

代非普适 Z' 模型中 $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ 衰变

李文君, 路明强

(河南师范大学 物理与电子工程学院, 河南 新乡 453007)

摘要: 研究 τ 轻子味破缺衰变, 有助于探索超出标准模型的具有轻子味破缺(LFV)机制的新物理. 在代非普适 Z' 模型中, 对 $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ 衰变进行了研究, 考虑了共振和非共振的贡献以及来自 B 介子衰变的限制, 结果表明: 在现有的参数范围内, 这些衰变的分支比都能达到目前的实验上限. 最新的实验上限将模型参数 $B_{\mu(e)}^{L(R)}$ 限制在 $O(10^{-3})$. 其中, s 夸克末态的贡献远大于 $u(d)$ 夸克末态的贡献, 共振部分形状因子的贡献最大, 分析了 $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ 微分衰变率与双 K 介子不变质量 $\sqrt{s} (s = m_{K\bar{K}}^2)$ 的关系. 在双 K 介子不变质量范围内, 矢量介子 $\varphi(1020)$ 共振占主导地位, $\tau^- \rightarrow \mu^- K\bar{K}$ 衰变的共振峰比 $\tau^- \rightarrow e^- K\bar{K}$ 衰变的共振峰高.

关键词: 代非普适 Z' 模型; 轻子味破缺; 分支比; 不变质量分布

中图分类号: O572.24

文献标志码: A

τ 轻子物理是国际高能物理研究的一个热点课题. 在标准模型中, 味改变中性流是禁戒的, 而中微子震荡实验和最近的大亚湾实验结果^[1-2] 表明荷电轻子部分中存在味破缺(LFV). 因此, 研究 τ 轻子味破缺衰变有助于探索超出标准模型的新物理. $\tau^- \rightarrow l^- K\bar{K} (l = e, \mu)$ 衰变, 属于 τ 轻子的强子衰变, 背景较为干净, 也有利于了解末态强子的 QCD 作用机制.

国际合作实验组 Belle 给出的最新的 $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ 衰变分支比是^[3]:

$$Br(\tau^- \rightarrow \mu^- K^+ K^-) < 4.4 \times 10^{-8}, (90\% \text{CL})$$

$$Br(\tau^- \rightarrow \mu^- K_s^0 K_s^0) < 8.0 \times 10^{-8}, (90\% \text{CL})$$

$$Br(\tau^- \rightarrow e^- K^+ K^-) < 3.4 \times 10^{-8}, (90\% \text{CL})$$

$$Br(\tau^- \rightarrow e^- K_s^0 K_s^0) < 7.1 \times 10^{-8}, (90\% \text{CL}) \quad (1)$$

理论方面, 人们在不同的新物理模型下对 $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ 衰变进行了研究, 例如人工色(TC)模型^[4], 具有 T 宇称的小黑格斯模型^[5], R 宇称破缺超对称模型(RPV SUSY)^[6] 和双黑格斯二重态模型 III(2HDM III)^[7] 等. 在代非普适 Z' 模型中, B 介子衰变等过程^[8-13], $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) P$ 衰变^[14] 以及考虑了 $Z'-Z$ 混合的纯轻衰变和辐射衰变也已被研究过^[15-16]. 本文将在代非普适 Z' 模型下, 研究 $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ 衰变过程.

1 代非普适 Z' 模型中的 $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ 衰变

理论上, Z' 模型是在标准模型的基础上增加了一个 $U(1)'$ 群, 与 $U(1)'$ 群对应的是一个质量较重的自旋为 1 的 Z' 中性规范玻色子^[17]. 大统一理论、超弦理论和一些额外维理论等新物理模型中都预言了 Z' 的存在^[18]. 实验上, LEP-II 通过 $e^+ e^- \rightarrow f\bar{f}$ 过程得到了 $U(1)'$ 群对费米子的电荷限制^[19], 强子对撞机上通过 $Z' \rightarrow \bar{l}l (l = e, \mu)$ 过程得到对 Z' 的质量的限制为 $Z' \geq 2.9 \text{ TeV}$ ^[20]. 对 Z' 的多数研究中, 都假设 Z' 的规范耦合是代普适的. Cleaver 和 Langacker 提出有 Z' 的非普适耦合存在的可能^[17]. 在代非普适 Z' 模型中, 第三代夸克之间的耦合与前两代不同, 所有的三代轻子之间的耦合也不同. 因此, Z' 玻色子与费米子之间的味混合矩阵是非对角的, 可使轻子味破缺过程在树图阶发生. 不考虑 $Z-Z'$ 混合时, 中性流有效拉氏量可表示

收稿日期: 2015-08-05; 修回日期: 2015-10-21.

基金项目: 国家自然科学基金(11005033; 11405046); 河南省教育厅自然科学研究计划资助项目(2011A140012).

第 1 作者简介(通信作者): 李文君(1976-), 女, 河南汤阴人, 河南师范大学副教授, 主要从事新物理模型唯象研究,

E-mail: liwj24@163.com.

为^[17]:

$$-L_{eff}^Z = \frac{4G_F}{\sqrt{2}} \left(\frac{g_2 M_Z}{g_1 M_{Z'}} \right)^2 J_\mu'^2,$$

$$J_\mu' = \sum_{i,j} \psi_i^\dagger \gamma_\mu [(\epsilon_{\mu L})_{ij} P_L + (\epsilon_{\mu R})_{ij} P_R] \psi_j^I, \quad (1)$$

其中, I 指相互作用本征态, $\epsilon_{\mu L(R)}$ 表示左手(右手)手征耦合矩阵. 在弱相互作用本征态基底表示下, 么正矩阵 $V_{L(R)}^\psi$ 可将 Yukawa 矩阵对角化, 并将 ψ^I 转化为质量本征态:

$$Y_\psi^{diag} = V_R^\psi Y_\psi V_L^{\psi\dagger}, \quad \psi_{L,R} = V_{L(R)}^\psi P_{L(R)} \psi^I, \quad V_{CKM} = V_{u,L} V_{d,L}^\dagger. \quad (2)$$

当 $\epsilon_{\mu L(R)}$ 是非对角矩阵时, 将会出现味改变中性流. 因此, 在费米子的质量本征态下, Z' 的手征耦合可参数化为

$$B_{ij}^{\psi_L} \equiv (V_L^\psi \epsilon_{\psi_L} V_L^{\psi\dagger})_{ij}, \quad B_{ij}^{\psi_R} \equiv (V_R^\psi \epsilon_{\psi_R} V_R^{\psi\dagger})_{ij}. \quad (3)$$

因此, $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ 过程可以通过 Z' 传播子在树图阶发生. 其衰变振幅可以因子化为轻子顶角部分和强子矩阵元的强子部分:

$$\langle K\bar{K} | M | \tau \rangle = -\frac{iG_F}{\sqrt{2}} \left(\frac{g_2 M_Z}{g_1 M_{Z'}} \right)^2 [B_{\tau}^L (\bar{l}\tau)_{V-A} + B_{\tau}^R (\bar{l}\tau)_{V+A}] \otimes$$

$$[B_{qq}^L \langle K\bar{K} | (\bar{q}q)_{V-A} | 0 \rangle + B_{qq}^R \langle K\bar{K} | (\bar{q}q)_{V+A} | 0 \rangle].$$

考虑共振和非共振形状因子的贡献^[21], 强子矩阵元可表示为:

$$\langle K\bar{K} | \bar{q}\gamma_\mu q | 0 \rangle = (P_K - P_{\bar{K}})_\mu F_\mu^{K\bar{K}}, \quad F_\mu^{K\bar{K}} = F_{R}^{K\bar{K}} + F_{NR}^{K\bar{K}},$$

$$F_{R}^{K\bar{K}} = \sum_i \frac{-C_{h_i}}{s - m_{h_i}^2 + im_{h_i} \Gamma_{h_i}}, \quad F_{NR}^{K\bar{K}} = \left(\frac{x_1^{(1)}}{s} + \frac{x_2^{(2)}}{s^2} \right) \left[\ln \left(\frac{s}{\Lambda^2} \right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

其中 $\tilde{\Lambda} = 0.3 \text{ GeV}$. F_{NR} 项在大 t 极限下满足 $F(t) \rightarrow (1/t) [\ln(t/\tilde{\Lambda}^2)]^{-1}$. $F_{\rho,\omega,\varphi}$ 包含来自于介子 $\rho(770)$, $\rho(1450)$, $\rho(1700)$, $\omega(782)$, $\omega(1420)$, $\omega(1650)$, $\varphi(1020)$ 和 $\varphi(1680)$ 的贡献. 参数 c_h , x_1^i 和 x_2^i 取值为^[21]:

$$c_\rho = 3c_\omega = c_\varphi = 0.363 \text{ GeV}^2, \quad c_\rho(1450) = 7.98 \times 10^{-3} \text{ GeV}^2, \quad c_\rho(1700) = 1.71 \times 10^{-3} \text{ GeV}^2,$$

$$c_\omega(1420) = -7.64 \times 10^{-2} \text{ GeV}^2, \quad c_\omega(1650) = -0.116 \text{ GeV}^2, \quad c_\varphi(1680) = -2.0 \times 10^{-2} \text{ GeV}^2,$$

$$x_1^1 = -3.26 \text{ GeV}^2, \quad x_1^2 = 5.02 \text{ GeV}^2, \quad x_2^1 = 0.47 \text{ GeV}^2, \quad x_2^2 = 0 \text{ GeV}^2.$$

$\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ 衰变的分支比可表示为

$$Br(\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}) = \int_{m_K+m_{\bar{K}}}^{m_\tau-m_l} \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{32m_\tau^3} |A(\tau^- \rightarrow l^- K\bar{K})|^2 dm_{K\bar{K}}^2 dm_{lK}^2 \cdot T_\tau. \quad (5)$$

不变质量谱

$$\frac{d\Gamma_{(m_{K\bar{K}})}}{dm_{K\bar{K}}} = \int_{m_K+m_l}^{m_\tau-m_K} \frac{1}{(2\pi)^3} \cdot \frac{1}{8m_\tau^3} |A(\tau^- \rightarrow l^- K\bar{K})|^2 m_{K\bar{K}} m_{lK} dm_{lK}. \quad (6)$$

2 数值结果与讨论

输入参数除了共振和非共振项的参数^[21]外, 还有模型参数 $B_{ff'}^R$. 夸克部分的参数 $B_{qq}^{L/R}$ 的值, 考虑了 $B_s - \bar{B}_s$ 混合以及 $B_s \rightarrow KK^{(*)}$ 等 B 介子衰变的限制^[8], 在以下 2 种情况计算了这些衰变的分支比:

$$\text{I: } |B_{ff'}^L| \neq 0, |B_{ff'}^R| = 0 \text{ 时, } B_{uu}^L = 5.5, B_{dd}^L = 11.5, B_{ss}^L = -1.3;$$

$$\text{II: } |B_{ff'}^L| \neq 0, |B_{ff'}^R| \neq 0 \text{ 时, } B_{uu}^L = 12.8, B_{uu}^R = -2, B_{dd}^L = 18.5, B_{dd}^R = -2, B_{ss}^L = 0.5, B_{ss}^R = -2.1.$$

计算表明, 衰变分支比与模型参数 $|B_{\mu(e)\tau}^{L(R)}|$ 的弱相角 $\varphi^{L,R}$ 无关. 图 1 给出了衰变分支比与模型参数的函数关系. 由图 1 可知, 两种情况下, $Br(\tau^- \rightarrow e^- (\mu^-) K\bar{K})$ 随模型参数 $|B_{\mu(e)\tau}^{L(R)}|$ 的增大而增大. 在现有的参数范围内, 各衰变道的衰变分支比都能达到实验上限. 当 $|B_{\mu(e)\tau}^{L(R)}|$ 取固定值时, 4 个衰变道分支比的大小关系为: $Br(\tau^- \rightarrow \mu^- K^+ K^-) < Br(\tau^- \rightarrow \mu^- K^0 \bar{K}^0) < Br(\tau^- \rightarrow e^- K^+ K^-) < Br(\tau^- \rightarrow e^- K^0 \bar{K}^0)$.

利用最新的实验数据,本文得到了对模型参数 $|B_{\mu(\epsilon)}^{L(R)}|$ 的限制,详见表 1. 由表 1 知,当 $|B_{\mu}^L|$ 和 $|B_{\epsilon}^L|$ 时,分支比的实验上限对 $K^+ K^-$ 道的参数限制比对 $K^0 \bar{K}^0$ 道的参数限制更严格,小一个量级. 当 $|B_{ff'}^L| \neq 0, |B_{ff'}^R| \neq 0$ 时,实验上限将参数限制在 $O(10^{-3})$ 量级.

由表 2 可知,对于这些道的衰变分支比,末态 s 夸克的贡献远大于末态为 u/d 夸克过程的贡献. 其中,在 $\tau^- \rightarrow l^- K^+ K^-$ 衰变过程中,共振部分形状因子 F_u^R 的贡献为 $7.92\% \sim 7.59\%$,而 F_s^R 贡献为 $86.7\% \sim 87.6\%$,远大于 F_u^R 的贡献. 在 $\tau^- \rightarrow l^- K^0 \bar{K}^0$ 的衰变过程中, F_s^R 贡献为 $64.9\% \sim 66.7\%$,占主要地位. 显然,对于 $\tau^- \rightarrow l^- K\bar{K}$ 衰变的衰变分支比,主要的贡献来源于形状因子中的共振部分.

图 2 给出衰变率与双 K 介子不变质量 \sqrt{s} 的函数关系图. 由图 2 可以看出,在双 K 介子不变质量 \sqrt{s} 取值范围内, $\tau^- \rightarrow \mu^- K\bar{K}$ 的衰变率峰值比 $\tau^- \rightarrow e^- K\bar{K}$ 过程的衰变率峰值要高. 矢量介子 $\varphi(1020)$ 共振占主要地位.

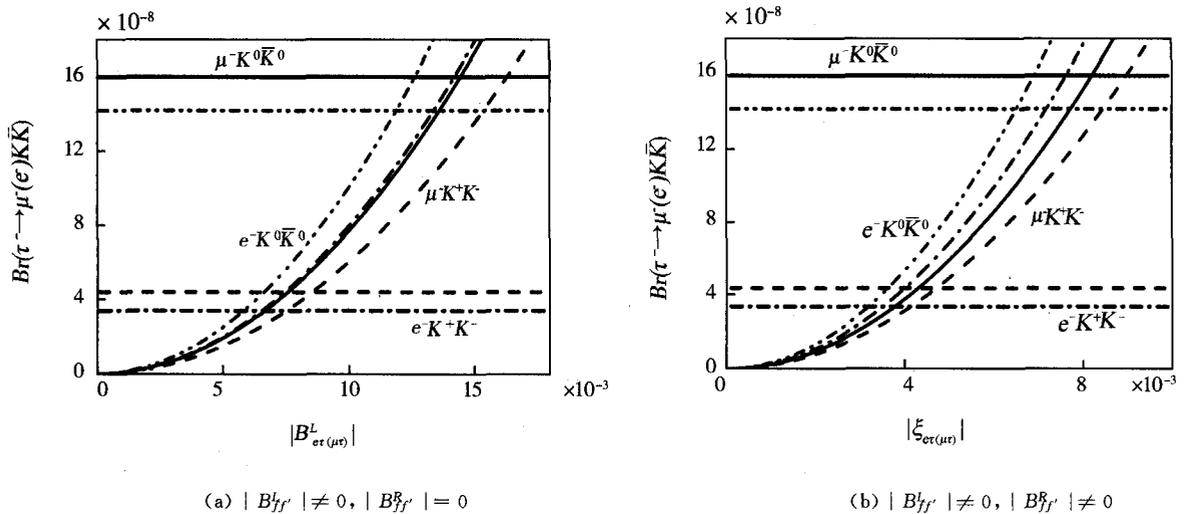


图 1 代非普适 Z' 模型下 $\tau^- \rightarrow l^- K\bar{K}$ 衰变分支比与模型参数的函数关系图,其中 $|\xi_{\mu(\epsilon)}| = |B_{\mu(\epsilon)}^L| = |B_{\mu(\epsilon)}^R|$. 各水平线表示对应线型衰变分支比的最新实验上限

表 1 衰变分支比实验数据对模型参数 $|B_{\mu(\epsilon)}^L|$ ($|\xi_{\mu(\epsilon)}|$) 的限制

参数 衰变道	$ B_{\mu}^L / \xi_{\mu} $		$ B_{\epsilon}^L / \xi_{\epsilon} $	
	$\tau^- \rightarrow \mu^- K^+ K^-$	$\tau^- \rightarrow \mu^- K^0 \bar{K}^0$	$\tau^- \rightarrow e^- K^+ K^-$	$\tau^- \rightarrow e^- K^0 \bar{K}^0$
I	$< 8.5 \times 10^{-3}$	$< 1.4 \times 10^{-2}$	$< 6.5 \times 10^{-3}$	$< 1.2 \times 10^{-2}$
II	$< 4.7 \times 10^{-3}$	$< 8 \times 10^{-3}$	$< 3.5 \times 10^{-3}$	$< 6.5 \times 10^{-3}$

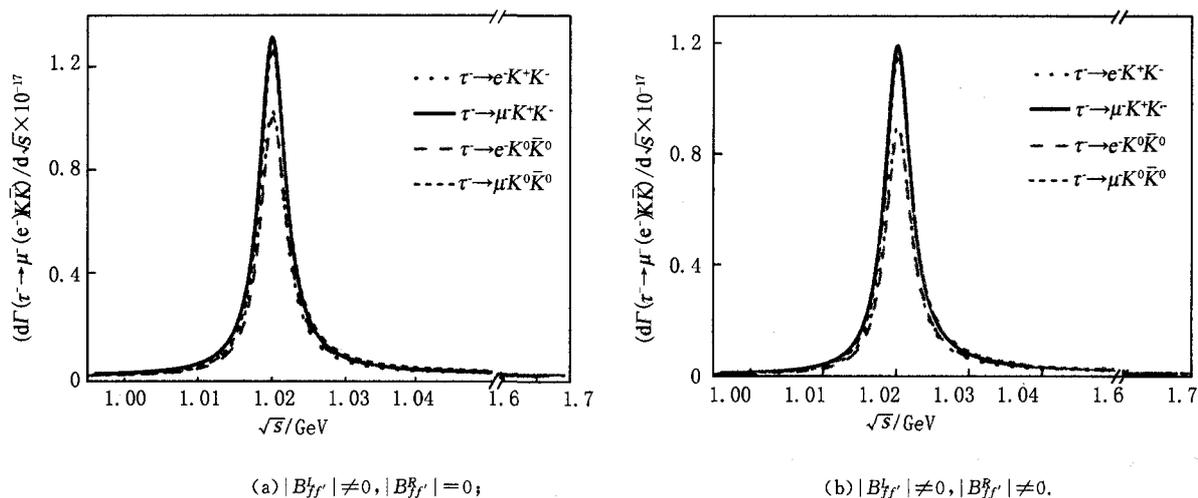
表 2 不同衰变道中共振部分和非共振部分形状因子对 $\tau^- \rightarrow l^- K\bar{K}$ 衰变分支比的贡献

末态	形态因子	$\tau^- \rightarrow \mu^- K^+ K^-$	$\tau^- \rightarrow e^- K^+ K^-$	末态	形态因子	$\tau^- \rightarrow \mu^- K^0 \bar{K}^0$	$\tau^- \rightarrow e^- K^0 \bar{K}^0$
u	F_u^R	7.92	7.59	d	F_d^R	25.8	25.0
	F_u^{NR}	0.205	0.222		F_d^{NR}	0.63	0.70
s	F_s^R	86.7	87.6	s	F_s^R	64.9	66.7
	F_s^{NR}	0.014	0.015		F_s^{NR}	0.01	0.01

3 结 论

在代非普适 Z' 模型中,对 $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ 衰变进行了研究,分析结果表明:在现有的参数范围内, $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ 衰变分支比能达到现在的实验上限. 最新的实验上限将

模型参数 $|B_{\mu(\epsilon)}^{L(R)}|$ 限制在 $O(10^{-3})$ 量级,其中, s 夸克末态的贡献远大于 u/d 夸克末态的贡献. 分析了 $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ 微分衰变率与双 K 介子不变质量 \sqrt{s} ($s = m_{K\bar{K}}^2$) 的关系. 在双 K 介子不变质量范围内,矢量介子 $\varphi(1020)$ 共振占主要地位,末态轻子为 μ^- 的道的共振峰比末态轻子为 e^- 的道的共振峰高. 此研究将为以后轻子味破缺和代非普适 Z' 模型的唯一象研究提供参考.

图 2 代非普适 Z' 模型下 $\tau^- \rightarrow l^- K\bar{K}$ 衰变率与双 K 介子不变质量 \sqrt{s} 的函数关系图

参 考 文 献

- [1] AN F P, BAI J Z, BALANTEKIN A B, et al. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay[J]. Phys Rev Lett, 2012, 108(17):171803.
- [2] AN F P, BAI J Z, BALANTEKIN A B, et al. Improved Measurement of Electron Antineutrino Disappearance at Daya Bay [J]. Chin Phys C, 2013, 37(1):011001.
- [3] OLIVE K A, AGASHE K, AMSLER C, et al. Particle Data Group[J]. Chin Phys C, 2014, 38(9):090001.
- [4] LIU Wei, YUE Chongxing, ZHANG Jiao. Lepton flavor violation decays $\tau^- \rightarrow \mu^- P_1 P_2$ in the topcolor-assisted technicolor model and the littlest Higgs model with T parity[J]. Eur Phys J C, 2010, 68(1): 197-207.
- [5] HERRERO M, PORTOLES J, RODRIGUEZ-SANCHEZ A. Sensitivity to the Higgs sector of SUSY-seesaw models via LFV tau decays [J]. AIP Conf Proc, 2010, 1200(908):908-911.
- [6] LI Wenjun, NIE Xiaoqin, FAN Yingying, et al. RPV SUSY effects in $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ Decays[J]. Int J Mod Phys A, 2014, 29 (11n12):1450063.
- [7] LI Wenjun, FAN Yingying, LIU Gongwei. Lepton Flavor Violating Decays in the Two Higgs Doublet Model III[J]. Int J Mod Phys A, 2010, 25(25):4827-4837.
- [8] CHAHNG Qin, LI Xinqiang, YANG Yadong. A Comprehensive Analysis of Hadronic b-s Transitions in a Family Non-universal Z' Model[J]. J Phys G, 2014, 41(10):105002.
- [9] LI Ying, WANG Enlei. Branching Fractions and CP Asymmetries of $B \rightarrow K_s^* (1430) \rho$ and $B \rightarrow K_s^* (1430) \phi$ Decays in the Family Nonuniversal Z' Model[J]. Adv High Energy Phys, 2013, 2013:175287.
- [10] LI Ying, WANG Wenlong, DU Dongshuo, et al. Impact of family-non-universal Z' boson on pure annihilation B^+ and $B_d \rightarrow K^+ K^-$ decays[J]. Eur Phys J C, 2015, 75:328.
- [11] LI Ying, FAN Xiaojiao, HUA Juan, et al. Implications of family non-universal Z' model on $B \rightarrow K_s^* (1430) \pi$ decays[J]. Phys Rev D, 2012, 85(7):074010.
- [12] BURAS A J, FULVIA De F, GIRRBACH J. The Anatomy of Z' and Z with Flavor Changing Neutral Currents in the Flavor Precision [J]. JHEP, 2013, 1302:116.
- [13] BURAS A J, GIRRBACH J. Left-handed Z' and Z FCNC quark couplings facing new $b \rightarrow s \mu^+ \mu^-$ data[J]. JHEP, 2013, 1312:009.
- [14] LI Wenjun, YANG Yadong, ZHANG Xiangdan. $\tau^- \rightarrow \mu^- \pi^0 (\eta, \eta')$ Decays in New Physics Scenarios beyond the Standard Model[J]. Phys Rev D, 2006, 73:073005.
- [15] CHIANG Chengwei, NOMURA T, TANDEAN J. Effects of Family Non-universal Z' Boson on Leptonic Decays of Higgs and Weak Bosons[J]. Phys Rev D, 2013, 87: 075020.
- [16] CHIANG Chengwei, LIN Yifan, TANDEAN J. Probing Leptonic Interactions of a Family-Nonuniversal Z' Boson[J]. JHEP, 2011, 1111:083.
- [17] LANGACKER P. The Physics of Heavy Z' Gauge Bosons[J]. Rev Mod Phys, 2009, 81:1199-1228.
- [18] MASIP M, POMAROL A. Effects of SM Kaluza-Klein excitations on electroweak observables [J]. Phys Rev D, 1999, 60:096005.

- [19] CARENA M, DALEO A, DOBRESCU B A, et al. Z-prime Gauge Bosons at the Tevatron [J]. Phys Rev D, 2004, 70:093009.
- [20] AAD G, ABBOTT B, ABDALLAH J, et al. Search for high-mass dilepton resonances in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV with the ATLAS detector[J]. Phys Rev D, 2014, 90(5):052005.
- [21] CHENG Haiyang, CHUA Chunkiang. Branching Fractions and Direct CP Violation in Charm-less Three-body Decays of B Mesons[J]. Phys Rev D, 2013, 88:114014.

$\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ decays in Family Non-universal Z' Model

LI Wenjun, LU Mingqiang

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

Abstract: It is helpful to investigate the τ decays to explore new physics scenarios with lepton flavor violation (LFV) beyond the SM. We investigate $\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K}$ decays in family non-universal Z' model. Considering the resonant and non-resonant terms contributions and the constraints from B mesons decays, we get the results that, in the current parameters scope, $Br(\tau^- \rightarrow \mu^- (e^-) K\bar{K})$ could reach the experimental upper limits. The contributions of s quark in final states is higher than those of the u/d quark in final states. We also get the constraints of parameter $|B_{\mu(\tau)}^{L/R}|$ at the order of $O(10^{-3})$ from experimental data. The invariant mass distributions of di-kaon are analyzed. The contribution of resonant form factor F_s^R is the most one among those of form factors. And the $\phi(1020)$ vector resonance is dominant in the scope of di-kaon invariant mass.

Keywords: family non-universal Z' model; lepton flavor violation; branching ratios; invariant mass distribution