

衰变过程中 G_2 U 旋态的一个经验选择定则*

葛 墨 林
(兰州大学)

当同位旋粒子受到电磁作用或弱作用发生衰变时, 由于这些作用导致了同位旋状态的破坏, 所以常常存在一些经验的选择定则, 例如 $|\Delta T| = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$ 等等. 如果认为基本粒子以某一二秩李群的不可约表示来分类时, 便可以引入 U 旋的概念^[1]. 对于 G_2 群, 可以用电荷 Q 与 U 旋的 z 轴投影 U_z 分别为纵、横坐标, 绘出其表示图形^[2], 如图 1, 图 2 所示. 在图中, n, Σ^0, Ξ^0 为 U 旋三重态, 而 Λ 则为 U 旋单态. 由于对称性受到了某种作用的破坏, 粒子质量发生分裂, 但仍可认为它们还能维持 G_2 对称性, 因此仍可有 U 旋态存在. 但是, 因为它们的质量分裂很大, 所以在受到某种弱作用(或电磁作用)的时候, 便可能按质量要求发生衰变. 在衰变过程中, 与同位旋情况相似, 一般说来应导致 U 旋状态的破坏, 即发生不同 U 旋状态之间的过渡. 本文的主要目的在于从目前实验事实出发, 对满足 G_2 对称的诸 U 旋状态的衰变过程, 总结出一个经验的选择定则. 我们将仅限于讨论传统的基本粒子的衰变问题, 亦即仅讨论八个重子与七个介子问题.

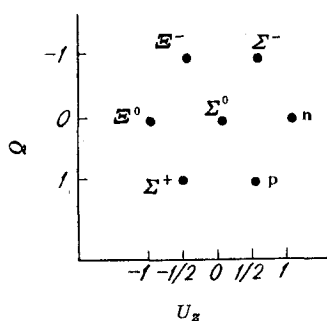


图 1

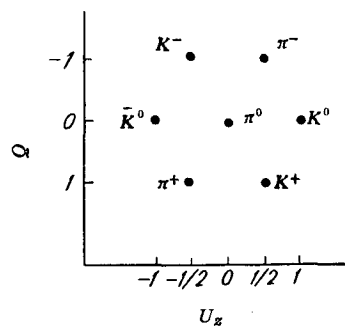


图 2

我们的结论是:

- (i) 对于非电磁与非轻子衰变, $|\Delta U| = 1, |\Delta U_z| = 1$;
- (ii) 对于电磁与轻子型衰变, $|\Delta U| \leq 1, |\Delta U_z| \leq 1$.

本文所引的实验资料除特别注明外, 一律取自文献[3]. 为与实验比较, 对于选择定则(i)可参看表 1.

表 1 中, 对 Ξ^0, Ξ^- , 表面上看来似乎是 $\Delta U = 0$, 但以下我们将看到实际上并不如此.

* 1965 年 4 月 12 日收到.

表 1

衰 变 粒 子			重 要 衰 变				
U	U_z		U_z	ΔU_z	反应中相对比例	附 注	
$K^\pm$	$1/2$	$\pm 1/2$	$\pi^\pm \pi^0$ $\pi^\pm \pi^+ \pi^-$ $\pi^\pm \pi^0 \pi^0$	$\mp 1/2$	± 1	$21.5 \pm 0.4\%$ $5.5 \pm 0.1\%$ $1.7 \pm 0.1\%$	
K^0 $\bar{K}^0$	1	$+1$ -1	$K_1^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ $\pi^0 \pi^0$ $K_2^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ $\pi^+ \pi^- \pi^0$	0	± 1	$69.4 \pm 5.1\%$ $30.6 \pm 1.1\%$ $27.1 \pm 3.6\%$ $12.7 \pm 1.7\%$	ΔU_z 为表示 K_1^0, K_2^0 的 K_0 与 $\bar{K}_0$ 各自的衰变过 渡
Λ	0	0	$p\pi^-$ $n\pi^0$	1 1	-1	$67.7 \pm 1.0\%$ $31.6 \pm 2.6\%$	$\times$ 标度=1.2
Σ^+	$1/2$	$-1/2$	$p\pi^0$ $n\pi^+$	$1/2$ $1/2$	-1	$51.0 \pm 2.4\%$ $49.0 \pm 2.4\%$	
Σ^-	$1/2$	$1/2$	$n\pi^-$	$3/2$	-1	$\sim 100\%$	
Ξ^0	1	-1	$\Lambda\pi^0$	0	-1	$\sim 100\%$	其 $ \Delta U = 1$ 的理由见 以后的说明
Ξ^-	$1/2$	$-1/2$	$\Lambda\pi^-$	$1/2$	-1	$\sim 100\%$	

从选择定则(i)出发,不难确定出一些不同末态的衰变几率之间的关系。例如

$$\left. \begin{aligned} \langle p\pi^- | \Lambda \rangle &= \langle 1, 1 | \Lambda \rangle, \\ \langle n\pi^0 | \Lambda \rangle &= -\frac{1}{\sqrt{2}} \langle 1, 1 | \Lambda \rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} \langle 2, 1 | \Lambda \rangle, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $\langle U, U_z |$ 表示相应于 U, U_z 状态的本征态矢量。由于 Λ 为 U 旋单态, 故由 (i) 可知 (1) 式第二式右端第二项应为零, 于是有

$$W\langle \Lambda \rightarrow p\pi^- \rangle = 2W\langle \Lambda \rightarrow n\pi^0 \rangle. \quad (2)$$

对反应 $\Xi^- \rightarrow \pi^- + \Lambda$, $\Xi^0 \rightarrow \Lambda + \pi^0$, 我们可以仿照 Окунь [4] 将它们表示为

$$\begin{aligned} \langle \Xi^- \pi^+ | \Lambda \rangle &= \langle 1, -1 | \Lambda \rangle, \\ \langle \Xi^0 \pi^0 | \Lambda \rangle &= -\frac{1}{\sqrt{2}} \langle 1, -1 | \Lambda \rangle. \end{aligned}$$

它给出

$$W\langle \Xi^- \rightarrow \Lambda^0 \pi^- \rangle = 2W\langle \Xi^0 \rightarrow \Lambda \pi^0 \rangle, \quad (3)$$

这也就是为什么我们认为它们实质上也符合选择定则(i)的原因。

对于反应

$$\begin{aligned} \Sigma^+ &\rightarrow \pi^0 + p, \\ \Sigma^+ &\rightarrow \pi^+ + n, \\ \Sigma^- &\rightarrow \pi^- + n, \end{aligned}$$

我们可按一般的作法,在左端附加上一个与 K^0 的量子数全同的“迹粒子” S^0 , 于是可把相应振幅表为

$$S^0 + \Sigma^+ \rightarrow \pi^0 + p: A_0;$$

$$S^0 + \Sigma^+ \rightarrow \pi^+ + n: A_+;$$

$$S^0 + \Sigma^- \rightarrow \pi^- + n: A_-.$$

由上式可看到,此时两端的 U 与 U_z 是全同的. 利用 Clebsch-Gordan 系数, 可以有以下表示:

$$\langle S^0 \Sigma^+ | = \sqrt{\frac{2}{3}} \langle 1/2, 1/2 | + \sqrt{\frac{1}{3}} \langle 3/2, 1/2 |,$$

$$|n\pi^+\rangle = \sqrt{\frac{2}{3}} |1/2, 1/2\rangle + \sqrt{\frac{1}{3}} |3/2, 1/2\rangle,$$

$$|p\pi^0\rangle = -\sqrt{\frac{1}{3}} |1/2, 1/2\rangle + \sqrt{\frac{2}{3}} |3/2, 1/2\rangle,$$

$$\langle K^0 \Sigma^- | = \langle 3/2, 3/2 |,$$

$$|n\pi^-\rangle = |3/2, 3/2\rangle.$$

利用定则(i)可得到以下熟知的关系:

$$A_- = \sqrt{2} A_0 + A_+. \quad (4)$$

(2)–(4)告诉我们, $|\Delta U| = 1$ 对于上述反应给出了与 $|\Delta T| = \frac{1}{2}$ 相同的结果, 而从实

验看来, 对上述反应, $|\Delta T| = \frac{1}{2}$ 定则是很好地被确定的.

对于 $K_{10} \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 与 $K_{10} \rightarrow \pi^0 \pi^0$, 可以得到

$$\frac{W\langle K_{10}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \rangle}{W\langle K_{10}^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \rangle} = \frac{3|a|^2}{|\sqrt{2}b - a|^2} = \frac{3}{\left|1 - \sqrt{2}\frac{b}{a}\right|^2}, \quad (5)$$

其中 a, b 分别表示由 K_{10} 向 $U = 0, U_z = 0$ 以及向 $U = 2, U_z = 0$ 过渡的振幅, 由于它

们均满足规则(i), 所以不能任意抛掉哪一项. (5)式仅当 $b = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{\sqrt{3}}{2}\right)a \approx -0.16a$

时才能给出与 $|\Delta T| = \frac{1}{2}$ 一致的结果. (5)式在形式上相当于包括了 $|\Delta T| = \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$ 等

定则所允许的过渡. 从目前实验看来, 尚不能说对 $K_{10}^0 \rightarrow 2\pi$ 反应已确立了 $|\Delta T| = \frac{1}{2}$ 定则, 因为实验之间的差别还是比较大的^[5].

由图 1, 2 和规则(i), 不难解释 $\Sigma^- \rightarrow n\pi^-$, $\Xi^0 \rightarrow \Lambda\pi^0$ 及 $\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$ 几乎是其唯一的非轻子非电磁的衰变方式.

对于包含光子(如认为光子为 U 旋单态)^[2]及轻子的衰变, 由于我们这里不包含具体的弱作用机构, 所以只能提供一个最广泛的限制. 例如规则(ii)可以允许以下反应:

$$n \rightarrow p e^- \nu, \quad K^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu, \quad \pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu, \quad \pi^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu,$$

$$K^\pm \rightarrow \pi^0 \mu^\pm \nu, \quad \pi^0 e^\pm \nu, \quad \pi^\pm \pi^\mp e^\pm \nu,$$

$$\Sigma^- \rightarrow n e^- \nu, \quad \Lambda \rightarrow p e^- \nu, \quad p \mu^- \nu,$$

$$\Xi^0 \rightarrow \Sigma^+ e^- \nu, \quad \Xi^- \rightarrow \Lambda e^- \nu,$$

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma, \quad \Sigma^+ \rightarrow p \gamma, \quad \pi^0 \rightarrow 2 \gamma,$$

等等,它们已分别由实验观察到. 对于其中几率极小的反应,只有用更细致的机构才能解释. 对于其它可能的衰变不再一一列举,可参阅文献[3].

但规则(i)与(ii)禁戒了许多反应,例如以下反应是被禁戒的,因为由图 1, 2 可以直接看出,这些反应有 $|\Delta U| > 1$:

禁戒反应	实验结果
$\Sigma^+ \rightarrow n + e^+ + \nu, \quad n + \mu^+ + \nu$	未观察到 ¹⁾
$\Xi^- \rightarrow n + \pi^-$	$< 5 \times 10^{-3}$
$\Xi^- \rightarrow n + \text{轻子}$	未观测到
$K^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^\pm + e^\mp + \nu_e$	$< 0.1 \times 10^{-5}$
$\Xi^0 \rightarrow n + \pi^0, p + \pi^-$	$< 0.4\%$
$n + \text{轻子}$	未观测到

此外,从图 2 还可以知道,反应 $K_0 \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e$ 与 $\bar{K}_0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e$ 也应被禁戒,但是由于 $K_1^0 =$

$\frac{1}{\sqrt{2}}(K_0 \pm \bar{K}_0)$, 所以对 K_1^0, K_2^0 而言,以上反应并不被禁戒.

总的来说,从以上实验事实可以看到,以上的选择定则包含了 $|\Delta T| = \frac{1}{2}$ 的一些成功的结果(例如衰变几率的关系等),允许了一些 $|\Delta T| = \frac{3}{2}$ 所决定的反应(例如 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ 等),同时又禁戒了一些反应. 这些都是与目前实验符合的,而有一些禁戒则与坂田模型相同,例如 $\Sigma^+ \rightarrow n e^+ \nu$ 等. 当然,以上的 U 旋状态分类是 $G_2(7)$ 对称的结果, G_2 群虽然在一些方面存在缺点,但尚未从实验上完全否定. 从以上的经验规则看来,好象在弱作用中 G_2 仍然能给我们提供一些能够判断衰变反应的经验规则.

最后,我们愿意指出,目前多重态对称性的存在,似乎有可能使我们把许多弱作用的经验规则统一成某一种旋的选择定则的形式;对于 SU_3 群,也有相应的定则存在,但在一些方面还有所不同,这些都将在另一篇文章中讨论.

感谢段一士老师的讨论.

参 考 文 献

- [1] Meshkov, S., Levinson, C. and Lipkin, H., *Phys. Rev. Letters*, **10** (1963), 361.
- [2] Harari, H., *Nuovo Cimento*, **33** (1964), 752.
- [3] Rosenfeld, A., et al., *Rev. Mod. Phys.*, **36** (1964), 978.
- [4] Окунь, Л., Слабое Взаимодействие элементарных частиц, стр. 189.
- [5] Crawford, F., et al., *Phys. Rev.*, **141** (1963), 2208.
- [6] フウアナ会议の报告(小川修三),素粒子论研究, **30** (1964), 78.

1) 以前曾观测到一个事例,但近来认为可能禁戒. 参看文献[6].