

弱电统一理论的简要回顾

吴 济 民

如果说,关于弱相互作用和电磁相互作用的统一理论是在 1967 年比较系统而又具体地提了出来,到今天,这个理论就整整经历廿年了.它经过不断地完善之后,现在各种有关的实验广泛地验证了它的正确性.弱电统一理论的确立无疑是粒子物理发展史中重要的里程碑之一.

1864 年,苏格兰物理学家马克士威尔发表了“电磁场的动力学理论”一文.他提出了电磁场运动方程,把电和磁现象统一地加以描述.这是一种统一理论.现在,我们早就懂得了这些常识:电流周围会形成磁场;导线切割磁力线就能产生电流.高压电火花放电、磁针摆动、不同的电流圈能产生各种需要的磁场分布等等现象都可以用同样的理论根据加以解释.电和磁现象是不可分割地联系在一起,是一个统一的现象.马克士威尔方程还指出应当存在电磁波现象.果然不久,赫兹的实验证实了电磁波的存在.这之后,电磁理论的发展和运用给人类社会带来了巨大的利益.进入本世纪之后,随着量子理论的发展,电磁理论有了新的形式.人们终于明白了,电磁相互作用的传播是以“光子”的形式进行的:电子可以发射出光子、光子又可以被另一个电子所吸收.这样就在带电粒子之间发生了

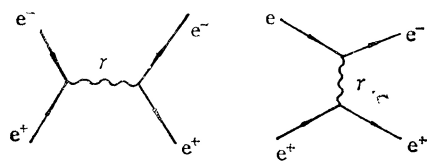


图 1

电磁相互作用.如图 1 可以看出,最基本的作用点总是由两条电子(或正电子)线和一条光子线组成.由这样的基本作用“顶点”可以拼成各种复杂的电磁作用过程.到四十年代末、五十年代初,电磁场的量子理论——量子电动力学最终完善和建立起来了.这是目前最为精确的量子理论.

弱作用理论也是一种规范理论吗?

人类对弱作用现象的认识和了解要稍晚一步,也更富有戏剧性.1896 年贝克勒尔发现了放射性现象.其中 β 射线就是弱作用过程发出的电子.这是人类最

早接触到的弱作用现象.到本世纪五十年代,对弱作用性质的了解已经获得许多重要的进展.例如,1930 年,泡利提出了中微子假设,后来在实验中果然找到中微子.1934 年,费米提出最早的弱作用理论——四费米子相互作用理论.1956 年,李政道、杨振宁先生指出了弱作用中宇称不守恒性质.到 1958 年,关于弱作用的普适的 $V-A$ 理论也提出来了.但到那时,弱作用理论仍然存在许多重要的不足.

最初,人们认为弱作用机制是四费米子型的.例如,描写中子衰变的作用量是

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_n \bar{\psi}_e \gamma^\mu \psi_\nu$$

其中 G_F 是弱作用耦合常数, $\psi_n, \psi_p, \psi_e, \psi_{\nu_e}$ 代表各有关粒子.如果用图形表示出来就是如图 2 四条费米子线相交在同一点上,构成了弱作用基本“顶点”.又把 $(\bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_n)$ 和 $(\bar{\psi}_e \gamma^\mu \psi_{\nu_e})$ 称为“弱流”,把这种作用机制称为“流-流等效相互作用”.如果用这样的



图 2

作用机制来计算一个最简单的弱作用过程(中微子-电子弹性散射) $\nu_\mu + e \rightarrow \nu_\mu + e$, 理论预言这个过程的反应截面与入射的中微子在质心系的动量大小 κ 的平方成正比.另一方面,从几率守恒要求出发,却要反应截面反比于入射中微子动量 κ 的平方.后一个要求是不能违背的.前者预言了很坏的截面行为,这是错的.显然,最初的理论出发点不合理,我们必须修改流-流相互作用形式.大家想到把弱作用理论与电磁理论加以比较.认为,弱相互作用的传播也应当像电磁相互作用那样,是通过传递某一种玻色子进行的.(光子自旋为 1,是一种玻色子)这种粒子称为弱中间玻色子,它带正电荷或负电荷,自旋为 1.图 3 是这种想法的示意图.这图描写中微子-电子弹性散射是通过传递 W^+ 粒子进行的.基本作用顶点也是由两条费米子线和一条玻色子线组成的.但是,只引入 W^+ , W^- 粒子还不够.当讨论

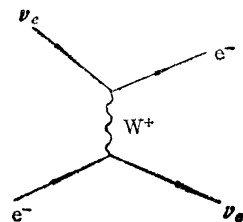


图 3

$\nu_e \bar{\nu}_e \rightarrow W^+ W^-$ 过程时又出现了类似的截面坏行为。于是有人认除去 $W^+ W^-$ 粒子外，还应当有 Z^0 粒子，这是一个中性的弱中间玻色子，自旋为 1。它也能传递弱作用，使得 $\nu_e \bar{\nu}_e \rightarrow W^+ W^-$ 表示成图 4

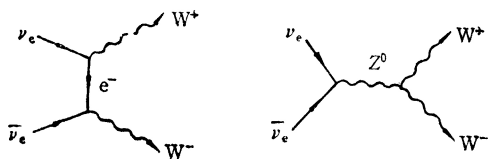


图 4

另有一些人认为，也许还应当存在重轻子 L^- 、 L^+ 。它们也可以消除不好的截面行为。（图 5）

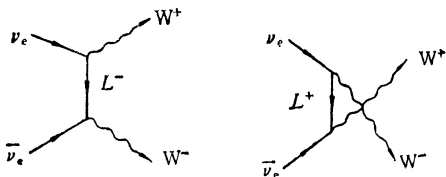


图 5

（不过，这些 $L^+ L^-$ 粒子是费米子而不是玻色子了。）经过这样处理后，确实克服了理论上的一些困难。

在量子理论中，为了讨论方便，我们不直接用电场和磁场描写电磁相互作用，而改用位势 A_μ ($\mu = 1, 2, 3, 4$) 描写。位势是可以按一定的原则修改的。这种修改并不影响物理结果。我们把这种修改称为“规范变换”。当然要求量子电动力学在这种规范变换下不发生变化。为此，在量子电动力学中自然而然地出现光子，它在理论中所处的位置就像我们所要求的那样：它总会和两个费米子场在一起构成相互作用顶点，或者说它传递电磁作用。所以，光子又称为电磁作用中的规范粒子。量子电动力学是一种规范理论。

那么弱中间玻色子是不是也可以看成是弱作用中的规范粒子呢？这个想法很有吸引力。因为光子和弱中间玻色子确有重要的相似之处。它们分别传递电磁作用和弱作用，都是自旋为 1 的粒子。而且，人们总接收这样的一种哲理：自然界中比较基本的规律总是比较简单的，美的。“对称性”就是一种美。所以，大家努力去寻找两种相互作用之间对应性和对称性方面的联系。

这使人们回想起 1954 年杨振宁和米尔斯提出的理论体系。他们把电磁理论中的规范不变原则扩大到更大的范围中去。（用数字术语说，把规范群由阿贝尔群情况扩大到非阿贝尔群情况中去）这里，在对应于电磁理论中的位势 A_μ 的位置上，可以出现多种位势 A_μ 。这些位势按一定的规则变化，也不影响物理结果。这

样，在同一个理论中可以同时存在多种规范粒子。这些粒子可以分别传递某种相互作用。人们就想把上述 $W^\pm, Z^0$ 放在规范粒子的位置上。当然，自然界中各种相互作用是否真是由这些规范粒子传递的，须要由实验结果来检验。通过实验检验的理论才能最终肯定下来。

电磁作用与弱作用相比又有一个重要的差别。前者作用力程无穷远，后者的作用力程却约限于 $\sim 10^{-16}$ cm 之内。如果用规范粒子的康普顿波长 $\frac{h}{mc}$ 来表示它的作用方程，那么光子的静止质量为零，传递弱作用的规范粒子的质量就很大，达到 80—100 GeV。杨振宁-米尔斯理论只能容纳多个质量为零的规范粒子。实验上也只发现了一种静止质量为零的规范粒子（光子）。怎么能在理论中自动出现如此大质量的弱中间玻色子呢？尽管把弱作用理论也看成规范理论有很大的吸引力，但是上述困难必须解决。

真空自发破缺

经过不断地探索、研究，人们逐步接受了“真空自发破缺”这样一个理论概念，并且把它应用到粒子物理中来。具体地说，就是描写相互作用的理论具有严格的对称性（规范对称性就是一种对称性），但是在现实的物理状态下，体系没有这种对称性。其结果可以使某些粒子变得静止质量不是零。

其实，这不是个新概念，在物理学中已经出现过多次了。例如，考虑一个有弹性的棍子。把它两端固定，在轴

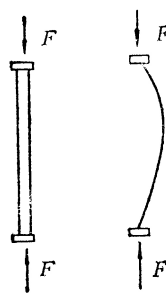


图 6

方向上施以压力 F （图 6）。棍子仍是直的，这是它的平衡状态。如果在水平方向上给棍子一个小的扰动，这个平衡状态仍然是稳定的，只是在平衡态附近进行振荡。如果外力 F 加大到一定程度，对于一个外来的扰动，棍子就变得不稳定，突然弯曲了。这时再考虑在新平衡态附近的振荡，这种振荡就不再是轴对称的了。显然，这时弯曲状态比直棍状态能量为低，棍子才处到这种弯曲状态上来的。描写棍子运动的方程仍然是对称的，但是其中的参数（外力 F ）大到一定程度后，方程的解就不再对称了。我们把这样的状态称为“真空”，意思是能量最低的状态。这时对称性遭到了破缺，因为这种破缺不是由于人为地修改具有轴对称的方程引起的，故称之为“真空对称性自发破缺”。

1964 年英国物理学家希格斯（Higgs）把这个想法应用到粒子物理中来，实现了真空自发破缺。这就

是著名的 Higgs 机制。1967、1968 年,温伯格 (Weinberg) 和萨拉姆 (Salam) 分别把这个想法应用在同描写电磁作用和弱作用的统一理论中来。他们选用 $su(2) \times U(1)$ 群作为规范变换群,开创了弱作用-电磁作用的统一理论。(1961 年格拉肖也提出了类似的想法)按照这个理论,描写弱作用、电磁作用的理论都是在规范变换下不变的,所以光子、弱中间玻色子都是零质量的粒子。此外还认为存在一种自旋为零的粒子(带电或不带电的),物理状态(又称真空态)是它所提供的位势的最低状态。这个状态下对称性破缺了,中间玻色子的静止质量不为零。

按照这种统一理论,应当出现四种规范粒子。属于 $su(2)$ 群的规范粒子有三个。其中两个是 W^+W^- 。第三个规范场 $A_{\mu,3}$ 与属于 $U(1)$ 群的规范场 B_{μ} 重新“混合”。

$$\begin{cases} Z_{\mu}^0 = A_{\mu,3}\cos\theta_W - B_{\mu}\sin\theta_W \\ A_{\mu} = A_{\mu,3}\sin\theta_W + B_{\mu}\cos\theta_W \end{cases}$$

它们就是中性弱规范粒子 Z_{μ}^0 和光子场 A_{μ} 。这种“混合”是不可避免的。这里出现了一个混合角 θ_W (称之为 Weinberg 角)。实际上,它是理论中的一个参数。

GIM 机制

如果按照 1967 年提出的弱电统一理论方案,预言

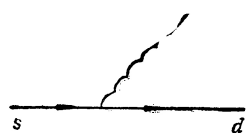


图 7

应当有较强的奇异数改变的中性流过程。就是在弱过程的始态和末态中,强子的电荷状态没有改变,但两者的奇异量子数相差 1。用夸克的语言说,这是由 s 夸克到 d 夸克的跃迁产生的。这个作用可以表示成“流”的形式

$$\bar{d}\gamma_{\mu}(1 + \gamma_5)s,$$

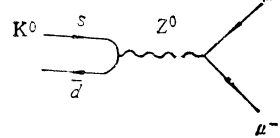


图 8

其中 d, s 分别代表 d 夸克和 s 夸克,用图 7 表示图中波纹线就代表了中性的、带有奇异数为 1 的弱作用中性流。因此就应当观察到相当多的 $K^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 衰变过程。(K^0 的奇异数为 1)。用图 8 表示,事实上,这是个十分稀有的过程。在 K_S^0, K_L^0 的衰变几率中只占很小的比例

$$K_S^0 \rightarrow \mu^+\mu^- \text{ 分枝比 } < 3.2 \times 10^{-7}$$

$$K_L^0 \rightarrow \mu^+\mu^- \quad (9.1 \pm 1.9) \times 10^{-9}$$

为了克服这一困难,1970 年格拉肖 (Glashow)、伊洛普洛斯 (Iliopoulos) 和迈安尼 (Maiani) 三人提出了还应当存在第四种夸克(粲夸克)的假设。它和已知的其它三种夸克一共组成两个组

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}$$

$$d' = d\cos\theta_c + s \cdot \sin\theta_c$$

$$s' = s \cdot \cos\theta_c - d \cdot \sin\theta_c$$

其中 θ_c 称为卡比玻 (Cabibbo) 角(弱作用理论中的又一个参数。实验给出 $\sin\theta_c = 0.230 \pm 0.003$)。如果写成“弱流”形式就应当是:

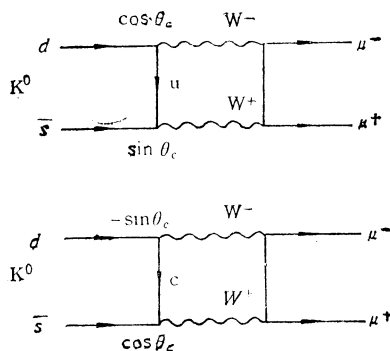


图 9

带电弱流 $\bar{u}\gamma_{\mu}(1 + \gamma_5)d \cdot \cos\theta_c$

$$\bar{u}\gamma_{\mu}(1 + \gamma_5)s \cdot \sin\theta_c$$

$$\bar{c}\gamma_{\mu}(1 + \gamma_5)d \cdot \sin\theta_c$$

$$\bar{c}\gamma_{\mu}(1 + \gamma_5)s \cdot \cos\theta_c$$

中性弱流 $(I_3 - \theta\sin\theta_W)\bar{q}\gamma_{\mu}q$

这样,就不存在奇异数改变的中性流。 $K^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 过程是两个过程之和如图 9 (由于 c 夸克,才有第二个图)仔细看一下上图,就可以看出两个过程的贡献相互抵消,或者说 $K^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 过程很弱,这样符合实验结果。果然,1974 年,丁肇中和里希特 (Richter) 分别发现了由粲夸克和反粲夸克 ($c\bar{c}$) 组成的束缚态 J/ψ 粒子。这个事实极大地支持了上述机制(称之为 GIM 机制),也支持了规范不变原理,因为上述讨论都基于要求理论具有规范不变性得来的。这样,更加确立了规范不变性原理在粒子物理中作为第一性原理的地位。

1971 年,又有人从理论上证明了含有自发破缺机制的弱电统一理论的可重整性。也就是证明了,按传统的微扰论方法计算这种理论的高级图形的贡献后,仍能得到物理上合理的结果。这样,理论体系得以完善。

实验检验

弱电统一理论就弱作用现象作出了许多重要的预言。实验上都一一加以检验证实。

说来十分奇怪。按照弱电统一理论,在弱作用现象中,中性流过程(始终态的强子电荷相同)应当占有很大的比例。实验上,多年来始终没有发现它。一直到 1973 年,在弱电统一理论的影响下,才在西欧核子

研究中心 (CERN) 首次发现了中性流过程。从这之后,进行了一系列中性流实验,都得到符合理论预言的

表 1

反 应 过 程	测得 $\sin^2\theta_W$ 值
中微子-核子单举过程($\nu_\mu N \rightarrow \nu_\mu + x$)	$0.229 \pm 0.09 \pm (0.005)$
反中微子-核子单举过程 ($\bar{\nu}_\mu N \rightarrow \bar{\nu}_\mu + x$)	0.230 ± 0.023
$\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p$	0.26 ± 0.06
$\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + N + \pi^0$	0.22 ± 0.09
$\bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \bar{\nu}_\mu + N + \pi^0$	$0.15 - 0.52$
电子-氘核单举过程($e^- + D \rightarrow e^- + x$)	0.224 ± 0.020
$\nu_\mu e^-$ 弹性散射 ($\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$)	$0.22 \begin{cases} +0.08 \\ -0.05 \end{cases}$
$\bar{\nu}_\mu e^-$ 弹性散射 ($\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$)	$0.23 \begin{cases} +0.09 \\ -0.23 \end{cases}$

结果。例如,在如此众多的中性流过程中,都能测出几乎相等的理论参数—— θ_W 值。这表示理论体系是正确的,它得到这么多过程的检验(见表 1)。记得约在 1980 年左右,有人测量中微子-电子弹性散射 $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$,突然测得 $\sin^2\theta_W \simeq 0.7$ 。大家十分惊讶,这是否意味着统一理论并不正确呢?后来发现这个实验做错了。才又恢复了平静。

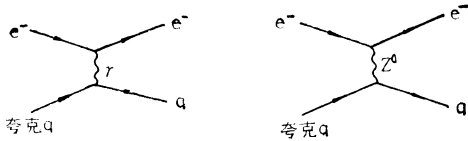


图 10

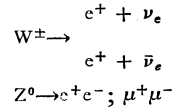
1978 年,在 SLAC 进行了极化电子束流与氘核靶的散射实验。在这个散射过程中,除去电子-夸克通过传递光子发生电磁作用外,按照弱电统一理论,还应当存在电子-夸克之间交换中性中间玻色子的弱散射过程(图 10)。这两个过程同时发生。就会在被散射电子随散射角度分布上存在“干涉”效应。此实验清楚地测到了这种干涉效应,而且测得了理论参数 $\sin^2\theta_W = 0.23$,与其它测量结果一致。本实验未直接测量 Z^0 粒子本身,因它需要很高能量的粒子束流才能做到。而是去测量这种干涉效应,所需要的粒子能量可以低一些。在这样稍低一些的能量下,测得了十分符合弱电统一模型理论预言的结果,当然是对理论很大的支持。这个干涉效应还在其它许多过程中找到了。

弱电统一理论对 $W^\pm, Z^0$ 粒子的质量也作出了预言。它预言:

$$m_W^2 = \frac{(37.5 \text{ GeV})^2}{\sin^2\theta_W}$$

$$m_Z = \frac{m_W}{\cos\theta_W}.$$

能不能从实验上找到这么大质量的粒子对理论是个十分严峻的考验。从 1978 年开始,西欧核子研究中心经过试验之后,在技术上肯定了可以建造反质子束流线之后,于是决定利用 SPS 加速器,在其上实现反质子-质子对撞。它的重要目的之一就是要寻找 $W^\pm, Z^0$ 粒子。经过 5 年努力,花费大量人力物力,终于在 1983 年先后在实验中发现了 $W^\pm, Z^0$ 粒子。这是通过测量 $W^\pm, Z^0$ 的衰变产物找到的。



它们的质量分别是:

$m_W = (81.8 \pm 1.5) \text{ GeV}$, $m_{Z^0} = (92.6 \pm 1.7) \text{ GeV}$ 。十分接近理论预言。这是对弱电统一理论明确而又肯定的实验支持。

爱因斯坦在他的后半生的绝大部分时间里从事引力相互作用和电磁作用的统一理论研究,但是没有取得成功。现在,电磁作用与弱作用的统一理论建立起来了。所谓统一,就是用更为基本的原理,以较少的假设解释,尽可能多的事实。弱电统一理论是在对称性原理基础上的统一。它的建立可以说是规范不变性原理的成功。由于这一理论的成功,鼓舞人们在强作用范围内也建立规范不变性理论——量子色动力学。甚至把电磁、弱、强作用在规范不变性原则上都统一起来,建立“大统一理论”。

神秘的 Higgs 粒子

为了实现统一理论的“真空自发破缺”,在理论中要求存在 Higgs 粒子。这是一种中性的或者带电的自旋为零的粒子。它起到了举足轻重的作用。不幸的是,我们对这种粒子的性质知道很少,特别是不知道它的质量大小。这种粒子出现在理论中带有较强的现象性理论的特点。实验上,大家也在不断地寻找它。一旦出现一个新现象,总要想一想是不是找到了 Higgs 粒子。结论又总是否定的。久而久之,使得这个粒子带上了神秘的色彩。不少人怀疑, Higgs 粒子可能不是一个真实的粒子,只是一种更基本的作用机制的等效场。

在弱电统一理论中总共还含有十几个参数。凭这一点,也不能认为这就是一个满意的基本理论。

事物发展的规律总是这样,原有的问题解决了,新的问题接着就出现了。弱电统一理论也是这样。纵观弱电统一理论发展的廿年,的确是充满了兴奋和收获的廿年。可以说,它的建立是粒子物理发展史中的重要里程碑之一。但仍然留下许多问题有待解决。