



# CP 不 对 称 性

薛 丕 友

(中国科学院高能物理研究所)

1980年诺贝尔物理学奖授予两位著名的美国实验物理学家菲奇 (Val Fitch) 和克罗宁 (James Cronin)。因为他们在实验上发现了 CP 不守恒<sup>[1]</sup>。这里 C 指电荷共轭变换 (charge conjugation), P 指宇称 (parity), CP 表示电荷共轭和宇称联合变换。

本文叙述对称性及其破坏在物理学中的重要性, 讨论 CP 不对称性的发展及其意义。

## 一、不可观察量、对称变换、守恒定律

对称原理之所以在物理学中有着重要作用, 在于它与一定的不可观察量之间有深刻的联系。例如, 绝对空间位置不可观察, 就相当于坐标平移变换对称性, 从而导致动量守恒。不可观察量、对称变换及其守恒定理三者的关系列于表 1<sup>[2]</sup>。

由表 1 还可以组成联合的不可观察量和相应的联合对称变换和联合守恒量。例如, 在基本粒子反应过程中, 如果绝对右或绝对左不可观察的同时, 电荷的绝对符号也不可观察。换句话说, 当粒子变为反粒子同时, 对它们作空间反演, 若一个过程对于这两个联系作用是不变的, 我们就有 CP 守恒。

电荷共轭 C、宇称变换 P 和时间反演 T, 都是不连续的变换, 因此只有在微观世界的量子现象中, 才显示它们的深刻意义。

1956年李政道和杨振宁先生提出了宇称不守恒 (即空间左右不对称性) 理论<sup>[3]</sup>, 在此以前, 人们认为空间是左右对称的。虽然, 在日常

表 1 不可观察量、对称性及守恒定律 (或选择规则) 之间的关系

不可观察量	对称变换	守恒定律或选择规则
相对粒子间区分	置换	玻色-爱因斯坦统计或费米-狄拉克统计
空间的绝对位置	空间平移 $r \rightarrow r + \Delta$	动量守恒
绝对时间	时间平移 $t \rightarrow t + \tau$	能量守恒
绝对空间方向	旋 转 $r \rightarrow r'$	角动量守恒
绝对速度	洛伦兹变换	洛伦兹群生成元
绝对右或绝对左	左右反射 $r \rightarrow -r$	宇称 P
电荷的绝对符号	$e \rightarrow -e$ 或 $\psi \rightarrow e^{i\phi}\psi^+$	电荷共轭 C (或称粒子反粒子共轭)
不同“荷”Q 之间相对相位	$\psi \rightarrow e^{iQ\theta}\psi$	“荷”Q 守恒
不同重子数 N 之间相对相位	$\psi \rightarrow e^{iN\theta}\psi$	重子数守恒
不同轻子数 L 之间相对相位	$\psi \rightarrow e^{iL\theta}\psi$	轻子数守恒
质子 p 和中子 n 不同相干混合态之间差异	$\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix} \rightarrow U \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$	同位旋守恒

生活中, 左、右彼此是可以区分的。例如, 人的心脏通常在左边, 谓之人的“偏心”吧。李、杨理论是一个飞跃, 故他们荣获了诺贝尔奖金。

吴健雄的实验<sup>[4]</sup>, 不但证实了弱相互作用中空间左右对称性的破坏, 即宇称 P 不守恒, 而

且还证明了正、反粒子间电荷共轭变换  $C$  不守恒。

虽然宇称  $P$  和电荷共轭  $C$  分别是不守恒，但它们的联合作用，即  $CP$  是否守恒呢？

## 二、弱相互作用中破坏

回顾一下五十年代末六十年代初对于  $CP$  破坏研究的历史，是饶有趣味的。虽然  $Co^{60}$  的  $\beta$  衰变实验表明弱作用下电荷共轭  $C$  和宇称  $P$  是分别不守恒的，但是，传统的“对称性”观察，总是禁锢着人们的思想。因此，当时物理学家们推测，宇称  $P$  和电荷共轭变换  $C$  联合起来，即  $CP$  还是守恒的。这一推测后来又被  $\mu^\pm$  介子衰变实验所证实。下面我们简单分析一下  $\mu^\pm$  介子衰变过程。考虑到  $\mu^+$ 、 $\mu^-$  是互为电荷共轭的粒子，它们的衰变方式分别为

$$\begin{aligned}\mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, \\ \mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.\end{aligned}$$

在  $CP$  变换下， $\mu^+$  与  $\mu^-$  互换  $\mu^+ \leftrightarrow \mu^-$ ； $e^+$  与  $e^-$  也互换  $e^+ \leftrightarrow e^-$ ，同时左旋变换为右旋，右旋变换为左旋。因此，如果  $CP$  守恒，则  $\mu^+$  衰变产生的 100% 的右旋  $e^+$  就相当于  $\mu^-$  衰变产生 100% 的左旋  $e^-$ 。实验上确实测得  $\mu^+$  衰变中  $e^+$  100% 是右旋的， $\mu^-$  衰变中 100%  $e^-$  的左旋的。因而，当时得到这样一个结论：在  $\mu^+$ 、 $\mu^-$  衰变中，尽管  $P$ 、 $C$  分别不守恒，但  $CP$  联合是守恒的。那末，在弱相互作用中， $CP$  是否都守恒呢？

1964 年，V. Fitch 和 J. Cronin 在美国布鲁克海文国家实验室 (Brookhaven National Laboratory) 的 33 GeV 质子同步加速器上做了一个  $K$  介子衰变实验，发现  $CP$  联合作用在弱相互作用中不守恒。他们研究的对象是  $K^0$  介子及其反粒子  $\bar{K}^0$ 。

我们知道， $K^0$  与  $\bar{K}^0$  不是  $CP$  的本征态，但是  $K^0$  与  $\bar{K}^0$  的如下线性组合是  $CP$  的本征态，令

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

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

则有

$$\begin{aligned}CP|K_1^0\rangle &= +|K_1^0\rangle, \\ CP|K_2^0\rangle &= -|K_2^0\rangle.\end{aligned}$$

因此，我们说： $|K_1^0\rangle$  的  $CP$  宇称是“+”的，而  $|K_2^0\rangle$  的  $CP$  宇称是“-”的。

如果在  $K^0$  介子衰变的弱相互作用中  $CP$  守恒，那么为了确保衰变前  $CP$  本征值等于衰变后的  $CP$  本征值，在非轻子衰变中， $K_1^0$  只能衰变为两个  $\pi$  介子，因为两个  $\pi$  介子系统的  $CP$  宇称也是“+”的。而  $K^0$  介子只能衰变为三个  $\pi$  介子，因为三个  $\pi$  介子的  $CP$  宇称可以是“-”的。反之，如果在实验上观察到  $K_2^0$  介子也能衰变为二个  $\pi$  介子，则衰变前和衰变后的  $CP$  宇称不相等了，即观察到  $CP$  破坏了。

非常有意思的是  $K_1^0$  和  $K_2^0$  之间的寿命相差很大。前者只有  $0.8923 \times 10^{-10}$  秒，后者为  $5.183 \times 10^{-8}$  秒。Fitch 和 Cronin 利用 30 GeV 质子轰击铍靶，产生中性  $K^0$  介子，大约经过 17 米路程， $K_1^0$  寿命短，几乎都“死”光，只剩下长寿命的  $K_2^0$ 。 $K_2^0$  衰变出来的带电  $\pi$  介子用两个谱仪记录，然后经过运动学分析，实验表明  $K_2^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  衰变方式是存在的。且有：

$$\frac{\text{强度}(K_2^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)}{\text{强度}(K_2^0 \rightarrow \text{all})} \doteq 2 \times 10^{-3},$$

我们需要强调指出的是，严格地说， $K^0$  介子有两种，一种是长寿命的，记为  $K_L^0$ ，它的主要成份是  $K_2^0$ ，但并不是  $K_2^0$  本身。另外还有一种短寿命的  $K^0$  介子，记为  $K_S^0$ ，它的主要成份是  $K_1^0$ 。由于  $K_L^0$  和  $K_S^0$  是  $K_1^0$  与  $K_2^0$  的如下线性组合：

$$\begin{aligned}|K_S^0\rangle &= \frac{|K_1^0\rangle + \varepsilon|K_2^0\rangle}{(1 + |\varepsilon|^2)^{\frac{1}{2}}}, \\ |K_L^0\rangle &= \frac{|K_2^0\rangle + \varepsilon'|K_1^0\rangle}{(1 + |\varepsilon'|^2)^{\frac{1}{2}}}.\end{aligned}$$

所以  $K_1^0$  和  $K_2^0$  虽然是  $CP$  的本征态，但  $K_S^0$  和  $K_L^0$  已经不是  $CP$  本征态，其中  $\varepsilon$  和  $\varepsilon'$  约为  $10^{-3}$ ，这就标志着  $CP$  破坏。

自从 Fitch 和 Cronin 发现  $CP$  破坏后， $K_S^0$  的  $2\pi$  衰变和  $K_L^0$  的  $CP$  不对称  $2\pi$  衰变的相干实验，也表明了  $CP$  对称的破坏。

$$\frac{n_{\bar{B}}}{n_B} \simeq 10^{-9}$$

### 三、CP 破坏的意义和原因

现在我们简述一下 CP 破坏的意义。我们知道,在一个很一般的假设下,即假设物理理论有洛伦兹协变性,而且自旋为半整数的粒子服从费米-狄拉克统计,整数自旋粒子服从玻色-爱因斯坦统计,并认为定域场论是成立的(这三个假设,在现有物理理论都采用着),则可以证明一个所谓 CPT 定理<sup>[5]</sup>。此定理说,电荷共轭变换 C、空间反射宇称 P 和时间反射变换 T 联合起来是不变的。即任何过程中, C, P, T 可能分别破坏,但 CPT 联合对称性总是成立的。

现在 Fitch 和 Cronin 在实验上发现了 CP 不守恒,则根据 CPT 定理,这就意味着时间反演 T 和在微观世界也是不对称的。这里应当强调,在实验上和理论上,可以不管 CPT 定理,专门考察时间反演 T 的不变性。这里有两种情况:第一种,假定 CPT 定理是对的,时间反演 T 是否不变,不知道,则有:

$$|K_S^0\rangle = \begin{pmatrix} 1 + \varepsilon \\ 1 - \varepsilon \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2(1 + |\varepsilon|^2)}},$$

$$|K_L^0\rangle = \begin{pmatrix} 1 + \varepsilon \\ -(1 - \varepsilon) \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2(1 + |\varepsilon|^2)}}.$$

第二种,假定 T 不变性成立,而 CPT 定理是否成立,不知道,则有:

$$|K_S^0\rangle = \begin{pmatrix} 1 + \delta \\ 1 - \delta \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2(1 + |\delta|^2)}},$$

$$|K_L^0\rangle = \begin{pmatrix} 1 - \delta \\ -(1 + \delta) \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2(1 + |\delta|^2)}}.$$

如果 CPT 定理和 T 对称性两者均成立,则有:

$$\varepsilon = \delta = 0.$$

CP 不对称性发现的另一个意义在于它与宇宙学、大统一理论都有密切关系。CP 不对称,意味着我们的宇宙可能也是不对称的。在宇宙学中,有一个问题,一直没有很好解决,为什么今天在宇宙中观察到的重子数  $n_B$  远远超过反重子数  $n_{\bar{B}}$ ? 目前实验观察值为

这就显示了宇宙中物质世界和反物质世界之间一个极大不对称性。Fitch 和 Cronin 发现的 CP 不对称性可能提供了物质世界和反物质世界之间这种不对称性的一种机制。当然这一课题目前还在研究中。

诚然,确定 CP 破坏的实验已经十六年了,但造成 CP 破坏的原因和物理机制,直到今天,还没有真正得到说明。当前还仅仅处于唯象分析和模型阶段。翻开近十几年的文献,你会看到讨论 CP 破坏的文章非常多,其模型也是各式各样。一种广泛采用的唯象分析,就是引进所谓 Kobayashi-Maskawa 矩阵, (简称 KM 矩阵)。假设,自然界有三代夸克:

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

其中除 t 夸克外,其它五种夸克 u, d, c, s, b 均在实验上发现了。考虑到弱相互作用本征态不是质量本征态,通常把带电弱相互作用流写成如下形式:

$$(\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}) \gamma_\mu \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) U \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

式中 U 就是 KM 阵矩<sup>[6]</sup>:

$$U = \begin{pmatrix} c_1 & -s_1 c_3 & -s_1 s_3 \\ s_1 c_2 & c_1 c_2 c_3 - s_2 s_3 e^{i\delta} & c_1 c_2 c_3 + s_2 c_3 e^{i\delta} \\ s_1 s_2 & c_1 c_2 c_3 + c_2 s_3 e^{i\delta} & c_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 e^{i\delta} \end{pmatrix},$$

其中

$$c_i = \cos \theta_i, \quad s_i = \sin \theta_i, \quad i = 1, 2, 3.$$

而  $\delta$  是复相位,它表征 CP 破坏大小,  $\delta = 0$ , 则 CP 守恒。CP 破坏参数  $\varepsilon$  与  $\delta$  之间关系为<sup>[7]</sup>

$$|\varepsilon| \simeq |s_2 c_2 s_3 \sin \delta|.$$

CP 破坏另一种可能机制是由于变换希格斯 (Higgs) 粒子造成的<sup>[8]</sup>。但是由于 Higgs 粒子造成 CP 破坏大小(即相互作用的有效顶角),既与具体模型有关,又与 Higgs 粒子的质量密切相关,而实验上,至今没有发现 Higgs 粒子,因而用它来说明 CP 破坏当然有一定的任意性。

(下转 62 页)

在核的相互作用中, 自旋为 1/2 的正极化粒子取矢积

$$\mathbf{k}_1 \times \mathbf{k}_0$$

的方向, 这里  $\mathbf{k}_1$  和  $\mathbf{k}_0$  分别为入射粒子和出射粒子的圆波矢。

7. 极化效应的描述(麦迪逊 (Madison) 约定)

在核反应的符号表达式  $A(b, c)D$  中, 在一个符号上划一个箭头, 表示这个粒子起始于极化状态, 或者它的极化状态已被测量。

例如:

$A(\vec{b}, c)D$  极化入射束

$A(\vec{b}, \vec{c})D$  极化入射束; 业经测量的出射粒子  $c$  的极化(极化转移)

$A(b, \vec{c})D$  未极化的入射束; 业经测量的出射粒子  $c$  的极化

$\vec{A}(b, c)D$  入射到极化靶上的未极化射束

$\vec{A}(b, \vec{c})D$  入射到极化靶上的未极化射束; 业经测量的出射粒子  $c$  的极化

$A(\vec{b}, c)\vec{D}$  极化入射束; 靶极化的测量。

(待续)

(原文: Symbols, Units and Nomenclature in Physics, Document U. I. P. 20 (1978), Report published with the financial support of the UNESCO, 邓存熙译, 第七章钱尚武初校, 第八章刘云丰初校, 全文由王学英统一校对, 姜友陆复校, 赵凯华审订)

## 1980 年诺贝尔物理学奖获得者简历

1980 年诺贝尔物理学奖授给了美国实验物理学家菲奇 (V. Fitch) 和克罗宁 (J. Cronin)。下面是这两位物理学家的简历。

**菲奇·维尔·洛格斯登 (Fitch Val Logsdon)**

1923 年 3 月 10 日生于内布拉斯加。1948 年在麦克迪尔大学获工程学士, 1954 年在哥伦比亚大学获物理学博士。1946—1947 年在洛斯阿拉莫斯实验室任助理科学家。1953—1954 年在哥伦比亚大学任物理学讲师, 1954—1960 年在普林斯顿大学任讲师, 后任副教授。1960 年以后为物理学教授, 1960—1964 年获斯隆奖金。1961 年以后为联合大学协会理事, 1970—1973 年任总统科学顾问委员会委员。他获得的荣誉和奖励有: 研究协会奖 (1968 年), 美国工程技术理事会洛伦斯奖 (1968 年)。他是美国国家科学院、美国科学艺术学院和美国物理学会会员。主要研究工作为: 粒子物理学, 精确测量发自  $\mu$  介原子的 X 射线, 从而实现核辐

射的精确测量; 经由 K 介子衰变的弱相互作用的辐射。

**克罗宁·詹姆斯·沃森 (Cronin James Watson)**

1921 年 9 月 29 日生于伊利诺斯州的芝加哥。他从事核物理学研究。1951 年在南卫公会大学获理学士, 1953 年和 1955 年在芝加哥大学先后获理科硕士和物理学博士。1955—1958 年在布鲁克海文国立实验室任助理物理学家, 1958 年—1971 年在普林斯顿大学先为助理教授后任教授。1971 年以后任芝加哥大学物理学教授, 同时在 1970—1971 年兼任伊利诺斯国立加速器的物理学家、国家科学院物理学部基本粒子物理学小组成员。在国家科学院、美国物理学会任职。主要研究工作为: 基本粒子;  $\pi$  介子-质子总截面的实验; 超子衰变的非对称性; 改进探测方法的研究。

(吴述尧自 "American Men and Women of Science", 12—13 th Edition)

(上接第 4 页)

另外, 也有些人讨论 CP 自发破缺机制, 即假定格拉朗日 L 是 CP 和 T 不变的, 但物理过程是 CP 破坏的。基本问题是, 究竟自然定律是不对称的还是我们生活的世界是不对称的呢? 因而实验上 CP 破坏的发现, 涉及到人们对客观世界认识的一些根本问题, 因而有着深刻的物理意义, 有待我们进一步去探索。

### 参 考 文 献

[1] J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch and R. Turlay, *Phys. Rev. Letters*, **13** (1964), 138.

- [2] 李政道, 《场论简引和粒子物理》, 北京, 中国科大研究生院, (1979), 76.
- [3] T. D. Lee. and C. N. Yang, *Phys. Rev.*, **104** (1956), 254.
- [4] C. S. Wu et al., *Phys. Rev.*, **105** (1957), 1413.
- [5] W. Pauli, Niels Bohr and the Development of Physics, McGraw-Hill and Pergamon, (1955).
- [6] M. Kobayashi and K. Maskawa, *Progr. Theor. Phys.*, **49** (1973), 652.
- [7] J. Ellis, SLAC-PUB-2177, August (1978).
- [8] T. D. Lee, *Phys. Rev.*, **98** (1973), 1226; *Phys. Rev.*, **90** (1974), 143; S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.*, **37** (1976), 657; Dong Fang-xiao, Ma Zhong-qi, Xue Pei-you, Yue Zhong-wu and Zhou Xian-jian, Proceedings of the 1980 Guangzhou Conference on Theoretical Particle Physics, (1980), 1264.