

SU(3)

对称性

吴 济 民

我们经常用“SU(3)对称性”、“SU(3)对称性破坏”等等来分析高能物理现象。究竟什么是高能物理中的“SU(3)对称性”呢？

对称性现象在自然界中普遍存在

我们稍许注意一下周围的自然界，就会发现许多现象和事物都具有某种对称性质。例如，辛勤的蜜蜂，造的蜂房总是六边形，这是左右对称的。人体的骨骼基本上也是左右对称的，我们住的地球，从几十亿年前形成以来就基本上是球对称的。这一类的例子可以举出很多、很多，这些都具有某种对称性质。我们还可以发现，有的现象对于正反电荷是对称的，有的现象对于时间向“未来”发展还是向“过去”发展是对称的。例如，有一列火车从我们面前由左向右匀速地在直线轨道上开去，如果设想时间向过去发展，那末这列火车就要不断退回到上一时刻的位置上去，这列火车就将由右向左地运动。无论火车自左向右前进也好，自右向左后退也好，都是自然界的客观规律所允许的。这就是说，这火车的运动规律对于时间向“未来”发展还是向“过去”发展是对称的。可见，对称性现象在自然界里是大量存在的，它是由更深刻的本质所决定的。从研究这些现象入手，可以找到事物的内在本质。

高能物理学研究的是微观世界的规律。那么在微观世界里对称性又是怎么回事呢？从现象上看，要复杂一些，不像上面的例子一目了然。但从数学上看，它们又有不少一致的地方。所以必不可少地要寻找合适的数学工具来描写它。比如，从镜子里看人的手，左手就成了右手，右手成了左手。原来，这是因为人的左手和右手本来就是左右不对称的，通过镜子这种不对称性显示出来了。这就相当于一种“变换”，我们取名为“镜象变换”或叫“空间反射变换”。用句数学的话来说，就是把（某个）坐标轴反了个方向。在这个变换下立刻就能区分左右对称和不对称，也就是找到了物体的一种内部属性。

高能物理研究离不开对称性质的研究。而微观世界的对称性不像宏观世界的一些对称性那么直观，少

不了要经过一些“变换”手续。在高能物理研究中的对称性质，人们通常分为“时间——空间对称性”和“内部对称性”两种。前者是指运动规律在时间、空间变换下的对称性质（例如，镜象变换就是一种空间变换），这之外的对称性往往称为内部对称性。所谓的SU(3)对称性就属于后一种。

核力与电荷无关，这是核力内部对称性的一个例子

核力，是指把质子和中子结合在一起组成原子核的力，又称强相互作用力。长期以来，人们就知道了核力与电荷无关这一现象。实验事实告诉了我们：如果把一个体系中的中子换成质子、或把其中的质子换成中子，他们之间的强相互作用力不受他们的电荷不同的影响。这就是说，强相互作用力对于质子和中子的交换具有不变性。这也是一种对称性质，只不过这里变换的对象已经不是左与右，而是中子与质子。在“小玲和老吕的对话”中讲过，自旋 $\hbar/2$ 的粒子只有两种相反的基本自旋取向，也就是只有两种基本量子状态。人们模仿自旋，引入了“同位旋”这个抽象概念，并把质子和中子看作是核子（同位旋为 $1/2$ ）的两种不同的同位旋基本状态（就像自旋 $\hbar/2$ 有两种不同的取向那样）。质子用同位旋的某个取向来代表，中子用相反的取向来代表。

再进一步，人们又引入了“同位空间”这个抽象概念。在这个“空间”里，有三个坐标轴，规定把质子用这个空间里沿 z 轴正方向的一个向量代表，把中子用沿 z 轴反方向的同样大小的一个向量代表。这样，如果把这个空间的 z 轴正方向改变为负方向，这就相当于把质子和中子交换了。所以，实验上告诉我们强相互作用与电荷无关就变成了强相互作用力在同位空间旋转变换下具有不变性了。

在数学上怎么描写这种对称性质呢？人们利用了李群（李代数），这是十九世纪发展起来的一种数学工具。在群理论中有一个分支叫做“对称群”，可以专门用来描写对称现象。在对称群理论中，包含有许多不同的具体的群，例如SU(2)群、SU(3)群、SO(3)群等等，就好像加减乘除法那样，它们有各自的运算规则，其次，它们所描写的对称现象各有自己的对称图象。客观世界存在某种对称性质，可以到那里去寻找合适的对称群来描写。正由于“群”是一种数学工具，就像 $1+1=2$ 既可以用来描写一个人加一个人，也可以描写一本书加一本书，所以，它可以广泛地应用在物理学的许多方面，如固体物理、原子核物理，“基本”粒子物理等等。人们发现，对称群理论中的SU(2)群用来描写同位

旋和同位旋空间的变换正合适,它的全名叫复二维线性空间的么模么正群。例如,它指出,同位旋数值为1的粒子的带电状态一共有 $(2I+1)$ 种,它们组成一个同位旋多重态,实际情况正是如此。例如,核子同位旋是 $1/2$,它应当有两种带电状态,这就是质子和中子,它们组成同位旋二重态; π 介子同位旋是1,它应当有三种带电状态,这就是 $\pi^+\pi^0\pi^-$,它们组成同位旋三重态如此等等。这样,强相互作用力在同位空间旋转变换下具有不变性就进一步抽象地说成了强作用力(至少)具有SU(2)对称性。

事实上,中子和质子的质量还是有一点差别的,这是由于它们的带电状态不同产生的。如果考虑到这种差别,就不能严格地把中子和质子看成是同一种核子的两个不同的量子状态了,这就是说,电磁相互作用不具有同位空间旋转不变性。我们称电磁相互作用是破坏SU(2)对称性的。

我们从核力与电荷无关这个事实出发,经过引入同位旋和同位空间这些抽象概念,导出强作用具有SU(2)对称性这个结论。这经历了从个别到一般,从实践到理论的认识过程。到这里,我们对相互作用力的认识要深入一步了,建立了这样一个物理图象:强相互作用具有同位旋空间变换下的不变性。如果自然界只存在强相互作用,那么组成同一个同位旋多重态的几个粒子(例如质子、中子,又例如 π^+ , π^0 , π^-)的性质应当是一样的(包括它们的质量,与其它粒子的相互作用情况等)。但是电磁作用不具有这种对称性质,即使同一个同位旋多重态里的粒子,它们之间在性质上也有差异。但是电磁作用比强作用弱得多,所以由它引起的同一个同位旋多重态内的各个粒子之间的质量差别并不太大。

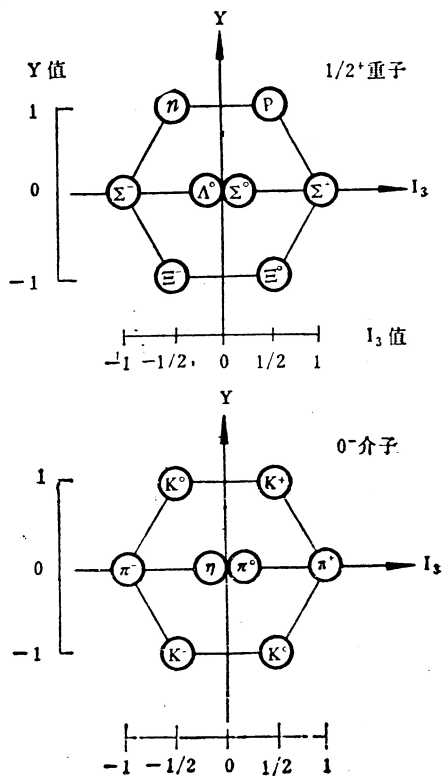
把粒子和共振态分类

那么,在高能物理研究中为什么要用到SU(3)对称群呢?这要从对粒子和共振态的分类说起。

在1957年,已经知道的“基本”粒子才三十种,到六十年代初期发现的粒子和共振态就增加到七八十种之多了。还发现它们三三两两有相近的性质。所以人们自然会问:难道这些粒子都是基本的,而不是某种更基本的东西组成的吗?大家感到已经处在类似于建立元素周期表和把氢原子谱线分类的时刻了。要着手把它们分类,寻找它们之间的内在联系。

要把粒子和共振态分类,一个很自然的想法是:自旋(用J表示)和宇称(用P表示)相同的粒子应当分在同一组内。六十年代初期发现得比较完整的两组粒子是 0^- 介子组和 $1/2^+$ 重子组(以下都用 J^P 值表示各组粒子)。 0^- 介子组有 π 、 K 、 $\bar{K}$ 、 η ,自旋为0、宇称为负。 $1/2^+$ 重子组有 N 、 Λ 、 Σ 、 Ξ ,自旋为 $1/2$ 、宇称为正。从这两组粒子来看,同一组内的粒子按质量大小

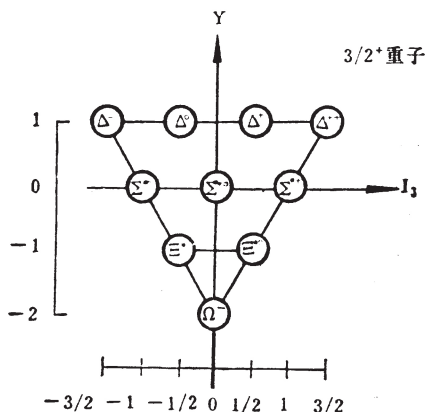
又可以再分成几个小组。这些小组其实就是不同的同位旋多重态,所以人们又称由几个同位旋多重态组成的 0^- 介子组、 $1/2^+$ 重子组等为“超多重态”,以 $1/2^+$ 重子组粒子为例,有核子N小组(有中子、质子同位旋二重态)、 Σ 小组(有 Σ^+ 、 Σ^0 、 Σ^- 一同位旋三重态)、 Λ 小组(只有 Λ^0 一个粒子一同位旋单态)和 Ξ 小组(有 Ξ^0 、 Ξ^- 一同位旋二重态)。小组与小组之间的质量差 $75\text{MeV}-125\text{MeV}$ 。这种质量差比同一个同位旋多重态内部由于电荷不同而引起的质量差大十倍左右。这个现象反映了什么物理本质呢?人们根据前面分析的同一个同位旋多重态内部的对称性质,自然会发生联想:处于同一个多重态内的 N 、 Λ 、 Σ 、 Ξ 粒子可能也都是相互对称的,它们的质量本来可能是一样大小的。但是由于另外某种相互作用的结果,才使它们之间出现了质量差异。人们于是提出了这样的物理图象:认为自然界存在着一种超强相互作用,如果只存在这种相互作用的话,同一个超多重态里的所有粒子质量应当相等。而且超强相互作用对于同一个超多重态的粒子来说都是一样的,或者说,它们之间如果进行交换,相应的超强相互作用情况是不变的,这就是一种对称性质。除此之外,认为自然界还存在次强相互作用,由于它的存在,使得不同的同位旋多重态的粒子质量有了不同,但同一个同位旋多重态内的各个粒子质量仍是相等的。最后,由于电磁相互作用,又使得同一个同位旋多重态



图一

内的各粒子之间质量也有了差异。这样,我们对于通常所说的强相互作用力的认识又深入了一步:它包括超强相互作用和次强相互作用两部分。前者对更大范围的粒子交换(例如在 N 、 Λ 、 Σ 、 Ξ 超重态粒子间的交换)具有对称性质,我们说,前者的对称性大于后者。超强相互作用既然有这种对称性质,当然也要找寻合适的数学方式来描写,最后发现, $SU(3)$ 群是唯一的一个描写这种对称性质的数学形式。

每个“对称群”对于它所描写的对象都有严格的规定。 $SU(3)$ 群也是这样,它要求被它所描写的对象必须是可以分成一个成员一组、三个成员一组、八个成员一组、十个成员一组等等。不仅仅如此,用 $SU(3)$ 来描写粒子时,还要求每一组里的粒子都能按照同位旋第三分量 I_3 (第三分量就是刚才讲的同位空间 x 轴方向的分量)和超荷 Y (等于重子数 B 加上奇异量子数 S)排成很规则的形式。这些要求,当时已经发现的 ϕ^- 介子组、 $1/2^+$ 重子组都能满足,它们正好都可以分别排成八个粒子组成的六角形的阵式,而且它们的 I_3 、 Y 值也都能像 $SU(3)$ 群的要求那样规则地排列起来(见图一)。这

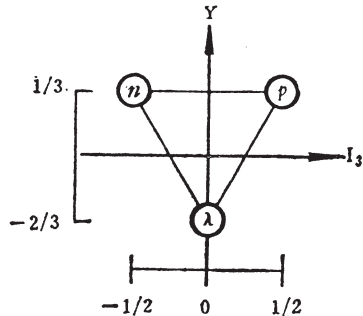


图二

很类似元素周期表:每个周期里的元素数目都有严格的规定,而且每个元素在这个周期里都有它自己合适的位置。

人们终于接受了关于强相互作用的上述图象,即:强相互作用分成超强相互作用和次强相互作用,前者有 $SU(3)$ 对称性,后者只有 $SU(2)$ 对称性。从这个理论出发作出的预言得到了实验上的证实,可以 $3/2^+$ 重子的分类为例:1952年,已经发现了 $3/2^+$ 重子 Δ 粒子(1238 MeV),这是同位旋四重态($I=3/2$; $I_3=3/2, 1/2, -1/2, -3/2$),就是说,有四种电荷状态 Δ^{++} 、 Δ^+ 、 Δ^0 、 Δ^- ,按 $SU(3)$ 理论,不能把它归于8个粒子组成的一组,至少要归在十个粒子组成的一组里。后来又发现了 Σ^* 粒子(1385 MeV),这是同位旋三重态。又发现了 Ξ^* (1530) MeV,这是同位旋二重态。这样一共有九个 $3/2^+$ 重子。于是人们从 $SU(3)$ 对称性理论出发,提

出它们都应当归于十个粒子组成的那个组里,而且还预言应当存在第十个 $3/2^+$ 重子,它的质量约为1676 MeV左右,带一个负电荷,奇异数为-3。果然,1964年找到了这个粒子,质量为1672 MeV,取名为 Ω^- 粒子(见图二)。这样, $SU(3)$ 对称性理论在粒子分类上获得成功,使人们相信强作用 $SU(3)$ 对称理论。



图三

到这里为止,我们看到强相互作用分成两部分,一部分是满足 $SU(3)$ 对称的超强相互作用,另一部分是破坏 $SU(3)$ 对称的次强相互作用。前者比后者强得多。这是种既对称又不对称的现象。这种现象在自然界也是相当普遍存在的。例如,拿一个看来左右对称的东西仔细观察,就会发现它不是绝对左右对称的,总有些微小的左右不对称现象。我们常说,自然界的这些对称现象是:既对称又不对称,但是基本上对称。

另外,按照这个基本图象,人们还预言和解释各种粒子之间的质量关系,它们的磁矩,有关反应过程截面之间的关系等等,在一定程度上证明了这种图象是正确的。

存在下一层次的粒子吗?

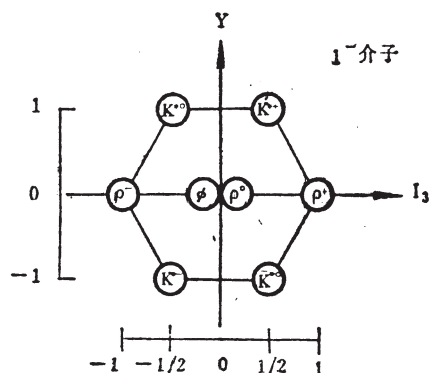
在 $SU(3)$ 对称性理论中,还要求有一个由三个粒子组成的组,而且要由这三个粒子作为基本组分去组成其它的八个粒子的组、十个粒子的组,等等。(见图三,我们把这三个粒子记作 p 、 n 、 λ)但是,直到现在为止,实验上没有找到这三个粒子。有一种意见认为,这三个粒子属于物质结构的下一层次,它们就是层子,而且还认为介子是由一对正反层子组成的,重子是由三个层子组成的。使这些层子束缚起来组成介子、重子的力就是超强相互作用力。介子和重子的各种相互作用,应归结为其中的层子、反层子的相互作用,量子场论方法也应当可以用于层子。根据这个基本设想建立起来了“基本”粒子的层子模型理论,这个理论统一地给出了介子和重子的电磁作用和弱作用的物理图象,和实验符合较好。这样就更深入地认识了介子和重子的内部性质,揭示了它们存在内部结构的这个客观真理。关于究竟层子怎样组成了介子和重子,科学上正在不断地探讨之中。这些年来,实验工作者也正在用各种

办法纷纷寻找这种粒子。从以上的发展看出,人们对微观世界的认识已越来越深入了。事物总是一分为二的。“基本”粒子也是可分的,这个思想被越来越多的事实所证明了,也被越来越多的人所接受了。

欲穷千里目 更上一层楼

人的认识是无止境的。 $SU(3)$ 对称性理论还只是一个现象性的理论。现象性理论在人们的认识过程中往往是必不可少的一步,可是,毕竟这还只是着重在现象的描述上。我们必须进一步研究是什么更深刻的物理本质产生了这种对称性质?这当然是今后重要的研究课题。

不仅如此,到七十年代,高能物理实验事实对 $SU(3)$ 对称性理论提出了挑战。从 1974 年底开始,在高能加速器实验中找到了一系列很重的新粒子: J/ψ (3095MeV)、 ψ (3684MeV)、……;最近又发现了 Υ 粒子,质量竟是质子的十倍。它们的自旋宇称都是 $J^P=1^-$ 。在这之前, 1^- 介子组已经很好地按 $SU(3)$ 对称性理论安排成 8 个粒子一组,它们是 $\rho^\pm, \rho^0, \varphi, K^{*0}, \bar{K}^{*0}, K^{*+}, K^{*-}$ 。现在,出现了这些姗姗来迟的不速之客,已经找不到现成的空位置可以安排它们了(图四)。怎么办呢?



图四

它们的出现反映了什么新的性质呢?这些成了近年来高能物理研究的一个重要课题。到目前,至少可以说,限于原有的 $SU(3)$ 对称性已经不够了。从新粒子家族和现有的弱相互作用实验看来,有人认为层子应当有四种,超强相互作用应当具有 $SU(4)$ 对称性,还有人认为层子的种类应当更多些。

总之,人们的认识总是不断前进的。高能物理研究进入了一个新的时期。我们必须以毛主席哲学思想为武器,分析实验和理论中出现的矛盾,善于解决矛盾,推动人们的认识不断向前发展。