

## 快报

# 双 Higgs 粒子二重态和 $t\bar{t}$ 的 $p$ 态分裂

丁亦兵

(中国科技大学研究生院, 北京)

秦旦华

(北京大学物理系)

赵光达

(中国高等科学技术中心(世界实验室), 北京大学物理系)

### 摘 要

双 Higgs 粒子二重态的存在会使  $t\bar{t}$  体系的  $1p$  和  $2p$  态能级分裂值发生变化, 分裂值之比  $R$  明显减小. 精细测量这些量可以提供鉴别 Higgs 粒子存在的一种可能性.

由于标准模型中的关键角色——Higgs 粒子至今未能在实验中找到, 扩充和改进这一模型的尝试仍吸引着众多的物理学家. 人们提出了许多种理论猜测, 预言 Higgs 粒子的二重态可能至少有两个. 它们由两个带电和两个中性的 Higgs 粒子所组成. 真空期待值相应的也有两个值. 这类模型有很多重要推论引起人们的关注. 一些作者如 G. Athanasiu、J. Frazini 和 J. Gilman 曾详细地讨论了双 Higgs 二重态模型对  $t\bar{t}$  谱的影响<sup>[1]</sup>. 他们指出, 如果假定两个中性 Higgs 粒子质量相等, 则通过交换这些中性标量粒子, 在  $t\bar{t}$  系统的非相对论势中将引入一项 Yukawa 吸引势:

$$V_H(r) = - \left[ \left( \frac{\xi}{\eta} \right) \frac{g m_t}{2M_W} \right]^2 \cdot \frac{1}{2\pi r} e^{-rM_H} \quad (1)$$

其中,  $\eta$  和  $\xi$  分别是与带有  $\frac{2}{3}$  和  $-\frac{1}{3}$  电荷的夸克相耦合的 Higgs 场的真空期待值,  $M_H$ 、 $M_W$  和  $m_t$  分别为 Higgs 粒子、矢量玻色子  $W$  以及  $t$  夸克的质量,  $g$  为标准电弱相互作用耦合常数. 从  $K_S^0-K_L^0$  质量差以及  $B^0-\bar{B}^0$  介子混合的实验数据可以求得对各参量之间关系的一些限制. 在  $M_H$  不是太大的情况下,  $\xi/\eta$  约为  $5\sim 10$ . 与此相应, 势  $V_H(r)$  对  $t\bar{t}$  系统的  $s$  态和  $p$  态能级以及零点波函数值会产生可观测的影响.

但不幸的是, 除了使  $2s$  态和  $1p$  态能级反转的这种特殊情况外, 在绝大多数情况下, Higgs 粒子对  $t\bar{t}$  能级造成的移动, 也可以通过适当改变不存在 Higgs 粒子时的  $t\bar{t}$  位势

\* 国家自然科学基金资助课题.  
本文 1989 年 8 月 9 日收到.

的形式或参数来实现。也就是说,单从  $1s$ 、 $1p$  和  $2s$  能级的移动,很难对是否存在 Higgs 粒子交换做出判定。

造成这一情况的原因在于,在最低阶非相对论近似下,交换标量 Higgs 粒子的 Yukawa 耦合,可以看做屏蔽库仑势,它与矢量胶子交换的库仑势部分迭加起来,总的效果相当于使库仑势的耦合常数增强,成为一种新的库仑势形式,即为  $-\frac{\tilde{\alpha}}{r}$ ,其中

$$\tilde{\alpha} = \frac{4}{3} \alpha_s + \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{gm_t}{2M_W} \right]^2 \left[ \frac{5}{\eta} \right]^2 e^{-M_H r} \quad (2)$$

式中第一项来自单胶子交换( $\alpha_s$  是夸克-胶子强耦合常数),第二项来自 Higgs 粒子交换。因此,引入 Higgs 粒子交换的效果,在某种程度上,等价于不引入 Higgs 粒子而选取一个较大的  $\alpha_s$ 。

怎样才能对 Higgs 粒子交换的存在做出更明确的判断呢? 我们认为,关键在于标量 Higgs 粒子的交换与矢量胶子的交换具有不同的 Lorentz 变换性质。尽管在最低阶非相对论近似下两者的贡献类似,都给出与自旋无关的吸引势,但对一阶相对论修正的自旋相关势的贡献,两者却表现出完全相反的行为。通过考查自旋相关势对  $t\bar{t}$  谱的影响,将使我们有可能从原则上判断 Higgs 粒子交换是否存在。

夸克之间的强相互作用位势包括标量禁闭势和矢量胶子交换势,如果还存在标量 Higgs 粒子交换势,则总位势为这三者之和。利用标准级化方法可以求得,在  $O\left(\frac{v^2}{c^2}\right)$  一级近似下,  $t\bar{t}$  系统的哈密量为<sup>[2]</sup>:

$$H = H_0 + H_1 \quad (3)$$

$$H_0 = \frac{\mathbf{p}^2}{m} + S + V \quad (4)$$

$$H_1 = -\frac{\mathbf{p}^4}{4m} + V_{SD} + V_{SI} \quad (5)$$

$$V_{SD} = \frac{1}{2m^2} \left( \frac{3}{r} V' - \frac{1}{r} S' \right) (\mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2) \cdot \mathbf{L} + \frac{2}{3m^2} \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2 \nabla^2 V - \frac{1}{3m^2} [3(\mathbf{S}_1 \cdot \hat{r})(\mathbf{S}_2 \cdot \hat{r}) - (\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2)] \left( V'' - \frac{1}{r} V' \right) \quad (6)$$

$$V_{SI} = \frac{1}{4m^2} \left\{ [\mathbf{p}^2(V - rV')] + 2(V - rV')\mathbf{p}^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{8}{r} V' + V'' - rV''' \right) + \frac{2}{r} VL^2 \right\} - \frac{1}{4m^2} \left\{ 2[\mathbf{p}^2, S] + 4S\mathbf{p}^2 + \frac{2}{r} S' + S'' \right\} \quad (7)$$

其中  $V$  为矢量交换势,  $S$  为标量交换势。我们主要关心(6)式中的自旋轨道耦合项。标量交换势与矢量交换势对这一项的贡献,符号相反。而在不考虑相对论修正时,它们对总位势的贡献是同号的。尽管相对论修正对于重夸克体系会很小,但只要实验达到足够高的精度,把零级结果与一级修正结果对照分析,有可能提供一种与势选取无关的方法,鉴别 Higgs 粒子的存在。

基于上述考虑,用我们以前采用的单参量位势<sup>[2]</sup>:

$$V(r) = -\frac{8\pi}{33-2n_f} \frac{1}{\ln \Lambda r} \frac{1-\Lambda r}{1+\Lambda r} \cdot \frac{1}{r} \quad (8)$$

$$S(r) = \frac{8\pi}{33-2n_f} \Lambda r^2 + V_H(r) \quad (9)$$

我们计算了  $t\bar{t}$  系统的  $1p$  态和  $2p$  态能级分裂. 其中  $\Lambda$  为 QCD 标度参量, 由  $c\bar{c}$  和  $b\bar{b}$  谱的符合, 取为  $470\text{MeV}$ .  $n_f$  为夸克味数, 取为 4.  $V_H(r)$  中  $\xi/\eta$  和  $M_H$  均采用文 [1] 中给出的值.  $m_t = 60\text{GeV}$ , 求得的结果列在表 1 中.

从表 1 中所列数据可见, 考虑了 Higgs 粒子交换的贡献后, 能级分裂值之比  $R$  明显下降. 且对于相同的  $M_H$ ,  $\xi/\eta$  越大,  $R$  下降越多; 对相同的  $\xi/\eta$ ,  $M_H$  越小, 下降越多. 这个结果不难从理论上理解.

如所周知<sup>[3]</sup>:

$$R = \frac{M(^3p_2) - M(^3p_1)}{M(^3p_1) - M(^3p_0)} \quad (10)$$

若令

$$a = \frac{1}{2m^2} \left\langle \frac{3}{r} V' - \frac{1}{r} S' \right\rangle \quad (11)$$

$$b = \frac{1}{12m^2} \left\langle \frac{1}{r} V' - V'' \right\rangle \quad (12)$$

则对于  $1p$  态, 有

$$R = \frac{2a - \frac{12}{5}b}{a + 6b} \quad (13)$$

计算  $R$  对  $a$  的微商,

$$\frac{dR}{da} = \frac{72}{5} \frac{b}{(a+6b)^2} \quad (14)$$

对于类库仑势有  $b > 0$ , 故

$$\frac{dR}{da} > 0 \quad (15)$$

由于  $S$  中增加的标量 Yukawa 势  $V_H(r)$ , 对  $a$  的贡献是使  $a$  减小, 故标量 Higgs 粒子的加入必然使  $R$  值下降. 又因为  $V_H(r)$  的绝对值正比于  $\left(\frac{\xi}{\eta}\right)^2$ , 且随  $M_H$  的增加而减小, 这正定性地解释了表 1 中所示的  $R$  随  $\xi/\eta$  和  $M_H$  的变化关系. 对于  $2p$  态也有类似的结果.

但由于分裂值的移动只有  $n$  个 MeV, 所以对实验的精度提出了很高的要求. 一旦观测技术达到了这样高的水平, Higgs 粒子的鉴别将成为可能.

特别要指出的是, 如果实验上观察到的  $(E_{1p} - E_{1s})/(E_{2s} - E_{1s})$  接近于一, 则实际上会预示着两种可能性. 一种是跑动的耦合常数  $\alpha_s$  加上 Higgs 粒子的交换, 它属于表 1 所示的数据范围. 这里  $m_t = 60\text{GeV}$ ,  $\alpha_s$  取跑动耦合常数形式. 表中的质量与能量单位均为 GeV. 另一种可能性是如文 [1] 曾指出的, 库仑势的耦合常数  $\alpha_s$  不具有渐近自由

表 1  $t\bar{t}$  系统  $1p$  和  $2p$  态分裂随  $\xi/\eta$  和  $M_H$  的变化关系

$M_H$	$\xi/\eta$	$E_{2_1} - E_{1_1}$	$E_{2_1} - E_{1p}$	$E_{1p_1} - E_{1p_0}$	$R_{1p}$	$E_{2p_1} - E_{2p_0}$	$R_{2p}$
0	0	0.8384	-0.0653	0.0080	0.841	0.0040	0.837
5	4	1.2866	0.0124	0.0084	0.799	0.0062	0.779
10	6	1.5873	-0.0165	0.0065	0.781	0.0044	0.724
10	8	2.4088	-0.1090	0.0060	0.727	0.0034	0.626
20	6	1.2585	0.0090	0.0086	0.815	0.0061	0.762
20	10	2.5213	-0.1452	0.0081	0.763	0.0048	0.648
20	14	6.9405	-0.3965	0.0077	0.674	0.0037	0.630
40	8	1.1933	0.0154	0.0094	0.802	0.0057	0.766

表 2  $t\bar{t}$  系统  $1p$  和  $2p$  态分裂随  $\xi/\eta$  和  $M_H$  的变化关系

$M_H$	$\xi/\eta$	$E_{2_1} - E_{1_1}$	$E_{2_1} - E_{1p}$	$E_{1p_1} - E_{1p_0}$	$R_{1p}$	$E_{2p_1} - E_{2p_0}$	$R_{2p}$
5	4	1.2458	0.0243	0.0109	0.772	0.0144	0.770
10	3	1.0448	0.0586	0.0166	0.787	0.0087	0.785
20	10	2.3229	-0.1242	0.0166	0.754	0.0117	0.714
20	14	6.6360	-0.3672	0.0164	0.712	0.0083	0.696
40	8	1.1322	0.0292	0.0198	0.706	0.0132	0.764

性质,而是取一个比较大的固定值。对于这后一种情况,我们也进行了一些定量的计算。按照我们在文[2]中的做法,取  $\alpha_s = 0.38$ ,其它参数不变,计算了相应的  $p$  态分裂值,结果如表 2 所示。我们发现,这后一种可能性相应的  $p$  态分裂值约为前者的一倍, ( $E_{1p_1} - E_{1p_0}$ ) 大约可达到 30MeV。因此测量  $p$  态分裂值将有助于澄清这一点。

## 参 考 文 献

- [1] G. Athanasiu, J. Franzini and J. Gilman, *Phys. Rev.*, **D32**(1985), 3010.  
 [2] Yibing Ding, Ju He, Shenou Cai, Danhua Qin, and Kuangta Chao (Zao Guangda), in Proceedings of the International Symposium On Particle and Nuclear Physics, Beijing, China, 1985, edited by Hu Ning and Wu Chong-shi (Worle Scientific 1986), P. 88.  
 [3] O. Dib, J. Gilman and J. Franzini *Phys. Rev.*, **D37**(1988), 735.

## TWO-HIGGS-DOUBLET MODELS AND SPLITTINGS OF $t\bar{t}$ $p$ -STATES

DING YIBING

*(Graduate School of Academia Sinica, Beijing)*

QIN DANHUA

*(Physics Department of Peking University)*

ZHAO GUANGDA

*(CCAST (World laboratory) Physics Department of Peking University)*

### ABSTRACT

The existence of two Higgs-doublets will alter the splittings of  $1p$  and  $2p$   $t\bar{t}$  states and reduce the ratios of the splittings  $R$ . Careful measurement of them will be helpful to clarify the existence of Higgs particle.