

# t 夸克圈对 TC 理论的中性 PG 玻色子反常耦合的影响

岳崇兴 鲁公儒

(河南师范大学物理系 新乡 453002)

1993-10-12 收稿

## 摘 要

推出了 TC 理论的中性 PG 玻色子与规范玻色子 ( $Z, \gamma, g$ ) 的总耦合拉氏量, 计算了 t 夸克圈对中性 PG 玻色子衰变宽度的影响. 结果表明 t 夸克圈能有效地增加反常耦合强度, 为在实验上寻找 PG 玻色子提供了理论依据.

**关键词** t 夸克圈, 规范玻色子, 反常耦合强度, 衰变宽度.

## 1 引 言

TC (Technicolor) 理论<sup>[1]</sup>是弱电对称性破缺机制的一个重要候选者. 与 QCD 类似, TC 理论预言在其能标  $\Lambda_{TC}$  下存在大量的哥尔斯通粒子, 其中三个产生了  $W^\pm, Z^0$  质量, 其余成为物理的 PG (Pseudo Goldstone) 玻色子, 其数目与 TC 理论的整体手征对称性有关, 如对于一代 Farhi-Susskind (F-S) 模型<sup>[2]</sup>, 其规范群为  $SU(4)$ , 整体手征对称性为  $SU(8)_L \times SU(8)_R$ , 通过 TC 费米凝聚产生了 60 个物理 PG 玻色子.

TC 理论提出之后, 人们就想方设法检验其正确性, 尤其最近人们讨论了 TC 理论对弱电可观测量的间接影响<sup>[3]</sup>, 不过弱电精确测量不能做为检验 TC 理论的唯一方法, 直接探测 TC 理论预言的粒子 (矢量介子、PG 玻色子) 仍是一个非常重要的方法<sup>[4]</sup>. t 夸克是标准模型预言的一个特殊粒子, 它的存在会对高能区域的物理产生一定的影响. 本文就是讨论 t 夸克圈对 TC 理论的中性 PG 玻色子与规范玻色子 ( $Z, \gamma, g$ ) 反常耦合的影响, 相信这些讨论对检验 TC 理论正确与否有所帮助.

第二部分给出了不考虑 t 夸克圈影响时中性 PG 玻色子与规范玻色子的反常耦合拉氏量, 并计算了有关衰变宽度; 在第三部分, 推出了考虑 t 夸克圈影响时, 中性 PG 玻色子的总反常耦合拉氏量; 最后对结果进行了讨论.

## 2 中性 PG 玻色子的反常耦合

中性 PG 玻色子与规范玻色子的耦合完全由 TC 相互作用决定, 可以由 Wess-Zumino 拉氏量给出; 有效拉氏量为<sup>[5]</sup>:

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} = & -\frac{\sqrt{3}N_T}{48\pi^2 F_T} \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \{2e^2[2(\partial_\mu A_\nu)(\partial_\rho A_\sigma) + (\text{ctg}\theta - 3\text{tg}\theta) \\
& \cdot (\partial_\mu Z_\nu)(\partial_\rho A_\sigma) + (\text{tg}^2\theta - 1) \cdot (\partial_\mu Z_\nu)(\partial_\rho Z_\sigma)]P^{03} \\
& + \frac{4}{3} e^2[2\text{tg}\theta(\partial_\mu Z_\nu)(\partial_\rho A_\sigma) - (\partial_\mu A_\nu)(\partial_\rho A_\sigma) \\
& - \text{tg}^2\theta(\partial_\mu Z_\nu)(\partial_\rho Z_\sigma)]P^0 + g_s^2(\partial_\mu G_\nu^a)(\partial_\rho G_\sigma^a)P^0 \\
& + \sqrt{6} g_s e[2(\partial_\mu A_\nu)(\partial_\rho G_\sigma^a) + (\text{ctg}\theta - \text{tg}\theta)(\partial_\mu G_\nu^a)(\partial_\rho Z_\sigma)]P^{03} \\
& + \frac{2}{\sqrt{6}} g_s e[2(\partial_\mu A_\nu)(\partial_\rho G_\sigma^a) - 2\text{tg}\theta(\partial_\mu G_\nu^a)(\partial_\rho Z_\sigma)]P^0 \\
& + 2\sqrt{6} g_s^2 d_{abc}(\partial_\mu G_\nu^a)(\partial_\rho G_\sigma^b)P^0 \tag{1}
\end{aligned}$$

$N_T$  为 TC 理论的规范群指标,  $F_T$  为中性 PG 玻色子的衰变常数  $F_T = 124\text{GeV}$ ,  $\theta$  是 Weinberg 角,  $P^0$ 、 $P^{03}$  分别为色单态同位旋单态、同位旋三重态的中性 PG 玻色子,  $P_1^0$ 、 $P_3^0$  分别为色八重态同位旋单态、同位旋三重态的中性 PG 玻色子, 方程(1)给出了色单态、色八重态的中性 PG 玻色子的所有反常耦合顶角, 通过简单计算不难得到 PG 玻色子的衰变、产生宽度.

$$\begin{aligned}
\Gamma_1^0(P^{03} \rightarrow \gamma\gamma) &= 9\Gamma^0(P^0 \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{\alpha^2}{3\pi^3} \frac{m_P^3}{F_T^2} \left(\frac{N_T}{4}\right) \\
&= 2.7 \times 10^{-6} \left(\frac{N_T}{4}\right)^2 \text{GeV} \tag{2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Gamma^0(Z^0 \rightarrow P^{03}\gamma) &= \frac{\alpha^2(1 - 4\sin^2\theta)^2}{36\pi^3 \sin^2\theta \cos^2\theta} \left(\frac{N_T}{4}\right)^2 \frac{(m_Z^2 - m_P^2)^3}{F_T^2 m_Z^3} \\
&= 7.0 \times 10^{-8} \left(\frac{N_T}{4}\right)^2 \text{GeV} \tag{3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Gamma^0(Z^0 \rightarrow P^0\gamma) &= \frac{4\alpha^2 \text{tg}^2\theta}{81\pi^3} \left(\frac{N_T}{4}\right)^2 \frac{(m_Z^2 - m_P^2)^3}{F_T^2 m_Z^3} \\
&= 7.8 \times 10^{-7} \left(\frac{N_T}{4}\right)^2 \text{GeV} \tag{4}
\end{aligned}$$

$$\Gamma_1^0(P^0 \rightarrow gg) = \frac{\alpha_s^2}{6\pi^3} \left(\frac{N_T}{4}\right)^2 \frac{m_P^3}{F_T^2} = 2.24 \times 10^{-4} \left(\frac{N_T}{4}\right)^2 \text{GeV} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
\Gamma_3^0(P_3^0 \rightarrow g\gamma) &= 9\Gamma(P_1^0 \rightarrow g\gamma) = \frac{\alpha_s \alpha}{4\pi^3} \left(\frac{N_T}{4}\right)^2 \frac{m_{P_1}^3}{F_T^2} \\
&= 5.64 \times 10^{-3} \left(\frac{N_T}{4}\right)^2 \text{GeV} \tag{6}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Gamma_4^0(P_1^0 \rightarrow gg) &= \frac{5\alpha_s^2}{24\pi^3} \left(\frac{N_T}{4}\right)^2 \frac{m_{P_1}^3}{F_T^2} \\
&= 6.05 \times 10^{-2} \left(\frac{N_T}{4}\right)^2 \text{GeV} \tag{7}
\end{aligned}$$

在上述计算中,已取  $\alpha_t = \frac{g_t^2}{4\pi} = 0.1$ ,  $\sin^2\theta = 0.226$ ,  $m_Z = 92.6\text{GeV}$ . 色单态 PG 玻色

子质量  $m_p = 40\text{GeV}$ , 色八重态  $m_{p_8} = 240\text{GeV}$ . 精细结构常数  $\alpha = \frac{1}{128.8}$ .

由此可知,对于反常耦合 PG 玻色子  $P^{03}$  的主要衰变道为  $\gamma\gamma$ ,  $P^0$  的主要衰变道为  $gg$ ,  $P_a^0$  的主要衰变道为  $gg$ ,  $P^{03}$  的主要衰变道为  $g\gamma$ , 因此在下面的讨论中,只考虑 t 夸克圈对过程  $P^{03} \rightarrow \gamma\gamma, P^0(P_a^0) \rightarrow gg, P_a^0 \rightarrow g\gamma$  的影响.

### 3 中性 PG 玻色子总的反常耦合有效拉氏量

ETC 理论<sup>[6]</sup>不仅使夸克、轻子获得质量,也对 PG 玻色子的质量有贡献,TC 费米子与普通费米子之间通过 ETC 的规范玻色子发生作用,这种作用非常复杂,并且与模型有关,不过人们一般认为该作用与普通费米子质量成正比.对于中性 PG 玻色子与 t 夸克的作用,取 Eills 模型<sup>[7]</sup>,有关拉氏量为:

$$\mathcal{L}_t = -\frac{1}{2F_T} \sum_t \left\{ \frac{1}{\sqrt{3}} [P^0 \bar{q}_t m_t i\gamma_5 q_t + P^{03} \bar{q}_t m_t i\gamma_5 \tau_3 q_t] + \sqrt{2} [P_a^0 \bar{q}_t m_t i\gamma_5 \lambda^a q_t + P_a^{03} \bar{q}_t m_t i\gamma_5 \lambda^a \tau_3 q_t] \right\} \quad (8)$$

$\lambda^a$  是 Gell-Mann 矩阵,  $\tau_3$  是 Pauli 矩阵的第三分量,  $q_t$  为夸克场.

中性 PG 玻色子通过 t 夸克圈与规范玻色子的耦合如图 1 所示.由方程(1)可知耦合振幅为:

$$T^{\mu\nu} = \frac{im_t}{2F_T} \mathcal{A} I^{\mu\nu} \quad (9)$$

$$I^{\mu\nu} = \int \frac{d^4q}{(2\pi)^4} \frac{N^{\mu\nu}}{\Delta} \quad (10)$$

$$N^{\mu\nu} = \text{Tr}[\gamma^\mu(\gamma \cdot q + m_t)\gamma_5(\gamma \cdot K_1 + \gamma \cdot K_2 + \gamma \cdot q + m_t)\gamma^\nu(\gamma \cdot K_1 + \gamma \cdot q + m_t)] = 4im_t \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} K_{1\rho} K_{2\sigma} \quad (11)$$

$$\int \frac{d^4q}{(2\pi)^4} \cdot \frac{1}{\Delta} = \int \frac{d^4q}{(2\pi)^4} \{ (q^2 - m_t^2) [(K_1 + K_2 + q)^2 - m_t^2] [(K_1 + q)^2 - m_t^2] \}^{-1} \\ = -\frac{i}{32\pi^2} \cdot \frac{1}{m_p^2} \int_0^1 dx \frac{1}{x(x-1)} \ln \left[ 1 - \frac{m_p^2}{m_t^2} (1-x)x \right] \quad (12)$$

所以

$$I^{\mu\nu} = -\frac{m_t}{8\pi^2 m_p^2} \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} K_{1\rho} K_{2\sigma} \int_0^1 \frac{dx}{x(1-x)} \ln \left[ 1 - \frac{m_p^2}{m_t^2} (1-x)x \right] \\ = -\frac{1}{8\pi^2 m_t} J(R) \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} K_{1\rho} K_{2\sigma} \quad (13)$$

$$J(R) = -\frac{1}{R^2} \int_0^1 \frac{dx}{x(1-x)} \ln [1 - R^2 x(1-x)] \quad (14)$$

其中  $R = m_p/m_t$ ,  $J(R)$  满足  $\lim_{R \rightarrow 0} J(R) = 1$ ,  $\lim_{R \rightarrow \infty} J(R) = 0$ ,  $R = 2$  时,  $J(R)$  取最大值,  $[J(R)]_{\max} = 2.46^{[8]}$ .

$$\mathcal{A} = Kg_1g_2[x_a\{x_b, x_c\}] \quad (15)$$

$K$  为数值系数, 由方程(8)知, 对于  $P^0, P^{03}$ ,  $K$  为  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ; 对于  $P_a^0, P_a^{03}$ ,  $K$  取  $\sqrt{2}$ ,  $g_1, g_2$  为耦合常数,  $x_a, x_b, x_c$  分别为中性 PG 玻色子、规范玻色子 ( $Z, \gamma, g$ ) 生成元; 对于过程  $P^{03} \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $\mathcal{A} = \frac{16e^2}{3\sqrt{3}}$ ; 过程  $P^0 \rightarrow gg$ ,  $\mathcal{A} = \frac{g_s^2}{2\sqrt{3}}$ ;  $P_a^0 \rightarrow gg$ ,  $\mathcal{A} = \sqrt{2} g_s^2 d_{abc}$  以及过程  $P_a^{03} \rightarrow g\gamma$ ,  $\mathcal{A} = \sqrt{2} eg_s$ .

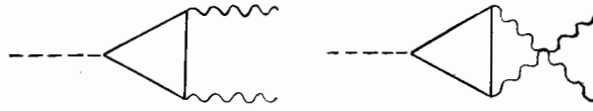


图1 PG 玻色子通过  $t$  夸克圈与规范玻色子耦合的费曼图

由方程(1)、(9)、(13)以及(15)可以得到考虑  $t$  夸克圈影响后, 中性 PG 玻色子的总有效拉氏量相关部分:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_t = & \frac{\sqrt{3} N_T}{48\pi^2 F_T} \left\{ 4e^2 \left[ 1 + \frac{4}{3N_T} J(R) \right] (\partial_\mu A_\nu)(\partial_\rho A_\sigma) P^{03} \right. \\ & + \left[ 1 + \frac{J(R)}{2N_T} \right] \cdot [g_s^2 (\partial_\mu G_\nu^a)(\partial_\rho G_\sigma^a) P^0 + 2\sqrt{6} g_s^2 d_{abc} \\ & \left. \cdot (\partial_\mu G_\nu^a)(\partial_\rho G_\sigma^b) P_a^0 + 2\sqrt{6} g_s e (\partial_\mu A_\nu)(\partial_\rho G_\sigma^a) P_a^{03}] \right\} \quad (16) \end{aligned}$$

考虑  $t$  夸克圈的影响后,  $P^{03}, P^0, P_a^0, P_a^{03}$  衰变宽度分别为:

$$\Gamma_1(P^{03} \rightarrow \gamma\gamma) = \Gamma_1^0(P^{03} \rightarrow \gamma\gamma) \left[ 1 + \frac{4}{3N_T} J(R) \right]^2 \quad (17)$$

$$\Gamma_2(P^0 \rightarrow gg) = \Gamma_2^0(P^0 \rightarrow gg) \left[ 1 + \frac{J(R)}{2N_T} \right]^2 \quad (18)$$

$$\Gamma_3(P_a^{03} \rightarrow g\gamma) = \Gamma_3^0(P_a^{03} \rightarrow g\gamma) \left[ 1 + \frac{J(R)}{2N_T} \right]^2 \quad (19)$$

$$\Gamma_4(P_a^0 \rightarrow gg) = \Gamma_4^0(P_a^0 \rightarrow gg) \left[ 1 + \frac{J(R)}{2N_T} \right]^2 \quad (20)$$

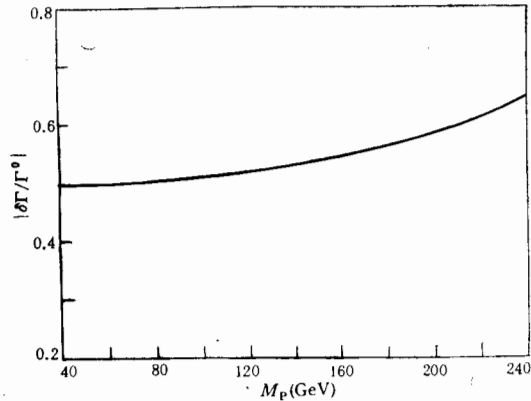
## 4 结果与讨论

由方程(17)–(20)可得:

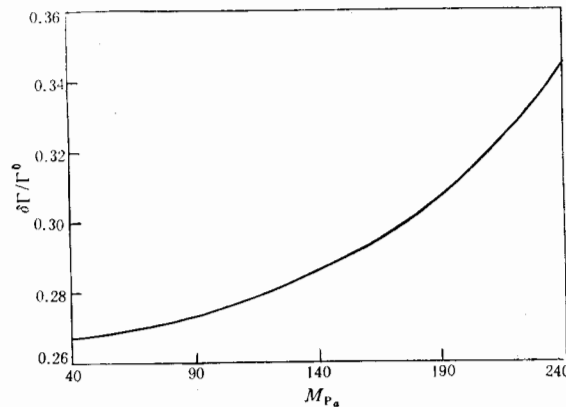
$$\frac{\delta\Gamma_1}{\Gamma_1^0} = \frac{8}{3N_T} J(R) + \frac{16}{9N_T^2} J^2(R) \quad (21)$$

$$\frac{\delta\Gamma_2}{\Gamma_2^0} = \frac{\delta\Gamma_3}{\Gamma_3^0} = \frac{\delta\Gamma_4}{\Gamma_4^0} = \frac{1}{N} J(R) + \frac{1}{4N_T^2} J^2(R) \quad (22)$$

取  $m_t = 160\text{GeV}$ ,  $N_T = 6$ , 宽度  $\Gamma_1(P^{03} \rightarrow \gamma\gamma)$  随  $m_p$  的变化曲线如图 2 所示, 从图可见  $m_p$  取值在  $40\text{--}100\text{GeV}$  范围时,  $\Gamma_1^0(P^{03} \rightarrow \gamma\gamma)$ , 增加 50%, 即  $\Gamma_1(P^{03} \rightarrow \gamma\gamma) = 9 \times 10^{-6}\text{GeV}$ , 若  $m_p = 240\text{GeV}$ , 宽度增加约为 66%。对于  $P_a^0, P_a^{03}$ , 若取  $m_t = 160\text{GeV}, N_T = 4$ , 由方程(22)可得到如图 3 所示的  $\Gamma(P_a^0 \rightarrow gg)$  和  $\Gamma(P_a^{03} \rightarrow g\gamma)$ , 随  $m_{p_a}$  值变化的曲线, 显然若  $m_{p_a}$  取值在  $40\text{--}240\text{GeV}$  范围, 则宽度增加量为 27%~37%。对于  $P_a^0 \rightarrow gg$ , 若取  $m_{p_a} = 240\text{GeV}$ ,  $\Gamma(P_a^0 \rightarrow gg) = 8.29 \times 10^{-2}\text{GeV}$ 。若取  $m_{p_a} = 320\text{GeV}, R = 2$ ,  $J(R)$  取最大值 2.46, 宽度增加到 0.2 GeV。

图 2 过程  $P^{03} \rightarrow \gamma\gamma$  的衰变宽度随  $m_p$  的变化曲线

总之, t 夸克圈增加了中性 PG 玻色子与规范玻色子反常耦合强度, 使中性 PG 玻色子的衰变宽度增加, 压缩了中性 PG 玻色子衰变到普通费米子对的分支比<sup>[9,10]</sup>, 为在实验上 (HERA 或 SSC) 寻找中性 PG 玻色子提供了理论依据。

图 3 过程  $P_a^0 \rightarrow gg, P_a^{03} \rightarrow g\gamma$  的衰变宽度随  $m_{p_a}$  的变化曲线

## 参 考 文 献

- [1] S. Weinberg, *Phys. Rev.*, **D19**(1979) 1277; L. Susskind, *Phys. Rev.*, **D20**(1979) 2619.
- [2] E. Farhi, L. Susskind, *Phys. Rev.*, **D20**(1979) 3404.
- [3] M. Golden, L. Randall, *Nucl. Phys.*, **B361**(1991) 3; B. Holdom, J. Terning, *Phys. Lett.*, **B247**(1990) 88; M. E. Peskin, T. Takeuchi, *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990) 964; *Phys. Rev.*, **D46**(1992) 381.
- [4] M. A. Luty, R. Sundrum, *Phys. Rev. Lett.*, **70**(1993) 529.
- [5] S. Dimopoulos, S. Raby, G. Kane, *Nucl. Phys.*, **B182**(1981) 77.

- [6] S. Dimopoulos, L. Susskind, *Nucl. Phys.*, **B155**(1979) 237; E. Eichten, K. Lane, *Phys. Lett.*, **90B** (1980) 125.
- [7] J. Eills et al., *Nucl. Phys.*, **B182**(1981) 529.
- [8] D. Slaven, Binlin Young, Xinmin Zhang, *Phys. Rev.*, **D45**(1992) 4349.
- [9] Chong Xingyue, Xue Leiwang, Gong Rulu, *J. Phys. G: Part. Phys.*, **19**(1993) 821.
- [10] Chong Xingyue, Gong Rulu, Jine Minyang, *Mod. Phys. Lett.*, **A8**(1993) 2843.

## Top-loop Correction to TC Neutral PG Boson Anomaly Coupling

Yue Chongxing    Lu Gongru

(Physics Department, Henan Normal University, Xin Xiang 453002)

Received 12 October 1993

### Abstract

The total effective lagrangian of the gauge boson couplings to the neutral PG (Pseudo-Goldstone) boson in technicolor models is developed. The effect of t-quark loop on the anomaly coupling is computed. Such effect significantly changes the coupling strength. The result is in favor of the detection of the neutral PG bosons.

**Key words** top quark loop, gauge boson, anomaly coupling strength, decay width.