



(八)

中性 K 介子的一些性质和 CP 不守恒

1957 年吴健雄等做的有名的极化 Co^{60} 实验,证实了弱相互作用中宇称(用 P 表示)不守恒,同时也证实了电荷共轭(用 C 表示)在弱相互作用中不守恒。但是,当时推测,宇称和电荷共轭联合起来(用 CP 表示)却是守恒的。后来 μ 子衰变的实验证实了这一点。 μ 子衰变方式如下:

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad \text{右旋}$$

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \text{左旋}$$

μ^+ 和 μ^- 是互为电荷共轭的粒子,它们的寿命相同。在电荷共轭变换下, e^+ 变成 e^- , e^- 变成 e^+ , μ^+ 变成 μ^- , μ^- 变成 μ^+ 。1958 年前后,实验上发现 μ^+ 衰变出来的 100% 的 e^+ 是右旋的, μ^- 衰变出来的 100% 的 e^- 是左旋的。这就说明,在这种衰变中,电荷共轭(C)变换不守恒,因为在 C 变换下,只改变带电粒子的电荷,并不改变它的自旋和运动方向。如果电荷共轭变换守恒,那末, μ^+ 衰变中 100% 的 e^+ 右旋就应该变成 μ^- 衰变中 100% 的 e^- 右旋,而实验上看到的却是 μ^- 衰变中 100% 的 e^- 左旋。

实验上 μ^\pm 衰变的电荷共轭下的不对称(也就是电荷共轭变换的不守恒)给人们一种提示,就是在这种衰变中,宇称和电荷共轭联合起来是对称的(也就是 CP 守恒的),因为 CP 变换不但使 μ^+ 、 μ^- 互变,使 e^+ 、 e^- 互变,而且把左旋变成右

旋,右旋变成左旋,所以,在 CP 变换下, μ^+ 衰变出来的 100% 的 e^+ 右旋就变成 μ^- 衰变出来的 100% 的 e^- 左旋。实验事实正好显示出来这样的一种对称性。由于这个实验事实,当时人们都相信在弱作用中, C 不守恒、P 不守恒、CP 是守恒的。后来几年的精确实验也证实了这一点。

到了 1964 年,有两个物理学家 Fitch 和 Cronin 同另外两个青年工作者,在美国布鲁克海文国家实验室的 33GeV 质子同步加速器上做了一个实验,意外地发现在弱相互作用下,CP 也是不守恒的。为了说明这个实验,我们先介绍一下中性 K 介子的性质。K 介子是一种很有趣的粒子,当初“ $\tau - \theta$ ”难题涉及的也是 K 介子,不过是带电的 K^\pm 介子。

K 介子的一些性质

① K 介子是一种奇异粒子,带有奇异量子数,质量大约是质子质量的 1/2,产生 K 介子必须要求有 $\sim 10^9$ 电子伏的能量。由于弱相互作用,中性 K 介子 K^0 和它的反粒子 \bar{K}^0 都是不稳定的。它们经历 β 衰变而变成一个 π 介子、一个中微子和一个电子(或 μ 子),它们也能衰变成二或三个 π 介子,其中 2π 方式衰变是主要的, 2π 衰变比其它衰变大约强 500 倍左右。换句话说, 2π 方式衰变的寿命要比 3π 和其它方式衰变的寿命短。

K^0 和 \bar{K}^0 不是 CP 的本征态,因为在 CP 变换下, K^0 和 \bar{K}^0 要相互变换,但是 K^0 和 \bar{K}^0 的线性组合

$$|K_1^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$$

$$|K_2^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$$

则是 CP 的本征态,因为

$$CP|K_1^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (-|\bar{K}^0\rangle$$

$$+ |K^0\rangle) = |K_1^0\rangle$$

$$CP|K_2^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle$$

本征值恰好分别为 +1 和 -1。

假定弱相互作用中 CP 变换守恒(本征值不变),那末, K_1^0 就只能衰变成两个 π , 不能衰变成三个 π ; K_2^0 就只能衰变成三个 π , 不能衰变成

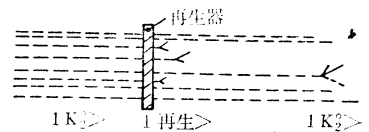


图 1 K_1^0 的再生。纯 K_1^0 束流穿过一片物质(再生体),穿过以后的束流又包含了 K_2^0 的成分。中性束流用虚线表示;短寿命 K_2^0 的衰变物由两叉径迹表示;长寿命 K_1^0 的衰变物由三叉径迹表示

两个 π , 因为衰变出来的 2π 系统的 CP 本征值是 +1, 衰变出来的 3π 系统的 CP 本征值才可能是 -1。如果发现 K_1^0 也能衰变成两个 π , 那就表明这种衰变在 CP 变换下也是不守恒的。但是,当时人们都相信

CP 变换严格守恒, 所以都认为 K_2^0 不可能衰变成两个 π .

② 中性 K 介子还有一个很有趣的特性, 就是再生. 从上面看到, K^0 和 \bar{K}^0 又是 K_1^0 和 K_2^0 的线性组合:

$$|K^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K_1^0\rangle + |K_2^0\rangle)$$

$$|\bar{K}^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K_2^0\rangle - |K_1^0\rangle)$$

假设在时间 $t = 0$ 时产生一个纯 K^0 束, 由于 K^0 是 K_1^0 和 K_2^0 的线性组合, 而且 K_1^0 的寿命比 K_2^0 短得多, 所以即使 K^0 的速度接近光速, 只要经过几米路程以后, 其中的 K_1^0 就衰变完了, 只剩下 K_2^0 . 然后再让 K_2^0 经过一个吸收体 (再生体). 由于 K_2^0 又是 K^0 和 \bar{K}^0 的线性组合, 原子核能够强烈地吸收 \bar{K}^0 , K^0 损失不多, 所以当 \bar{K}^0 被原子核吸收以后, 就重新又出现了纯 K^0 束, 这种现象就称为再生. 如图 1. K_1^0 也可自 K_2^0 得到再生.

③ 干涉和质量差: K^0 和 \bar{K}^0 的静止质量虽然相同, 但由于有弱相互作用, K_1^0 和 K_2^0 的静止质量之间存在着微小的差别. 我们知道, 微观粒子都具有波粒二象性, 粒子的静止质量如果不同, 静止粒子的波的频率也就因之而不同. 所以, 静止的 K_1^0 的波和静止的 K_2^0 的波的频率之间也必定存在着微小的差别. 这种差别是可以测量的. 一旦在实验上测定了这个频率差, 就立刻可以知道 K_1^0 和 K_2^0 的质量差了.

那末, 怎样测量这个频率差呢? 刚才讲过, K^0 是 K_1^0 和 K_2^0 的线性

组合, K_1^0 比 K_2^0 衰变得快, 又能自 K_2^0 得到再生, 从而通过 K_1^0 的衰变和再生, 就可显出 K_1^0 和 K_2^0 两种频率的干涉现象, 频率差就由此可以定出. 按照这个方法确定的 K_1^0 和 K_2^0 质量差, 已达到百分之几的精度. 另外, K_1^0 的寿命也能精确测量. 这些测量可以帮助我们确定 CP 和 T 是否守恒.

CP 对称性的破坏

由于 K_1^0 和 K_2^0 的寿命相差很大, 所以有可能产生一束纯 K_2^0 , 用这种方法可以做许多有关 K_2^0 性质的实验. 1964 年, Fitch 和 Cronin 等人用纯 K_2^0 观察到了 $K_2^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 的衰变方式. 这个发现引起很大的轰动, 因为上面讲过, 如果 CP 对称性不破坏, 长寿命的 K_2^0 介子就只能衰变成三个 π , 不能衰变成两个 π .

然而现在竟看到了 K_2^0 的 2π 方式的衰变, 这就证明了 CP 对称性在弱作用下也遭到了破坏. (其实验装置如图 2). 这里稍多说几句话, 介绍一下这个实验:

中性 K 介子束是布鲁克海文加速器 30 GeV 质子轰击钨靶而产生的, 束流用准直器限制, 带电粒子由磁场清扫. 大约经过 17 米的衰变路程, 使 K_1^0 衰变. 氮包的作用是使 K_2^0 的作用减到最小. 从氮包中 K_2^0 衰变出来的带电 π 用两个谱仪记录, 每一个谱仪都包括闪烁计数器、契仑科夫计数器和由磁铁分开的两个火花室, 火花室由契仑科夫计数器和闪烁计数器的符合来触发. 每一

个粒子的动量由粒子在磁场中偏转的曲率来决定. 知道了两个带电 π 的能量和动量, 就可以算出衰变粒子的质量. 如果 K_2^0 衰变成两个 π , 计算出来的衰变粒子的质量就都是 K 介子的质量. 若是三体衰变 (衰变成三个 π),

中性粒子 (π^0) 亦将带走动量, 计算出来的质量就必定有一个分布, 而不再是 K 介子的质量. 实验验证 $K_2^0 \rightarrow \pi\pi$ 衰变方式存在, 并给出

$$\frac{\text{强度}(K_2^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)}{\text{强度}(K_2^0 \rightarrow \text{全部衰变})} \approx 2 \times 10^{-3}$$

CP 不对称也可以这样来表示, 长寿命的 K^0 记作 K_L^0 , 接近 K_2^0 , 但并不是 K_2^0 ($|K_L^0\rangle \neq |K_2^0\rangle$), 短寿命的 K^0 记作 K_S^0 , 接近 K_1^0 , 但也并不是 K_1^0 ($|K_S^0\rangle \neq |K_1^0\rangle$), 而 K_L^0 和 K_S^0 都是 K_1^0, K_2^0 的线性组合,

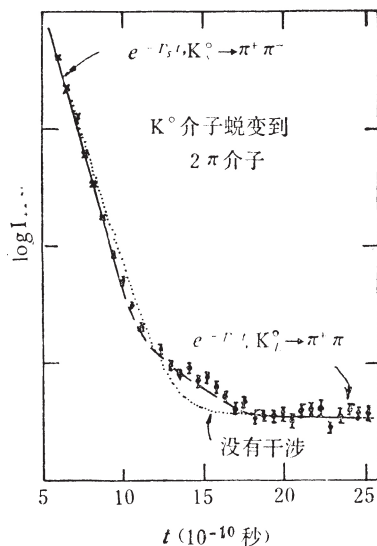


图 3 K^0 介子 2π 方式衰变曲线, 点线为没有干涉的衰变.

$$|K_S^0\rangle = \frac{|K_1^0\rangle + \varepsilon |K_2^0\rangle}{[1 + |\varepsilon|^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$$|K_L^0\rangle = \frac{|K_2^0\rangle + \varepsilon' |K_1^0\rangle}{[1 + |\varepsilon'|^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$\varepsilon, \varepsilon'$ 是 $\sim 10^{-3}$ 的小数, 标志着 CP 不对称的强度. K_1^0, K_2^0 的 CP 本征值仍是 +1 和 -1. 总之, 这个实验事实说明, CP 的不对称虽然很小, 只有千分之几, 但它毕竟是存在的.

对于 CP 不对称这一发现的最有力的支持来自普林斯顿组完成的干涉实验. 这个实验让初始的纯 K_L^0 束通过一个再生器, 则再生的 K_S^0 可以显现出 2π 方式衰变. K_S^0 的 2π 衰变和 K_L^0 的 CP 不对称的 2π 衰变, 能够相互干涉,

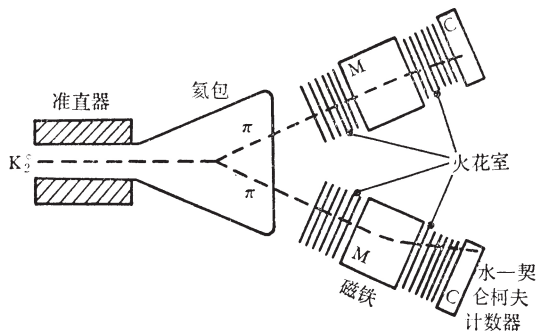


图 2 K_2^0 2π 方式衰变的观测装置.

故再生 K_S^0 衰变的幅度 A_1 和 K_L^0 的 CP 不守恒衰变的幅度 Σ 相干相加, 应出现干涉效应。普林斯顿组的工作证实了 A_1 和 Σ 之间的干涉效应, 从而证明了 K_L^0 有 2π 方式的衰变。图 3 是 Telesdi 等人在 1969 年的实验结果, 也明显地看到干涉效应。在电荷不对称衰变的实验中, 也发现了 CP 对称性的破坏。实验测量 $K_L^0 \rightarrow \pi^- l^+ \nu$ 和 $K_L^0 \rightarrow \pi^+ l^- \bar{\nu}$ 的相对衰变率(此处 l^+ 是指 e^+ 或 μ^+ , l^- 指 e^- 或 μ^- , ν 和 $\bar{\nu}$ 分别代表中微子和反中微子)。若 CP 守恒, 则 K_L^0 衰变的产物中应该有同等数量的 μ^+ , μ^- , 同等数量的 e^+ , e^- , 若 CP 不守恒则有

$$\delta = \frac{\mu^+ \text{数量} - \mu^- \text{数量}}{\mu^+ \text{数量} + \mu^- \text{数量}} \approx \frac{e^+ \text{数量} - e^- \text{数量}}{e^+ \text{数量} + e^- \text{数量}} \neq 0$$

实验测得 $\delta \sim 10^{-3}$ 数量级。也证明了 CP 不守恒。 周月华