

# 弱电统一理论的标准模型

魏安赐

(河北工业大学理学院 天津 300130)

## 一、弱电统一理论的背景

### 普适弱相互作用理论

1958年,美国物理学家费恩曼和盖尔曼共同提出了矢量流减轴矢量流理论。在电磁相互作用中,电磁流 $j^{EM}$ 守恒,同强相互作用无关的电子和参与强相互作用的质子的电荷大小相等。在弱相互作用中,轻子弱流 $j^L$ 和核子弱流 $j^H$ 的矢量部分形式完全相同,显示核子弱流 $j^H$ 的矢量部分 $j^V$ 守恒,它和电磁流 $j^{EM}$ 的同位旋矢量部分,在同位旋空间是同一矢量沿不同方向的分量。盖尔曼提出:类似于电磁相互作用中的磁性,弱相互作用中也应有弱“磁”性。1963年被吴健雄在美国哥伦比亚大学做的实验所证实。只需一个耦合常数就可表征弱相互作用的各种过程,该理论称为普适弱相互作用理论。

### 弱作用和电磁作用的统一性思想

20世纪60年代,格拉肖、温伯格和萨拉姆在普适弱相互作用理论的基础上,透过电磁作用和弱作用表现形态的差异性(如它们的强弱、力程、作用时间分别都不相同),洞察其内在实质的同一性(如它们都是普适性、矢量型相互作用,都呈现为流的形式——电磁作用呈现电磁流、弱作用呈现弱流)。根据杨振宁—米尔斯规范场理论,先后独立提出电磁作

用和弱作用具有统一性的思想,建立弱电统一理论。

## 二、弱电统一理论的内容

### 电磁作用和弱作用对应基本规范场

电磁作用是宇称守恒的,弱作用是宇称不守恒的。它们分别对应的一维么正对称群 $U(1)$ 和二维么模么正对称群 $SU(2)$ ,各自不能同时容纳两者。能同时容纳它们的是 $SU(2) \times U(1)$ 群,该群有4个生成元,3个是 $SU(2)$ 的,1个是 $U(1)$ 的。这4个生成元共对应轻子和夸克所带有的4种弱荷及其生成的4种基本规范场(规范场是传递物质场及其相应粒子相互作用的矢量场) $W_{\mu}^1, W_{\mu}^2, W_{\mu}^3, W_{\mu}^Y$ 。符号中的上标表示其序号,其中 $Y$ 称为电弱超荷。基本规范场使物质场(自旋量子数为 $1/2$ 的轻子和夸克对应的旋量场)和标量场(其相应粒子的自旋量子数为零)的运动规律,在 $SU(2) \times U(1)$ 定域规范变换(与时空坐标 $x^{\mu}$ 有关的相变换)下保持不变。但是基本规范场没有可观察的量子即没有相应粒子。

### 基本规范场两两组合成

### 中间矢量玻色子场和电磁场

自然界中存在一种被称为希格斯场的标量场。上述4种基本规范场在同希格斯场的相互作用中两

敏化电池、有机太阳能电池等,这里不再赘述。值得注意的是关于薄膜电池的研制。除前面介绍的非晶硅薄膜电池外,还有晶态硅薄膜电池。这类电池可以极大地节约原材料,减少工艺流程。它的主要结构是硅淀积在玻璃或耐高温材料的衬底上。特别是后者,能够实现连续生产线,获得高生产率和高转换效率的产品。关键是解决具有理想技术特性、价格低的衬底材料问题。再如,非晶硅/晶态硅异质结太阳能电池。非晶硅膜淀积在硅片两面。太阳光主要由单晶硅或多晶硅吸收。这类电池的优点是具有较高的转换效率;表面钝化好,因而载流子表面复合速率低;制备工艺可以在摄氏温度 $200^{\circ}\text{C}$ 以下进行,加工过程热积累低,能耗小;产品的成本低。

太阳能电池系统与建筑结合,国际上正在迅速发展。这类建筑不仅美观、无污染,而且还可以自身供电。据介绍,目前采用太阳能电池系统进行外装修的成本和普通大理石持平,比钛合金板便宜得多。随着太阳能电池成本的下降,这类建筑应更多地发展。

据2002年11月底《科学时报》综合报道,我国太阳能并网发电不多,但离网应用做得很好。仅“送电到乡”工程就需要20兆瓦的装机容量,这将对我国太阳能电池的市场具有很大的推动作用。我国西部地区日照时间很长,特别是偏远山区,发展太阳能光伏工程不但非常需要,而且是可以大有作为的。

两重新组合。 $W_{\mu}^1$  和  $W_{\mu}^2$  组合成两种带电的中间矢量玻色子场  $W_{\mu}^+$  和  $W_{\mu}^-$ , 它们和带电粒子构成的弱带电流相耦合;  $W_{\mu}^3$  和  $W_{\mu}^Y$  组合成电磁场  $A_{\mu}$  和弱中性场即中性中间矢量玻色子场  $Z_{\mu}^0$ , 它们和弱带电流以及由中性粒子构成的弱中性流相耦合。这后一种组合可以表示为:

$$A_{\mu} = W_{\mu}^3 \sin \theta_W + W_{\mu}^Y \cos \theta_W$$

$$Z_{\mu}^0 = W_{\mu}^3 \cos \theta_W - W_{\mu}^Y \sin \theta_W$$

以表征弱电统一的两个量子数—电弱同位旋  $\tau$  和电弱超荷  $Y$  为两个直角坐标轴, 把电磁场和弱中性场也形象表示为另外两个直角坐标轴。这两套直角坐标系之间的旋转角  $\theta_W$  称为温伯格角, 它是电磁相互作用和弱相互作用的混合角。其正弦平方平均值是

$$\sin^2 \theta_W = 0.229 \pm 0.003 \pm 0.006$$

电磁场  $A_{\mu}$ 、带电中间玻色子场  $W_{\mu}^{\pm}$  和弱中性场  $Z_{\mu}^0$  的量子, 依次是可观察的传递电磁相互作用的光子  $\gamma$ 、传递弱相互作用的带电中间玻色子  $W^+$ 、 $W^-$  和中性中间玻色子  $Z^0$ 。

希格斯场使中间玻色子获得很大的静质量

场的能量最低的状态称为基态, 所有在一定范围的空间中互相重叠的场都处于基态时, 对应于该空间范围的物理真空, 它不表现任何释放能量的物理效应。1964年, 英国物理学家希格斯在量子场论中引入真空对称性自发破缺的概念: 希格斯场的场量为零时, 其能量并不最小; 场量取某一不为零的量值时, 场能最小。在一切场的总能量都达到最小的物理真空态上, 希格斯场的场量的真空期望值在某些方向上不为零, 物理真空偏离了一切场的场量为零的状态, 从而不再具有  $SU(2) \times U(1)$  定域规范变换下的不变性, 即不再保持  $SU(2) \times U(1)$  对称性, 这种现象称为真空对称性自发破缺。希格斯场的场量子是自旋量子数为零的标量粒子, 其中具有静质量的粒子称为希格斯粒子; 没有静质量的粒子称为高德斯顿粒子。传递弱相互作用的中间玻色子  $W^{\pm}$  和  $Z^0$ , 在真空对称性自发破缺下, 与处于基态但场量真空平均值不为零的希格斯场发生相互作用。希格斯场的高德斯通粒子的波函数, 转换成弱场  $W_{\mu}^{\pm}$  和  $Z_{\mu}^0$  的纵向分量, 相当于  $W^+$ 、 $W^-$  和  $Z^0$  吸收了高德斯顿粒子及其运动质量, 从而获得很大的静质量。因为相互作用的力程和传递相互作用的规范粒子的质量成反比; 并且该规范粒子的质量越大, 它所传递

的作用越弱。故弱作用成为短程作用, 有效强度也大大降低。

因为电磁作用对应的  $U(1)$  规范对称性没有真空自发破缺现象, 所以不存在与电磁场相互作用的希格斯场, 电磁场的量子—光子无从获得静质量。电磁作用仍保持长程性和较大强度。

电磁相互作用和弱相互作用的统一性

在弱电统一理论  $SU(2) \times U(1)$  框架中, 电磁场和中间玻色子场处于同等地位; 电磁作用和弱作用的原初耦合常数是同数量级的, 内禀作用强度原来基本相同。弱作用之所以比电磁作用弱的缘由是: 相互作用的粒子处于低能时, 很不容易“推动”静质量很大的中间玻色子传递弱相互作用, 低能下的弱作用耦合强度, 比没有静质量的光子传递的电磁作用耦合强度大为减弱。只要相互作用的粒子能量足够高, 就能“有力推动”中间玻色子传递弱作用。这时弱作用和电磁作用的耦合强度就基本相同了, 两种作用在高能下“合二而一”地统一成弱电统一相互作用。其基本耦合常数—电弱同位旋群  $SU(2)$  规范场的相应耦合常数  $g_{\tau}$  和电弱超荷群  $U(1)$  规范场的相应耦合常数  $g_Y$ , 是不能直接测量的, 但是它们和可以直接测量的电磁作用耦合常数  $e$  及弱作用耦合常数  $g$  之间存在如下关系:

$$g_{\tau} = \frac{e}{\sin \theta_W} = g \cos \theta_W$$

$$g_Y = \frac{e}{\cos \theta_W} = g \sin \theta_W$$

### 三、弱电统一理论的验证

#### 弱电统一理论的理论验证

1971年, 荷兰特霍夫特从理论上证明: 在真空对称性自发破缺的过程中, 仍保持可重整性。故弱电统一理论是可重整化的。

#### 弱电统一理论的实验验证

##### 1 中性流的存在

验证弱电统一理论正确性的关键实验, 是检验是否存在以中性中间玻色子  $Z^0$  为媒介的弱相互作用, 它是在轻子或强子组成的中性弱流之间进行的。

##### (1) $\mu$ 中微子的散射

###### ① $\mu$ 中微子在电子上的散射

西欧核子研究中心 (CERN) 用  $25\text{GeV}$  ( $1\text{GeV} = 10^9\text{eV}$ ) 的高能质子与原子核碰撞产生  $K$  介子和  $\pi$  介子。这些介子衰变成的中微子, 大部分是  $\mu$  中微子  $\nu_{\mu}$  及其反粒子  $\bar{\nu}_{\mu}$ 。高能  $\nu_{\mu}$  和电子碰撞, 被打出的电

子在核附近韧致辐射光子  $\gamma$ ,  $\gamma$  在核附近转化为电子对:  $\gamma \rightarrow e^- e^+$ 。因为  $\nu_\mu$  和  $e^-$  不能组成荷电弱流, 只能组成中性弱流, 即借助  $Z^0$  的媒介才能实现两者的散射, 所以上述链式过程只在中性流存在时才能发生。CERN 用大型气泡室探测, 在 70 万张照片中发现 1 个中性流事例。

### ② $\mu$ 中微子在核子上的散射

当高能  $\nu_\mu$  在质子或中子上散射时, 若交换  $Z^0$ , 则  $\nu_\mu$  仍保持为  $\nu_\mu$ , 并产生若干介子; 被撞核子可保持不变, 也可发生质子变中子、中子变质子, 不产生单个  $\mu$  子。若交换  $W^+$  或  $W^-$ , 则  $\nu_\mu$  变成单个  $\mu$  子, 也产生若干介子。通过荷电弱流或中性弱流的作用, 末态分别有或没有单个  $\mu$  子。1973 年, CERN 的 Gargamelle 小组在 400—500GeV 质子加速器上, 用超大型超导磁体氢泡室, 从 30 万个事例中发现 1 个末态无  $\mu$  事例, 进而发现单个  $\mu$  子出现和不出现的次数比约为 3:1。证实了弱作用中的中性流的存在。

### (2) 极化电子在核子上的散射

美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)泰勒小组, 做了极化电子在氘核上散射的实验:

$$e(\text{极化的}) + d(\text{非极化的}) \rightarrow e' + X$$

其中,  $e$  是纵向极化(自旋角动量与动量平行)的入射电子,  $d$  是非极化的氘核,  $e'$  是散射电子,  $X$  是所有其他的作用产物。

若  $\sigma_R$  和  $\sigma_L$  分别是右旋纵向极化(自旋角动量和动量同向)和左旋纵向极化(自旋角动量和动量反向)的电子在氘核上散射的微分截面, 即落在一定方向的散射电子  $e'$  在单位立体角内对应单位能量的作用几率

$$\sigma_{R(L)} = \frac{d^2 \sigma_{R(L)}}{d\Omega dE'}$$

$$A = \frac{\sigma_R - \sigma_L}{\sigma_R + \sigma_L}$$

若不存在  $Z^0_\mu$ , 则上述散射只能通过电磁作用发生; 电磁作用宇称守恒、左右对称,  $\sigma_R = \sigma_L$ ,  $A = 0$ 。若存在  $Z^0_\mu$ , 则上述散射除电磁作用外, 还存在交换  $Z^0$  的弱中性流的作用; 弱作用宇称不守恒、左右不对称, 和  $Z^0_\mu$  耦合的弱中性流同电磁作用相干涉的结果, 使  $\sigma_R \neq \sigma_L$ ,  $A \neq 0$ 。

若  $E_0$  和  $E'$  分别是入射和散射电子的能量,

$E_0 - E'$  是电子传递给强子的能量,  $Y = (E_0 - E')/E_0$ ;  $Q$  是不变的四动量(四维时空中的动量)传递。在  $E_0 = 19.4\text{GeV}$ 、 $E'$  从 11 到 14.5GeV 时, 实验测得  $A/Q^2 = (-9.5 \pm 1.6) \times 10^{-5} (\text{GeV}/C^2)^{-2} \neq 0$ ,  $A \neq 0$ , 其数量级约为  $10^{-4}$ 。极化电子在核子上的散射中, 存在违反宇称守恒的由  $Z^0$  传递的弱相互作用, 从而证实了弱中性流的存在。

弱电统一理论得到发现弱中性流的实验证实, 从而该理论的创立者格拉肖、温伯格和萨拉姆共同获得 1979 年诺贝尔物理学奖。

### 2 中间矢量玻色子的发现

弱电统一理论预言传递弱作用的规范粒子—中间矢量玻色子  $W^+$ 、 $W^-$  和  $Z^0$  的存在, 推得其静质量

$$m_W = (83.0 \pm 2.5)\text{GeV}/C^2$$

$$m_Z = (93.7 \pm 2.1)\text{GeV}/C^2$$

1983 年 1 月, CERN 在超级质子同步加速器(SPS)加速的能量均达 270GeV 的质子和反质子对撞中, 产生带电中间矢量玻色子  $W^+$ 、 $W^-$ 。同年 5 月, 鲁比亚的 UAI 组在发现  $W^\pm$  的 SPS 上又发现中性中间矢量玻色子  $Z^0$ 。其反应为

$$p + \bar{p} \rightarrow W^+ + X \text{ 或 } W^- + X \text{ 或 } Z^0 + X$$

$X$  是一群强子(几乎都是  $\pi$  介子)。 $W^+$  或  $W^-$  的产生几率约为  $5 \times 10^{-9}$ ,  $Z^0$  的产生几率约为  $1 \times 10^{-9}$ 。

$W^+$  和  $W^-$  以  $10^{-25}$  秒的平均寿命衰变成带电轻子和中微子:  $W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 、 $W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 、 $W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$ 、 $W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$ 。 $Z^0$  也以  $10^{-25}$  秒的平均寿命衰变为正负轻子对:  $Z^0 \rightarrow e^- e^+$ 、 $Z^0 \rightarrow \mu^- \mu^+$ , 其衰变能量宽度  $\Gamma_Z = (2.19^{+0.70}_{-0.50} \pm 0.22)\text{GeV}$ 。 $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  衰变成的带电轻子具有很高能量和大横动量(横动量是动量在垂直质子、反质子对撞方向的分量)。

$W^\pm$  和  $Z^0$  的发现进一步证实弱电统一理论和规范场理论的正确性。主要发现者意大利的鲁比亚和荷兰的范德梅尔荣获 1984 年诺贝尔物理学奖。

1986 年, CERN 提高仪器的精度, 重新测量了中间矢量玻色子的静质量, 其量值为

$$m_W = (80.1 \pm 0.8 \pm 1.3)\text{GeV}/C^2,$$

$$m_Z = (92.1 \pm 1.1 \pm 1.5)\text{GeV}/C^2$$

实验值与弱电统一理论推导的理论值高度符合, 为弱电统一理论的正确性提供了新的有力的证据。