

# 亚夸克理论研究进展

张端明

(华中工学院)

陆继宗

(上海师范学院)

## 一、今天的基本粒子家族

自从1964年 Gell-Mann 和 Zweig 提出强子的夸克模型以来<sup>[1]</sup>, 原始的朴素夸克模型已经经过许多充实和修正, 然而其基本的物理思想依然如故。夸克模型在解决强子物理学的许多定性性质和一些定量性质方面取得令人惊叹的成就。尤其是, 70年代所进行的一系列高能深度非弹性实验更是使人不容置疑, 强子是由较小的组分构成。时至今日, 我们已发现三百余种强子。世界上绝大多数的粒子物理学家都相信, 所有强子确实都是由更基本的微观粒子——夸克构成。除此而外, 在目前的高能物理实验中, 没有发现轻子的内部结构。因而, 就我们目前的认识水平而言, 似乎可以说, 夸克和轻子乃是物质世界的最小物质单元, 即所谓“基本粒子”。无怪乎日本著名的物理学家 Terazawa 说, 今天的基本粒子物理学最好称为“轻子和夸克”的物理学。

另一方面, 近代规范场理论的巨大成就, 使我们逐渐形成这样的信念: 基本粒子的相互作用是由所谓规范粒子传递的。量子味动力学, 即描述弱和电磁相互作用的  $SU(2)_w \otimes U(1)$  规范理论告诉我们, 弱电作用是由味规范粒子——光子  $\gamma$  和中间玻色子  $W^\pm, Z^0$  传递的。描述强相互作用的  $SU_c(3)$  规范理论则断言, 强作用的传递者是色胶子  $G^a (a = 1, 2, \dots, 8)$ 。超引力理论则宣称, 万有引力是由引力规范粒子——引力子和引力微子 (螺旋度为  $\pm 3/2$  的无质量的 Rarita-Schwinger 规范场) 传递的。于是基本粒子家族又应加上一大批成员——规范粒子。但是, 目前唯一被实验证实的规范粒子只

有熟知的光子。1979年春, 在西德的 PETRA 发现色胶子存在的实验迹象——三喷注现象<sup>[2]</sup>。

最后, 规范场理论还预言, 自然界存在一类极重的 Higgs 标量粒子。它们引起真空自发破缺, 从而使夸克、轻子、中间玻色子等获得质量。

总而言之, 目前公认的基本粒子家族的成员是夸克、轻子、规范粒子和 Higgs 粒子等等。马上就会看到, 这个家族是异常庞大的!

我们已经发现五味夸克, 即电荷  $(2/3)e$  的  $u$  (上),  $c$  (粲) 夸克和电荷  $-(1/3)e$  的  $d$  (下),  $s$  (奇异),  $b$  (底) 夸克。许多人相信, 至少还有一味—— $t$  (顶) 夸克有待发现。每味夸克配有三种不同的色: 红、绿和黄。纯  $SU(3)$  量子色动力学断言, 夸克的味道数目即令达到 16 种, 渐近自由的性质依然可以保持。众所周知, 渐近自由是解释高能深度非弹性散射实验中发现的无标度性所必需的。如此看来, 连同反夸克, 夸克的种类也许会有  $16 \times 3 \times 2 = 96$  种之多!

目前发现的轻子有五种: 三种带电的轻子  $e^-, \mu^-, \tau^-$ , 两种中微子  $\nu_e, \nu_\mu$ 。大家相信中微子  $\nu_\tau$  是肯定存在的。此外, 根据所谓夸克-轻子对称性, 轻子的味道数上限是 16, 连同反粒子, 也就是 32 种了。

至于规范介子的数目, 各模型预言都颇为可观。例如, 在  $E(7)$  大统一模型中, 其 133 维表示竟包括 133 个规范介子! 该表示的  $SU(3) \otimes SU_w(3)$  分解是<sup>[3]</sup>

$$\begin{aligned} 133 = & (\underline{35}, \underline{1}) + (\underline{1}, \underline{8}) + (\underline{15}, \underline{3}) \\ & + (\overline{15}, \overline{3}), \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $(\underline{1}, \underline{8})$  包括 8 个色胶子,  $(\underline{35}, \underline{1})$  包括 35

个无色的弱玻色子 ( $\gamma, W^\pm$  和  $Z^0$  以及 31 个附加的玻色子),  $(15, 3)$  和  $(\bar{15}, \bar{3})$  则包括 90 个色味俱全的轻子夸克玻色子。

Higgs 粒子的种类就很难说。因为 Higgs 粒子在规范场理论中是唯一引入的。例如, 在一种人工色 TC 大统一模型中引入的 Higgs 标量场就有三个 63 维多重态<sup>[4]</sup>。即令其中一部分被规范场“吃掉”, 剩下的 Higgs 粒子也有一百多个!

综上所述, 目前公认的基本粒子家族成员的数目确实异常庞大, 或许达数百余种! 我们知道, 微观物理学的基本思想始终是, 万象纷纭的物质世界只是由极少数“基本实体”构成的。从古希腊德谟克利特的原子论、我国墨翟的“端犹”说, 到近代的原子模型、原子核模型, 直至今天的夸克模型, 概莫能外。于是, 我们自然会产生如下问题: 在自然界中, 果真存在如此多的基本粒子吗? 或者更准确地说, 我们视为基本粒子的夸克、轻子等果真是“基本”的吗? 如果不是, 那么构成它们的基本组分是什么? 这些组分的性质如何? 其运动规律和动力学机制如何? 这便是所谓亚夸克结构问题, 亦即本文讨论的中心问题: 夸克、轻子等的复合模型问题。

## 二、亚夸克理论的依据

亚夸克理论认为, 夸克、轻子等不是“基本粒子”, 它们具有某种亚结构, 是由更基本的组分构成。但是, 提出亚夸克模型的依据是什么呢?

1. 已经发现几十种夸克、轻子。理论还预言, 有更多的夸克、轻子, 以及规范介子、Higgs 粒子有待发现。它们的种类如此繁多, 这就强烈暗示在它们下面存在更深的微观层次。

2. 夸克-轻子对称性的启示。早在 1959 年, Gamba, Marshak 和大久保就发现所谓重子-轻子对称性, 即在当时发现的三种轻子 ( $e, \mu$  和中微子  $\nu$ ) 与三种“基础重子”(坂田三重态  $p, n$  和  $\Lambda$  超子) 之间存在对应性, 或者说, 在荷电弱流(当时未发现弱中性流)的重子和轻子之

间存在对应关系。在发现两种中微子  $\nu_e$  和  $\nu_\mu$  以后, 随着夸克模型问世, 这种对称性经过推广便改称: “夸克-轻子对称性”<sup>[5]</sup>。1974 年 11 月丁肇中等发现基于这种对称性预言的粲夸克, 再加上以后 b 夸克和  $\tau$  轻子的发现, 大多数高能物理工作者都相信这种对称性确实存在。

夸克-轻子对称性的物理内容是:

(1) 自然界存在味道数相同的夸克和轻子。

(2) 夸克和轻子分别构成一代代弱同位旋双重态。它们彼此正好一一对应:

$$\text{第一代} \left\{ \begin{matrix} u_R, u_Y, u_B \\ d_R, d_Y, d_B \end{matrix} \right\} \longleftrightarrow \left[ \begin{matrix} \nu_e \\ e \end{matrix} \right] \text{SU}_w(2) \text{ 双重态}$$

(SU<sub>c</sub>(3) 三重态) (下标 R, Y, B 表示红、黄、蓝三色)

$$\text{第二代} \left\{ \begin{matrix} c_R, c_Y, c_B \\ s_R, s_Y, s_B \end{matrix} \right\} \longleftrightarrow \left[ \begin{matrix} \nu_\mu \\ \mu \end{matrix} \right]$$

$$\text{第三代} \left\{ \begin{matrix} t_R, t_Y, t_B \\ b_R, b_Y, b_B \end{matrix} \right\} \longleftrightarrow \left[ \begin{matrix} \nu_\tau \\ \tau \end{matrix} \right]. \quad (2a)$$

它们自上而下一代比一代质量大:

$$\begin{aligned} m_u \sim m_d \sim 3-6\text{MeV}; & \quad m_e \sim 0.51\text{MeV}, \\ m_{\nu_e} < 50\text{eV}; & \quad m_c \sim 7.5\text{GeV}, \\ m_s \sim 150-300\text{MeV}; & \quad m_\mu \sim 106\text{MeV}, \\ m_{c_\mu} < 0.55\text{MeV}; & \quad m_b \sim 5\text{GeV}, \\ m_t > 10\text{GeV}; & \quad m_\tau \sim 1.8\text{GeV}, \\ m_{\nu_\tau} < 250\text{GeV}. & \quad (3) \end{aligned}$$

(3) 弱电相互作用在置换(2a)  $\longleftrightarrow$  (2b)下是不变的。亦即在弱电味规范群(weak-electromagnetic flavor gauge group)中, 夸克和轻子的结构(量子数)相同。尤其应该强调的是, 每一代的轻子和夸克的电荷具有精确的比例关系:

$$Q_e = 3Q_d, \quad Q_\mu = 3Q_s; \quad Q_\tau = 3Q_b; \quad (4a)$$

$$\sum_i Q_i = 0. \quad (Q_e \text{ 为电子电荷, 余类同}) \quad (4b)$$

在(4b)中, 求和遍及每一代所有的夸克和轻子。由于(4b), 讨厌的 Adler 反常才得以相消。

简言之, 这种对称性表明, 每一代夸克和轻子都重复上一代的物理性质(除质量而外): 自旋、弱旋、电荷等等。无妨说, 这种“代模式”(generation pattern)的物理图象, 就是夸克和轻

子的周期表。如果说,元素周期表是原子内部结构的反映,核谱是原子核内部结构的反映的话,那么轻子和夸克的代模式图象难道不是它们内部具有结构的强烈暗示么?

夸克-轻子对称性是亚夸克理论最重要的依据,其基本内容与现代实验资料是颇为协调的。

3. 在现代规范场理论中, Higgs 粒子基本上是唯象引入的,因而具有极大的近似性。日本物理学家南部(Nambu)这样说:“我们目前仅仅达到超导理论中的 Ginzburg-Landau 描述罢了,尚未达到 BCS 理论的水平。诚然, Higgs 型理论的可重整性殊关宏旨,对于相对论性的问题,这一点尤其可贵,然而获致对称性的阶次破缺而引入越来越多的 Higgs 场,无异于陷入一次又一次的逻辑循环。即令只需要极少数的 Higgs 场也罢,我们也有权追问:在 Higgs 理论的背后,还存在相应的 BCS 理论么? Higgs 场难道真是 Cooper 对么?”<sup>[6]</sup>实际上,在现代许多亚夸克理论中, Higgs 粒子都被认为是亚夸克对。这一点我们下面还要谈到。

4. 实验资料表明,夸克和轻子的亚结构只能在极短的距离( $<10^{-16}\text{cm}$ )或极高的能域( $\Lambda > 10^2\text{GeV}$ )下才可能观察到。实际上,在目前的实验精确度之内,我们没有直接观察到夸克和轻子的内部结构效应。

在 70 年代初期,人们在轻子-核子的深度非弹性散射实验中观察到, Bjorken 无标度性的轻微破坏(对数性)。Drell 等假定,这就是夸克的内部结构效应。他们的分析似乎表明,夸克的亚结构线度约为  $10^{-15}\text{cm}$ 。然而,后来更为细致深入的分析证实,这种对数性的破坏与量子色动力学(QCD)的预言完全吻合<sup>[7]</sup>,从而排除了内部结构效应的假定。

量子电动力学的许多精密实验(如 Lamb 能级移动,电子磁矩和  $\mu$  子反常磁矩的测量),深度非弹结构函数的近似无标度性,截面比  $R[\equiv \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子})/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)]$  直到  $35\text{GeV}$  的近似不变性,再加入 Weinberg-Salam 模型的巨大成就等等。一致测定轻子和夸克的形状因

子标度  $\Lambda > 100\text{GeV}$ <sup>[8]</sup>。就是说,在解释上述实验事实时,我们完全无需引入夸克和轻子的形状因子,作为 Dirac 点粒子就可以了。换言之,至少到  $10^{-16}\text{cm}$  的范围,夸克和轻子还是类点粒子(point-like particles)。

鉴于这一点,亚夸克模型采取两种途径解释为什么  $m_e \ll \Lambda$ ,即所谓自然性问题。一是重组分方案,认为  $m_{\text{sub}q} \sim \Lambda$ ,利用超强作用自动调节的机制。二是轻组分方案,假定,  $m_{\text{sub}q} \sim 0$ ,并且当动量迁移  $p \gtrsim \Lambda$  时,存在不破缺的手征对称性,从而导致零质量的束缚态。

5. 现代亚夸克理论的发展与大统一理论存在密切的关系。大统一理论遇到两个基本困难:基本费米子数目过多以及大沙漠问题。后者是指在大统一理论中,超重规范介子质量可达  $10^{18}\text{GeV}$ ,而现在人们打交道的粒子(如夸克、中间玻色子等)质量最大不过  $\sim 100\text{GeV}$ 。在  $10^2-10^{18}\text{GeV}$  广阔区域中何以不存在粒子,而是一片“沙漠”呢?这两个问题的解决,许多人认为亚夸克理论乃是一种可行的方案。我们下面稍微详细讨论亚夸克理论与大统一理论之间的关系。

### 三、亚夸克理论与场的统一场论

自然科学史表明,对于物质结构的基本性(elementarity)的探索从来就是与对物质运动规律的统一性(unification)的探索联系在一起。爱因斯坦晚年致力于统一场论的工作:将物质场与引力统一起来,将引力场与电磁场统一起来。然而他没有成功,原因在于当时人们对于物质的微观结构的认识很肤浅。继 1964 年夸克模型问世以后, Weinberg-Salam 在 1967 年提出弱、电统一模型。从此,多年停滞不前的场的统一理论便以极大势头向前推进。1974 年 Geogi 和 Glashow 提出弱、电磁和强相互作用的大统一模型——SU(5)理论<sup>[9]</sup>。其中有 6 个轻子态和 24 个夸克态,它们分属于 SU(5)的两个右手 5 维表示和两个 10 维表示。物理学的迷人前景之一,乃是四种基本力:强、弱、电磁

和引力的超大统一。目前统一场论正朝着这个前景迈进。这种超大统一理论遇到的基本问题正是与亚夸克理论息息相关。

目前超大统一理论沿着两个方向前进。一个是我们熟悉的超引力理论<sup>[10]</sup>。另一个方向就是所谓“前几何-前规范”理论 (pregauge and pregeometric theory)<sup>[11]</sup>。在这两种方案中,面临的共同问题是,如果要建立一个真实的统一场论,似乎应考虑亚夸克层次,以减少基本粒子的数目。

例如,在扩展超引力理论中,规范超对称性与  $SO(N)$  内禀对称性多重态结合在一起。当  $N = 8$ , 超引力 (tribal) 多重态是由下面  $SO(8)$  多重态 (families) 构成:

螺旋度 $h$	$SO(8)$ 多重态
$\pm 2$	①
$\pm 3/2$	⑧
$\pm 1$	②⑧
$\pm 1/2$	⑩
0	⑩. (5)

但是这个庞大的“部族”却容纳不下  $[SU(2) \otimes U(1)]_{w-s} \otimes SU_c(3)$ 。它包含  $Z^0$  和  $\gamma$  光子,却不包括  $W^\pm$  中间玻色子,以及  $\mu, \tau$  轻子和  $t$  夸克。Salam 在 19 届高能物理会议上指出,唯一的出路就是引入亚夸克。

最近, Curtright 和 Freuncl<sup>[10]</sup> 提出  $SU(8)$  超引力模型,其中基本八重态由  $W_i$  双重态  $[SU(2)_w]$ 、 $h_i$  (水平对称性)三重态和  $C_i [SU_c(3)]$  三重态构成:

$$\textcircled{8} = (w_1, w_2) + (h_1, h_2, h_3) + (C_1, C_2, C_3). \quad (6)$$

实际上,它们正好是 Akama 等提出的八个旋量亚夸克,也是 Salam 提出的八前子。

“前几何-前规范”理论是建立在亚夸克模型基础上的统一场论,实际上它也是亚夸克的动力学理论。例如 Terazawa 最近提出一种意见<sup>[12]</sup>,认为存在旋量亚夸克  $w$ ,其质量  $M \sim 10\text{TeV}$ ,它是  $SU(N)$  基本  $N$  重态;标量亚夸克  $c$  (质量  $\mu \sim M$ ) 是单态。夸克、轻子、规范玻色子和引力子 (或时空度规) 都是夸克-反夸克对

复合体。它给出在亚夸克层次的原始相互作用。从这个原始作用,它可导出 Yang-Mills 规范理论和爱因斯坦的广义相对论。换言之,弱电味动力学、色动力学以及万有引力都是这种原始作用在低能近似下的“有效规范和几何理论”罢了。这个模型的严重问题在于,原始相互作用是不可重整化的,同时它也不能解释何以在普朗克长度  $G^{1/2} \sim 10^{-33}\text{cm}$  处存在普适的自然截止。

无论如何,从上述事实我们看到,物质结构学说 (亚夸克理论) 与场的统一理论确实是相互影响、相互促进的。这当然不是偶然的。我们对于微观世界的认识每深入一个层次,自然对于其中的物理图象和运动规律的了解就越是准确,越是容易把握物质运动规律之间的相互联系,从而揭示出微观世界相互作用规律的统一性。无足为怪,一个真正的统一场论,即将所有粒子相互作用规律归并为一种基本相互作用的理论,需要我们对微观世界的认识再深入一个层次——亚夸克层次。如果我们相信统一场论最终会建立起来的话,那怎么会怀疑亚夸克层次的存在呢?

#### 四、亚夸克理论的早期阶段

亚夸克理论的研究方兴未艾,极其活跃,就连亚夸克组分的称呼,也是五花八门:

- 亚夸克 (subquark) 族子 (familon)
- 亚层子 (substraton) 阿尔法子 (alphon)
- 前夸克 (prequark) 贝塔子 (Beiton)
- 前子 (preon) 奎克子 (qwink)
- 里兹子 (Rishon) 毛子 (Maons)
- 色子 (chromons) 格里克 (Gleck)
- 味子 (flavons) 翁米嘎子 (Omegons),

等等。对亚夸克模型的大力研究,虽然只是最近的事,然而,其最初雏形都可以溯源到 30 年代!

1930 年,法国著名科学家德布罗意提出光子的复合模型。他认为光子是由中微子和反中微子的复合体。以后苏联人索科洛夫和德国人

约当都研究过光的中微子理论。但是，他们都难于解释，为什么只参与弱相互作用的中微子能够构成强度大许多数量级的电磁相互作用的传递者——光子场。

具有现代意义的亚夸克结构理论的尝试，乃是海森堡的非线性旋量理论和日本的 Nagoya (名古屋) 模型。

1958 年海森堡在德国的哥廷根提出非线性旋量的统一场论。翌年，他详细地报告了自己的工作。这个理论假定，现有的一切基本粒子（当然包括光子、轻子等）都是由元物质场——基本旋量场  $\psi_a(x)$  构成。 $\psi_a(x)$  满足自耦合的非线性方程：

$$\gamma_\nu(\partial\psi/\partial x_\nu) + l^2\gamma_\nu\gamma_5:\psi(\bar{\psi}\gamma^\nu\gamma_5\psi): = 0, \quad (7)$$

其中  $l \sim 10\text{cm}$ ，是具有长度量纲的普适常数，它描绘时空的量子化特性。

海森堡的工作曾轰动一时，但是他在数学上遇到极其严重的困难，并且带来负几率、鬼态等非物理概念。他未能构成一个与实验资料相容的现实物理模型。

1960 年问世的名古屋模型中，坂田三重态  $\mathcal{D}, \mathcal{N}, \lambda$  (相当于今天的  $u, d$  和  $s$  夸克) 被认为是由  $B^+$  物质 (Bosonic matter) 与轻子构成  $\mathcal{D} = \langle B^+\nu \rangle, \mathcal{N} = \langle B^+e^- \rangle, \lambda = \langle B^+\mu^+ \rangle$ 。 (8) Taketani 和 Katayama 对此稍加修改，认为  $e^-$  和  $\mu^-$  是由中微子与所谓  $e$  荷构成：

$$e^- = \langle \nu e^- \rangle, \mu^- = \langle \nu e^- \rangle \\ \mathcal{D} = \langle \nu b^+ \rangle, \mathcal{N} = \langle \nu e^- b^+ \rangle, \lambda = \langle \nu e^- b^+ \rangle. \quad (9)$$

这个模型汲取了 Ferreira 等的 Sao Paulo 模型的下述思想： $e^-$  和  $\mu^-$  都是由  $\nu$  “吸收”电荷  $e^-$  产生的。

1962 年，发现了两种中微子  $\nu_e$  和  $\nu_\mu$ 。Katayama 等随即提出新名古屋模型：

$$\mathcal{D} = \langle B^+\nu_1 \rangle, \mathcal{Y} = \langle B^+\nu_2 \rangle, \\ \mathcal{N} = \langle B^+e^- \rangle, \lambda = \langle B^+\mu^- \rangle, \quad (10)$$

式中  $\nu_1 = \nu_e \cos \theta + \nu_\mu \sin \theta, \nu_2 = -\nu_e \sin \theta + \nu_\mu \cos \theta$  ( $\theta$  是 Cabbibo 角)， $\mathcal{Y}$  是第四种基础重子，相当于今天的粲夸克。

以上的工作都是在夸克模型提出以前发表

的。这些工作往往只稍加改变便可直接应用到亚夸克理论中去。实际上，现代亚夸克模型，有许多就是上面工作的直接沿袭和发展。

夸克模型提出伊始，对于夸克内部的结构探索随之开始。但是，各种理论的出发点分歧极大。从结构上来看，大体可分为两种意见。一种观点认为夸克和轻子不属于同一微观层次，早期亚夸克理论多半持这种观点，其中明显地打上了名古屋模型的烙印。另一种则认为夸克和轻子同属于一个微观层次，因此，亚夸克理论更准确地说应该叫亚夸克-轻子模型，这是现代亚夸克模型的主流。下一节拟着重介绍。

最早的亚夸克模型，也许要算广岛 (Hiroshima) 模型<sup>[13]</sup>。在这个模型中， $u, d, c$  和  $s$  夸克组成如下：

$$u = \langle B^+(\nu_e \bar{\nu}_e \cos \theta + \nu_\mu \bar{\nu}_\mu \sin \theta) \rangle, \\ c = \langle B^+(-\nu_e \bar{\nu}_e \sin \theta + \nu_\mu \bar{\nu}_\mu \sin \theta) \rangle, \\ d = \langle B^+(e^+ \bar{\nu}_e) \rangle, \\ s = \langle B^+(\mu^- \bar{\nu}_\mu) \rangle. \quad (11)$$

这个模型在解释强子的半轻子衰变中的  $\Delta I = 1/2$  规则是成功的，但是在说明其他弱过程却一筹莫展。

Senju 模型、Nakagawa-Takasu 模型、Yasue 以及 Yamanashi 等的模型与本模型的继承关系是十分明显的。

Nakagawa-Takasu 模型则认为存在六种有质量的轻子： $\nu_1, \nu_2, e^-, \mu^-$  以及重轻子  $E^-, M^-$ 。元玻色子的自旋  $s = 0$ ，超荷  $Y_b = 3/4$ ，电荷  $Q_b = 2/3$ 。轻子与  $b$  构成六种夸克：

$$u = \langle b\nu_1 \rangle, d = \langle be^- \rangle, \\ c = \langle b\nu_2 \rangle, s = \langle b\mu^- \rangle, \\ f = \langle bE^- \rangle, g = \langle bM^- \rangle. \quad (12)$$

该模型探讨了  $\mu$  数和味不守恒的中性流存在的可能性。

在早期的亚夸克模型中，大多数仅限于讨论夸克的亚结构，没有涉及到轻子的问题。例如 Chang 磁电模型(1972)<sup>[14]</sup>。

Chang 认为，通常的三味三色夸克  $\mathcal{D}_i, \mathcal{N}_i, \lambda_i$  ( $i = 1, 2, 3$  是色指标) 是由自旋  $1/2$  的电夸克  $\mathcal{D}, \mathcal{N}, \lambda$  与自旋  $0$  的磁反夸克  $\mathcal{D}',$

$\overline{\mathcal{N}}$  和  $\overline{\lambda}$  构成:

$$\begin{pmatrix} \mathcal{P}_1 & \mathcal{P}_2 & \mathcal{P}_3 \\ \mathcal{N}_1 & \mathcal{N}_2 & \mathcal{N}_3 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{P} \\ \mathcal{N} \\ \lambda \end{pmatrix} \otimes (\overline{\mathcal{P}}, \overline{\mathcal{N}}, \overline{\lambda}). \quad (13)$$

这是第一个将色与味分开处理的夸克复合模型。其后 Pati-Salam, Motumot。以及 Greenberg-Nelson 模型等都沿袭这个思想。

在 Matumodo 模型中<sup>[14]</sup>, 亚强子组分  $S_\alpha$  的自旋为 1/2, 带味量子数; 组分  $b_i$  自旋为 0, 带色指标。夸克  $q_{\alpha i}$  (味  $\alpha = 1, 2, 3, 4$ , 色  $i = 1, 2, 3$ ) 和色胶子  $U_\mu^A (A = 1, 2, \dots, 8, \mu$  为洛伦兹指标) 由  $S_\alpha$  和  $b_i$  构成:

$$q_{\alpha i} = \langle S_\alpha b_i \rangle, \quad U_{j\mu}^i = \langle b_i^* b_j \rangle_\mu. \quad (14)$$

强子之间的相互作用是由亚强子组分的结构性 (constructive) 相互作用产生的。其拉氏量是

$$\mathcal{L}_{\text{cons}} = iG(\overline{S}_\alpha \gamma_\mu S_\alpha - b_i^* \partial_\mu b_i) G^\mu. \quad (15)$$

关于 Greenberg 模型和 Pati-Salam 模型将在下一节介绍。还应指出, 我国兰州大学官学惠等从七十年代起就致力于亚夸克模型的研究, 他们起先仅仅研究夸克的结构, 后来进一步研究了轻子的复合模型, 尤其是还讨论了夸克的结构函数<sup>[15]</sup>。

纵观早期的亚夸克模型, 大多数都只考虑夸克的结构问题, 没有涉及到轻子的组分, 更没有认真探讨亚夸克的动力学机制。还有一个严重的问题, 就是很少探讨亚夸克理论的实验基础。一般说来, 早期的亚夸克模型是比较粗糙的。

## 五、全结构性的亚夸克模型

亚夸克理论近年来发展极快, 引人注目。现代亚夸克模型的主要趋向是什么呢? 第一, 模型多为全结构型的; 第二, 模型的动力学研究进展相当可观; 第三, 尽量寻找理论与实验的联系。所谓全结构性的模型, 指的是夸克和轻子, 乃至包括规范粒子和 Higgs 粒子的复合模型; 认为夸克和轻子同属一个微观层次。

### Pati-Salam 前子 (preons) 模型<sup>[16]</sup>

物理

1974 年, Pati-Salam 提出第一个弱、电磁和强相互作用的大统一理论—— $SU(4) \otimes SU(4)$  模型, 认为轻子具有第四种色。在他们论文脚注中, 提出存在所谓基本场  $F = (u, d, s, c)$  (表示味自由度) 和  $B = (a, b, c, d)$  (表示色自由度)。16 重态的夸克——轻子场  $\psi$  由它们合成:

$$\psi \equiv \begin{bmatrix} u_a & u_b & u_c & u_d = \nu \\ d_a & d_b & d_c & d_d = e^- \\ s_a & s_b & s_c & s_d = \mu^- \\ c_a & c_b & c_c & c_d = \nu' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ d \\ s \\ c \end{bmatrix} \otimes [a, b, c, d]. \quad (16)$$

1975 年, 他们将此模型进一步具体化。认为存在三种前子: 色子  $c = (a, b, c, d)$ 、味子  $Q = (\mathcal{P}, \mathcal{N}, \lambda, S)$  和一种单态费米子  $s$  (中性)。引入后者的目的是为了得到重量子数 (heaviness) (或镜像量子数——mirror)。夸克和轻子是三体复合态:

$$\psi = (\overline{QCS}). \quad (17)$$

1980—1981 年间他们进一步探讨了模型的动力学机制。

与这个模型颇为相似的还有 Koike 模型, 但后者没有讨论轻子的结构。

### 三体旋量亚夸克模型 (1976)<sup>[17]</sup>

Terazawa 等假设, 存在三类亚夸克  $w_i (i = 1, 2)$ 、 $h_i (i = 1, 2, \dots, N)$  和  $C_i (i = 0, 1, 2, 3)$ 。它们都是自旋为 1/2 的旋量场。  $w_L = (w_1, w_2)_L$  和  $w_{1R}, w_{2R}$  分别是 Weinberg-Salam 模型的弱旋双重态和单态, 与弱电作用有关。  $h_i$  是水平对称性  $N$  重态, 与水平(或“代”)自由度有关。  $C_0$  和  $C_i$  是  $SU_c(3)$  单态和三重态, 与强作用有关。轻子和夸克的构成如下:

$$\begin{aligned} \nu_e &= \langle w_1 h_1 C_0 \rangle, & \nu_\mu &= \langle w_1 h_2 C_0 \rangle, \\ \nu_\tau &= \langle w_1 h_3 C_0 \rangle, \dots \\ e^- &= \langle w_2 h_1 C_0 \rangle, & \mu^- &= \langle w_2 h_2 C_0 \rangle, \\ \tau^- &= \langle w_2 h_3 C_0 \rangle, \dots, \end{aligned} \quad (18)$$

和

$$\begin{aligned} u_i &= \langle w_1 h_1 C_i \rangle, & C_i &= \langle w_1 h_2 C_i \rangle, \\ t_i &= \langle w_1 h_3 C_i \rangle, \dots \\ d_i &= \langle w_2 h_1 C_i \rangle, & s_i &= \langle w_2 h_2 C_i \rangle, \\ b_i &= \langle w_2 h_3 C_i \rangle, \dots, \end{aligned} \quad (19)$$

或简记为

$$\begin{aligned} \nu_j &= \langle w_1 h_j C_0 \rangle, & u_{ji} &= \langle w_1 h_j C_i \rangle, \\ l_j &= \langle w_2 h_j C_0 \rangle, & d_{ji} &= \langle w_2 h_j C_i \rangle. \end{aligned} \quad (20)$$

$(i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, N)$

规范介子、Higgs 粒子的复合结构是

$$\begin{aligned} \text{Higgs 粒子} & \quad \eta = \langle \bar{W}W \rangle, \\ \text{光子} & \quad \gamma = \langle \bar{W}QW \rangle \quad (Q \text{ 是电荷}), \\ \text{中间玻色子} & \quad W^\pm = \langle \bar{W}\tau^\pm W \rangle \quad (\tau \text{ 是同位旋 Pauli 矩阵}), \\ & \quad Z^0 = \langle \bar{W}RW \rangle \quad (R \text{ 与 } Q \text{ 垂直}). \end{aligned}$$

Mann 色胶子  $G^a = \langle c\lambda^a c \rangle$ , ( $\lambda^a$  是  $SU_c(3)$  的 Gell-Mann 矩阵,  $a = 1, \dots, 8$ .) (21)

这个模型是一个重要模型, 其它许多模型可视为本模型的特例。作者提出亚夸克流及其代数。作者并且在模型框架中, 详细讨论大统一理论问题。

Fujikawa 提出的统一  $SU(6)$  规范对称模型就是本模型的一个特例。其中的基本六重态是亚夸克  $w_i (i = 1, 2)$  和  $C_i (i = 0, 1, 2, 3)$ , 模型中也引入水平亚夸克。模型的反对称 15 重态是

$$\begin{aligned} \bar{\nu}_{jL} &= (1/\sqrt{2})(C_0 w_2 - w_2 C_0, h_j)_R, \\ & \quad (\text{下标 } j \text{ 是代指标, } L \text{ 表示左旋}) \\ \bar{l}_{jL} &= (1/\sqrt{2})(C_0 w_1 - w_1 C_0, h_j)_R, \\ \bar{l}_{jR} &= (1/\sqrt{2})(w_1 w_2 - w_2 w_1, h_j)_L, \\ & \quad (R \text{ 表示右旋}) \\ u_{jiL} &= (1/\sqrt{2})(C_i w_1 - w_1 C_i, h_j)_L, \quad (22) \\ d_{jiL} &= (1/\sqrt{2})(C_i w_2 - w_2 C_i, h_j)_L, \\ \bar{u}_{jiR} &= (1/\sqrt{2}) \left( \sum_{k,l=1}^3 \epsilon_{ikl} C_k C_l, h_j \right)_L, \\ \bar{d}_{jiR} &= (1/\sqrt{2})(C_i C_0 - C_0 C_i, h_j)_R. \\ & \quad (i \text{ 是色指标}) \end{aligned}$$

### Yasue 两元亚夸克模型 (1979)<sup>[18]</sup>

与此类似的还有 Tanikawa-Saito 模型和 Yamanashi-Yasue 模型。共同的特点是, 认为存在两类亚夸克: 旋量型的和标量型的。

Yasue 模型中, 轻子和夸克的组成分别是

$$\begin{aligned} \nu_e &= \langle LU_1 \rangle, & \nu_\mu &= \langle L'U_1 \rangle, \\ e^- &= \langle LU_2 \rangle, & \mu^- &= \langle L'U_2 \rangle; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{D}_W &= \langle B \cos \theta + B' \sin \theta, U_1 \rangle, \\ \mathcal{D}'_W &= \langle B' \cos \theta - B \sin \theta, U_1 \rangle, \\ \mathcal{N}_W &= \langle B \cos \phi + B' \sin \phi, U_2 \rangle, \\ \lambda_W &= \langle B' \cos \phi - B \sin \phi, U_2 \rangle; \end{aligned} \quad (24)$$

式中  $L, L'$  和  $B, B'$  是玻色亚夸克,  $L$  和  $L'$  分别带有轻子数  $L_e$  和  $L_\mu$ ,  $B$  和  $B'$  则带有代量子数;  $U_i$  是费米型亚夸克;  $q_w (q_w \equiv \mathcal{D}_W, \mathcal{N}_W, \mathcal{D}'_W \text{ 和 } \lambda_W)$  表示处于弱本征态的夸克。在这个模型中, 弱规范介子  $W^\pm$  和  $Z$  可以当  $u_1$  和  $u_2$  的束缚态。  $\theta$  表示 Cabbibo 角。

Tanikawa-Saito 模型的旋量亚夸克  $Q_i (i = 1, 2)$  和标量亚夸克  $B_a^h$  (色指标  $\alpha = 0; 1, 2, 3$ , 代指标  $h = 1, 2, \dots, N$ )。它们以如下方式构成夸克和轻子 ( $l_h$  表示各代轻子):

$$\begin{aligned} \nu_h &= \langle Q_1 B_0^h \rangle, & u_\alpha^{(h)} &= \langle Q_1 B_\alpha^h \rangle, \\ l_h &= \langle Q_2 B_0^h \rangle, & d_\alpha^{(h)} &= \langle Q_2 B_\alpha^h \rangle. \end{aligned} \quad (25)$$

本模型的规范群是  $SU(2) \otimes U(1) \otimes U'(1)$ , 相应的规范玻色子  $W^\pm, B$  (携带量子数  $L_e$  和  $L_\mu$ ) 和  $B'$  (具有重子数和轻子数)。模型利用“亚夸克线”画出所谓“双关性” (duality) 图形。上述介子就是图形中  $s$  道共振态, 或  $t$  道 Regge 极点。

Yamanashi-Yasue 两元亚夸克模型的费米型亚夸克 ( $f_1, f_2$ ) 构成“弱同位旋”双重态, 玻色型亚夸克  $B_\alpha^i (i = 1, 2, \dots, N \text{ 是“代”指标, } \alpha = 1, 2, 3 \text{ 是色指标})$  和  $B_0^i$  具有“弱量子数”。夸克和轻子的组分是

$$\begin{aligned} u_\alpha^{(i)} &= \langle B_\alpha^{(i)} f_1 \rangle, & \nu^{(i)} &= \langle B_0^{(i)} f_1 \rangle, \\ d_\alpha^{(i)} &= \langle B_\alpha^{(i)} f_2 \rangle, & l^{(i)} &= \langle B_0^{(i)} f_2 \rangle. \end{aligned} \quad (26)$$

类似的两元模型还可指出 Néeman 的原粒子 (primitive-particle) 模型。其中有二类原粒子:  $\alpha$  子和  $\beta$  子。

近年出现的 Omegons 模型, 实际上只是“半结构”模型——只讨论了夸克的结构, 认为轻子与亚夸克同属一个层次。这里不予赘述。

### Rishon 模型 (1979)<sup>[19]</sup>

这个模型是 Harari 提出的, 近年来颇为各方面重视。模型提出有两种里兹子 (Rishon):  $T$  和  $V$ 。它们的自旋均为  $1/2$ , 无质量。电荷

$Q_T = +1/2, Q_V = 0$ . 轻子和夸克的组成:

$$\begin{aligned} e^+ &= \langle TTT \rangle, & \bar{\nu}_e &= \langle \bar{V}\bar{V}\bar{V} \rangle, \\ u &= \langle TTV \rangle, & d &= \langle \bar{V}\bar{V}\bar{T} \rangle, \\ \bar{d} &= \langle TVV \rangle, & \bar{u} &= \langle \bar{V}\bar{T}\bar{T} \rangle, \\ \nu_e &= \langle VVV \rangle, & e^- &= \langle \bar{T}\bar{T}\bar{T} \rangle. \end{aligned} \quad (27)$$

规范介子  $W^+, W^-$  和  $W^3$  相应组合  $\langle TTTVVV \rangle$ 、 $\langle \bar{T}\bar{T}\bar{T}\bar{V}\bar{V}\bar{V} \rangle$  以及  $T\bar{T}$  与  $V\bar{V}$  的一个组合, 而 Higgs 粒子则是轻子或夸克的复合体.

这个模型其所以引人注目, 原因在于作者提出符合 't Hooft 条件的动力学机制 (详后).

类似的工作还有 Shupe 的 quips 模型. 在国内的工作中, 文献 [20] 提出用色旋标量场合成色旋量场 (轻子和夸克) 以及规范场的普遍机制.

在亚夸克组态的研究中, 实际上就模型所体现的对称性而言, 亚夸克理论大致有两种方案. 一种方案是守恒性的模型 (conservative models). 这种模型将所有已知的对称性 (包括弱同位旋之类近似对称性) 都归于基本动力学变量 (亚夸克) 的层次中. 此类模型是标准规范模型的推广, 其中包括 Rishon 模型、Yasue 模型等. 它们的群结构曾为 Casalbuoni 和 Catto 所详细研究<sup>[21]</sup>. 它们动力学机制依然是“电型”作用 (规范作用). 它们的主要缺点是, 亚夸克层次的对称群必须是一个相当大的群, 因而在理论中出现太多的未观察到的类夸克和类轻子的“奇外” (exotic) 复合场. 另一类模型是“根本”性的 (radical). 在这类模型中, 亚夸克层次只存在完全对称性, 而近似对称性都只在复合场 (夸克等) 层次作为分类群出现. 例如 Terazawa 旋量模型、Pati-Salam 模型等便属于这一类. 它们吸引人的地方在于, 引入的亚夸克数目是最少的, 规范介子都是亚夸克的复合态. 它们的问题在于相应的动力学机制不可能是通常的局域化的量子场论. 也许得面临我们不熟悉的新的统计规律、非结合代数 (nonassociative algebra) 等棘手的问题.

## 六、亚夸克动力学

亚夸克动力学无疑是亚夸克理论的中心问

物理

题. 由于夸克动力学问题, 尤其是夸克的禁闭机制还没有弄清楚, 所以亚夸克的动力学问题当然是极其困难的问题. 但是近年来人们作了许多可贵的尝试. 途径大致如上节所指出的, 即传统观点——相应于守恒性的模型和根本性观点——相应于“根本”性模型. 呼声较高的, 看来还是前者, 它们是当前的主流.

所谓传统的观点认为, 亚夸克动力学还是具有局域规范不变性的局域量子场论. 't Hooft 的工作在这个领域中具有极大的指导意义. 't Hooft 对于组分 (亚夸克) 模型有如下猜测<sup>[22]</sup>:

1. 亚夸克作用是非阿贝尔规范作用. 亚夸克也存在红外囚禁. 他把这个作用叫超色作用 (Hyper-Color Interaction).

2. 在能量  $\ll \Lambda_{H,C}$  (夸克形状因子标度) 的低能下, 夸克和轻子的内部结构可以忽略. 这时可以由等效拉氏量  $L_{eff}$  描述. 在  $L_{eff}$  中, 只包含轻子、夸克及同一层次的其他粒子. 't Hooft, Veltman 和 Parist 进一步猜测, 如果原始拉氏量 (包含亚夸克) 是可重整化的, 那么  $L_{eff}$  也是可重整的.

3. 't Hooft 断言, 理论如果具有某种整体手征不变性, 在  $\Lambda_{H,C}$  时不破缺. 它不以 Goldstone 方式实现, 而以 Wigner 方式实现. 即所有粒子都是手征对称群的表示.

4. 由原始  $L$  构造  $L_{eff}$  时, 如果  $L_{eff}$  是无 Adler 反常, 则应满足所谓“相容性条件” (内容略). 此外他还提出第二条件——解耦条件 (内容略).

't Hooft 立论于一个基本思想: 现实的规范理论应该具有“自然性” (Naturalness). 亦即如果  $\alpha_i$  是系统的一组物理参数, 在任意能量标度  $\mu$  下, 只有当  $\alpha_i(\mu)|_{\mu=0} = 0$  时系统的对称性将增加,  $\alpha_i(\mu)$  才允许充分小.

Rishons 模型的规范理论就是可以纳入 't Hooft 猜测的一个范例<sup>[23]</sup>. 该模型的规范群是  $SU_c(3) \otimes SU_{H,C}(3)$ , 它们是在任意能域上都不破缺的. Rishons 被赋予的群表示是

$$T = (3, 3), \quad V = (3, 3^*). \quad (28)$$

我们知道, 色禁闭给出能量标度因子  $\Lambda_c =$



300—500 MeV. 轻子和夸克的类点行为给出  $\Lambda_{H,C} = 100 \text{ GeV}$ . Rishons 禁闭在范围  $\Lambda_{H,C}^{-1}$ , 它是超色三重态, 而有色的超色单态则禁闭在范围  $\Lambda_C^{-1}$  (夸克). 理论具有整体  $U(1) \otimes U(1)$  对称性, 相应的量子数定义为 ( $n_T$  和  $n_V$  是纯 T 数和 V 数)

$$\begin{aligned} R &= (1/3)(n_T + n_V) \text{ (Rishons 数)}, \\ r &= (1/3)(n_T - n_V) = B - L \\ &\text{(重子数减轻子数)} \end{aligned} \quad (29)$$

显然电荷

$$Q = (1/3)(R + r). \quad (30)$$

由于在原始拉氏量中无质量项, 所以还存在着具有两个轴  $U(1)$  因子的手征  $U(1)$  对称性. 这样, 原始拉氏量的对称群是  $SU_C(3) \otimes SU_{H,C}(3) \otimes U_R(1) \otimes U_T(1) \otimes U_{\text{em}}(1)$ .

具有 3 个 Rishon 组分超色单态的色表示是

$$\begin{aligned} VVV: & 1, 8, 10^*; \quad TTV: 3, 6^*, 15; \\ TTT: & 1, 8, 10; \quad TVV: 3, 6, 15. \end{aligned} \quad (31)$$

轻子是色单态, 夸克则是色三重态. 其它的附加态则是色奇外态 (color-exotic states), 它们的质量  $\geq 20 \text{ GeV}$ , 所以通常“看不到”. 此外, 在此模型中, 还预言有所谓超夸克和超轻子, 它们的组分是  $r\bar{r}\bar{r}$  或  $r\bar{r}\bar{r}$  ( $r$ ——Rishon), 具有有效质量  $\sim \Lambda_{H,C}$ . 所以也“看不到”. 在模型中提出, 轻子和夸克是由剩余超色力结合在一起. 弱介子  $W^\pm$  是六个  $r$  的矢量凝聚态. 超色力形成标量凝聚, 从而给出  $W$  介子和夸克、轻子的质量. 这与“人工色”机制<sup>[23]</sup>颇为相似, 但这里的 Higgs 粒子是复合态. 第二代、第三代轻子, 夸克只要添上  $r\bar{r}$  就行了. 模型给出  $\sin^2\theta_w = \frac{1}{4}$  ( $\theta_w$ ——Weinberg 角).

模型作者从  $SU_C(3) \otimes SU_{H,C}(3)$  无质量 Rishons 的规范理论, 无需对原始对称性破缺, 就导出在复合层次的有效  $SU_C(3) \otimes SU_L(2) \otimes SU_R(2) \otimes U_{B-L}(1)$  动力学破缺的规范理论, 得到了具有代模式的轻子、夸克谱. 理论无基本标量粒子 (Higgs), 无反常, 是完全自然的, 是可重整化的. 无需引入任何新的假设, 动力学对

称性破缺的机制便自然出现. 但是, 理论与大统一理论是不相容的, 因为在  $10^{15} \text{ GeV}$  能域弱电群在理论中已不存在了. 理论存在的问题自然还多. 各代模式的组分就很牵强. 而且模型没有给出在最近可以检验的实验预言.

最近, Weinberg 讨论  $SU_{H,C}(5)$  和  $SU_C(3)$  的模型, 认为理论还存在元素为

$$\exp[i(2n\pi/3)(n_{TL} + n_{VL})] = \exp[i2n\pi R_L],$$

(下标 L, R  $\rightarrow$  左、右)

$\exp[i2n\pi R_R], n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (32)$   
的分立对称性. 这些手征对称性自然会产生一些质量  $\ll \Lambda_{H,C}$  的粒子<sup>[23]</sup>.

我国戴元本等<sup>[24]</sup>研究了一种轻子的组分参与 QCD 相互作用的亚夸克模型. 其中讨论了从味单态轴矢量中性流以及宇宙学给出的限制, 同时还探讨了轻子的胶子发射的分类.

沿着这条线索, 关于亚夸克动力学的工作, 我们还可以指出 L. Adler 提出的  $U(2)$  代数色动力学 (或 Quaternionic Chromodynamics) 以及 L. G. Mestres 提出的  $SO(3)$  前色动力学<sup>[25]</sup> 等等.

亚夸克动力学的“根本性”方案当然要复杂得多. 往往要涉及非定域场论、非结合代数以及异常的统计规律, 等等. 在这种方案中, 规范介子往往是亚夸克的复合态, 因而往往又具有不可重整化的问题. 例如在第三节提到的 Terazawa 等前几何-前规范理论便是一个典型的例子. 再如 Greenberg 等最近提出的亚夸克的量子结构动力学 (QSD)<sup>[23]</sup> 也是这样的. 他们假定存在三类亚夸克: 自旋 1/2 的味子双重态  $F = (F_u^{2/3}, F_d^{-1/3})$  和两个味单态; 自旋 0 的  $SU_C(3)$  反三重态色子  $c = (c_1^0, c_2^0, c_3^0)$  和一个自旋 0 的轻子标量  $S^{2/3}$  (上标表示电荷, 下略). 图 1 是轻子-夸克荷电弱流相互作用的 Zweig 图. 从图 1 中可以清楚看出轻子-夸克和规范介子的组成. 其他复合场构成如下:

$$\begin{aligned} \text{Higgs 场: } & \bar{F}_L F_R = \psi, \\ \text{光子场: } & [2F_u \gamma_\mu F_u - \bar{F}_d \gamma_\mu F_d + 2iS^+ \theta_\mu S]/3, \\ \text{色胶子场: } & c^+ \theta_\mu \lambda^a c, \end{aligned} \quad (33)$$

Greenberg 等给出相应的拉氏作用量. 他们认

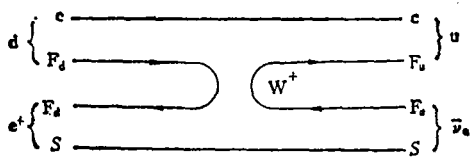


图 1

为 QSD 使亚夸克束缚成轻子和夸克等，而强和弱相互作用都是这个与味无关的定域作用的剩余力罢了。这一类理论的特点是不能纳入 'tHooft 框架。最近 J. Pati 甚至证明，普通的“电型”力——阿贝尔和非阿贝尔规范作用是不可能在大统一框架中将“前子”结合为夸克和轻子，除非大大增加前子的数目。他认为，前子既具有电荷又具有磁荷（“双子”），“磁力”使前子束缚为夸克和轻子。夸克和轻子是磁中性的<sup>[23]</sup>。

总而言之，对亚夸克动力学理论的大力研究虽然不过是近两年的事，但是确实取得了一些可喜的收获。人们从不同的角度，对于理论的基本特征进行的推测和描述越来越具体，越来越明确。当然，我们对于所有这些工作，应采取非常谨慎的态度。

### 七、亚夸克理论的实验预言

亚夸克理论的最重要的问题，在于目前缺乏任何直接实验证据，表明夸克和轻子内部具有结构。如果认为第二代夸克和轻子是第一代的激发态，那么为了抑制  $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ ,  $s \rightarrow d + \gamma$  等衰变，必须对系统的线度（ $\sim$ 亚夸克质量的倒数）加以限制，由此可估计，夸克和轻子的半径小于  $10^{-24}$ cm。另外，如果根据大统一理论，重子数和轻子数都将不再守恒，由目前资料给定质子寿命的上限，可判定衰变应在高于  $10^{15}$  GeV 能域发生的。最后，如果超引力理论是正确的话，自然界四种基本相互作用将在普朗克质量  $M_P = 10^{19}$ GeV 处统一，由此猜测，夸克和轻子的半径有可能小于  $10^{-34}$ cm！当然，这些结果是与许多理论前提直接有关的。但是它的确暗示

我们，亚夸克理论的实验检验是何等困难的事！

尽管如此，为了将理论向前推进，人们还是不断努力，以寻求理论的实验基础。我们知道，实验既是理论建立最可靠的支柱和航标，同时也是检验理论正确的唯一的标准。当前人们工作的重点，在于从各自模型提出一些在不远的将来可以检测的实验预言。

例如，Terazawa 预言在  $e^+e^-$  对撞和单光子湮灭为轻子—反轻子对（或夸克—反夸克对）实验中，可能发现自旋 3/2 的夸克和轻子。他还预言可能存在电荷 3/2 的反常轻子和色六重态、八重态、十重态的反常有色夸克，以及奇怪的双夸克型的规范介子。而 Tanikawa 和 Saito 模型，则预言存在  $\mu$  数和味不守恒的中性流。

然而，在这方面 A. De Rujula 的工作是令人瞩目的<sup>[25]</sup>。他论文的题目就叫“闪射：夸克和轻子亚结构的表现”。所谓闪射（Glint）系指在  $p\bar{p}$ ,  $p\bar{p}$ ,  $e\bar{p}$  或  $e^+e^-$  对撞中可能出现的强子和轻子的数目极大的多重产生，其截面颇为可观，并且具有极大的横向角动量和 acoplanarity（非共面性）。按他的意见，闪射实际上就是夸克碎裂或亚夸克（gleeks）湮灭的反应。还有一类闪射可能是夸克偶素（gleekonium）共振态的单光子产生，或电子的碎裂。

Rujula 认为在  $p\bar{p}$  质心能量  $\sqrt{s} \sim O(R^{-1})$ （ $R$  是夸克半径）处，观察到的夸克碎裂现象比通常 QCD 预言的大横动量现象有很大的不同。产物粒子将不再处于同一平面；并且最后产生的  $\pi$  介子比轻子的数目大得多。尽管中微子和带电轻子数也很可观；横向动量极其巨大  $\sim \sum |P_T| \sim O(\sqrt{s})$ 。Rujula 乐观地预计，在  $\sqrt{s} \approx 0.5-2$ TeV 就可以观察到这种闪射现象，并认为目前在宇宙射线中可能已观察到它，在不久的将来 CERN 也可以看到它！

我们必须记住，上面预言都是依赖于具体的模型的。无论如何，我们相信，就象卢瑟福发现原子核，和 SLAC-MIT 小组在斯坦福直线中心发现“夸克”一样，人们会在实验中“发现”亚夸克的！

## 八、结 语

我们通过对亚夸克理论的沿革和现状的简要考察,不难得出如下初步的结论:

1. 亚夸克模型的基本出发点是,目前人们认为的“基本粒子”——夸克、轻子、规范粒子和 Higgs 粒子不过是微观世界的无限层次中的一个层次而已,它们是由下一个层次的元粒子(亚夸克)构成的。有的性急的人(如 Salam)甚至于在议论前子(亚夸克的组元)。这与辩证唯物主义关于物质无限可分的论点是完全一致的。亚夸克理论近年来发展极为迅速,其基本论点也越来越为更多的人所接受。

2. 一般说来,各亚夸克模型在组态结构方面,都得到与夸克模型相容的物理图象,并且使这一图象更直观、更简洁、更有说服力,但是定量结果很少。有许多理由使人们相信,亚夸克模型与统一场论的工作也许有密切的关系。

3. 亚夸克理论目前有一些间接的实验依据,但缺乏直接的可靠实验线索。这是理论目前面临的基本困难,也是目前各模型纷纭其说、莫衷一是的原因。理论的“任意性”和“探索性”归根到底是由于缺乏取舍和鉴别的客观标准。

4. 近年来亚夸克理论发展的趋向是:统一研究夸克和轻子,甚至于规范介子和 Higgs 粒子的结构;深入探讨亚夸克动力学规律(其中最重要的是 't Hooft 的工作);尽可能寻找理论与实验的关系。在这三个方面,理论都取得一定结果。当然,这也不排斥理论在其他方面的探索。例如,最近有人用纤维丛研究规范场的同时,还讨论了 Higgs 场的起源问题<sup>[25]</sup>。这确实是十分有趣的。

5. 亚夸克模型面临的具体技术问题值得一提的是:如何圆满说明重子的磁矩以及截面比  $R [= \sigma(e^+e^- \rightarrow h)/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)]$  的问题。一般说来,各模型关于这方面的工作,不是有疏漏,就是显得牵强。

总而言之,亚夸克理论作为粒子物理的一个极其活跃的前沿在近年取得的进展是相当可

观的。尽管理论面临的困难是严重的、甚至是带根本性的,在前进的道路上处处潜伏误入歧途和徒劳往返的危险。然而理论的探索表明,一个正确反映客观现实的亚夸克模型是可以建立起来的。毫无疑问,在当前理论中必然存在尔后正确理论的生长点。一个更深的微观层次——亚夸克世界的帷幕正在拉开:对于物理工作者来说,这里是一片几乎完全有待开发的丰饶的处女地。让我们努力开垦吧!

## 参 考 文 献

- [1] M. Gell-Mann, *Phys. Lett.*, **8** (1964), 214, 237; G. Zweig, CERN Reports, TH401 and 412 (1964).
- [2] TASSO Collaboration, R. I. Brandelik et al., *Phys. Lett.*, **86B** (1979), 248; MARKJ Collaboration, D. P. Barker et al., *Phys. Rev. Lett.*, **43** (1979), 830; PLUTO Collaboration, C. Berger et al., DES/Preprint 79/57 (1979).
- [3] T. Cursey and P. Sikivie, *Phys. Rev. Lett.*, **36** (1976), 775.
- [4] 陆继宗、李新洲, 上海师院学报(自然科学版), (1981), 第1期, 11.
- [5] A. Gamba et al., *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **45** (1959), 881; Y. Katayama et al., *Prog. Theor. Phys.*, **28** (1962), 675; Z. Maki et al., *ibid.*, 876; B. J. Bjorken and S. L. Glashow, *Phys. Lett.*, **11** (1964), 255; S. L. Glashow, J. I. Iliopoulos and L. Maiani, *Phys. Rev. D*, **2** (1970), 1285; H. Geogi and S. L. Glashow, *Phys. Rev. D*, **6** (1972), 2977.
- [6] Y. Nambu, in Proceedings of 19th International Conference on High Energy Physics, Tokyo, 1978, edited by S. Homon et al., (Physical Society of Japan, Tokyo, 1979), p. 971.
- [7] M. S. Chanowitz and S. D. Drell, *Phys. Rev. D*, **9** (1974), 2078; *Phys. Rev. Lett.*, **30** (1973), 807; T. Tajima and K. Matumoto, *Phys. Rev. D*, **14** (1976), 97. T. Gabathuler, See ref. [6], p. 841.
- [8] M. Glück, *Phys. Lett.*, **87B** (1979), 247; H. J. Lipkin, *Phys. Lett.*, **89B** (1980), 358; D. P. Barber et al., *Phys. Rev. Lett.*, **43** (1979), 1915; J. D. Bowwan et al., *ibid.*, 556.
- [9] H. Geogi and S. L. Glashow, *Phys. Rev. Lett.*, **32** (1974), 438.
- [10] D. V. Volkov and V. A. Soroka, *JETP Letters* **18** (1973), 529; B. Zumino, *Nucl. Phys.*, **B89** (1975), 535; J. Wess and B. Zumino, *Nucl. Phys.*, **B 70** (1974), 39; A. Salam and J. Strathdee, *Nucl. Phys.*, **B 76** (1974), 477. D. Z. Freedman, See ref. [6], p. 535. F. L. Curtright and P. G. O. Freund, Report No. EFL 79/25 (Enrico Fermi Institute), 1979.
- [11] A. D. Sakharov, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **177** (1967), 70; P. R. Phillips, *Phys. Rev.*, **146**

- (1966), 966; K. Akama et al., *Prog. Theor. Phys.*, **60** (1978), 868; K. Akama, *ibid.*, **62** (1978), 1900; S. L. Adler, *Phys. Rev. Lett.*, **44** (1980), 1567.
- [12] H. Terazawa and K. Akama, *Phys. Lett.*, **96B** (1980), 276.
- [13] T. Hayashi et al., *Prog. Theor. Phys.*, **39** (1968), 1372; H. Senju, *ibid.*, **46** (1978), 550; M. Nakagawa and M. Takasu, *ibid.*, **59** (1978), 548.
- [14] C. K. Chang, *Phys. Rev. D*, **5** (1972), 950; K. Matumoto, *Prog. Theor. Phys.*, **52** (1974), 1973.
- [15] 官学惠、焦善庆, 兰州大学学报, **2** (1975), 1.
- [16] J. C. Pati and A. Salam, *Phys. Rev. D*, **10** (1974), 275; J. C. Pati, A. Salam and J. Strathdee, *Phys. Lett. B*, **59** (1975), 265; K. Koike, *Prog. Theor. Phys.*, **56** (1976), 998; J. C. Pati, *Phys. Lett.*, **98B** (1981), 40.
- [17] K. Akama and H. Terazawa, Univ. of Tokyo, Report No. 257, 1976; H. Terazawa, *Phys. Rev. D*, **16** (1977), 2373; *ibid.*, **22** (1980), 184; K. Fujikawa, *Prog. Theor. Phys.*, **58** (1977), 978.
- [18] M. Yasue, *Prog. Theor. Phys.*, **58** (1978), 534; Y. Tanikawa and T. Saito, *Prog. Theor. Phys.*, **59** (1978), 563; K. Yamanashi and M. Yasue, Nagoya Uni. Report No. DPNN 68-78, (1978).
- [19] H. Harari, *Phys. Lett.*, **86B** (1979), 83; H. Harari and N. Seiberg, *Phys. Lett.*, **96B** (1981), 289; *Phys. Lett.*, **100B** (1981), 41; M. A. Shupe, *Phys. Lett.*, **86B** (1979), 87.
- [20] 李新洲等, 华中工学院学报, **9-5** (1981), 35.
- [21] R. Cassalbuoni et al., *Phys. Rev. D*, **23** (1981), 462; R. Cassalbuoni and R. Catto, *Phys. Lett.*, **93B** (1980), 47; R. Catto, Univ. of Geneva Report No. 4 UGVA-DPT 1980/04-236.
- [22] G. 'tHooft, Cargese Summer Institute Lecture (1979).
- [23] S. Weinberg, *Phys. Rev. D*, **13** (1976), 974; L. Susskind, *Phys. Rev. D*, **20** (1979), 2619; S. Dimopoulos and L. Susskind, *Nucl. Phys. B*, **155** (1979), 237; S. Weinberg, "Color and Electroweak Forces as a Source of Quark and Lepton Masses." Dept. of Phys., U. of Texas Preprint, 1981. S. A. Adler, *Phys. Rev. D*, **21** (1980), 2903; *Phys. Lett.*, **86B** (1979), 83; *Phys. Rev. D*, **17** (1978), 3212; L. G. Mestres, *Phys. Rev. D*, **23** (1981), 2055; J. C. Pati, *Phys. Lett.*, **98B** (1981), 40; G. R. Farrar, *Phys. Lett.*, **96B** (1980), 273 (将 't Hooft 的工作推广到包括奇外态的复合模型); F. Mansouri, *Phys. Lett.*, **100B** (1981), 25. O. W. Greenberg and J. Sucher, *Phys. Lett.*, **99B** (1981), 339.
- [24] C. B. Chin and Yuan-ben Dai, QCD Interaction of Leptons in Composite Models, Dep. of Phys. U. of Texas, Austin, Texas 78712 (1981), Preprint.
- [25] A. De Rujula, *Phys. Lett.*, **100B** (1981), 25; K. I. Macrae, *Phys. Rev. D*, **18** (1978), 3737; 3761; *ibid.*, **22** (1980), 1996; C. N. Chang et al., *Phys. Rev. D*, **13** (1976), 235.

## 放大的自发辐射的若干物理问题

郭光灿

(中国科学技术大学)

激光器通常由激活介质和光学谐振腔两个基本部分构成。但近年来的发展证实,存在一类高增益激光器,它们无需由反射元件构成的光腔仍然有激光输出,其中典型的激光谱线如  $N_2$  的为  $0.337\mu\text{m}$ , He-Ne 的为  $3.39\mu\text{m}$  等。这类激光器俗称为无腔激光器。它既不同于激光振荡器,也区别于激光放大器。它的激光形成的基本过程是自发辐射在增益介质内传播过程中连续获得受激放大。目前国际上统称之为放大的自发辐射(缩写为 ASE)。由于 ASE 激光有着与通常激光不同的形成机理和特征,因而引起了人们的重视,在近两届“罗彻斯特(Rochester)相干性和量子光学讨论会”上,ASE 是

主要课题之一。本文将讨论 ASE 激光的若干物理问题。

### 一、超辐射和 ASE

“超辐射”一词最早是 Dicke 在 1954 年提出来的<sup>[1]</sup>。他指出,在  $N$  个二能级原子体系中,若激发态原子处于某种特殊的初始状态(即超辐射态或 Dicke 态),则每个激发原子的自发辐射不再是彼此无关的,而是在一个共同的耦合电磁场作用下协同地进行,这种自发辐射的相关效应使得体系发射的光强与  $N^2$  成正比,而不是如通常的自发辐射那样正比于  $N$ 。这就是所