

SU(8)的TC大统一模型

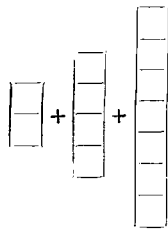
陆继宗 李新洲

(上海师范学院) (复旦大学)

本文构造了一个带有人工色的大统一模型,其统一规范群是SU(8)。在通常的能量标度下,它与现有实验基本一致,它的强作用部分等同于QCD,弱电部分的规范群是 $SU(3) \otimes U(1)$ 。在高能时,强作用对称性是 $SU_c(5)$,带人工色的粒子预言了新的物理效应。

一、引言

现代物理的一个重要任务是要从各种不同的相互作用中,找出更为简单的基本规律。从目前的实验要求夸克和轻子具有相同的时空结构(类点状的,自旋为 $\frac{1}{2}$)来看,可以把它们看作属于一个基本费米子的多重态⁽¹⁾⁽²⁾。这些就是大统一思想的基本出发点。在所有大统一理论中最小的一个方案是Georgi和Glashow⁽³⁾的SU(5)模型。SU(5)模型的统一质量是在 $M_x \sim 10^{14}$ Gev的能量标度上⁽⁴⁾,这就产生了所谓大沙漠(the grand plateau)问题⁽⁵⁾。最近,Goldman和Ross试图利用人工色(Technicolour,以下简称TC)理论来解决这个问题⁽⁶⁾。SU(5)模型的最简单的人工色扩充显然是SU(7)模型,但在SU(7)模型中需要选择



才能把费米子合理填充⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

$SU(5) \supset SU_c(3) \otimes [SU(2) \times U(1)]_{EW}$, 它的弱电部分事实上就是 Weinberg—Salam 模型。另一方面,由于三 μ 事件等实验结果⁽⁹⁾, B. Lee 和 Weinberg⁽¹⁰⁾, Langacker 和 Segrè⁽¹¹⁾等人提出了 $SU(3) \otimes U(1)$ 弱电统一模型。由此构成大统一模型的最小选择应是 $SU(6) \supset SU_c(3) \otimes [SU(3) \otimes U(1)]_{EW}$ 。但是根据重整化群的计算可知,在此模型中强耦合常数和弱电耦合常数随着能量增加时的变化率是差不多的,因而它的统一质量将远远超过 10^{14} Gev的能量标度,甚至可能永远不能达到。我们发现如果选用带TC的SU(8)大统一模型,就可以解决这个问题,统一质量仍在 $M_x \sim 10^{14}$ Gev标度上;另外在我们这个模型中费米子的填充显得特别简单,它只需选择 $\mathbb{1}$ 表示。

下面我们首先给出费米子的填充,然后讨论规范玻色子的填充和规范层次(gauge hierarchy)问题,最后将它的一些理论上预言的结果与实验进行比较。

本文1980年9月15日收到

二、基本费米子填充

我们选取 8 维空间的矢量分量, 它的前二个分量是 TC 分量, 中间三个代表颜色分量, 最后三个代表弱电分量。考虑 $SU(8)$ 的完全反对称的 28 维表示, 它在 $SU_{TC}(2) \otimes SU(6)$ 子群分解下为

$$28 = (1, 15) + (2, 6) + (1, 1) \quad (1)$$

其中 $(1, 15)$ 表示在子空间 $SU_{TC}(2) \otimes SU_C(3) \times [SU(3) \otimes U(1)]_{EW}$ 下又可分解为

$$(1, 15) = (1, 1, \bar{3}) + (1, \bar{3}, 1) + (1, 3, 3) \quad (2)$$

根据 B. Lee 和 Weinberg^[6] 的 $SU(3) \otimes U(1)$ 模型使用的夸克和轻子的符号, e 族含有轻子 $(e^-, E^-, \nu_e; E^0)$, 带 $\frac{2}{3}$ 电荷的夸克 (t_i, u_i) , 带 $-\frac{1}{3}$ 电荷的夸克 (d_i, b_i) 。 μ 族含有轻子 $(\mu^-, M^-, \nu_\mu; M)$, 带 $\frac{2}{3}$ 电荷的夸克 (g_i, c_i) , 带 $-\frac{1}{3}$ 电荷的夸克 (s_i, h_i) 。同样可以引入 τ 族粒子, ……。其中 $i = R, Y, B$ 代表颜色指标。可将每一族粒子填充在一个左手 28 重态和一个右手 28 重态中, 例如对于 e 族粒子的填充为

$$L_e = \begin{pmatrix} 0 & \bar{\nu}_e & -P_R & -P_r & -P_B & -J^0 & -J^- & -j^- \\ -\bar{\nu}_e & 0 & -Q_R & -Q_r & -Q_B & -L^0 & -L^- & -l^- \\ P_R & Q_R & 0 & E_B & E_r & -u_R & -d_R & -b_R \\ P_r & Q_r & -E_B & 0 & E_R & -u_r & -d_r & -b_r \\ P_B & Q_B & -E_r & -E_R & 0 & -u_B & -d_B & -b_B \\ J^0 & L^0 & u_R & u_r & u_B & 0 & -e^+ & -E^+ \\ J^- & L^- & d_R & d_r & d_B & e^+ & 0 & -\bar{E}^0 \\ j^- & l^- & b_R & b_r & b_B & E^+ & \bar{E}^0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_e = \begin{pmatrix} 0 & \bar{E}^0 & -P_R & -P_r & -P_B & -\nu_j & -j^- & -J^- \\ -\bar{E}^0 & 0 & -Q_R & -Q_r & -Q_B & -\nu_l & -l^- & -L^- \\ P_R & Q_R & 0 & \bar{u}_B & \bar{u}_r & -t_R & -b_R & -d_R \\ P_r & Q_r & -\bar{u}_B & 0 & \bar{u}_R & -t_r & -b_r & -d_r \\ P_B & Q_B & -\bar{u}_r & -\bar{u}_R & 0 & -t_B & -b_B & -d_B \\ \nu_j & \nu_l & t_R & t_r & t_B & 0 & -E^+ & -e^+ \\ j^- & l^- & b_R & b_r & b_B & E^+ & 0 & -\bar{\nu}_e \\ J^- & L^- & d_R & d_r & d_B & e^+ & \bar{\nu}_e & 0 \end{pmatrix}$$

其中 $P_i, Q_i (i = R, Y, B)$; J^0, J^-, j^-, ν_j 和 L^0, L^-, l^-, ν_l 是带有 TC 的费米子, 它们在 $SU_{TC}(2) \otimes SU(6)$ 下填充在 $(2, 6)$ 表示中。除了 TC 量子数以外, TC 夸克与普通夸克, TC 轻子与普通轻子所带的其他量子数均分别相同。

三、对称破缺和规范玻色子

在能量非常高时，SU(8)是一个很好的对称性，这时弱电、强(颜色)、TC相互作用都统一起来了，但在低能时对称性破缺。在此模型中，我们选取规范层次破缺链为

$$\begin{aligned}
 &SU(8) \\
 &\quad \downarrow M_x \\
 &[SU(3) \otimes U(1)]_{EW} \otimes SU_s(5) \\
 &\quad \downarrow M_{TC} \\
 &[SU(3) \otimes U(1)]_{EW} \otimes SU_c(3) \otimes SU_{TC}(2) \\
 &\quad \downarrow M_W \\
 &U(1) \otimes SU_c(3) \otimes SU_{TC}(2)
 \end{aligned}$$

SU(8)的63个规范玻色子可以分成如下六种类型

- (1) 8个色胶子
- (2) 9个弱电玻色子(其中包括光子 A_μ 和两个对角的中性矢介子)
- (3) 30个X玻色子。它们对应于与6、7、8分量相关的生成元，改变SU(3)_{EW}和色以及SU(3)_{EW}和人工色之间的指标。具体引入破缺机制后它们的质量是超重的($\sim 10^{16}$ GeV)。
- (4) 3个TC胶子，相应于3个SU_{TC}(2)生成元，由于SU_{TC}(2)没有破缺，因此它们是无质量的。
- (5) 12个B玻色子，对应于与第3、4、5分量相关的生成元。它们传递颜色态和TC态之间的相互作用。
- (6) B'玻色子是对应于与超荷正交的对角生成元。

B玻色子、色胶子和TC胶子以及B'和超荷的线性组合构成了SU_s(5)。SU_s(5)破缺使B和B'获得重质量。

为了使规范粒子获得所需要的质量，我们选取三个63维的Higgs多重态。在下面讨论中A, B, C, a, b, c, 和d等都是常数，且满足要求 $A, B \gg C \gg a, b, c, d$ 。具体破缺分三次进行，第一步，令63维表示的Higgs多重态 Φ_j^i 具有真空期待值

$$(\Phi_j^i) = \begin{pmatrix} A & & & & & & & & \\ & A & & & & & & & \\ & & A & & & & & & \\ & & & A & & & & & \\ & & & & A & & & & \\ & & & & & -B & & & \\ & & & & & & -B & & \\ & & & & & & & -B & \\ & & & & & & & & -B \end{pmatrix}$$

其中 $5A + 3B = 0$ 。使30个X玻色子获得起重质量。

第二步，要求第二个63维Higgs多重态 φ_j^i 的真空期待值为

$$(\varphi_j^i) = \begin{pmatrix} C & & & & & & \\ & -C & & & & & 0 \\ & & 0 & & & & \\ & & & 0 & & & \\ & & & & 0 & & \\ 0 & & & & & 0 & \\ & & & & & & 0 \\ & & & & & & & 0 \end{pmatrix}$$

使12个B玻色子获得相同的质量,同时也使B'变成有质量的。

第三步,要求第三个63维Higgs多重态 ψ_j^i 的真空期待值为

$$(\psi_j^i) = \begin{pmatrix} 0 & & & & & & \\ & 0 & & & & & 0 \\ & & 0 & & & & \\ & & & 0 & & & \\ & & & & 0 & & \\ 0 & & & & & c & 0 & C \\ & & & & & 0 & d & b \\ & & & & & 0 & a & d \end{pmatrix}$$

其中 $c+2d=0$,这就破缺 $SU_w(3)$ 使得弱玻色子获得质量,而保持光子没有质量。

四、一些应用

(1) 轻夸克和轻子质量

在Dimopoulos和Susskind^[12]最先的工作中已讨论了利用TC获得轻夸克和轻子质量的问题。轻夸克 q 和轻子 l 可以通过TC夸克 Q 发射B玻色子获得质量(图1(a)(b))。同时轻子 l 从TC轻子耦合中获得质量(图1(c))。图中的×号是标记凝结使手征态混合。

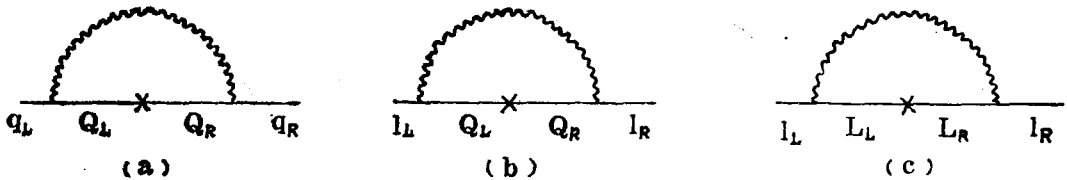


图 1

通过这些图可以估计轻夸克 q 和轻子 l 所获得的质量

$$m_q \propto \frac{g_5^2}{8\pi^2} \frac{1}{M_B^2} \int_0^{M_Q} \frac{d^4 l}{l^2 + m_Q^2} m_Q \sim \frac{g_5^2}{8\pi^2} \frac{m_Q^3}{M_B^2}$$

其中 g_5 是在100TeV标度时 $SU_5(5)$ 的耦合常数。

(2) 中性流和荷电流总截面之比 R^{ν} 与 R^e 之计算

中性流和荷电流总截面之比 R^{ν} 、 R^e 的定义如下

$$R^{\nu} \equiv \frac{\sigma(\nu N \rightarrow \nu X)}{\sigma(\nu N \rightarrow \mu X)}$$

$$R^e \equiv \frac{\sigma(e^+ N \rightarrow e^+ X)}{\sigma(e^+ N \rightarrow \mu^+ X)}$$

假设海夸克分布是 $SU(3)$ 对称的,可以利用Parton模型计算 R^{ν} 和 R^e 的值。海夸克和价夸

克贡献比定义为

$$\varepsilon = \frac{\int x(\bar{u}(x) + \bar{d}(x)) dx}{\int x(u(x) + d(x) - \bar{u}(x) - \bar{d}(x)) dx}$$

其中 $u(x)$, $\bar{u}(x)$, $d(x)$ 和 $\bar{d}(x)$ 是夸克分布函数。一般地选择 $\varepsilon = 0.06^{[13]}$, 中性流中有效偶合常数选取为

$$\alpha_{u_L} = 0.6 \pm 0.2$$

$$\alpha_{d_L} = -0.8 \pm 0.1$$

$$\alpha_{u_R} = \pm 0.45 \pm 0.15$$

$$\alpha_{d_R} = 0 \pm 0.3$$

$$T_s = \frac{4}{3} \{ (\alpha_{u_L})^2 + (\alpha_{u_R})^2 + (\alpha_{d_L})^2 + (\alpha_{d_R})^2 + (\alpha_{s_L})^2 + (\alpha_{s_R})^2 \}$$

$$R^v = \frac{(\alpha_{u_L})^2 + \frac{1}{3}(\alpha_{u_R})^2 + (\alpha_{d_L})^2 + \frac{1}{3}(\alpha_{d_R})^2 + \varepsilon T_s}{4(1 + (7/3)\varepsilon)} \approx 0.28$$

$$R^s = \frac{(\alpha_{u_R})^2 + \frac{1}{3}(\alpha_{u_L})^2 + (\alpha_{d_R})^2 + \frac{1}{3}(\alpha_{d_L})^2 + \varepsilon T_s}{4(1/3 + (7/3)\varepsilon)} \approx 0.38$$

这与CERN—GGM实验值 $R^v = 0.026 \pm 0.04$, $R^s = 0.39 \pm 0.06$ 基本一致^[14]

(3) $\mu \rightarrow e\gamma$

如果 $m_w \approx 100 \text{ GeV}$, 则 E° , M° 和 T° 的质量为 4 GeV , 这样计算得 $\mu \rightarrow e\gamma$ 的分支比的上限是 1.4×10^{-10} , 这与实验符合很好。

(4) 三 μ 事例

通过反应过程 $\nu_\mu d \rightarrow M^- t$, 在 $\nu_\mu N$ 碰撞中能产生 M^- , 而 $\mu^- \mu^- \mu^+$ 三 μ 事例, 可以用下面一种衰变链得到

$$M^- \rightarrow \nu_\mu \bar{M}^\circ \mu^-$$

$$\bar{M}^\circ \rightarrow \mu^+ \tau^- \bar{T}^\circ$$

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

$$M^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu M^\circ \mu^-$$

$$M^\circ \rightarrow \mu^- \mu^+ E^\circ$$

这些衰变链所得三 μ 事例的分支比约为 1.2×10^{-3} , 这和Fermilab的 $\nu_\mu N$ 碰撞实验相符^[9]。

参 考 文 献

- [1] F. Gürsey and P. Sikivie, Phys. Rev. Lett. 36 775(1976)
- [2] J. C. Pati and A. Salam, Phys. Rev. D8 1240(1973)
- [3] H. Georgi and S. L. Glashow, Phys. Rev. Lett. 32 438(1974)
- [4] H. Georgi and H. Quinn and S. Weinberg, Phys. Rev. 33 451(1974)

- [5] H. Georgi, Nucl. Phys. B156 126(1979)
- [6] T. Goldman and D. A. Ross, Nucl. Phys. B162 102(1980)
- [7] E. Corrigan and P. Ramond CALT-68-728(1979)
- [8] L. Susskind, Stanford Univerity Report ITP 626(1979)
- [9] A. Benvenuti et al., Phys. Rev. Lett 38 1110(1977)
B. C. Barish et al., Phys. Rev. Lett 38 577(1977)
- [10] B. W. Lee and S. Weinberg, Phys Rev. Lett 38 1237(1977)
- [11] P. Langacker and G. Segré, Phs. Rev. Lett 39 259(1977)
- [12] S. Dimopoulos and L. Susskind, Nucl. Phys. B155 237(1979)
- [13] V. Barger et al., Nucl. Phys. B102 439(1976)
- [14] J. Blietschan et al., Nucl.Phys. B118 218(1977)

absract

In this paper we suggest a grand unified model with technicolours. Its unifying gauge group is $SU(8)$. Under usual energy scale, it is in conformity with the present experiment results. The strong interaction part is equal to QCD and the electro-weak gauge group is $SU(3) \otimes U(1)$. The strong interaction symmetry is $SU_c(5)$ at high energy and we can predict some new physics effects from the technicolour particles.