



张 端 明

### 一、今日对基本粒子的看法

什么是基本粒子？基本粒子，就其本意来说，就是构成物质世界的最小的、最简单的元粒子。“基本”-Elementary 一词，按其拉丁语源，意即始原、简单。今天，世界上绝大多数的粒子物理学家都认为，夸克和轻子是基本粒子。在“基本粒子”家族中，也许还应该加上光子、胶子、引力子和中间玻色子等规范粒子，以及另一类奇怪的粒子——黑格斯(Higgs)粒子。当然这个家族的主人翁是夸克和轻子。难怪有的科学家说，今日的基本粒子物理学最好说是“轻子-夸克物理学”。

为什么我们说轻子和夸克是基本粒子呢？因为，迄今为止，所有的高能物理实验都没有发现它们具有任何内部结构。我们目前加速器的最大能量约为500 GeV，相应的对粒子的最大时空分辨率只能达到 $10^{-16}$ 厘米。所以，我们在今天还不能发现夸克和轻子的内部结构。就人类目前的认识能力而言，我们认为夸克和轻子是基本粒子。

另一方面，近代规范场理论的蓬勃发展，使我们逐渐形成这样的概念：夸克和轻子之间的相互作用也许全部是由所谓规范粒子传递的。电磁作用是由电磁规范粒子——光子传递的；弱相互作用是由弱规范粒子——中间玻色子传递的；强相互作用是由色规范粒子——色胶子传递的；而引力作用是由引力规范粒子——引力子(还可能有引力微子)传递的。各种统一模型中，还有许多其他规范粒子。然而，迄今查明的规范粒子只有光子。1979年春天，在西德的佩特拉正负电子对撞机上发现色胶子存在的实验迹象——三喷注现象。时至今日，所谓庞大的规范介子家族，绝大部分不过存在于理论工作者的笔端而已。一时还很难从实验上研究它们的内部结构性。

至于奇怪的黑格斯标量粒子，在现代规范场理论中扮演着十分重要角色。它们引起真空的对称性自发破缺。从而使得夸克、轻子以及有质量的规范介子获得质量。一般的看法是，它们的质量极大，也许是质子

的几百倍，乃至 $10^{18}$ 倍。所以在实验上是极难发现它们的，目前自然更无从研究其内部结构了。

综上所述，我们今天公认的基本粒子家族的正式成员是：夸克、轻子、规范粒子和黑格斯粒子。

### 二、庞大的“粒子家族”

迄今为止，人们已发现五味(类)夸克，即u(上)、d(下)、c(粲)、s(奇异)和b(底)夸克，每种夸克又配有三种不同的色：红、黄和蓝。连同相应的“反粒子”-反夸克，看来自然界至少存在30种夸克-反夸克。大多数理论工作者都相信(尽管最近“搜寻”它的工作接连“失利”)，应该还存在一种(味)夸克——t(顶)夸克。量子色动力学的理论告诉我们，如果不计黑格斯场的影响，即使夸克的味道有16种之多——也就是96种夸克-反夸克，所谓“渐近自由”的特性还依然保留。目前我们查知的轻子有五种：电子及电子型中微子， $\mu$ 子及 $\mu$ 子型中微子，以及 $\tau$ 重轻子。大家推测，还应存在着相应的 $\tau$ 中微子 $\nu_\tau$ 。轻子连同反轻子，至少有12种之多。

至于规范介子的种类，虽然目前实验确证的只有光子一种，然而，各规范模型预言的规范粒子的种类都是相当多的。如果以目前公认的六味夸克和轻子(计48种)作为基本组态，那么，相应的“自然”群将是SU(48)。而基本规范子竟然会有2303个之多！

黑格斯粒子的种类有多少？这就更难说了。因为这类粒子在规范场理论中是唯象引入的，各种理论选取的数目悬殊很大。在所谓标准温伯格-萨拉姆模型中，选取四种黑格斯场，被规范介子“吃掉”三个，剩下一个有质量的黑格斯粒子。其他的模型里，引入的黑格斯粒子的数目至少是与模型中规范粒子的数目相当。

由此看来，我们目前认定的基本粒子家族的成员也许有几百乃至几千之多！人们不禁要问，在自然界中，基本的“始原”粒子居然会有这么多吗？或者说，我们所说的“基本”粒子：夸克、轻子、规范粒子和黑格斯粒子果真是“基本”的吗？它们真的是没有大小、没有内部结构的宇宙的“最原始”的砖石吗？

历史的经验告诉我们，从古代的原子弹论，到近代的分子论，原子理论，直到原子核理论、夸克模型，贯穿于微观物理学的基本思想始终是，物质世界只是极少数基本实体构成的。

如果说，在六十年代，众多强子的发现揭开夸克模型的帷幕的话，那么在今天，庞大的“粒子”家族的出现，正是亚夸克世界给予我们的信息。逻辑的类推当然不能代替具体的科学研究。事实上，除了夸克和轻子的数目庞大而外，关于它们内部结构的某些其他暗

示确实存在。

### 三、亚夸克层次到底存在吗？

关于夸克和轻子的内部结构性的最强烈的暗示来自所谓轻子-夸克对称性。

早在 1959 年，戈巴、马尔夏克和大久保就发现所谓重子-轻子对称性。他们指出，在所谓坂田三重态(即质子 p、中子 n 和奇异粒子  $\lambda$  超子)与当时知道的三种轻子之间存在对应关系

$$e \leftrightarrow n, \mu \leftrightarrow \lambda, \nu \leftrightarrow p.$$

1962 年，发现中微子有  $\nu_e$  和  $\nu_\mu$  两种。1964 年夸克模型问世。格拉肖和布约肯建议，这种对称性应改称为夸克-轻子对称性

$$\begin{aligned} \nu_e &\leftrightarrow p(u), & \nu_\mu &\leftrightarrow \lambda'(c) \\ e &\leftrightarrow n(d), & \mu &\leftrightarrow \lambda_0(s) \end{aligned}$$

当时一般人认为只存在三种夸克。他们大胆推测，应存在质量很大的第四种夸克——c 夸克。1970 年，格拉肖等为了解释在实验中没有观察到奇异数改变的中性强子流，再一次指出应该存在第四种夸克——粲夸克，1974 年 11 月，美国布鲁海文国立实验室丁肇中小组和斯坦福直线中心的里克特小组发现  $J/\psi$  粒子。这个质量很大的超重介子是由一个粲夸克和一个反粲夸克构成。以后，又相继发现由粲夸克构成的强子，如 D 介子、F 介子等等。粲夸克的发现，是轻子-夸克对称性的生动证明。

1975 年，第五种轻子  $\tau$  发现了。无独有偶的是，1977 年美国费米实验室的莱德曼等发现了第五种(味)夸克——b 夸克及其反夸克构成的超重介子—— $\Upsilon$  粒子。现在，大多数粒子物理学家相信，至少还存在一种轻子—— $\tau$  中微子  $\nu_\tau$  以及与之相应的第六味夸克——t (顶)夸克。于是，我们可以把轻子-夸克对称性的物理内容表述为：

- i. 自然界存在味数相同的轻子和夸克；
- ii. 夸克和轻子分别构成一代代 (generations) 弱旋双重态。它们彼此对应

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \nu_e \\ e \end{bmatrix} & \quad \begin{bmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{bmatrix} & \quad \begin{bmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{bmatrix} \dots & (1) \\ \updownarrow & \quad \updownarrow & \quad \updownarrow & \\ \begin{bmatrix} u \\ d \end{bmatrix} & \quad \begin{bmatrix} c \\ s \end{bmatrix} & \quad \begin{bmatrix} t \\ b \end{bmatrix} \dots, & (2) \end{aligned}$$

而且自左向右，一代比一代质量大。

现在实验测得的夸克和轻子的质量是：

$$\begin{aligned} m_e &\sim 0.51\text{MeV}, & m_\mu &\sim 106\text{MeV}, & m_\tau &\sim 1.8\text{GeV}, \\ m_u &\sim m_d \sim 3\text{--}6\text{MeV}, & m_c &\sim 1.5\text{GeV}, \\ m_s &\sim 150\text{--}300\text{MeV}, & m_t &> 18\text{GeV} (?), \\ m_b &\sim 5\text{GeV}. \end{aligned}$$

以前一般认为中微子无静止质量。最近有的资料说已经测得它们的质量，但尚未得到公认。无论如何，目前

我们可断言：

$$m_{\nu_e} < 50\text{eV}, \quad m_{\nu_\mu} < 0.55\text{MeV}, \quad m_{\nu_\tau} < 250\text{MeV}.$$

理论工作者正积极探索夸克和轻子质量谱的规律。

iii 弱电相互作用在 (1)  $\leftrightarrow$  (2) 置换下是不变的。

iv 在每一代轻子和夸克中，存在精确的电荷比例关系： $Q_e = 3Q_u, Q_\mu = 3Q_s, Q_\tau = 3Q_b$ 。尤其令人感兴趣的是，每一代轻子和夸克的总电荷都为 0：

$$\sum_i Q_i = 0.$$

如第一代(乘 3 是同为有三色)：

$$\begin{aligned} 3(Q_u + Q_d) + Q_{\nu_e} + Q_e \\ = 3\left(-\frac{1}{3} + \frac{2}{3}\right) + 0 + (-1) = 0. \end{aligned}$$

妨碍重整化的 Adler 反常，正是由于这一点才在温伯格-萨拉姆的弱电统一规范模型中得以消除。

这种对称性表明，每一代夸克和轻子都重复着前一代的主要物理性质：电荷、自旋、弱旋等等，构成所谓“代模式”的物理图景。可以说，这种“代模式”乃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规律性的反映，那么夸克和轻子的“代模式”当然也是它们内部规律性的强烈暗示。如果后者确有内部结构的话，我们合理的推测是，它们是由相同物理实体构成。

另一方面，场的统一理论的发展与亚夸克理论的关系甚为密切。目前超引力理论的基本困难之一，就是超引力多重态“容纳”不下所谓“基本粒子”：夸克、轻子、规范粒子等。看来一个现实的出路在于引入亚夸克，以减少基本费米子的数目。最近，卡特耐特和弗让德提出  $SU(8)$  超引力模型。其中  $SU(8)$  基本八重态就是八个亚夸克，实际上就是阿卡玛等提出的旋量亚夸克。

亚夸克理论与统一场论之所以结下如此的不解之缘，自有其深刻的物理根源。人们对于微观世界的认识每深入一个层次，对于微观世界的真实图景的了解就更加接近，从而更容易从纷繁的物质运动现象中抓住它们的本质，找到它们之间的联系，揭示出它们运动规律的统一性。看来，一个真正的统一理论，需要我们对微观世界的认识再深入一个层次——亚夸克层次。

### 四、极微世界话极微

亚夸克层次既然存在，我们就试来估计一下它们的大小。

我们知道量子电动力学中有许多极其精密的实验：如电子反常磁矩的测量， $\mu$  子反常磁矩的测量，以及兰姆能级移动等，实验结果与理论的符合令人惊叹不已。近年来，温伯格-萨拉姆模型获得巨大成功，QCD 理论成功地解释了深度非弹性结构函数的近似无标度性，以及  $e^+e^-$  湮灭时，产生各种强子的截面与产生  $\mu$

子对的截面之比  $R_c + c^-$  等等。所有这些确凿的事实一致表明,至少到  $10^{-16}\text{cm}$  的范围,夸克和轻子还是类点粒子。换言之,即夸克与轻子有内部结构,这样的亚结构的线度应小于  $10^{-16}\text{cm}$ 。因为,将夸克和轻子作为狄拉克点粒子,无需引入它们的形状因子,便可以圆满解释上述实验事实。

如果认为第二代夸克 ( $c, s$ ) 和轻子 ( $\nu_\mu, \mu$ ) 是第一代 ( $u, d; \nu_e, e^-$ ) 的激发态,那么衰变

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu, s \longrightarrow d + \nu_\mu.$$

便应是允许进行的。不过,这样的衰变应受到一些特征因子的压抑。这些特征因子由夸克-轻子的极小的线度,或极重的组分质量所确定。从  $\mu^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu$  的衰变率的上限来看,夸克和轻子的半径远小于  $10^{-16}\text{cm}$ ,看来,也许要小于  $10^{-24}$  厘米。当然,这只是极粗略的估算,因为具体的计算细节取决于我们全然不知道的亚夸克的动力学机制。

如果进一步假定,夸克与轻子确实由同样的“实体”构成,那么,重子数和轻子数就都不会守恒了。根据现在测定的质子寿命的上限估计,夸克的半径可能小于  $10^{-29}\text{cm}$ ,因为衰变应在高于  $10^{15}\text{GeV}$  的能域发生。超引力理论告诉我们,所有相互作用的统一可能在  $10^{18} - 10^{19}\text{GeV}$  处,即相应于普朗克质量处,这似乎暗示,夸克、轻子的亚结构也许小到  $10^{-34}\text{cm}$  左右!这真是小到不可思议!即令对于习惯于微观世界的极微诸量的人,这个数字也不免叫他们大吃一惊!

当然,应该加一句的是,上述的估算都是在许多“如果”条件下进行的,很不可靠。但是,无论如何,根据实验资料可以判定,夸克和轻子的亚结构不会大于  $10^{-16}\text{cm}$ 。因而,亚结构的任何直接物理效应只能在极其惊人的超高能领域才显示出来。

## 五、千姿百态斗芳菲

所谓亚夸克模型是指夸克(轻子)的复合模型。他们认为,夸克(轻子)不是“基本粒子”,应具有某种亚结构,是由更基本的元粒子构成。

亚夸克模型的雏形也许应溯源到 30 年代的德布罗意的光子复合模型,索科洛夫-约旦的光的中微子理论。近代意义的亚夸克研究则导源 60 年代末期,到 70 年代中期后趋于高潮。目前,正是方兴未艾,各种新模型相继问世。但因为依据的实验资料极端缺乏,建造模型的任意性很大,所以各种模型千姿百态,相同处极少。唯一的共通之点是,它们都认为夸克和轻子都由更基本的元粒子构成。

各种亚夸克模型的内容确是五花八门。有的认为,夸克和轻子同属于一个微观层次,而且往往一并讨论规范粒子和黑格斯粒子的复合模型,这叫做“全结构学派”。有的认为夸克和轻子并不属于同一微观层次,而且往往认为轻子比夸克处于更深的微观层次,这叫

做“半结构学派”。此外,还有一些单篇另页,单独讨论规范粒子和黑格斯粒子的复合模型。

我们先看看黑格斯粒子的复合模型。在现代规范理论中,黑格斯粒子确是一类很奇怪的粒子,在各类规范理论,都少不了它,因为费米子场(夸克和轻子等)和有质量的规范粒子,都必须“吃掉”黑格斯粒子,才能获得质量。然而,在规范理论中,规范场是以完全确定的方式(协变导数)引进的,而黑格斯粒子却是以唯象的并不完全确定的方式引进的,因而具有极大的任意性。

日本著名的粒子物理学家南部阳一郎在十九届国际高能物理会议的闭幕词中说:“照我看来,黑格斯场只不过是规范理论中导出质量的一种唯象方法而已。我们仅仅达到超导理论中的金兹别格-朗道描述的阶段罢了,尚未达到 BCS (巴丁、库柏、施里弗)理论的水平。诚然,黑格斯型理论的可重整性是重要因素,对于相对论性的问题,这一点尤其可贵。然而,为了获得对称性的阶次破缺而引入越来越多的黑格斯场,无异于陷入一次又一次的逻辑循环。即令只需要极少数的黑格斯场,我们也有理由追问,在黑格斯理论后面的 BCS 理论存在吗?黑格斯场难道真是库柏对吗?”说得多么好啊!

下面让我们继续领略亚夸克理论中的奇葩异卉吧!

## 六、轻子具有“色”吗?

最早的“半结构”模型恐怕要追溯到 1960 年的名古屋模型。1968 年,日本一批年轻物理学家在名古屋模型的基础上又提出具有现代意义的“亚夸克”模型——广岛模型。对这个模型经过修改和充实,在解释一些实验现象上取得了一定程度的成功。然而,这一类模型都有一个共同的特点:将轻子作为夸克的组分。许多人对这一点都有疑问:为什么常见的轻子所构成的复合体——夸克,却总是戴着隐身帽,人们总是观察不到呢?

近年来,亚夸克理论发展的主要样式是全结构型的亚夸克模型。1974 年,萨拉姆和帕提写了一篇关于大统一模型 ( $SU_3(4) \times SU_2(4)$ ) 的著名论文。在文章脚注中他们提出一种亚夸克模型。模型认为存在所谓味基本场 ( $u, d, s, c$ ) 和色基本场  $B = (a, b, c, d)$ 。夸克-轻子场  $\psi$  是 16 重态,系由基本场复合而成(由此自然得出结论,轻子具有色,是色单态):

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

他们以后又将此模型加以改进,称为“前子”模型。萨

拉姆,这位场的统一理论的健将,还是亚夸克理论的急先锋呢!他在1979年欧洲的一次学术会议甚至性地提出“前前子”(pre-preon)的问题!

1976年日本一批物理学家提出的所谓“三体量量亚夸克模型是一个相当重要的工作。许多其他的模型实际上都可视为本模型的特例。这个模型和许多全结构性模型一样,都汲取了萨拉姆-帕提思想:轻子具有第四色。

但是还有许多模型却是沿着另外一条道路前进。其中以色列科学家哈拉里等人在1979年提出的“里夏子”模型可以说是亚夸克理论百花园中一朵别具风致的小花。

里夏子模型假定存在两种自旋  $J = 1/2$  的基本组分:带电的  $T$  里夏子 ( $Q = +1/3$ ) 以及中性的  $V$  里夏子。除此之外,还存在它们的反粒子  $\bar{T}$  和  $\bar{V}$ 。夸克和轻子都是它们的复合体:

$$e^+ = (TTT), u = (TTV), \bar{d} = (TVV),$$

$$\nu_e = (VVV);$$

$$\bar{\nu}_e = (\bar{V}\bar{V}\bar{V}), \bar{d} = (\bar{V}\bar{V}\bar{V}), \bar{u} = (\bar{V}\bar{T}\bar{T}),$$

$e^- = (\bar{T}\bar{T}\bar{T})$ 。等等。(第二、三代是激发态)规范介子则是里夏子的六体复合态:

$$W^+ = (TTTVVV), W^- = (\bar{T}\bar{T}\bar{T}\bar{V}\bar{V}\bar{V}), \text{等等。}$$

这个模型吸引人的地方在于其中亚夸克种类极少。1981年,作者又在原模型基础之上,提出了模型的动力学机制“量子超色动力学”,给理论更进一步增添了风采。什么是超色动力学呢?

## 七、亚夸克是怎样胶合在一起的

哈拉里等认为,里夏子既有色又有超色。在极短距离上 ( $\ll 10^{-13}$  厘米),超色的相互作用远远超过色相互作用。超色规范群  $SU(3)_H$  在许多方面都与色规范群  $SU(3)_C$  类似;对称性是完全的;规范介子——超胶子 (hypergluon) 传递超色作用,而且也是自耦合的;超色作用范围约为  $10^{-16}$  厘米。轻子和夸克都是超色单态。在理论中还预言新的粒子——超轻子和超夸克,它们都是超色三重态。由于质量极大,约  $100\text{GeV}$ ,通常能域下自然观察不到。

超色相互作用理论实际上仍然是一种具有定域规范不变性的定域量子场论。当然这种理论仍然比较粗糙。然而它已经可以解释如下问题:里夏子是怎样胶合在一起的?是怎样构成几乎无质量的轻子和夸克的?各代轻子和夸克的质量劈裂何以较之复合系统的体积倒数小许多?为什么没有自旋  $3/2$  的轻子和夸克?为什么不存在  $T\bar{V}\bar{V}$  或  $TV\bar{V}$  态?等等。

沿着类似超色理论的所谓传统观点,即用定域规范场论建立的亚夸克动力学理论还有德茹约拉的量子三重动力学 (Quantum Gledynamics) 等。早在1974年特霍夫特就对此类理论的一般轮廓进行过饶有意义的

探索。迄今仍然是人们经常引用的文献。

亚夸克动力学理论还有另一种学派:“彻底革新”的动力学。这种理论认为,亚夸克的动力学完全不同于上一层级。它们具有一些古怪的特点:非传统的统计性,非定域场论,非结合代数等等。这种理论的优点在于它能给出最经济的模型(基本组分最少的模型)。但是迄今为止,人们还几乎不能下手。所以大多数人还是走的传统道路。

动力学问题是亚夸克理论的中心问题,也是最困难问题。尽管人们在这方面已取得一定成绩,应该说还是很初步的。

## 八、路漫漫其修远兮

亚夸克理论研究极其活跃。各种模型,千姿百态,而且也取得了一定的成绩。一般说来,在对亚夸克动力学作出极概括的假设之下,它可以得到与现在夸克模型不相矛盾的物理图象。在许多情况下,它使得这一物理图象更直观、更简明、更有说服力。在一些场合它甚至预言一些新的、似乎有可能观察到的物理现象。例如,有的预言存在自旋  $3/2$  的夸克和轻子(可在  $e^+e^-$  对撞中或单光子湮灭实验中观察到),存在电荷  $3/2$  的反常轻子以及色六重态、八重态、十重态的反常有色夸克。有的预言,可能存在一种双亚夸克型的奇怪的规范介子。还有的预言了  $\mu$  数不守恒和味不守恒的中性流现象,等等。

然而,遗憾的是,目前亚夸克理论的成就大概也只有这样多了。它所预见的极少数实验现象没有被实验证实过。更加糟的是,看来在可以预见的将来,我们不会得到亚夸克存在的直接实验证明。因此,亚夸克理论的基本困难就在于缺乏可靠的实验事实。实验资料是任何科学理论建立的“向导”,同时也是对它们取舍的唯一标准。理论的多样化,从另一个侧面则反映理论本身的极大“任意性”。这说明亚夸克理论研究尽管已开展多年,但距成为一个严格的科学理论尚远,它目前还处于探索和尝试的阶段。“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索”。看来在亚夸克理论的漫漫征途中,我们还只是在起步阶段。

## 九、庭院深深深几许,帘幕无重数

人类对于微观世界结构的探索已经有几千年的历史了。我们在近几十年“基本”粒子的研究中清楚看到,物质的确可以不断分下去,由分子,到原子,到原子核(或原子碎片),直到夸克和轻子。今天又面临亚夸克(层子)。人们揭开一面又一面微观世界的帷幕,真是“庭院深深深几许,帘幕无重数。”每揭开一个新的微观层次,便打开一片花团锦簇的物理新天地。

毛主席在五十年代曾说过一段话:“原子头分

为原子核与电子，它们是对立面的统一。原子核里头又分为质子和中子。它们也是对立面的统一。一分为二是普遍的现象。质子，中子，电子也仍然是可分的。现在实验上还没有证明，将来实验条件发展了，将会证明它们是可分的。”今天我们重温这段话，是倍觉亲切的。

尽管亚夸克的研究中，困难很大，但在实验领域中，已有证据强烈暗示轻子和夸克是有结构的；在理论工作中，各种尝试也使人们相信，一个自治的亚夸克结构理论是能够建立起来的。在这个新的微观层次，充满了新的发现的可能。