

亚层子探讨中的某些问题

吴丹迪

轻子和夸克是否有结构是当今理论物理的一个热门议题。“夸克”用来作为强子的组分粒子的名称，只有二十多年的历史，夸克本身的结构又成为一个被广泛研究的课题。

二十年前，国内外学者研究夸克模型时，除了想要改进对几十种已经发现的强子的分类，解释强子谱的八重法则外，也因为发现了许多说明强子不是简单的点粒子的实验证据。如强子有电磁形状因子，重子有反常磁矩等等。现在学者们要研究轻子和夸克的结构，则更多地出于希望简化目前的物理图象，或者出于认为“物质是无限可分的”这样一个信念。

目前高能理论中的“基本的元素”，如轻子，夸克，规范粒子和黑格斯粒子的数目已经很多。它们之间除了有占主导地位的强、电、弱三种规范作用外，还有汤川作用和黑格斯粒子的自作用。而且粒子和夸克在占主导地位的规范作用方面表现出色 $\times$ 味 $\times$ 代三个方向的重复性。我们按照胡堤-萨拉姆的办法，把轻子看作为第四色，与三种颜色的夸克并列。味道是指弱作用 $SU(2)$ 的 $I_3 = 1/2$ 和 $I_3 = -1/2$ 的两种状态，在文献中常被称为上(up)和下(down)两味。已经发现的轻子和夸克(包括预计中的 t 夸克)共有色数 $(4) \times$ 味数 $(2) \times$ 代数 $(3) = 24$ 种。这些情况使我们想到轻子和夸克可能有结构。然而没有一个想象可以直接说明轻子和夸克是有结构。轻子或夸克没有表现出电磁形状因子；它们的反常磁矩似乎与量子电动力学的计算相符。这种情况可能是暂时的，因为我们用来撞击轻子和夸克的粒子的能量还不够高。在这样的情况下，研究轻子和夸克的结构问题需要想象。即使轻子和夸克真有结构，打开轻子和夸克所需要的能量也是极高的，这一代加速器很难达到。因此在短期内，理论家们很难期望从实验方面得到可靠的信息。

在研究夸克结构时，回忆一下六十年代海森堡对强子结构的一个批评，非常耐人寻味。他的大意是，既然所有的相对论粒子(强子、轻子等当时所谓的“基本粒子”)都可以成对地产生和湮没，区分组分粒子和复合粒子就是没有意义的事情。因为任何一个粒子都可以由其它粒子组成出来，例如核子可以看作 K 介子和 Δ 超子的复合粒子；光子可以看作 μ 子和反 μ 子的复合粒子等等。仅当把复合粒子分割开来所需的能量比组分粒子的质量小很多时，这种区分还有点实用意义。但是，由于这个区分的定量性质(组分粒子与复合粒子没有定性的差别，只是一个轻点，另一个重点罢了)，

抛弃这个区分也是合理的。海森堡在这里提出了一个令人深思的问题：什么是区分组分粒子与复合粒子的原则标准？早年夸克模型的工作者们找到过一个区分夸克和强子的方法，夸克填强味道 $SU(3)$ 的三重态。这里的强味道与前面讲的两种弱味道不同。当时人们只知道三种强味道。所有的强子填强味 $SU(3)$ 的单态，八重态，十重态等。海森堡一定认为这种区分只是定量的，没有原则意义。人们后来发现夸克是有颜色的，因此夸克之间有颜色相互作用，而强子是没有颜色的。这个区分方法能否使海森堡满意则不得而知。也许具有截然不同的作用性质，至少使得组分粒子与复合粒子的区分变得有一点意义。

在研究轻子和夸克的结构时，我们也面临着如何区分组分粒子和复合粒子的问题。如果轻子和夸克有结构，人们普遍认为其组分粒子——亚层子——之间的结合能要比最重的夸克的质量大四至五个量级。在这里组分粒子可能比复合粒子重的多。如何解释这个现象，这是轻子和夸克结构模型所面临的新问题。

一个有趣的现象是，对于任何基本物理问题，常常有两种截然不同的研究方法。一种是就已知现象的联系作“宏观”的讨论；另一种则是从物质结构的角度作微观的探讨。在没有搞清楚物质的结构以前，宏观讨论是唯一能够正确处理问题的手段。而要更深入、更彻底地解决问题，必须以结构理论为指导实行两者并举；在结构理论与物理结论之间距离太长时(例如，需要做力不胜任的计算)，辅之以宏观方法。比如当年研究强子性质时，靴样理论，色散关系，Regge 轨迹，火球模型等这些与强子结构没有直接关系的理论，可以称为宏观理论。这些理论在处理实验数据时有一定的作用。大多数有关强子的问题当然要用夸克模型才能解决。但是用夸克模型去处理复杂的强子散射问题会感到棘手，不如用靴样理论，火球模型等方便。靴样理论的基本观点，同前面讲的海森堡的观点一样，它认为所有的强子都是平等的，强子填在不同的强味道 $SU(3)$ (最初是 $SU(2)$ 同位旋)的表示中，它们之间的关系是由群表示论决定的。你看，靴样理论等宏观理论，虽然不承认强子有结构，但是它们只把强子作为研究对象，不包括轻子。这个状况在我们知道强子结构的细节之前就向我们暗示，所有的强子在结构方面属于同一个层次，轻子不属于这个层次，果然在夸克模型中，强子都变成了复合粒子，而轻子仍然是基本的。

在某种意义上，现代的规范理论，特别是大统一理

论,和当时的靴襪理论有些相似。在大统一理论中,轻子、夸克、规范粒子、黑格斯粒子都是不可缺少的,在某种意义上是平权的,即都是在规范对称群的表示之中。从强子结构研究的经验来看,大统一模型的某种成功,说明轻子和夸克在结构上属于同一层次,很可能规范粒子与黑格斯粒子也在这个层次之中。不过,反对这种看法,只把 Higgs 粒子或者规范粒子当做复合粒子来研究,也不乏其人。

结构模型按照组分粒子与复合粒子性质差异的程度,可以分成积木式的和算学式的两大类。夸克模型是一种积木式结构模型。强子的同位旋,奇异数,粲数,魅数等量子数分别是由轻夸克 u, d , 奇异夸克 s , 粲夸克 c 和魅夸克 b 携带的。用夸克来构造具有确定量子数的强子,是如此直接了当,同小孩拼积木一样容易。比如 D^+ 粒子具有同位旋 $+1/2$, 粲数 $+1$, 因此其组分为 $(c\bar{d})$, 质子的同位旋是 $+1/2$, 其他量子数为零,因此其组分为 (uud) 。

原子结构模型则是一种完全不同的模型。原子的化学性质,它在周期表中属于第几类,第几族,是当电子与原子核(它是由一定数目的质子和中子构成的)结合时产生的,或者说是动力学产生的。电子,质子,中子没有族或者类的性质。从没有任何化学性质的质子和中子,可以构造出化学性质截然不同的各种原子来。这与用 0,1 两个数编代码非常相似。因此这种模型称为算学模型。

如果夸克和轻子有结构,我们是该拼积木还是做数学游戏? 世界各地学者们已经提出了几十种轻子和夸克的结构模型,大多数已经提出的结构模型是积木式的。也有少数模型是算学式的。

在积木式的模型中夸克和轻子的色,味,代等性质,在它们的组分粒子上,都有不同程度的表现。让我们举一个典型的例子,姑且称为帕堤-萨拉姆-寺泽英纯模型 (Pati-Salam-Terazawa)。这个模型里有三种亚层子,分别带色,味和代的量子数。这三种亚层子分别叫做色子,味子和代子。有红、黄、绿、轻子色等四个色子。 C_r, C_y, C_g, C_e 。上、下两个味子 F_u, F_d 。和电代子, μ 代子, τ 代子等三个代子 S_e, S_μ, S_τ 。夸克和轻子的组成式为色子+味子+代子。因此夸克的量子数的谱表现出色 $\times$ 味 $\times$ 代的重复性。例如,第一代八个轻子和夸克的成分分别为

$$\begin{aligned} u_r &= (C_r F_u S_e), & u_y &= (C_y F_u S_e), & u_g &= (C_g F_u S_e), \\ d_r &= (C_r F_d S_e), & d_y &= (C_y F_d S_e), & d_g &= (C_g F_d S_e) \\ \nu_e &= (C_e F_u S_e), & e &= (C_e F_d S_e) \end{aligned}$$

要知道第二代轻子和夸克的成分,只要把上面表达式中的 S_e 换成 S_μ , 同时把 u, d, ν_e, e 分别换成 C, S, ν_μ, μ 即可。第三代,则可以用相似的方法来办理。由于色,味和代三个自由度都有相应的亚层子携带,相应的相互作用也可以由相应的亚层子来携带,例如,色

子具有 $SU(4)$ 规范相互作用,味子具有 $SU(2)_L \times SU(2)_R$ 规范相互作用,代子具有水平规范作用等等。注意,味子的作用有手征性,即左手和右手的味子具有不同的规范作用,一个是 $SU(2)_L$, 另一个是 $SU(2)_R$, 而其他作用没有手征性。如果假定色子和带子的自旋为零而味子的自旋为 $1/2$, 就可以解释为什么味子的作用有手征性。颜色 $SU(4)$ 可以通过自发破缺破坏列普通的颜色 $SU(3)_C$ 和 $U(1)$, 这个 $U(1)$ 与 $SU(2)_L \times SU(2)_R$ 经过自发破缺,变成温伯格-萨拉姆的 $SU(2)_L \times U(1)$ 。一个有趣的问题是,为什么在这个模型中会出现色子+味子+代子这样的结构式,为什么没有三个味子或者两个色子,一个味子构成的复合粒子? 研究表明,用非阿贝尔的规范束缚力,不能实现我们希望的结构式,只有用阿贝尔规范束缚力,即一种类似电磁作用的束缚力,才能实现我们的目的。这个新的类电磁力叫做声作用。

在算学模型中,轻子和夸克的色、味、代等性质在组分粒子上一点也没有反映。例如在哈喇利和舒帕模型中有两个亚层子 T 和 V 。它们既不带颜色也不带味道。第一代 8 个轻子与夸克的组成式为

$$\begin{aligned} \text{正电子 } e^+ & TTT \\ \text{上夸克 } u & TTV, TVT, VTT. \\ \text{反下夸克 } \bar{d} & VVT, VTV, TVV. \\ \text{电子中微子 } \nu_e & VVV. \end{aligned}$$

哈喇利和舒帕认为不同的排列 TTV, TVT 和 VTT 对应于三种不同颜色的夸克。这一点受到许多人的批评。然而这个模型的简单性,吸引了许多研究者。帕堤等人为了组分 T 和 V 引进了声作用,解释了组分是怎样结合的,同时赋予三种不同的排列以新的意义,使得三种颜色的夸克变为明显的可以区分。他们假定有三种带有不同声荷的 T 和三种带有不同声荷的 V : T^a, T^b, T^c ; V^a, V^b, V^c 。这里 a, b, c 是粒子的声荷指标。在一个最简单的例子中, $a = 3g, b = 1g, c = -4g$, 声耦合常数 $g^2/4\pi \sim 137$ 。由于这个耦合很强,只有声中性的复合粒子才是比较轻的。由三个组分构成的声中性系统有八个,它们是

$$\begin{aligned} e^+ & T^a T^b T^c \\ u & V^a V^b T^c, V^b T^c T^a, V^c T^a T^b \\ \bar{d} & T^a V^b V^c, T^b V^c V^a, T^c V^a V^b \\ \nu_e & V^a V^b V^c. \end{aligned}$$

在改造过的 KPR 模型中亚层子 T 和 V 可以是不带电荷的标量粒子,复合粒子的电磁作用和自旋也都是动力学产生的。

正如我们在开头讲到的,轻子和夸克的结构模型正处于萌芽阶段,我们在这里介绍的两个模型也还都是很不成熟的。我们相信,在今后一、二十年,随着轻子和夸克结构理论中许多两难问题的探讨,高能物理理论又会有一个新飞跃。