

TC2 模型与轻子味破坏过程 $l_i \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_l$ *

刘兰君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 许多超出标准模型的新物理预言了非普适规范玻色子 Z' 的存在. 此粒子可产生许多新物理现象. 本文计算了顶色辅助的人工色(TC2)模型预言的非普适规范玻色子 Z' 对轻子味破坏(LFV)衰变过程 $l_i \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_l$ 的贡献. 结果表明, 在整个参数空间内, 过程 $\tau^+ \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_\tau$ 的分支比比 $\tau^+ \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_l$ ($l = \mu, e$) 的分支比大得多. 考虑实验测量值上限 $Br^{exp}(\mu \rightarrow 3e) \leq 1 \times 10^{-12}$ 对 TC2 模型的自由参数的限制, 我们给出了一些轻子味破坏过程的上限. 在大部分参数空间中, 分支比 $Br(\tau^+ \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_\tau) \sim 10^{-6}$, $Br(\tau^+ \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_l) \sim 10^{-9}$. 这些结果可以用来部分地解释中微子振荡数据, 将来的高能实验有可能探测到此新物理效应.

关键词 非普适规范玻色子 Z' TC2 模型 轻子味破坏衰变 分支比

众所周知, 在标准模型(SM)中, 轻子数 L_e, L_μ, L_τ 各自守恒, 树图的轻子味破坏(LFV)过程是不存在的. 因此, 探测到任何轻子味破坏迹象都可视为新物理存在的证据. 太阳中微子实验和 SK 大气中微子实验^[1]的测量结果, 使人们相信中微子是有质量的, 中微子可以混合, 并且在不同的味之间振荡. 这表明了轻子数是不守恒的. 为了描述中微子混合及振荡, SM 需要修正. LFV 过程 $l_i \rightarrow l_j \gamma, l_i \rightarrow l_j l_k l_l$ ^[2,3] 存在. 这是 SM 以外的新物理存在的清晰证据.

中微子振荡表明了太阳中微子存在 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$ 的转变, 大气中微子存在 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 的转变. 通常的 τ 衰变 $\tau \rightarrow \mu \bar{\nu}_\mu \nu_\tau, e \bar{\nu}_e \nu_\tau$ 和 μ 衰变 $\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu$ 不能解释这些实验事实. 即 SM 不能解释中微子振荡. 然而, LFV 过程 $l_i \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_l$ ($l_i = \tau^+, \mu^+; l_j = \mu^+, e^+; l = \tau, \mu, e$) 可以解释. 即相当于发生了 ν_e, ν_μ, ν_τ 的转变而产生的. 因此, 我们研究了顶色辅助的人工色模型(TC2 模型)^[4] 预言的非普适规范玻色子 Z' 对 LFV 过程 $l_i \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_l$ 的贡献. 指出, Z' 能对 LFV 过程 $\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\tau \bar{\nu}_\tau, e^+ \nu_\tau \bar{\nu}_\tau$ 和 $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_\tau \bar{\nu}_\tau$ 有显著的贡献. 这些结果可以用来部分地解释中微子振荡数据. 即 SM 不能

解释中微子振荡数据, 而这些 LFV 过程可以解释. 另外, 考虑 LFV 过程 $\mu \rightarrow 3e$ 的实验测量值上限对 TC2 模型的自由参数的限制, 给出了交换 Z' 产生的过程 $l_i \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_l$ 的分支比的上限.

TC2 模型的一个重要特征就是, 基本的相互作用, 即顶色相互作用, 是非普适的. TC2 模型预言了非普适 $U(1)$ 规范玻色子 Z' 的存在, Z' 能产生树图级的味改变(FC)耦合顶角 $Z' l_i l_j$. 文献[3, 4]显示规范玻色子 Z' 对 LFV 过程 $l_i \rightarrow l_j \gamma, l_i \rightarrow l_j l_k l_l$ 和 $Z \rightarrow l_i l_j$ 的贡献. 表明 Z' 对这些衰变过程的贡献非常大, 在将来的高能实验中有可能探测到此新物理效应. 新粒子 Z' 与第三代费米子的耦合不同于与第一、二代费米子的耦合, 并能导致树图级味改变耦合. Z' 与轻子的味对角耦合是^[2,5]:

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

2003-09-01 收稿, 2003-11-10 收修稿稿

* 国家自然科学基金(90203005)资助

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

其中 g_1 是通常的超荷规范耦合常数, θ' 是混合角且 $\tan\theta' = g_1/\sqrt{4\pi k_1}$. Z' 与轻子的味改变耦合是:

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

其中 k_{ij} 是味混合因子. 为简化起见, 在数值计算中假设三代轻子之间的混合常数为 k , $k_{\tau\mu} = k_{\tau e} = k_{\mu e} = k$.

从方程(1)和(2), 能看出: 通过交换规范玻色子 Z' , 可以产生树图级 LFV 过程 $l_i \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i$. 费曼图在图 1 中表示出. 这些衰变宽度是

$$\Gamma_1 = \Gamma(\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\tau \bar{\nu}_\tau) = \Gamma(\tau^+ \rightarrow e^+ \nu_\tau \bar{\nu}_\tau) =$$

$$\frac{5k_1\alpha_e}{384\pi C_W^2} \frac{m_\tau^5}{M_Z^4} k^2,$$

$$\Gamma_2 = \Gamma(\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\mu) = \Gamma(\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_e \bar{\nu}_e) =$$

$$\Gamma(\tau^+ \rightarrow e^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\mu) = \Gamma(\tau^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_e) =$$

$$\frac{5\alpha_e^3}{384\pi k_1 C_W^6} \frac{m_\tau^5}{M_Z^4} k^2,$$

$$\Gamma_3 = \Gamma(\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_\tau \bar{\nu}_\tau) = \frac{5\alpha_e^3}{384\pi k_1 C_W^6} \frac{m_\mu^5}{M_Z^4} k^2,$$

$$\Gamma_4 = \Gamma(\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\mu) = \Gamma(\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_e) =$$

$$\frac{5\alpha_e^5}{384\pi k_1^3 C_W^{10}} \frac{m_\mu^5}{M_Z^4} k^2.$$

其中 $C_W^2 = \cos^2\theta_W$, θ_W 是 Weinberg 角, M_Z 是 TC2 模型预言的非普适 $U(1)$ 规范玻色子 Z' 的质量. 从方程(1)和(2)可以看出, 非普适规范玻色子 Z' 与第三代费米子的耦合不同于与第一、二代费米子的耦合, 而与第一代和第二代费米子的耦合是相同的. 通过质量比较, 过程 $\tau \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i$ 中, 取 $m_\mu \approx 0$, $m_e \approx 0$; 过程 $\mu \rightarrow e\nu_i\bar{\nu}_i$ 中, 取 $m_e \approx 0$. 过程 $l_i \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i$ 和 $l_i \rightarrow l_j\nu_e\bar{\nu}_e$ 的衰变宽度是相同的. 人们已经精确测量了分支比 $Br(\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau)$, 即 $Br^{\text{exp}}(\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau) = (17.83 \pm 0.06)\%$ [6], 因此可以利用分支比 $Br(\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau)$ 来表示 LFV 过程 $\tau \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i$ 和 $\tau \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i$ 的分支比. $\mu \rightarrow e\nu_e\nu_\mu$ 是轻子 μ 的主要衰变方式.

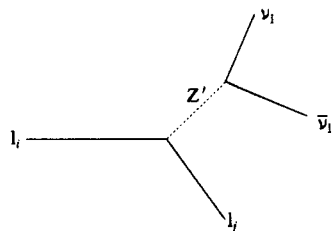


图 1 由于交换 Z' 对 LFV 过程 $l_i \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i$ 贡献的费曼图

相应的分支比为

$$Br_1 = Br^{\text{exp}}(\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau) \frac{\Gamma_1}{\Gamma(\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau)},$$

$$Br_2 = Br^{\text{exp}}(\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau) \frac{\Gamma_2}{\Gamma(\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau)},$$

$$Br_3 = \frac{\Gamma_3}{\Gamma(\mu \rightarrow e\nu_e\nu_\mu)},$$

$$Br_4 = \frac{\Gamma_4}{\Gamma(\mu \rightarrow e\nu_e\nu_\mu)},$$

且:

$$\Gamma(\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau) = \frac{m_\tau^5 G_F^2}{192\pi^3},$$

$$\Gamma(\mu \rightarrow e\nu_e\nu_\mu) = \frac{m_\mu^5 G_F^2}{192\pi^3}.$$

其中费米耦合常数 $G_F = 1.16639 \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2}$. 文献 [7] 指出 k_1 必须满足: $k_1 \leq 1$. 研究 Z' 对不同的物理可观测量的贡献可以得到对 Z' 质量 M_Z 的限制 [5]. 例如, 文献 [8] 指出, M_Z 必须满足 $M_Z > 1 \text{TeV}$. 在数值计算中, 取 M_Z 和 k_1 作为自由参数.

图 2 和图 3 表示了过程 $\tau^+ \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i$ 和 $\tau^+ \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i$ 的分支比随 M_Z 变化的曲线. 其中取 $k = \lambda = 0.22$ (λ 是 Wolfenstein 参数), $k_1 = 0.2, 0.5, 0.8$. 从图 2 和图 3 可以看出, 在整个参数空间内, 分支比 $Br(\tau^+ \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i)$ 至少要比 $Br(\tau^+ \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i)$ 大 3 个量级. 这是由于额外的 $U(1)$ 规范玻色子 Z' 同第三代费米子耦合很强. 当 $1 \text{TeV} \leq M_Z \leq 4 \text{TeV}$, $k_1 = 0.5$ 时, 分支比 $Br(\tau^+ \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i)$ 从 7.91×10^{-6} 减小到 3.09×10^{-8} ; 而 $Br(\tau^+ \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i)$ 从 3.23×10^{-9} 减小到 1.26×10^{-11} . 并且, 分支比 $Br(\tau^+ \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i)$ 的值随 k_1 的增加而增大, 而分支比 $Br(\tau^+ \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i)$ 的值随 k_1 的增加而减小. 当 $k_1 = 1$, $M_Z = 1 \text{TeV}$ 时, 分支比 Br_1 可达 1.60×10^{-5} . 当然, 数值结果随味混合参数 k 的值而变化.

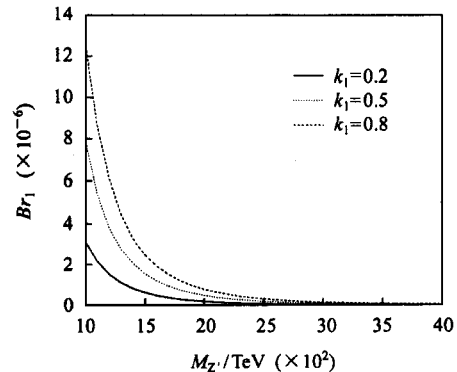


图 2 当 $k = 0.22$ 时, 过程 $\tau \rightarrow l_j\nu_i\bar{\nu}_i$ 的分支比随 M_Z 变化的曲线

取最大参数值, 即 $(k_1)_{\max} = 1$, $k_{\max} = 1/\sqrt{2}$ 时, $M_Z = 1\text{TeV}$ 时, $Br(\tau^+ \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_\tau)$ 可达最大值 1.63×10^{-4} , 而 $Br(\tau^+ \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_i)$ 的最大值是 1.67×10^{-8} .

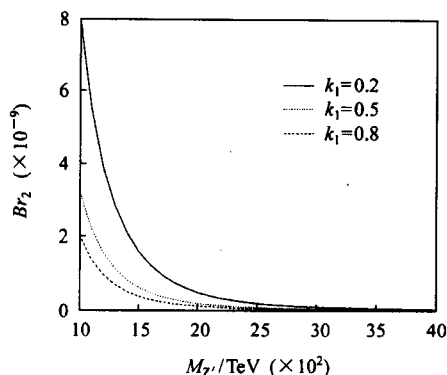


图3 当 $k = 0.22$ 时, 过程 $\tau \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_i$ 的分支比随 M_Z 变化的曲线

额外的 $U(1)$ 规范玻色子 Z' 对 LFV 过程 $\mu \rightarrow 3e$ 也有贡献. 交换 Z' 引起的衰变宽度是

$$\Gamma(\mu \rightarrow 3e) = \frac{25\alpha_e^5}{384\pi k_1^3 C_W^{10}} \frac{m_\mu^5}{M_Z^4} k^2.$$

目前对 LFV 过程 $\mu \rightarrow 3e$ 的实验限制 $Br^{\text{exp}}(\mu \rightarrow 3e) \leq 1 \times 10^{-12[9]}$, 能对 TC2 模型的自由参数给出严格的限制. 所以, 对分支比 Br_1, Br_2, Br_3 和 Br_4 的限制是:

$$Br_1 \leq \frac{k_1^4 C_W^8}{5\alpha_e^4} Br^{\text{exp}}(\tau \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\tau) Br^{\text{exp}}(\mu \rightarrow 3e),$$

$$Br_2 \leq \frac{k_1^2 C_W^4}{5\alpha_e^2} Br^{\text{exp}}(\tau \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\tau) Br^{\text{exp}}(\mu \rightarrow 3e),$$

$$Br_3 \leq \frac{k_1^2 C_W^4}{5\alpha_e^2} Br^{\text{exp}}(\mu \rightarrow 3e),$$

$$Br_4 \leq \frac{1}{5} Br^{\text{exp}}(\mu \rightarrow 3e).$$

可以看出, 这些分支比的最大值只依赖于自由参数 k_1 . 当 $k_1 \leq 1$ 时, 这些限制是

$$Br(\tau^+ \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_\tau) \leq 3.43 \times 10^{-6},$$

$$Br(\tau^+ \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_i) \leq 3.49 \times 10^{-10},$$

$$Br(\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_l \bar{\nu}_\tau) \leq 1.96 \times 10^{-9},$$

$$Br(\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_l \bar{\nu}_i) \leq 2 \times 10^{-13}.$$

额外的规范玻色子 Z' 的存在是标准模型必须被推广和新物理存在的有力证据. 若标准模型的扩展同味对称性破缺相联系, 规范相互作用将不是味普适的, 它预言了非普适规范玻色子 Z' 的存在. 当在质量本征态中描述非普适相互作用时, 会导致树图级的味改变耦合. 因而, Z' 会对某些味改变中性流(FCNC)过程有较大的贡献. 本文研究了 TC2 模型预言的非普适规范玻色子 Z' 对 LFV 过程 $l_i \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_i$ 的贡献. 结果表明, 在整个参数空间, 过程 $\tau \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_\tau$ 的分支比比过程 $\tau \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_i$ ($l = \mu, e$) 的分支比至少大 3 个量级. 而且, 分支比 $Br(\tau \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_\tau)$ 的值随 k_1 的增加而增大, 而分支比 $Br(\tau \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_i)$ 的值随 k_1 的增加而减小. 考虑实验测量值上限 $Br^{\text{exp}}(\mu \rightarrow 3e) \leq 1 \times 10^{-12}$ 对 TC2 模型的自由参数的限制, 我们给出了一些轻子味破坏过程的上限. 这些结果可以用来部分地解释中微子振荡数据. 因此, 研究轻子味破坏过程 $\tau \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_\tau$ 和 $\tau \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_i$ ($l = \mu, e$) 是非常有意义的. 将来的高能实验有可能检测到这些新物理效应.

参考文献 (References)

- 1 Super-Kamiokande Collaboratino, Shiozawa M. talk at the Int. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics "Neutrino '02", May 25—30, 2002, Munich, Germany
- 2 Rador T. Phys. Rev., 1999, **D60**:095012; YUE Chong-Xing, LIU Guo-Li, LI Jian-Tao. Phys. Lett., 2000, **B496**:89; YUE Chong-Xing, ZHANG Yan-Ming, LIU Lan-Jun. Phys. Lett., 2002, **B547**:252; YUE Chong-Xing, XU Qing-Jun, LIU Guo-Li. Commun. Theor. Phys., 2002, **38**:461
- 3 YUE Chong-Xing et al. Phys. Lett., 2002, **B536**:67
- 4 Hill C T. Phys. Lett., 1995, **B345**:483; Lane K, Eichten E. Phys. Lett., 1995, **B352**:383; Lane K. Phys. Lett., 1998, **B433**:96; Cvetič G. Rev. Mod. Phys., 1999, **71**:513
- 5 Buchalla G et al. Phys. Rev., 1996, **D53**:5185; Hill C T, Simmons E H. hep-ph/0203079
- 6 Groom D E et al (Particle Data Group). Eur. Phys. J. C., 2001, **15**:1
- 7 Popovic M B, Simmons E H. Phys. Rev., 1998, **D58**:095007; Burdman G, Evans N. Phys. Rev., 1999, **D59**:115005
- 8 Chivukula R S, Simmons E H. Phys. Rev., 2002, **D66**:015006
- 9 Brooks M L et al (MEGA Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1999, **83**:1521

Lepton Flavor Violating Processes $l_i \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_l$ in Topcolor-Assisted Technicolor Models*

LIU Lan-Jun¹ 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 study the lepton flavor violating (LFV) processes $l_i \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_l$ in the context of the topcolor-assisted technicolor (TC2) models. We find that the branching ratios $Br(\tau \rightarrow l_j \nu_\tau \bar{\nu}_\tau)$ are larger than the branching ratios $Br(\tau \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_l)$ in all of the parameter space. Over a wide range of parameter space, we have $Br(\tau \rightarrow l_j \nu_\tau \bar{\nu}_\tau) \sim 10^{-6}$ and $Br(\tau \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_l) \sim 10^{-9}$ ($l = \mu$ or e). Taking into account the bounds given by the experimental upper limit $Br^{\text{exp}}(\mu \rightarrow 3e) \leq 1 \times 10^{-12}$ on the free parameters of TC2 models, we further give the upper limits of the LFV processes $l_i \rightarrow l_j \nu_l \bar{\nu}_l$. We hope that the results may be useful to partly explain the data of the neutrino oscillations and the future neutrino experimental data might be used to test TC2 models.

Key words gauge boson Z' , TC2 models, lepton flavor violating, branching ratios