

ϕ 介子工厂和 CP 破坏的精密测量

童 国 梁

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

粒子工厂这个术语,现在对大家已经不陌生了,它是“高精度前沿”发展的产物. 在实验高能物理发展过程中,“高能量前沿”与“高精度前沿”是互补的发展方向,前者着眼于尽可能提高现有加速器相互作用能量,在新的能量尺度下寻找新粒子、探索新的相互作用规律;后者则是在选定的能区(例如 ϕ 共振态、 $\tau - J/\psi$ 共振态家族或 $b\bar{b}$ 共振态家族能区)上,以高于一般机器100倍左右的亮度,配备专门设计的探测器,集中地研究特定的粒子(共振态)和物理现象,以高精度、高统计的显著特点深入地研究相关的物理规律. 目前正在建造的粒子工厂有意大利 Frascati 的 ϕ 介子工厂以及分别在美国 SLAC 和日本 KEK 的 B 介子工厂. 本文就 ϕ 介子工厂及其研究目标作简单介绍.

一、DAΦNE - ϕ 介子工厂

1990年6月,意大利国家核物理研究所(INFN)批准建造一个总能量为1020MeV(ϕ 介子质量)的高亮度的 e^+e^- 对撞机. 对撞机定名为DAΦNE,这是Double Anular Φ - factory for Nice Experiment的缩写. 因为该机器运转时大量地产生 ϕ 介子,故人们常常把它称为 ϕ 介子工厂. DAΦNE的所有设备安置在当年曾在 J/ψ 研究中做出重要贡献的 e^+e^- 对撞机ADONE的实验厅内.

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

在 ϕ 共振态能区, $e^+e^- \rightarrow \phi$ 过程的截面约为 $5\mu\text{b}$,以机器最终目标亮度($10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)估计,每秒将有5000个 ϕ 介子产生,以一年取数时间为 10^7 秒计, ϕ 介子的年生产率高达 5×10^{10} !

ϕ 介子是矢量介子,它的量子数 $J^{PC} = 1^{--}$,

质量 $M = 1019.4\text{MeV}$,总宽度 $\Gamma = 4.41\text{MeV}$,轻子宽度 $\Gamma_{\text{le}} = 1.37\text{KeV}$. 在静夸克模型中, ϕ 是纯奇异夸克组合 $s\bar{s}$ (取理想混合假设),故在它的衰变中,包含K介子的衰变道占了绝大部分.

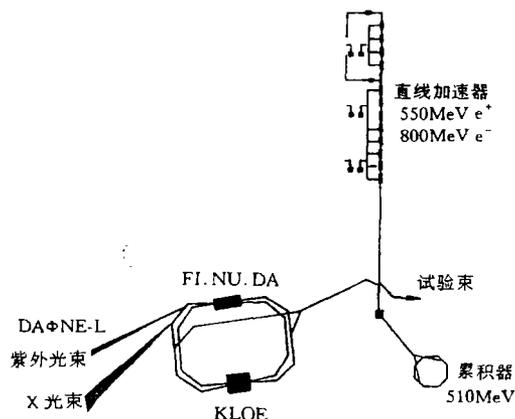


图1 DAΦNE机器的总体安排

DAΦNE上产生的 ϕ 介子在静止中衰变,终态K介子不仅成对产生,而且是背靠背(共线)飞行,所以观察到一个K介子则保证了具有确定方向和确定类型的另一个K介子的存在,也就是说,这里的K介子是可以被“标记”的. 表1列出了 ϕ 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

表1 ϕ 介子衰变

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

及短寿命和长寿命的中性 K 介子 K_S, K_L 的年生产率. 表上的年生产率显示了 DAΦNE 确实是中性 K 介子、带电 K 介子以及 ρ, η 和 η' 的“工厂”.

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. 下面的介绍仅限于 KLOE 实验.

二、KLOE 实验研究计划

ϕ 介子工厂提供极丰富的 K 介子源, 是开展 K 介子物理研究的极好场所. 自 1949 年 K 介子被发现以来, K 介子物理在基本相互作用研究中最丰富的知识源泉之一, 对此我们可以作一简单回顾: 由 K 介子的产生和衰变研究, Gell-Mann 引入了奇异数; 由 $\tau - \theta$ 之谜的研究, 李、杨提出了在弱相互作用中宇称不守恒的重要假设. 到了 60 年代, K 介子在强作用对称性分类以及 Cabbibo 理论中扮演了重要角色, 特别是 Christenson 观察到了 CP 不守恒; 70 年前后, 由味 (flavor) 改变中性流过程被压低的事实促使 Glashow 等引入存在“粲 (Charm)”的假设, 并最终导致把夸克和轻子的电弱相互作用统一起来.

1964 年, Christenson 等观察到了 CP 守恒所不容许的 $K_L \rightarrow \pi\pi$ 衰变, 揭示了存在一种在 CP 变换下不守恒的非常弱的相互作用, 这是物理学上的又一个革命性发现. 但是尽管这个著名实验已经过去了 30 多年, CP 破坏现象仍然没有完全弄清楚, 这就使得 K 介子的研究, 无论在理论上还是在实验上, 仍是高能物理界非常感兴趣的领域. 需要指出的是, 直至今日, 除 K_L 衰变外, 尚未发现任何其他 CP 破坏的证据.

CP 破坏既可发生于 $K^0 - \bar{K}^0$ 的混合, 也可发生在衰变幅度上. 在 CPT 守恒的假设下, 发生于混合的 CP 破坏可用一个单参数 ϵ 表示; K^0 和 \bar{K}^0 的 2π 弱衰变幅度之差发生在衰变顶点上, 由此造成的 CP 破坏由 ϵ' 表示, 称为直接 CP 破坏. 在实验上, ϵ 和 ϵ' 可通过 K_L, K_S 的 2π 衰变幅度比表示: K_L 和 K_S 衰变到带电 2π (即 $\pi^+\pi^-$) 的幅度比 $\eta_{+-} = \epsilon + \epsilon'$, 它们衰变到中性 2π (即 $\pi^0\pi^0$) 的幅度比 $\eta_{00} = \epsilon - 2\epsilon'$. ϵ' 的精确测量具有很大的理论意义. 在超弱模型下, CP 破坏仅

限于质量混合, 预期 $\epsilon' = 0$; 在标准模型下, CP 破坏完全由 CKM 矩阵中的相因子 δ 决定, 一级 CP 破坏发生在衰变幅度上, 二级 CP 破坏才发生在质量混合上, 由此得出 $\epsilon' \neq 0$ 的预言. 所以 ϵ' 是否为 0 是大家十分感兴趣的问题.

另一方面, DAΦNE 上的 K_L 和 K_S 在 ϕ 介子的衰变中同时产生, 若适当选择 K_L 和 K_S 的衰变道, 通过衰变强度的相干性测量可以对 CP 和 CPT 守恒作精密试验.

下面简单介绍 KLOE 上的主要实验安排.

1. 双比测量 R^\pm / R^0

在双比测量中, R^\pm 和 R^0 分别表示 K_L 与 K_S 带电和中性的 2π 衰变率之比. 因为 $R^\pm / R^0 \approx 1 + 6R_\epsilon(\epsilon' / \epsilon)$, 所以这是测量 ϵ' / ϵ 实部的经典方法. 利用已有的实验条件和参数可以估算出 DAΦNE 运行一年 ϵ' / ϵ 的测量精度可达 1×10^{-4} , 这是 KLOE 实验追求的主要目标之一.

2. 通过衰变强度的相干测量进行 CP 和 CPT 破坏试验

设过程 $\phi \rightarrow KK \rightarrow f_1, t_1 + f_2, t_2$, 其中一个中性 K 介子在 t_1 时刻衰变到 f_1 , 另一个中性 K 介子在 t_2 时刻衰变到 f_2 , 如图 2 所示. 这时 f_1, f_2 的衰变强度 I 不仅与中性 K 介子 K_L 和 K_S 的全宽度 Γ_L 和 Γ_S 有关, 也是时间差 $\Delta t = t_1 - t_2$ 的函数. I 中的相干项对 K_L 和 K_S 的质量差 $\Delta m = m_L - m_S, f_1$ 和 f_2 的相位差 $(\phi_1 - \phi_2)$ 以及 $K_L \rightarrow f_i$ 与 $K_S \rightarrow f_i (i = 1, 2)$ 幅度比 η_i 很灵敏. 适当选择衰变模式 f_1, f_2 , 通过衰变强度 I 谱的测量, 可实现对 CP 和 CPT 破坏的精密试验.

(1) 选择 $f_1 = f_2$. 这时 I 中的所有相位相消, 通过 I 的测量可以得出 Γ_S, Γ_L 和 Δm . 此法得



图 2 f_1, f_2 的相干衰变

到的 Γ_S 和 Γ_L 的测量精度可以提高 10 倍, Δm 的精度可以提高 2 倍.

(2) 选择 $f_1 = \pi^+\pi^-, f_2 = \pi^0\pi^0$. 在 I 随 Δt 变化的全谱的大 Δt 区域可测量 ϵ' / ϵ 的实部 $R_\epsilon(\epsilon' / \epsilon)$; 在 $|\Delta t| \leq 5\tau_S$ 的小 Δt 区域, 可测量 ϵ' / ϵ 的虚部 $I_m(\epsilon' / \epsilon)$.

(3) 选择 $f_1 = \pi^+ l^- \nu$ 和 $f_2 = \pi^- l^+ \nu$, 我们可以测量 CPT 破坏参数 δ_k .

(4) 选择 $f_1 = 2\pi, f_2 = K_B$ (即 $K \rightarrow \pi l \nu$). 在衰变强子谱的小 Δt 区域可得出 $\Delta m, |\eta_{\pi\pi}|$ 和 $\phi_{\pi\pi}$; 在大 Δt 区域 K_L 的半轻子衰变的不对称性提供了对 T 和 CPT 破坏的试验.

总之, 通过选择 f_1, f_2 衰变模式, KLOE 探测器可以测量描写中性 K 介子系统的 16 个独立参数.

3. KLOE 上其他 CP 破坏研究

以前 CP 破坏仅在 K_L 衰变 (2π 衰变及半轻子衰变) 中观察到. DAΦNE 上巨大的 K_S 和 K^{\pm} 源为 KLOE 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 $K_S \rightarrow \pi^+ l^- \nu$ 和 $K_S \rightarrow \pi^- l^+ \nu$ 衰变率差与衰变率之和之比) 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 $f = \pi^+ \pi^+ \pi^-$ 和 $\pi^+ \pi^0 \pi^0$ 衰变道, 目前的不对称性的测量水平分别为 $(0.7 \pm 1.2) \times 10^{-3}$ 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 $f(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma)$ 和 $f(K^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \gamma)$ 的电荷不对称性也是 CP 直接破坏的证明. 目前的实验限为 $< 5 \times 10^{-2}$, KLOE 的灵敏度是 1.4×10^{-3} , 理论预言 $\leq 10^{-3} \sin \delta$, 这里 δ 为 CKM 矩阵的相角.

4. 手征性微扰理论 (CHPT) 试验

在低能处, 也即非微扰 QCD 区, 目前还不能从严格的拉氏量对强子动力学作出预言. 80 年代, 为了解决低能问题发展了手征性微扰理论. 最低一级的 CHPT 对一些 K 介子衰变过程作了预言, 但与目前得到的测量值不符. KLOE 上可大大改进这方面的研究.

5. ϕ 辐射衰变研究

(1) $\phi \rightarrow \eta' \gamma$ 精密地测量 $\eta - \eta'$ 的混合与

夸克模型和 QCD 有重要的关系, 特别关系到 η 和 η' 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 ϕ 到 η 和 η' 的辐射衰变是可行的, 可以达到 10^{-6} 分支比的测量.

(2) $\phi \rightarrow f_0 \gamma$ DAΦNE 上 ϕ 介子的高产率使它成为在 ϕ 的辐射衰变中研究 $f_0(975)$ 的唯一机会, KLOE 上对该道分支比可测到 10^{-6} . $\phi \rightarrow f_0 \gamma$ 道的探测将为这个唯一的、最轻的标量介子态 f_0 的性质研究提供崭新的信息.

6. 从 ϕ 介子产生阈到 1.5 GeV 能区 $e^+e^- \rightarrow$ 强子截面的测量

精密地测量直到 1.5 GeV 的截面 $\sigma(e^+e^- \rightarrow$ 强子) 对 μ 子反常磁矩 a_μ 的计算是很必要的. 在强子对 a_μ 的贡献中, 由于真空极化和光子-光子散射过程造成了对 a_μ 的最大不定性. 为了减少这种不定性以达到所需要的程度, 需要把 $\sigma(e^+e^- \rightarrow$ 强子) 的测量精度提高到 0.5%, 而这在 KLOE 上是可以达到的.

7. 稀有衰变研究

DAΦNE 提供了丰富的 ϕ, ρ, η 和 η' 粒子源, 可使这些粒子的稀有衰变研究达到新的水平. 例如在 KLOE 上可以把 $\eta \rightarrow 3\gamma, \omega \gamma, \pi^0 e^+e^-$ 和 $\pi^0 \mu^+ \mu^-$ 衰变分支比的测量精度达到 10^{-8} 水平, 把 $\phi \rightarrow \rho \gamma, \pi^+ \pi^- \gamma$ 分支比的测量精度达到 10^{-9} 水平, 这将比现有测量精度提高 10^2 到 10^7 倍.

三、KLOE 探测器

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, 该实验由意大利、美国、中国和德国等国科学家参加. 根据预订的物理目标, KLOE 探测器的设计考虑到下列要求: 收集足够的数据量; 精确测量 K_S, K_L 的衰变长度; 严格排除本底; 能用各种 K 介子衰变模式和巴巴事例对探测器的各部分进行自标定. KLOE 探测器尺度的主要考虑因素是 K_L 的衰变长度 $L = \gamma \beta c \tau = 3.44 \text{m}$, 这就注定 KLOE 的尺寸不能太小.

KLOE 是一个密封的近乎 4π 接收度的探测器, 图 3 给出了它的截面图. 下面我们从里向外介绍这些设备.

1. 束流管道

束流管道在相互作用区做成半径为 10cm、厚为 0.5mm 的铍材薄壳球状。薄壳的选择是为了减小 K^+ 和中性 K 介子带电次级产物的多次散射和电离能损,同时也为了尽可能压低短寿命中性 K 介子的再生;选择 10cm 半径(约为 13—17 倍 K_S 的衰变长度)是为了保证 K_S 能在束流管道内全部衰变。

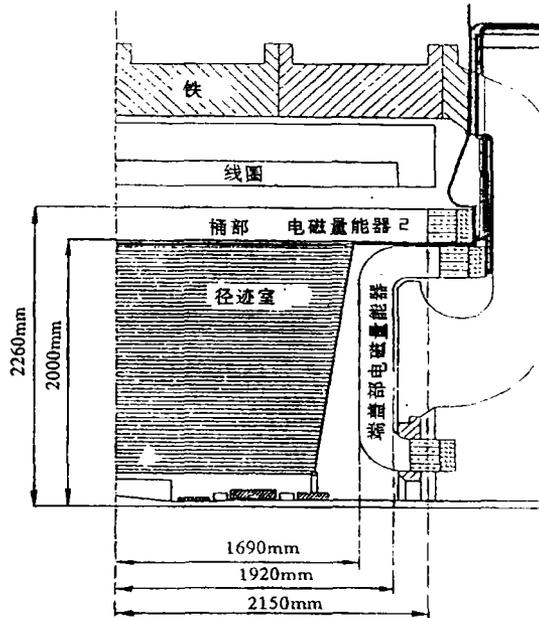


图3 KLOE探测器截面图

2. 中心径迹室 (CTC)

它是一个长 3.5m、直径 4m 的高效率圆柱形大漂移室,在 KLOE 实验中承担带电终态产物的探测和重建以及 K_L 带电衰变顶点位置的确定。CTC 采用氦基气体 (90% He+10% 异丁烷) 为工作气体。因为 K_L 的衰变顶点在离开对撞点距离上近乎均匀分布,CTC 采用 $3 \times 3\text{cm}^2$ 均匀的漂移单元。CTC 的室壁做得很薄,这样使从 π^0 衰变的光子有很好的透明性并到达电磁量能器。CTC 的端盖板做成球形,以保证在 50,000 根丝的张力下维持刚性。预期的单丝分辨 $\sigma_{\text{单丝}} \leq 500\mu\text{m}$, $\sigma_{\text{径迹}} = 1\text{--}2\text{mm}$, K_L 质量的重建分辨 $\sigma_M \sim 1\text{MeV}$ 。

3. 电磁量能器 (EmC)

重建动量为 $110\text{MeV}/c$ 的中性 K 介子的 π^0 衰变模式、确定它的衰变点并有效排除 $3\pi^0$ 衰变本底,这些是 EmC 的主要任务。而这些任务

使得 EmC 的设计成为一项最具挑战性的项目。KLOE 的 EmC 是高精细取样的铅-闪烁光纤量能器,信号(包括能量和粒子到达的时间)用光电倍增管读出。EmC 桶部内径 4m,厚 23cm;端盖部边厚 23cm,其两端都弯曲成 90° 以减小磁场对光电倍增管的影响。KLOE 的 EmC 的每个模块由直径 1mm 的蓝色闪烁光纤均匀地镶嵌在铅块中构成,光纤之间铅层厚 0.5mm。KLOE 实验在 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 衰变中确定 K_L 衰变长度的方法是非常特别的,它是通过时间测量实现的。如图 4 所示, I 是 ϕ 的衰变点, ID 是 K_L 的飞行方向,在 K_S 飞行的反方向上, A 点是被 EmC 探测到的光子转换(成电子对)点的位置。从图上显见,即使只探测到一个到达 EmC 的时间,就可决定 K_L 的衰变长度。之所以能这样做正是因为 K_L 和 K_S 在 ϕ 衰变中成对产生。EmC 中确定 K_L 衰变长度的精度可达 0.6cm。EmC 的能量分辨率 $\delta E/E = 5\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$;时间分辨 $\delta t = 66\text{ps} / \sqrt{E(\text{GeV})}$ 。

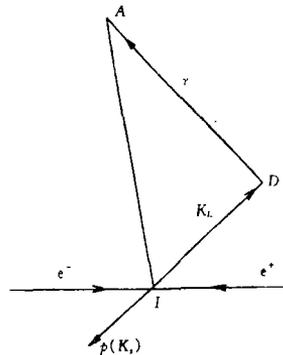


图4 K_L 衰变长度的测量

4. 磁体

在 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 信号样本中排除本底的要领是必须能够精确测量 $155\text{--}268\text{MeV}/c$ 区间的动量。运动学重迭与磁场强度三次方成反比,但是也不能把磁场强度提得太高,因为磁场强度太高不仅会损失触发效率,而且还会使径迹顶点的定位精度变差。KLOE 采用 6KG 场强的超导磁体,这样既保留了很强的本底排除,而又不损害其他的探测性能。

四、结束语

DAΦNE 以其高亮度、高产率成为 ϕ 介子、 K

用中子检查隐藏爆炸物的物理学原理

仇九子

(中国人民武装警察部队学院 廊坊 065000)



由隐藏爆炸物引发的空难事件会给人民的生命财产造成惨重的损失。为避免炸机事件就必须在行李箱进入飞机前把隐藏在其中的炸药检查出来。然而,由于大多数炸药与日常物品的组成元素(主要是C、H、O、N)相同,密度又与大多数日常塑料制品相近,再加上塑性炸药可捏成任意形状,使X射线检查难以辨认;有些炸药挥发性极弱,使气体探测器亦无能为力。因此,给自动检查带来了严重困难。

随着核检测技术的不断发展,利用中子检查隐藏爆炸物已成为最有效的方法。中子具有极强的穿透力,可穿过行李箱和箱内物品,直接与炸药中的原子核发生作用,使之发射特征 γ 射线。利用 γ 射线探测系统通过对特征 γ 射线的探测和分析,就可以确定炸药的存在。

早在70年代末,国外就开始了这方面的研究,经过十几年的探索,在炸药探测方面已取得了一定的进展,共提出了五种利用中子检查爆炸物的方案。根据这些方案,在美国和法国已研制出了部分样机,并投入试用。近年来,我国也已开始了这方面的研究工作。本文将主要介绍这五种检爆方案的基本原理。

一、热中子分析法

由于炸药含氮量(单位体积中的氮原子数)通常不同于一般日用物品,因此,通过测量行李箱中物品的氮含量,就可以识别爆炸物。

热中子与氮原子核相互作用,可被氮原子核俘获,其反应式为



介子以及 ρ 、 η 和 η' 介子的“工厂”,以K介子系统的CP、CPT对称性研究为主要物理目标的KLOE实验将以显著的优势开展许多有意义的物理课题研究,并把CP破坏的测量提高到一个新水平。按原定计划,DAΦNE将于1998年正式运行。近

该反应辐射的特征 γ 射线能量很高,易于探测。

在一定强度的热

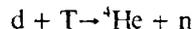
中子照射下,出射的这种特征 γ 射线的强度与物品中氮含量成正比。所以,通过探测这种特征 γ 射线的强度就可以确定物品中氮含量,从而识别爆炸物。

根据这一原理,美国于1987年研制成功了用于探测爆炸物的样机,并在洛杉矶和旧金山国际机场中投入试用。试用结果表明,若以美国联邦航空局规定的最小探测炸药量的探测率为100%,则误报率为(18—20)%;若将探测率降到90%,误报率约为2%;平均探测效率为(90—96)%,误报率为(3—8)%。另外,法国也已研制出了这种样机,并投入试用。

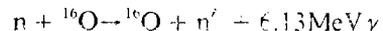
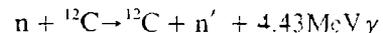
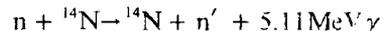
热中子分析法比较简单,易于实现。但含氮量高的并不一定是炸药,有许多物品的含氮量接近于炸药。所以,仅凭含氮量的高低来判断是否存在炸药,难免会出现误判。

二、快中子分析法

由氘氚反应



产生的14MeV的快中子与氮、碳、氧三种元素作用都可发生非弹性散射(与氢不发生该反应)。其反应式分别为:



年来,中国科学家已为KLOE探测器的建造做了许多工作,现在他们正积极准备,迎接实验的取数和分析任务,与合作组中的各国科学家一道,争取为实现KLOE实验的目标多做贡献。