

# $\phi$ 介子工厂及其粒子物理实验研究计划\*

童 国 梁

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘 要 建于罗马近郊 Frascati 意大利国家实验室的高亮度正负电子对撞机 DAΦNE 在  $\phi$  介子产生的阈能上运行, 被称为  $\phi$  介子工厂. DAΦNE 已于 1999 年 4 月开始物理运行. 文章介绍了这台对撞机以及相应的粒子物理实验——KLOE 实验的研究计划.

关键词  $\phi$  介子工厂, CP 破坏, 直接 CP 破坏

## Φ FACTORY AND ITS EXPERIMENTAL PROGRAM FOR PARTICLE PHYSICS

TONG Guo Liang

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract** An  $e^+e^-$  collider, christened DAΦNE and optimized for operation at a total energy of 1020 MeV, the mass of the  $\phi$  meson, started physical operation this April in Italy. An overview is presented of the DAΦNE project, the KLOE experiment and the particle physics program.

**Key words**  $\phi$  factory, CP violation, direct CP violation

### 1 DAΦNE —— $\phi$ 介子工厂

1990 年 6 月, 意大利国家核物理研究所 (INFN) 批准在罗马郊区 Frascati 建造一台总能量为 1020 MeV ( $\phi$  介子质量) 左右的高亮度的正负电子对撞机. 对撞机定名为 DAΦNE, 这是英文 Double Annular  $\Phi$ -factory for Nice Experiment 的缩写<sup>[1]</sup>. 因为该机器运行时产生大量的  $\phi$  介子, 故人们常常

把它称为  $\phi$  介子工厂. DAΦNE 的所有设备安置在当年曾在  $J/\psi$  研究中作出重要贡献的正负电子对撞机 ADONE 的实验大厅内.

DAΦNE 总体结构如图 1 所示, 它采用双圈式设计, 在两个对撞点上分别安置了开展粒子物理实验的探测器 KLOE 和开展核物理实验的探测器 FINUDA.

从实验的角度出发, 表 1 列出了 DAΦNE 机器的一些主要参数.

表 1 DAΦNE 机器的主要参数

单束能量	0.51 GeV
每束团粒子数	$8.9 \times 10^{10}$
每环束团数	30 至 120
对撞频率	直到 368.85 MHz
水平发射度	$1.0 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
垂直发射度	$0.01 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
束团长度	$30 \text{ mm} \cdot \text{rms}$
对撞点束团水平扩散	$2.0 \text{ mm} \cdot \text{rms}$
对撞点束团垂直扩散	$0.02 \text{ mm} \cdot \text{rms}$
每圈同步辐射损失	9.3 KeV
最大亮度	$5.3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

在  $\phi$  峰值能区,  $e^+e^- \rightarrow \phi$  过程截面约为  $5 \mu\text{b}$ , 以机器最终目标亮度 ( $10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 估计, 每秒将有

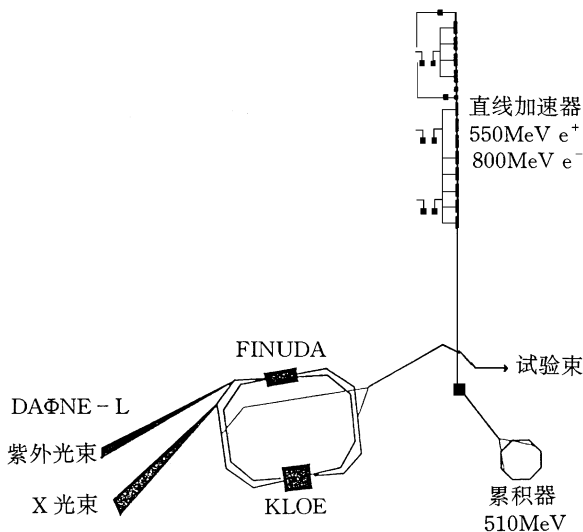


图 1 DAΦNE 正负电子对撞机的总体安排

\* 国家自然科学基金资助项目

1999-04-19 收到初稿, 1999-08-26 修回

5000 个  $\phi$  介子产生,以一年取数时间为  $10^7$ s 计, $\phi$  介子的年产率高达  $5 \times 10^{10}$ ! 它比通常这个能区的对撞机的产率高出 100 多倍.

$\phi$  介子是一个矢量介子,具有确定的量子态.和光子一样,它的自旋宇称  $J^{PC}$  也是  $1^{--}$ . 在夸克模型中, $\phi$  介子是由正、反奇异夸克  $s\bar{s}$  组成,故在  $\phi$  介子衰变中,含  $K$  介子(组分中有  $s$  和  $\bar{s}$  成分)的衰变道占了绝大部分.大家知道, $CP$  不守恒在 60 年代正是由中性  $K$  介子的衰变中发现的,而  $K$  介子衰变也是迄今为止唯一观察到  $CP$  破坏的过程.

DAΦNE 上产生的  $\phi$  介子在静止时衰变,终态  $K$  介子不仅成对产生(可以是带电的  $K^+$  与  $K^-$ ,也可以是中性的  $K_S$  和  $K_L$ ),而且是背靠背(共线)飞行,所以观察到一个  $K$  介子也就保证了另一个具有确定方向和确定类型的  $K$  介子的存在,也就是说,这样产生的  $K$  介子是可以被“标记”的.表 2 列出了  $\phi$  介子各衰变道分支比、相关运动学参量以及 DAΦNE 在 KLOE 探测器上可标记的  $K^+ K^-$  对以及短寿命和长寿命的中性  $K$  介子  $K_S$  和  $K_L$  的年产率.

表 2  $\phi$  介子衰变

衰变模式	分支比 / %	速度 / $c$	衰变长度 $\hbar c\tau$ / cm	最大动量 $P_{max}$ / MeV / $c$	年产率 / 对 / 年	标记年产量 / 对 / 年
$K^+ K^-$	49	0.249	95.4	127	$2.5 \times 10^{10}$	$1.7 \times 10^{10}$
$K_S K_L$	34	0.216	0.59 ( $K_S$ )	110	$1.7 \times 10^{10}$	$3.6 \times 10^9$ ( $K_S$ )
			343.8 ( $K_L$ )			$4.5 \times 10^9$ ( $K_L$ )
$\rho^\pi$	13	—	—	182	$6 \times 10^9$	—
$\pi^+ \pi^- \pi^0$	2	—	—	462	$1 \times 10^9$	—
$\eta\gamma$	1.3	—	—	362	$6 \times 10^8$	—
其他	~1	—	—	—	$5 \times 10^8$	—

$\phi$  介子工厂除了可以获得很大的  $\phi$  介子产额以外,还具有下列特点:它在  $\phi$  介子产生的阈能上运行,因而提供了非常干净的环境;它还提供了可以确知流强的单色  $K$  介子束流,并有可能对  $K$  介子进行有效的标记和相干测量. $\phi$  介子工厂的这些特点为  $\phi$  介子、 $K$  介子衰变以及相关的对称性破坏研究提供了理想场所.

DAΦNE 上的 FINUDA 探测器用于超核和非介子衰变的核物理研究;KLOE 探测器<sup>[2]</sup>则专门用来开展以  $CP$  破坏精密测量为主要目标的粒子物理研究.本文仅限于 KLOE 探测器的粒子物理实验.

## 2 KLOE 实验的研究计划

KLOE 是 Kaon Long Experiment 的缩写,该实验的主要物理目标是在  $K$  介子系统中精确测量  $CP$

破坏以及进行各种对称性研究.这里首先把  $CP$  对称性以及已经进行过的在  $K$  介子系统中的  $CP$  破坏研究情况作一概述,然后介绍 KLOE 将要开展的研究计划.

### 2.1 $CP$ 变换不变性

$C$  指电荷共轭变换, $P$  指宇称变换.在  $C$  变换下,粒子变为其反粒子,这时除了粒子的自旋和动量不变外,其余相加的量子数均改变符号.一个粒子或粒子系,只有当它的相加量子数全为零时,才是电荷共轭本征态,例如  $\pi^0$  就是这样的本征态.

让我们用  $\pi$  介子衰变反应

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu \quad (1a)$$

作为例子,把其中每种粒子用相应的反粒子代替,也就是通过  $C$  变换使原初的反应成为

$$\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}. \quad (1b)$$

这种情况如图 2 所描述.原初的反应见图 2(a),粒子用反粒子代替如图 2(b) 表示,但是图 2(b) 的反应从来没有观察到(左手极化的反中微子是不存在的),而图 2(c) 的反应是可以观察到的,它恰好是由图 2(b) 的空间反演即  $P$  变换得到的,这意味着,弱相互作用不具有宇称不变性和电荷共轭不变性,但具有联合的  $CP$  不变性.

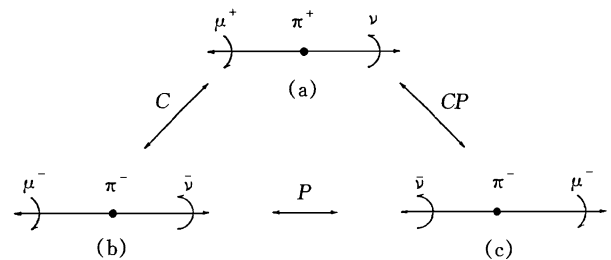


图 2  $C, P$  和  $CP$  变换过程

### 2.2 中性 $K$ 介子系统中 $CP$ 破坏的发现

中性  $K$  介子有两种,即奇异数  $S = +1$  的  $K^0$  和  $S = -1$  的  $\bar{K}^0$ . 与  $\pi^0$  介子不同, $\pi^0$  的反粒子即为它自己,但  $K^0$  和  $\bar{K}^0$  互为反粒子.中性  $K$  介子通过弱相互作用衰变,奇异数不守恒. $K^0$  和  $\bar{K}^0$  不是  $CP$  的本征态,但是它们的线性组合

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \quad CP = +1, \quad (2a)$$

$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \quad CP = -1, \quad (2b)$$

是  $CP$  的本征态,且有

$$CP|K_1\rangle \rightarrow +|K_1\rangle,$$

$$CP|K_2\rangle \rightarrow -|K_2\rangle.$$

在中性  $K$  介子衰变而成的  $\pi$  介子系统中,实验

证明在  $\pi$  介子之间没有相对的角动量(即  $s$  波态),  $\pi$  介子系统的宇称完全由  $\pi$  介子的本征宇称决定,  $2\pi$  介子系统( $\pi^+\pi^-$ ,  $\pi^0\pi^0$ )和  $3\pi$  介子系统( $\pi^+\pi^-\pi^0$ ,  $\pi^0\pi^0\pi^0$ )分别处在  $CP$  的偶态和奇态. 由  $CP$  守恒可以预期  $K_1$  和  $K_2$  的衰变模式:

$$\begin{aligned} K_1 &\rightarrow \pi^+\pi^-, \pi^0\pi^0 & CP = +1, \\ K_2 &\rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0, \pi^0\pi^0\pi^0 & CP = -1. \end{aligned}$$

$K_1$  和  $K_2$  的寿命也是完全不同的, 分别为  $0.9 \times 10^{-10}$ s 和  $0.5 \times 10^{-7}$ s.

在 1957 年研究弱衰变过程中发现宇称破坏之后的一段时间内, 人们仍然相信, 至少在  $CP$  变换下弱相互作用还保持不变性. 这种信念导致了上述关于  $CP$  本征态  $K_1$  和  $K_2$  的描写. 但是到了 1964 年, 著名的 Christenson 等的实验第一次揭示了被我们称为  $K_2$  的所谓长寿命态同样可以衰变为  $\pi^+\pi^-$ , 这种衰变模式的分支比约为  $10^{-31}$ . 于是两个  $K$  介子态  $K_1$  ( $CP = +1$ ) 和  $K_2$  ( $CP = -1$ ) 被  $K_S$  (短寿命成分) 和  $K_L$  (长寿命成分) 替代.  $K_S$  原则上由  $CP = +1$  的  $K_1$  组成, 但带了极少量的  $CP = -1$  的  $K_2$  成分;  $K_L$  的构成情况正好相反.  $CP$  破坏常常用下式的振幅比来度量:

$$|\eta_{+-}| = \frac{A(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-)}{A(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-)} = 2.28 \times 10^{-3}.$$

接着,  $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$  衰变也发现了. 最后,  $CP$  破坏又在  $K_L \rightarrow e^+\nu\pi^-$  和  $K_L \rightarrow e^-\nu\pi^+$  衰变率之间的不对称性中发现.

中性  $K$  介子衰变中  $CP$  不守恒的发现使我们对粒子物理的认识又前进了一大步. 很快, 这一发现又被用来解释宇宙中重子与反重子的失配现象. 我们知道, 宇宙中反重子与重子之比  $< 10^{-4}$ , 对此目前有两种不同的解释: 一种认为在早期宇宙发生的过程中就已产生了  $10^{-9}$  的重子与反重子不对称性, 经过正、反重子湮灭成光子后, 留下了剩余重子; 另一种解释则从对称的情况出发, 而不对称性仅仅发生在尔后的重子数不守恒过程中, 1967 年, Sakharov 强调指出, 这时的重子产生必须是  $CP$  不守恒的.

### 2.3 直接 $CP$ 破坏<sup>[4]</sup>

$CP$  破坏已在  $K_L$  的半轻子衰变  $K_L \rightarrow \pi^\pm l^\pm \nu$  和非轻子衰变  $K_L \rightarrow 2\pi$  中观察到, 这些观察量可表示为

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^- l^+ \nu) - \Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ l^- \nu)}{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^- l^+ \nu) + \Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ l^- \nu)}, \quad (3) \\ \eta_{+-} &= A(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-) / A(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-) \end{aligned}$$

$$= |\eta_{+-}| e^{i\phi_{+-}}, \quad (4)$$

$$\eta_{00} = A(K_L \rightarrow \pi^0\pi^0) / A(K_S \rightarrow \pi^0\pi^0)$$

$$= |\eta_{00}| e^{i\phi_{00}}. \quad (5)$$

一共有 5 个实数, 3 个量, 2 个相位. 目前达到的测量结果为:  $|\eta_{+-}| \approx |\eta_{00}| = 2.28 \times 10^{-3}$ , 相位角  $\phi_{+-} \approx$  相位角  $\phi_{00} = 44^\circ$ ,  $\delta = 3.3 \times 10^{-3}$ , 这些量表征了  $K$  介子衰变中  $CP$  破坏的程度.

$CP$  破坏除了发生在 2.2 节中介绍过的  $K^0 - \bar{K}^0$  混合上以外, 也可以发生在衰变幅度上:

$$A[K^0 \rightarrow \pi\pi(I)] = A_I e^{i\delta_I} \quad (6a)$$

$$A[\bar{K}^0 \rightarrow \pi\pi(I)] = A_I^* e^{i\delta_I} \quad (6b)$$

式中  $I$  是  $\pi\pi$  的同位旋, 可取 0, 1 两个值,  $\delta_I$  是终态相移. 若  $CP$  守恒, 则  $A_I$  为实数. 因为对于带电的  $2\pi(\pi^+\pi^-)$  和不带电的  $2\pi(\pi^0\pi^0)$  态, 由  $I = 0, 2$  态的混合幅度(或系数)是不同的, 因此  $\eta_{+-} \neq \eta_{00}$ . 它们可以分别表示为

$$\eta_{+-} = \epsilon + \epsilon', \quad (7a)$$

$$\eta_{00} = \epsilon - 2\epsilon'. \quad (7b)$$

实验上观察  $|\eta_{+-}|^2$ , 即  $K_L, K_S$  到带电的  $2\pi$  衰变率之比,  $|\eta_{00}|^2$ , 即  $K_L, K_S$  到中性的  $2\pi$  衰变率之比, 以及这两者之比, 我们称之为双比量. 双比量与  $\epsilon, \epsilon'$  关系为

$$|\eta_{+-} / \eta_{00}|^2 \approx 1 + 6 \operatorname{Re}(\epsilon' / \epsilon). \quad (8)$$

$\epsilon'$  的非零值将揭示在衰变幅度中的  $CP$  破坏, 这类  $CP$  破坏被称为直接  $CP$  破坏. 已知在标准模型中, 夸克之间的混合是通过 Cabibbo - Kobayashi - Maskawa(简称 CKM) 矩阵联系的. 在 CKM 矩阵中, 包含了一个相角因子, 此因子是产生  $CP$  破坏的原因. 标准模型预期  $\epsilon' / \epsilon$  不为零. 但是, 在  $CP$  破坏研究中另一个很有影响的超弱模型<sup>[5]</sup> 却明确预言  $\epsilon'$  为零, 也即  $CP$  破坏只发生在混合矩阵中. 因此精确确定  $\epsilon'$  是否为零意义重大,  $\epsilon'$  的精确测量也就成了  $\phi$  介子工厂的主要物理目标之一.

### 2.4 KLOE 实验的研究课题<sup>[6]</sup>

#### 2.4.1 双比 $|\eta_{+-} / \eta_{00}|^2$ 测量

关于这个量前面已有介绍. 不难估计, 若在 KLOE 探测器上记录了  $4 \times 10^6$  个  $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$  事例, 则对  $\epsilon' / \epsilon$  的测量精度可以达到  $10^{-4}$ . KLOE 在物理运行的开头几年即可达到这个目标.

$\epsilon' / \epsilon$  的测量是目前粒子物理实验的一大热点,  $\epsilon' / \epsilon$  是不是零原来是没有定论的, 虽然 CERN 的 NA31 组给出的结果  $\epsilon' / \epsilon = (23 \pm 7) \times 10^{-4}$ <sup>[7]</sup> 明显支持了直接  $CP$  破坏, 但美国费米实验室的 E731 给

出  $\epsilon'/\epsilon = (7.4 \pm 5.9) \times 10^{-4[8]}$ ,却又与  $\epsilon' = 0$  的设定接近.但是,1999年2月底费米实验室又公布了一个惊人的消息:KTeV组宣布了他们的结果: $\epsilon'/\epsilon = (28 \pm 4.1) \times 10^{-4}$ ,以7倍标准偏差的优势强烈支持了直接CP破坏,按照他们的说法,判处了超弱模型的“死刑”.尽管如此,有见地的物理学家要求大家更关注KLOE实验在这方面的结果,因为前面提到的几个  $\epsilon'/\epsilon$  的测量结果都是在固定靶实验上得到的.实验环境与条件与他们完全不同的KLOE实验无疑对他们是最好的检验.所以1999年4月开始物理运行的KLOE实验仅在这一点上就已成了大家注意的焦点.

### 2.4.2 通过对成对产生的 $K, \bar{K}$ 的相干测量开展CP和CPT对称性研究

考虑  $\phi \rightarrow KK \rightarrow f_1, t_1 + f_2, t_2$  过程.如图3所示,这里一个中性K介子在  $t_1$  时刻衰变到  $f_1$  态,另一个中性K介子在  $t_2$  时刻衰变到  $f_2$  态.衰变到  $f_1, f_2$  的强度作为  $\Delta t = t_1 - t_2$  的函数,在  $\Delta t > 0$  时为

$$I(f_1, f_2; \Delta t) = \frac{1}{2} |\langle f_1 | K_S \rangle \langle f_2 | K_S \rangle|^2 [|\eta|^2 \cdot e^{-\Gamma_L \Delta t} + |\eta|^2 e^{-\Gamma_S \Delta t} - 2|\eta||\eta| \cdot e^{-\Gamma \Delta t/2} \cos(\Delta m \Delta t + \phi_1 - \phi_2)], \quad (9)$$

式中  $\eta \equiv \langle f_i | K_L \rangle / \langle f_i | K_S \rangle$ ,  $\Gamma_L, \Gamma_S$  分别为  $K_L$  和  $K_S$  的宽度,  $\Gamma = \Gamma_S + \Gamma_L$ ,  $\Delta m = m_1 - m_2$ ; 对于  $\Delta t < 0$ , 也可得到类似的公式.式中的相干项对  $\Delta m$  幅度比  $\eta$  的数值以及  $f_1, f_2$  之间的相位差灵敏;总的衰变密度的分布同时也依赖于  $K_S$  和  $K_L$  的寿命.

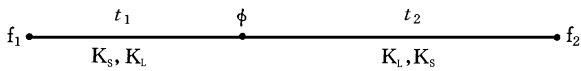


图3  $\phi \rightarrow KK \rightarrow f_1, t_1 + f_2, t_2$

(1) 若选  $f_1 = f_2$ , (9) 式中所有相位相消, 通过衰变密度谱可以测量  $\Gamma_S, \Gamma_L$  和  $\Delta m$ .

表3给出的数值表明, 当收集到  $4 \times 10^{10}$  个  $\phi$  介子时, 利用相干法测量  $\Delta m, \Gamma_S$  和  $\Gamma_L$ , 其测量精度有可能改善.

表3  $\Delta m, \Gamma_S$  和  $\Gamma_L$  测量精度

参量	测量精度 $\sigma$	
	目前	KLOE
$\Delta m$	$0.14 \times 10^8 \text{hs}$	$0.12 \times 10^8 \text{hs}$
$\Gamma_S$	$0.10 \times 10^8 \text{hs}$	$0.02 \times 10^8 \text{hs}$
$\Gamma_L$	$0.0015 \times 10^8 \text{hs}$	$0.0001 \times 10^8 \text{hs}$

(2) 选  $f_1 = \pi^+ \pi^-, f_2 = \pi^0 \pi^0$ , 我们在大时间差处可测量  $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$ , 而在  $|\Delta t| < 5 \tau_S$  处可测量  $\text{Im}(\epsilon'/\epsilon)$ . 图4展示了在这种选择下的相干模式.

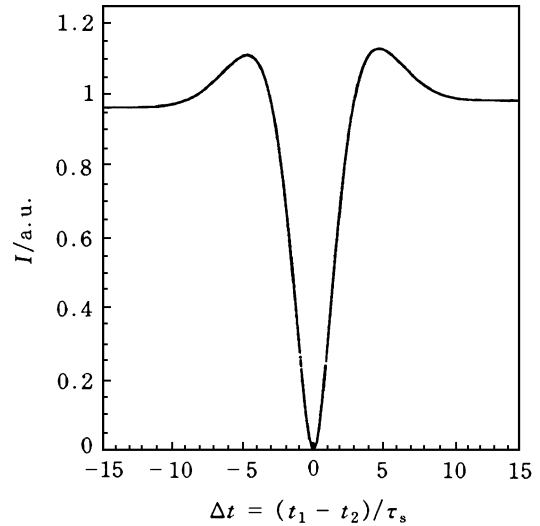


图4  $f_1 = \pi^+ \pi^-, f_2 = \pi^0 \pi^0$  的相干模式

(3) 取  $f_1 = \pi^+ l^- \bar{\nu}$  和  $f_2 = \pi^- l^+ \nu$ , 我们可以测量CPT破坏的参数  $\delta_K$ , 在大的时间差下, 可测量  $\delta_K$  的实部, 而在  $|\Delta t| \leq 10 \tau_S$  下细致测量, 可以得到  $\delta_K$  的虚部.

(4) 取  $f_1 = 2\pi, f_2 = K_L$  (指  $K \rightarrow \pi^+ l^+ \nu$  类型的衰变), 小时间差的衰变密度谱可以得出  $\Delta m, |\eta_{\pi\pi}|$  和  $\phi_{\pi\pi}$ , 大时间差的  $K_L$  半轻子衰变提供了T和CPT对称性的试验.

### 2.4.3 在DAΦNE上的其他CP破坏

迄今为止的CP破坏仅仅在  $K_L$  的  $2\pi$  衰变和半轻子衰变中观察到. DAΦNE上巨大的  $K_S$  和  $K^\pm$  源为KLOE探测器观察CP破坏提供了新的渠道.

#### (1) $K_S$ 衰变

$K_S \rightarrow 3\pi^0$  衰变以及  $K_S$  的  $l_3$  衰变的电荷不对称性(即  $K_S \rightarrow \pi^+ l^- \bar{\nu}$  和  $\pi^- l^+ \nu$  衰变率的不同)的观察将对CP破坏提供新的证据.

#### (2) $K^\pm$ 衰变

$K^\pm$  介子衰变可以提供有特色的CP破坏研究, 因为在  $K^+$  和  $K^-$  之间不存在质量混合. 设  $f$  为  $K^+$  的某一终态, 而  $\bar{f}$  为  $f$  的电荷共轭,  $A_f$  和  $A_{\bar{f}}$  分别表示  $K^+ \rightarrow f$  和  $K^- \rightarrow \bar{f}$  的弱衰变幅度, 则在这一道上的CP破坏可以通过  $|A_f|$  和  $|A_{\bar{f}}|$  之间的不对称性测量. 对于  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^+ \pi^-$  (常被记为  $\tau^\pm$ ) 和  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  (常被记为  $\tau'^\pm$ ) 衰变道, 目前的不对称的测量水平分别为  $(0.7 \pm 1.2) \times 10^{-3}$  和  $(0 \pm 6) \times 10^{-3}$ , 比理论估计  $10^{-8}$  差得多.

带电K介子辐射衰变率  $f(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \nu)$  和  $f(K^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \nu)$  的电荷不对称性也是直接CP破坏的证明. 目前的实验限为  $< 5 \times 10^{-2}$ , KLOE可达到

的灵敏度是  $1.4 \times 10^{-3}$ , 而理论预言  $\leq 10^{-3} \sin \delta$ , 这里  $\delta$  为 CKM 矩阵的相角.

#### 2.4.4 手征微扰理论<sup>[9]</sup>(chiral perturbation theory, CHPT) 检验

手征微扰理论是用来分析标准模型低能结构的系统方法, 特别是它可以用于决定由夸克流构成的格林函数(如介子的电磁形状因子或介子-介子散射幅度)的低能行为. 半轻子衰变的矩阵元也可以由夸克流关联子计算得到. KLOE 探测器上可以通过对这些预言的物理量的测量来检验手征微扰理论.

#### 2.4.5 $\phi$ 辐射衰变

在 DAΦNE 运行的初期, 束团数只能达到最大值的 1/4, 这时可以开展一些轻介子谱的研究以及稀有辐射衰变的测量.

##### (1) $\phi \rightarrow \eta' \gamma$

精密地测量  $\eta$ - $\eta'$  的混合与夸克模型和 QCD 有重要关系, 特别关系到  $\eta$  和  $\eta'$  函数中是否存在胶子成分的问题. 模拟研究表明, 在 KLOE 上测量  $\phi$  到  $\eta$  和  $\eta'$  的辐射衰变是可行的, DAΦNE 运行一年,  $\phi \rightarrow \eta' \gamma$  的分支比的测量精度可达  $10^{-6}$ .

##### (2) $\phi \rightarrow f_0 \gamma$

DAΦNE 上  $\phi$  介子的高产率使它成为在  $\phi$  的辐射衰变中研究  $f_0(975)$  的唯一机会, 即使该道分支比低至  $10^{-6}$ . 这个最轻的标量介子  $f_0(975)$  很少被当前的模型描述过.  $\phi \rightarrow f_0 \gamma$  道的探测将会对  $f_0$  态的性质研究提供崭新的信息.

##### (3) 稀有衰变测量

DAΦNE 提供了丰富的  $\phi, \rho, \eta$  和  $\eta'$  粒子源, 可以使这些粒子的稀有衰变测量达到一个新水平. 表 4 列出了在 DAΦNE 拟测量的稀有衰变.

表 4 DAΦNE 上稀有衰变分支比测量

衰变模式	目前精度	DAΦNE 可达精度
$\eta \rightarrow 3\gamma$	$< 5 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-8}$
$\eta \rightarrow \omega\gamma$	$< 5 \times 10^{-2}$	$10^{-9}$
$\phi \rightarrow \rho\gamma$	$< 2 \times 10^{-2}$	$10^{-9}$
$\phi \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$	$< 7 \times 10^{-3}$	$10^{-9}$
$\eta \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$	$< 4 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-8}$
$\eta \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$	$< 5 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-8}$

#### 2.4.6 从 $\phi$ 产生阈到 1.5 GeV 范围的 R 值测量

精密地测量直到 1.5 GeV 能区的  $e^+ e^- \rightarrow$  强子产生截面对  $\mu$  子反常磁矩  $a_\mu$  的计算是必须的. 为了观察弱相互作用对  $a_\mu$  的贡献(此贡献是很小的,  $a_\mu^{\text{weak}} = 19.5 \times 10^{-10}$ ),  $\sigma(e^+ e^- \rightarrow \text{强子})$  的测量精度要求达到  $\sim 0.5\%$ , 而这样的精度在 KLOE 探测器

上是可行的.

我们知道, 精确决定在  $\phi$  质量处的 K 形状因子可以测量  $\phi$  介子与  $\rho, \omega$  以及  $\bar{s}s$  更高的激发态介子的相干效应. 直到 1.5 GeV 能区的轻介子谱的研究仍是很有意义的, 例如可以寻找神秘的 1.1 GeV 共振<sup>[10]</sup>.

### 3 KLOE 探测器

前面提到, KLOE 是安置在 DAΦNE 的一个对撞点上用于粒子物理研究的通用型探测器. 该探测器由意大利、美国、德国、中国和俄国等国科学家参加建造. 根据预定的物理目标, KLOE 探测器的设计考虑了下列要求: 收集足够的数量; 精确测量  $K_S, K_L$  的衰变长度; 严格排除本底; 能用某些 K 介子衰变模式和巴巴散射对探测器的各部分进行自标定. KLOE 探测器尺寸的主要考虑因素是  $K_L$  的衰变长度( $\sim 3.44$  m), 为了尽可能记录到更多的  $K_L$  的衰变, KLOE 探测器的尺寸必然很大.

KLOE 是一个密封的近乎  $4\pi$  接收度的探测器, 图 5 给出了它的截面图. 这里我们从里向外简单地介绍它的各个部件.

束流管道在相互作用区做成半径为 10 cm、厚 0.5 mm 的铍材薄壳球状. 轻薄结构是为了减小带电产物的多次散射、电离能损以及压低  $K_S$  的再生. 中心漂移室(CTC)和 KLOE 实验中承担了带电终态

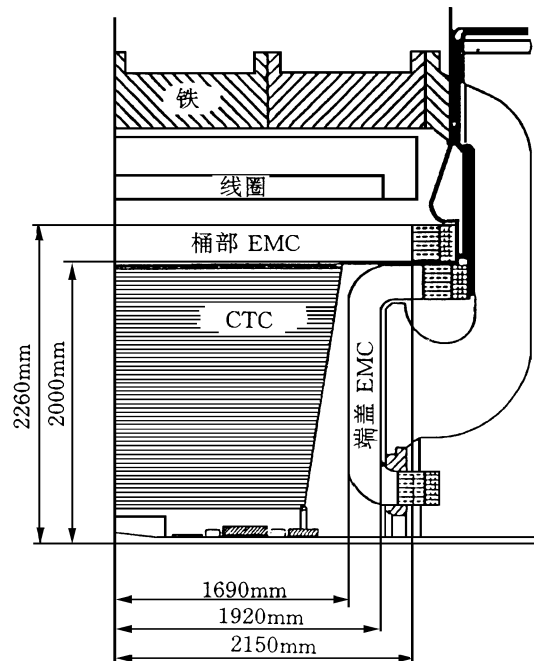


图 5 KLOE 探测器截面图

(下转第 168 页)