

# 只带一种基本标量粒子的 轻子-夸克复合模型

杨新娥

(天津大学)

## 摘 要

我们提出一个包括两种基本费米子和一种基本标量粒子的轻子-夸克复合模型。其中,基本费米子无质量并且不带色,基本标量粒子是色的三重态。 $SU(3)_H$  定域规范作用将基本粒子束缚成轻子、夸克和弱玻色子等复合粒子。轻子是由三个基本费米子组成的三体复合粒子,夸克由一个基本费米子和一个基本标量粒子组成。本模型基本粒子的数目较少,存在为数不多的 exotic 粒子。解释了轻子-夸克的对称性。弱作用是超色单态之间的一种短距剩余作用,它只在复合层次出现。通过动力学对称破缺破坏了宇称守恒。

1. 根据目前存在着较多轻子和夸克以及它们的性质具有一定规律之事实,许多人提出了各种不同的轻子-夸克复合模型<sup>[1-3]</sup>。一类模型的基本粒子都是自旋为 1/2 的费米子,另一类模型除了费米子之外还包括有基本标量粒子。这些模型存在的一个普遍问题就是基本粒子的数目偏多以及出现许多不需要的 exotic 粒子的情况。为此,我们尝试构造一个更简单一些的复合模型。在该模型中,只要较少的基本粒子就能组成我们所需要的轻子和夸克,而且能够解释现存的一些实验事实,模型中出现的 exotic 粒子的数目较少。

我们的模型比通常的标量粒子模型少引进一个基本标量粒子。采用  $SU(3)_H$  群作为基本理论的超色规范群。基本费米子不带色。由于规范场论在描写弱电和强相互作用方面的成功,所以我们也采用非阿贝尔规范场论作为模型的基本动力学理论。假设存在一种超强的禁闭力将基本粒子束缚成轻子和夸克,并称这种力为超色力,具有  $SU(3)_H$  对称性,其动力学记为 QHD。在能标  $\Lambda_H (\sim 1\text{TeV})$ , 超色力变强。基本粒子是超色禁闭的。复合轻子、夸克和弱玻色子是超色单态。基本 Lagrangian 的定域规范群是  $SU(3)_H \times SU(3)_c$ ,  $SU(3)_c$  为通常的色群。整体超味群是  $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_Y$ 。各基本粒子的量子数见表 1。

表中  $I_{3L}$  和  $I_{3R}$  分别是  $SU(2)_L$  和  $SU(2)_R$  生成元的第三分量。Y 为  $U(1)_Y$  量子数。

2. 第一代复合轻子和夸克的组成如下:

$$\begin{pmatrix} \nu_c \\ e^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{f}_u \bar{f}_d \bar{f}_d \\ \bar{f}_u \bar{f}_u \bar{f}_d \end{pmatrix}_1$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_u & \varphi \\ f_d & \varphi \end{pmatrix}_3,$$

表 1

基本粒子	$SU(3)_H$	$SU(3)_c$	$I_{3L}$	$I_{3R}$	Y	自旋
$f_{uL}$	$\frac{3}{-}$	$\frac{1}{-}$	1/2	0	1/3	1/2
$f_{dL}$	$\frac{3}{-}$	$\frac{1}{-}$	-1/2	0	1/3	1/2
$\varphi$	$\frac{3^*}{-}$	$\frac{3}{-}$	0	0	0	0
$f_{uR}$	$\frac{3}{-}$	$\frac{1}{-}$	0	1/2	1/3	1/2
$f_{dR}$	$\frac{3}{-}$	$\frac{1}{-}$	0	-1/2	1/3	1/2

其中,下指标 1 和 3 分别表示色单态和色三重态.电荷公式为

$$Q = I_{3L} + I_{3R} + Y/2,$$

轻子和夸克的这种组成是唯一的,因为  $f_u$  和  $f_d$  无色,  $\varphi$  是色三重态,所以在构成上述复合夸克和轻子时,不会伴随着出现任何带色轻子和其它色多重态的夸克,这就大大减少了模型可能出现的 exotic 粒子.我们比一般的含标量粒子的复合模型少引进一个基本标量粒子,这将使模型的基本粒子数目减少,因此,轻子必须用三个费米子  $f$  来组成.

对于模型可能出现的另一类  $I_{3L}$  (或  $I_{3R}$ ) 为 3/2 的“轻子 exotic”态  $f_u f_u f_u (Q = +2)$  和  $f_d f_d f_d (Q = +1)$ ,由轻子波函数对称性的讨论,可知它们并不存在,其理由如下:

已知轻子由三个费米子  $f$  组成,应用泡里原理于亚层次,该费米子系统的波函数应该是全反对称波函数.如果我们假定该系统的空间基态波函数为  $s$  波,即对称波函数,超色部分是反对称的,那么,剩下的超味群和洛仑兹群相应的波函数应当是对称波函数<sup>[3]</sup>.

令

$$f_L \equiv \begin{pmatrix} f_u \\ f_d \end{pmatrix}_L, \quad f_R \equiv \begin{pmatrix} f_u \\ f_d \end{pmatrix}_R.$$

已知  $f_L$  和  $f_R$  填在超味群  $SU(2)_L \times SU(2)_R$  和洛仑兹群  $SL(2, C)$  [用  $SU(2)'_L \times SU(2)'_R$  代表]的基本表示:

$$SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes SU(2)'_L \otimes SU(2)'_R \equiv G_{FL},$$

$$\begin{array}{cccc} f_L & \square & \bullet & \square & \bullet \\ f_R & \bullet & \square & \bullet & \square \end{array}$$

其中,“ $\bullet$ ”代表标量表示.三费米子复合系统的全对称态(左手态部分)在  $G_{FL}$  下用杨图  $\boxed{L|L|L}$  或  $\boxed{L|R|R}$  描写.

下面,以左手态为例进行讨论,其结果对右手态  $\boxed{R|R|R}$  和  $\boxed{R|L|L}$  同样成立.

$\boxed{L|L|L}$  按  $SU(2)_L \otimes SU(2)_R$  和  $SU(2)'_L \otimes SU(2)'_R$  的直积分解如下:

$$\begin{aligned} \boxed{L|L|L} &= (\boxed{L|L|L}, \bullet) \otimes (\boxed{L|L|L}, \bullet) \\ &+ \left( \begin{array}{c} \boxed{L|L} \\ \underline{L} \end{array}, \bullet \right) \otimes \left( \begin{array}{c} \boxed{L|L} \\ \underline{L} \end{array}, \bullet \right) + \left( \begin{array}{c} \underline{L} \\ \boxed{L} \end{array}, \bullet \right) \otimes \left( \begin{array}{c} \underline{L} \\ \boxed{L} \end{array}, \bullet \right) \end{aligned}$$

$$\rightarrow \left( \begin{array}{|c|c|} \hline L & L \\ \hline \hline L & \\ \hline \end{array}, \bullet \right) \otimes \left( \begin{array}{|c|} \hline L \\ \hline \end{array}, \bullet \right)$$

如果把  $SU(2)_L$  看作是弱同位旋群, 那么, 同位旋取 3/2 与自旋取 3/2 就必须同时出现. 由 Weinberg-Witten 定理<sup>[6]</sup>可知自旋为 3/2 的  $fff$  不可能存在, 所以, 本模型不出现同位旋为 3/2 的  $f_u f_u f_u$  和  $f_d f_d f_d$ , 相应的右手态也不出现.

对于  $f_L f_R f_R$ , 可作同样的分解:

$$\begin{aligned} \left[ \begin{array}{|c|c|c|} \hline L & R & R \\ \hline \hline L & & \\ \hline \end{array} \right] &= \left( \begin{array}{|c|} \hline L \\ \hline \end{array}, \begin{array}{|c|} \hline R \\ \hline R \\ \hline \end{array} \right) \otimes \left( \begin{array}{|c|} \hline L \\ \hline \end{array}, \bullet \right) + \left( \begin{array}{|c|c|} \hline L & R \\ \hline \hline R & R \\ \hline \end{array} \right) \otimes \left( \begin{array}{|c|} \hline L \\ \hline \end{array}, \begin{array}{|c|} \hline R \\ \hline R \\ \hline \end{array} \right) \\ &\rightarrow \left( \begin{array}{|c|} \hline L \\ \hline \end{array}, \begin{array}{|c|} \hline R \\ \hline R \\ \hline \end{array} \right) \otimes \left( \begin{array}{|c|} \hline L \\ \hline \end{array}, \bullet \right) \end{aligned}$$

在上面的分解中, 同样也不出现  $f_u f_u f_u$  和  $f_d f_d f_d$ .

综上所述, 可得结论如下:

轻子  $fff$  态可以填充而且满足费米统计的多重态在  $SU(2)_L \times SU(2)_R$  中的表示为

$$\begin{aligned} &\left( \begin{array}{|c|c|} \hline L & L \\ \hline \hline L & \\ \hline \end{array}, \bullet \right) & \left( \bullet, \begin{array}{|c|c|} \hline R & R \\ \hline \hline R & \\ \hline \end{array} \right) \\ &\left( \begin{array}{|c|} \hline L \\ \hline \end{array}, \begin{array}{|c|} \hline R \\ \hline R \\ \hline \end{array} \right) & \left( \begin{array}{|c|} \hline L \\ \hline \end{array}, \begin{array}{|c|} \hline R \\ \hline \end{array} \right) \end{aligned}$$

以上多重态的自旋和同位旋都是 1/2;

同位旋 3/2 的  $f_u f_u f_u$ ,  $f_d f_d f_d$  在本模型中是不存在的, 不会成为 exotic 粒子而出现.

另外一类粒子, 例如  $\varphi\bar{\varphi}$ ,  $\varphi\varphi\varphi$  等  $SU(3)_H$  单态粒子, 因为基本标量粒子  $\varphi$  很重, 所以这些 exotic 粒子要比普通夸克和轻子重得多.

3. 在两个超色单态, 例如轻子和轻子之间, 会出现一种复杂的短距剩余作用, 它反映了两个复合体内各成份之间的超色相互作用. 我们把这种等效作用看作是低能弱作用, 类似于强作用是色力的剩余等效作用.

我们已经知道, 色单态强子之间的强作用通过有质量的色单态介子  $\pi$ 、 $\rho$  和  $\varphi$  等传递. 强子有结构, 这些介子也是有结构的复合粒子. 可以作同样的类比, 我们假定轻子、夸克之间交换有质量的弱玻色子. 本模型把它们也看作是由同一组基本粒子  $f_u$  和  $f_d$  组成的复合粒子. 它们的组成如下:

$$\begin{aligned} W_{L\mu}^+ &= \bar{f}_{dL}\gamma_\mu f_{uL}, & W_{R\mu}^+ &= \bar{f}_{dR}\gamma_\mu f_{uR}, \\ W_{L\mu}^- &= \bar{f}_{uL}\gamma_\mu f_{dL}, & W_{R\mu}^- &= \bar{f}_{uR}\gamma_\mu f_{dR}, \\ W_{L\mu}^3 &= 1/\sqrt{2}(\bar{f}_{uL}\gamma_\mu f_{uL} - \bar{f}_{dL}\gamma_\mu f_{dL}), \\ W_{R\mu}^3 &= 1/\sqrt{2}(\bar{f}_{uR}\gamma_\mu f_{uR} - \bar{f}_{dR}\gamma_\mu f_{dR}). \end{aligned}$$

以上两组玻色子分别对应于左手和右手同位旋  $SU(2)_L \times SU(2)_R$  矢量. 同位旋标量玻色子

$$W^0 = 1/\sqrt{2}(\bar{f}_u\gamma_\mu f_u + \bar{f}_d\gamma_\mu f_d),$$

的质量比  $W^3$  要大得多(因为  $W^0$  可以湮灭为一对超色胶子). 所以, 在低能弱作用中, 只考虑  $W^3$  对弱中性流相互作用的贡献.

关于低能问题,我们接受 'tHooft 和 Veltman 的猜测: 当复合粒子的大小比其康普顿(Compton)波长小得很多时,亚层次的拉瓦量 $\mathcal{L}$ 将产生出一个复合层次的可重整的 $\mathcal{L}_{\text{eff}}$ ,它是一个定域的等效的低能的拉格朗日量,包括了夸克,轻子和 $SU(2)_L \times SU(2)_R$ 玻色子. 可重整性意味着 $\mathcal{L}_{\text{eff}}$ 是一个具有左-右对称的破缺的定域 $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)$ 规范不变的拉氏量. 在破缺之前, $W_{L,R}^{\pm}, W_{L,R}^3$ 被看作是具有 $V \mp A$ 耦合的低能的无质量规范玻色子. 最后,可以按文献[7]的方法破缺到 $SU(2)_L \times U(1)$ 理论.

一些弱作用过程可以用组元(基本费米子和基本标量粒子)交换图象表示(见图1). 质子在组元交换的图象下是不能衰变的,这点与 Harari 一类模型不同,因此本模型没有质子衰变的困难.

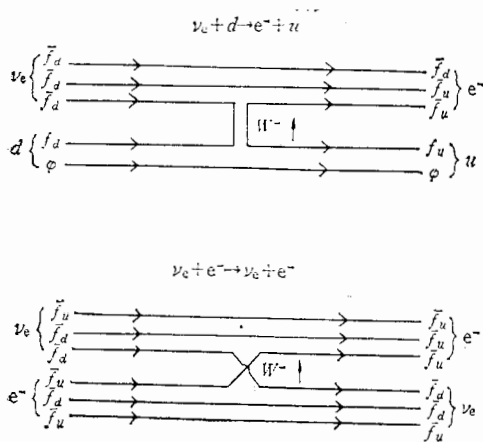


图1 轻子和夸克弱相互作用的组元交换图

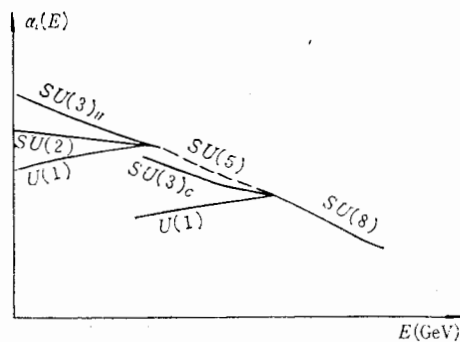


图2 耦合常数演化图

4. 本文讨论了一个简单的轻子-夸克复合模型. 在该模型中,严格的定域规范对称群是 $SU(3)_H \times SU(3)_C$ . 轻子、夸克和弱玻色子都是由同一组基本费米子和基本标量粒子组成的复合粒子. 模型解释了轻子和夸克的对称性. 弱作用和强作用类似,都是定域规范相互作用的剩余效应.

该模型引进了较少的基本粒子,合理的组成了具有正确量子数的轻子和夸克,而且,出现的 exotic 粒子很少. 一类同位旋为 $3/2$ 的 $f_u f_u f_u$ 和 $f_d f_d f_d$ 复合态并不出现. 本模型不存在质子衰变的困难. 夸克和轻子在大能标 $\Lambda_H$ 的无质量性质可用手征群 $SU(2)_L \times SU(2)_R$ 保证.

最后,我们简要地讨论一下超色规范群的选取问题. 一般情况下,在高能标时, QHD 和 QCD 规范群有可能用一个单纯规范群统一,在这种情况下, QHD 规范群必须比 $SU(3)$ 群要大,因为 $\Lambda_H > \Lambda_c$ . 如果取 $SU(N)$ 作为超色群,那么则要求 $N > 3$ . 但是, $N > 3$ 也不一定是必须的,我们采用一种特殊的破缺机制(见图2),这样一来, $SU(3)_H$ 和 $SU(3)_C$ 虽然都是 $SU(3)$ 群,但仍能实现 $\alpha_H \gg \alpha_c$ . 其实我们也没有什么先验的理由要求超色规范群 $SU(3)_H$ 和色群 $SU(3)_C$ 一定要统一到一个更大的单纯群中. 如果不是大统一,则对超色群的限制更小了.

作者感谢杜东生教授的指导,感谢黄涛教授和高崇寿教授有益的讨论.

## 参 考 文 献

- [1] J. C. Pati and A. Salam, *Phys. Rev.*, D10(1974), 275.
- [2] H. Harari and N. Seiberg, *Nucl. Phys.*, B204(1982), 141.
- [3] M. Casalbuoni and R. Gatto, *Phys. Lett.*, 93B(1980), 47.
- [4] O. W. Greenberg and J. Sucher, *Phys. Lett.*, 99B(1981), 339.
- [5] H. Fritzsch and G. Mandelhaum, *Phys. Lett.*, 102B(1981), 319. TH. 3203—CERN (1981).
- [6] S. Weinberg and E. Witten, *Phys. Lett.*, 96B(1980), 59.
- [7] G. Senjanovic, *Nucl. Phys.*, B153(1979), 334.

## THE COMPOSITE MODEL OF LEPTON AND QUARK WITH ONLY ONE CONSTITUENT SCALAR

YANG XIN-E

(Tainjing University)

### ABSTRACT

We propose a composite model of leptons and quarks containing two constituent fermions of spin 1/2 and a constituent scalar. The constituent fermions are massless and color singlets. Leptons, quarks and weak vector bosons are composites confined by  $SU(3)_H$  local gauge interaction, where leptons are made of three constituent fermions and quarks are two-body composites of a scalar and a fermion. The number of the constituent particles is less in our model. There are less exotic leptons and quarks. Quark-lepton parallelism holds. Weak interactions appear only at the composite level as residual short-range interactions among hypercolor singlets. The violation of parity occurs by the mechanism of dynamical symmetry breaking.