第 11 卷 第 5 期　　高 能 物 理 与 核 物 理　　Vol. 11, No. 5
1987 年 9 月　　HIGH ENERGY PHYSICS AND NUCLEAR PHYSICS　　Sept., 1987

快报

在 K^0–K^0 系统理论中的一个重要问题

吴　丹　迪
（中国科学院高能物理研究所，北京）
CERN 日内瓦

摘　　要

利用对 K^0-K^0 系统相位无关的描写公式，讨论了在计算 M_{12} 时的 B 参量的符号及 K-M 矩阵中 $\sin\delta$ 的符号(都应大于零)．也讨论了精确的 ε 表达式中的奇异性的意义．这个奇异性在文献中常见的公式里不存在．

二十多年来，CP 破坏的例证一直限于 K^0-K^0 系统，因此对这个系统的精确理解具有重要的意义．作者曾经给 CP 不对称参量 ε 的一个精确的、与相位约定无关的表达式[1]．这个表达式与常见的表达式[2,3]

$$\varepsilon = \frac{e^{i\theta}}{2\sqrt{2}}\left(\frac{\operatorname{Im} M_{12}}{\operatorname{Re} M_{12}} - \frac{2\operatorname{Im} a_0}{\operatorname{Re} a_0}\right) \quad (当\ \operatorname{Im} a_2 = 0) \tag{1}$$

有区别，这区别不在于数值上，而在于概念上，因为文献[1]中的公式可以有奇点，而K介子物理恰好远离奇点．当计算其他中性介子的 ε 参量时两个公式可以给出极不相同的结果[4]．同时利用相位无关的公式，使我们能够讨论理论和实验上都还不能定下的某些参数的符号(见 19 式)．

公式(1)的主要问题在于它随着粒子的相位变换 $K^0 \to e^{i\chi}K^0$ 而改变(虽然，当 $\chi \approx 0$ 时 ε 几乎不随 χ 而改变)．由于实验上 ε 很小，人们习惯于用微扰方法计算．其结果是所有的 K^0-K^0 CP 破坏（除了 ε' 以外）都可以用 ε 表达[2]．其实它们的精确公式十分不同，而仔细考察这些精确公式，将会得到新的信息．但本文只讨论 K^0 的 2π 及半轻子衰变模式．我们知道下列的 CP 变换是强作用守恒的(其他粒子的相应变换从略)

$$CP|K^0\rangle = e^{i\eta}|K^0\rangle \tag{2}$$

不做任何相位约定，K^0-K^0 系统的本征态写作[5]

$$|K_\pm\rangle = [P|K^0\rangle \pm q|K^0\rangle]/[|P|^2 + |q|^2] \tag{3}$$

在相位约定 $\eta = 0$ 和 CP 守恒的极限下，

$$|K_\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[|K^0\rangle \pm |K^0\rangle] \tag{4}$$

系数 p、q 满足如下久期方程(假定 CPT 守恒)

本文 1987 年 2 月 8 日收到．

$$\begin{pmatrix} M_{11}-\frac{i}{2}\Gamma_{11}-\left(m_{-}-\frac{i}{2}\gamma_{-}\right) & M_{12}-\frac{i}{2}\Gamma_{12} \\ M_{12}^{*}-\frac{i}{2}\Gamma_{12}^{*} & M_{11}-\frac{i}{2}\Gamma_{11}-\left(m-\frac{i}{2}\gamma_{-}\right) \end{pmatrix}\begin{pmatrix} p \\ -q \end{pmatrix}=0 \qquad (5)$$

有非零解条件是[6]

$$\left(M_{12}-\frac{i}{2}\Gamma_{12}\right)\left(M_{12}^{*}-\frac{i}{2}\Gamma_{12}^{*}\right)=\frac{1}{4}\left(\Delta m-\frac{i}{2}\Delta\gamma\right)^{2} \qquad (6')$$

$$4\mathrm{Re}\, M_{12}\Gamma_{12}^{*}=\Delta m\Delta\gamma,\ (\Delta m=m_{+}-m_{-},\ \Delta\gamma=\gamma_{+}-\gamma_{-}) \qquad (6'')$$

方程(5)的第一行是

$$p/q=\left(M_{12}-\frac{i}{2}\Gamma_{12}\right)\Big/\frac{1}{2}\left(\Delta m-\frac{i}{2}\Delta\gamma\right) \qquad (7)$$

取极限(4)，方程(6，7)意味着

$$\Delta m M_{12}>0,\quad (\text{当 } \eta=0,\ \text{CP 守恒}) \qquad (8)$$

实际上，由(3)式看出，在非常好的近似下，CP 不纯洁性 $\langle K_{+}|K_{-}\rangle\equiv\delta$ 是

$$\delta=\frac{|p|^{2}-|q|^{2}}{|p|^{2}+|q|^{2}}=\frac{-2\mathrm{Im}\, M_{12}\Gamma_{12}^{*}}{2|M_{12}|^{2}+\frac{1}{2}|\Gamma_{12}|^{2}+\frac{1}{2}\left|(\Delta m)^{2}-\frac{1}{4}(\Delta\gamma)^{2}-i\Delta m\Delta\gamma\right|} \qquad (9)$$

δ 也恰好是实验上可以测量的半轻子衰变及对称参量，如果流流作用理论成立的话

$$\delta=[\Gamma(K_{L}\to\pi^{-}l^{+}\nu)-\Gamma(K_{L}\to\pi^{+}l^{-}\bar{\nu})]/[\Gamma(K_{L}\to\pi^{-}l^{+}\nu)+\Gamma(K_{L}\to\pi^{+}l^{-}\bar{\nu})] \qquad (10)$$

实验上 $\delta=3.3\times10^{-3}$，因此即使考虑 CP 破坏，$K_{\pm}$ 仍可分别当作近似的 CP 本征态。我们称此为按强作用或按初态定义的 CP 本征态。(后文在标准模型中，CP 不纯洁性 $\delta\sim10^{-3}$ 对其他将把"近似"二字去掉)。中性介子混合系统也都成立[4]。不仅如此，由(6.9)我们发现 $2|M_{12}|=|\Delta m|$，$2|\Gamma_{12}|=|\Delta\gamma|$，两式在忽略 δ^{2} 级修正时是准确的。而(7)式在 CP 破坏趋于零时渐变成(4)的条件是(假定 $\Delta m<0$ 是实验上已知的)

$$\mathrm{Re}\, M_{12}<0\quad (\eta=0,\ \mathrm{Im}\, M_{12}\Gamma_{12}^{*}\approx0) \qquad (11)$$

象通常那样定义 ($A_{0}=a_{0}e^{i\delta_{0}}$ 等等)

$$\langle 2\pi,\ I=0|K^{0}\rangle=A_{0}$$

$$\langle 2\pi,\ I=0|\bar{K}^{0}\rangle=\bar{A}_{0} \qquad (12)$$

(11)式可以表示成与相位约定无关的形式[4]

$$\mathrm{Re}\, M_{12}A_{0}\bar{A}_{0}^{*}<0\quad (\text{当 } \eta=0,\ A_{0}\bar{A}_{0}^{*}=a_{0}^{2}) \qquad (13)$$

满足这个条件，才能保证 K_{+} 和 K_{-} (见(3)，(7)式)分别对应于 CP = + 和 CP = − 的本征态，而且使公式(1)在标准模型计算下与精确公式(见后)的近似程度达 99% 以上。实际上，由于

$$\Gamma_{12}=D\cdot(A_{0}^{*}\bar{A}_{0}+A_{2}^{*}\bar{A}_{2}+\text{其他小项}) \qquad (14)$$

(这里 D 是相空间因子)因此 $\mathrm{Re}\,\Gamma_{12}A_{0}\bar{A}_{0}^{*}>0$ 总是成立，联结此式与(6)式(如实验表明，其右边小于零)；假定 $\Delta\gamma>0$ (它对 $K^{0}-K^{0}$ 成立)，(13)式也是必需的。但是如果把(13)式的不等号弄颠倒了，就会得到 $\Delta m\Delta\gamma>0$ 的严重后果。

现在来看 CP 反对称参量 ε，其定义为 $\varepsilon=\langle 2\pi,\ I=0|K_{-}\rangle/\langle 2\pi,\ I=0|K_{+}\rangle$。利

用 (3) 与 (12) 式，显然地它是

$$\varepsilon = \frac{pA_0 - q\bar{A}_0}{pA_0 + q\bar{A}_0} \cdot \frac{p^*A_0^* + q^*\bar{A}_0^*}{p^*A_0^* + q^*\bar{A}_0^*} \tag{15}$$

这里我们有意识地乘上一个因子 1. 参考 (7) 可以想象，ε 是如下参量的函数.

$$U = M_{12}A_0\bar{A}_0^*,\quad V = \Gamma_{12}A_0\bar{A}_0^*,\quad y_\pm = |A_0|^2 \pm |\bar{A}_0|^2 \tag{16}$$

所有这些量都是在相因子改变下不变的，例如 $U = \langle K^0|$ Heff, $\Delta s = 2|K^0\rangle\langle 2\pi|K^0\rangle\langle 2\pi|K^0\rangle^*$ 等等.

$$\varepsilon = \frac{\left(\mathrm{Im}\,V + \frac{1}{2}\Delta m Y_-\right) + i\left(2\,\mathrm{Im}\,U - \frac{1}{4}\Delta\gamma Y_-\right)}{\left(2\,\mathrm{Re}\,U + \frac{1}{2}\Delta m Y_-\right) - i\left(\mathrm{Re}\,V + \frac{1}{4}\Delta\gamma Y_+\right)} \tag{17}$$

(17) 与 (11) 的显著不同在于，它的分母每个括弧中有两项. 当条件 (13) 满足时这两项相加；否则，这两项相减. 在 (9) 式后边我们说过，每个括弧中的两项都极相近，因此相减意味着近于零，ε 趋于无穷大. $\varepsilon \to \infty$ 在概念上并非不可接受，它只不过意味着 CP = ± 的本征态几乎全部衰变到 CP = ∓ 的末态，这叫做 CP 倒相现象. 由于 CP = + 和 CP = − 的末态分别是 2π 和 3π，$\varepsilon \to \infty$ 意味着 $\Delta\gamma < 0$，或者 $\Delta m\Delta\gamma > 0$，这是被 K 介子实验否定了的.

M_{12} 一般地可以写成

$$M_{12} = M_{12B} + M_{12L} \tag{18}$$

这里 M_{12B} 是箱图计算的结果，其中有一个理论上不定的因子参数 B. M_{12L} 是所谓长距离效应，尚无可靠的计算；不过我们知道，$\mathrm{Im}\, M_{12L}A_2\bar{A}_2^* = 0$. 利用实验上已知的 δ, ε 和条件 (13)，有可能对 B 参数，M_{12L} 及 K-M 混合矩阵[7]中的 $\sin\delta$ 的符号给出限制. 至少，当 $|M_{12L}| < |M_{12B}|$ 时，我们得到

$$B > 0 \quad \sin\delta > 0 \tag{19}$$

由于篇幅所限，此地不做一般性讨论. 将条件 (13) 和公式 (15)，(17) 推广到 B^0-B^0 系统（(13) 式需做小的调整 [4]），我们发现对某些 B^0-B^0 CP 自轭衰变换道，$\varepsilon > 1$. B_d 或 B_s 系统有可能 CP 倒相，依相应的 B 参数的符号而定. 如果我们使用类似 (1) 式的公式，就不会得到 ε 大于 1 的结果. 值得一提的是尽管出现倒相，$\Delta m\Delta\gamma < 0$ 对 B 粒子混合系统仍然成立.

作者在今年 1 月底的 Moriond Workshop（法国）会上受益非浅，特向会议的组织者 Tran Thanh Van 教授表示感谢.

参　考　文　献

[1] D. D. Wu, *Phys. Rev.*, **D33**(1986), 860.
[2] T. T. Wu and C. N. Yang, *Phys. Rev. Lett.*, **13**(1964), 380.
[3] F. Gilman and M. Wise, *Phys. Lett.*, **93B**(1980), 129.
[4] D. D. Wu, X. Q. Li and P. Wang, BIHEP-TH-86-26.
[5] R. Marshak, Riazudin and C. P. Ryan, in Theory of Weak Interactions in Particle Physics (Wiley and Sons, 1969) pp. 609—641.

[6] D. D. Wu, *Phys. Lett.*, **90B**(1980), 452.
[7] M. Kobayashi and T. Maskawa, *Prog. Theor. Phys.*, **49**(1973), 652.

AN IMPORTANT MESSAGE IN THE K^0-K^0 MIXING SYSTEM

DAN-DI WU

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing*)

and (*CERN, Geneve*)

ABSTRACT

The rephasing invariant formulation for the K^0-K^0 system is given and used to discuss the signs of the B parameter in M_{12} calculation and $\sin\delta$ in the K-M matrix (both are positive). The meaning of the singularity appeared in the exact formula of the ε parameter, which does not appear in the popular formula in the literature, is also discussed.