

谈谈 CP 破坏现象

吴丹迪

三十年前，李政道和杨振宁两位先生对宇称破坏的研究导致了一场怀疑和检查所有守恒定律的轩然大波，CP 守恒也是在这场风波中被放弃的守恒定律之一。

每一个人对他的工作都有职业的审美观。厨师力图把菜肴做得色香味俱全。物理学家的梦想是用简单和统一的方法来描写世界。对称性与守恒定律的存在，给物理学家提供实现梦想的更好条件。但是，1956 年李政道和杨振宁两位先生经过深入的研究，首先对 β 衰变中宇称是否守恒提出异议，不久，吴健雄先生用精巧的实验证明了在 β 衰变中宇称是不守恒的。我们知道，宇称 P 守恒要求物理定律在空间反射下对称，即具有左与右的对称性，当把左边的图象反射到右边时能与右边原来的图象重合。

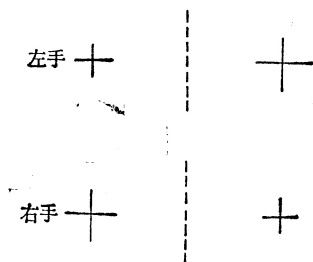


图 1 左手图和右手图在对镜子(虚线),都不是反射对称的,但如将它们重在一起,则是对称的。

李先生、杨先生和吴先生的研究结论在物理学界引起了强烈的震动，就如巨石投入了一潭死水。大量紧张的研究接踵而来。人们开始自觉地检验各种不同的对称性，从以为它们当然正确反转去寻找破坏它们的各种事例。人们发现，凡有宇称 P 破坏的地方，往往伴随着有电荷共轭 C 的破坏。电荷共轭对称要求粒子世界的定律与反粒子世界的定律完全一样。几年之内，实验物理和理论物理都得到了长足的进步。1959 年弱作用的 V-A 理论和 1967—1972 年的弱电统一规范理论的研究，都来自这些理论。这些理论中的一个要素是两个由费米子场构成的流。流有两种：左手流和右手流。如果左手流与右手流在理论中恰好对半相加，我们就得到一个 P 和 C 都守恒的相互作用理论，例如强作用和电磁作用的理论（图 1）。在弱作用中，只有左手流起作用，所以宇称 P 和电荷共轭 C 都遭到最大的破坏。从某种意义上来说，P 和 C 分别破坏的问题，已经不再是神秘的。然而，CP 破坏依然是一个秘

密。

什么是 CP 破坏？早在五十年代初期，物理学家就发现了一种非常奇特的介子，它有两种寿命不同的成分：一种短寿命的成分（寿命约为 10^{-10} 秒），后来被命名为 K_s ，它主要地衰变到两个 π 介子（不是 $\pi^+\pi^-$ ，就是 $\pi^0\pi^0$ ）；另一种长寿命的成分（寿命约为 5×10^{-8} 秒），它主要衰变到 3π （ $\pi^+\pi^-\pi^0$ 或 $\pi^0\pi^0\pi^0$ ）（图 2）和 $\pi^\pm e^\pm \nu$ ， $\pi^\pm \mu^\pm \nu$ 。

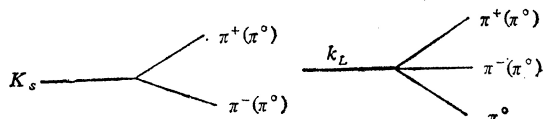


图 2 K_s 衰变到 2π ， K_L 主要衰变到 3π 。 $K_L \rightarrow 2\pi$ 是 CP 破坏的信号。

由于 π^0 介子的内禀宇称是 $P = -1$ ，电荷共轭宇称是 $C = +1$ ，所以 π 介子的 CP 宇称是 $CP = -1$ 。由此我们推知， K_s 的 CP 宇称应为 $CP = (-1)^2 = +1$ （幂 2 来自两个 π^0 介子，可以证明， $\pi^+\pi^-$ 体系的 CP 宇称也是正的。）而 K_L 应为 $CP = (-1)^3 = -1$ 。以上判断成立的条件是在衰变过程中 CP 守恒。真的，物理学家们借助于迭加两个中性的奇异介子 K^0 与 \bar{K}^0 就能得到 $CP = +1$ 和 $CP = -1$ 的两种介子状态。什么是 \bar{K}^0 和 K^0 呢？ \bar{K}^0 是 K^0 介子的反粒子，它可以在下述散射过程中产生：

$$P + P \rightarrow P + n + K + \bar{K}^0$$

而 K^0 则可以在下述过程中产生

$$P + P \rightarrow P + P + \pi^+ + K^0 + K^-$$

或者

$$P + P \rightarrow P + \Sigma^+ + K^0$$

在质子-质子低能散射时， \bar{K}^0 通常与带正电的奇异介子 K^+ 成对产生，而 K^0 或者与 K^- 成对产生，或者与 Σ, Λ 等超子成对产生（并靠产生适量带电 π 介子来保证反应中电荷守恒）。由 K^0 和 \bar{K}^0 组成的 $CP = +1$ 的态是

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 + \bar{K}^0), \quad CP = +1$$

因为它的宇称 $P = -1$ ，电荷共轭 $C = -1$ （电荷共轭变换将 K^0 变到 \bar{K}^0 ， \bar{K}^0 变到 K^0 ），类似地， $CP = -1$ 的态是

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 - \bar{K}^0), \quad CP = -1$$

这个态的电荷共轭宇称是正的， $C = +1$ 。如果只考虑 $K_s \rightarrow 2\pi$ 和 $K_L \rightarrow 3\pi$ 衰变，那么把 K_s 认作

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 - \bar{K}^0),$$

K_L 认作

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 + \bar{K}^0)$$

就再恰当不过了。自从李、杨两位先生发现宇称不守恒以后，宇称 P 和电荷共轭 C 在弱作用中不守恒已经成为众所周知的，所以 $K_S \rightarrow 2\pi$ 分别破坏 P 及 C 两个对称性并不引起惊奇。奇怪的是到 1964 年，克里斯坦森，克罗宁，费去和特雷等先生完成了一个历史性的发现，他们的实验表明长寿命的中性 K 介子不仅可以衰变到三个 π 介子，还可以衰变到两个 π 介子。尽管 $K_L \rightarrow 2\pi$ 的衰变机率只是 $K_L \rightarrow 3\pi$ 的 0.88%，由于 2π 与 3π 有相反的 CP 宇称， K_L 的 CP 宇称究竟是什么就成了问题。 K_L 到 2π 衰变的存在说明 CP 守恒是有问题的，也许在 K_L 的衰变过程中 CP 破坏了；也许 K_L 不是纯的 $\frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 + \bar{K}^0)$ ，而是还有一点 $\frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 - \bar{K}^0)$ 的成分，而这种情况也意味着在 K^0 (或 \bar{K}^0) 分离成 K_S 与 K_L 两种成分的演化过程中有 CP 破坏。现代的标准解释兼收了两种可能性。理论上，对于分析 CP 破坏更方便的是比较 $K_L \rightarrow 2\pi$ 的衰变速率与 $K_S \rightarrow 2\pi$ 的衰变速率，二者速率比约为 5.7×10^{-6} 。

自 1964 年发现第一个 CP 破坏的例证以来，人们为寻找 CP 破坏的其他例证作了大量细致的工作。其方法基本上还是从一个具有确定 CP 宇称 (例如 $CP = +1$) 的粒子开始，然后寻找其具有 $CP = -1$ 的衰变末态。例如 K_L 主要衰变为 3π ，它的 CP 是 -1 ，那么 $K_L \rightarrow 2\pi$ 的出现就告诉我们 CP 破坏了。类似的，如果在 $K_L \rightarrow 2\gamma$ 中发现两个光子的极化是互相平行的，则两光子处于宇称和 C 宇称都为正的状态，因此 CP 在这里受到了破坏。当两个光子极化互相垂直时，它们的宇称是负的，而 C 宇称仍是正的。粗糙的估计给出

$$\frac{K_L \rightarrow 2\gamma (P = +1) \text{ 的速率}}{K_L \rightarrow 2\gamma (P = -1) \text{ 的速率}} \text{ 约为 } 2 \times 10^{-3}$$

这么小的 CP 破坏很难测量，因为 K_L 统共只有万分之五的可能性作双光子衰变。另一个可以想到的例子是 η 介子。 η 的 C 和 P 与 π^0 相同，它主要衰变到 3π 或 $2\gamma (P = -1)$ 。如果我们找得到 $\eta \rightarrow 2\pi$ 衰变，那就是一个 CP 破坏的例证。但是 $\eta \rightarrow 2\pi$ 的份额即使有，也一定极其微小。其原因是 $\eta \rightarrow 3\pi$ 及 $\eta \rightarrow 2\gamma (P = -1)$ 分别是强衰变和电磁衰变，速率太快，相比之下， CP 破坏的份额就微不足道了。

CP 破坏也可以在某些不具有确定 CP 宇称的末态中找到。例如比较 $K_L \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}$ 与 $K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ 的衰变速率，如两者有差异，就说明有 CP 破坏。原因很明显：如果 CP 守恒， K_L 就应等于 $\frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 + \bar{K}^0)$ 。夸克模型告诉我们 K^0 只能衰变到 $\pi^- e^+ \nu$ 而 \bar{K}^0 到

$\pi^+ e^- \bar{\nu}$ 。所以 $K_L \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}$ 与 $K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ 速率不等说明 K^0 与 \bar{K}^0 在 K_L 中的地位不是象 CP 守恒所要求那样一半对一半的，略微不同一些的理由说明了，如果 $\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0$ 与 $\bar{\Sigma}^+ \rightarrow \bar{p} \pi^0$ 的衰变速率不同，也表示有 CP 破坏。值得一提的是，吉村先生曾指出我们的宇宙中质子和中子远远多于反质子、反中子，这一事实还是同 CP 破坏有关的呢。原来在宇宙大爆炸的早期，宇宙膨胀得非常迅急，以至有一段很短的时间 (10^{-44} 秒) 宇宙脱离了热平衡，一些超重的粒子很快地衰变成重子和反重子，但由于 CP 不守恒，衰变成的重子就比反重子多，而重子与反重子又成对地湮灭，最后，只剩下现在宇宙中多余的重子 (即质子和中子)。

讨论了空间反演 P 和电荷共轭 C ，我们也会想到时间反演 T 的问题。 T 守恒要求物理定律在倒转时间的方向以后不改变。我们这里谈的是微观的简单过程的时间方向问题，而宏观的，即多粒子体系的时间方向问题，主要是由熵增加的方向决定的。例如，当我们在电影里看到地上的水自动流回杯子里去，我们就能判断出是放电影的人把片子逆转了。然而把单个粒子运动的电影倒过来放，我们却很难就正、倒问题作出判断。场论里有名的 CPT 定理告诉我们 CPT 在任何过程中都是守恒的。如果承认这个定理，那么，一定数量的 CP 破坏必然伴有相应数量的 T 破坏去抵消，以保证 CPT 不破坏。让我们以电偶极矩 d 为例，来讨论 T 破坏的情形

$$d = e\sigma \cdot l$$

此式中 σ 是粒子的自旋， l 是粒子内部的一个有向长度， e 是电荷 (不是说粒子必须带电，电偶极矩的经典图象见图 3)。因为自旋在许多情况下可以想象为刚体的转动，当时间倒流时，刚体旋转的方向也就反过来了。电偶极矩在空间反演： $\gamma \rightarrow -\gamma$ ， $l \rightarrow -l$ 下也改号。如果带自旋的粒子有电偶极矩，这说明 T 和 P 都破坏了。因为在 T 或 P 变换下， d 变为 $-d$ ，而 T 或 P 的守恒则要求变换前后情形不变，即 $d = -d = 0$ 。

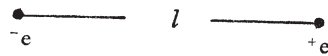


图 3 两个相距 l 的相反的电荷构成的体系具有电偶极矩。

至此我们讨论了许多可能的 CP 破坏表现方式。在某种程度上我们知道怎样把 CP 破坏现象与 CP 守恒现象区别开来，就象厨师知道如何区分不同的菜肴一样。不幸的是 CP 破坏的例证到目前为止仅限于 $K_L \rightarrow 2\pi$ 和 $K_L \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}$ 与 $K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ 的速率之差，只此而已。所有其它寻找 CP 破坏的努力全告失败。例如，人们曾经用非常巧妙的方法测量中子和电子的电偶极矩，并得到了十分小的上限数值。看来 CP

破坏是极微小和极个别的现象，与宇称在弱作用中最大限度地破坏形成鲜明对照。

那么为什么会有 CP 破坏，又为什么会这样小呢？理论家们发现，复数的耦合常数会引起相互作用中的 CP 破坏。所以 CP 破坏本质上就是量子现象，因为经典物理可以不用复数。复数 $z = x + iy$ 可以写成 $z = \sqrt{x^2 + y^2}e^{i\delta}$ ， δ 称为相因子， $\operatorname{tg}\delta = x/y$ 。当 $\delta = 0$ ， z 成为实数。由于量子力学中波函数的相位可以任意选择，而这任意选择可能使得耦合常数的相因子做相应的改动。因此只有所谓非平庸的相因子，即在改变波函数相因子时不变化的部分，才引起 CP 破坏。沃芬斯坦先生在发现 CP 破坏以后不久，立即提出了一个超弱作用理论，专门用来解释 K_L-K_S 体系中的 CP 破坏现象，取得了很大的成功。按照他的理论，CP 破坏是由一种与通常弱作用不同的，并且只有中性奇异粒子参加的作用引起的，这作用比弱作用还弱，所以称超弱作用。九年以后（1973 年），小林和松川先生在规范理论的基础上，提出了另一种方案，现在大家都称它为 KM 模型。按照 KM 模型，世界上应当有六种夸克，3 种带 $2/3$ 电荷，质量各不相同，名为 u, c, t ，另外三种带 $-1/3$ 电荷，质量也各不相同，名为 d, s, b 。注意内部带 c 夸克组分的粒子 J/ψ 是第二年底才发现的。发现带 b 夸克的粒子则是四年以后的事。这六个夸克组成三个弱作用二重态

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}.$$

KM 模型是以规范理论为基础的，因此它比超弱作用理论漂亮，也可以导出更丰富的结果，可是如果仅就解释 CP 破坏的实验来说，两者却不分高低。这是由于 CP 破坏事例太少。如果一个人只是偶然地做一点点小菜，那么他就很难比较出小刀与菜刀孰优孰劣。总之，人们由于 KM 模型的美而喜欢它，并称它为标准模型。