

原子核的 β 衰变和宇称不守恒

吴慧芳

原子核的 β 衰变现象

我们知道,当原子 (A, Z) 的质量大于原子 $(A, Z + 1)$ 的质量时,原子核 (A, Z) 是不稳定的,它要通过 β 衰变,使核中一个中子变成质子,同时放出电子和反中微子.当原子 (A, Z) 的质量大于原子 $(A, Z - 1)$ 的质量时,原子核 (A, Z) 也是不稳定的,它将通过 K 或 L ...电子俘获(即从原子核外电子层中抓进一个 K 或 L 层的电子)使核中一个质子变成中子,同时放出一个中微子.同样,当原子 (A, Z) 和原子 $(A, Z - 1)$ 的质量差大于电子静止质量的两倍时,原子核 (A, Z) 将通过 β^+ 衰变,将核中一个质子变成中子,同时放出一个正电子和中微子.上述这些现象统统称为原子核的 β 衰变.

四费米子弱相互作用理论

β 衰变是弱相互作用中最早被人发现和研究得最详细的现象.费米第一个提出 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子、电子和反中微子.在 β 衰变过程中,跃迁是通过四个费米子(中子、质子、电子和中微子)之间的一种弱作用发生的,人们将它称之为费米弱相互作用理论.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+反中微子)的态的几率正比于中子、质子、电子和中微子波函数乘积的平方.由于波函数是具有四个分量的旋量,由这四个波函数可以组成五种相对论不变的组合,即标量耦合(S)、矢量耦合(V)、张量耦合(T)、赝矢耦合(A)和赝标耦合(P).费米在建立 β 衰变理论时,只选用了矢量耦合,而不是选用由这五种耦合的线性组合构成的四费米子相互作用.下面我们将看到,在五十年代确定的普适($V-A$)费米相互作用与当初费米的选择并没多大差别.但是,费米理论在刚提出时并未很快为人们所接受.1933年英国《自然》杂志以太抽象、没有实用价值为理由拒绝发表费米的论文,后来他只好又把这篇论文送到意大利的一家科学杂志和德国的《物理杂志》,才被接受并发表.

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.原因是当时人工放射性原子核还应用得很少,核 β 衰变的能谱的实验还很缺乏.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,才基本上从实验上验证了费米理论.第二次世界大战后,吴健雄和阿尔伯特仔细地研究了 ^{35}S 和 ^{64}Cu 的 β 能谱,发现他们的实验结果与费米理论预言符合得很好,才完全地确立了费米理论在研究原子核 β 衰变现象中的地位.

在1956年李政道、杨振宁发现宇称不守恒以前,描写 β 衰变的相互作用只能在空间反射(P ,即 $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$)下不变.并且在电荷共轭变换(C ,即粒子 \rightarrow 反粒子变换)和时间反演(T ,即时间倒向变换)下也是不变的.而当时有关 β 衰变的实验只有 β 能谱, β - ν (中微子)角关联, β - γ 角关联等,这些物理量都是标量,因此和当时的理论没有矛盾.

原子核 β 衰变实验验证了弱作用中宇称不守恒的预言

为了解决1954—1956年以来的令人困惑不解的“ θ - τ ”之谜,1956年夏天李政道、杨振宁在罗彻斯特大学召开的两年一度的国际高能物理会议上提出了弱作用中宇称不守恒的假设.他们从大量的实验数据分析中,得到了下述结论:虽然在强作用和电磁作用中宇称守恒已为实验所证实,但是在弱作用中宇称守恒仅仅是一个推广的“假设”,所有以前做过的有关弱作用的实验仍是这样一类实验,它们对于这种作用是否导致宇称守恒是不敏感的,并没有牢靠的实验基础.自从1927年维格纳提出宇称概念以后,在原子与分子光谱学中,宇称守恒定律被证明是十分有用的,在五十年代中期,已经把它的位置看作与经典守恒定律一样近乎神圣不可侵犯.这就是说,还在关于弱作用的理论有任何进展之前,宇称守恒定律就已经如此牢固地建立了.在1956年下半年《物理评论》的一篇论文中,李、杨提出“可以把现在的‘ θ - τ ’之谜看作弱作用中宇称不守恒的一个表现”.

李、杨还建议,为了从实验上验证在弱作用中宇称不守恒,应该测量那些由在空间反射下改变符号的赝标量所组成的物理量.李、杨讨论过的一种类型实验便是做原子核的 β 衰变实验.正如在报道这一实验的那篇通讯中写的那样:“在 β 衰变中,我们可以测定从极化原子核 β 衰变中产生出的电子的角分布.如果观察到 θ 和 $(180^\circ - \theta)$ 的角分布是不对称的(这里 θ 是母体原子核的取向与电子动量之间的夹角),那么就提供了无可争辩的证据,说明在 β 衰变中宇称是不

守恒”。

根据李、杨的建议,哥伦比亚大学的吴健雄教授等在华盛顿国家标准局作了极化 ^{60}Co 的 β 衰变实验。他们将 ^{60}Co 极化,并测量顺着 ^{60}Co 极化方向和反着极化方向放出的粒子数。因为两者互为镜像过程,所以如果宇称守恒,则二边探测器中计数应当相等。事实上,他们测出的结果是两边粒子数是不相等的,所以宇称不守恒被破坏。这样,吴健雄等便通过实验发现了 β 衰变中的宇称不守恒,首次成功地从实验上证实了李、杨的预言。随后不久,加温等测量了 $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \rightarrow e^\pm$ 衰变中放出电子的角分布,发现在这些弱作用衰变中宇称也不守恒,于是再次证实了李、杨的预言。

李、杨的发现促使人们重新检查在弱作用中其它守恒定律是否仍然有效。实际上吴健雄等的实验不仅证实了在 β 衰变中宇称(P)不守恒,而且证实了电荷共轭(C)也不守恒,但是当时人们认为CP守恒。1964年克里斯坦森等发现,在长寿命的中性K介子的弱作用衰变中的CP混合宇称也不守恒。迄今为止,所有的实验结果都证实了电荷共轭C、空间反射(P)时间反演(T)联合变换(即CPT)下是守恒的。

宇称不守恒和普适(V-A)弱相互作用理论

李、杨的发现促进了 β 衰变的理论和实验的研究,加速了人们对 β 衰变的基本规律和弱作用本质的认识;促进了普适(V-A)弱相互作用理论的建立。

前面已经提到,早在30年代,五种耦合形式组合的费米弱相互作用给出了 β 衰变的理论基础,尽管费米本人却“相信它是矢量作用”。那么,是否这五种可能的耦合中只有矢量作用呢?还是五种都有呢?究竟是那些最好地符合实验资料呢?

为了回答这些问题,此后的三十多年内,许多物理学家进行了大量的实验和理论研究。实验上早已发现五种相互作用中赝标耦合(P)的贡献很小,而其余四种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的选择规则为伽莫夫-泰勒选择规则,T和A称为伽莫夫-泰勒型相互作用。根据 ^6He 、 ^{12}B 和 ^{12}N 等原子核的 $\text{O}^+ \rightarrow \text{I}^+ \beta$ 跃迁和一些原子核的唯一禁戒跃迁确定存在伽莫夫-泰勒型相互作用(A, T)。根据 ^{10}C 、 ^{14}O 、 ^{26}Al 等的 $\text{O}^+ \rightarrow \text{O}^+ \beta$ 跃迁确定存在费米型相互作用(S, V)。那么A和T以及S和V是否同样重要呢?从菲尔兹干涉项实验表明S和V,或T和A中只能有一个为主。结合当时 β 能谱形状的一些其它实验数据,在这四种相互作用中只允许有两种组合:ST和VA。五十年代初拉斯塔德等从 ^6He 的 β - ν 角关联中确定了在 β 衰变中起作用的是ST。那么,ST优惠是否正确呢?这个问题直到宇称不守恒提出来后才得到解决。

弱作用中宇称和电荷共轭不守恒的发现,促使萨拉姆、李政道、杨振宁和朗道分别独立地提出中微子的二分量理论。作为二分量中微子理论的一个必然结果,是在 μ 衰变(也是一种弱作用)中起作用的费米相互作用只能是VA。这就与以前的ST优惠相矛盾。此时,艾伦等作了纯费米型的 β^+ 放射源的 ^{32}A 的 β - ν 角关联实验,发现在费米型相互作用中应选择V而不是S。随后,艾伦等又重新作了 ^6He 的 β - ν 角关联实验,发现在伽莫夫-泰勒型相互作用中应选择A而不是T。而伯吉等通过极化中子 β 衰变实验,进一步弄清了V和A有相反的位相,即(V-A)。

在上述实验基础上,费曼和盖尔曼,苏达香和马尔夏克对弱相互作用实验值作了仔细定量的分析,指出一切关于核的 β 衰变,以及 μ 、 π 和K介子的衰变实验,可以很好地用具有同样大小的耦合常数的费米相互作用矢量(V)和赝标量(A)来描写。至此,从费米提出弱相互作用理论以后,经过三十多年的弱作用实验,尤其是 β 衰变的大量实验工作以及李、杨的宇称不守恒理论的推动,确立了普适(V-A)费米弱相互作用理论。

继普适(V-A)费米弱相互作用理论以后,费曼和盖尔曼提出了矢量流守恒假说,而吴健雄等通过 ^{12}B 和 ^{12}C 的 β 能谱形状验证了矢量流守恒理论。

结 束 语

我们见到原子核的 β 衰变实验不仅在验证宇称不守恒定律方面起了关键的作用,而且在探讨弱相互作用的本质方面也起了决定性的作用。如果从1930年泡里提出中微子假设算起,至今对 β 衰变的研究已有五十多年的历史,它一直是一个活跃的研究领域。近几年来利用原子核的 β 衰变现象研究中微子质量问题成为一个重要的研究方向。例如这几年来中苏联科学家测量了 ^3H 的 β 能谱,测出不等于零的中微子质量值,虽有争议但也引起了人们极大的兴趣。又如原子核的双 β 衰变现象研究也为检验轻子数不守恒和确定中微子质量等自然界的重要规律提供了极好的场所。中微子有无静止质量的问题不仅影响着粒子物理和原子核物理,而且影响着宇宙起源学说和宇宙的未来。人们期望着原子核的 β 衰变现象在探讨这些重大课题中仍将起着重要的作用。