

弱作用和电磁作用统一的模型

徐 德 之

1978年8月在东京召开的第十九届国际高能物理会议上,美国斯坦福直线加速器实验所的泰勒教授报告了电子-质子散射中的宇称破坏现象的实验。这个报告引起了各国科学家的极大的兴趣。大家认为这是对温伯格-萨拉姆弱电统一理论的一个很好的检验,从而基本上肯定了这个理论的正确性。在这篇短文中,我们简单地来介绍一下弱作用和电磁作用统一的理论。

几千年来,人们在日常生活中不断地和电磁现象打交道。虽然完善的理论直到上个世纪才出现,但是,在漫长的岁月中却积累了许多关于电磁现象的知识,如:知道了有两种不同的电性——正电和负电,同性相斥,异性相吸,作用力的大小遵从库伦定律,电和磁可以互相转化等等。最后终于建立了麦克斯韦方程,使经典的电磁场理论达到了尽善尽美的地步。随着理论的发展,电磁现象的应用也逐步渗入到生产和生活的每个角落中。但是,弱作用现象对绝大多数人来说还是很陌生的。弱作用的发现和对它的认识只有四十多年的历史,它的很多性质还没有很好的认识,弱作用的理论还是很不完美的。产生这种差异的原因不外乎有两个:(1)作用强度不同。电磁作用的强度是 $\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$

$\frac{1}{137}$,而在低能时弱作用的强度为 10^{-7} 。(2)作用力程不同。电磁作用是长程力,它能表现于宏观现象中;而弱作用的力程小于 $10^{-15} \sim 10^{-16}$ 厘米,所以只能在微观现象中观察到。由于这些原因,使得从表面上看来,它们是很不相同的。那么它们是怎样统一起来的呢?这要从它们的作用方式说起。

直接作用和间接作用

我们知道,两个带电体之间的相互作用,不是穿过空无一物的空间直接地、瞬时地发生的,而是通过它们周围的电磁场来传递的。如两个电子的散射过程是这样进行的:电子A放出一个光子,带走了它的一部份动量和能量,这个光子被电子B吸收,使B的动量和能量发生变化,这就是我们所观察到的弹性散射过程。

对弱作用方式的认识有一个曲折的过程。弱作用最早是在研究中子的 β 衰变时发现的,后来又在 μ 衰变和 μ 俘获中观察到。在这些过程中,粒子的能量很低,所以它们的德布罗意波长比弱作用的力程长得多(如在中子 β 衰变中,质子的德布罗意波长为 4×10^{-13} cm),于是可以把它们的作用看成是直接的。为了解释这些衰变现象,费米在1934

年提出了普适弱作用理论。在这个理论中,一个带电费米子和一个中

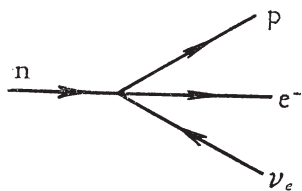


图 1

性费米子构成一个带电弱流,而弱作用是这些弱流的直接耦合。这样,弱相互作用就和电磁相互作用不同,它没有第三者来传递,而是直接发生作用的。图1是中子 β 衰变的示意图。这里中子、质子、电子、反中微子四个场在一点上直接发生作用。这个理论很好地解释了 β 衰变、 μ 衰变过程。在引入卡比玻角后,又很好地解释了奇异粒子的半轻子弱衰变过程。但也遇到了很大的困难。首先是在一些计算中出现了无穷大,并且这些无穷大不能像在电磁作用理论中那样,通过重整化消除掉。其次用这个理论算出的高能时的轻子散射截面不符合从几率守恒要求推出的截面大小。因此人们就设想弱作用和电磁作用一样,也是由某一种场来传递的,这就是中间玻色子W,并认为它是一种带电的、自旋为1的矢量粒子。为了使这个理论在讨论低能弱衰变时得

到的结果和费米理论得到的矛盾,就要令 w 的质量很大,传递作用的粒子的质量越大,其力程就越短,与粒子的德布罗意波长相比,就可以忽略,于是就回到了四费米子相互作用的图象。但这个理论也没有取得很大的成功,它仍然是不可重整化的。直到1967年,温伯格应用了杨-密尔斯的规范场理论,并引入希格斯机制使其带上质量,才使得中间玻色子的思想获得了新的生命力,并且进一步导致了弱作用和电磁作用的统一。在这个理论中,电磁场和传递弱作用的中间玻色子场完全处于同等的地位上,是同时出现于理论中的规范场。

规范场理论

我们知道“基本”粒子的运动规律有很多对称性,如空间的转动、平移、反射不变性、电荷共轭变换不变性、时间反演不变性等等。除此以外,它们还有一种内部对称性——规范不变性。如自由电子场的运动方程

$$\left(\gamma_\mu \frac{\partial}{\partial x_\mu} + m\right)\psi = 0 \quad (1)$$

在电子场作变换

$$\psi \longrightarrow \psi' = e^{i\alpha}\psi \quad (2)$$

时是不变的,这种变换构成一个群,称 $U(1)$ 群。这里 α 是与 x 无关的群参数,所以这种变换是与时空点无关的,我们称它为整体规范变换,或第一类规范变换。又如电磁场的麦克斯韦方程在电磁场矢量 A_μ 作变换

$$A_\mu \longrightarrow A'_\mu = A_\mu - \frac{1}{e} \frac{\partial \alpha}{\partial x_\mu} \quad (3)$$

时是不变的,这里 α 是 x 的函数。这种与 x 有关的规范变换称定域规范变换或第二类规范变换。再如电子在电磁场中运动,其方程为

$$\left[\gamma_\mu \left(\frac{\partial}{\partial x_\mu} - ieA_\mu\right) + m\right]\psi = 0 \quad (4)$$

它在变换

$$\begin{cases} \psi \longrightarrow \psi' = e^{i\alpha(x)}\psi \\ A_\mu \longrightarrow A'_\mu = A_\mu + \frac{1}{e} \frac{\partial \alpha}{\partial x_\mu} \end{cases} \quad (5)$$

时是不变的,这里 ψ 和 A_μ 都作第

二类规范变换。所以规范不变性是“基本”粒子运动规律的属性。

在上面的叙述中,我们先有了电子和电磁场及它们的相互作用运动方程,然后去考察它具有什么样的规范不变性。

1954年杨振宁和密尔斯从另一个角度来考察了这个问题。前面我们已经叙述过自由电子场的狄拉克方程(1)在作整体规范变换(2)时是不变的。现在我们这样来提出问题:如果要方程(1)在定域规范变换(5)下不变,则会出现什么情况?我们将会发现,由于参数 $\alpha(x)$ 是 x 的函数,所以方程(1)是要变的。但如果在方程(1)中引入一个新场 A_μ ,即将(1)中的 $-i\frac{\partial}{\partial x_\mu}$ 变为 $-i\frac{\partial}{\partial x_\mu}$

$-eA_\mu$,这样得到的方程(就是方程(4))在变换(5)下就是不变的了,到此为止实际上没有引入什么新的内容。这里得到的方程就是方程(4),所作的变换就是变换(5),引入的新场就是电磁场。由于这时场 A_μ 是要求运动方程在定域规范变换下不变而引入的,所以称它为规范场。尽管如此,这样一种新的叙述方法,却为理论的推广开辟了一条方便的路径,引导我们进入了一个新的境界。

在上面的叙述中,我们从要求方程(1)在 $U(1)$ 定域规范变换下不变出发,引入了规范场 A_μ 。所以自然地,可以通过改变定域规范的群而来推广理论。最简单的推广是引入 $SU(2)$ 群

$$e^{i\theta_i \tau_i} \quad (6)$$

这是一个2阶的么正模群,其中 θ^i 为三个群参数, τ^i 为此群的无穷小算子。这个群实际上包含了三种变换。对应每一种变换都应引入一个规范场,以使方程在定域规范变换下不变,所以一共要引入三个规范场 $A_\mu^i (i=1,2,3)$ 。当然如果取别的群,还会得到更多的规范场,其数目等于该群的无穷小算子的数目。但这样得到的规范场仍然不能作为传递弱作用的中间玻色子,因为它们没有静止质量。如果人为地

引入质量项,就会破坏定域规范不变性,从而失去可重整性。所以这个从理论上推出来的规范场,很长时期没有得到应用。

真空自发破缺和希格斯机制

1964年希格斯引入了一个体系的真空自发破缺的概念。

我们知道,所谓真空态是一个体系的能量最低态。真空态实际上是有结构的,而不是空无一物的,因而也可有一定的变换性质。通常我们认为一个体系只有一个真空态,它在任何变换下都是不变的。但如果一个体系的真空态不止一个,即真空是退化的,而场量的真空态平均值可以不为零则在一种变换下,一个真空态就会变成另一个真空态。但体系的运动规律仍然可以保持不变。这种使运动规律不变,而使真空态发生改变的对称性称为自发破缺对称。如果一个体系具有连续的自发破缺对称性,则必定存在一些静止质量为零的标量粒子,这些粒子称为高德司通粒子。为了说明自发破缺,我们来看一个例子。

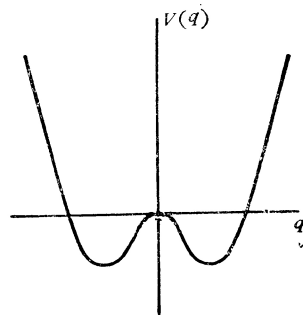


图 2

考虑一个经典的一维体系,它的势函数为

$$V = \frac{1}{2} \mu^2 q^2 + \frac{\lambda}{\phi} q^4 \quad (7)$$

当 $\mu^2 < 0$ 时,它有两个最小值,如图2所示。现在我们向量子理论过渡。我们知道经典理论中的每一个物理量,对应量子理论中的一个算符;而经典理论中这个物理量的值,对应量子理论中这个算符在一个状态中

的平均值, 现在 $q = \pm \left(-\frac{\mu^2}{\lambda}\right)^{1/2}$ 是使体系能量达最小时的 q 值; 而在量子理论中能量最低的状态是真空态, 所以 $\pm \left(-\frac{\mu^2}{\lambda}\right)^{1/2}$ 就是 q 算符的

真空平均值. 由此可见此体系的真空态有两个, 在反演变换下, q 变到 $-q$, 势函数(7)不变, 但真空态却从一个变换到另一个.

如果要求有自发破缺对称的标量场体系在某一种定域规范变换下不变, 则也要引入前面所述的规范场. 这种场和标量场有相互作用, 因而就有相互作用能量. 这时高德司通粒子转化成规范场的纵分量, 使得规范场得到静止质量, 其大小正比于标量场的场算符的真空平均值. 这种使规范场得到静止质量的机制称希格斯机制. 这时虽然规范场有了静止质量, 但由于理论始终是保持规范不变的, 所以理论就可重整化, 即理论中出现的无穷大可以通过对一些参数的(如质量、耦合常数等)重新定义而消去. 这种有静止质量的规范场就可用来代表传递弱作用的中间玻色子场.

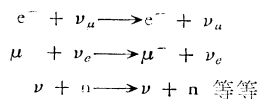
温伯格-萨拉姆的弱电统一模型

在中间玻色子理论中, 我们看到弱作用的机制和电磁作用的机制非常相像, 都是由一种矢量粒子来传递相互作用的. 低能时弱作用的强度与中间玻色子的质量有关, 质量越大, 耦合就越弱. 所以人们就猜想弱作用和电磁作用可能是统一的, 它们的原始耦合强度可能是一样的, 只是因为中间传递粒子的质量不一样, 才在低能时显示出不同的强度.

这种猜测, 被温伯格和萨拉姆的规范场模型所实现. 在这个模型中, 除了有规范场和自发破缺的标量场(它使规范场有质量)外, 还有轻子场: μ, ν_μ, e, ν_e . 因为电磁作用是宇称守恒的, 而弱作用是宇称不守恒的, 所以, $SU(2)$ 对称不能同时容纳电磁作用和弱作用. 为此,

他们所用的群是 $SU(2) \times U(1)$ 群. 这个群有四个无穷小算子; 三个是 $SU(2)$ 的, 一个是 $U(1)$ 的. 所以如果要求轻子场和标量场的运动方程在定域规范变换 $SU(2) \times U(1)$ 下不变, 就必须引入四个规范场, 其中与 $SU(2)$ 相应的三个用 A_μ^i 表示, $i = 1, 2, 3$; 与 $U(1)$ 相应的一个用 B_μ 表示. 它们和标量场有相互作用, 所以当标量场有自发破缺时, 这四个规范场重新组合成三个有静止质量的规范场 $W_\mu^\pm, Z_\mu^0$ 和一个没有静止质量的规范场 A_μ ——电磁场. A_μ 只和带电的粒子耦合在一起, 并且就是原来的电磁相互作用的形式. $W_\mu^\pm$ 和费米相互作用中的带电流耦合. 如前所述, 当 $W_\mu^\pm$ 的质量很大时, 用它来描写低能弱过程的结果和费米相互作用的结果是一样的. Z_μ^0 除了和由带电粒子构成的中性流耦合外, 还和由不带电粒子构成的中性流耦合. 当它的质量很大时, 它在低能时的等效作用强度也是很弱的. 由于 Z_μ^0 的存在, 所

以中性流的引入是自然的、并且是必须的. 这时必定有如下的弱过程

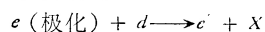


这些反应的物理图象如图 3 所示. 因为在弱作用中, μ 轻子数、 e 轻子数、重子数是分别守恒的, 所以不能有 $\nu_e \mu^-$ 、 $\nu_\mu e^-$ 这样的带电流, 在没有 Z_μ^0 时就不会发生上面的几个过程. 另外 Z_μ^0 的存在, 还会有一些其它的效应, 如电磁过程中, 由弱作用引起的宇称破坏效应.

由此可见, 温伯格-萨拉姆模型统一了电磁作用和弱作用, 它们都是由规范场来传递相互作用的, 并且原始的耦合常数是同数量级的, 只是因为传递弱作用的玻色子静质量很大, 在低能时作用强度就显得很小, 但在高能时弱作用的强度就会变得和电磁作用差不多大小.

弱电统一理论的一个验证

为了检验这个统一理论, 斯坦福直线加速器实验所的泰勒教授的实验小组做了一个极化电子在氦核上散射的实验.



这里, 电子 e^- 是纵向极化的. 测量的量是不对称性

$$A = \frac{a\sigma_R - d\sigma_L}{d\sigma_R + d\sigma_L} \quad (8)$$

其中 $d\sigma_R$ 为右旋极化电子的散射微分截面, $d\sigma_L$ 为左旋极化电子的散射微分截面. 如果没有 Z_μ^0 , 则这个过程只能通过电磁作用而发生. 因为电磁作用的宇称是守恒的, 所以左右是对称的, 于是 $d\sigma_R$ 等于 $d\sigma_L$, $A = 0$. 但如果有 Z_μ^0 , 则由于和 Z_μ^0 耦合的中性流有宇称破坏部份, 它和电磁作用相干的结果使 $d\sigma_R$ 不等于 $d\sigma_L$, 因而 $A \neq 0$. 实验测得

$$A/Q^2 = (-9.5 \pm 1.6) \times 10^{-5} (\text{GeV/C})^{-2}$$

其中 Q 是过程中的动量交换, 这个值和温伯格-萨拉姆模型的预言是一致的.

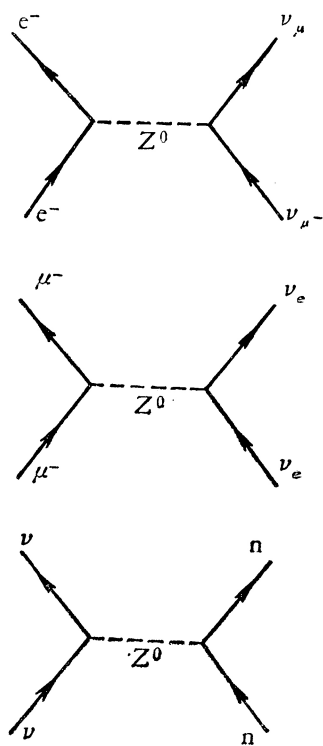


图 3