

近代物理讲座

第十一讲 粒子物理学的发展

高崇寿

(北京大学物理系)

一、粒子和粒子物理学

本世纪初物理学的发展弄清楚了原子的直径大体上是 10^{-8} cm 的量级。进一步的发展中又认识到：原子核的直径是 10^{-12} cm 量级，原子核是由若干个质子和中子组成。质子、中子、电子和光子就是人们最早认识的一批基本粒子。在当时由于它们被认为可能是物质微粒结构的最小单元，因此被称为基本粒子。在这以后，凡是和这些粒子可以相互作用和相互转化并在当时的认识水平上认为是同一层次的粒子，统称为基本粒子。随着实验和理论研究的发展，显示出某些基本粒子肯定不能看作是点粒子，它们有一定的大小并有内部结构。同时还显示出来从内部结构的情况来看，已有的基本粒子并不属于同一层次。因此，现在已将基本粒子改称粒子，基本粒子物理学改称粒子物理学。“基本粒子”这个名词愈来愈成为历史的陈迹。

粒子的运动有其特有的特点，主要表现在以下三点上：

1. 所有的粒子都是微观尺度的客体，因此都具有量子性；

2. 粒子运动时，速度的变化常达到可以和光速相比拟的量级，与此相应，其动能的变化常达到相当于甚致远大于粒子静止能量的量级；

3. 在运动过程中，常表现出粒子之间的转化，即粒子可以消失或产生，粒子数目也是可变的。

粒子运动的这些特点决定了粒子物理学中

所研究的物理规律必然是既能反映微观粒子的量子效应，又能反映高速运动的相对论效应，同时还能体现粒子可以产生或湮没的过程。因此，在粒子物理学的理论研究中，仅采用把个别粒子的相对论性运动作为研究对象的相对论量子力学是不够的，代替量子力学并能同时体现上述三个特点的是量子场论。

每一种粒子都有一些特征的物理性质把它和其它种粒子区分开来，这些体现粒子特征的物理量的数目随着粒子物理学的发展而日益增多，反映了人们对粒子性质认识的逐步深入。我们首先看其中最重要的一些物理量。

质量 每种粒子都具有质量。由于相对论性的效应，粒子运动时质量随速度增加而增加。粒子物理学中所提到的粒子质量都是指粒子的静止质量 m ，它和粒子在自由状态下的能量 E 和动量 p 有如下关系：

$$m = \frac{1}{c} \sqrt{\left(\frac{E}{c}\right)^2 - p^2},$$

其中 c 为真空中的光速。相对论普遍给出，任何物体所具有的质量和能量之间只差一个普遍常数 c^2 ，因此在粒子物理学中，常把质量、动量和能量的单位取得相同。这样，光子的质量小于 6×10^{-22} MeV，电子的质量为 $(0.5110034 \pm 0.0000014)$ MeV，质子的质量为 (938.2796 ± 0.0027) MeV。现在实验上已发现的最重的粒子是 1983 年发现的 W^\pm 粒子和 Z^0 粒子，两个实验组 (UA1 组和 UA2 组) 测得的质量分别列于表 1。

在表 1 中给出的粒子质量值各有两个误差，其中第一个为统计误差，第二个为系统误

表 1

UA1 组	UA2 组
$m_W (80.9 \pm 1.5 \pm 3.0) \text{ GeV}$	$(81.0 \pm 2.5 \pm 1.3) \text{ GeV}$
$m_Z (95.6 \pm 1.4 \pm 3.0) \text{ GeV}$	$(91.9 \pm 1.3 \pm 1.4) \text{ GeV}$

差。从表 1 可以看到, Z^0 粒子的质量约为质子质量的一百倍。

寿命 已发现的数百种粒子中, 除极少数是稳定的以外, 其它的都是不稳定的, 即在产生之后, 经过一定时间就将自动转化成其它种类的粒子。每种粒子在衰变前平均存在的时间称为平均寿命, 简称寿命。考虑到运动粒子衰变时其寿命将有时间延缓效应, 粒子物理学中说的寿命都是指在粒子静止时表现的平均寿命。理论上稳定粒子的寿命为无穷大, 实验上则表现为给出这些粒子寿命的下限, 例如电子的寿命 $> 2 \times 10^{22} \text{ yr}$, 质子寿命 $> 1.3 \times 10^{32} \text{ yr}$, 中子的平均寿命为 $(925 \pm 11) \text{ s}$, 它是现在已知可以衰变的粒子中寿命最长的粒子。除中子外, 可以衰变的粒子中 μ 子的寿命最长, 其值为 $(2.19714 \pm 0.00007) \times 10^{-6} \text{ s}$ 。现在已知的寿命最短的粒子, 其寿命约为 10^{-23} s 量级。量子效应决定了不稳定粒子的质量有一定的自然宽度 Γ , 它和粒子的寿命 τ 之间满足关系:

$$\Gamma \tau = \hbar = h/2\pi,$$

其中 h 为普朗克常数。因此对于粒子的寿命可以等效地用宽度来描写。稳定粒子的宽度为零, 现在已知的寿命最短的粒子, 其宽度约为 1 GeV 的量级。

在粒子物理学中所讨论的问题经常涉及以 \hbar 体现的量子特性和以 c 体现的高速运动特征。为简单起见, 常采用自然单位制。在自然单位制中, 普朗克常数 \hbar 、真空自由光速 c 以及玻耳兹曼常数 k 都取作 1。基本的量纲只有一个, 可取作能量。这样, 能量、动量、质量和温度等都有相同的量纲和单位, 例如可取 eV , MeV 或 GeV 为单位; 电荷、角动量和速度等是无量纲的量; 寿命、长度和磁矩等有相同的量纲和单位, 例如可取 GeV^{-1} , s 或 fm 为单位。

电荷 质子的电荷 e 的实验值为

$$e = (1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19} \text{ C}.$$

所有的粒子, 其所带的电荷都是质子电荷的整数倍, 亦即质子电荷为电荷的最小单位。这个规律的实验检验是测量电子电荷 e_e 与质子电荷 e 的代数和是否为零, 现有实验给出

$$\left| \frac{e - |e_e|}{|e_e|} \right| < 1.0 \times 10^{-21}.$$

现在已发现的各种粒子中电荷绝对值最大的为质子电荷的二倍。

自旋 每种粒子都有确定的自旋角动量, 其值可以用一个自然数或自然数加 $1/2$ 来标志。换言之, 自旋量子数 J 的可取值为 $0, 1/2, 1, 3/2, \dots$, 自旋角动量的值为 $\sqrt{J(J+1)} \hbar$ 。光子的自旋量子数为 1, 电子、质子和中子的自旋量子数为 $1/2$, 新发现的 W 粒子和 Z 粒子的自旋量子数亦为 1。现已发现的粒子中, 自旋最大的取值为 $11/2$ 。

同位旋 能够直接参与强相互作用的粒子显现出某些特有的特性。例如质子和中子的质量相近, 它们参与强相互作用时, 耦合常数相近并且相互作用行为也相近, 它们的差别似乎主要表现为所带电荷的不同, 并且它们的差别似乎都可以归结为由于电荷不同所带来的。类似的情况在 π^+ , π^0 , π^- 介子之间也可以明显地看到, 后来发现这个特性是能够直接参与强相互作用粒子的普遍特性。这个特性可以从理论上概括为这些粒子具有被称为“同位旋”的物理量, 在强相互作用过程中同位旋是守恒的。

同位旋是指在某种抽象空间中的“角动量”。正如自旋 $J = 1/2$ 粒子的自旋角动量在某特定方向上的投影可以有 $J_3 = 1/2$ 和 $-1/2$ 两个可能值一样, 同位旋 $I = 1/2$ 粒子的同位旋在该抽象空间中某特定方向上的投影可以有 $I_3 = 1/2$ 和 $-1/2$ 两个值。质子和中子正属于这种情形, 它们是同一种 $I = 1/2$ 的粒子 (称为核子) 分别处在 $I_3 = 1/2$ 情形 (质子) 和 $I_3 = -1/2$ 情形 (中子)。

同位旋和自旋有极大的类似性, 它们的数学结构完全相同, 同位旋这一名称正由此而来, 同位旋守恒的数学表述也和角动量守恒的数学表述相同。当我们谈到自旋沿某一特定方向的

投影时,这特定方向是具体的,但当谈到同位旋沿某一特定方向投影时,因为指的是抽象空间中的特定方向,在现实三维空间中来看这特定方向并不具体。然而,同位旋守恒定律的存在表明这抽象空间仍有现实的物理意义,同位旋守恒定律的确立也表明要对粒子的运动状态进行完全的描写,仅采取过去熟知的自由度是不够的,还要引入更多的自由度,这些自由度通常称为内部自由度。同位旋自由度是人们最先认识的粒子运动内部自由度。

除了质量、寿命、电荷、自旋、同位旋之外,还有许多标志粒子特征的物理量。这些物理量的取值反映了粒子参与的相互作用性质,粒子的不同就直接在所参与的相互作用中反映出来,例如电荷为零的粒子和电荷为一个单位的粒子在电磁场作用下,其相互作用性质显然是不同的。

现已确知的粒子之间的相互作用有四种:引力相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用。这些相互作用都是随着距离的增加而减弱,引力作用和电磁作用力随着距离的改变按照与距离的平方成反比而变化,属于长程力。弱作用力和强作用力则随距离的增加比与距离的平方成反比还要更快地减弱,是短程力。正因为有这样的差别,在宏观的物理现象中,人们早就认识到了引力作用和电磁作用,而弱作用和强作用则只到原子核物理学中才直接认识其存在。

为了对这四种性质不同的相互作用进行比较,考虑两个质子相距 10^{-13} cm,对其间的四种相互作用作如下的比较:

如果对相互作用力作经典近似,并略去质子有限半径的影响而把质子作为点粒子对待,则四种作用力的比例约为

$$6 \times 10^{-39}:10^{-176}:7 \times 10^{-3}:0.2.$$

然而四种相互作用耦合常数无量纲化后的比值为

$$6 \times 10^{-39}:4 \times 10^{-7}:7 \times 10^{-3}:0.2.$$

明显的差别表现在弱相互作用上,其原因在于弱相互作用的短程性。如果将两质子的距离减

少到 10^{-14} cm 来进行比较,则四种相互作用力的比例变为

$$6 \times 10^{-39}:3 \times 10^{-17}:7 \times 10^{-3}:0.2.$$

四种相互作用耦合常数无量纲化后的比值为

$$6 \times 10^{-39}:4 \times 10^{-5}:7 \times 10^{-3}:0.2.$$

由此可见,四种相互作用强弱的比较,十分敏感地依赖于相互作用的距离。为了避免随距离而迅速变化所带来的不确定性,有时用典型的反应截面之比来标志相互作用强度之比。如把强相互作用强度的 0.2 为标准,那么弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用的强度比为

$$1.7 \times 10^{-11}:2.2 \times 10^{-3}:0.2.$$

引力相互作用的反应截面无实验值,无法比较。从上面的讨论可以看出,这四种相互作用的强度在数量级上有很大差别。

现在已经发现的粒子按它们参与各种相互作用的性质可以作如下分类:

规范粒子 电磁相互作用是一种规范相互作用。规范相互作用是一类特殊的相互作用,规范相互作用的机制是吸收或放出相应的规范粒子,规范粒子的自旋为 1。基本的电磁相互作用过程表现为放出或吸收光子,因此光子是一种规范粒子。弱相互作用也属于规范相互作用,1983 年发现的 W^\pm 和 Z^0 粒子是弱相互作用的规范粒子。因此,到目前为止这一类中共有四种粒子。

轻子 轻子为不直接参与强相互作用,但直接参与弱相互作用的自旋为半整数(即整数加 $1/2$)的粒子。现已发现的轻子共有六种,连同它们的反粒子在内共有 12 种。最常见的轻子是电子,上面提到的 μ 子也是轻子。

强子 能直接参与强相互作用的粒子统称强子,现在已经发现的粒子绝大多数是强子,最常见的强子是质子和中子。强子又按其自旋值而区分为两类,自旋为半整数的强子统称重子(或反重子),自旋为整数的强子统称介子。到现在为止实验上已发现并已确认其存在的介子有 100 种,重子和反重子有 298 种,即强子共有 398 种。此外,实验上曾报道有发现但还未得到充分实验证实确认其存在的介子有 59 种,重

子和反重子有 314 种,即这类强子共有 373 种。

表 2 已发现粒子分类

粒子类别	规范 粒子	轻子	强 子		共计
			介子	重子	
已发现已确认	4	6+6	100	149+149	414
已发现未确认	0	0	59	157+157	373
共 计	0	12	159	612	787

在已发现的这 787 种粒子中,目前实验上还未观察到其衰变行为的(即有可能是真正稳定的)粒子,只有电子、质子、三种中微子和它们的反粒子以及光子,共 11 种粒子。其余的粒子都是可以衰变的,粒子的衰变实际上是通过某种相互作用转化为另外几个质量较轻的粒子。同一种粒子通过同一种相互作用可以衰变为几种不同类型的粒子末态,同时同一种粒子还可以通过不同的相互作用而衰变。每一个衰变过程根据其通过的相互作用是强作用、电磁作用和弱作用而分别称为强衰变、电磁衰变和弱衰变。一般说来,只有弱衰变的粒子寿命较长,一般长于 10^{-13} s。只有电磁衰变和弱衰变的粒子寿命短一些,一般长于 10^{-20} s。有强衰变的粒子寿命最短,一般在 10^{-20} s 到 10^{-24} s 之间。这个数量级的区分并不是绝对的,例如 1983 年发现的 W^{\pm} 粒子和 Z^0 粒子是只作弱衰变的粒子,但它们的寿命估计应为 10^{-25} s 的量级,远短于一般有强衰变粒子寿命的量级。

粒子物理学中公认把粒子分为“稳定”粒子和不稳定粒子两类:凡是不能通过强作用衰变的粒子称为“稳定”粒子;可以作强衰变的粒子称为不稳定粒子。由此,现在已发现的“稳定”粒子的分类如表 3 所示。

表 3 稳定粒子分类

粒子类别	规范 粒子	轻子	强 子		共计
			介子	重子	
已发现已确认	4	6+6	13	10+10	49
已发现未确认	0	0	2	1+1	4
共 计	4	12	15	22	53

物理

要注意的是粒子物理学中时间要用粒子尺度来衡量,质量为 m 的粒子的特征时间(即固有振动周期)为

$$\frac{1}{m} (6.582173 \pm 0.000017) \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s},$$

可以用这个作尺度来比较。按这个尺度,即使对于质量不为零的已知的最轻粒子——电子,其特征时间亦约为 10^{-21} s。由此可见对于粒子来说 10^{-10} s 是一个相当长的时间。

粒子物理学是研究场和粒子的性质、运动、相互作用和相互转化规律的学科,是研究粒子内部结构规律的学科。人们对粒子物理学本身的认识也有个发展过程。在粒子物理学发展初期,一般并不认为粒子物理学要研究粒子的内部结构。但是经过 1965 年到 1970 年强子结构理论的发展和所取得的成功,特别是实验的发展为强子具有内部结构提供了有力的证据,这就促使多数粒子物理学家接受粒子还有内部结构的观点,并且把研究粒子内部结构规律作为粒子物理学研究的一个重要组成部分。

二、前期的几个重要进展

在粒子物理学发展的前期,有几个进展对于粒子物理学的形成起了重要的作用。

1. 粒子与反粒子

1928 年狄喇克提出一个相对论性电子运动的量子力学方程,即狄喇克方程。利用这个方程来研究氢原子能级分布时,给出了氢原子能级的精细结构,与实验很好地符合。从这个方程还可自动导出电子自旋为 $\hbar/2$, 并且电子自旋的回磁比为轨道角动量回磁比的二倍。利用这个方程还可以讨论高速运动电子的许多性质,这些结果都很好地与实验符合。这些成就促使人们相信狄喇克方程是一个正确地描写电子运动的相对论性量子力学方程。

既然已有充分实验验证了狄喇克方程的正确,人们自然期望利用狄喇克方程可以预言新现象。按照狄喇克方程,电子除了有正能态外,还有负能态,并且正能态和负能态的分布对能

量为零点是完全对称的。这个结果表明：如果有一个电子处于某正能态，则任意小的扰动都有可能促使它跳到负能态而放出能量。同时，由于负能态的分布包含延伸到负无穷的连续谱，这个释放能量的跃迁过程可以一直持续不断地继续下去，这显然在物理上是不合理的。

针对这个矛盾，狄喇克提出一个假设，认为物理上的真空态实际上是负能态都已填满电子，同时正能态中没有电子的态。按照这个假设，如果把一个电子从负能态激发到正能态去，需要从外界输入至少两倍于电子静止能量的能量。这表现为可以看到一个正能态的电子和一个负能态的空穴。这个正能态的电子带电荷 $-e$ ，所具有的能量相当于或大于一个电子的静止能量。按照电荷守恒和能量守恒的要求，这个负能态的空穴应表现为带电荷 $+e$ ，并且也具有相当于或大于一个电子静止能量的能量。换言之，这个空穴表现为一个带电荷 $+e$ 的电子，即正电子。

狄喇克的这个预言在 1932 年的宇宙线实验中得到了证实，因此发现了正电子。狄喇克的空穴理论中给出了反粒子的概念。后来发现，各种粒子都有相应的反粒子存在，这个规律是普遍的。在粒子物理中，已不再采用狄喇克的空穴理论来认识正反粒子之间的关系，而是从正反粒子完全对称的场论观点来认识。按照量子场论提供的图象，一般说来，场的激发态表现为粒子。场的任一种激发状态都有与之对应的复共轭的激发状态，这在物理上相应于粒子与反粒子。也有可能某些粒子的反粒子就是它们自己，这类粒子称为马约喇纳粒子或纯中性粒子，相应的场称为马约喇纳场或纯中性场。

一切粒子都有与之相对应的反粒子，这个普遍结论被几十年的粒子物理的发展不断印证。“反粒子”已成为粒子物理学中一个重要的基本概念，并且其本身的含义也在发展充实。

2. 核力的汤川理论

在研究原子核性质的过程中，对把质子和中子结合在一起的核力逐步刻划清楚了：核力是一种短程力，在距离大于 10^{-13} cm 时，核力迅

速减弱到可以忽略的地步，亦即它主要在 10^{-13} cm 内起作用；无论在质子之间、在中子之间或者在质子和中子之间都表现为吸引力，并且其强度量级相同；在 10^{-13} cm 以内的范围，核力的强度远比单位电荷的电磁作用力要大得多，因此不能简单地归结为电磁作用的某种表现。

1935 年汤川秀树对核力的来源提出了一个理论——介子理论。从微观过程来看，带电粒子之间的电磁相互作用是通过交换光子来实现的，光子的静止质量为零，这决定了带电粒子之间的库仑力是长程的。汤川秀树提出：核子（质子或中子的统称）之间的核力也是通过交换一种称为“介子”的粒子来实现的，如果介子具有静止质量，则自然导致核力为短程的。根据核力作用范围为 10^{-13} cm，可以估算出介子的静止质量应约为电子的二百多倍。把这种粒子称为介子正是表示其质量介于质子和电子之间。

其后不久，在宇宙线的实验中发现一种质量约为电子质量 207 倍的粒子，称为 μ 介子。当时人们以为这就是汤川理论所预言的介子，但是以后多年的研究显示出 μ 介子与原子核的相互作用很弱，不可能是汤川所预言的介子。1947 年，在宇宙线实验中又发现了一种质量约为电子质量 273 倍的粒子，称为 π 介子。这种粒子与原子核有很强作用，于是人们认为 π 介子才是汤川理论所预言的粒子，汤川的理论得到证实。由于 μ 介子实际上并不是原来含义下的介子，它之被称为介子是一种历史的误会，因此在以后就统一称为 μ 子，不再称为 μ 介子。 μ 子和电子一样，在粒子分类中属于带电轻子，无论从电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用性质来说， μ 子和电子表现性质完全相同，所有的差别似乎都可以归结于 μ 子和电子质量不同而带来的。

汤川理论对于粒子物理的发展有重要的意义，它给出了粒子之间相互作用的一种最重要的基本的物理机制，后来对这种类型的相互作用机制统称为汤川型相互作用。值得注意的是，当人们确信 π 介子就是汤川所预言的、起传递核力作用的介子，并从而认为汤川理论随着

π 介子的发现而被证实和确立之后, 物理学的发展愈来愈显示出核力不可能用核子之间交换 π 介子来解释, 核力机制远比汤川理论所描述的要复杂得多. 因此, 不能认为汤川理论完全地解决了核力机制问题, 也不能仅从核力理论的发展的角度来看汤川理论的意义. 在粒子物理学发展的前期, 汤川理论起了重要的历史作用.

3. 量子电动力学的发展

量子电动力学是在经典电动力学和量子力学的基础上发展起来的. 由于这两方面都已经发展得比较成熟, 在此基础上发展建立的量子电动力学也没有很大的不确定性. 但是很快理论就碰到了内在的困难, 表现在理论中出现一系列无穷大, 例如带电粒子的电磁自能和实验显现的电荷值, 甚至光子的电磁自能的计算中都出现发散到无穷大的问题. 这些结果在物理上是难以理解的, 但在理论上又是无法回避的, 这就是“发散”困难. 实际上有些发散困难在经典电动力学中就已存在, 而在量子电动力学中更加明显地表现出它是无法回避的, 它表现在利用量子电动力学来计算任何一个物理过程时, 几乎都会出现物理上无法理解的发散值. 这个发散困难在一段时间内是理论发展的主要障碍.

1946 年以后提出了重整化理论, 给出了系统地处理量子电动力学中的发散困难的办法, 使量子电动力学成为一个完整地描绘微观电磁相互作用的精确理论. 用重整化的量子电动力学理论计算纯电磁相互作用过程时, 除了粒子的物理质量和电荷值外, 没有其它参数. 由于所涉及的参数没有未定的, 因此计算结果具有确定性, 并且可以明确地用实验检验. 对电子反常磁矩的计算可以作为一个典型例子; 以玻尔磁子为单位, 狄喇克方程给出电子的正常磁矩应为 1, 实际测量值与 1 之差是“反常”磁矩. 实验测得电子的磁矩值为

$$(1.001159652209 \pm 0.0000000000031) \frac{e\hbar}{2mc},$$

用量子电动力学计算准到六级电磁作用修正为

$$(1.001159652359 \pm 0.0000000000282) \frac{e\hbar}{2mc}.$$

物理

理论计算值与实验测量值在十位有效数字内完全相同, 两者的差别完全在一个标准误差以内. 理论计算和实验测量在如此高的精度下符合, 这是很少有的. 考虑了重整化的量子电动力学是粒子物理学中处理电磁相互作用的精确理论. 量子电动力学的成功, 还为粒子物理学中更广泛的量子场论的发展提供了条件, 准备了基础.

4. 奇异粒子与奇异数

1947 年在宇宙线实验中, 首次观察到了后来被称为奇异粒子的粒子. 但是只有在 1954 年加速器实验中产生了奇异粒子后, 它们的“奇异”特性才展现出来并得到系统的研究. “奇异粒子”是当时新发现的一批粒子的总称, 它们具有以下几个明显的特性: (1) 它们是协同产生, 非协同衰变, 即在碰撞过程中至少两个奇异粒子一起产生, 然后每个奇异粒子再分别独立地衰变掉, 最终衰变成的粒子都是过去已知的粒子而不再有奇异粒子; (2) 它们是快产生、慢衰变. 奇异粒子产生于粒子的高能碰撞, 碰撞经历的时间量级为 10^{-24} s, 而它们衰变的平均寿命则长得多, 时间量级为 10^{-10} s 或更长, 两个时间量级差约 10^{14} 倍. 后来的理论分析表明, 奇异粒子的这些特性可以用客观上存在一种新的守恒量子数来概括. 这种新守恒量子数称为奇异数, 它只能取整数值. 过去熟知的粒子奇异数均为零, 称为普通粒子. 奇异粒子的奇异数不为零. 在强相互作用过程中奇异数守恒, 在弱相互作用过程中奇异数可以不守恒. 奇异粒子的产生是通过强相互作用过程, 时间很短. 奇异数守恒决定了协同产生的特点. 奇异粒子的衰变是通过弱相互作用过程, 时间较长, 但不再要求奇异数守恒了.

表 3

		奇 异 粒 子					
普通强子		奇 异 粒 子					
重 子	$p \quad n$	Λ	Σ^+	Σ^0	Σ^-	Ξ^0	Ξ^-
奇异数 S	0 0	-1	-1	-1	-1	-2	-2
介 子	$\pi^+ \quad \pi^0 \quad \pi^-$	K^+	K^0	\bar{K}^0	K^-		
奇异数 S	0 0 0	1	1	-1	-1		

初期发现的奇异粒子和那时熟知的普通强子以及相应的奇异数 S 的值如表 3 所示。

各粒子奇异数 S 的值是根据奇异数守恒的要求以及实验结果分析所赋予的。从这两方面的要求来说,各粒子的 S 值并没有完全确定下来。事实上如果把上面所给出各粒子的 S 值都乘一共同常数值作为新定义的 S 值,则上述要求仍满足;如果把上面所给出各粒子的 S 值再加一个强相互作用过程中守恒的相加性量子数作为新定义的守恒量,上述要求亦仍满足。为了避免这些不确定性带来的任意性,粒子物理学家实际上采取了自然约定,即以最初确定的上述粒子的奇异数值为标准来确定其它粒子的奇异数值。按照这样规定的奇异数值,不久就总结出强子的电荷 Q 、同位旋沿“第三方向”(注意这是指抽象的同位旋空间而言)的投影 I_3 、重子数 B (重子的 B 为 1,反重子为 -1 ,介子为 0) 和奇异数 S 有以下关系:

$$Q = I_3 + (B + S)/2,$$

称为盖耳曼-西岛关系。以后的实验充分证明这个关系的普遍性,这个关系在六十年代强子对称性及分类理论的探索中是一个重要的基本关系式。

奇异数的引入很好地解释了奇异粒子的特性。在这以前,粒子物理学中所认识到的守恒量除能量、动量、角动量、电荷外,按加法计算的守恒量只有同位旋的分量,但是同位旋的概念和粒子的电荷有一定的联系,而奇异数则完全是根据实验的规律性独立地总结出来的客观存在的守恒量。奇异量子数的下述两个特点对粒子物理学的发展是有启示意义的:(1)它是一个“近似”守恒的相加性守恒量,在强相互作用和电磁相互作用下严格守恒,但是在弱相互作用下可以不守恒;(2)与电荷不同,奇异数本身不是某种相互作用的“荷”,因此它的确定只能通过实验的分析总结,不能象电荷那样通过它所体现的相互作用性质的动力效应来测定。奇异数的存在和被认识给人们以启示:粒子物理学中丰富多采的内容表现之一就是自然界中客观上还可能存在其它一些反映粒子内部性质的量

子数,它们有可能是“近似”守恒量,有可能并不是某种相互作用的“荷”。事实上,1974年以后先后发现的粲数和底数,都是属于这类量子数。

5. 宇称不守恒问题

发现奇异粒子后,在对最轻的奇异粒子(即现在称为 K 介子的)衰变过程的研究中遇到了一个疑难,即“ θ - τ 疑难”。这疑难表现为:实验中发现了两种质量、寿命和电荷都相同的粒子 θ 和 τ ,衰变时, θ 衰变为两个 π 介子, τ 衰变为三个 π 介子。实验结果的分析表明,三个 π 介子的总角动量为零,宇称为负;而两个 π 介子的总角动量如为零,则宇称只能是正。因此从质量、寿命和电荷来看, θ 与 τ 似乎应是同一种粒子,但从衰变行为来看,如果宇称是守恒量,则 θ 和 τ 不可能是同一种粒子。

1956年,李政道和杨振宁全面分析后指出,这个疑难的焦点在于认为微观粒子的运动过程中宇称守恒。但是仔细分析实验根据可以看出,在强相互作用和电磁相互作用过程中宇称守恒是经过检验的,在弱相互作用过程中,宇称守恒并没有得到判定性检验。李政道和杨振宁提出,这个疑难产生的原因在于弱相互作用过程中宇称可以不守恒。他们进一步建议可以通过钴 60 的衰变实验来对这一点进行判定性检验。实验的原理是利用核磁技术使钴 60 的原子核极化,即原子核的自旋方向沿确定方向排列,观察钴 60 通过 β 衰变放出的电子的方向分布。如果宇称是守恒的,则包含自旋轴正向的半球方向内射出的电子应与包含自旋轴负向的半球方向内射出的电子数相近,即左右对称;反之如果这两个半球方向射出的电子总数不相等,即表现出明显的左右不对称性,则表明弱相互作用过程中宇称可以不守恒。1957年吴健雄进行了这个实验,证实了李政道和杨振宁提出的分析判断。

过去人们对于守恒定律的理解比较简单,弱相互作用宇称不守恒的确立告诉人们:各种守恒定律的适用范围可以不同,有的物理量在一切相互作用过程中都是守恒的,而有些物理量则只在某些相互作用过程中才是守恒的。在

研究各种守恒定律时，无论涉及的是相加性守恒量还是相乘性守恒量，都需要注意和研究这些守恒定律的适用范围。

从这几个重要进展可以看到粒子物理学所讨论的现象，并且要求人们用新的概念和观点去理解和认识。粒子物理学中最常见的一类粒子运动转化的现象是粒子的衰变，例如 $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ ，它是通过弱相互作用而进行的衰变，具体是 π^+ 介子和正电子 e^+ 以及中微子 ν_e 之间的弱相互作用。但是 π^+ 介子存在时，并不存在 e^+ 和 ν_e ，而 e^+ 和 ν_e 出现的时候， π^+ 早已不存在了，它们既然并不同时存在，怎么能相互作用呢？可见，若用旧的物理图象去理解粒子的运动转化现象，就会不可避免地遇到困难了。

量子场论给出了一个新的基本物理图象，概括如下：

(1) 每种粒子对应一种场，场没有不可入性，它充满全空间。对应各种不同粒子的场在空间中互相重叠。例如，对应于 π 介子、电子 (e)、中微子 (ν_e) 和光子 γ 的场分别为 π 介子场、电子场、中微子场和电磁场，它们互相重叠地充满全空间。

(2) 场的激发状态表现为相应的粒子，场的不同激发状态表现为粒子的数目和运动状态不同。例如，电子场的激发状态可以表现为一个电子，也可表现为多个电子。

(3) 一般说来，场用复数描写，与此相应，场的激发也用复数描写。互为复共轭的两种激发表现为粒子和反粒子互换的两种物理状态。例如，电子场的一种激发状态表现为一个电子 e^- ，与之成复共轭的激发状态表现为一个能量、动量相同的正电子 e^+ 。

(4) 场的能量最低状态称为基态。所有的场都处于基态时为物理真空。由此可见，真空并不是“真”的“空”无一物。真空态时，全空间充满各种场，只是由于所有场都处于能量最低状态而不可能表现出任何释放能量的物理效应。

(5) 相互作用存在于场之间，无论是处于基态还是处于激发态的场都同样地与其它场相

物理

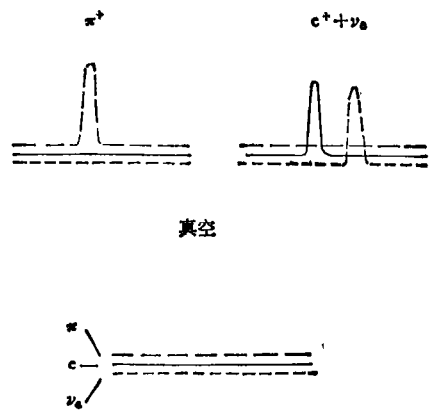


图 1

互作用。

根据这里给出的基本物理图象，反过来再来看 $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ 的衰变过程。在示意图(图 1)上，我们用一条线代表一种场，水平直线代表场处在基态，水平线上的隆起峰代表场的激发，表现为一个粒子。下图为真空，即所有场都处于基态的情形。上图描写 $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ 的衰变过程。开始时， π 介子场处于激发状态，表现为存在一个 π^+ 介子。电子场和中微子场则处于基态，表现为没有电子和中微子(或相应的反粒子)。经过 π 介子场与电子场和中微子场之间的弱相互作用， π 介子场可以跃迁到基态而引起电子场和中微子场的激发(即 π 介子场的激发能量传给电子场和中微子场)，表现为 π^+ 介子消失而产生了一个 e^+ 和一个 ν_e ，这就是 $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ 衰变过程的场论图象。在这个图象中，衰变过程得以发生的原因是场之间的弱相互作用。正因为 π 介子场与电子场和中微子场之间存在弱相互作用的联系，才使 π 介子场的激发状态的改变引起电子场和中微子场激发状态的改变而表现为 $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ 衰变过程。

三、强子的内部结构

六十年代初期，高能物理实验中发现了许多很不稳定称为“共振态”的粒子。这些共振态的寿命一般在 $10^{-22} - 10^{-24}$ s 的范围，远远短于

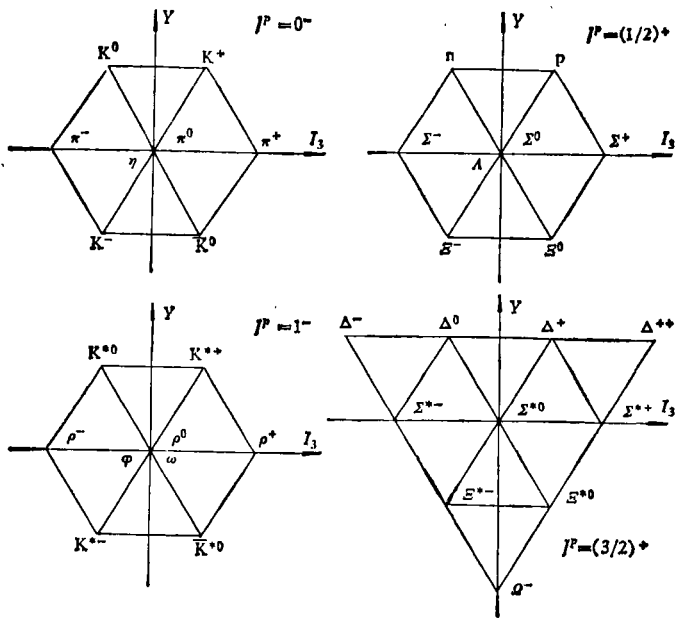


图 2

过去已发现粒子的寿命。这些共振态可以看作是一些可以通过强相互作用而衰变的不稳定粒子。大量不稳定粒子的出现促使人们研究它们之间的对称性联系和分类问题。这些新发现的不稳定粒子都是强子，它们各自的性质都有特定的同位旋和奇异数等量子数来描写，需要研究的是同位旋和奇异数通过怎样的对称性联系起来。

对大量实验结果的理论分析很快表明，一个被称为 $SU(3)$ 群八重法理论的强相互作用对称性理论取得了成功。按照这个理论，强相互作用近似具有在某一抽象的三维复空间中转动不变性。这个理论要求，无论介子还是重子，都分成若干族，每一族构成 $SU(3)$ 群的一个不可约表示。每一族内各粒子的自旋和宇称相同，质量不同但有确定的联系，同位旋和奇异数不同但其值完全由族的性质所决定。这个理论还要求强子的族所构成的 $SU(3)$ 群的表示都是由八维表示或八维表示直乘所得的表示，亦即每族中所包含的粒子数只能是 1 个、8 个、10 个或 27 个等。八重法理论解释了当时发现的大量介子和重子的分类，而对这个理论的判定性检验则是 Ω^- 粒子的发现。

当时，实验上已发现自旋为零、宇称为负的介子共有八个，它们的同位旋第三分量 I_3 和超荷 Y ($Y = B + S$) 量子数在图 2 上表示为六边形。这表明，它们应属于按八重法理论所要求的由八个粒子组成的族。类似地，当时实验上已发现自旋为 $1/2$ ，宇称为正的重子也共是八个，它们的 I_3 和 Y 量子数分布也和前者相同，它们也属于按八重法理论所要求的由八个粒子组成的族。自旋为 1，宇称为负的介子有九个，从量子数的分布来看，它们应属于一个由八个粒子组成的族和一个粒子组成的族。这几种自旋的粒子的量子数分布确如八重法所要求的那样，并且每族内诸粒子之间的

关系也符合八重法理论的预言。这些都是对于八重法理论的重要支持。

当时实验上已发现自旋为 $3/2$ ，宇称为正的粒子共九个，它们都是短寿命的共振态。从它们的量子数分布情形来看，应属于八重法理论中所要求的由 10 个粒子组成的族，并且其质量也符合八重法理论的预言。还有一个尚未发现的粒子。根据八重法理论可以预言这个未发现粒子的性质，包括这个粒子的质量、带电状态、同位旋、奇异数、相互作用性质和衰变行为等。理论给出：尽管已发现的九个粒子都是可以作强衰变的不稳定粒子，但是这个未发现的粒子却应只能作弱衰变，从而将表现为一个稳定粒子，被称为 Ω^- 粒子。这个特殊的稳定粒子是否确实存在就成为对这个理论的判定性检验。1964 年实验中果然发现了 Ω^- 粒子，其质量和寿命的现有实验值分别为 (1672.45 ± 0.32) MeV 和 $(0.819 \pm 0.027) \times 10^{-10}$ s，所有的性质都和理论预言相符合。这样，八重法理论得到了判定性的检验。

1964 年盖耳曼和茨威格分别独立地提出夸克模型，认为当时所发现的所有强子都是由更基本的被称为夸克的粒子所组成。夸克共有

三种，这三种夸克和反夸克以各种不同的方式组合成的复合态就表现为各种不同的强子。夸克模型对八重法理论所描述的联系的物理来源给出了合理的解释，同时自然说明了不存在由十个或二十七个介子所组成的族以及不存在由二十七个重子所组成的族的原因，而后者是八重法理论不能说明的。

夸克模型提出后，用非相对论量子力学于研究夸克模型所得到的定量和半定量的结果表明：夸克模型可以比八重法理论给出更多的预言并且与实验大体符合。1965年到1966年，我国的高能物理理论工作者，研究并提出了强子的相对论性结构模型，即层子模型，把强子结构模型建立在符合相对论性普遍要求的基础上，得出了一系列新的并且符合实验的预言。国外相类似的工作也迅速发展，到七十年代初期，强子结构理论取得的成功以及比较直接显示强子有内部结构的实验进展，使高能物理学家逐渐普遍地接受强子有内部结构的观点，并且促使相当大的一部分实验和理论研究工作转到这个方面来。这样，高能物理的发展进入了一个新的阶段。

在七十年代中，由于实验和理论的研究工作取得了一系列重要进展，使人们对强子内部结构规律的认识逐渐明朗和深入。概括起来，可以归结为以下几点：

(1) 强子是由更深层次粒子组成的复合粒子，组成强子的粒子中，有一类统称为层子(或夸克)。层子的自旋为 $1/2$ ，其电荷以质子电荷为单位表述时为 $2/3$ 或 $-1/3$ 。层子按电荷、弱相互作用性质以及在相互作用中显现的质量加以区分，可以分为若干种，这种区分称为“味”。现在实验上已表明组成强子的层子有五味，理论上倾向于至少应有六味。这五种味的层子分别称为：上层子(u)、下层子(d)、奇异层子(s)、粲层子(c)、底层子(b)。理论上认为可能存在的第六种层子为顶层子(t)。

(2) 每种味的层子按其在强相互作用中的地位区分为三种，这种区分称为“色”，即每种味的层子又都分为“红”、“蓝”、“绿”三色。

(3) 带电粒子之间的电磁相互作用是通过交换光子来实现的。与此类似，层子之间的相互作用是通过交换胶子来实现的。带电粒子所带电荷决定它参与电磁作用的强弱。与此相应，夸克所参与的强相互作用的行为和强弱由夸克所带色荷来决定。电荷只有一种，这决定了光子只有一种。夸克的色荷有三种，这决定了胶子有八种，即 3^2-1 种。

(4) 从最低级近似来看，介子由一个层子和一个反层子所组成，重子由三个层子所组成。这些层子和反层子通过交换胶子而相互作用。在强子内部，总是不断地有胶子被放出和被吸收，并处于统计平衡的状态。因此在强子内部除了有上面所说的层子和反层子外，还存在数目未知然而确定的胶子。在强子内部既然存在胶子，胶子可以转化成层子反层子对，而层子反层子对又可以湮没为胶子，因此在强子内部也还应存在数目未知然而确定的层子反层子对。这样存在的每一个层子反层子对在强子内部并不要求结合成一个小集团，但总起来说，层子的数目总和反层子数目相等。为了将上述两处所谈的层子加以区分，前者称为价层子，后者称为海层子或微层子。“价层子”的名称是从化学中借来的，化学中称原子结构最外层没有填满壳层的电子为价电子，它决定原子的化学性质。价层子则是强子中少数味和数目都完全确定的层子(或反层子)，它们决定该粒子的性质。换言之，各种强子的不同反映在它们的价层子(或价反层子)不同上。每个强子内部所有价层子(和反层子)的色性质是保证其总合为“白色”，即整体对外来说相当于无色的(所有色都消光)。每个强子内部所有价层子(和反层子)的味性质则不一定是无味的。海层子是强子中数目不定的层子和反层子，任何时刻其总合是“无色无味”的。海层子的数目稳定是统计平衡的结果。

(5) 尽管强子是由层子和胶子组成，但是迄今为止实验并没有直接观察到自由的(即单独存在的)层子或胶子。这是因为色相互作用具有“禁闭”的性质，即带色的粒子之间的色相

相互作用并不随距离的增加而迅速减弱,从而使粒子最终互相独立而处于自由状态。换言之,只有由层子和胶子组成的无色系统才可以自由地单独存在,带色的层子和胶子只能存在于这个系统内部。色相互作用的这种禁闭性质最先是根据实验结果的启示而提出的理论假设,随后理论上作了很多试探去证明,但是迄今在理论上并没有最终严格地证明。尽管如此,在现今对强子结构的研究中,色禁闭仍然是被普遍接受的基本假定。

虽然层子和胶子被禁闭在强子内部,但是在高能的物理过程中,被禁闭的这些层子和胶子在强子内部又近似地可以看作无相互作用。色相互作用的这个性质称为“渐近自由”,它可以从理论上导出,它的许多推论已经得到实验的验证。

对高能实验结果的分析得出,高能强子内部胶子和价层子所带的动量分别约为强子动量的一半,海层子所带的动量只约占强子动量的百分之五左右。这个结果也表明,如果认为强子只是由价层子所组成,这种看法即使是在初级近似下也是过于简单了。

下面给出一个质子的示意图(图3)。质子有三个价层子 U, U, D , 我们用大写符号代表;用小写符号 u, d, s, c, \dots 代表海层子;用 g 代表胶子。这些粒子在质子内部的分布是分散的,色禁闭的性质使它们在一定的边界之内。价

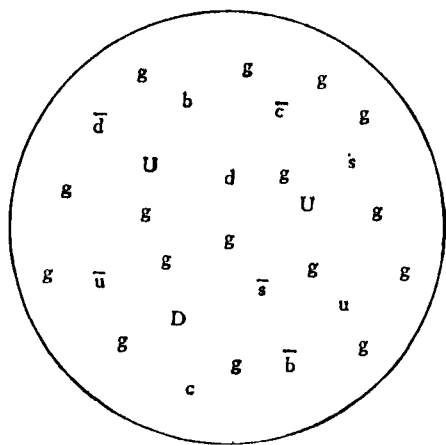


图 3

层子的种类和个数确定,即只是图中的 U, U, D 。海层子的个数不确定,但由于总起来要满足“无色无味”的要求,平均来说,三种色的海层子(和海反层子)数目相等,各种味的海层子(和海反层子)数目相等。胶子的数目也是不确定的。

在强子结构理论逐步发展完善和成熟的过程中,有几个重要进展,概述如下:

(1) 深度非弹性散射和分子模型

七十年代初期在高能电子和质子碰撞实验中得到的结果可以由假定强子内部电荷是集中在一些点状粒子(部分子)上来解释。进一步的实验和理论研究表明,部分子实际上就是夸克(层子),它显示出色相互作用的渐近自由性质,还提供了色禁闭存在的可能性。这方面的研究给出了强子由价层子、胶子和海层子反层子对三部分组成的物理图象。

(2) J/ψ 粒子和 Υ 粒子的发现

1974年11月,美国布鲁克海文实验室和斯坦福直线加速器中心同时发现一种新中性介子,称为 J/ψ 。 J/ψ 的质量为 (3096.9 ± 0.1) MeV,宽度为 (63 ± 9) keV。 J/ψ 粒子的寿命比质量相近的其它介子约长 10^3-10^4 倍。这种特殊稳定的性质引起了人们的重视。实验和理论的研究很快给出判断: J/ψ 是由第四种味的层子——粲层子 c 及其反粒子 \bar{c} 为价层子的介子。 J/ψ 的发现显示出自然界至少存在四种味的层子。在 J/ψ 的发现启示下,1977年实验上又发现了一种新粒子 Υ ,其质量为 (9456 ± 10) MeV,宽度为 (42 ± 15) keV。 Υ 是由第五种层子——底层子 b 及其反粒子 \bar{b} 为价层子的介子。理论上的研究给出,自然界存在的层子味数应为偶数,既然 Υ 的发现显示自然界至少存在五种层子,人们相信应该还有第六种层子——顶层子 t 存在。近几年来,高能物理实验中普遍注视的一个问题是找以 t 和 \bar{t} 为价层子的介子。

(3) 喷注现象的研究

高能粒子碰撞时产生大量粒子的现象称为多重产生现象。在多重产生现象的研究中发现往往新产生的大量粒子并不是均匀地向各方向

分散飞出,而是集中向某些确定方向飞出,这个现象称为喷注现象.最先观察和研究的是二喷注现象,即观察到两个方向的喷注.对二喷注现象的理论解释为:高能碰撞产生一对层子和反层子,但由于色禁闭的性质,这一对层子和反层子不能自由飞出.它们通过色相互作用再激发发出一些海层子反层子对,并各自配成无色后分开.由于能量很高,每一个无色系统表现为许多个强子,形成喷注.

因此,喷注现象既作为层子存在的间接验证,又作为色相互作用禁闭性质的间接验证而受到重视.1979年发现的三喷注现象则进一步作为胶子存在的间接验证而受到重视.

按现有理论,介子中有一对价层子和价反层子,那么就有可能存在有两个价层子和两个价反层子的粒子.这种粒子基本性质和介子相似,但有些性质又有所差别,并可以通过细致的实验来判断,这类粒子被称为重子偶素.到现在为止,实验上已发现的粒子中还未辨认出有重子偶素.

按现有理论,胶子之间也有色相互作用,因此就有可能存在由胶子组成的复合粒子.亦即在这种粒子中没有价层子,然而却有价胶子,这种粒子称为胶球.胶球的基本性质和中性介子相似,但其衰变行为又和中性介子有所不同,可以通过实验的测量来分析判断.1982年实验上发现了两个粒子 τ 和 θ ,人们认为很可能是胶球,但有待进一步的实验来作判定.

四、相互作用的统一理论

微观粒子之间存在四种相互作用,这四种相互作用之间存在什么联系,它们是否可以从更深刻的角度统一起来,一直是粒子物理学家关心的问题.爱因斯坦在建立广义相对论后,花很长时间致力于统一场论的研究,他希望能建立一个电磁作用和引力作用的统一理论.爱因斯坦的这个研究并没有取得成功,现在看来,这主要是因为物理学的发展在当时条件还不成熟.当时电磁作用和引力作用的宏观规律已经

认识得比较清楚,但是对于弱作用和强作用这两种只在微观范围才明显显现出来的短程相互作用的规律还认识得很少.粒子物理学近二十年的发展表明,首先成功地统一起来的是弱相互作用和电磁相互作用.

1957年实验证实弱相互作用宇称不守恒之后,提出和建立了普适费米弱相互作用V-A理论.这个理论在当时实验的基础上,给弱相互作用的规律以完整的描写.尽管这个理论得到大量实验的支持和验证,但是从理论上反映出的一些问题表明,这个理论只能是在一定范围内的近似理论,而进一步的探讨需要更深刻的理论来代替.一个重要的试探是引入中间玻色子,即假定弱相互作用是通过交换中间玻色子来实现的.弱相互作用的中间玻色子理论不仅可以解释普适费米弱相互作用V-A理论所能解释的各种弱相互作用现象,并且还使弱相互作用和电磁相互作用这两种在力程、强度和作用规律上截然不同的两种相互作用之间显现出某些相同之处.

弱相互作用和电磁相互作用的这些相似之处提供了一种可能性,即弱相互作用和电磁相互作用可以统一起来.考虑到电磁相互作用是一种规范相互作用,统一的弱电相互作用亦应为规范相互作用.1961年格拉肖首先提出了一个弱电统一模型,1967年和1968年,温伯格和萨拉姆把这个模型发展完善.这个理论除了可以解释已知的弱相互作用和电磁相互作用的基本规律外,并给出了一系列新的预言.这个模型预言当时实验上尚未观察到的中性流弱作用的存在,并预言中性流弱作用的强度和性质唯一地由一个未知参数决定.1973年实验证实中性流弱作用的存在.1978年,九个独立的实验组对中性流弱作用的强度和性质进行了测量,得到的参数数值在误差范围内完全一致,这样这个模型就得到了实验的验证.

1978年以后,虽然中性流弱相互作用过程的实验研究已对G-W-S模型给出了判定性检验,但是对G-W-S模型的更直接的检验则应是传递弱相互作用的中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 的发射

现。根据低能中性流弱作用确定的参数 $\sin^2\theta_w$ 的值,可以预言W粒子和 Z^0 粒子的质量 m_w 和 m_z 。利用1981年定出的 $\sin^2\theta_w=0.222\pm 0.017$, 给出预言值: $m_w=(82.0\pm 2.4)$ GeV, $m_z=(93.0\pm 2.0)$ GeV;利用1982年定出的 $\sin^2\theta_w=0.215\pm 0.012$, 给出预言值: $m_w=(83.0\pm 2.5)$ GeV, $m_z=(93.7\pm 2.1)$ GeV。由于这些质量约为质子的87—100倍左右,所以一直到1982年才有可能在用加速器所进行的实验中产生。1983年上半年,欧洲核子研究中心先后宣布发现了W粒子和Z粒子。两个实验组同时在作这方面的工作,所测得的W粒子和Z粒子的质量分别为 $m_w=(80.9\pm 1.5\pm 3.0)$ GeV, $m_z=(95.6\pm 1.4\pm 3.0)$ GeV 和 $m_w=(81.0\pm 2.5\pm 1.3)$ GeV, $m_z=(91.9\pm 1.3\pm 1.4)$ GeV。这两个实验组测得的结果和根据G-W-S模型给出的预言在误差范围内完全符合,这是对G-W-S模型的直接验证。对W粒子和Z粒子性质的测量研究不仅对进一步验证弱电统一模型有重要意义,并对理论应如何进一步发展也将提供重要的启示。

弱电统一模型的成功促进了大统一理论的研究,大统一理论是指把强相互作用和弱电相互作用统一起来的理论。现在国际上提出了许多种大统一模型,各有不同的特点。但是迄今为止,并没有任何一个大统一模型得到实验的判定性检验。比较起来, $SU(5)$ 大统一模型可以概括的已知规律很多,同时又不引入过多的未发现的粒子,比起其它模型来,它处于更重要的地位。 $SU(5)$ 模型的基础是强相互作用的色动力学理论和弱电统一模型,它可以解释这两个理论能解释的实验,同时还可以给出一些进一步的预言。一个重要的新结果是可以算出弱电统一模型中未知参数 $\sin^2\theta$ 的值,计算给出的预言值为 0.214 ± 0.025 ,1982年实验测得的值为 0.215 ± 0.012 ,两者很好地符合。 $SU(5)$ 模型中最重要的和过去理论不同的论点是预言质子可以衰变,其平均寿命的值取决于模型的具体细节和采用的假定。对于不带来过多不确定性的最小 $SU(5)$ 模型,预言其值小于 1×10^{34}

yr。现在关于质子衰变寿命的实验值为长于 10^{32} yr,因此现有实验并不有利于 $SU(5)$ 大统一模型。

如果在 $SU(5)$ 大统一模型内调整模型的某些假定,可以把质子平均寿命的预言值变长,甚至可以改变为预言质子不衰变。如果采用对称性比 $SU(5)$ 模型的更大的大统一模型,对于质子平均寿命的预言值也会有所不同。然而所有这些改变,在把质子平均寿命的预言值改变的同时,又给理论带来很多新的有待验证的预言。从现在实验检验的情况来看,显得需要付出的代价过大。质子是否确能衰变?如果能衰变,其平均寿命是多少?这不是短期内可以作结论的。但是迄今实验结果在质子衰变问题上并没有对现有的大统一理论提供有力的支持。

近十年来粒子物理理论的一个重要探索方向是关于超对称理论的研究。超对称性是一种把自旋为半整数的粒子与自旋为整数的粒子联系起来对称性。超对称性理论的一个探索方向是建立超引力理论,即在超对称性的基础上把四种相互作用都统一起来的理论。近年来,在超对称大统一模型方面、亚夸克层次的超对称大统一模型方面以及关于超对称性理论基础的研究方面都进行了不少工作,但是总起来说还处于探索阶段,还没有一种模型得到判定性的检验。由于在大统一理论范围内,各种可能的模型都已被试探研究过,可以作的理论探索都已比较充分地进行过,因此理论探索的注意力已从大统一理论转移到超对称理论方面来。这个转移过程从1980年就已明显地表现出来,到1982年这个转移过程就已比较完全了,这是近年来理论发展的一个重要动向。

七十年代末到八十年代初,粒子物理理论的探索中曾有许多工作探讨层子(夸克)和轻子的内部结构,提出了许多可能的“亚层子”模型,并有许多理论物理学家对这类模型在实验上和理论上所受的限制进行了普遍讨论。这是一个十分吸引人的方向,曾一度表现得相当活跃,特别是探索在亚层子层次建立大统一模型的试

探。但是,进一步的发展遇到了困难,困难的来源之一是迄今为止,没有任何实验迹象显露出层子有内部结构,这一点和六十年代研究强子结构时所遇到的情况完全不同。

五、粒子物理发展的展望

粒子物理是一门实验的科学,粒子物理学的发展归根结底和实验的发展分不开,展望粒子物理未来的发展时,也和未来高能物理学实验研究的发展分不开。根据发展现状可以作以下的展望。

1. 关于W粒子和Z粒子的实验研究将受到很大的重视,这两个粒子的发现是对弱电统一理论的直接检验。不仅如此,由于在弱电统一理论中,W粒子和Z粒子的性质已被描述得非常确定,因此对W粒子和Z粒子各种性质的精确测定将可以为理论如何进一步发展提供启示,例如它们质量的精确测量可以为统一理论的进一步发展提供启示,它们的宽度则直接和自然界中存在多少种轻子和层子相联系,并且最终和宇宙论的探讨相联系。因此,W粒子和Z粒子物理的发展将有一段时期是实验和理论研究所关注的中心课题之一。

2. 在强子物理学的发展中人们将关心寻找顶层子的复合态。顶层子如果存在,它的质量应大于20 GeV。然而从现有理论来看,顶层子应存在,并且其质量应不超过100 GeV。除了找寻顶层子的复合态外,人们还会注意找寻新类型强子,其中包括胶子球和重子偶素的辨认。在关于介子共振态谱的研究中,将会把更多注意力放在寻找和辨认胶子球的研究上。胶子球是在尚未发现的几种新类型强子中比较有希望容易在实验中发现的,而胶子球的发现又将对量子色动力学的直接验证,从而受到特别的重视。现在实验上已发现的粒子中,至少有两个被认为是很有希望的胶子球候选者,人们期待着实验和理论的分析给出最后的判定。

3. 近年来在超高能宇宙线实验中发现了一系列新现象。1982年新运转的加速器对撞机

的能量已接近于这个超高能区域。因此今后在利用加速器所进行的高能物理实验中,人们会集中力量注意考察这些新现象是否确实存在并展开相应的研究。

在对于超高能实验新现象进行研究时,如果这些新现象的存在被进一步的实验所证实,则它们不可能是由于产生了个别新粒子而带来的。有两个可能特别值得注意:(1)新现象是和轻子、层子是由更深层次粒子组成有关,亦即这些新现象是物质的“亚层子”层次结构的反映;(2)新现象是在高能下大量粒子产生时的集体现象,即相干性所带来的关联效应。不管是哪一种,对粒子物理理论的发展都是重要的。

4. 还有一些特殊的新现象和新粒子的实验,仍会在过去研究的基础上继续进行并受到重视。例如,关于质子寿命的测量、关于中微子质量和中微子振荡现象的实验、关于磁单极子的探寻,关于自由分数电荷粒子的探寻等。

5. 由于高能物理实验发展到现在,每一个实验都要许多人合作,周期很长,费用很大,要求的技术设备条件很高、很严。这些情况决定了高能物理实验中得到新的成果的条件日益困难,这也就迫使理论探索和研究上具有更大的相对独立性。这个特点使某些暂时不直接和实验联系的抽象理论也将得到重视和发展。从目前的发展状况来看,关于规范场论的研究,关于非线性场论的研究、关于集体相干现象场论的研究、关于超对称理论的研究和关于临界现象的场论研究等都可能成为受到重视的发展方向。事实上,上面所举的这些方向,已不单纯地只属于粒子物理学的范围,有些和原子核理论的发展也有联系,有些已成为统计物理学的重要组成部分。

6. 过去几年曾相当活跃的关于“亚层子”模型的探索,在进一步发展时遇到的主要困难之一是没有任何实验迹象显露出层子有内部结构。因此,在今后的发展中,粒子物理学家会敏感地注视着显露层子内部结构的一切实验迹象。任何这方面的进展势必会促使关于“亚层

(下转第698页)