

# PG 玻色子 $P_a^0$ 在 Tevatron 上的 可能物理迹象

岳崇兴 鲁公儒

(河南师范大学物理系 新乡 453002)

1996-02-26 收稿

## 摘 要

在 Topcolor-Assisted Technicolor 框架下, 计算了多标度 WTC 模型的中性色八重态 PG 玻色子  $P_a^0$  对 top 夸克产生截面的修正, 结果表明  $P_a^0$  可以增大 Tevatron 上 top 夸克的产生截面.

**关键词** 中性 PG 玻色子, 产生截面, 衰变宽度.

CDF 与 DO 实验组已分别发现了 top 夸克<sup>[1]</sup>. CDF 实验组给出 top 夸克质量为  $m_t = 176 \pm 8 \pm 10 \text{ GeV}$ , 产生截面  $\sigma_t = 7.6^{+34}_{-20} \text{ pb}$ , DO 实验组测量结果为  $m_t = 199^{+19}_{-21} \pm 22 \text{ GeV}$ ,  $\sigma_t = 6.4 \pm 2.2 \text{ pb}$ . 显然 top 夸克的质量与弱电对称性破缺标度  $(\sqrt{2} G_F)^{-\frac{1}{2}} = 246 \text{ GeV}$  非常接近, top 夸克的产生与弱电对称性破缺有密切的关系. 因此, 在理论上对 Tevatron 上 top 夸克的产生进行研究是探测新物理可能迹象的有效途径.

Holdom 和 Ramana<sup>[2]</sup> 计算了传统 TC 模型预言的中性色八重态矢量介子  $\rho_a^0$  对 Tevatron 上 top 夸克产生截面的修正, 并进一步讨论了此新粒子的可能物理迹象; 在 Topcolor 模型框架下, Hill 和 Pake<sup>[3]</sup> 用有效拉氏量方法讨论了 Topcolor 玻色子对 top 夸克产生截面的修正, 给出了 top 夸克产生截面  $\sigma_t$  随玻子质量变化的曲线; Eichten 和 Lane<sup>[4]</sup> 证明了多标度 WTC (Walking Technicolor) 模型<sup>[5]</sup> 预言的中性色八重态 PG 玻色子可以增加  $gg \rightarrow t\bar{t}$  过程的 top 夸克产生截面.

传统的 TC 模型很难同时满足精确测量所给出的各种限制: (1) 产生足够大的 top 夸克质量; (2) 对弱电参数  $S$ ,  $T$  产生较小的贡献; (3) 能够自然地解释过程  $Z \rightarrow b\bar{b}$  分支比  $R_b$  的实验值与标准模型预言值的偏差. 因此, 第三代夸克引入 Topcolor 相互作用是非常必要的. 人们把 Topcolor 与 Technicolor 结合在一起而提出的新理论称之为 Topcolor-Assisted Technicolor (TC2)<sup>[6]</sup>. 此理论的主要思想为弱电对称性破缺主要由 TC 相互作用引起, 轻夸克和轻子的质量仍有 ETC (Extended Technicolor) 作用产生, top 夸克的质量主要由 Topcolor 作用产生. TC2 理论的优点为产生了足够大的 top 夸克质量, 解释了分支比  $R_b$  实验测量值与标准模型预言值的偏差, 同时又压低了 TC 理论对弱电参数的贡献.

文献[4]仅考虑了 TC 费米子圈产生的  $P_a^0$  与胶子的耦合, 进而计算了 PG 玻色子  $P_a^0$  对  $gg \rightarrow t\bar{t}$  过程的贡献. 实际上 top 夸克圈产生的  $P_a^0$  与胶子的耦合亦不能忽略. 本文在 TC2 框架下, 在考虑 top 夸克圈对过程  $P_a^0 \rightarrow gg$  产生修正的基础上, 讨论了中性色八重态 PG 玻色子  $P_a^0$  的各种可能衰变道, 并进一步计算了  $gg \rightarrow P_a^0 \rightarrow t\bar{t}$  过程的 top 夸克产生截面. 这为在高能对撞机实验 Tevatron 上探测新物理提供了理论预言.

TC 理论的费米子与普通费米子通过 ETC 规范玻色子发生耦合, 这种耦合非常复杂, 与具体的 ETC 模型有关. 不过, 人们一般认为此耦合的强度与  $\frac{m'_f}{F}$  成正比. 其中  $F$  为 PG 玻色子的衰变常数,  $m'_f$  为 ETC 相互作用产生的普通费米子质量, 对于传统的 TC 模型  $m'_f$  与普通费米子的实际质量  $m_f$  相等, TC2 模型一般有  $m'_f \leq m_f$ . PG 玻色子与普通费米子对的耦合振幅为:

$$-B_{\text{Pff}} \left( \frac{m'_f}{F\sqrt{n/2}} \right) P(\bar{f} i\gamma^5 \lambda^a f). \quad (1)$$

$n$  为味手征群的维数,  $B_{\text{Pff}}$  是与 ETC 模型有关数量级为 1 的常数, 在下面的计算中取  $B_{\text{Pff}}=1$ .

多标度 WTC 模型<sup>[5]</sup> 是为压低味改变中性流, 产生合适的普通费米子质量谱提出的. 此模型的色单态 TC 费米子双重态  $\psi$  属于规范群  $SU(N_{\text{TC}})$  的高维表示, 主要引起弱电对称性破缺, 其束缚态  $\bar{\psi}\psi$  组成的 TC 介子衰变常数  $F_\psi=220-235\text{GeV}$  属于规范群  $SU(N_{\text{TC}})$  基本表示的 TC 夸克  $Q$ , TC 轻子  $L$  双重态产生 PG 玻色子, 其衰变常数为  $F=F_Q=F_L=30-50\text{GeV}$ . 文献[5]已详细计算了色八重态 PG 玻色子质量, 其取值范围为  $300-600\text{GeV}$ . 若取中性色八重态 PG 玻色子  $P_a^0$  的质量为  $400\text{GeV}$ , 衰变常数  $F_Q=40\text{GeV}$ , 则在 Topcolor-Assisted Technicolor 框架下,  $P_a^0$  衰变到普通费米子的主要衰变道为:  $P_a^0 \rightarrow t\bar{t}$ ,  $P_a^0 \rightarrow b\bar{b}$ , 衰变宽度为:

$$\Gamma'_t(P_a^0 \rightarrow t\bar{t}) = \frac{3}{16\pi} \frac{m'_t{}^2}{F_Q^2} M_p \sqrt{1 - \frac{4m'_t{}^2}{M_p^2}} \approx 18\text{GeV}, \quad (2)$$

$$\Gamma'_b(P_a^0 \rightarrow b\bar{b}) = \frac{3}{16\pi} \frac{m_b}{F_Q} M_p \sqrt{1 - \frac{4m_b^2}{M_p^2}} \approx 0.344\text{GeV}, \quad (3)$$

在上述估计中, 取  $m'_t=50\text{GeV}$ ,  $m_t=175\text{GeV}$ ,  $m_b=4.8\text{GeV}$ .

中性 PG 玻色子与规范玻色子 ( $g, Z, \gamma$ ) 的耦合由 TC 相关作用决定, 其耦合的具体形式由 Wess-Zumino 拉氏量给出.  $P_a^0$  与规范玻色子 ( $g, Z, \gamma$ ) 相互作用的有效拉氏量为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{WZ}} = & -\frac{\sqrt{2} N_{\text{TC}}}{24\pi^2 F_Q} \{ g_s e [(\partial_\mu A_\nu)(\partial_\rho G_\sigma^a) - \text{tg}\theta(\partial_\mu G_\nu^a)(\partial_\rho Z_\sigma)] \\ & P_a^0 - 3g_s^2 d_{abc}(\partial_\mu G_\nu^a)(\partial_\rho G_\sigma^b) P_a^0 \}, \end{aligned} \quad (4)$$

从(4)式不难看出, 中性色八重态 PG 玻色子  $P_a^0$  衰变到规范玻色子的主要衰变道为  $P_a^0 \rightarrow gg$ , 其衰变宽度为:

$$\Gamma'_g(P_a^0 \rightarrow gg) = \frac{5\alpha_s^2 N_{\text{TC}}^2 M_p^2}{384\pi^3 F_Q^2} = 2.65\text{GeV}. \quad (5)$$

(5) 式给出的  $P_a^0 \rightarrow gg$  衰变宽度仅考虑了 TC 费米子圈所产生的  $P_a^0$  与胶子的反常耦合, 实际上  $P_a^0$  也可以通过普通费米子圈与胶子发生相互作用, 此类相互作用的存在对  $P_a^0 \rightarrow gg$  过程的衰变宽度产生有意义的修正<sup>[7]</sup>. 通过单圈图推导, 不难得到  $P_a^0$  通过 top 夸克圈与胶子耦合的有效拉氏量:

$$\mathcal{L}_t = -\frac{\sqrt{2}\alpha_s}{4\pi F_Q} J(R) d_{abc} (\partial_\mu G_\nu^a) (\partial_\rho G_\sigma^b) P_a^0, \quad (6)$$

$$J(R) = -\frac{m_f'}{m_f} \cdot \frac{1}{R^2} \int_0^1 \frac{dx}{x(1-x)} \ln[1 - R^2 x(1-x)], \quad (7)$$

其中  $R = \frac{M_p}{m_f}$ ,  $J(R)$  满足  $\lim_{R \rightarrow 0} \ln J(R) = 1$ ,  $\lim_{R \rightarrow \infty} \ln J(R) = 0$ ,  $R=2$  时  $J(R)$  取最大值, 所有的轻夸克、轻子质量  $m_f (f \neq \text{top}) \ll 200\text{GeV}$ , 因此它们对  $P_a^0 \rightarrow gg$  过程的贡献可以略去, 在以下的计算中, 仅考虑 top 夸克的贡献.

从(4)式和(5)式不难写出过程  $P_a^0 \rightarrow gg$  的总衰变宽度:

$$\Gamma'_{g, \text{total}}(P_a^0 \rightarrow gg) = \Gamma'(P_a^0 \rightarrow gg) \left| 1 + \frac{J(R)}{2N_{\text{TC}}} \right|^2, \quad (8)$$

$$\frac{\delta\Gamma}{\Gamma'} = \frac{\text{Re}J(R)}{N_{\text{TC}}} + \frac{|J(R)|^2}{4N_{\text{TC}}^2}, \quad (9)$$

从(7)式和(9)式不难算出, 当  $M_p=400\text{GeV}$  时, top 夸克圈增加  $P_a^0 \rightarrow gg$  衰变宽度  $\frac{\delta\Gamma_g}{\Gamma'_g} \approx 11\%$ , 当  $M_p=500\text{GeV}$  时,  $\frac{\delta\Gamma_g}{\Gamma'_g} \approx 6\%$ .

在 Tevatron 上 top 夸克主要通过夸克与反夸克的湮没和胶子与胶子的碰撞产生的.

$$q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}, \quad gg \rightarrow t\bar{t}, \quad (10)$$

显然中性色八重态 PG 玻色子  $P_a^0$  通过  $gg \rightarrow P_a^0 \rightarrow t\bar{t}$  过程对 top 夸克的产生截面有贡献, 此过程的 Feynman 图如下所示:

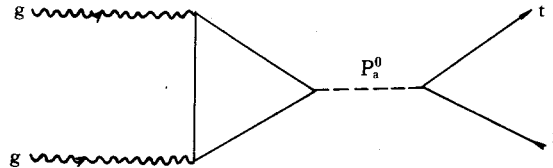


图1 过程  $gg \rightarrow P_a^0 \rightarrow t\bar{t}$  的费曼图

其中单圈为 TC 费米子或 top 夸克.

此过程的产生截面计算公式为<sup>[4]</sup>:

$$\sigma(pp \rightarrow P_a^0 \rightarrow t\bar{t}) = \frac{\pi^2}{2s} \frac{\Gamma'_{g, \text{total}} \Gamma'_t(P_a^0 \rightarrow t\bar{t})}{M_{P_a} \Gamma_{\text{total}}} \int_{-Y_B}^{Y_B} dy_B Z_0 f_g^{(p)}(\sqrt{\tau} e^{y_B}) f_g^{(p)}(\sqrt{\tau} e^{-y_B}), \quad (11)$$

其中  $f_g^{(p)}$  是胶子的分布函数,  $\tau = M_{P_a}^2/s$ ,  $y_B$  是过程  $gg \rightarrow P_a^0 \rightarrow t\bar{t}$  的 Boost Rapidity.

文献[4]讨论了多标度 WTC 模型的中性色八重态 PG 玻色子  $P_a^0$  对 Tevatron 上产生 top 夸克的贡献, 给出了  $P_a^0$  的质量取不同值时  $gg \rightarrow P_a^0 \rightarrow t\bar{t}$  产生截面, 不过文章中并没有引入 Topcolor 相互作用, 且仅考虑了 TC 费米子圈的贡献. 本文在 TC2 模型框架下, 既考虑了 TC 费米子圈的贡献, 又考虑了 top 夸克圈的贡献, 给出了  $M_{P_a}$  取不同值时的  $gg \rightarrow P_a^0 \rightarrow t\bar{t}$  的产生截面, 具体计算结果如表 1 所示:

表 1

$M_p$	$\Gamma'_i$	$\Gamma_i$	$\Gamma'_{g, total}$	$\Gamma'_g$	$\sigma'_i$	$\sigma_i$
400	18	73	2.9	2.65	4.45	3.63
450	26	108	3.8	3.55	2.07	1.78
500	33	136	4.9	4.64	0.94	0.92

在上表中  $\Gamma'$ 、 $\sigma'$  表示本文的结果,  $\Gamma$ 、 $\sigma$  表示文献[4]的结果, 质量、衰变宽度单位为 GeV, 产生截面的单位为 pb. 在给出 top 夸克产生截面数值时未考虑 QCD 的辐射修正效应.

总之, 第三代夸克引入 topcolor 相互作用压低了  $P_a^0 \rightarrow t\bar{t}$  过程的衰变宽度, top 夸克圈增加了  $P_a^0 \rightarrow gg$  过程的衰变宽度, 其总效应增大了中性色八重态 PG 玻色子  $P_a^0$  对 Tevatron 上产生 top 夸克的贡献, 这无疑有利于在 Tevatron 上探测新物理的可能迹象.

## 参 考 文 献

- [1] F. Abe *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995)2626; S. Abachi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995)2632.
- [2] B. Holdom, M. V. Ramana, *Phys. Lett.*, **B353**(1995)295.
- [3] C. T. Hill, S. Pake, *Phys. Rev.*, **D49**(1994)4454.
- [4] E. Eichten, K. Lane, *Phys. Lett.*, **B327**(1994)129.
- [5] K. Lane, M. V. Ramana, *Phys. Rev.*, **D44**(1991)2678.
- [6] C. T. Hill, *Phys. Lett.*, **B345**(1995)483; K. Lane, E. Eichten, *Phys. Lett.*, **B352**(1995)382.
- [7] Chongxing Yue, Xuelei Wang, Gongru Lu, *J. Phys.*, **G19**(1993)821.

## Signatures of Neutral PG Boson $P_a^0$ at the Tevatron

Yue Chongxing    Lu Gongru

(*Physics Department of Henan Normal University, Xinxiang 453002*)

Received 26 February 1996

### Abstract

In topcolor-assisted technicolor scheme, we calculate the correction of the neutral color octet PG boson  $P_a^0$  to top quark production at the Tevatron. The result is that the PG boson  $P_a^0$  can significantly enhance the top quark production cross section.

**Key words** neutral PG boson, production cross section, decay width.