

走向统一的自然力

弱力和电磁力的统一(II)

厉光烈 鹿桂花

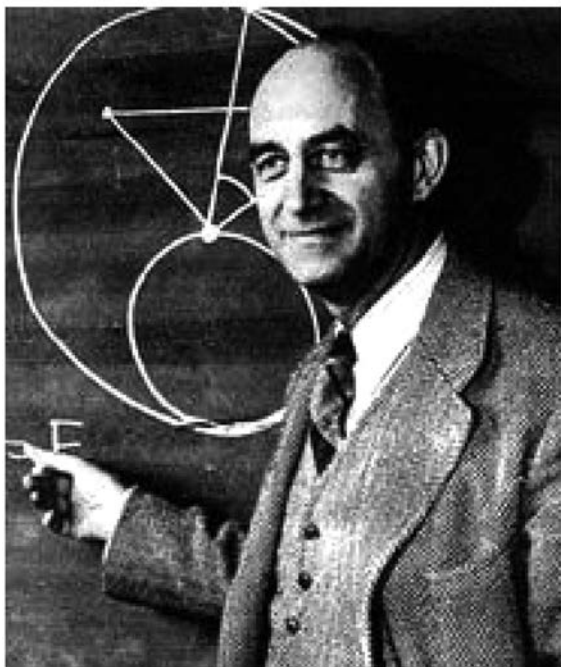
2. 揭示弱力的物理本质

β 衰变的研究对揭示弱力的物理本质起了主要的, 甚至可以说是决定性的作用。这一讲主要介绍通过 β 衰变实验和理论研究揭示弱力物理本质的过程: 从费米提出 β 衰变理论到普适(V-A)费米相互作用的确立。

(1) 费米 β 衰变理论及其实验验证

理论和实验全才——费米

恩里科·费米(Enrico Fermi, 1901 ~ 1954), 美籍意大利物理学家。1901年9月29日出生于罗马, 1918年进入比萨大学, 1922年获得博士学位。随后, 前往德国哥廷根大学从师著名物理学家玻恩教授, 至1926年, 已发表论文30余篇, 年仅27岁就被选为林赛科学院院士。1938年意大利颁布了法西斯种族歧视法, 费米的妻子是犹太血统, 于是他在1938年底, 趁去瑞典领取诺贝尔物理学奖的机会携带全家逃离法西斯统治下的意大利, 移居美国, 先后任教于哥伦比



亚大学和芝加哥大学。1954年11月28日因癌症在芝加哥逝世。

费米被誉为物理学史上最后一位理论和实验全才, 他既是伟大的理论物理学家, 又是杰出的实验物理学家。

在理论方面, 他研究了分子、原子、辐射以及气体的统计特性, 发现了服从泡利不相容原理的新型统计, 后人称之为费米-狄拉克统计, 并将服从这种统计的自旋为半整数的粒子称为费米子。他还凭物理直觉最先指出: β 衰变与原子发光类似, 也是一种跃迁, 并引入4费米子相互作用, 建立了 β 衰变理论。后来, 经过杨振宁、李政道、吴健雄、费曼、格拉肖、温伯格和萨拉姆等理论和实验物理学家近半个世纪的努力, 终于建立了弱电统一理论, 实现了弱力和电磁力的统一。

在实验方面, 他用中子轰击了周期表中的所有元素, 并发现由此产生的新放射性元素。他还发现慢中子与重原子核的反应截面比快中子大得多, 并研究了慢中子引起的核反应。因“发现用中子产生新的放射性元素和开展慢中子核反应的研究工作”, 他荣获了1938年度诺贝尔物理学奖。鉴于慢中子核反应后来在军用和民用的核能领域产生了深远的影响, 费米被人们誉为“中子物理学之父”。另外, 他在移居美国后, 还实现了铀核裂变的自持链式反应, 并领导建造了世界上第一座受控链式核反应堆。这一成就是核能时代的一个重要里程碑, 为制造原子弹迈出了决定性的一步, 也为和平利用核能奠定了基础。随后, 费米参加了原子弹的研制工作, 到美国新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯实验室任理事会委员。第二次世界大战后, 费米又转向粒子物理的研究, 且成绩斐然。

费米不仅是一位卓越的物理学家, 还是一位诲人不倦的导师, 他培养了不少著名的物理学家, 诺贝尔物理学奖获得者张伯伦(O. Chamberlain,

1921 ~ 2006)、李政道和斯坦伯格 (J. Steinberger, 1921 ~) 等人都是他的学生。他还曾建议迈耶 (M. G. Mayer, 1906 ~ 1972) 根据实验需要来确定核壳层模型中自旋-轨道耦合力的强度, 后来, 迈耶因发现核壳层模型与维格纳和延森 (J. H. D. Jensen, 1907 ~ 1973) 分享了 1963 年的诺贝尔物理学奖。

为了表彰他在科学上的重大贡献, 费米被授予美国科学院院士和英国皇家科学院院士头衔。物理学家还用各种方式来纪念他: 将人工产生的 100 号元素以他的名字命名为镆 (Fermium, 化学符号为 Fm), 还将长度单位 10^{-15} m 称为费米 (fm, 我国大陆地区将其译为飞米), 芝加哥附近的美国加速器研究中心被称为费米国家实验室, 芝加哥大学还命名了费米研究所。另外, 以他的名字命名的还有费米黄金定则、费米-狄拉克统计、费米子、费米面、费米能级、费米液体、费米常数以及费米悖论, 等等。费米的物理才华是多方面的, 他不仅治学极广, 且均出类拔萃。1954 年, 为纪念费米对核物理学的贡献, 美国原子能委员会专门设立了“费米奖”, 以表彰为和平利用核能做出贡献的各国科学家, 费米荣获了首次颁发的费米奖。

费米提出 β 衰变理论

费米在参加 1933 年的索尔维会议以后, 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。原子发光, 是电子从原子的较高能态跃迁到较低能态; 而 β 跃迁, 则是原子核内的一个中子转变为质子、电子和中微子^①。在原子发光过程中, 跃迁是通过电磁作用发生的; 而在 β 衰变过程中, 跃迁是通过上述 4 个费米子之间的一种直接作用发生的, 人们后来称其为费米相互作用。现在我们知道, 这是一种弱作用^②。费米认为, 可以像狄拉克处理原子自发辐射那样, 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, 这里 ψ_n 、 ψ_p 、 ψ_e 和 ψ_ν 分别是描述原子核内中子和质子以及逸出核外的电子和中微子的状态的量子力学波函数^③。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、矢量耦合、张量耦合、轴矢耦合和赝标耦合, 对应于 5 种相互作用, 即标量作用 (S)、矢量作用 (V)、张量作用 (T)、轴矢

作用 (A) 和赝标作用 (P), 但是费米本人从来不喜欢由这 5 种作用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作用, 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”。下面, 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》(Nature) 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《物理杂志》(Zeitschrift für Physik), 才被接受发表。

费米 β 衰变理论的实验验证

费米 β 衰变理论早期的不幸遭遇主要在于没有及时得到实验验证。按照跃迁的快慢和不同的选择规则, β 跃迁可分为允许跃迁, 第一级禁戒跃迁和第二级禁戒跃迁等。根据费米理论, 允许 β 跃迁的能谱分布应该给出线性的库里标绘^④。但不幸的是, 当时人工放射性原子核还应用得很少, 天然放射性原子核 ^{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 20 世纪 60 年代才弄清楚。原来, ^{210}Bi 的 β 衰变不是单纯的允许跃迁, 而是混有几种 β 跃迁。因此, 早期 β 能谱的实验研究没有给出线性分布, 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 (E. J. Konopinski) 和乌伦贝克 (G.E.Uhlenbeck, 1900 ~ 1988) 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^⑤。根据他们的理论, 允许 β 跃迁的能谱分布不应给出线性的库里标绘。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 (J. L. Lawson) 和科克 (J. M. Cocke) 研究了 ^{114}In 的 β 能谱; 泰勒 (J. C. Taylor) 研究了 ^{64}Cu 的 β 能谱, 都得到了大体上是线性分布的能谱, 只是在低能部分 (小于 200 keV) 往往出现偏离。直到第二次世界大战后, 吴健雄和艾伯特 (R. D. Albert) 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及其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（即正电子），又可发射 β^- 粒子（即电子），两者的强度和衰变能量都一样，因此可以用测量 N_{β^+}/N_{β^-} 来很好地检验费米的理论预言，这里 N_{β^+} 和 N_{β^-} 分别是 ^{64}Cu 发射的 β^+ 和 β^- 粒子数。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。

(2) 普适 (V-A) 费米相互作用

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 5 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，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 的选择规则称为伽莫夫-泰勒选择规则，T 和 A 称为伽莫夫-泰勒 (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 型选择规则是 $\Delta J=0, \pm 1$ ，宇称不变，但 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁除外。这里， $\Delta J=J_i - J_f$ ， J_i 和 J_f 分别表示衰变前后原子核的自旋； $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁表示 $J_i^P = 0^+ \rightarrow J_f^P = 0^+$ 的 β 跃迁^⑥。1936 年伽莫夫 (G. Gamow, 1904 ~ 1968) 和泰勒 (E. Teller, 1908 ~ 2003) 首先在 ^6He 的 β 衰变中确认存在 G-T 型相互作用，因为 ^6He 的 β 衰变是服从 G-T 选择规则的宇称不变的 $0^+ \rightarrow 1^+$ 跃迁。后来谢尔 (R. Sherr) 和格哈特 (J. B. Gerhart)，以及阿尔伯 (W. Arber) 和斯特哈林 (P. Stähelin) 在 1953 年又从 ^{14}O 和 ^{10}C 等原子核的 β 衰变中发现了 $0^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁，从而确定了费米型相互作用的存在，因为只有费米型相互作用中



伽莫夫

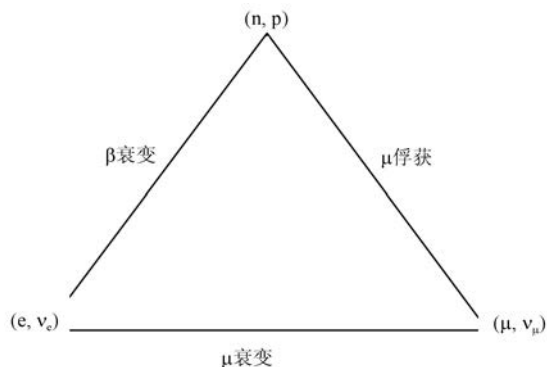


泰勒

才允许出现 $0^+ \rightarrow 0^+$ 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^⑦。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 (B. M. Rustad) 和鲁比 (S. L. Ruby) 作了纯 G-T 型 β 放射源 ^6He 的 β - ν 角关联实验^⑧，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。

普比三角形

实验发现， μ 衰变： $\mu^- \rightarrow \nu_{\mu} + e^- + \bar{\nu}_e$ ，即 μ 子 $\rightarrow \mu$ 子中微子 + 电子 + 反电子中微子和 μ 俘获： $\mu^+ + n \rightarrow p + \bar{\nu}_{\mu}$ ，即反 μ 子 + 中子 \rightarrow 质子 + 反 μ 子中微子，与原子核里中子的 β 衰变： $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ，即中子 \rightarrow 质子 + 电子 + 反电子中微子，十分类似，它们构成所谓的普比三角形（见下图）的 3 条边；它们的相互作用强度，即耦合常数，与强作用相比都极小，而且彼此几乎相等。人们直觉地感到，这种类似一定反映了某种内在的联系。1950 年，费米在美国耶鲁大学的西尔曼讲座中曾经一再强调：“这 3 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、蒂欧姆诺 (J. Tiomno) 和惠勒 (J. A. Wheeler)，李政道、罗森布拉斯 (M. Rosenbluth) 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 3 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 20 世纪 50 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。

普适 (V-A) 费米相互作用的确立

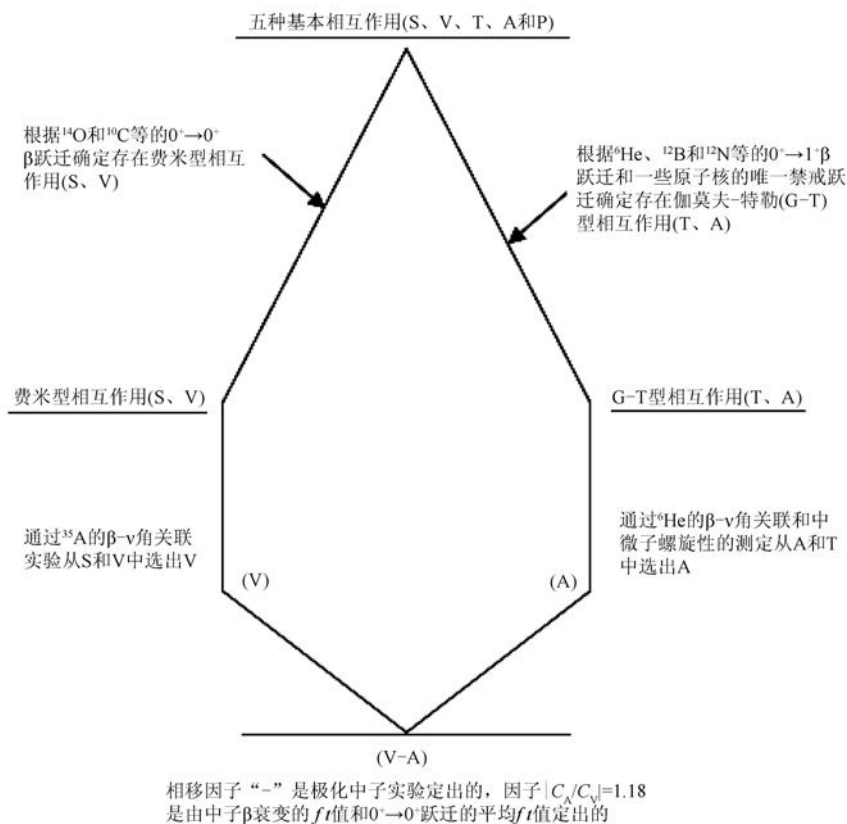
弱作用中宇称不守恒的发现，使上述5种基本相互作用增加到10种，增加的5种是破坏宇称守恒的S、V、T、A和P。虽然验证宇称不守恒的 β 衰变实验同时也确定了SV和TA两类相互作用相对权重之间的关系，但是它们并没有改变以前得到的ST优惠的实验结论。另一方面，宇称和电荷共轭不守恒的发现，促使朗道(L. D. Landau, 1908 ~ 1968)、萨拉姆(A. Salam, 1926 ~ 1996)、李政道和杨振宁分别独立地提出了中微子的二分量理论。实验上发现中微子是左旋的，反中微子是右旋的，因此可以用二分量的旋量代替四分量的旋量来表示中微子的波函数。这就是中微子的二分量理论（顺便指出：早在1929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^①的可能性，但因违背宇称守恒而遭到泡利的反对）。作为这个理论的一个必然结果，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(J. S. Allen)和他的合作者作了人们期待已久的纯费米型 β^+ 放射源 ^{35}Ar 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，吴健雄和施瓦兹希尔德(A. Schwartschild)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 的 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。进一步，伯吉(Burgy)等通过极化中子 β 衰变实验又弄清了V和A有相反的位相，即V-A。这样，就确定了普适(V-A)费米相互作用。应当指出：由中子衰变的比较半衰期，即 f 值，和 $0^+ \rightarrow 0^+$ β 跃迁的平均 f 值导出A和V的相对权重

之比： $|C_A/C_V|=1.18$ ，而不是严格等于1，因此(V-A)定律与实验数据之间还是稍有分歧的，但是，由于它的简单性和普适性，它仍受到普遍的重视。后来，电子俘获、 μ 俘获、 μ 衰变，特别是弱相互作用 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。

虽然普适(V-A)费米相互作用既包含矢量相互作用(V)又包含赝矢相互作用(A)，但是研究发现，只要假设参与相互作用的4个费米子都是无质量的狄拉克粒子，像中微子一样，可以用二分量的旋量代替四分量的旋量来表示它们的波函数，那么普适(V-A)费米相互作用就变成了费米当初建议的矢量相互作用。当年，费米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。

吴健雄教授来华讲演时曾用下图简明扼要地描述了确定普适(V-A)费米相互作用的上述过程。

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(E. C. G. Sudershan)和马谢克(R. E. Marshak)大胆地假设：



总的四费米子相互作用在手征变换 ($\psi \rightarrow \gamma_5 \psi$) 下应当是不变的^⑥。作为这个假设的一个有趣的结果, 就是四费米子相互作用被唯一地确定为 (V-A)。另外, 费曼 (R. P. Feynman) 和盖尔曼 (M. Gell-Mann) 用狄拉克旋量的二分量公式, 萨库拉 (J. J. Sakurai) 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。

① 原子核 β 衰变一共有 3 种类型: β^- 衰变——原子核 (母核) 放出一个电子和一个反电子中微子, 转变为原子序数大 1、质量数相同的另一种原子核 (子核), 其基本过程是原子核内的一个中子衰变成一个质子并放出一个电子和一个反电子中微子; β^+ 衰变——母核放出一个正电子和一个电子中微子, 转变为原子序数小 1、质量数相同的子核, 其基本过程是原子核内的 1 个质子衰变成 1 个中子并放出 1 个正电子和 1 个电子中微子; 电子俘获——母核吸收一个在原子轨道上的电子, 转变为原子序数小 1、质量数相同的子核, 并发射 1 个电子中微子, 其基本过程是原子核内的 1 个质子俘获在原子轨道上的 1 个电子转变为中子并放出 1 个电子中微子, 最常见的是俘获原子最内层 (K 层) 电子, 称为 K 俘获。费米提出 β 衰变理论时, 人们只知道一种类型的 β 衰变, 就是 β^- 衰变, 因此他在这里说: “ β 跃迁是原子核内的 1 个中子转变为质子、电子和中微子”, 现在我们知道, 这里费米所说的中微子应是反电子中微子。

② 弱相互作用 (Weak Interaction), 简称弱作用。它仅在微观尺度上起作用, 作用范围大约在 10^{-18} m 以内, 比强相互作用还要小, 有两种类型: 一是有轻子参与的反应, 例如 β 衰变, μ 子的衰变以及 π 介子的衰变等; 另一是奇异粒子: K 介子和 Λ 超子的衰变。这两种弱作用的强度相同, 都比强相互作用弱 $10^{12} \sim 10^{14}$ 倍, 弱相互作用时间约为 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ s。

相互作用的性质通常是由它的强度 (即耦合常数的大小) 和作用类型 (如矢量型、标量型等) 来表征的。在正文里, 我们将先后就弱作用的作用类型和耦合常数讨论其普适性以及电磁作用的类似性。

③ 狄拉克是相对论量子力学的奠基人, 我们将在下一讲较为详细地介绍相对论量子力学及其描述微观粒子状态的波函数。

④ 根据费米理论, 允许 β 跃迁的能谱分布可以写成:

$$[N_{\pm}(W)/F(\mp Z, W)PW]^{1/2} = K(W_0 - W),$$

这里 $N_{\pm}(W)$ 表示单位时间内所发射的能量在 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; Z 为原子核的电荷数; K 为一个与能量无关的常数, 显见, $[N_{\pm}(W)/FPW]^{1/2}$ 对 W 的标绘应该是一条直线, 这种标绘一般称为库里 (F. N. D. Kurie) 标绘或费米标绘。

⑤ 根据科诺宾斯基-乌伦贝格理论, 应该是 $[N_{\pm}(W)/FPW]^{1/4}$, 而不是 $[N_{\pm}(W)/FPW]^{1/2}$ 对 W 的标绘是直线, 也就是说, 库里标绘

不应是直线。

⑥ 在 β 跃迁过程中, 不仅能动量守恒, 而且角动量也守恒, 即 $J_i = J_f + L + S$, 这里 J_i 和 J_f 分别是母核和子核的自旋, L 和 S 分别是放出的两个轻子的总轨道角动量和总自旋, 它们只取整数值。 β 跃迁的快慢与 L 的取值有关: $L=0, 1, 2, \dots$ 分别对应于允许跃迁、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跃迁快 c/v 倍, 这里 c 是光速, v 是原子核内核子的速度。由于两个轻子的自旋都是 $\frac{1}{2}$, S 只能取两个值: 如果它们的自旋方向相反 (或者说自旋反平行), 则 $S=0$, 相应的 β 跃迁称为费米型跃迁; 如果它们的自旋方向相同 (或者说自旋平行), 则 $S=1$, 相应的 β 跃迁称为伽莫夫-泰勒 (G-T) 型跃迁。显见, 在允许跃迁的情况下, 费米型跃迁要求: $L=0, S=0, J_i=J_f$, 即 $\Delta J=J_i - J_f=0$, 宇称不变, 称为费米选择规则; G-T 型跃迁要求: $L=0, S=1, J_i=J_f+1$, 即 $\Delta J=0, \pm 1$, 宇称不变, 但 $J_i^P=0^+ \rightarrow J_f^P=0^+$ 跃迁除外, 称为伽莫夫-泰勒 (G-T) 型选择规则。

⑦ 用五种基本相互作用 (S、V、T、A 和 P) 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, 则允许 β 跃迁的能谱分布变为:

$$[N_{\pm}(W)/F(\mp Z, W)PW]^{1/2} = K(W_0 - W)(1 \pm b/W)^{1/2},$$

由此给出的 $[N_{\pm}(W)/FPW]^{1/2}$ 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 ^{64}Cu 的 β 能谱形状的实验研究表明 $[N_{\pm}(W)/FPW]^{1/2}$ 对 W 的标绘基本上是直线, 也就是说不存在菲尔兹干涉项, 即 $b=0$ 。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 $b_{\beta} = 0.00 \pm 0.10$ 和 $b_{G-T} = -0.01 \pm 0.02$ 。

⑧ β - ν 角关联实验测量的是 β 衰变放出的电子和反电子中微子之间的夹角。

⑨ 外尔这里所说的狄拉克粒子指的是满足狄拉克方程的自旋为 $\frac{1}{2}$ (即服从费米-狄拉克统计) 的粒子, 现在我们称其为费米子。

⑩ 普适 (V-A) 费米相互作用的哈密顿量可以写成:

$$H = g \sum_{\lambda=V,A} C_{\lambda} (\psi_p^{\dagger} \gamma_{\lambda} O_{\lambda} \psi_n) (\psi_e^{\dagger} \gamma_{\lambda} O_{\lambda} (1 + \gamma_5) \psi_{\nu}) + \text{厄米共轭项}$$

其中 g 为普适的耦合常数, 用来表征相互作用强度; C_{λ} 为相对权重: $C_A = -C_V$, 以及 $\psi_{n(p)}$ 和 $\psi_{\nu(e)}$ 分别为中子 (质子) 和电子中微子 (电子) 的波函数; $O_V = \gamma_{\mu}$, $O_A = i\gamma_5 \gamma_{\mu}$, 这里 γ_{μ} ($\mu=1, 2, 3, 4$) 和 γ_5 都是 2×2 的厄米矩阵, 称为狄拉克矩阵。

利用 γ 矩阵的性质, 上式可改写为

$$H = G (\Psi_p^{\dagger} \gamma_{\mu} \gamma_5 \Psi_n) (\Psi_e^{\dagger} \gamma_{\mu} \gamma_5 \Psi_{\nu}) + \text{厄米共轭项}$$

其中 $G = 4gC_V$, $\Psi = \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)\psi$, 具体地讲, $\Psi_{n(e)}$ 表示中子和电子中微子的左旋波函数; $\Psi_{p(e)}$ 表示质子和电子的左旋波函数的厄米共轭。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。

(厉光烈, 中国科学院高能物理研究所 100049; 鹿桂花, 新疆伊宁市伊犁师范学院物理科学与技术学院 835000)