

β衰变对揭示弱作用本质的贡献

(续)

三、守恒矢量流理论与¹²B和¹²N β能谱形状的测量

新的疑难： $g_V^\mu \approx g_\mu$

实验上发现，β衰变中的矢量耦合常数 g_V^β 不仅在所有超允许 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁中有惊人的相同，而且与μ衰变中费米型相互作用耦合常数 g_μ 也几乎一样，误差不超过1~2%。这种极好的一致，本来正是普适费米相互作用所要求的。但是，再进一步考虑，却出现了新的疑难。因为核子不同于μ子，它可以发射或吸收虚π介子，例如 $p \leftrightarrow p + \pi^0 \leftrightarrow n + \pi^+ \leftrightarrow p + \pi^+ + \pi^- \leftrightarrow \dots$ ，因此在它的周围好象包着一层介子云。这层介子云对核子的β衰变必然要产生影响，那么为什么包着介子云的核子会与裸μ子有相同的弱作用呢？这显然是一个令人困惑的问题。

费曼和盖尔曼提出守恒矢量流假设

为了解决这个疑难，费曼和盖尔曼对照电磁学理论提出了守恒矢量流(CVC)假说。在图3(a)中，我们看到：在电磁跃迁中，由于电荷守恒，物理质子、裸质子和π介子云与电磁场相互作用的耦合常数都是e，也就是说，包着介子云的物理质子和裸质子与电磁场的相互作用是相同的。由连续性方程 $\nabla \cdot j + \partial \rho / \partial t = 0$ 可知：电荷守恒(即 $\partial \rho / \partial t = 0$)意味着电流j的散度等于零，也就是说，j是无散流或守恒流。在图3(a)中，j是由裸质子和π介子云贡献的电流(或称电磁流)。对照图3(a)和图3(b)，我们可以看到，在β衰变中情况是类似的。只要由裸中子和π介子云贡献的弱矢量流是守恒流，包着π介子云的物理中子就会与裸中子有相同的弱矢量相互作用。这就是费曼和

厉光烈

(中国科学院高能物理研究所)

盖尔曼提出的CVC假说。

进一步他们又提出了同位旋三重态矢量流假说，即把电磁流的同位旋矢量部分 \mathcal{J}_μ^\pm 和β衰变中的弱矢量流，看作是同位旋三重态矢量流的三个分量：

$$\beta^- \text{ 衰变, } J_\mu^+ = \phi_N^\dagger \gamma_\mu \tau_+ \phi_N + i[\phi_\pi^* T_+ \nabla_\mu \phi_\pi - (\nabla_\mu \phi_\pi)^* T_+ \phi_\pi];$$

$$\text{电磁跃迁, } J_\mu^z = \phi_N^\dagger \gamma_\mu \tau_z \phi_N + i[\phi_\pi^* T_z \nabla_\mu \phi_\pi - (\nabla_\mu \phi_\pi)^* T_z \phi_\pi];$$

$$\beta^+ \text{ 衰变, } J_\mu^- = \phi_N^\dagger \gamma_\mu \tau_- \phi_N + i[\phi_\pi^* T_- \nabla_\mu \phi_\pi - (\nabla_\mu \phi_\pi)^* T_- \phi_\pi]. \quad (3)$$

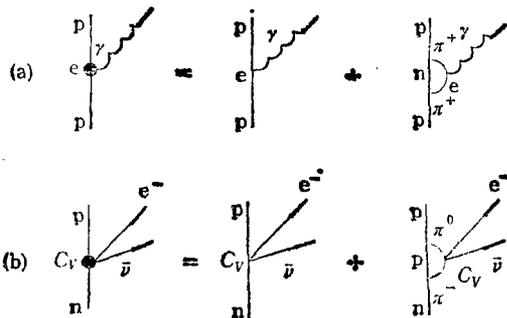


图3 CVC理论中的电磁跃迁和β衰变

(a) 物理质子的电磁跃迁是裸质子和π介子云贡献之和，
(b) 物理中子的β衰变是裸中子和π介子云贡献之和。

其中 ϕ_N 和 ϕ_π 分别为核子和π介子的波函数： $\tau_\pm = 1/2(\tau_x \pm i\tau_y)$ ， $T_\pm = 1/2(T_x \pm iT_y)$ ， τ 和 T 分别为核子和π介子的同位旋矢量； ∇ 为梯度算符。显见，由同位旋三重态矢量流守恒可以给出弱矢量流守恒，但是应当注意，仅仅弱矢量流守恒和电荷守恒并不意味着同位旋三

②引入同位旋后，裸核子的电磁流可以写成

$$j_\mu = \phi_N^\dagger \gamma_\mu \tau_\mu (1 + \tau_z) \phi_N / 2 = j_\mu^+ + j_\mu^-,$$

其中 $j_\mu^+ = (1/2)\phi_N^\dagger \gamma_\mu \tau_\mu \phi_N$ 是电磁流的同位旋标量部分。 $j_\mu^- = (1/2)\phi_N^\dagger \gamma_\mu \tau_\mu \tau_z \phi_N$ 是电磁流的同位旋矢量部分。在考虑π介子云引起的修正以后， j_μ^+ 就变成(3)式中的 j_μ^+ 。

重态矢量流守恒. 另外, 还应当指出: 无论是守恒矢量流假说, 还是同位旋三重态矢量流假说, 都只涉及到弱作用的矢量耦合部分. 轴矢流并不守恒. 因为如果轴矢流也守恒, 那么 $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$ 和 $\pi \rightarrow e + \nu_e$ 的弱衰变过程就不可能发生, 而这是与实验事实相矛盾的.

吴健雄等通过精确测量 ^{12}B 和 ^{12}C β 能谱形状验证 CVC 理论

对于电磁相互作用, 虽然 π 介子云引起的修正并不改变耦合常数(即电荷 e), 但是它可以明显地改变核子的磁矩. 在物理上, 这是由于裸 π 介子具有较小质量而携带较大的磁矩的缘故. 核子反常磁矩正是因此而产生的. 根据 CVC 理论, 在 β 衰变中也应有类似的反常磁矩项, 盖尔曼称其为弱磁项. 由于弱磁项的存在, β 能谱的库里标绘将会偏离线性. 因此, 通过实验测量这种偏离便可验证理论的预言. 作为一个例子, 盖尔曼建议测量 ^{12}B 和 ^{12}N β^\pm 衰变的能谱. 从图 4 中可以看到, ^{12}B 的基态、 ^{12}C 的能量为 15MeV 的激发态和 ^{12}N 的基态正好组

成 0.05% (MeV) $^{-1}$. 两者明显不同. 因此, 通过实验测量 a_\pm 便可知道哪一种理论更正确. 但是, 由于谱形因子与 1 相差极小, 做这样的实验测量是很困难的.

1962年, 梅耶-库库克和米歇尔首先测量了 ^{12}B 和 ^{12}N 的 β 能谱, 得到 $a_- = (+1.82 \pm 0.08) \% (\text{MeV})^{-1}$ 、 $a_+ = (+0.52 \pm 0.20) \% (\text{MeV})^{-1}$ 和 $a_- - a_+ = (1.30 \pm 0.31) \% (\text{MeV})^{-1}$. 虽然他们得到的 $(a_- - a_+)$ 值与 CVC 理论预言值 $[(1.10 \pm 0.17) \% (\text{MeV})^{-1}]$ 符合得很好, 但是 a_\pm 值本身与 CVC 理论预言值符合得并不好. 随后吴健雄等在 1963 年用他们的无铁中阈聚焦磁谱仪, 更精细地测量了这两个 β 能谱, 其结果 $[a_- = (+0.55 \pm 0.10) \% (\text{MeV})^{-1}$, $a_+ = (-0.52 \pm 0.06) \% (\text{MeV})^{-1}$, $a_- - a_+ = (1.07 \pm 0.24) \% (\text{MeV})^{-1}]$ 与 CVC 理论的预言值符合得极好, 从而成功地验证了 CVC 理论. 还有其他一些实验, 例如 $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$ 绝对衰变几率的测量和 ^8Li 、 ^{12}B β - α 角关联的测量等, 它们的实验结果也都支持 CVC 理论.

卡比博角

CVC 理论要求 $g_V^b = g_\mu$, 但实际上 g_V^b 与 g_μ 并不严格相等, 精确的实验测量表明, $(g_\mu - g_V^b)/g_\mu = (2.2 \pm 0.15) \%$. 耦合常数之间的这种差别显然是与 CVC 理论的要求相矛盾的. 在比较奇异数 (S) 守恒和不守恒的半轻子衰变几率时, 这种矛盾变得更加突出. 例如, 奇异数守恒 ($\Delta S = 0$) 的 π^+ 介子的半轻子衰变 ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 和 $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$) 的衰变几率要比相应的奇异数不守恒 ($|\Delta S| = 1$) 的弱作用过程 ($K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 和 $K^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$) 大 20~30 倍. 另外, $\Delta S = 0$ 的中子 β 衰变 ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$) 的几率也要比 $|\Delta S| = 1$ 的超子的半轻子衰变 (例如, $\Lambda \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ 和 $\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$) 的几率大 20~30 倍. 为什么 $|\Delta S| = 1$ 的弱作用过程的衰变几率会如此之小呢? 为了回答这个问题, 卡比博根据强子的 $SU(3)$ 群分类提出了一个很吸引人的假说. 以 $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 和 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 为例, 他认为, 耦合常数 g_K 和 g_π

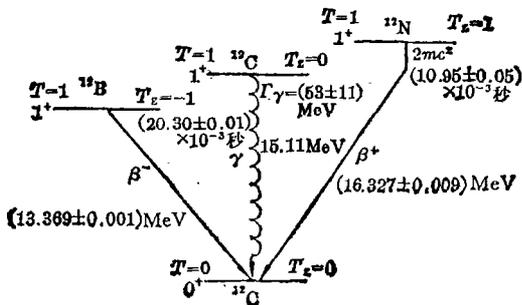


图 4 $A = 12$ 的同位旋三重态

成一个同位旋三重态(同位旋 $T = 1$, 自旋和宇称为 1^+)。它们通过发射 β^- 、 γ 和 β^+ 粒子跃迁到 ^{12}C 的基态 ($T = 0, 0^+$)。考虑到弱磁项的存在, β^\pm 衰变的能谱可以写成

$$N_\pm(W) \approx PW(W_0 - W)^2 \left(1 \pm \frac{8}{3} a_\pm W\right), \quad (4)$$

其中 $PW(W_0 - W)^2$ 为给出线性库里标绘的统计因子; $\left(1 \pm \frac{8}{3} a_\pm W\right)$ 为谱形因子, a_\pm 可由理论算出: CVC 理论给出的结果是 $a_\pm(\text{CVC}) = \mp (0.55 \pm 0.09) \% (\text{MeV})^{-1}$; 不考虑 π 介子云修正的费米理论给出的结果是 $a_\pm(\text{费米}) = \mp$

之所以不一样,是因为人们把 K^+ 和 π^+ 看作是基础粒子的缘故。实际上, K^+ 和 π^+ 是有内部结构的。按照强子结构的夸克模型,它们同属于一个八重态介子族,这个介子族包含 π^+ 、 π^0 、 π^- 、 η 、 K^+ 、 K^0 、 \bar{K}^0 和 K^- 等 8 个粒子。在 $SU(3)$ 群对称性不破坏的情况下,这 8 个粒子的任何线性组合都可看作是这介子族的基础粒子。如果取 K^+ 和 π^+ 的线性组合: $\phi_{K^+}' = (g_\pi \phi_{\pi^+} + g_K \phi_{K^+})/g_0$ 和 $\phi_{K^+}' = (g_K \phi_{\pi^+} - g_\pi \phi_{K^+})/g_0$ (其中 $g_0 = (g_\pi^2 + g_K^2)^{1/2}$ 称为“弱荷”),用 K^+ 和 π^+ 代替 K^+ 和 π^+ 当作基础粒子,那么 $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 和 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 的耦合常数将完全一样,都是 g_0 。而 g_K 和 g_π 可通过一个角度 θ_c 由 g_0 给出: $g_K = g_0 \sin \theta_c$, $g_\pi = g_0 \cos \theta_c$ 。 θ_c 就称为卡比博角。一般地讲, $\theta_c = \arctan \frac{g_{|\Delta S|=1}}{g_{|\Delta S|=0}}$ 。由实验数据定出, $\theta_c = 0.26$ 弧度,对矢量耦合和轴矢耦合都一样。利用卡比博角,不仅成功地解释了奇异粒子(包括 K 介子和超子等)的半轻子衰变,而且在考虑 $SU(3)$ 群对称性破坏引起的修正以后,也能很好地解释 g_V^{μ} 和 g_μ 之间的细微差别。

四、弱电统一理论的建立和中间玻色子 W^\pm 、 Z^0 的实验发现

李政道和杨振宁提出中间玻色子的概念

在低能情况下,普适 ($V-A$) 费米相互作用可以很好地解释 β 衰变和 μ 衰变等弱作用过程。在引入卡比博角后,又可以很好地解释奇异粒子的半轻子弱衰变过程。但是,当把它推广到高能情况时,就遇到了很大的困难。首先是在一些计算中出现了无穷大,而且这些无穷大不能象在电磁作用理论中那样,可通过重正化消除掉。其次用它算出的轻子散射截面不符合从几率守恒要求推算出的结果,即破坏所谓的么正性条件。为了克服这些困难,李、杨对照核力的汤川理论^⑩,提出 4 费米子弱作用是通过中间玻色子 W^\pm 来传递的。在对有关的实验事实进行分析以后,他们指出: W^\pm 是一种带电的自旋为 1 的矢量粒子,寿命很短,质量很大。因此,在低能极限下,相互作用力程与粒子的德

布罗意波长相比可以忽略不计,于是便可以回到不需要通过第三者来传递的普适 ($V-A$) 费米相互作用。但是,由于 W^\pm 的质量太大,估计为 $30\text{GeV} < M_{W^\pm} < 300\text{GeV}$,因此在当时的实验条件下很难观察到。

弱电统一理论的建立和初步的实验验证

前面已经讲过,费米提出 β 衰变理论和费曼、盖尔曼提出 CVC 理论时,都将 4 费米子弱作用与电磁作用作了类比,这反映了这两种相互作用非常相似。但是,它们的耦合方式不一样。4 费米子弱作用,即普适 ($V-A$) 费米相互作用是直接作用,而电磁作用是通过电磁场来传递的。李、杨的中间玻色子理论的提出消除了这一差别,使人们猜测弱作用和电磁作用可能象电和磁一样,是一种作用的两种表现,它们的原始耦合常数可能是一样的,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。

这种猜测促使温伯格(1967年)和萨拉姆(1968年)分别独立地提出了弱电统一理论。考虑到电磁作用是通过一种规范场——电磁场来传递的,他们认为弱作用也可以通过规范场来传递。他们应用杨振宁和米尔斯1954年提出的规范场理论,选用 $SU(2) \otimes U(1)$ 群作为统一描述弱作用和电磁作用的规范群。按照杨振宁和米尔斯原来的定义,与这种规范群相应的 4 个规范场的量子是没有静止质量的,都不能作为弱作用的中间玻色子。因此,他们进一步又引入希格斯机制使这 4 个规范场重新组合成 3 个有静止质量的规范场,其量子为中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 , 以及一个没有静止质量的规范场——电磁场,其量子为光子。这样,他们便统一地描述了弱作用和电磁作用。

温伯格和萨拉姆的弱电统一理论预言,中间玻色子 W^\pm 、 Z^0 的质量分别为: $M_{W^\pm} = (82 \pm 2.4)\text{GeV}$, $M_{Z^0} = 93\text{GeV}$ 。由于这些中间玻色子的质量太大,当时世界上所有的加速器的能量都不足以产生它们,因此实验上没有能够立即

^⑩ 根据核力的汤川理论,核子之间的相互作用是通过介子来传递的。

发现。但是，由于弱电统一理论不仅预言存在李、杨提出的中间玻色子 W^\pm ，而且预言存在一种新的中间玻色子 Z^0 ，因此，只要找到交换 Z^0 的中性流反应，例如 $e^- + \nu_\mu \rightarrow e^- + \nu_\mu$ ， $\mu^- + \nu_e \rightarrow \mu^- + \nu_e$ 和 $\nu + n \rightarrow \nu + n$ 等(见图5)，便可检验理论的预言。1973年，在西欧核子研究中心的一个实验组利用庞大的重液泡室和能量为 28GeV 的加速器所产生的中微子束流，找到了中性流反应 $e^- + \nu_\mu \rightarrow e^- + \nu_\mu$ 的第一个事例，从而间接地证明了 Z^0 的存在，验证了理论的预言。另外，弱电统一理论还预言，在 e^+e^- 对撞机的实验中，既可以通过电磁作用产生 $\mu^+\mu^-$ 对，也可以通过弱作用产生 $\mu^+\mu^-$ 对(见图6)。因此，通过实验观察这两种反应之间的弱电干涉现象也可以检验理论的预言。1978年，在美国斯坦福直线加速器中心工作的由泰勒领导的实验组作了一个纵向极化电子在氩核上散射的实验，得到了与弱电统一理论预言相符合的实验结果，再次证实了弱电统一理论的正确性。

因对弱电统一理论作出了贡献，温伯格、萨拉姆和格拉肖共同获得了1979年度的诺贝尔物理学奖。

中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 的实验发现

1981年10月，西欧中心的质子-反质子对撞机(SPS)投入运行。两束粒子在质心系中的能量高达 540GeV ，使实验上发现中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 成为可能。1983年1月20—21日，

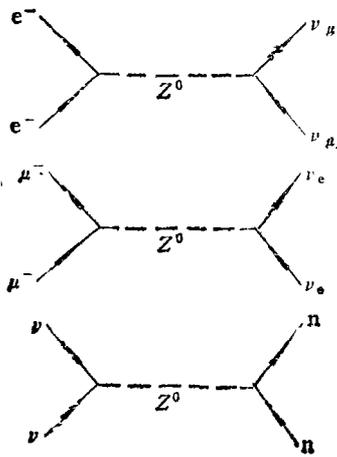


图5

在这台对撞机上工作的两个实验组分别宣布发现了 W^\pm 。其中，由鲁比亚领导的代号为 UA1 的实验组在10亿次质子-反质子碰撞中观察到5个 W^\pm 事例，确定 $M_{W^\pm} = (81.70 \pm 6.44)$ GeV；另一个由德勒拉领导的代号为 UA2 的实验组在相同数目碰撞中观察到4个 W^\pm 事例，确定 $M_{W^\pm} = (83.05 \pm 7.05)\text{GeV}$ 。这二个组定出的 M_{W^\pm} 值都与弱电统一理论预言值符合得很好。由于产生 Z^0 的机会要比产生 W^\pm 机会小10倍，因此它没有能够与 W^\pm 一同被发现。西欧中心的科学家为了发现 Z^0 ，花了4个月的时间将束流的亮度提高了10倍。UA1组终于在5月4日找到了 Z^0 的第一个事例，到6月1日西欧中心总所长朔佩尔宣布这一发现时，一共找到了5个 Z^0 事例，确定 $M_{Z^0} \leq 100\text{GeV}$ ，这与弱电统一理论预言值也符合得很好。

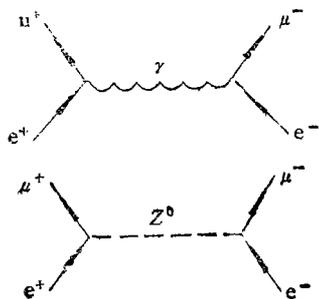


图6

GeV；另一个由德勒拉领导的代号为 UA2 的实验组在相同数目碰撞中观察到4个 W^\pm 事例，确定 $M_{W^\pm} = (83.05 \pm 7.05)\text{GeV}$ 。这二个组定出的 M_{W^\pm} 值都与弱电统一理论预言值符合得很好。由于产生 Z^0 的机会要比产生 W^\pm 机会小10倍，因此它没有能够与 W^\pm 一同被发现。西欧中心的科学家为了发现 Z^0 ，花了4个月的时间将束流的亮度提高了10倍。UA1组终于在5月4日找到了 Z^0 的第一个事例，到6月1日西欧中心总所长朔佩尔宣布这一发现时，一共找到了5个 Z^0 事例，确定 $M_{Z^0} \leq 100\text{GeV}$ ，这与弱电统一理论预言值也符合得很好。

中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 发现证明了温伯格-萨拉姆的弱电统一理论是完全正确的。

建立弱电统一理论的重要意义

弱电统一理论的建立和中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 的发现是物理学上一个划时代的事件，其重要性可以与电磁学理论的建立和电磁波的发现相比拟。虽然目前还无法估量它是否会象电磁学理论那样对人类生活产生巨大的影响，但是，理论上的意义是很清楚的：从电磁统一到弱电统一，反映了基本相互作用之间有某种内在的联系，它促使人们进一步去探索统一弱电作用和强作用的可能性。