

# 味普适 TC2 模型与轻子味破坏衰变 $Z \rightarrow l_i l_j$ \*

岳崇兴<sup>1</sup> 赵晔<sup>2</sup> 李虹<sup>2</sup> 赵启<sup>3</sup>

1 (辽宁师范大学物理系 大连 116029)

2 (河南师范大学物理与信息工程学院 新乡 453002)

3 (平顶山广播电视大学 平顶山 467000)

**摘要** 讨论计算了味普适 TC2 模型预言的额外  $U(1)$  规范玻色子  $Z'$  对轻子味破坏(LFV)衰变  $Z \rightarrow l_i l_j$  过程的贡献. 结果表明  $Z'$  对此过程有较大贡献, 在合理的参数取值范围内,  $Z \rightarrow \tau\mu$  和  $Z \rightarrow \tau e$  的分支比可以接近实验测量值的上限, 而  $Z \rightarrow \mu e$  过程的实验测量值上限给味普适 TC2 模型自由参数以严格的限制.

**关键词** 味普适 TC2 模型 额外  $U(1)$  规范玻色子  $Z'$  轻子味破坏衰变

SK 大气中微子实验和太阳中微子实验<sup>[1]</sup> 的精确测量数据表明, 中微子是有质量的, 并且可在不同的味之间振荡. 因此, 研究轻子味改变(LFV)  $Z$  衰变过程, 对探测新物理有很大的帮助. 另外, TESLA 直线对撞机的 Giga  $Z$  计划可大大提高规范玻色子  $Z$  的产生事例数, 这为我们仔细研究  $Z$  的性质提供了极好的实验条件, 因此有必要更精确地研究 LFV  $Z$  衰变过程.

众所周知, 在标准模型中轻子数守恒, 无树图级 LFV  $Z$  衰变过程.  $\nu$ SM 模型假设中微子是有质量的, 并且存在与轻子的混合. 文献[2]在此模型中研究了 LFV  $Z$  衰变过程. 不过, 分支比 ( $Br$ 's) 非常小,  $Br(Z \rightarrow e\mu) \sim Br(Z \rightarrow e\tau) \sim 10^{-54}$ ,  $Br(Z \rightarrow \mu\tau) < 4 \times 10^{-60}$ . 最近, 人们在  $Zee$  模型<sup>[3]</sup> 和 2HDM 模型<sup>[4]</sup> 分别研究了 LFV  $Z$  衰变过程, 发现在合理的参数取值范围内, 分支比得到显著提高,  $Br(Z \rightarrow \mu e)$  和  $Br(Z \rightarrow \tau e)$  可以分别达到  $7 \times 10^{-11}$  和  $2.5 \times 10^{-9}$ .

目前实验测量值给出的上限是<sup>[5]</sup>

$$\begin{aligned} Br(Z \rightarrow \tau e) &< 9.8 \times 10^{-6}, \\ Br(Z \rightarrow \tau \mu) &< 1.2 \times 10^{-6}, \\ Br(Z \rightarrow \mu e) &< 1.7 \times 10^{-6}. \end{aligned} \quad (1)$$

随着 Giga- $Z$  实验精度的提高, 这些数值可以达到<sup>[6]</sup>

$$Br(Z \rightarrow \tau e) < f \times 1.5 \times 10^{-8},$$

$$Br(Z \rightarrow \tau \mu) < f \times 2.2 \times 10^{-8}, \quad (2)$$

$$Br(Z \rightarrow \mu e) < 2 \times 10^{-9}.$$

其中  $f = 0.2 - 1.0$ . 本文在 TC2 模型<sup>[7]</sup> 和味普适 TC2 模型<sup>[8]</sup> 框架下讨论了 LFV  $Z$  衰变过程  $Z \rightarrow l_i l_j$ , 具体计算了这些模型预言的额外  $U(1)$  规范玻色子  $Z'$  对此 LFV 衰变过程分支比的贡献. 结果表明: 玻色子  $Z'$  交换可使  $Z \rightarrow l_i l_j$  过程分支比明显提高, 在将来的高能实验中也许可以观测到  $Z'$  对过程  $Z \rightarrow \tau\mu$  和  $Z \rightarrow \tau e$  的修正效应.

大的 top 夸克质量及 top 和 bottom 质量的差别, 使得人们猜测: top 夸克质量  $m_t$  与其他夸克和轻子的质量来源是否不同, 它的来源是否与电弱对称性破缺(EWSB)机制有某种联系, 据此, 人们提出一些具体模型. TC2 模型和味普适 TC2 模型就是典型的例子. 这类模型预言了额外  $U(1)$  规范玻色子  $Z'$ , 此新粒子可产生新的味改变的耦合项  $Z' t c$ ,  $Z' \tau \mu$ ,  $Z' \tau e$ . 因此, 它可对许多味改变中性流过程有显著贡献<sup>[9]</sup>.

味普适 TC2 模型与传统 TC2 模型具有相同的群结构:

$$G_{TC2} \times SU(3)_1 \times SU(3)_2 \times SU(2) \times U(1)_1 \times U(1)_2. \quad (3)$$

在能标  $\Lambda$  处, 色群  $SU(3)_1 \times SU(3)_2$  破缺到它的对

2003-02-14 收稿

\* 国家自然科学基金(90203005)资助

角子群  $SU(3)_c$ , 超荷群  $U(1)_1 \times U(1)_2$  破缺到  $U(1)_1$ . 因此, 此模型预言了两种规范玻色子: colorons 和  $Z'$ . 但是, 费米子电荷的分配情况与 TC2 模型不同. 在夸克部分, 所有的夸克都是  $SU(3)_1$  三重态和  $SU(3)_2$  单态. 在超荷部分, 第三代费米子只与强  $U(1)_1$  有作用, 其他两代与较弱的  $U(1)_2$  有作用.

$Z'$  与轻子的味对角耦合形式为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_Z^{\text{FD}} = & -\frac{1}{2} g_1 \cot \theta_y Z'_\mu (\bar{\tau}_L \gamma^\mu \tau_L + 2\bar{\tau}_R \gamma^\mu \tau_R) + \\ & \frac{1}{2} g_1 \tan \theta_y Z'_\mu (\bar{\mu}_L \gamma^\mu \mu_L + \\ & 2\bar{\mu}_R \gamma^\mu \mu_R + \bar{e}_L \gamma^\mu e_L + 2\bar{e}_R \gamma^\mu e_R), \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $g_1$  是超荷规范耦合常数,  $\theta_y$  是混合角,  $\tan \theta_y =$

为了形成 top 凝聚, 而不形成  $bb$  凝聚,

$\theta_y$  必须满足:  $\tan \theta_y \ll 1$ .  $Z'$  与轻子的味改变耦合形式为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_Z^{\text{FC}} = & -\frac{1}{2} g_1 Z'_\mu [K_{\tau\mu} (\bar{\tau}_L \gamma^\mu \mu_L + 2\bar{\tau}_R \gamma^\mu \mu_R) + \\ & K_{\tau e} (\bar{\tau}_L \gamma^\mu e_L + 2\bar{\tau}_R \gamma^\mu e_R) + \\ & K_{\mu e} \tan^2 \theta_y (\bar{\mu}_L \gamma^\mu e_L + 2\bar{\mu}_R \gamma^\mu e_R)], \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $K_{ij}$  是味混合因子.

从方程(4)和(5)可以看出, 额外  $U(1)$  规范玻色子  $Z'$  交换可产生树图级 LFV 过程  $e^+ e^- \rightarrow Z' \rightarrow l, l_j$ . 通过简单地计算不难给出  $Z'$  交换所产生的 LFV 过程  $e^+ e^- \rightarrow l, l_j$  截面. 具体计算表明, 在味普适 TC2 模型合理参数空间范围内, 产生截面可达  $2 \times 10^{-2}$  fb 到 10fb. 若假设质心能量为 800GeV 高能线性  $e^+ e^-$  对撞机的积分亮度为  $L = 580 \text{fb}^{-1}$ , 则每年可产生几十直至几千个事例. 因此, 在将来的高能对撞机上有可能观测到此新粒子对 LFV 过程的贡献, 有必要研究其对 LFV 过程的高级贡献.

额外  $U(1)$  规范玻色子  $Z'$  交换产生的 LFV  $Z$  衰变过程  $Z \rightarrow l, l_j$  的费曼图如图 1 所示,  $Z \rightarrow \tau e$  和  $Z \rightarrow \mu e$  衰变过程的费曼图与此类似. 由  $Z'$  交换产生的  $Z$  的轻子味改变耦合为

$$\delta g_L^{\tau e} = \delta g_L^{\tau e} \approx \frac{K_1 \tan \theta_y}{6\pi} g_1^1 K \left[ \frac{m_Z^2}{M_{Z'}^2} \ln \frac{M_{Z'}^2}{m_Z^2} \right], \quad (6)$$

$$\delta g_R^{\tau e} = \delta g_R^{\tau e} \approx \frac{2K_1 \tan \theta_y}{3\pi} g_1^1 K \left[ \frac{m_Z^2}{M_{Z'}^2} \ln \frac{M_{Z'}^2}{m_Z^2} \right],$$

$$\delta g_L^{\mu e} \approx \frac{K_1 \tan^2 \theta_y}{6\pi} g_1^1 K^2 \left[ \frac{m_Z^2}{M_{Z'}^2} \ln \frac{M_{Z'}^2}{m_Z^2} \right], \quad (8)$$

$$\delta g_R^{\mu e} \approx \frac{2K_1 \tan^2 \theta_y}{3\pi} g_1^1 K^2 \left[ \frac{m_Z^2}{M_{Z'}^2} \ln \frac{M_{Z'}^2}{m_Z^2} \right]. \quad (9)$$

其中

$$g_L^1 = \frac{e}{S_W C_W} \left( -\frac{1}{2} + S_W^2 \right), \quad g_R^1 = \frac{e S_W}{C_W}, \quad (10)$$

$g_L^1 (g_R^1)$  是标准模型中左手(右手)  $Z$ - $l$ - $l$  耦合常数. 一般情况下,  $Z$  衰变宽度为

$$\Gamma(Z \rightarrow l, l_j) = \frac{G_F m_Z^3}{3 \sqrt{2} \pi} [(\delta g_L^{\tau e})^2 + (\delta g_R^{\tau e})^2]. \quad (11)$$

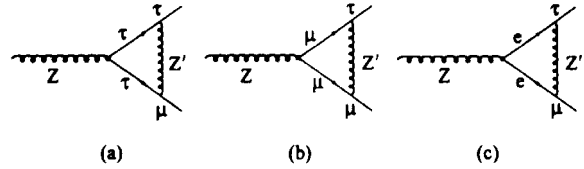


图 1  $Z$  衰变过程  $Z \rightarrow \tau \mu$  的费曼图

在进行数值计算时, 取  $m_Z = 91.18 \text{GeV}$ ,  $G_F = 1.1664 \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2}$ ,  $\Gamma_Z = 2.495 \text{GeV}$ ,  $S_W^2 = 0.2322^{[10]}$ . 味混合因子  $K_{ij}$  是味普适 TC2 模型给出的自由参数, 无论模型本身还是实验数据都不能准确定出其取值. 不过, 由目前的中微子振荡实验数据知其值应满足  $K_{ij} \leq \frac{1}{\sqrt{2}}^{[11]}$ . 为计算简便起见, 假设  $K_{ij}$  的值等于

Wolfenstein 参数  $\lambda = 0.22$ . 最近, Simmons<sup>[11]</sup> 利用 B-B 混合给出了  $Z'$  质量的下限, 即如果 ETC 对 CP 破坏参数  $\epsilon$  没有贡献,  $M_{Z'} \geq 590 \text{GeV}$ , 反之,  $M_{Z'} > 910 \text{GeV}$ . 在后面的数值计算中, 分别取  $M_{Z'}$  和  $K_1$  为自由参数.

图 2 给出 LFV  $Z$  衰变过程  $Z \rightarrow \tau \mu$ ,  $Z \rightarrow \tau e$  的分支比随  $Z'$  质量的变化曲线. 从图 2 可以看出, 分支比随  $M_{Z'}$  的增大而减小, 随  $K_1$  的增大而增大. 在绝大部分参数空间内,  $Z \rightarrow \tau \mu$  和  $Z \rightarrow \tau e$  过程的分支比大于  $1 \times 10^{-9}$ . 当  $K_1 = 1$  和  $M_{Z'} = 500 \text{GeV}$  时, 分支比  $Br(Z \rightarrow \tau \mu, \tau e) = 7.0 \times 10^{-9}$ , 可以达到将来实验测量的上限:  $Br(Z \rightarrow \tau e) < f \times 1.5 \times 10^{-8}$ ,  $Br(Z \rightarrow \tau \mu) < f \times 2.2 \times 10^{-8}$ , 其中  $f = 0.2 - 1.0$ .[6]

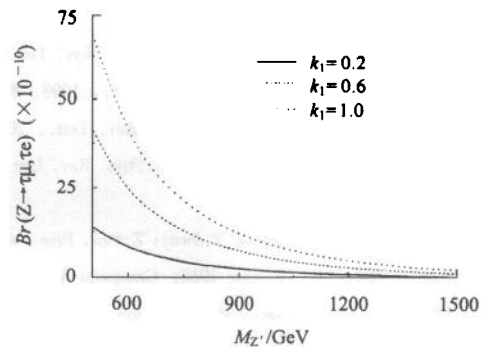
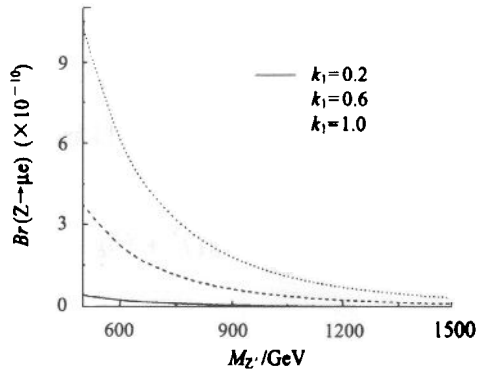


图 2 过程  $Z \rightarrow \tau \mu$  和  $Z \rightarrow \tau e$  的分支比随  $M_{Z'}$  的变化

图 3 过程  $Z \rightarrow \mu e$  的分支比随  $M_{Z'}$  的变化

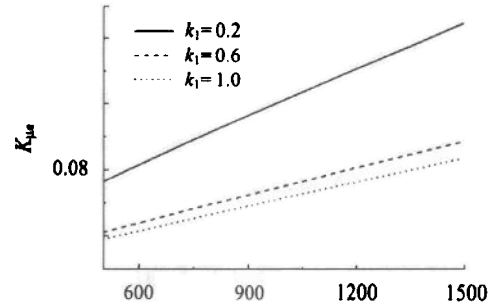
从图 3 可以看出,在整个参数空间内分支比  $Br(Z \rightarrow \mu e)$  比  $Br(Z \rightarrow \tau \mu, \tau e)$  小. 当  $K_1 = 0.6$ ,  $M_{Z'}$  取 500—1500 GeV 时,  $Br(Z \rightarrow \mu e)$  的取值在  $3.8 \times 10^{-10}$  和  $1.2 \times 10^{-11}$  之间变化.

由  $\mu \rightarrow 3e$  过程实验上限和电弱规范玻色子  $Z$  相关精确测量结果,文献[12]给出了高能实验所允许的 LFV  $Z$  衰变的分支比的上限:

$$Br(Z \rightarrow \mu e) \leq 5 \times 10^{-13}, \quad Br(Z \rightarrow \tau l) \leq 3 \times 10^{-6}, \quad (12)$$

其中  $l = e$  或  $\mu$ . 由图 2 和图 3 给出的结果可知  $Z \rightarrow \tau \mu$  和  $Z \rightarrow \tau e$  过程不会对味普适 TC2 模型产生任何限制,然而,过程  $Z \rightarrow \mu e$  的高能实验所允许的上限限制了味普适 TC2 模型自由参数的取值范围.

为了更详细地体现  $Br(Z \rightarrow \mu e) \leq 5 \times 10^{-13}$  对味普适 TC2 模型的限制,取  $Br(Z \rightarrow \mu e) = 5 \times 10^{-13}$  为定值,  $500 \text{ GeV} \leq M_{Z'} \leq 1500 \text{ GeV}$ , 在图 4 中画出了  $K_{\mu e}$  随  $M_{Z'}$  变化的曲线. 由图 4, 可以看出, 当  $Br(Z \rightarrow \mu e) \leq 5 \times 10^{-13}$  时, 对味混合因子  $K_{\mu e}$  的限制很强. 如果我们取  $K_1 = 0.1$ ,  $M_{Z'} \leq 1500 \text{ GeV}$ ,  $K_{\mu e}$  很小, 其值必须满足  $K_{\mu e} \leq 0.04$ .

图 4 过程参数  $K_{\mu e}$  随  $M_{Z'}$  的变化

与味普适 TC2 模型类似, TC2 模型也预言了额外  $U(1)$  规范玻色子  $Z'$ ,  $Z'$  对 LFV  $Z$  衰变  $Z \rightarrow l_i l_j$  过程亦有贡献. 文献[13]显示 BB 混合对 TC2 模型预言的  $Z'$  玻色子的质量限制是  $M_{Z'}$  必须大于 4 TeV. 因此, TC2 模型中  $Z'$  对 LFV  $Z$  衰变的贡献要比味普适 TC2 模型中的要小的多. 在 TC2 模型中绝大多数参数取值范围内,  $Br(Z \rightarrow \tau \mu) = Br(Z \rightarrow \tau e) < 1 \times 10^{-11}$ ,  $Br(Z \rightarrow \mu e) < 1 \times 10^{-13}$ .

为了解决 SM 中 Higgs 粒子带来的平庸性和不自然性问题, 人们提出各种动力学 EWSB 理论, 其中强 top 动力学 EWSB 模型是人们比较感兴趣的一类. 这类模型预言了额外  $U(1)$  规范玻色子  $Z'$ ,  $Z'$  可以产生味改变耦合顶角  $Z' \tau \mu$ ,  $Z' \tau e$ ,  $Z' \mu e$ . 因此, 规范玻色子  $Z'$  对 LFV  $Z$  衰变  $Z \rightarrow l_i l_j$  过程有显著贡献. 本文计算了味普适 TC2 模型预言的额外  $U(1)$  规范玻色子  $Z'$  对这些衰变过程的贡献, 结果显示,  $Z'$  交换可使 LFV  $Z$  衰变过程的分支比显著提高, 只要取合理的参数值,  $Z \rightarrow \tau \mu$  和  $Z \rightarrow \tau e$  过程的分支比可以达到  $1 \times 10^{-8}$ , 这个数值可以达到将来实验测量值的上限. 另外  $Z \rightarrow \mu e$  过程给味普适 TC2 模型自由参数以严格的限制, 当  $K_1 = 1$ , 取  $K_{\mu e} = 0.22$ ,  $M_{Z'}$  必须满足  $M_{Z'} \geq 5 \text{ TeV}$ .

## 参考文献 (References)

- 1 Superkamiokande Collaboration, Fukuda Y et al. Phys. Lett., 1994, **B335**:237; Fukuda Y et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**:1562; Phys. Rev. Lett., 2001, **86**:5651; Phys. Rev. Lett., 2001, **86**:5656; SNO Collaboration, Ahmad Q R et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **87**:071301
- 2 Riemann T, Mann G. Nondiagonal Z decay:  $Z \rightarrow e \mu$ , Proc. of the Int. Conf. Neutrino '82, 14—19 June 1982; Ganapathi V et al. Phys. Rev., 1983, **D27**:579; Clements M et al. Phys. Rev., 1983, **D27**:570; Mann G, Riemann T. Annalen Phys., 1984, **40**:334
- 3 Ghosal A, Koide Y, Fusaoka H. Phys. Rev., 2001, **D64**:053012
- 4 Ilan E O, Turan I. Phys. Rev., 2002, **D65**:013001
- 5 OPAL Collaboration, Akers R et al. Z. Phys., 1995, **C67**:555; L3 Collaboration, Adriani O et al. Phys. Lett., 1993, **B316**:427; DELPHI Collaboration, Abreu P et al. Z. Phys., 1997, **C73**:243
- 6 Wilson G. Neutrino Oscillations: are lepton-flavor violating Z decays observable with the CDR detector? and Update on experimental aspects of lepton-flavor violation, DESY-ECFA LC Workshop held at Frascati, Nov. 1998 and at Oxford, march 1999
- 7 Hill C T. Phys. Lett. 1995, **B345**:483; Cvetic G. Rev. Mod. Phys., 1999, **71**:513
- 8 Popovic M B, Simmons E H. Phys. Rev., 1998, **D58**:095007; Burdman G, Evans N. Phys. Rev., 1999, **D59**:115005

- 9 Rador T. Phys. Rev., 1999, **D60**:095012; YUE Chong-Xing et al. Phys. Lett., 2000, **B496**:89 (岳崇兴, 张延明, 刘兰君. 高能物理与核物理, 2003, **27**(7):564)
- 10 YUE Chong-Xing et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2002, **26**(10): 1004—1008 (in Chinese); YUE Chong-Xing, ZHANG Yan-Ming, LIU Lan-Jun. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2003, **27**(7):564(in Chinese); (岳崇兴等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(10):1004—1008)
- 11 Paratical Data Group. Eur. Phys. J., 2000, **C15**:1
- 12 Simmons E H. Phys. Lett., 2002, **B526**:365
- 13 Nussinov S, Peccei R D, ZHANG X M. Phys. Rev., 2000, **D63**:016003; Delepine D, Vissani F. Phys. Lett., 2001, **B522**:95
- 14 Burdman G, Lane K, Rador T. Phys. Lett., 2001, **B514**:41

## Lepton Flavor Violating $Z \rightarrow l_i l_j$ in Flavor-Universal Topcolor-Assisted Technicolor Models\*

YUE Chong-Xing<sup>1</sup> ZHAO Ye<sup>2</sup> LI Hong<sup>2</sup> ZHAO Qi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> (Physics Department of Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

<sup>2</sup> (College of Physics and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453002, China)

<sup>3</sup> (Pingdingshan Radio and TV University, Pingdingshan 467000, China)

**Abstract** In the context of flavor-universal topcolor-assisted technicolor (TC2) models, we study the lepton flavor violating (LFV) processes  $Z \rightarrow l_i l_j$ . We find that the extra  $U(1)$  gauge boson  $Z'$  can give significantly contributions to these LFV processes. With reasonable values of the parameters, the branching ratios of the processes  $Z \rightarrow \tau\mu$  and  $Z \rightarrow \tau e$  can approach the experimental upper limits. The indirect bound on the process  $Z \rightarrow \mu e$  can give a severe constraint on the flavor-universal TC2 models.

**Key words** flavor-universal topcolor-assisted technicolor (TC2) models, extra  $U(1)$  gauge bosons  $Z'$ , lepton flavor-violation decays