

# 弱作用与电磁作用的统一理论

曹 昌 祺

(北京大学物理系)

弱作用与电磁作用理论又简称弱电统一理论。迄今所知道的物质间的基本物理作用共有四类,即引力相互作用、电磁相互作用、强作用和弱作用。前二种相互作用广泛地表现在宏观的物理过程中,因而比较早地为人类所认识。电磁作用还是固体、液体和分子的一切物理性质和化学性质的根源,在原子物理中起作用的也是电磁作用。强作用和弱作用是通过原子核物理的发展,在本世纪三十年代以后才为人们所研究。强作用使质子和中子结合成原子核,由于这种作用原子核才得以形成。弱作用则使中子变成质子加上电子和反中微子,它导致原子核的 $\beta$ 衰变。以后人们又发现了大量其它粒子。在全部发现的粒子中只有一部分具有强作用,这些粒子统称为强子,其余的除光子外则称为轻子,轻子都是费米子。强作用的强度比电磁作用强,而弱作用则比电磁作用弱,并且都是量级上的差别。至于引力则比弱作用还要微弱得多,在目前所涉及到的微观过程中,它的效应可以忽略不计。

电磁作用的经典理论在十九世纪已经建立,即经典电动力学。在微观领域的量子效应发现以后,又于本世纪三十年代初建立了量子电动力学。四十年代末发展了量子场论的协变微扰论和重正化等方法,量子电动力学被证明为可重正化的,从而可以计算它的精微的高阶效应。计算的结果准确地与实验值符合,使得量子电动力学成为一门精密可靠的理论。

弱作用的情况却不是这样。在弱电统一理论提出以前,虽然人们对它的认识已有很大的进展,但始终没有建立一个完整的理论。弱电统一理论就是在发展弱作用理论的时候,将它与电磁作用结合起来考虑所提出来的统一性的

物理

理论。

弱作用与电磁作用之间虽然存在着一些重要的相似点,但它们在强度上有量级上的不同,在一些基本性质上也有类型上的差异,从表面上看是很难统一起来的。统一理论能够建立的一个关键,是六十年代对称性自发破坏的概念在量子场论中的发展。下面就分别对弱电统一理论提出前的弱作用理论发展情况、对称性自发破坏概念、和弱电统一理论模型本身加以介绍。

## 统一理论提出前的弱作用理论

1933年泡利提出中微子假设,以解释核 $\beta$ 衰变中表观上的能量和角动量不守恒的问题。1934年费米在此基础上提出了四费米子作用作为 $\beta$ 衰变的机制。这是弱作用理论的创始阶段。在此后的二十年中,主要是探索四费米子耦合的具体形式,并试图用统一的弱作用来解释各种原子核的 $\beta$ 衰变。五十年代中,弱作用理论又有了一个重要发展。这时关于 $\mu$ 轻子和 $\pi$ 介子的弱衰变已积累了不少材料,四费米子作用很自然地被推广应用到它们的衰变过程。但人们发现无法用统一的四费米子耦合方式来解释当时所有的核衰变和 $\mu$ 、 $\pi$ 衰变的实验数据。1956年李政道和杨振宁为了解释有关 $K$ 介子衰变的一些实验现象,提出了弱作用宇称不守恒(即弱作用不具有空间反射对称性)的假设。这一假设于次年为实验所证实。在此基础上,Marshak和Sudarshan以及费曼和盖尔曼于1957和1958年彼此独立地提出矢量-轴矢耦合方式的普适四费米作用,简称为V-A理论,获得了很大成功。过去一些认为明显与矢

量耦合或轴矢耦合相抵触的实验结果在重做之后都证明是错误的.新的实验结果与普适 V-A 理论完全符合.

V-A 理论可以概括为弱作用具有下述相互作用哈密顿量密度:

$$H_w(x) = - (G/\sqrt{2}) J_\lambda(x) \bar{J}_\lambda(x),$$

它表明弱作用是流-流耦合并且有普适的耦合强度  $G$  (费米耦合常数). 这种流称为弱流, 它包括矢量流  $J_\lambda^\nu$  和轴矢流  $J_\lambda^A$  两部分:

$$J_\lambda(x) = J_\lambda^\nu(x) + J_\lambda^A(x).$$

轻子的弱流具有下述简单形式

$$J_\lambda(x) = i\bar{\psi}_\nu(x)\gamma_\lambda(1 + \gamma_5)\psi_e(x) + i\bar{\psi}_\mu(x)\gamma_\lambda(1 + \gamma_5)\psi_\mu(x)$$

这意味着只是左手轻子参与弱作用, 而右手轻子不参与. 对于强作用粒子, 弱流还要分为奇异性不变的  $J_\lambda^0$  和奇异性改变的  $J_\lambda^1$  两个成分, Cabibbo 于 1963 年提出两者的组合形式为

$$J_\lambda(x) = \cos\theta_c J_\lambda^0(x) + \sin\theta_c J_\lambda^1(x),$$

$\theta_c$  称为 Cabibbo 角, 而  $J_\lambda^0$  和  $J_\lambda^1$  又都含有矢量流和轴矢流两部分.

V-A 理论表明, 弱作用与电磁作用有一个重要的相似处, 即普适流-流作用的形式. 我们知道, 带电粒子之间的电磁作用也可以表成普适流-流耦合的形式, 只是其中的流是电流(这里的流都是指四维时空变换中的流, 矢量和轴矢也是对四维时空变换而言). 但是弱作用也在一些基本性质上与电磁作用有类型上的差异. 首先是力程类型上的不同. 带电粒子之间的流-流作用是通过光子传递的, 由于光子的质量为零, 故作用是长程作用. 在 V-A 理论中, 弱流与弱流之间的作用是直接的, 即力程为零. 这不仅意味着弱作用属于短程作用, 还是短程作用的极限情况.

其次一个差异是, 弱作用与电磁作用遵守的时空对称性不同. 电磁作用对空间坐标反射是对称的, 即具有左右对称性, 而弱作用对于空间坐标反射是不对称的, 而且是最大限度的不对称. 表现在流中即为: 电流只有矢量成分而弱流却为矢量和轴矢两种成分的叠加, 并且两种成分具有同等的大小.

第三, 电磁作用是一种规范作用, 而 V-A 理论不是.

弱作用 V-A 理论虽然唯象上获得很大成功, 但理论上存在一些严重困难. 首先它不可重正化, 于是在计算它的高阶修正时将不能开发散困难. 这表明它不是一个完整的理论, 只能给出初级近似的结果.

其次, 用 V-A 理论计算出的初级近似的结果虽然在低能领域与实验相符合(直到六十年代前期所研究过的弱作用过程只是各种粒子的衰变, 它们都属于低能领域), 但一旦过渡到高能散射和反应的领域, 理论计算将不可避免地要与实验结果相矛盾. 这是因为, 按照 V-A 理论, 在弱作用引起的散射和反应的过程中, 它的效应将随着能量而增强, 当质心系中的能量值超过一定值(量级为几百 GeV) 时, 计算出的截面值甚至会超过么正性所允许的极限. 这显然不可能是正确的.

V-A 理论的流-流耦合特性使人们想到弱作用也可能象电磁作用那样是通过某种矢量玻色子传递的(光子也是一种矢量玻色子). 这种传递弱作用的矢量玻色子通常又称为中间玻色子. 这样, 弱作用在低能过程中效应微弱以及它的极短程特性都可归结为中间玻色子具有很重的质量. 引入中间玻色子以后, 弱作用的耦合强度也象电磁作用一样可用一个无量纲(在自然单位制中)的耦合常数  $g$  来表示. 如果设想  $g$  具有与电磁耦合常数  $e$  同样的量级, 则中间玻色子的质量  $M_w$  将达到几十个 GeV 的大小, 即为质子质量的几十倍. 对于这种中间玻色子理论, 初级近似与么正性的矛盾得到缓和, 但并未完全解决. 另外, 理论仍然是不可重正化的.

从弱流的性质可以得出, 中间玻色子必定是带电的(通常以符号  $W^\pm$  来标志). 这又引起了矢量带电玻色子与光子的耦合要取何种形式才能使相应的电动力学可以重正化的新问题. 这一情况使得一些物理学家认为, 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.

电磁作用是一种阿贝尔规范作用。1954年杨振宁和 Mills 把规范作用推广到带有内部对称性的情况,提出了非阿贝尔规范场理论,这就为规范理论的扩大应用创造了条件。但直接将此理论应用到弱作用有一个很大障碍,即规范理论要求其中的矢量玻色子必须是零质量的,而中间玻色子则应具有很大的质量。另外,弱作用的宇称不守恒也为建立严格的对称性理论造成了困难。宇称不守恒意味着,如果弱作用具有内部对称性,那么这种对称性必定是左右手有别的,即一个费米子的左右手分量要具有不同的量子数。但哈密顿量中的费米子质量项将破坏这种对称性,因为它使得一个费米子的左右手分量互相转化。这样,严格的弱作用内部对称性要求费米子质量也必须为零。而我们知道,除了中微子以外,所有的费米子都是有质量的。

1958年 Feinberg 发现,当带电矢量玻色子具有特定的磁矩时,某一类型的发散可以消去。这一磁矩并不等于“最小电磁耦合”所给出的值而对应于某种非阿贝尔规范场理论中所要求的磁性。这一迹象表示非阿贝尔规范理论可能在解决发散困难中起重要作用。

当将非阿贝尔规范概念应用到弱作用并把内部对称性取为弱同位旋时,规范玻色子除了带电的以外,还应有一个中性的。1957—1959年, Schwinger, Glashow, Salam 和 Ward 都分别设想过这个中性规范玻色子就是光子的方案,但所得结果与实验有明显矛盾。1961年 Glashow 首先想到,要同时描写弱作用和电磁作用,内部对称性应当扩大。即除了弱同位旋以外还应加上弱超荷。这时中性规范玻色子就有二个,混合后一个即为光子,另一个具有质量称为  $Z_0^1$ , 它与一个形式很特殊的中性弱流相耦合。1964年 Salam 和 Ward 在不知道 Glashow 工作的情况下,提出了类似的理论。

但这个理论并不是严格的非阿贝尔规范场理论,因为此理论中加进了中间玻色子的质量项。Glashow 曾认为象这样具有部分规范对称性的理论仍然是可重正化的,后来知道这个结

论并不正确。实际上只有在引入对称性的自发破坏概念之后,才有可能建立一个既可重正化又使中间玻色子具有质量的弱电统一理论。

### 对称性的自发破坏和 Higgs 机制

物理规律的对称性是指它在一定的变换下保持不变的性质。相对论所要求的洛伦兹不变性就是一切物理规律所具有的一种时空对称性。1930年开始引入了内部对称性,当时引入的为强作用在同位旋变换下的不变性。随后物理学家认识到,不同的物理作用具有不同程度的对称性,以及有些对称性本身亦只是近似地成立。于是自然地产生这样一个问题:如果对称性是自然规律的基本特性,那么为何某些对称性只是近似的?

1960年左右一个重要概念被一些物理学家(如 Heisenberg, Nambu 和 Goldstone)从固体物理引入到粒子物理中,这就是对称性的自发破坏。它指的是这样的情况:物理规律本身具有某种精确的对称性,但基态是简并的,实际的物理基态又只是这些众多可能的基态中的某一个,因此在这个特定基态的基础上所发生的物理现象,将不显示或只部分地显示物理规律固有的对称性。在这里,对称性并未受到外界因素的破坏,它的破坏完全是自发产生的,故称为自发破坏。从实质上说,这时物理规律的对称性并没有任何破坏,只是在特定的背景下不能显示出来。因此自发破坏的对称性又称为隐含的对称性。固体物理中的铁磁和超导电现象就是这种情况的例子。

在超导电理论的启发下, Hambu 等在1960年左右提出一个使核子获得质量的理论模型。他假设物理规律原来具有手征对称性,从而其中的费米子不具有原始质量。在粒子物理中,基态就是真空态,所以由于现实基态的特殊取定(在众多可能的基态中取定为某一个)而造成的对称性破坏也称为真空自发破坏。在 Nambu 模型中,手征对称性的真空自发破坏使得原无质量的一个二分量的费米子合成为一个有质量

的核子(具有四分量)。Nambu 发现与此同时还有一个零质量的标量玻色子存在的迹象。此标量粒子被认定为  $\pi$  介子并假设由于其他原因而获得了一个小质量。

Goldstone 于 1961 年通过具体模型清楚地揭示出, 相对论性场论中连续对称性的自发破坏如何导致零质量粒子的出现, 并认为这是一个普遍性的结论。此结果被称为 Goldstone 定理, 而上述零质量标量玻色子通常称为 Goldstone (或 Nambu-Goldstone) 玻色子。1962 年 Goldstone, Salam 和 Weinberg 对此定理给出了一般性的证明。

两年以后, Higgs, Englert 和 Brout 指出, Goldstone 定理有一个例外, 即发生自发破坏的是规范对称性的情况。这时 Goldstone 玻色子并不作为物理粒子表现出来, 它可以通过规范变换吸收到规范玻色子中去成为它的纵分量并使得规范玻色子获得质量。这种现象可看成是超导电中等离子体激元现象的相对论变种。以上所述的消除 Goldstone 玻色子的机制一般称为 Higgs 机制。它既可在理论中消去不期望有的 Goldstone 粒子, 又可使规范玻色子获得质量, 一举解决了将规范理论应用到弱作用所遇到的两个重大困难。但由于当时的某些情况, 此结果未受到足够的重视。

1967 年, Weinberg 考虑将强作用的手征同位旋对称性取为规范对称性的可能性, 并研究它的自发破坏的后果, 但不能得出一个令人满意的理论。若为了可重正化性而采用严格的规范理论, 则当手征同位旋对称自发破坏到非手征的同位旋对称性后, 理论上获得质量的只是轴矢介子,  $\rho$  介子应保持无质量, 同时  $\pi$  介子应被轴矢介子吸收掉不作为物理粒子出现, 这两点都明显地与实际矛盾。

当年秋天, 他忽然想到他是将一个正确的概念应用到一个错误的课题上。通过自发破坏获得质量的不是强作用的轴矢介子而是弱作用的中间玻色子, 而保持质量为零的也不是  $\rho$  介子而是光子。这样, 上述概念应用的对象就转换为弱电作用。在此基础上他提出了一个可重

正化的理论, 统一处理轻子的弱作用和电磁作用。第二年 (1968) Salam 也提出了类似的理论模型, 他是从 Kibble 那里了解到 Higgs 机制以后将它用到弱电统一的理论问题上的。

### 弱电统一理论模型

在 Weinberg-Salam 弱电统一理论模型里, 内部对称性仍然取为弱同位旋和弱超荷, 费米子(在这里就是轻子)的弱电作用哈密顿量为

$$H = -i\bar{\psi}\gamma_{\lambda}\left(g\mathbf{T}\cdot\mathbf{W}_{\lambda}+g'\frac{\hat{Y}}{2}B_{\lambda}\right)\psi,$$

其中  $\mathbf{T}$  为弱同位旋算符,  $\mathbf{W}_{\lambda}$  为相应的规范玻色子,  $g$  为弱同位旋耦合常数; 类似地,  $\hat{Y}$  为弱超荷算符,  $B_{\lambda}$  为相应的规范玻色子,  $g'$  为弱超荷耦合常数。造成真空简并的, 假设是由于一个弱同位旋二重态的标量粒子在真空中的凝聚, 此标量粒子并带有弱超荷 1。

对于轻子质量问题, 模型采用了 Nambu 模型中的思想, 即假定所有的轻子都无原始质量, 这样电子或其它带电轻子的左手分量和右手分量原来是两种不同的费米子, 各只有两个分量, 只是因为它们与真空中凝聚的标量粒子相耦合, 从而在这种真空背景下它们可以互相转化, 才被称为同一粒子的不同分量并合成为具有四分量的有质量的费米子。用这种方式在理论中引入轻子质量, 既可破坏原来的对左右手分量有别的对称性, 因而能适应弱作用宇称不守恒的需要, 又保证了自发破坏后剩余下来的电磁规范作用对左右手是对称的。因为按上述方式配成的左右手分量对于仍然守恒的量子数-电荷, 必定具有相同的值。至于中微子则因为它不通过标量粒子与其他二分量子费米子耦合, 故保持质量为零。它虽然只有左手分量从而不是左右对称的, 但它不带电荷, 故对电磁作用的左右对称性没有影响。

下面继续对此模型作具体的说明。在此模型中, 左手电子  $e_L$  和相应的中微子  $\nu_{eL}$  构成弱同位旋二重态并带弱超荷  $-1$ 。右手电子  $e_R$  为弱同位旋单态并带弱超荷  $-2$ 。其它轻子情况

类似。当标量粒子发生真空凝聚后，只有一个量子数所相应的规范对称性没有被破坏。此量子数就是通常的电荷，它所相应的算符用  $\hat{Q}$  表示。在弱同位旋的适当取向， $\hat{Q}$  可表为

$$\hat{Q} = \hat{T}_3 + \frac{1}{2} \hat{Y},$$

其中  $\hat{T}_3$  为弱同位旋第三分量。与电荷相应的规范玻色子保持无质量，它即为光子  $A_\lambda$ 。  $A_\lambda$  为  $W_\lambda^3$  和  $B_\lambda$  的某种混合

$$A_\lambda = \cos\theta_w B_\lambda + \sin\theta_w W_\lambda^3,$$

其中  $\theta_w$  代表混合角，称为 Weinberg 角，它可通过弱同位旋耦合常数  $g$  和弱超荷耦合常数  $g'$  的比表示出来。

$$\tan\theta_w = \frac{g'}{g}.$$

$W_\lambda^3$  和  $B_\lambda$  的另一个组合

$$Z_\lambda^0 = \sin\theta_w B_\lambda - \cos\theta_w W_\lambda^3$$

以及  $W_\lambda^\pm \left[ W_\lambda^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} (W_\lambda^1 \mp iW_\lambda^2) \right]$  都获得质量，理论预言的值为

$$M_W^2 = \frac{e^2}{4\sqrt{2} G \sin^2\theta_w},$$

$$M_Z^2 = \frac{M_W^2}{\cos^2\theta_w}.$$

$Z_\lambda^0$  所耦合的中性弱流具有下述形式

$$i\bar{\psi}\gamma_\lambda(\hat{T}_3 - \hat{Q}\sin\theta_w)\psi,$$

耦合常数为  $g/\cos\theta_w$ 。

Weinberg 和 Salam 曾猜想这种自发破坏的规范场理论仍然是可重整化的，但未能给出证明。因此他们的弱电统一理论模型在提出后的几年里并未受到人们的注意，直到 1971 年，t Hooft 论证了它的可重整性之后才引起广泛的重视。1972 年 B. W. Lee 和 Zinn-Justin，以及 t Hooft 和 Veltman 进一步给出了这种理论可重整化的详尽证明。

Weinberg-Salam 理论在其提出来的当时还存在一个问题即如何推广应用到强作用粒子（在夸克模型中即推广到夸克）上去。困难在于如何在理论中避免奇异数改变的中性弱流的出现（实验表明此种弱流不存在）。不过到 1971

年时，这个问题实际上已有现成的解决办法。1970 年 Glashow, Iliopoulos 和 Maiani 对奇异数改变的中性弱流问题进行了分析。由于当时尚不知道有任何可重整化的理论，他们使用了截断的处理。在此项工作中他们论证了对于已知的各类弱作用模型（如四费米子作用，荷电中间玻色子作用，弱电统一作用），都会出现一些实验上未观察到的效应如  $K_1K_2$  大质量差、 $K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu}$  衰变等，除非强作用粒子服从某种约束。他们指出，若存在第四种夸克（粲夸克），即可在理论中消去这些不期望的效应。

有了 Glashow-Iliopoulos-Maiani 机制，就不难把 Weinberg-Salam 模型推广到强作用粒子。在四夸克情况下，只要补进去四个弱同位旋单态  $u_R, d_R, s_R, c_R$  和两个弱同位旋二重态

$$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \cos\theta_C + s_L \sin\theta_C \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c_L \\ s_L \cos\theta_C - d_L \sin\theta_C \end{pmatrix}$$

即可。为使夸克带分数电荷，应假设右手夸克  $u_R$  和  $c_R$  带弱超荷  $4/3$ ， $d_R$  和  $s_R$  带弱超荷  $-2/3$ ，而左手夸克二重态带弱超荷  $1/3$ 。

这样到 1971 年，一个完整的弱电统一理论模型已经形成。同时实验技术也有了很大发展，特别是已有了中微子束可以进行中性弱流实验。1973 年在欧洲核物理中心（CERN）和美国费米实验室都测到了中性弱流反应的事例，其形式和强度与理论预言的一致。在那以后的五年中实验结果有些混乱，致使一些理论物理学家提出了不少修改方案。但到后来，实验仍支持原来的模型。 $\sin^2\theta_w$  的值定出为 0.23 左右。相应的  $M_W$  约为 78 GeV， $M_Z$  约为 89 GeV。另外，粲夸克所组成的介子也在 1974 年为实验所发现。目前实验物理学家正在寻找中间玻色子  $W_\lambda^\pm$  和  $Z_\lambda$  并测定它们的质量。这将是对弱电统一理论最关键性的检验。最近在欧洲核物理中心已得出了初步的肯定性的实验结果，找到了若干  $W_\lambda^\pm$  和  $Z_\lambda$  的事例， $M_W$  的初步值约为 81 GeV， $M_Z$  的初步值为 92—95 GeV，与理论预言基本符合。

弱电统一理论的建立以及它所预言的中性

（下转第 605 页）