

弱作用与电磁作用的统一理论

曹 昌 祺

(北京大学物理系)

近代物理学中一个引人思索的问题是,所有的物理作用能否用一个统一理论来描述?在物理学的发展历史中还有一个长期受到注意和引起争论的问题:所谓的真空是什么?是不是空无所有?表面看起来,这是两个完全无关的问题。但人们在探索弱作用与电磁作用的统一理论的过程中,却发现这两个问题间有着某种密切的联系。

到现在为止,已知的物质间的基本作用共有四种,即引力作用、电磁作用、弱作用和强作用。引力作用主要表现在宏观物理过程中,电磁作用不仅表现在宏观过程中,而且还在微观物理过程中占有极其重要的地位。无论是在原子、分子物理和凝聚态物理中,还是在光学和化学中,所涉及到的物质间的基本作用都只是电磁作用。强作用和弱作用是由于核物理的发展在三十年代后才开始研究的。使质子和中子结合成核的作用就属于强作用,而导致核的 β 衰变的作用则是弱作用。

在量子力学建立以后,接着又发展了量子场论,以解释光的量子化的实验现象。到四十年代后期,电磁作用的量子理论——量子电磁场理论(也称作量子电动力学)已发展得比较成熟。它的理论结果与实验符合得非常好,成为最可靠的物理理论之一。

至于弱作用,经过多年的实验和理论研究,到五十年代,人们对它的性质也已有了一定的了解。1956年,李政道和杨振宁为解释有关K介子衰变的一些实验现象,提出了弱作用宇称不守恒的假说。不久得到了实验证实,使人们对弱作用的认识又前进了一步。

在此基础上, Feynman 和 Gell-Mann, Ma-

rshak 和 Sudarshan 建立了弱作用的 V-A 理论,解释了大量实验,获得很大成功。这个理论把弱作用归结为弱流-弱流间的直接作用(本文中所有的流都是指四维流),并且只存在于左手费米子之间(粗略地说,左手费米子就是左旋费米子。但左旋和右旋的分法不是洛伦兹不变的,而左手与右手的分法则是洛伦兹不变的)。V-A 理论虽然能够解释当时弱作用方面的实验结果,但它本身还不是一个完整的理论。首先,它不可以重正化,从而只能计算初级近似值。如用它计算高阶修正,将不能避免发散困难。其次,从 V-A 理论计算出的初级近似值虽然在低能领域与实验相符合(直到当时,所有关于弱作用的实验都属于低能领域),但一旦过渡到高能领域的弱过程(质心系能量为几百 GeV),理论值肯定要与实验结果相矛盾,因为它的值将超过么正性所允许的极限。

V-A 理论的成功表明,弱作用与电磁作用有一个重要的相似之处,即流-流的耦合作用。我们知道,带电粒子间的电磁作用也可表示成电流-电流(四维)耦合的形式。不过两者之间又有如下重要的差别:

(1) 力程不同。V-A 理论描述的是一种直接作用,即力程为零。电磁作用则为一种长程作用(力程为无穷)。在一种作用是通过某种粒子来传递的情况下,其力程即为该粒子的康普顿波长。光子的静质量为零,故其康普顿波长为无穷大。

(2) 时空对称性不同。电磁作用具有左、右对称性,即电磁过程中宇称是守恒的。弱作用不仅左右不对称,而且是最大限度的不对称,即右手费米子完全无弱作用。

(3)电磁作用是一种规范作用,而 V-A 理论不是。

光子是一种自旋为 1 (以 \hbar 为单位) 的波色子,它同电流相耦合。电流与电流之间的作用就是通过光子传递的。V-A 理论中的弱流-弱流耦合形式使人们想到弱作用也可能是通过某种自旋为 1 的玻色子来传递的。这种粒子被称为中间玻色子。它们应当很重(例如为质子质量的几十倍),从而使弱作用力程很短,看起来象是直接作用。从弱流的性质来看,中间波色子应当带电,通常记作 W^+ 和 W^- 。这又引起 W^\pm 与光子间耦合的问题,使得一些物理学家相信,只有将弱作用与电磁作用结合起来考虑才能得到一套完整的理论。这就导致了弱作用与电磁作用统一理论的研究。

统一理论是在 V-A 理论的基础上发展起来的。它的理论基石是量子规范场理论和对称性自发破缺的概念。下面我们就分别对这两者作一些介绍。

在经典电动力学中,规范变换是指 $A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) + \frac{\partial}{\partial x_\mu} \alpha(x)$ 的变换(x 代表时空坐标)。在量子力学中,规范变换的意义有进一步发展。我们知道,一个粒子的波函数其位相可以任意改变一个常数,即 $\psi(x)$ 变换到 $e^{i\theta_0}\psi(x)$ 时,所代表的物理状态不变。可不可以允许这种相因子随时间、地点取不同的值呢?也就是说,可不可以将前述变换推广到 $\psi(x) \rightarrow e^{i\theta(x)}\psi(x)$? 从相对论观点来看,这种推广是自然的,在类空间隔,由于不存在任何因果联系,位相因子应该可以彼此独立地取值。在量子力学中,由于基本作用就是电磁作用,这种推广确实是可以的。量子力学的方程及其解的物理内容在下述变换中保持不变:

$$A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) + \frac{\partial}{\partial x_\mu} \alpha(x),$$

$$\psi(x) \rightarrow e^{i \frac{q}{\hbar c} \alpha(x)} \psi(x).$$

这一联立变换就是量子力学中的规范变换。

我们知道, ψ 的位相随时空的变化与粒子

物理

的正则动量 p_μ 相联系,即

$$p_\mu \longleftrightarrow -i\hbar \frac{\partial}{\partial x_\mu},$$

在经过上述变换后,正则动量 p_μ 改变了,但动量并不是 p_μ 而是 $p_\mu - \frac{q}{c} A_\mu$, 它在上述变换中保持不变。

杨振宁和 Mills 在 1954 年, Shaw 在 1955 年,分别提出这样的问题:电磁作用的上述特性能否推广到具有内部对称性的其他相互作用上去? 内部对称性的概念是在核物理研究中发展出来的。在核物理中,根据实验结果的启示,提出了一种叫同位旋的内部对称性。它把质子和中子看作是同一种粒子(称为核子)的两种不同的状态,同样把 π_+ , π_0 和 π_- 看作是一种粒子的三种不同状态,对称性的意思是,就强作用而言,我们并不能定出一个物理标准来判定一个核子究竟是质子还是中子。我们只能通过某种指定,例如指定某个核子为质子而将待定的核子与它相比较来作出判断。在强作用中,中子能吸收 π_+ 而质子不能。能不能以此作为判定的标准呢? 不能,这是因为还存在一个对称的情况:质子能吸收 π_- 而中子不能。由于两者是对称的,上述办法并不构成一个判断标准,除非我们事先能判定一个 π 介子究竟是 π_+ 还是 π_- 。而这同样需要作某种指定。

当然,在现实中我们能够根据某种物理标准直接定出一个核子是不是质子(例如通过与电磁场的作用或测量质量),这是因为电磁作用和质量差破坏了这种同位旋对称性。

就强作用而言,我们还可以更普遍地把质子和中子两种状态的某种叠加态当作是新的质子,把另一种与上述态正交的叠加态当作是新的中子:

$$|p'\rangle = a_{11}|p\rangle + a_{12}|n\rangle,$$

$$|n'\rangle = a_{21}|p\rangle + a_{22}|n\rangle,$$

并在将 $\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$ 变换成 $\begin{pmatrix} p' \\ n' \end{pmatrix}$ 的同时将 $\begin{pmatrix} \pi_+ \\ \pi_0 \\ \pi_- \end{pmatrix}$ 也变

换成相应的 $\begin{pmatrix} \pi'_+ \\ \pi'_0 \\ \pi'_- \end{pmatrix}$ 。实验表明,在上述变换下,强

作用规律性与原来的相同。也就是说,当我们把 p' 当作质子,把 n' 当作中子,把 π'_+ 当作正 π 介子……时,不会发现与原来有什么异样。

上述变换可以看成是某种标架变换。要指出的是,在这里标架的取法在全空间是一致的,并且不随时间变化,能不能容许上述标架的取法随着地点和时间变化而不同呢?即能否允许上述变换从整体性的改成定域性的?杨振宁和 Mills 及 Shaw 的研究表明,这只是在作用是通过规范场传递的条件下才可能。在内部对称性由非阿贝尔群描述的情况下,相应的规范场称为非阿贝尔规范场,它比电磁场要复杂得多,后者属于阿贝尔规范场。当标架作定域变换时,非阿贝尔规范场本身也要作相应的变换,使运动方程式和物理结论保持不变。这种不变性就叫作非阿贝尔规范不变性。

这种非阿贝尔规范场理论虽然很吸引人,但对它进行量子化时却发生了困难。因为从哈密顿动力学体系来看,并非规范场的所有分量都具有动力学变量的地位,而非阿贝尔规范场又具有比阿贝尔规范场更复杂的性质,它的量子化不能仿照量子电动力学的办法来解决。直到 1967 年,非阿贝尔规范场的量子化问题才由 Faddeev 和 Popov 等完满解决。

通常从经典理论过渡到量子理论,是将描述物理量的普通数换成不可对易的量(算符)。这种方法可以称为算符量子化方法。四十年代, Feynman 等发展了另一种量子化方法,称为泛函积分量子化(或称路径积分量子化)。在这种量子化中,不需要引入算符,粒子的运动仍用路径表示,但与经典力学不同的是,粒子从一点到另一点,不是通过某个确定的路径,而是通过无穷多个路径,每个路径都具有一定的几率振幅(不是几率,因而可以发生干涉)。在我们计算粒子到某点的总几率振幅时,应把各种路径的贡献进行求和(这也就是“路径积分”名称的含义)。这种量子化方法不难推广到场论中去。

Faddeev 和 Popov 正是用这种方法比较完整地解决了非阿贝尔规范场的量子化问题。

随后,非阿贝尔规范场的可重正化性也得到了证明。这些工作构成了量子场论晚近的重要发展。

非阿贝尔规范场的量子,也就是传递作用的粒子,它象光子一样是自旋为 1 的玻色子。于是人们想到能否用这种非阿贝尔规范作用来描述弱作用,并仿照同位旋,把 $\begin{pmatrix} \nu \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$ 等看作是某种弱旋的二重态(ν, e, u, d 分别表示中微子、电子和两种夸克,脚标 L 表示左手分量)。这样,过去提出的中间玻色子应当就是规范场的量子。但这种理论设想立刻就遇到一个困难,即规范对称性要求规范场的量子是无静质量的,而中间玻色子应具有相当大的质量。

这个问题后来由于对称性自发破缺概念的发展才得到解决。

对称性自发破缺的概念是从固体物理中得出来的。1960 年左右, Nambu 等物理学家把它引入到粒子物理中来。它指的是下面所说的情况:物理规律本身具有某种对称性,但基态是简并的;这样,在某个特定基态的基础上所发生的物理过程将不显示或只部分地显示规律所具有的对称性。铁磁性和超导性就是这种情况的例子。如果我们生活在一个巨大的铁磁畴内部,我们从所观察到的物理现象来判断,就会以为物理规律是各向异性的。这时,物理规律实际所具有的各向同性对称性在表观上就破坏了。这种破坏是理论本身所导致的(从该理论得出简并的基态),故称为对称性的自发破缺。当然,从实质上来说,对称性并未破坏(基态的全体仍符合对称性的要求),只不过是某个特定的基态背景下不显示出来而已。

从量子场论的观点看来,物质世界就是相互作用着的各种场的总和,其基态就是真空。如果基态是简并的,而现实的真空只是这些众多可能的基态中的某一个,那么就会发生上述对称性自发破缺的情况。

六十年代初, Nambu 和 Goldstone 等人的

研究表明,在相对论性的理论中,某种连续变换的对称性的自发破缺一定导致零质量粒子(现称作 Nambu-Goldstone 玻色子)的出现。这就给对称性自发破缺理论的适用范围带来很大限制,因为这种零质量粒子如果存在,那么它就应当早已被观察到。1964 年左右, Higgs 等人阐明,如果该对称性是定域的规范对称性,则这种零质量 N-G 粒子将与规范场耦结在一起,使得该规范场量子获得质量,从而增加一个纵偏振态。而 N-G 粒子本身不再作为物理粒子表现出来,可以通过规范变换将它从理论中消去。这种效应可认为是超导中等离子激元效应的相对论变种。

在超导中,基态可看作是 Cooper 对的相干态。它的简并性使电磁作用的规范对称性在表观上受到破坏。所出现的与 N-G 玻色子相应的元激发,由于与库仑场之间的耦结而转化为有质量的纵向等离激元,并不作为零质量的准粒子表现出来。

超导中的 Meissner 效应也可与对称性自发破坏相联系。设 ϕ 为描述 Cooper 对的波函数(实为一种序参量),则在横规范条件下,基态的 ϕ 为一个常数。当有磁场时,如前所述, Cooper 对的运动动量将等于 $\mathbf{P} - q\mathbf{A}/c$ 。对这个基底场 ϕ_0 , 正则动量 \mathbf{p} 为零,运动动量即为 $-q\mathbf{A}/c$ 。于是超导电流 \mathbf{j}_s 将与 \mathbf{A} 成正比。这个结果只对横规范 ($\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$) 成立,因而规范对称性表观上受到了破坏。对于几何构形简单的超导体,实际的 ϕ 仍保持为一常数,故 \mathbf{j}_s 与 \mathbf{A} 成正比的关系不变。这就导致 Meissner 效应。从电磁场量子化的角度来看,可认为是超导体中的横光子也获得了一个质量。

Higgs 等人的工作正是从上述超导现象得到启示而完成的。

这一进展克服了将非阿贝尔规范场理论应用到弱作用的困难,既解决了中间玻色子的质量问题,又避免了在理论中出现了希望有的零质量的 N-G 粒子(实际上未发现它存在。)

在这些工作的基础上, 1967 年和 1968 年 Weinberg 和 Salam 分别提出了弱作用与电磁

作用的统一理论。采用的对称性为弱旋加弱超荷。这种对称性是 Glashow 在六十年代初期首先提出来的。因此这一理论现在常称为 Glashow-Weinberg-Salam 理论。理论中共有四个规范玻色子,即 W^+, W^0 和 B。此对称性由于真空中有某种带弱旋和弱超荷标量场的凝聚而发生自发破缺。该标量场的量子有三个成为 N-G 玻色子并转化为三个规范场量子 W^+, W^- 和 Z^0 的纵分量。 Z^0 为 W^0 和 B 的一个叠加态, $Z^0 = W^0(\cos\theta_w + B \sin\theta_w)$, 并使这三个规范量子获得质量。而 W^0 和 B 的另一个叠加态 $A = B \cos\theta_w - W^0 \sin\theta_w$ 则保持质量为零, A 即为光子。式中的 θ_w 称为 Weinberg 角。

由此可见,电磁规范对称性代表弱旋和弱超荷对称性自发破缺后的剩余对称性,光子为 W^0 和 B^0 的一个相干叠加,而被破坏的那部分规范作用就成为弱作用。

为了解释弱作用具有最大限度的左右不对称性,就需要假定费米子的左手分量和右手分量原来就是两种不同的粒子,具有不同的弱旋和弱超荷。但这只有费米子是无静质量的情况下才是可能的。于是统一理论采用了 Nambu 等于 1961 年提出的一种方案,假定费米子原来都没有静质量,其左、右手分量原是不同的粒子,只是因为它们与真空中凝聚的标量场有作用,从而在这种真空的背景下可以互相转化,才成为一个有静质量粒子的不同分量。相对论告诉我们,质量与能量间有一个正比关系,静质量当然也对应于一定的能量。这个能量的物理意义是什么,原来我们并不清楚。现在电弱统一理论给了我们一个答案:这个能量代表费米子与真空中凝聚标量场相互作用的势能。

电磁作用的左、右对称性也得到了说明。既然一个有静质量的费米子的左、右手分量可以互相转化,而电磁作用又对应于剩余的对称性,那么左、右手分量的电荷必然相等,因而电磁作用是左右对称的。

我们看到,电弱统一理论不仅为弱作用提供了一个完整的理论(它可以重正化,因而可以计算高阶效应,么正性也就不成问题),解释了

为何弱作用具有最大限度的左右不对称,还使我们对于粒子静质量的来源有所认识,对真空的物理性质也有了新的了解。我们由此更清楚地认识到真空确是物质的一种状态,而且是一种非平常的状态——某种带弱旋和弱超荷标量场的相干态,它有着极其重要的物理效应。

电弱统一理论预言了原来不知道的与 Z_0 耦合的中性弱流,并给出它的理论表达式。1973年,中微子散射实验证实了它的存在。经过几年的实验研究,最终肯定了它在定量上也与理论所预言的一致。这一成功使 Glashow、Weinberg 和 Salam 获得了 1979 年诺贝尔奖金物理学奖金。1982—1983 年,在欧洲核联合中心又进一步在实验上发现了 W^\pm 和 Z^0 粒子,证实它们自旋为 1,而且质量与理论预言的基本一致。这个成果又使从事这一实验工作的鲁比亚 (Rubia) 获得了 1984 年的诺贝尔奖金物理学奖。不过情况也出现过一些波折。1984 年,对实验数据作了进一步分析,认为 Z^0 的衰变方式与理论有不一致之处,并有迹象表明还可能存在一个更重的 Z'_0 。1985 年暑期在日本东京举行的国际会议上情况已得到澄清,新的实验结果已与理论完全一致,原来认为的矛盾都已消除。 W^\pm 和 Z^0 的质量也得到更准确的测定,分别在 $81.2\text{GeV}/c^2$ 和 $92.5\text{GeV}/c^2$ 左右,与理论预言值相符。到此,统一理论可说是已得到很好的证实。目前唯一尚未被发现的是 Higgs 粒子(由于理论上不能对它的质量作出预言,故还不能说是一个问题)。从以上情况看来,我们可以说,

电弱统一理论已经是一个得到实验相当严格检验的科学理论。

在本世纪的前中期,一些伟大的物理学家如爱因斯坦和海森堡都曾长期致力于统一理论的研究。但由于条件不成熟,他们都未取得成功。经过三十年代以来粒子物理学家进行了几十年的实验和理论研究,在大量科学实践的基础上,又从固体物理特别是超导物理那里吸取了营养,才终于在统一理论方面取得了重要进展,揭示出弱作用与电磁作用间的本质关系和真空的复杂性质,使人类对自然界的认识又前进了一大步。

当然,电弱统一理论也还有不足的地方。首先,从某种意义上说,它还不是一个真正统一的理论,因其中含有两个规范群,有两个独立的耦合常数。第二,没有对电荷的量子化[即所有粒子的电荷为某一数值(电子电荷的 $1/3$)的整数倍]作出解释。第三,理论中含有太多的参量,主要是标量粒子的自耦合常数和标量粒子与费米粒子间的耦合常数。这些不足之处为粒子物理提出了新的研究课题。一些粒子物理学家试图通过把三种(即电磁作用、弱作用和强作用)甚至四种基本作用全部统一起来的方式来解决这些问题,但在研究过程中遇到不少困难,一些理论预言也未得到实验支持。最近情况似乎有了变化。新发展的一种叫超弦的理论,表现出有许多优越的性质,目前正受到许多理论物理学家的关注。

敬告作者

本刊从 1986 年第 5 期开始不再给作者寄校样,希望作者在交稿前认真做好清稿定稿工作。稿件发排后作者不能作任何改动。科学出版社只按原稿进行校对。