第20卷 第11期 高能物理与核物理 Vol.20, No.11
1996年 11月 HIGH ENERGY PHYSICS AND NUCLEAR PHYSICS Nov., 1996

现实的一代 ETC 模型对 $Zb\bar{b}$、$Z\tau^+\tau^-$ 顶角的辐射修正 *

岳崇兴[1] 邝宇平[2] 鲁公儒[1]

1(河南师范大学物理系 新乡 453002)

2(清华大学物理系 北京 100084)

1995-11-24 收稿

摘 要

在一个现实的一代扩展人工色(ETC)模型中，计算了旁路(Sideways)及对角(diagonal)ETC规范玻色子交换对 $Zb\bar{b}$、$Z\tau^+\tau^-$ 顶角的单圈辐射修正. 结果表明 $Z\to b\bar{b}$ 过程的衰变宽度 Γ_b、分支比 R_b 以及 τ 的极化不对称参数 A_τ 都较标准模型的要大，与最近的实验数据相符.

关键词 单圈修正、衰变宽度 Γ_b、分支比 R_b、极化不对称参数 A_τ.

1 引 言

最近 LEP 的电弱精确检验实验测得的 $Z\to b\bar{b}$ 的分支比 R_b 较标准模型的预言值要大 3.7 个标准偏差[1]. 其它如 $Z\to c\bar{c}$ 的分支比 R_c, $Z\to\tau^+\tau^-$ 中的 τ 的极化不对称参量 A_τ 等也都与标准模型的预言有差别，这现象引起了人们的注意，人们开始探讨这些是否可能是某种超出标准模型的新物理的贡献. 本文主要研究 R_b 及 A_τ 的可能解释.

人工色(TC)模型是电－弱对称性动力学破缺的重要侯选者之一，它避免了标准模型中 Higgs 场部分的平庸性、不自然性等缺点，是人们注意探讨的新物理之一. TC 理论会给一系列可观测物理量以直接或间接的修正. 间接修正可用三个参量 S、T、U 表示[2], 直接修正主要指对 $Zb\bar{b}$、$Z\tau^+\tau^-$ 相关的物理量的修正. 已有的计算表明，传统的一代扩展人工色(ETC)模型给出的 S 值过大，且对 R_b 的修正为负，与实验矛盾[3]. 这种模型已基本上被实验排除.

最近 Appelquist 等人提出了一个新的 ETC 模型[4], 其中假设仅 TC 夸克部分保持同位旋对称性. TC 轻子部分是同位旋破缺的. 他们重新计算了电弱参数 S、T 的数值，给出了与实验符合较好的结果，使此模型可能成为一个现实的 ETC 模型. 本文研究这个一代 ETC 模型中的 R_b 和 A_τ, 仔细计算了旁路(sideways)和对角(diagonal)ETC 规范玻色

* 国家自然科学基金、河南省科委资助.

子对 $Zb\overline{b}$、$Z\tau^{+}\tau^{-}$ 顶角的贡献. 我们发现旁路 ETC 规范玻色子压低 R_b, 而对角 ETC 规范玻色子增加 R_b, 其总效果为给出了与最近 LEP 实验组测量值符合较好的结果. 本文纠正了文献[5]的错误结果. 在这个一代 ETC 模型中, TC 轻子组成的介子衰变常数远小于 TC 夸克组成的介子衰变常数, 因此这模型对 $Z\tau^{+}\tau^{-}$ 顶角的辐射修正远小于对 $Zb\overline{b}$ 顶角的辐射修正, 不过, 我们发现它对 τ 的极化不对称参数 A_τ 产生了正贡献, 与最近的精确测量结果符合较好.

2 $Zb\overline{b}$ 顶角的修正

在文献[4] 的一代ETC 模型中, 描述第三代费米子与TC 费米子相互作用的有效拉氏量为:

$$\begin{aligned}\mathscr{L}=g_E(&\xi_t\overline{Q}_L W_Z^{\nu}\gamma_\nu q_L+\xi_{Rt}\overline{U}_R W_E^{\nu}\gamma_\nu t_R+\xi_b\overline{D}_R W_E^{\nu}\gamma_\nu b_R+\mathrm{h\cdot c}\quad+\xi_\tau\overline{L}_L W_E^{\nu}\gamma_\nu L_L\\&+\xi_\nu\overline{N}_R W_E^{\nu}\gamma_\nu\nu_R+\xi_{R\tau}\overline{E}_R W_E^{\nu}\gamma_\nu\overline{\tau}_R+\mathrm{h\cdot c.}),\end{aligned}\tag{1}$$

其中 $q_L=(t, b)$L, t_R 和 b_R 为第三代夸克; $L_L=(\nu, \tau)_L$. ν_R、τ_R 为第三代轻子; $Q_L=(U, D)_L$, $L_L=(N, E)_L$ 分别表示 TC 夸克和 TC 轻子. 普通费米子与 TC 费米子通过 ETC 作用发生耦合, 其耦合常数为 g_E, 下面用 ξ_i 表示左或右手耦合系数.

利用维数分析规则, 由方程(1)可以写出第三代夸克、轻子质量的一般表示式:

$$m_i=\xi_i\xi_j\ \frac{g_E^2}{m_s^2}\ (4\pi F_i^3)\ ,\tag{2}$$

其中 m_s 为旁路 ETC 规范玻色子的质量, F_i 为 TC 介子衰变常数. 利用(2)式可以唯象地给出耦合系数间的关系:

$$\xi_t=\xi_{Rt}^{-1}\ ,\ \xi_b=\xi_t^{-1}\ \frac{m_b}{m_t}\quad ,\tag{3}$$

$$\xi_\tau=\xi_{R\tau}^{-1}\ ,\ \xi_\nu=\xi_\tau^{-1}\ \frac{m_\nu}{m_\tau}\quad .\tag{4}$$

若取 $m_t=175\mathrm{GeV}$, $m_b=4.8\mathrm{GeV}$. $m_\nu=0.164\mathrm{GeV}$. $m_\tau=1.78\mathrm{GeV}$. 那么有 $\xi_b\approx0.028\xi_t^{-1}$, $\xi_\nu\approx0.089\xi_\tau^{-1}$.

由方程(1), 可以写出旁路 ETC 规范玻色子交换产生的四费米子算符, 其具体形式为:

$$-\frac{g_E^2}{m_s^2}\ [\xi_t^2(\overline{Q}_L\gamma^\nu q_L)\ (\overline{q}_L\gamma_\nu Q_L)+\xi_b^2\ (\overline{D}_R\gamma^\nu b_R)\ (\overline{b}_R\gamma_\nu D_R)]\ .\tag{5}$$

进行 Fierz 换位后, 上述算符可以写为:

$$-\frac{g_E^2}{2m_s^2}\frac{1}{N_C}[\xi_t^2(\overline{Q}_L\gamma^\nu\tau^a Q_L)\ (\overline{q}_L\gamma_\nu\tau^a q_L)+\xi_b^2\ (\overline{D}_R\gamma^\nu D_R)\ (\overline{b}_R\gamma_\nu b_R)]\ ,\tag{6}$$

其中τ^a为Pauli矩阵，N_c为普通颜色数．在(6)式中，我们忽略了高阶相互作用项，仅写出了对$Zb\bar{b}$顶角产生主要贡献的项．此外在(6)式中隐含着对普通色、TC色指标的求和．

在TC理论对称性破缺能标下，采用有效拉氏量方法，TC费米子流可以用有效的复合Σ物的流来代替．这样便于计算辐射修正，用此法可求得旁路ETC规范玻色子交换产生与规范玻色子有关的新耦合为：

$$\frac{g_E^2}{2m_s^2}\ \frac{e}{s_\theta C_\theta}\ F_Q^2[\ \xi_t^2\bar{q}_L Z\frac{\tau_3}{2}\ q_L-\xi_b^2\bar{b}_R Z\frac{\tau^3}{2}\ b_R]\ , \tag{7}$$

其中$s_\theta=\sin\theta$，θ为温伯格角，因此，对$Zb\bar{b}$顶角的树图耦合$g^b_L=\frac{e}{S_\theta C_\theta}(-\frac{1}{2}+\frac{1}{3}S_\theta^2)$，$g_R^b=\frac{e}{S_\theta C_\theta}(\frac{1}{3}S_\theta^2)$产生的修正为：

$$\delta g_{LS}^b=\frac{\xi_t^2}{4}\ \frac{m_t}{4\pi F_Q}\ \frac{e}{S_\theta C_\theta}\ ,\ \delta g_{RS}^b=-\frac{\xi_b^2}{4}\ \frac{m_t}{4\pi F_Q}\ \frac{e}{S_\theta C_\theta}\ . \tag{8}$$

对角ETC规范玻色子存在于绝大多数的ETC模型中，它也可以对$Zb\bar{b}$顶角产生有意义的贡献[6]，对角ETC规范玻色子交换引起的费米子．及TC费米子间的耦合，可以由相应的旁路耦合乘以因子得到．由对角生成元的无迹性、厄米性和归一化可求得．此因子分别为$\sqrt{\frac{N_{TC}}{N_{TC}+1}}$和$-\frac{1}{\sqrt{N_{TC}(N_{TC}+1)}}$．这样对角ETC规范玻色子交换引起的四费米子耦合算符为：

$$\frac{1}{2}\left(\frac{m_S}{m_D}\right)^2\frac{g_E^2}{m_s^2}\ \frac{1}{N_{TC}+1}[(\bar{U}_R\gamma^\nu U_R)\ (\bar{q}_L\gamma_\nu q_L)+\xi_t\xi_b(\bar{D}_R\gamma^\nu D_R)$$

$$\cdot(\bar{q}_L\gamma_\nu q_L)+\xi_t^{-1}\xi_b(\bar{U}_R\gamma^\nu U_R)(\bar{b}_R\gamma_\nu b_R)]\ . \tag{9}$$

从而求得对角ETC规范玻色子交换对g_L^b、g_R^b产生的修正为：

$$\delta g_{LD}^b=-\frac{1}{4}\ \frac{m_t}{4\pi F_Q}\ \frac{e}{S_\theta C_\theta}\left(\frac{m_S}{m_D}\right)^2\frac{N_c}{N_{TC}+1}\ \xi_t(\xi_t^{-1}+\xi_b)\ , \tag{10}$$

$$\delta g_{RD}^b=-\frac{1}{4}\ \frac{m_t}{4\pi F_Q}\ \frac{e}{S_\theta C_\theta}\left(\frac{m_S}{m_D}\right)^2\frac{N_{TC}}{N_{TC}+1}\ \xi_t^{-1}\xi_b\ . \tag{11}$$

由上式可见对角ETC规范玻色子交换对g_L^b、g_R^b产生的贡献为负，与旁路ETC规范玻色子的贡献相反，可以增加衰变宽度Γ_b的数值．这里指出文献[5]单圈计算的结果是不正确的，与我们的差一负号．

从方程(8)、(11)，可以看出ETC玻色子交换对g_R^b的修正效应被小因子$\left(\frac{m_b}{m_t}\right)^2$、

$\left(\frac{m_b}{m_t}\right)$压低，在以下估计中取 $\delta g^b_{RS} \approx \delta g^b_{RD} \approx 0$，求得在文献[4] 的一代 ETC 模型中 $Zb\bar{b}$ 顶角的总修正为:

$$\delta g^b_{LE} = -\frac{1}{4}\frac{m_t}{4\pi F_Q}\frac{e}{S_\theta C_\theta}\left[\left(\frac{m_s}{m_D}\right)^2\frac{N_{TC}}{N_{TC}+1}\xi_t(\xi_t^{-1}+\xi_b)-\xi_t^2\right], \tag{12a}$$

$$\delta g^b_{RE} \approx 0. \tag{12b}$$

从上式可以看出两种 ETC 规范玻色子对 $Zb\bar{b}$ 顶角产生的贡献量级相同.

在此模型中，$F_Q \approx 140$GeV，$F_L \approx 60$GeV[4]，若将 ξ_t 取为标准的 Clebsch－Gordon 系数值，$\xi_t = \frac{1}{\sqrt{2}}$，并取 $N_{TC}=4$，$m_s \approx m_D$，则此模型中 $Z \to b\bar{b}$ 过程的衰变宽度 Γ_b、分支比 R_b 的修正为:

$$\left(\frac{\delta\Gamma}{\Gamma_b}\right)_E = \frac{2(g^b_L\delta g^b_{LE}+g^b_R\delta g^b_{RE})}{(g^b_L)^2+(g^b_R)^2} \approx 1.26\%\left(\frac{m_t}{175\text{GeV}}\right), \tag{13}$$

$$\delta R_{bE} = \delta\left(\frac{\Gamma}{\Gamma_b}\right)_E = \left(\frac{\delta\Gamma}{\Gamma_b}\right)_E\left(\frac{\Gamma_b}{\Gamma_b}\right)\left(1-\frac{\Gamma_b}{\Gamma_h}\right) \approx 0.99\%\left(\frac{m_t}{175\text{GeV}}\right)R_b. \tag{14}$$

$Z \to b\bar{b}$ 过程的分支比的最新实验测量值为 $R_b = 0.2219 \pm 0.0017$ 较标准模型的理论预言值 $R_b = 0.2157 \pm 0.0004$. ($m_t = 175$GeV. $m_H = 100$GeV，$\alpha_s = 0.12$) 大 3.7 个标准偏差[1], QCD 对 R_b 的主要修正可以相消，新物理对 R_b 产生的可观测的修正主要来源于顶角修正. 因此，结果是有意义的.

3 $Z\tau^+\tau^-$ 顶角的修正

ETC 玻色子交换产生对 $Z\tau^+\tau^-$ 顶角有贡献的四费米子算符为:

$$-\frac{g_E^2}{2m_s^2}\left[\xi_\tau^2(\bar{L}_L\gamma^\nu\tau^a L_L)(\bar{l}_L\cdot\gamma_\nu\tau^a l_L)+\xi_\tau^{-2}(\bar{E}_R\gamma^\nu E_R)(\tau_R\gamma_\nu\tau_R)\right], \tag{15}$$

$$-\frac{1}{2}\left(\frac{m_s}{m_D}\right)^2\frac{g_E^2}{m_s^2}\frac{1}{N_{TC+1}}\left[\xi_\tau\xi_\nu(\bar{N}_R\gamma^\nu N_R)(\bar{l}_L\gamma_\nu l_L)+(\bar{E}_R\gamma^\nu E_R)\right.$$
$$\left.\cdot(\bar{l}_L\gamma_\nu l_L)+\xi_\tau^{-1}\xi_\nu(\bar{N}_R\gamma^\nu N_R)(\bar{\tau}_R\gamma_\nu\tau_R)\right]. \tag{16}$$

方程(16)为对角 ETC 规范玻色子交换所产生的 TC 轻子部分的四费米子算符，当然 TC 夸克部分对 $Z\tau^+\tau^-$ 顶角亦有贡献，但贡献较小，在此略去.

这个模型对 $Z\tau^+\tau^-$ 耦合树级顶角 $g^\tau_L = \frac{e}{S_\theta C_\theta}\left(-\frac{1}{2}+S_\theta^2\right)$，$g^\tau_R = \left(\frac{e}{S_\theta C_\theta}\right)S_\theta^2$ 产生的辐射修正为:

$$\delta g_{LE}^{\tau}=-\frac{1}{4}\frac{m_t}{4\pi}\frac{F_L^2}{F_Q^2}\frac{e}{S_\theta C_\theta}\left[\left(\frac{m_S}{m_D}\right)^2\frac{N_C}{N_{TC}+1}(1+\xi_\tau\xi_\nu)-\xi_\tau^2\right], \tag{17}$$

$$\delta g_{RE}^{\tau}=-\frac{1}{4}\frac{m_t}{4\pi}\frac{F_L^2}{F_Q^2}\frac{e}{S_\theta C_\theta}\left[\left(\frac{m_S}{m_D}\right)^2\frac{N_C}{N_{TC}+1}\xi_\tau^{-1}\xi_\nu+\xi_\tau^{-2}\right]. \tag{18}$$

实验对$Z\tau^+\tau^-$顶角的约束可以由τ极化的不对称参数$A\tau$表示，$A\tau$的表示式为$A\tau=\frac{(g_L^\tau)^2-(g_R^\tau)^2}{(g_L^\tau)^2+(g_R^\tau)^2}$. 新物理对参数$A\tau$的修正可以写为:

$$\begin{aligned}\frac{\delta A\tau}{A\tau}&=\frac{4(g_L^\tau)^2(g_R^\tau)^2}{(g_L^\tau)^4-(g_R^\tau)^4}\left(\frac{\delta g_L^\tau}{g_L^\tau}-\frac{\delta g_R^\tau}{g_R^\tau}\right)\\&\approx-\left(\frac{e}{S_\theta C_\theta}\right)^{-1}(24.04\delta g_L^\tau+27.99\delta g_R^\tau)\ .\end{aligned} \tag{19}$$

在文献[4]的模型中，如前，取$\xi_\tau=\frac{1}{\sqrt{2}}$，$\xi_\nu\approx0.089\xi_\tau^{-1}$，$m_s\approx m_D$，那么此模型中不对称参数$A\tau$的修正为$\left(\frac{\delta A\tau}{A\tau}\right)_E\approx0.245$，$A\tau$的精确测量值为$\frac{\delta A\tau}{A\tau}=0.14\pm0.13$[7]. 因此这个模型对$A\tau$的修正基本上与实验结果相吻合.

4 结　论

在文献[4]的一代ETC模型中，计算了不同类型的ETC玻色子对$Zb\bar{b}$、$Z\tau^+\tau^-$顶角的辐射修正，给出了与实验符合较好的结果.

本文仅考虑了TC理论对$Zb\bar{b}$、$Z\tau^+\tau^-$顶角的高能贡献. 与QCD类似TC理论预言了一系列的赝标格尔斯通粒子、矢量介子，这些新粒子对$Zb\bar{b}$、$Z\tau^+\tau^-$顶角也含产生修正，不过这种修正与TC理论所预言的新粒子质量(理论中具体参量值)有关[8]，这里不仔细讨论.

参　考　文　献

[1] K. Hagiwara, Implications of Precision Electroweak Data, talk presented at 17th International Symposiumon on Lepton-Photon Interactions, August 10— 15, 1995, Beijing.

[2] M. E. Peskin, T. Tacheuchi, *Phys. Rev.*, **D46** (1992) 381.

[3] R. S. Chivukula *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **69** (1992) 575; R. S. Chivukula *et al.*, *Phys. Lett.*, **311B** (1993) 157; N. Evans, *Phys. Lett.*, **B331** (1994) 378.

[4] T. Appelquist J. Terning, *Phys. Lett.*, **B315** (1993) 139; T. Appekquist, J. Terning, *Phys. Rev.*, **D50** (1994) 2116.

[5] N. kitazawa, *Phys. Lett.*, **B313** (1993) 393.

[6] Guo-Hong Wu, *Phys. Rev. Lett.*, **74** (1995) 4137.

[7] B. Holdom, *Phys. Lett.*, **B339** (1994) 114.
[8] Z. Xiao, L. Wan, G. Lu *et al.*, *J. Phys.*, **G20** (1994) 901.

Radiative Corrections to the $Zb\bar{b}$ and $Z\tau^+\tau^-$ Vertices in a Realistic One-Family Extended Technicolor Model

Yue Chongxing[1] Kuang Yuping[2] Lu Gongru[1]
1 (*Physics Department, Henan Normal University, Xin Xiang* 453002)
2 (*Institute of Modern Physics, Tsinghua University, Beijing*, 100084)

Received 24 November 1995

Abstract

In a realistic effective one-family extended technicolor (ETC) model without exact custodial symmetry, we calculate the one-loop corrections to the $Zb\bar{b}$ and $Z\tau^+\tau^-$ vertices from the sideways and diagonal ETC gauge boson exchange. The results show that both the $Z\rightarrow b\bar{b}$ partial width Γ_b and branching ratio R_b and the τ polarization asymmetry parameter $A\tau$ are enhanced by the corrections and are in agreement with the present experimental data.

Key words one-loop corrections, decay width Γ_b, branching ratio R_b, polarization asymmetry parameter $A\tau$