

# 电荷共轭-宇称不对称性的发现

Val L. Fitch

这是1980年诺贝尔物理学奖获得者之一,美国物理学家 Val L. Fitch 教授在授奖典礼上的学术讲演。承作者惠寄预印本,并经诺贝尔基金会惠允译成中文<sup>1)</sup>。对此,谨向他们表示感谢。另一获奖者 Cronin 教授的讲演,见本刊今年第5期。

· 编者 ·

物理学作为一门科学,由于理论和实验之间微妙的相互作用,已经取得了令人难以置信的进展。为说明已知现象而提出的理论所作的惊人预言,已经得到了实验的证实。在过去没有研究过的领域中进行探索性实验,常常揭露出理论上完全没有预测到的物理效应。紧接着的是把这些新的效应归并到一个理论体系中去。

今年<sup>2)</sup>, Cronin 教授和我由于一个纯粹的实验发现而获得荣誉。在理论上和实验上过去未曾有过与这一发现有关系的预兆。在过了十六年之后的今天,对这个发现还没有满意的说明。然而它显示了电荷共轭-宇称对称性的破坏,相应地显示了时间反演不变性的破坏,因此,它触及了我们对自然界最深入的了解。

CP 对称性的破坏是在K介子系统中发现的。这一点非常有趣,因为也正是K介子的研究导致推翻了宇称守恒观念,即认为相互作用同它们的镜面反射必定相等的观念。

我自己在1952—1953年开始对K介子感到兴趣。当时我正在哥伦比亚大学同 Jim Rainwater 一起做 $\mu$ 子原子的工作。那时候在宇宙线中新发现的粒子的奇异特性<sup>[1]</sup>是人们在走廊里和喝咖啡时谈话的主要题目。所谓奇异特性是指K介子大量产生却缓慢衰变。 $\pi$ 介子轰击质子时, $\Lambda$ 超子的产生率比起他们衰变为 $\pi$ 介子和质子的衰变率要大 $10^{13}$ 倍。Pais 来到哥伦比亚,谈到他用协同产生的观念来解释这一反常现象<sup>[2]</sup>。Gell-Mann 在访问时讨论了他和 Nakano-Nishijima 为解释协同产生的现象而独

立提出的方案<sup>[3,4]</sup>。

面对可用的数据,他们的观念是难以置信而大胆的。这个方案认为,K介子是两个双重态,即 $K^+K^0$ 和反粒子 $K^-K^0$ 。一个本来可能的假设是:K介子和 $\pi$ 介子一样,是粒子的三重态 $K^+, K^0, K^-$ 。Nishijima 也给K介子指定了后来称为奇异数的量子数;它们在强相互作用中守恒,而在弱相互作用中则不守恒。给定 $K^+, K^0$ 的奇异数是+1,而 $K^-, K^0$ 和 $\Lambda^0$ 的奇异数是-1。

粒子中具有正奇异数的只有 $K^+$ 和 $K^0$ 介子,当时我想,要最终了解情况,这些对象可能是关键。物理学的实验常常是持久而又困难的。致力于新的研究领域需要扭转兴趣。事后看来,最初的动机往往很天真。然而我确实参加了由 George Reynolds 领导的普林斯顿的宇宙线组。1954年我花了一个夏天,在科罗拉多的高山上学习正在进行的实验。在同一期间,布鲁克海文的“宇宙加速器”(cosmotron)能量提高到了3京电子伏。在布鲁克海文,Shutt 和他的小组清楚地看到了协同产生的现象<sup>[5]</sup>。加速器产生的K介子也在照相乳胶中得到了证实<sup>[6]</sup>。夏末,我勉强决定,将来不是在我喜欢的高山上研究宇宙线,而是去做加速器实验。

这年秋天,我和研究生 Bob Motley 开始设计用计数器技术在加速器上探测K介子。在做这个工作的过程中,对 $\tau$ - $\theta$ 之谜<sup>[7]</sup>的兴趣自然

1) © The Nobel Foundation 1981.

2) 指1980年。——编者注

地促使我们去探索, K 介子的寿命是否和它们的衰变方式有关. Motley 和我用我们的探测器做的实验很成功. 我们和伯克利的 Alvarez 小组同时发表了实验结果<sup>[8,9]</sup>. 他们的实验用质子同步稳相加速器 (bevatron) 作为粒子源. 这些结果表明了  $\tau$  和  $\theta$  介子寿命的简并性. 另外的实验又独立地证明了  $\tau$  和  $\theta$  的质量在 1% 以内相等<sup>[10]</sup>. 这种情况就使李政道和杨振宁的有名工作<sup>[11]</sup>登上了舞台, 接着实验给出了在弱相互作用中最大限度宇称破坏的惊人结果<sup>[12]</sup>. 1957 年李和杨曾在这里谈到过这个故事.

大约就在这时候, Landau 发表了他在知道  $\beta$  衰变实验结果之前写的一篇文章<sup>[13]</sup>. 在讨论  $\tau$ - $\theta$  问题时他注意到, 单纯的排除宇称守恒将在物理上产生困难问题. 但是用他讲的“复合反演”, 也就是空间反演同时又将粒子变换为反粒子, 就可以避免困难. 确实, 自然界的规律似乎正是这样. 随后的实验证明, 宇称破坏被电荷共轭破坏所补偿. 因此, 弱相互作用对粒子-反粒子互换和镜面反射的联合变换(亦即电荷共轭-宇称, CP) 不变.

一个对称性被证明无效但却被另一个更深的对称性所代替, 这个新对称性由于 CPT 定理而特别吸引人. 基于狭义相对论和定域性的 CPT 定理是所有量子场论基础. 它的意思是, 对 C, P 和时间反演 T 全部联合变换, 所有相互作用必须不变. 如果 CP 是好的, T 就是好的, 这同所有的实验数据完全符合, 因此情况非常令人满意. 1963 年 Sakurai 写道<sup>[14]</sup>: “在 1953 年谁能想像到, K 介子衰变特性的研究竟引起了我们对不变性原理的理解的革命.”但是此后在 1964 年, 实际上正是这些同样的粒子继 1957 年宇称破坏实验之后再一次显示出 CP 破坏的惊人特性.

很难给出一个比中性 K 介子的故事更好的例子来说明理论和实验之间相互补充的作用. 中性 K 介子特别使物理学家感到高兴. 因为难得有一个物理系统, 其中包含了近代物理这么多的部分. 两态系统是很多的, 这只是其中的一例, 然而它的特点使它具有独特的美. 我希

望告诉你们, 为什么这个系统如此吸引我们. 这个故事要从 Gell-Mann 和 Nishijima 给粒子指定同位旋和奇异数讲起. 指定 K 介子是两个双重态, 这使  $K^0$  和  $\bar{K}^0$  成为不同的物体. 但他们都衰变为两个  $\pi$  介子. 如果物理学家在他的探测器中看到了  $\pi^+$  和  $\pi^-$  介子, 它们的来源是什么? 是  $K^0$  呢? 还是  $\bar{K}^0$  呢? 这个问题由于 Gell-Mann 和 Pais 的惊人眼光, 在他们 1955 年的文章中得到了解决<sup>[15]</sup>. 按照量子力学,  $\pi^+\pi^-$  介子的源必须是  $K^0$  和  $\bar{K}^0$  态的某种线性组合. 他们注意到,  $\pi^+\pi^-$  介子末态对于电荷共轭变换为偶 (even), 这就是指粒子和反粒子互换时波函数不改变其代数符号. 显然,  $K^0 + \bar{K}^0$  组合满足这个偶性的条件. 他们称这为  $K_1^0$ <sup>[16]</sup>. 如果这是对的, 就必定有几率相同的另一个态  $K^0 - \bar{K}^0$ , 这  $K_2^0$  对于电荷共轭变换为奇 (odd), 相应地它衰变成  $\pi^+\pi^-$  介子是被禁戒的. 但是它可以衰变为许多其他态, 像  $\pi^+\pi^-\pi^0$  介子那样的三体态. 可以预料, 变为三体态的衰变事例比起二体衰变事例低得多. 相应于  $K_1^0$  粒子的寿命将约比  $K_2^0$  长 500 倍. 此外, 虽然根据 CPT 定理,  $K^0$  和  $\bar{K}^0$  的质量严格相等, 但是预料  $K_1^0$  和  $K_2^0$  的质量会稍稍不同.

Gell-Mann 和 Pais 预言有这种长寿命的中性 K 介子. 接着, 在布鲁克海文高能加速器上工作的哥伦比亚组寻找和发现了它们<sup>[17]</sup>. 以弱相互作用中电荷共轭不变性观念为基础的理论模型曾被证实是对的. 突然发现弱相互作用中宇称与电荷共轭一道都破坏了. 但这块乌云几乎立刻就被吹掉, 因为注意到了只要用 CP 代替 C, 中性 K 介子的故事仍然保持一样<sup>[18]</sup>. 根据 CP 守恒,  $K_2^0$  衰变为两个  $\pi$  介子仍然是绝对禁止的. Feynman 曾经把成功地描述 K 介子中性系统称为“理论物理的最大成就之一”<sup>[18]</sup>.

如果我们对  $K^0$  在  $t = 0$  时产生的情况写出包括寿命和能量项的波函数,  $K^0\bar{K}^0$  系统的其他特性将会很明显:

$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |K_1^0\rangle e^{-t/2\tau_1 + i\omega_1 t} + |K_2^0\rangle e^{-t/2\tau_2 + i\omega_2 t} \},$$

$$|K_1^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [ |K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle ],$$

$$|K_2^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [ |K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle ].$$

可以看到, 经过一段比起  $K_1^0$  寿命长而比起  $K_2^0$  寿命短的时间后, 初始时一个纯  $K^0$  态将会变成  $K_1^0$ ; 它是  $K^0$  和  $\bar{K}^0$  的等量混合. 我们可以给出典型实验情况的数值: 在衰变之前  $K_1^0$  介子平均走几个厘米, 而  $K_2^0$  介子平均走几十米. 因此在离开  $K^0$  产生点大于一米左右距离上, 可以得到一个接近纯的  $K_1^0$  束.

当我们考虑  $K_1^0$  与物质相互作用时, 这个系统的另一重要特性也是很明显的. 由于  $K^0$  和  $\bar{K}^0$  的奇异数相反, 它们的相互作用截面很不一样. 一束  $K_1^0$  穿过一块物质, 会形成  $K^0$  和  $\bar{K}^0$  不再是一半对一半, 而是相应于  $K_1^0$  和  $K_2^0$  新组合的一种混合. 在物质后面将出现新产生的短寿命  $K_1^0$ , 它们会衰变为  $\pi^+\pi^-$ . 这个现象称为再生<sup>[20]</sup>. 当吸收物质对  $K^0$  完全透明而对  $\bar{K}^0$  不透明的情况下, 在吸收体后面  $K_1^0$  的强度将是入射到吸收体上原始  $K_1^0$  强度的  $1/4$ .

M. L. Good<sup>[20]</sup> 在五十年代末注意到, 由于  $K^0$  和  $K_1^0$  有非常小的质量差, 在相干过程中将发生上面讨论的再生现象. 相干是指不在个别原子核上发生散射, 而在整个一块散射物质上发生散射. 也就是说, 在散射过程中整块物质将保持它的初始量子力学态. 在这种情况下, 如同普通光穿过玻璃, 可以把再生物质看作是有折射率的. 相干再生的  $K_1^0$  具有和入射的  $K_1^0$  精确相同的能量. 它们的角分布和入射束相同, 但由于衍射效应而有加宽, 后者决定于再生物质在垂直束方向上的大小. 在典型的实验中,  $K$  介子的特征波长约  $10^{-13}$  厘米. 横向大小的典型值是 10 厘米. 因此, 相应的衍射图样宽度数量级是  $10^{-14}$  弧度! 另外,  $K_1^0$  波的相干相加是在大于  $10^{14}$  波长的距离上观察到的. 这种相干再生  $K_1^0$  束的特点是, 它可以同原始束区别开来, 因为它以短寿命衰变为  $\pi^+\pi^-$ . 就我所知, 这是向前相干散射束能够同原始束区别开来的唯一例子.

物理

听众中学物理的学生都知道,  $K_1^0K_2^0$  的故事与极化光有相似之处.  $K_1^0$  和  $K_2^0$  相应于左旋和右旋的圆极化光, 而  $K^0$  和  $\bar{K}^0$  态相应于线极化的  $x$  和  $y$  分量.  $K_1^0$  束穿过一块凝聚态物质, 相当于左旋圆极化光穿过一块方解石一类的双折射介质, 它对极化的  $x$  和  $y$  分量具有不同的折射率. 相干再生与非相干再生的总的图象, 已经由泡室实验证实了<sup>[21]</sup>.

与此相联系的许多现象还有待于探讨. 例如还需要在晶体平面上做相干再生  $K_1^0$  的实验. 对通常所用的粒子动量, 布拉格角非常小, 因此消光因子和 Debye-Waller 因子只在相应的小角度才起作用. 但这些实验是可以做的.

$K^0\bar{K}^0$  系统给我们提供了有关引力相互作用的重要的而且非常精确的信息. 这是未曾预料到的. 它同强普适性问题有关系: 无论什么物体, 在这里是粒子和反粒子, 如果具有相同的惯性质量, 它们在引力场中的表现相同. M. L. Good<sup>[22]</sup> 注意到, 倘若  $K^0$  和反粒子  $\bar{K}^0$  的引力位能相反, 则  $K^0\bar{K}^0$  系统会很快混合, 就永远看不到长寿命粒子. 对这个系统更仔细的分析指出, 倘若粒子和反粒子的引力相互作用差一份额  $\kappa$ , 并且如果我们讨论的是地球引力场, 则  $\kappa$  值必须小于  $10^{-10}$ . 对太阳系则是  $10^{-11}$ , 对银河系则是  $10^{-13}$ .

科学发现的航行可以在未经探查的水域中进行, 但是也可以在港口附近熟悉的海湾内进行, 只要人们有那种能够对熟悉的物体进行比以前更精细观察的仪器. 1963 年我们有机会用比以前更好的分辨率去研究中性  $K$  介子现象. 采用了火花室作为带电粒子探测器, 能够精确测定径迹位置, 而且能够对合适的事例进行选择触发.

我们的同事 Jim Christenson 及 Rene Turlay, 同 Jim Cronin 和我用这种新设备着手系统研究: (1) 再生现象, (2) 我们称为  $CP$  不变性问题, (3) 中性流. 我们对再生现象特别有兴趣, 因为刚好有一个组报道了他们研究  $K_1^0$  介子穿过液氢泡室的反常结果<sup>[23]</sup>. 许多同事对我们研究  $CP$  不变性并不相信, 但不管怎样, 我们做了

这个实验。人们对中性流很久就有兴趣，一年以前 Glashow 教授曾在这里讨论过它。

我们进行研究所用仪器的平面图见图 1。它是一个双臂谱仪，每一臂中磁铁前后都装有火花室，用来测量粒子径迹。两个臂中的切伦科夫计数器和闪烁计数器符合后给出信号，触

发用照相记录的火花室。这仪器放在布鲁克海文 AGS 加速器的中性粒子束中，选择距离使  $K^0$  已经衰变完，只剩下  $K^0$ 。谱仪双臂的夹角安排得有利于探测  $K^0$  介子衰变为两个  $\pi$  介子的事例。研究再生时，可将各种固体物质块放在中性粒子束中。研究  $K^0$  自由衰变为两个  $\pi$  介

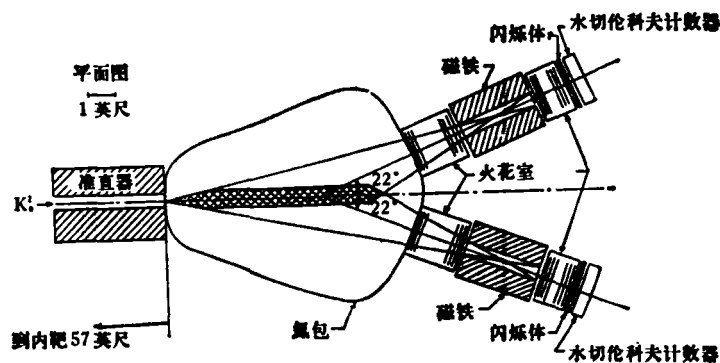


图 1 在 AGS 加速器上进行实验的仪器平面图

子时，在衰变体积中充氮气，以减小相互作用。

变为两个  $\pi$  介子的衰变事例同大量的三体衰变事例有两方面的区别。探测到的两个粒子，其动量和必须与入射  $K^0$  方向一致。但一般讲三体衰变不会发生这种情况。另外，计算得出的母粒子质量必须相应于  $K^0$  介子的质量。实验的原始数据见图 2 和图 3。图 2 是用较粗糙的测量仪器测量照相记录得到的数据。事例的分布在沿束流线方向有峰，这鼓励我们进行更精确的测量，测量结果见图 3。可以明显地看到，在合适的质量范围中，向前峰约有 56 个事

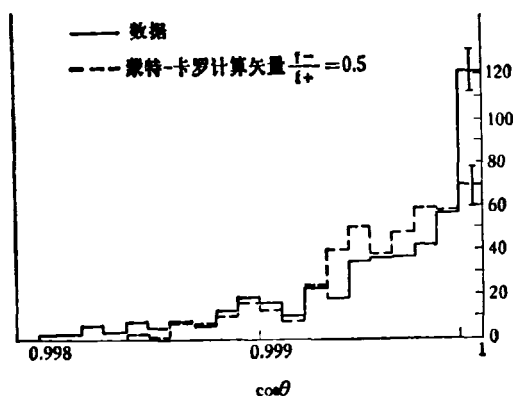


图 2 用粗糙的测量仪器测得的在合适的质量范围中的事例角分布

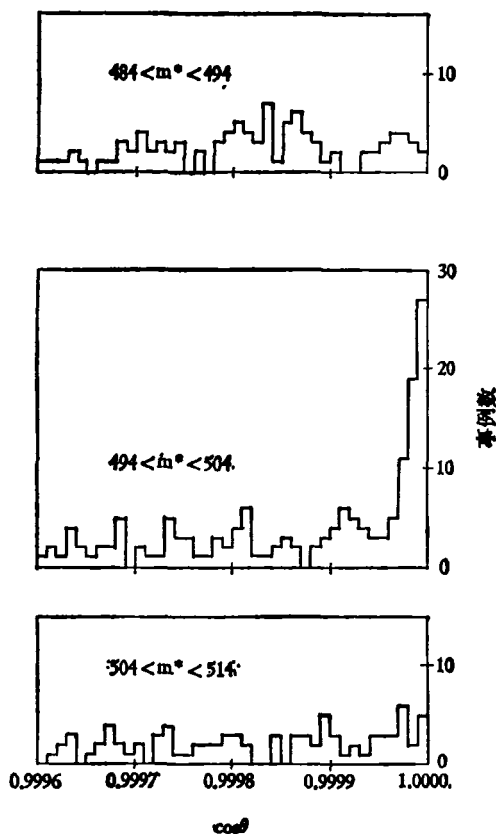


图 3 用精细的测量仪器测得的在三个有关的质量区中的事例角分布

例,其中本底为 11. 由这数据我们确定了,  $K_S^0$  衰变为两个  $\pi$  介子相对于所有带电衰变方式的分支比是  $2 \times 10^{-3}$ . 这是  $CP$  守恒完全禁止的衰变的第一次证据<sup>[23]</sup>. 我们对这个结果的重要性是非常敏感的,我必须承认,一开始我们自己对它并不相信. 我们花了近半年的时间来寻找其他可能的解释,但是没有一种能够成功.

研究相干再生对  $CP$  测量是很重要的. 这有几点原因. 第一,我们得到的结果完全符合预期值而没有反常. 在钨、铜、碳和液氢上测量的相干再生率,使我们能够确认,在充满衰变体积的氦气上的相干再生,对我们观察到的信号的贡献是可以完全忽略的. 第二,相干再生的  $K_L^0$  接着衰变为  $\pi^+\pi^-$  介子,它们对刻度仪器非常有用.

现在我们来更定量地观察中性  $K$  系统是适宜的<sup>[24]</sup>. 由于  $K^0$  和  $\bar{K}^0$  经过了弱相互作用混合,  $K^0$  波随时间的变化率将不仅决定于  $K^0$  振幅,而且也决定于  $\bar{K}^0$  振幅,即

$$-\frac{dK^0}{dt} = AK^0 + p^2\bar{K}^0$$

和

$$-\frac{d\bar{K}^0}{dt} = B\bar{K}^0 + q^2K^0.$$

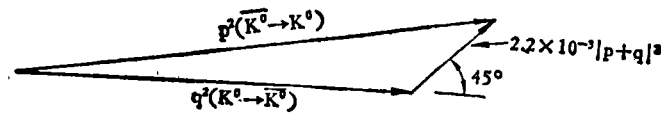


图 4 表示  $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$  振幅与  $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$  振幅差的矢量图

将会说明,对于中性  $K$  介子系统已经独立地证明  $CPT$  定理是成立的,这样就自持地表明了时间反演不变性的破坏.

我们都熟悉与熵相联系的时间不对称性. 在一个封闭系统中,熵随时间而增加. 这种时间不对称性是边界条件造成的结果. 但是在中性  $K$  介子系统中,我们第一次看到了由于相互作用而不是边界条件造成时间不对称性的一个物理系统.

因为人们过去一直认为微物理定律具有时间反演不变性,这个发现揭开了范围宽广而

物理

其中粒子符号表示相应的波振幅. 根据  $CPT$  不变性,粒子和反粒子的质量和寿命必须精确相等,因此上面方程式中  $A$  必须等于  $B$ . 这样,实际上可能由两种方式发生  $CP$  破坏:或者通过上面方程组中的项,或者通过衰变振幅. 随后的实验表明,如果不是全部的话,大部分破坏是在上面的方程式中,其中包含了所谓质量衰变矩阵. Cronin 教授将会讨论在衰变项发生的效应. 这里仅要指出一点:  $p^2$  对于  $q^2$  的任何偏离,结果将是使  $K_S^0$  衰变为两个  $\pi$  介子. 如果  $CP$  不守恒,则短寿命和长寿命粒子不再是前面定义过的  $K_S^0$  和  $K_L^0$ ,而是

$$K_S^0 = \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2}} \{p|K^0\rangle + q|\bar{K}^0\rangle\}$$

和

$$K_L^0 = \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2}} \{p|K^0\rangle - q|\bar{K}^0\rangle\}$$

$K_L^0$  衰变为两个  $\pi$  介子的事实表明,粒子跃迁到反粒子的振幅,这里就是  $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$ ,不完全等于其逆过程振幅  $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$ ;事实上我们现在相当精确地知道,不但是振幅稍有不同,而且两个振幅之间还存在小的相角(见图 4).

我们已经指出,根据  $CPT$  定理,  $CP$  的破坏等同于时间反演不变性的破坏. Cronin 教授

意义深远的许多问题. Cronin 教授将要详细地讨论这些问题. 我要提到下面两点. 能不能用这个效应来减少一个孤立系统的熵? 我们从地球上望出去,看到一个非常有秩序的宇宙. 倘若熵永远增加,宇宙怎么会是这个样子呢? 是不是  $CP$  破坏的效应会使宇宙“振荡”呢? 对这些问题的回答似乎是否定的<sup>[25]</sup>.

同时,我们从地球上望出去,看到早期很热的宇宙的遗留物. 人们期望,在很早时期,物质和反物质会以相等数量凝聚,最终湮灭成  $\gamma$  辐射. 但是我们现在没有见到反物质的踪迹. 一

年以前在这里曾经讲过规范理论,它预测了质子和反质子可能会衰变。这个过程联系 CP 破坏,就可能促使宇宙趋向于物质比反物质多,而且还可以说明观察到的宇宙中物质与辐射的比值<sup>[26]</sup>。

Lewis Thomas 的科学小品使我们的文学增光,他曾经写道:“一个工作的质量可以用它引起的惊奇程度来量度。”经过十六年之后,物理学界仍旧对 CP 和 T 的破坏感到惊奇。我猜想诺贝尔奖金委员会是出于类似 Thomas 的考虑,因而给予 Cronin 教授和我这一个最高的荣誉。

### 参 考 文 献

- [1] 1953年以前的评述见 G. D. Rochester and C. C. Butler, *Reports in Phys.* **16**, 364(1953).
- [2] A. Pais, *Phys. Rev.* **86**, 663(1952).
- [3] M. Gell-Mann, *Phys. Rev.* **92**, 833(1953).
- [4] T. Nakano and K. Nishijima, *Progr. Theoret. Phys.* **10**, 581(1953).
- [5] W. B. Fowler, R. P. Shutt, A. M. Thorndike, and W. L. Whittemore, *Phys. Rev.* **93**, 861(1954).
- [6] Rochester Conference Proc. (1954).
- [7] R. H. Dalitz, *Phil. Mag.* **44**, 1068(1953); E. Fabri, *Nuovo Cimento*, **11**, 479(1954).  
奇异粒子中有些衰变为两个 $\pi$ 介子,有些衰变为三个 $\pi$ 介子。用 Dalitz 和 Fabri 的分析方法分析少数事例,表明三 $\pi$ 介子系统的宇称和两 $\pi$ 介子系统的宇称相反。如果在衰变作用中宇称是守恒的,则应当存在可区别的宇称相反的母体, $\theta$ 衰变为两个 $\pi$ 介子,而 $\tau$ 衰变为三个 $\pi$ 介子。使人迷惑不解的问题是,如果这两种粒子是不同的东西,为什么它们会有相同的质量和寿命呢?在知道了宇称守恒破坏以后,认识到它们都是K介子,分别写作 $K_{s1}$ 和 $K_{s3}$ 。
- [8] L. W. Alvarez, F. W. Crawford, M. L. Good, and M. L. Stevenson, *Phys. Rev.* **101**, 503(1956); G. Harris, J. Orear, and S. Taylor, *Phys. Rev.* **100**, 932(1955).
- [9] V. Fitch, R. Motley, *Phys. Rev.* **101**, 1496(1956); *Phys. Rev.* **105**, 265(1957).
- [10] R. W. Birge, D. H. Perkins, J. R. Peterson, D. H. Stork, M. N. Whitehead, *Nuovo Cimento* **4**, 834(1956).
- [11] T. D. Lee, C. N. Yang, *Phys. Rev.* **104**, 254(1956).
- [12] C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes, R. P. Hudson, *Phys. Rev.* **105**, 1413(1957); R. Garwin, L. Leleman, M. Weinrich, *Phys. Rev.* **105**, 1681(1957).
- [13] L. Landau, *Nucl. Phys.* **3**, 254(1957).
- [14] J. J. Sakurai, *Invariance Principles and Elementary Particles*, Princeton University Press (1964), Princeton, N. J. p. 296.
- [15] M. Gell-Mann, A. Pais, *Phys. Rev.* **97**, 1387(1955).
- [16] 我们已经改用了最近惯用的记号。Gell-Mann 和 Pais 原来称它们叫  $O_s$  和  $O_r$ 。
- [17] K. Lande, E. T. Booth, J. Impeduglia, L. M. Lederman, W. Chinowsky, *Phys. Rev.* **103**, 1901(1956).
- [18] R. P. Feynman, *Theory of Fundamental Processes*, W. A. Benjamin, Inc. New York, p. 50.
- [19] A. Pais, O. Piccioni, *Phys. Rev.* **100**, 1487(1955).
- [20] M. L. Good, *Phys. Rev.* **106**, 591(1957).
- [21] R. H. Good, R. P. Matsen, F. Muller, O. Piccioni, W. M. Powell, H. S. White, W. B. Fowler, R. W. Brige, *Phys. Rev.* **124**, 1223(1961).
- [22] M. L. Good, *Phys. Rev.* **121**, 311(1961).
- [23] J. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay, *Phys. Rev. Letters* **13**, 138(1964).
- [24] T. D. Lee, R. Oehme, C. N. Yang, *Phys. Rev.* **106**, 340(1957).
- [25] Y. Ne'eman, *Erice Summer School Lectures*, June 16—July 6, 1972.
- [26] A. D. Sakharov, *JETP Letters* **5**, 24(1967), 科普讨论见 F. W. Wilczek, *Scientific American* **243**, 82 (Dec. 1980).

(唐孝威译 杜东生校)

(上接第 478 页)

- [5] R. Rosenberg and L. Berenbaum, *Appl. Phys. Lett.*, **12**(1968), 201.
- [6] R. E. Humonel, R. T. Dehoff and H. J. Geier, *J. Phys. Chem. Solids*, **37**(1976), 73.
- [7] P. S. Ho and H. B. Huntington, *J. Phys. Chem. Solids*, **27**(1966), 1319.
- [8] R. V. Penney, *J. Phys. Chem. Solids*, **25**(1964), 335.
- [9] G. J. van Gorp, *J. Appl. Phys.*, **44**(1973), 2040.