

Z' 和 τ 的轻子味破坏衰变*

岳崇兴^{1,1)} 张延明² 刘兰君²

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)

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. 此新粒子可产生许多新的物理现象. 本文计算了顶色辅助的人工色(TC2)模型和味普适 TC2 模型预言的非普适规范玻色子 Z' 对 τ 的轻子味破坏衰变过程 $\tau \rightarrow l_i \gamma, \tau \rightarrow l_i l_j l_k$ 的贡献. 结果表明, 在整个参数空间内, 过程 $\tau \rightarrow l_i l_j l_k$ 的分支比比 $\tau \rightarrow l_i \gamma$ 的分支比大. 在适当的参数空间内, 分支比 $Br(\tau \rightarrow l_i l_j l_k)$ 可达到 10^{-8} . 因此, 在将来的高能实验中有可能探测到此新物理效应.

关键词 非普适规范玻色子 Z' τ 的轻子味破坏衰变 TC2 模型

标准模型(SM)在描述电弱相互作用方面取得了巨大成功,但是它只是某种能量标度下的有效理论. 规范玻色子 Z' 的存在是标准模型必须推广和新物理存在的有力证据^[1]. 非普适规范玻色子 Z' 可产生树图级味改变中性流(FCNC's)耦合. 因此,非普适规范玻色子 Z' 可对某些 FCNC 过程产生贡献. 例如,顶色辅助的人工色(TC2)模型^[2]和味普适 TC2 模型^[3]等 Topcolor 模型预言的非普适规范玻色子 Z' , 可以对某些 FCNC 过程产生有意义的修正^[4,5]. 如果在 LHC, LC 或其他实验中探测到此修正效应,将有助于探测规范玻色子 Z' 这种新粒子,从而可以检验新物理模型.

SuperKamiokande(SK)大气中微子实验^[6]和太阳中微子实验^[7]的精确测量结果,使人们相信中微子是有质量的,在不同味之间振荡,轻子数不守恒. 在 SM 中,由于轻子 CKM 混合矩阵的么正性和中微子的零质量,这些轻子味破坏过程的分支比很小,不能被现在或将来的实验所观测到. 最近,人们在一些新物理模型框架下,对轻子味破坏过程进行了研究^[8,9]. 结果表明:轻子味破坏过程确实可作为探测新物理的有效过程. 另外,KEK 的 Belle 实验有可能提高对 τ 的轻子味破坏衰变过程的限制. 新的限制是^[10].

$$Br(\tau \rightarrow \mu \gamma) < 5 \times 10^{-7}, \quad Br(\tau \rightarrow 3\mu) < 8.7 \times 10^{-7}, \\ Br(\tau \rightarrow 2\mu e) < 7.7 \times 10^{-7}, \quad Br(\tau \rightarrow 2e\mu) < 3.4 \times 10^{-7}, \\ Br(\tau \rightarrow 3e) < 7.8 \times 10^{-7}$$

因此,研究轻子味破坏过程(如 $l_i \rightarrow l_j \gamma, l_i \rightarrow l_j l_k l_l$)是非常有意义的.

本文计算了 TC2 模型和味普适 TC2 模型预言的非普适规范玻色子 Z' 对过程 $\tau \rightarrow l_i \gamma$ 和 $\tau \rightarrow l_i l_j l_k$ 的分支比 $Br(\tau \rightarrow l_i \gamma)$ 和 $Br(\tau \rightarrow l_i l_j l_k)$ 的贡献. 结果显示,树图级过程 $\tau \rightarrow l_i l_j l_k$ 的分支比,要比光子在壳企鹅图过程 $\tau \rightarrow l_i \gamma$ 的分支比大的多. 在适当的参数取值下, $Br(\tau \rightarrow l_i l_j l_k)$ 的值可达到 4.1×10^{-8} ; 对于分支比 $Br(\tau \rightarrow l_i \gamma)$, 其最大值可达到 2.6×10^{-9} .

为了避免 SM 中基本 Higgs 场造成的平庸性和不自然性等问题,人们提出了各种的强相互作用动力学破缺模型,其中 TC2 模型是令人感兴趣的一种. 此类模型在解释顶夸克大质量的同时,提供了一种可能的电弱对称性破缺(EWSB)机制^[2,4]. 此类模型的共同特征是,SM 规范群在高于电弱能量标度之上得到扩充. 扩充的规范群破缺到其对角子群时,产生有质量的非普适规范玻色子. 例如,TC2 模型和味普适 TC2 模型均预言了非普适规范玻色子 Z' 的存在. 这些新粒子与第三代费米子的耦合,不

2002-12-05 收稿

* 国家自然科学基金(90203005)和河南省教育厅基金资助

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

同于与第一、二代费米子的耦合,从而导致了味改变(FC)耦合.

Z' 与轻子的味对角耦合是

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

其中 g_1 是通常的 $U(1)_Y$ 耦合常数, θ' 是混合角且

$$\tan \theta' = \frac{g_1}{\sqrt{4\pi k_1}}.$$

为使顶夸克凝聚而不形成 $b\bar{b}$ 凝聚, 必须有: $\tan \theta' \ll 1$. Z' 与轻子的味改变耦合是

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

其中 k_{ij} 是味混合因子. 在下面的估算中, 取 $k_{\tau\mu} = k_{\tau e} = k_{\mu e} = k = \lambda$. $\lambda = 0.22$ 是 Wolfenstein 参数.

由方程(1)和(2)看出, 通过 Z' 的交换, 可以产生轻子味破坏的 τ 衰变. 首先考虑轻子味破坏衰变过程 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 和 $\tau \rightarrow e\gamma$. 这些过程由图 1(a) 中光子在壳企鹅图产生. 费米子内线可以是 τ, μ 或者 e . 但 τ 的两条内传播子在分子上产生一个正比于 m_τ^2 的项. 由于在分母上重的 Z' 质量占主导地位, 所以分母上的 m_τ^2 项不能抵消掉分子上的 m_τ^2 项. 因此, 轻子味破坏耦合 $Z'\mu e, Z'\mu\mu, Z'ee$ 的贡献可以忽略, 可只考虑 $Z'\tau\tau, Z'\tau\mu, Z'\tau e$ 等轻子味破坏耦合的贡献. 经过直接计算, 可得到 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 和 $\tau \rightarrow e\gamma$ 的衰变宽度^[11]

$$\Gamma(\tau \rightarrow \mu\gamma) = \Gamma(\tau \rightarrow e\gamma) = \frac{\alpha^2 k_1}{1152\pi^2 C_W^2 M_{Z'}^4} \cdot k^2. \quad (3)$$

非普适规范玻色子 Z' 可以通过图 1(b) 和 (c) 对过程 $\tau \rightarrow l_i l_j l_k$ 产生修正. 但是, 单圈图对过程 $\tau \rightarrow l_i l_j l_k$ 的贡献, 至少要比树图级 Z' 交换产生的贡献小一个量级. 因此, 计算中忽略了图 1(b) 对过程 $\tau \rightarrow l_i l_j l_k$ 的贡献. 衰变宽度是

$$\begin{aligned} \Gamma(\tau \rightarrow 3\mu) = \Gamma(\tau \rightarrow 3e) = \Gamma(\tau \rightarrow ee\mu) = \\ \Gamma(\tau \rightarrow \mu\mu e) = \frac{25\alpha^3}{384\pi k_1 C_W^6 M_{Z'}^4} \cdot k^2. \end{aligned} \quad (4)$$

由方程(3)和(4)可以看出, 过程 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 和 $\tau \rightarrow e\gamma$ 的衰变宽度相等, 过程 $\tau \rightarrow l_i l_j l_k$ 的宽度也是彼此相等的. 这是因为非普适规范玻色子 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, 与第一代和第二代费米子的耦合是相同的. $e\bar{\nu}_e\nu_e$ 是轻子 τ 的主要衰变道. 因此, 可以用 $Br(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_e)$ 来表示轻子味破坏的 τ 衰变分支比

$$\begin{aligned} Br(\tau \rightarrow l_i \gamma) &= Br(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_e) \frac{\Gamma(\tau \rightarrow l_i \gamma)}{\Gamma(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_e)}, \\ Br(\tau \rightarrow l_i l_j l_k) &= Br(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_e) \frac{\Gamma(\tau \rightarrow l_i l_j l_k)}{\Gamma(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_e)}, \end{aligned} \quad (6)$$

且

$$\Gamma(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_e) = \frac{m_\tau^5 G_F^2}{192\pi^3}.$$

其中费米耦合常数 $G_F = 1.16639 \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2}$

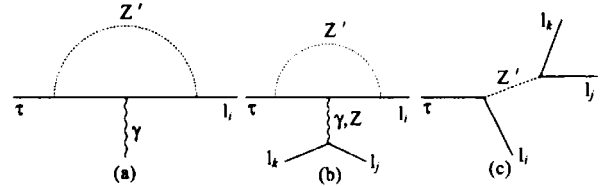


图 1 τ 衰变过程 $\tau \rightarrow l_i \gamma$ 和 $\tau \rightarrow l_i l_j l_k$ 的费曼图

图 2 和图 3 分别给出了 $k_1 = 0.2, 0.5, 1.0$ 时, 分支比 $Br(\tau \rightarrow l_i \gamma)$ 和 $Br(\tau \rightarrow l_i l_j l_k)$ 随 $M_{Z'}$ 变化的曲线. 由图 2 和图 3 可以看出, 在整个参数空间内, $Br(\tau \rightarrow l_i l_j l_k)$ 至少要比 $Br(\tau \rightarrow l_i \gamma)$ 大一个量级. 分支比 $Br(\tau \rightarrow l_i \gamma)$ 的值随着 k_1 的增加而增大, 而分支比 $Br(\tau \rightarrow l_i l_j l_k)$ 的值则随着 k_1 的增加而减小. 当 $k_1 = 0.2, M_{Z'} = 1 \text{TeV}$ 时, $Br(\tau \rightarrow l_i l_j l_k)$ 可达最大值, 即 $Br(\tau \rightarrow l_i l_j l_k) = 4.1 \times 10^{-8}$, 而 $Br(\tau \rightarrow l_i \gamma)$ 的最大值为 2.6×10^{-9} , 且是在 $k_1 = 1.0, M_{Z'} = 1 \text{TeV}$ 时达到.

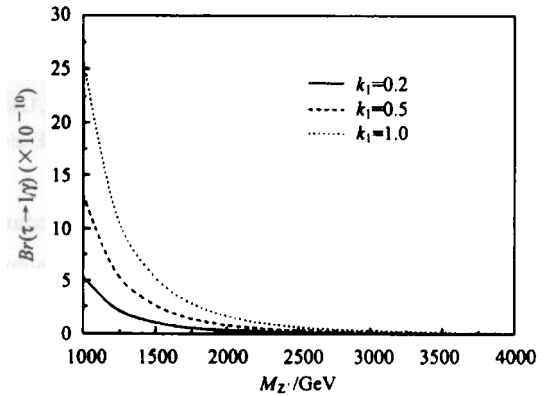


图 2 过程 $\tau \rightarrow l_i \gamma$ 的分支比随 $M_{Z'}$ 变化的曲线

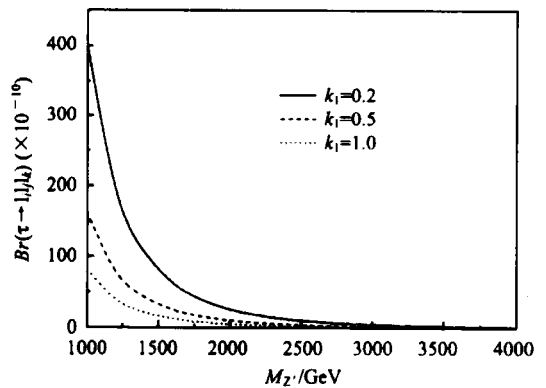


图 3 过程 $\tau \rightarrow l_i l_j l_k \gamma$ 的分支比随 $M_{Z'}$ 变化的曲线

预言非普适规范玻色子 Z' 的存在, 是所有 TC2 模型的重要特征. 本文计算了 TC2 模型和味普适 TC2 模型预言的非普适规范玻色子 Z' 对 τ 的轻子味破坏衰变的贡献. 发现, 在大部分参数空间内, 分支比 $Br(\tau \rightarrow l_i \gamma)$ 小于 2.6×10^{-9} , 很难探测到. 然而,

在相当大范围的参数空间内, 分支比 $Br(\tau \rightarrow l_i l_j l_k)$ 可达到 1.0×10^{-8} 量级. 因此, 在将来的高能实验中, 有可能探测到非普适规范玻色子 Z' 对衰变过程 $\tau \rightarrow l_i l_j l_k$ 的修正效应.

参考文献 (References)

- 1 Erler J, Langacker P. Phys. Lett., 1999, **B456**: 68; Phys. Rev. Lett., 2000, **84**: 212
- 2 Hill C T. Phys. Lett., 1995, **B345**: 483; Lane K. Phys. Lett., 1998, **B433**: 96
- 3 Popovic M B, Simmons E H. Phys. Rev., 1998, **D58**: 095007; Burdman G, Evans N. Phys. Rev., 1999, **D59**: 115005
- 4 Buchalla G et al. Phys. Rev., 1996, **D53**: 5185; Hill C T, Simmons E H. hep-ph/0203079
- 5 YUE Chong-Xing et al. Commun. Theor. Phys., 2002, **38**: 461; YUE Chong-Xing et al. High Energy Phys. and Nucl Phys., 2002, **26** (10): 1004 (in Chinese); YUE Chong-Xing, LI Jian-Tao. High Energy Phys. and Nucl Phys., 2001, **25** (10): 445 (in Chinese)
(岳崇兴等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(10): 1004; 岳崇兴, 李
- 6 Fukuda S et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 3999
- 7 Fukuda S et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 5656; Ahmad Q R et al (SNO Collab.). Phys. Rev. Lett., 2001, **87**: 071301; Phys. Rev. Lett., 2002, **89**: 011301
- 8 Cvetič G et al. Phys. Rev., 2002, **D66**: 034008
- 9 FENG J L, Nir Y, Shadmi Y. Phys. Rev., 2000, **D61**: 113005; Babu K S, Kolda C. hep-ph/0206310; Sher M. hep-ph/0207136; Hisano J. hep-ph/0209005
- 10 Hokuue T. talk in DPF 2002 (24—28 May 2002, Williamsburg, Virginia, USA); Yuasa Y. talk in DPF 2002 (24—28 May 2002, Williamsburg, Virginia, USA); <http://www.dpf2002.org/tau-physics.cfm>
- 11 YUE Chong-Xing, ZHANG Yan-Ming, LIU Lan-Jun. Phys. Lett., 2002, **B547**: 252

Z' and Lepton Flavor-Violation Tau Decays

YUE Chong-Xing^{1,1)} ZHANG Yan-Ming² LIU Lan-Jun²

1 (Department of Physics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

2 (College of Physics and Information Engineering, He'nan Normal University, Xinxiang 453002, China)

Abstract There are many models beyond the standard model predicting the existence of non-universal gauge bosons Z' , which can give rise to very rich phenomena. We calculate the contributions of the non-universal gauge bosons Z' , predicted by topcolor-assisted technicolor (TC2) models and flavor-universal TC2 models, to the lepton flavor-violation tau decays $\tau \rightarrow l_i \gamma$ and $\tau \rightarrow l_i l_j l_k$. We find that the branching ratio $Br(\tau \rightarrow l_i l_j l_k)$ is larger than that of the process $\tau \rightarrow l_i \gamma$ in all of the parameter space. Over a sizable region of the parameter space, we have $Br(\tau \rightarrow l_i l_j l_k) \sim 10^{-8}$, which may be tested in the future experiments.

Key words non-universal gauge bosons Z' , lepton flavor-violation tau decays, TC2 models

Received 5 December 2002

* Supported by NSFC(90203005) and Foundation of He'nan Educational Committee

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