Pi_t^0$ 的研究\*

陈兰莉<sup>1,2</sup> 许文娜<sup>1</sup> 王学雷<sup>1;1)</sup>

1 (河南师范大学物理与信息工程学院 新乡 453007)

2 (河南省南阳理工学院电子系 南阳 473004)

**摘要** 在TC2模型框架下研究了强子对撞机Tevatron和LHC上中性top-pion介子 $\Pi_t^0$ 的产生过程 $pp(p\bar{p}) \rightarrow \Pi_t^0 \Pi_t^0$ 和 $pp(p\bar{p}) \rightarrow b\Pi_t^0$ . 研究表明,在Tevatron上,这两个过程的产生截面都很小,通过这两个过程我们无法探测到中性top-pion介子. 在LHC上,产生截面会大大增加,但通过 $\Pi_t^0 \Pi_t^0$ 的产生仍无法探测到中性top-pion介子.  $b\Pi_t^0$ 在LHC上的产生截面能达到几百个fb甚至pb的量级,LHC每年能产生 $10^4$ — $10^5$ 个 $b\Pi_t^0$ 事例. 另外,味改变耦合 $\Pi_t^0 t\bar{c}$ 的存在,使得实验能通过背景非常干净的衰变道 $\Pi_t^0 \rightarrow t\bar{c}$ 来探测 $\Pi_t^0$ . 因此,通过 $b\Pi_t^0$ 这一产生机制,未来的LHC实验应能获得足够多的可鉴别的 $\Pi_t^0$ 事例. 我们的研究结果,可为LHC上寻找中性top-pions介子检验TC2模型提供有价值的理论指导.

**关键词** TC2模型 电弱对称性破缺 强子对撞机 产生截面

## 1 引言

尽管标准模型通过了很多精确实验的检验,但是其中的电弱破缺机制(EWSB)仍不清楚,探索电弱对称性破缺机制是当前粒子物理中的重要前沿问题之一,也是未来高能实验重要任务之一.

目前,多数理论物理学家深信,在TeV能标下,会有超出标准模型的新物理出现,标准模型只是某种更基本理论的低能有效形式. 目前,人们比较关注的新物理模型主要有: 最小超对称模型(MSSM)、technicolor(TC)模型、额外维理论等. 它们避免了标准模型中Higgs场带来的平庸性、不自然性等问题. TC模型是一种动力学破缺理论,在众多的TC模型中, topcolor辅助的technicolor(TC2)模型<sup>[1]</sup>是一种比较理想的TC模型. 一方面,它解释了重top夸克质量问题,又不与实验相矛盾;另外,它还合理地解释了EWSB. TC2模型结合了TC理论和topcolor理论的优点. 其EWSB主要由TC部分产生, extended technicolor (ETC)<sup>[2]</sup>贡献了普通夸克和轻子

的质量,并且给出top夸克质量的一小部分:  $m_t' = \varepsilon m_t$  ( $\varepsilon=0.03-0.1$ )<sup>[3]</sup>. 而topcolor贡献了top夸克质量的主要部分:  $m_t' = (1-\varepsilon)m_t$ , 并对EWSB有小部分贡献. TC2模型的一主要预言是存在3个赝格尔斯通粒子:  $\Pi_t^0, \Pi_t^\pm$ , 称为top-pion介子. 这些粒子的质量在几百个GeV的范围,是TC2模型的特征粒子,也是未来高能实验可观测的物理粒子,这些粒子的发现将为TC2模型的存在提供直接的实验证据.

在 高能实验方面,一些正在运行或筹建中的对撞机将为我们寻找Higgs粒子或其他新粒子、搞清EWSB机制等前沿问题提供良机,尤其是高能量、高亮度的强子对撞机. 正运行的质子-反质子对撞机Tevatron,其质心能量 $\sqrt{s}=2\text{TeV}$ ,目前已运行到第二阶段,有望发现SM或MSSM中质量 $M_H < 130\text{GeV}$ 的轻或类轻的Higgs粒子,但无法阐明EWSB机制;即将运行的质子-质子对撞机LHC,其质心能量可达 $\sqrt{s}=14\text{TeV}$ ,亮度为 $100\text{fb}^{-1}/\text{year}$ ,将能发现SM中更大质量的Higgs粒子或MSSM整个参数空间的Higgs玻色子,还能够探测新物理模型中与EWSB有关的新

2006-06-23 收稿

\* 国家自然科学基金(10375017)资助

1) E-mail: wangxuelei@sina.com

的类 Higgs 重粒子(如 TC2 中的 top-pions). 因此, 在高能量、高亮度的强子对撞机 Tevatron 和 LHC 上研究 top-pion 的产生机制, 可为强子对撞机寻找 top-pion 提供有价值的理论指导.

为寻找 TC2 模型中的中性 top-pion 介子, 人们已经系统地研究了  $e^+e^-$  对撞机上通过  $e^+e^-$  对撞产生中性 top-pion 的过程<sup>[4, 5]</sup>. 正负电子对撞机上也可实现电子-光子、光子-光子对撞, 文献[6—8]对光子对撞机上中性 top-pion 的产生机制也进行了系统研究. 这些研究表明, 未来高能量、高亮度的正负电子直线对撞机为中性 top-pion 介子的探测提供了契机. 同样, 中性 top-pion 介子也可在强子对撞机上产生. 关于强子对撞机 Tevatron 和 LHC 上中性 top-pion 的产生, 我们已经研究了  $\Pi_t^0$  与规范玻色子的联合产生过程  $\Pi_t^0 V (V = g, W, Z, \gamma)$  和  $\Pi_t^0$  与夸克对的联合产生过程  $\Pi_t^0 t\bar{t}, \Pi_t^0 t\bar{c}$ <sup>[9]</sup>. 本文将研究强子对撞机 Tevatron 和 LHC 上  $pp(p\bar{p}) \rightarrow \Pi_t^0 \Pi_t^0$  和  $pp(p\bar{p}) \rightarrow b\Pi_t^0$  这两个 top-pion 产生过程.

## 2 强子对撞机上 $\Pi_t^0 \Pi_t^0$ 产生过程研究

TC2 模型中 top-pion 与三代费米子间的耦合是非普适的, 它只与第三代费米子有较强的耦合, 其中, 中性 top-pion 与第三代夸克间的耦合为<sup>[10]</sup>

$$i \frac{m_t}{\nu_W} \tan \beta \left[ K_{UR}^{tt} K_{UL}^{t\bar{t}} \bar{t} \gamma_5 t \Pi_t^0 + K_{UR}^{tc} K_{UL}^{t\bar{c}} \bar{t} R c \Pi_t^0 + \frac{m_b^*}{m_t} \bar{b} \gamma_5 b \Pi_t^0 \right] \dots, \quad (1)$$

其中  $\tan \beta = \sqrt{\left(\frac{\nu_W}{\nu_t}\right)^2 - 1}$ ,  $R = \frac{1 + \gamma_5}{2}$ ,  $\nu_t \cong 60 - 100 \text{ GeV}$  是 top-pion 介子的衰变常数,  $\nu_W = 246 \text{ GeV}$  是电弱破缺标度.  $K_{UL}^{tt}$  是么正矩阵  $K_{UL}$  的矩阵元,  $K_{UR}^{tt,tc}$  是右手旋转矩阵  $K_{UR}$  的矩阵元. 旋转矩阵  $K_{UL,R}$  可使质量矩阵对角化:  $K_{UL}^+ M_U K_{UR} = M_U^{\text{dia}}$ . 而 CKM 矩阵表示为  $V = K_{UL}^- K_{DL}$ ; 它们的值如下:

$$K_{UL}^{t\bar{t}} \cong 1, \quad K_{UR}^{tt} = 1 - \varepsilon, \quad K_{UR}^{tc} \leq \sqrt{2\varepsilon - \varepsilon^2}, \quad (2)$$

这里把  $\varepsilon$  作为自由参数, 取值范围为 0.03 到 0.1. 瞬子所产生的部分底夸克质量用  $m_b^*$  表示, 其值大约为<sup>[1]</sup>

$$m_b^* = \frac{3km_t}{8\pi^2} \sim 6.6k \text{ GeV}, \quad (3)$$

在 QCD 中  $k$  取 0.1—1, 这里取  $k=0.5$ .

由(1)式可以看出, top-pion 与费米子的耦合正比于夸克的质量. 由于 topcolor 的非普适性, TC2 模型不存在 GIM 机制的压低, 在树图水平存在味改变的

耦合  $\Pi_t^0 t\bar{c}$ , 这也是 TC2 模型的一个典型特征. 我们已研究了与这一味改变耦合相关的  $t$  夸克稀有衰变过程  $t \rightarrow cV (V = g, Z, \gamma)$ <sup>[11]</sup>, 在 TC2 模型中, 这一稀有过程的分支比大大增加, 未来高能实验可以通过这一稀有过程探测到 TC2 模型的效应.

树图水平的  $\Pi_t^0 \Pi_t^0$  产生过程的费曼图如图 1 所示.

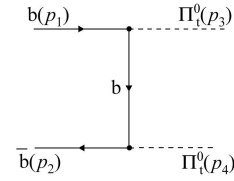


图 1 强子对撞机上  $\Pi_t^0 \Pi_t^0$  产生过程的费曼图

根据费曼图可直接写出其产生振幅

$$M_1 = \frac{i \tan^2 \beta}{\nu_W^2} \frac{m_b^{*2}}{(p_1 - p_3)^2 - m_b^2} \times \bar{v}_b(p_2) (m_b + \not{p}_3 - \not{p}_1) u_b(p_1). \quad (4)$$

在强子对撞机上, 依据以上的产生振幅, 可直接写出子过程  $b\bar{b} \rightarrow \Pi_t^0 \Pi_t^0$  的产生截面, 在强子对撞机上总的截面用部分子的分布函数同子截面的卷积得到.

在计算中, 取  $m_b = 4.9 \text{ GeV}$ ,  $\nu_t = 60 \text{ GeV}$ . 而对于产生截面中的自由参数  $M_{\Pi_t}$ , 让  $M_{\Pi_t}$  在 150—400 GeV 之间变化. 图 2 和图 3 分别给出了 Tevatron 和 LHC 上,  $\Pi_t^0 \Pi_t^0$  产生截面随中性 top-pion 介子质量  $M_{\Pi_t}$  变化的曲线.

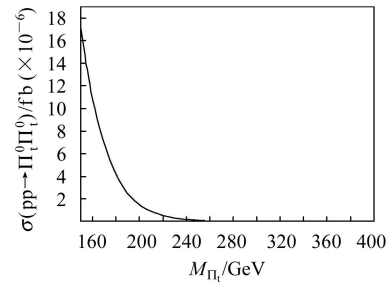


图 2 Tevatron 上  $\Pi_t^0 \Pi_t^0$  产生的总截面随  $M_{\Pi_t}$  变化曲线

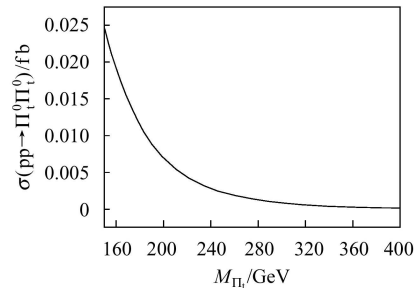


图 3 LHC 上  $\Pi_t^0 \Pi_t^0$  产生的总截面随  $M_{\Pi_t}$  变化曲线

如图 2, 3 所示,  $\Pi_t^0 \Pi_t^0$  的产生截面随  $M_{\Pi_t}$  的增加而单调递减. 当  $M_{\Pi_t}$  在 150—400 GeV 之间取值时, 由于

$\Pi_t^0$  与 b 夸克对的耦合较弱、强子中 b 夸克贡献较小以及末态相空间的压低效应, 发现在 Tevatron 和 LHC 上  $\Pi_t^0\Pi_t^0$  的产生截面都低于 fb 的量级. 如此低的截面, 即便 LHC 的年积分亮度达到预计的  $100\text{fb}^{-1}$ , 也无法通过  $pp \rightarrow \Pi_t^0\Pi_t^0$  过程发现中性 top-pion 介子.

### 3 强子对撞机上 $b\Pi_t^0$ 产生过程研究

在强子对撞机上, 树图水平的  $b\Pi_t^0$  产生过程的费曼图如图 4 所示.

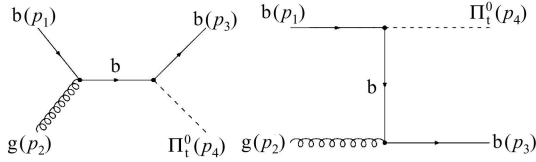


图 4 强子对撞机上  $b\Pi_t^0$  产生过程的费曼图

根据费曼图可直接写出相关的产生振幅:

$$M_2 = \frac{m_b^* g_s \tan \beta}{\nu_W} \frac{1}{(p_1 + p_2)^2 - m_b^2} \bar{u}_{bi}(p_3) \gamma_5 \times (\not{p}_1 + \not{p}_2 + m_b) \gamma^\mu T_{ij}^a u_{bj}(p_1) \varepsilon_\mu^a(p_2), \quad (5)$$

$$M_3 = \frac{m_b^* g_s \tan \beta}{\nu_W} \frac{1}{(p_1 - p_4)^2 - m_b^2} \bar{u}_{bi}(p_3) \gamma^\mu \times T_{ij}^a (\not{p}_1 - \not{p}_4 + m_b) \gamma_5 u_{bj}(p_1) \varepsilon_\mu^a(p_2). \quad (6)$$

现在, 对  $b\Pi_t^0$  的产生截面进行数值分析. 与  $\Pi_t^0\Pi_t^0$  产生过程相比, 由于  $b\Pi_t^0$  产生过程末态相空间的增大, 使得  $b\Pi_t^0$  的产生截面远大于  $\Pi_t^0\Pi_t^0$  的产生截面. 图 5 给出了在 Tevatron 上,  $b\Pi_t^0$  的产生截面随  $M_{\Pi_t}$  变化的曲线.

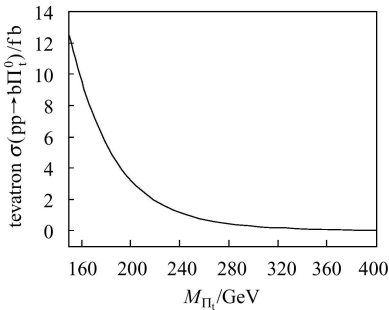


图 5 Tevatron 上  $b\Pi_t^0$  产生的总截面随  $M_{\Pi_t}$  变化曲线

计算表明在 Tevatron 上,  $b\Pi_t^0$  的产生截面依然很小, 一般在几个 fb 的量级. 这是因为在 Tevatron 上, 贡献主要来自轻夸克, 而 b 夸克贡献很小. 这样小的截面, 我们无法在 Tevatron 上通过  $b\Pi_t^0$  产生来探测中性 top-pion 介子. 图 6 是 LHC 上,  $b\Pi_t^0$  的产生截面随  $M_{\Pi_t}$  变化的曲线.

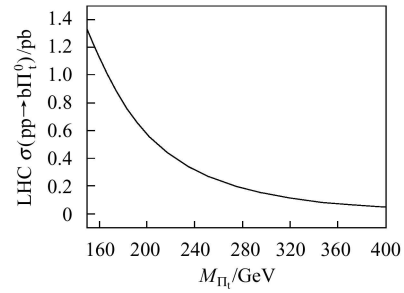


图 6 LHC 上  $b\Pi_t^0$  产生的总截面随  $M_{\Pi_t}$  变化曲线

从图中可看出, LHC 上的产生截面在几百个 fb 到 pb 的量级. 与 Tevatron 相比, 在 LHC 上  $b\Pi_t^0$  的产生截面大大增加. 这一方面是因为, 在 LHC 上, 对截面的贡献主要来自胶子部分; 另外, 质心能量的增大能大大提高 t 道的贡献. 对小的  $M_{\Pi_t}$ , 截面能到 pb 量级. LHC 的年积分亮度为  $100\text{fb}^{-1}/\text{year}$ , 可以预计, 在 LHC 上, 通过  $b\Pi_t^0$  这一产生机制, 每年可产生  $10^4$ — $10^5$  个  $b\Pi_t^0$  事例.

我们知道, 在强子对撞机上, 中性 top-pion 介子也可通过  $pp(p\bar{p}) \rightarrow \Pi_t^0 V(g, Z, \gamma, W)$  和  $pp(p\bar{p}) \rightarrow \Pi_t^0 t\bar{t}, \Pi_t^0 t\bar{c}$  产生, 文献 [9] 已对这些过程进行了研究. 其中截面最大的是  $\Pi_t^0 g$  的产生, 在 LHC 上可达几个甚至几十个 pb, 但这一过程末态信号分析比较困难, 背景较大. 在 LHC 上,  $\Pi_t^0 t\bar{t}, \Pi_t^0 t\bar{c}$  的产生截面在  $10^2$ — $10^3\text{fb}$  的量级, 与  $b\Pi_t^0$  的产生截面量级大致相同. 由于  $\Pi_t^0 t\bar{c}$  是味改变的过程, 背景比较干净, 是探测中性 top-pion 介子的理想过程. 在 LHC 上, 通过  $b\Pi_t^0$  的产生探测中性 top-pion 介子也具有独特优势. 一是该过程能产生足够多的信号; 二是实验对 b 夸克有较高的识别效率, 通过角分布的测量和 b 夸克的识别, 实验能容易地鉴别出 b 夸克伴随一新粒子的产生过程.

要想实验上通过末态粒子来鉴别中性 top-pion 介子, 我们还需要分析中性 top-pion 介子的各个衰变道. 文献 [8] 对中性 top-pion 介子各衰变道进行了研究.  $\Pi_t^0$  的主要衰变道为  $t\bar{t}, t\bar{c}, b\bar{b}, gg$ . 当  $M_{\Pi_t} > 2m_t$  时, 由于  $\Pi_t^0 t\bar{t}$  很强的耦合,  $\Pi_t^0$  几乎都衰变为  $t\bar{t}$ , 其他衰变道的衰变分支比很小, 但由于此时  $\Pi_t^0$  衰变宽度较大, 很难通过  $t\bar{t}$  来探测  $\Pi_t^0$ . 当  $M_{\Pi_t} < 2m_t$  时,  $t\bar{t}$  道被禁闭,  $\Pi_t^0$  的总衰变宽度大大降低, 此时  $\Pi_t^0$  的最主要衰变道是  $t\bar{c}$ . 这一衰变道是味改变的, 这是 TC2 模型的典型特征. 由于标准模型中 GIM 机制的存在, 不存在味改变中性流, 通过  $t\bar{c}$  探测  $\Pi_t^0$ , 标准模型的背景比较干净. 这一特征为  $\Pi_t^0$  的探测提供了独特的机会. 我们知道, LHC 每年可产生  $10^4$ — $10^5$  个  $b\Pi_t^0$  事例, 如果实验能很好地重建 t 夸克, 有效地识别 c 夸克发现味改变过程的存

在, 将来的 LHC 应能发现足够的清晰信号来鉴别  $\Pi_t^0$ , 从而为 TC2 模型提供直接的实验证据。

综上所述, TC2 模型提供了一种理想的电弱破缺的动力学机制, 该模型预言了赝哥尔斯通粒子, top-pions 介子的存在, 高能实验如能发现这种粒子的存在, 将为 TC2 模型提供直接的实验证据. 2007 年 LHC

的运行将为检验 TC2 模型提供良机. 本文在 TC2 模型下, 研究了强子对撞机上中性 top-pion 介子的产生过程:  $pp(p\bar{p}) \rightarrow \Pi_t^0 \Pi_t^0$  和  $pp(p\bar{p}) \rightarrow b\Pi_t^0$ . 我们的研究结果显示, 在未来的 LHC 实验上, 通过  $b\Pi_t^0$  的产生有可能探测到中性 top-pion 的存在. 我们的研究将为 LHC 实验寻找中性 top-pion 介子提供有价值的理论指导.

## 参考文献(References)

- 1 Hill C T. Phys. Lett., 1995, **B345**: 483—489
- 2 Susskind L. Phys. Rev., 1979, **D20**: 2619—2625
- 3 Buchalla G, Burdman G, Hill C T et al. Phys. Rev., 1996, **D53**: 5185—5200
- 4 YUE C X, XU Q J, LIU G L et al. Phys. Rev., 2001, **D63**: 115002
- 5 WANG X L, YANG Y L, LI B Z et al. Phys. Rev., 2002, **D66**: 075009; WANG X L, YANG Y L, LI B Z. Phys. Rev., 2004, **D69**: 055002; WANG X L, QIAO Q P, ZHANG Q L. Phys. Rev., 2005, **D71**: 095012
- 6 WANG X L, YANG Y L, LI B Z et al. Phys. Rev., 2002, **D66**: 075013
- 7 WANG X L, LI B Z, YANG Y L. Phys. Rev., 2003, **D68**: 115003; WANG X L, LI B Z, YANG Y L. Phys. Rev., 2003, **D67**: 035005
- 8 WANG X L, WANG X X. Phys. Rev., 2005, **D72**: 095012
- 9 WANG X L, YU L L, SONG N H et al. Commun. Theor. Phys., 2006, **45**(3): 521—526
- 10 HE H J, YUAN C P. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**: 28—31
- 11 LU Gong-Ru, YIN Fu-Rong, WANG Xue-Lei et al. HEP & NP, 2004, **28**(4): 345—349 (in Chinese)  
(鲁公儒, 殷复荣, 王学雷等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(4): 345—349)

# Study of the Top-Pion Production Processes $pp(p\bar{p}) \rightarrow \Pi_t^0 \Pi_t^0, b\Pi_t^0$ at the Hadron Colliders\*

CHEN Lan-Li<sup>1,2</sup> XU Wen-Na<sup>1</sup> WANG Xue-Lei<sup>1:1</sup>)

1 (College of Physics and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

2 (Department of Electronics, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

**Abstract** In the framework of the topcolor-assisted Technicolor(TC2) model, the neutral top-pion ( $\Pi_t^0$ ) production processes at hadron colliders(Tevatron and LHC),  $pp(p\bar{p}) \rightarrow \Pi_t^0 \Pi_t^0$  and  $pp(p\bar{p}) \rightarrow b\Pi_t^0$ , are studied. The results show that the cross sections of these two processes at Tevatron are too small to observe  $\Pi_t^0$ . The cross sections can be significantly enhanced at LHC, but  $\Pi_t^0$  is also not observable via  $\Pi_t^0 \Pi_t^0$  production at LHC. The cross section of  $b\Pi_t^0$  production reaches the level of a few hundred fb even a few pb at LHC and  $10^4$ — $10^5$  events can be produced each year. Furthermore, Due to the existence of the flavor-changing coupling  $\Pi_t^0 t\bar{c}$ ,  $\Pi_t^0$  can be experimentally detected via the decay mode  $\Pi_t^0 \rightarrow t\bar{c}$  with the clean background. Therefore, the enough distinguished  $\Pi_t^0$  events would be obtained via the  $b\Pi_t^0$  production at LHC future experiments. Our study can provide the valuable theoretical information for probing neutral top-pion and testing TC2 model at LHC.

**Key words** Topcolor-assisted Technicolor(TC2) model, the mechanism of the electroweak symmetry breaking(EWSB), hadron collider, production cross section

Received 23 June 2006

\* Supported by NSFC (10375017)

1) E-mail: wangxuelei@sina.com