



β 衰变对揭示弱作用本质的贡献

厉光烈

(中国科学院高能物理研究所)

在过去的半个多世纪里, β 衰变的研究对理解弱作用的本质起了主要的, 甚至可以说是决定性的作用。本文¹⁾将比较详细地介绍人们通过 β 衰变认识弱作用本质的过程: 从费米提出 β 衰变理论, 确定普适 ($V-A$) 费米相互作用, 一直到弱作用和电磁作用的统一。

一、 β 衰变的费米理论及其实验验证 理论的提出

费米在参加索尔维会议以后, 根据泡利的中微子假说提出了他的 β 衰变理论。他认为, 与原子发光类似, β 衰变也是一种跃迁过程。在此跃迁过程中, 原子核内的一个中子转变为质

MeV 到 174GeV, 相差五万倍, 质量的起源是什么? ……所有这些问题都促使高能物理学家深入研究它们的性质和探寻新的物理规律。

目前, 高能物理向两大方向发展: 一是向超高能发展, 如正在筹建的 LHC 就是西欧各国通过国际合作来完成的超高能加速器, 以期揭示新的物理规律; 二是向高精度发展, 如美国和日本分别正在建造的 B 介子工厂就是精细研究 b 夸克的性质的高能加速器和探测器。这两个方向的发展相辅相成, 目标在于深入研究现今这一层次甚至更新层次的物理性质和规律。

向超高能发展对揭示新物理固然很重要, 但耗资巨大, 达几十亿美元。LHC 正通过以欧洲为主的国际合作来完成。高能物理学家越来越重视精细研究现今这一层次的轻子和夸克。对底夸克 b 的精细研究的物理目标使得 B 介子工厂应运而生, 美国和日本同时筹建, 预期将在

子、电子和中微子²⁾。在原子发光过程中, 跃迁是通过电磁作用发生的; 在 β 衰变过程中, 跃迁是通过 4 个费米子之间的一种弱作用发生的 (人们称它为费米相互作用)。以量子力学的辐射理论为依据, 他直截了当地假设: 从一个中子态跃迁到 (质子 + 电子 + 中微子) 态的几率正比于波函数 ψ_n, ψ_p, ψ_e 和 ψ_ν 乘积的平方。由于波函数 ψ 是具有 4 个分量的旋量, 因此有各种各样的组合方式可以把它们相乘在一起。一般地讲, 由这 4 个波函数可以组成 5 种相对论不变的组合, 即标量耦合 (S)、矢量耦合 (V)、

1) 本文是上期“ β 衰变对物理学基本规律的两次冲击”一文的姐妹篇。

2) 现在我们知道, 不是中微子, 而是反中微子。

本世纪末投入运行。我国北京正负电子对撞机 (BEPC) 已取得国际瞩目的物理成果, 它的研究对象是第二代的粲夸克 c 和第三代轻子 ν_τ, τ 。我国高能物理学家正与国际同行讨论提出建造 τ -粲工厂的建议, 以期对 τ 轻子和粲夸克作精细研究。

高能物理学是研究微观世界物质结构、基本组成成份的性质及其相互作用规律的前沿科学。从提出夸克的设想至今已经历了 30 年, 高能物理的发展不仅发现了夸克家族, 揭示了夸克-轻子这一层次的物理性质和规律, 而且开始寻找超出夸克-轻子这一层次的物理性质和规律。人们期望, 21 世纪的高能物理学将对认识微观世界有新的突破, 就像 20 世纪初从原子物理学深入到原子核物理学和尔后的高能物理学一样。21 世纪必将把对微观世界的认识推向一个崭新的层次。

张量耦合 (T)、轴矢耦合 (A) 和赝标耦合 (P)，但是费米本人从来不喜欢由这 5 种耦合的线性组合构成普遍的 4 费米子相互作用的想 法。他在建立 β 衰变理论时只选用了矢量耦合，甚至当实验数据不利于这种选择时，他仍然说：“我还是相信它是矢量作用。”在下一节中我们将会看到，人们在 25 年后确定的普适 ($V-A$) 费米相互作用与费米当初的选择并没有多大区别。虽然如此，费米理论在刚提出时并没有很快为人们所接受。1933 年 8 月当费米把论文送到英国《自然》杂志去发表时，遭到了拒绝。理由是，太抽象，没有实用价值。后来，他又把它送到意大利的一家科学杂志和德国的《物理杂志》，才被接受发表。

实验验证

费米理论早期的不幸遭遇主要在于没有及时得到实验验证。根据费米理论，允许 β 跃迁²⁾ 的能谱分布应该给出直线的库里标绘³⁾。但不幸的是，当时人工放射性原子核还应用得很少， RaE (^{210}Bi) 仍然是研究 β 能谱形状的唯一 β 放射性源，而这个原子核的 β 能谱形状极其特殊，它的特性一直到六十年代方被弄清楚。因此，早期 β 能谱的实验研究没有能够给出直线的库里标绘，也就是说并不支持费米理论。为了解释实验数据，科诺宾斯基和乌伦贝克对费米理论进行了修正，在费米理论的框架里加进包含中微子波函数导数的相互作用项。根据他们的理论，是 $[\mathcal{N}_{\pm}(W)/FPW]^{1/4}$ 而不是 $[\mathcal{N}_{\pm}(W)/FPW]^{1/2}$ 对 W 的标绘是直线。当时有些实验数据支持科诺宾斯基-乌伦贝克理论，但是后来发现这些实验数据并不可靠。1939 年，劳森和科克研究了 ^{114}In 的 β 能谱，泰勒研究了 ^{64}Cu 的 β 能谱，都得到了大体上是直线的库里标绘，只是在低能部分（小于 200keV）往往出现偏离。一直到第二次世界大战后，吴健雄和阿尔伯特才解释了低能部分的这种偏离。他们仔细地研究了 ^{35}S 和 ^{64}Cu 的 β 能谱，发现这种偏离主要是由于 β 粒子在有一定厚度的不均匀的放射源和衬托中的吸收和散射引起的，放射源越薄越均匀，偏离越小。他们用薄放射源测量的结果

和直线偏离很小。另外，他们还发现，由于 ^{64}Cu 既可发射 β^+ 粒子，又可发射 β^- 粒子，两者的强度和衰变能量都差不多，弹性背散射效应也都一样，因此可以用测量 $\mathcal{N}_{\beta^+}/\mathcal{N}_{\beta^-}$ 来很好地检验费米理论的预言。他们的实验结果与理论预言符合得很好，从而验证了费米理论，抛弃了科诺宾斯基-乌伦贝克修正。

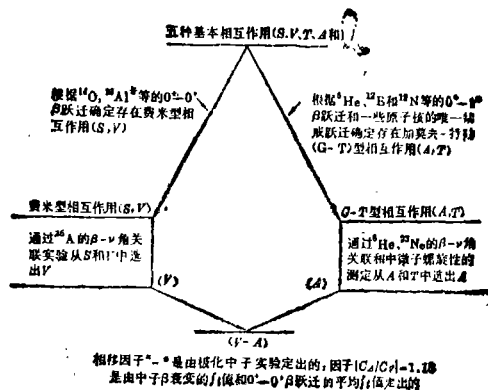


图 1

二、普适 ($V-A$) 费米相互作用

吴健雄教授来华讲演时曾用图 1 简明扼要地描述了确定普适 ($V-A$) 费米相互作用的过程。现将图 1 说明如下：

S, T 优惠

前面已经讲过，费米相互作用的普遍形式应该包含五种基本相互作用，即 S, V, T, A 和 P 。在这五种基本相互作用中，实验上已经发现 P 的贡献极小³⁾，其余四种可以根据它们的选择规则分为两类：表征 S 和 V 的选择规则称

- 1) 根据跃迁的快慢， β 跃迁被分为允许跃迁、第一级禁戒跃迁和第二级禁戒跃迁等。前一级跃迁比后一级快 c/v 倍，这里 c 是光速， v 是原子核内核子的速度。
- 2) 根据费米理论，允许 β 跃迁的能谱分布可以写成： $[\mathcal{N}_{\pm}(W)/F(\mp Z, W)PW]^{1/2} = K \cdot (W_0 - W)$ 。这里 $\mathcal{N}_{\pm}(W)$ 表示单位时间内所发射的能在 W 和 $W + dW$ 之间的 β^{\pm} 粒子数； $F(\mp Z, W)$ 一般称为费米函数，表示原子核库仑场引起的修正； P 为 β^{\pm} 粒子的动量； W_0 为衰变能量； K 为一个与能量无关的常数。显见， $[\mathcal{N}_{\pm}(W)/FPW]^{1/2}$ 对 W 的标绘应该是一条直线，这种标绘一般称为库里标绘或费米标绘。
- 3) 在非相对论近似下， P 的贡献可以忽略不计，从 π 介子衰变实验结果来看， P 的贡献也极小。 P 和 A 的相对权重之比约为 5×10^{-4} 。

为费米选择规则, S 和 V 称为费米型相互作用, 表征 T 和 A 的选择规则称为加莫夫-特勒选择规则, T 和 A 称为 $G-T$ 型相互作用. 在允许 β 跃迁的情况下, 费米选择规则是 $\Delta J = 0$, 宇称不变; $G-T$ 选择规则是 $\Delta J = 0, \pm 1$ ($0 \rightarrow 0$ 跃迁除外), 宇称不变¹⁾. 1936 年加莫夫和特勒首先在 ${}^6\text{He}$ 的 β 衰变中确认存在 $G-T$ 型相互作用, 因为 ${}^6\text{He}$ 的 β 衰变是服从 $G-T$ 选择规则的宇称不变 $0 \rightarrow 1$ 跃迁. 后来谢尔和格哈特, 以及阿尔伯和斯特哈林在 1953 年又从 ${}^{10}\text{O}$ 、 ${}^{10}\text{C}$ 等原子核的 β 衰变中发现了 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁, 从而确认了费米型相互作用的存在, 因为只有费米选择规则允许出现 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁. 那么, 在费米型相互作用中 S 和 V , 以及在 $G-T$ 型相互作用中 T 和 A , 是否同样重要呢? 回答是否定的. 实验上已经发现不存在菲尔兹干涉项²⁾. 这表明在 S 和 V 或 T 和 A 中只能有一个为主, 另一个很弱. 结合 β 能谱形状的一些其他实验证据, 在这四种基本相互作用中只允许有两种组合, 即 ST 和 VA . 1953 年拉斯塔德和鲁比作了纯 $G-T$ 型 β^- 放射源 ${}^6\text{He}$ 的 $\beta-\nu$ 角关联实验, 从 $G-T$ 型相互作用 T 和 A 中选出 T . 这样, 就确定了在 β 衰变中起作用的费米相互作用是 ST .

普皮三角形与普适费米相互作用

在此期间, 人们已经发现 μ 衰变和 μ 俘获与原子核的 β 衰变十分类似: 它们构成所谓普皮三角形 (见图 2³⁾) 的三个边; 它们的耦合常数与强作用的耦合常数相比极小, 而且彼此几乎相等. 人们直觉地感到这种类似一定反映某种内在的联系. 1950 年费米在耶鲁大学的西尔曼讲座中曾经一再强调: “这三种耦合常数之间的类似不是偶然的, 而是有深刻含义的, 只是目前尚不清楚.” 接着, 他又说: “克莱因、提澳姆诺和惠勒, 李政道、罗森布拉斯和杨振宁, 以及其他一些人都注意到了这个事实, 这不可能是一种偶然的巧合, 尽管目前尚不清楚它的含义.” 普适费米相互作用的概念就是那时产生的. 人们希望能够找到一种可以同时描述上述三种弱作用过程的普适费米相互作用. 当

然, 这不仅要求耦合常数相同; 而且要求相互作用有类似的结构. 前面已经提到, 在五十年代初人们已经确定在 β 衰变中起作用的费米相互作用是 ST . 那么, 在 μ 衰变和 μ 俘获中起作用的费米相互作用是不是 ST 呢? 这个问题一直到宇称不守恒发现以后才得到解决.

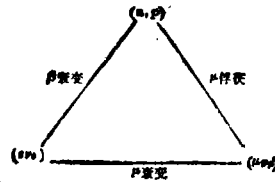


图 2

普适 ($V-A$) 费米相互作用的确定

弱作用中宇称不守恒的发现, 使基本相互作用由 5 种增加到 10 种, 增加的 5 种是破坏宇称守恒的 S 、 V 、 T 、 A 和 P . 虽然验证宇称不守恒的 β 衰变实验同时也确定了这两类相互作用相对权重之间的关系, 但是它们并没有改变以前得到的 ST 优惠的实验结论. 另一方面, 宇称和电荷共轭不守恒的发现, 促使胡道、萨拉姆、李政道和杨振宁分别独立地提出了中微子的二分量理论⁴⁾. 实验上发现中微子是左旋的, 反中微子是右旋的, 因此可以用二分量的旋量代替四分量的旋量来表示中微子的波函数. 这就是中微子的二分量理论. 作为这个理论的一个必然的结果, 是在 μ 衰变中起作用的费米相互作用只能是 VA . 与此同时, 艾伦和他的

- 1) 这里 ΔJ 表示衰变前后原子核自旋的改变 ($\Delta J = J_f - J_i$), $0 \rightarrow 0$ 跃迁表示 $J_i = 0 \rightarrow J_f = 0$ 的 β 跃迁.
- 2) 用上述五种基本相互作用的线性组合构成的费米相互作用的普遍形式, 代替费米当初选用的矢量相互作用, 则有

$$[\mathcal{N}_{\pm}(W)/FPW]^{1/2} = K(W_+ - W)(1 \pm b/W)^{1/2},$$
 由此式给出的 $[\mathcal{N}_{\pm}/FPW]^{1/2}$ 对 W 的标绘称为菲尔兹标绘. 其中非线性项称为菲尔兹干涉项. 前面已经讲过, 吴健雄等对 β 能谱形状的实验研究表明 $[\mathcal{N}_{\pm}/FPW]^{1/2}$ 对 W 的标绘基本上是直线, 也就是说不存在菲尔兹干涉项 ($b=0$). 后来知道, 在费米型相互作用和 $G-T$ 型相互作用中菲尔兹干涉项的上限分别为 $b_F = 0.00 \pm 0.10$ 和 $b_{G-T} = -0.01 \pm 0.02$.

- 3) 图中 $\nu_e, \bar{\nu}_e$ 分别是电子型中微子和 μ 子型中微子. 存在两种中微子的想法是首先由李政道和杨振宁 (1960 年) 提出的. 后来在布鲁克海文实验室 (1962 年) 和西欧核子研究中心 (1963 年) 先后发现了这两种类型的中微子.
- 4) 其实, 早在 1929 年外尔就从数学上证明了用二分量旋量描述无质量狄拉克粒子的可能性. 但因违背宇称守恒而遭到泡利的反对.

合作者作了人们期待以久的纯费米型 β^+ 放射源 ^{38}A 的 β - ν 角关联实验,发现在费米型相互作用 S 和 V 中应选择 V 而不是 S 。这就与以前得到的在 β 衰变中 ST 优惠的实验结论发生了矛盾。1958年初,吴健雄和施瓦茨西尔德重新检查了以前确认 ST 优惠的 ^6He β - ν 角关联实验,发现有很大的系统误差。随后,艾伦小组重新作了 ^6He β - ν 角关联实验,发现在 $G-T$ 型相互作用 T 和 A 中应选择 A 而不是 T 。伯吉等通过极化中子 β 衰变实验又进一步弄清了 V 和 A 有相反的位相,即 $V = -A$ 。这样,就确立了普适的 $(V - A)$ 费米相互作用。后来电子俘获、 μ 俘获、 π 衰变,特别是 π - e 衰变方式的发现和引入卡比博角后奇异粒子的半轻子弱作用衰变等方面的实验,也都证实了 $(V - A)$ 费米相互作用的普适性。

普适 $(V - A)$ 费米相互作用的哈密顿密度可以写成

$$H = g \sum_{i=V,A} C_i (\psi_i^\dagger \gamma_i O_i \psi_n) (\psi_e^\dagger \gamma_i O_i (1 + \gamma_5) \psi_p) + \text{厄米共轭项}, \quad (1)$$

其中 g 为普适的耦合常数; C_i 为相对权重, $C_A = -C_V$, 以及 $\psi_n(p)$ 和 $\psi_e(e)$ 分别为中子(质子)和中微子(电子)的波函数; $O_V = \gamma_\mu$, $O_A = i\gamma_5 \gamma_\mu$, $\gamma_\mu (\mu = 1, 2, 3, 4)$ 和 γ_5 都是

2×2 的厄米矩阵。利用 γ 矩阵的性质,上式可改写为

$$H = G (\Psi_p^\dagger \gamma_i \gamma_\mu \Psi_n) (\Psi_e^\dagger \gamma_i \gamma_\mu \Psi_p) + \text{厄米共轭项}, \quad (2)$$

其中 $G = 4gC_V$, $\Psi = 1/2(1 + \gamma_5)\psi$ (表示核子或轻子的左旋波函数)。显见,除了用 Ψ 代替 ψ 外,上式就是费米当初建议的矢量耦合 β 衰变相互作用。费米当年在没有任何实验事实的情况下,单凭他的物理直觉就给出了如此准确的 β 衰变相互作用形式,不能不令人钦佩。

那么,从理论上讲,普适费米相互作用为什么是 $(V - A)$ 呢? 为了回答这个问题,苏达香和马谢克大胆地假设:总的 4 费米子相互作用在手征变换 ($\psi \rightarrow \gamma_5 \psi$) 下应当是不变的。作为这个假设的一个有趣的结果,就是 4 费米子相互作用被唯一地确定为 $(V - A)$ 。另外,费曼和盖尔曼用狄拉克旋量的二分量公式,萨库拉用狄拉克方程在组合变换 ($\psi \rightarrow \gamma_5 \psi$ 和 $m \rightarrow -m$) 下的不变性,即所谓质量改号不变性,也给出了类似的结果。

(待续)

1) 由中子 β 衰变的比较半衰期(即 f_t 值)和 $0^+ \rightarrow 0^+$ β 跃迁的平均 f_t 值导出 A 和 V 的相对权重之比 $|C_A/C_V| = 1.18$ 。因此 $(V - A)$ 定律与实验数据之间还是有分歧的。但是,由于它的简单性和普适性,它仍受到普遍的重视。

“炸毁月球改造地球”的设想

《科技日报》1994年11月15日报道,美国特拉华大学数学教授亚历山大·亚伯,与一些科学家经过多年研究和模拟试验,共同提出一个“炸毁月球改造地球”的大胆设想。

据亚伯设想,若将月球炸毁,地球的引力就会把一部分月球土壤和碎块吸入广阔的太平洋海域内,这样,地球的地形、地貌、气候、生态环境等都会向好的方向改变,如太阳光在地面的分布将会较为均匀,届时,地球上将不会再有冰冷的冬天和炎热的夏天,那些贫瘠的沙漠和荒漠也将消失,气候将趋向长期稳定,整个地球四季如春,风调雨顺。

为什么炸毁月球后地球环境会好转呢?

亚伯解释说,地球上之所以一直存在恶劣的自然环境,如沙漠、风暴、严寒、酷热等,是由于目前地球运行轨道(地球中心轴线)有 60.5 度的倾斜。正是由于这种倾斜,导致南北半球气候的巨大差异,使相当大的地带出现恶劣的自然环境。如果在月球运行到南半球南极地带时把它炸毁,大量的月球土壤和块片就会落到荒无人烟的南极和南太平洋地区,这样就可以消除地球运转的倾斜状态。亚伯多年来与一些科学家曾对此设想进行多次模拟试验,并利用电脑进行精密的运算,据说这个设想存有“可行性”。

(卞吉 编)