

# TELESIS 在 $\phi \rightarrow 3\gamma$ 衰变末态分析中的运用\*

许国发 童国梁 黄秀萍 吕峰 俞国威

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 介绍了  $\phi$  介子工厂 (DAΦNE) KLOE 组的数据分析中运动学拟合程序 TELESIS 的运用. 利用 KLOE 2000 年在  $e^+e^-$  对撞能量  $E_{cm} = 1020\text{MeV}$  获取的部分数据开展  $\phi \rightarrow \gamma\eta \rightarrow 3\gamma$  和  $\phi \rightarrow \gamma\pi^0 \rightarrow 3\gamma$  的分析, 得到  $\phi$  介子的产生截面  $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi} = (4.04 \pm 0.04 \pm 0.24)\mu\text{b}$ , 以及  $\phi \rightarrow \gamma\pi^0 \rightarrow 3\gamma$  的分截面  $\sigma_{\phi \rightarrow \gamma\pi^0 \rightarrow 3\gamma} = (5.3 \pm 0.3 \pm 0.6)\text{nb}$ . 这些结果与理论预言以及俄国新西伯利亚的 VEPP (CMD-2, SND, ND 各探测器) 的相应结果一致.

**关键词** TELESIS 运动学拟合  $\phi$  辐射衰变 截面

## 1 引言

意大利高亮度正负电子对撞机——DAΦNE (Double Annular Φ—factory for Nice Experiment) 的能量优化在  $\phi$  介子能区 (1020MeV), KLOE 是其中一个对撞点上的探测器<sup>[1]</sup>, 其侧视剖面图如图 1 所示, 它主要由漂移室 (DC 或 CTC) 和电磁量能器 (EMC) 组成, 为了提高探测器的接收度, 在小角度范围内有一个称作 QCAL 的量能器. 漂移室主要用来探测带电粒子, 动量分辨为  $\sigma_p/p \sim 0.5\%$ ; 电磁量能器主要探测光子和正负电子, 其位置、能量、时间分辨分别为  $\sigma_x \approx 10\text{cm}$ ,  $\sigma_E/E \approx 5\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$ ,  $\sigma_t \approx 70\text{ps} / \sqrt{E(\text{GeV})}$ , KLOE 探测器的设计优化于光子的探测.

对  $\phi$  辐射衰变的研究尤其是对纯中性末态的研究是非常有意义的. 通过此研究可以检验手征微扰理论在反常及非反常因子上的近似<sup>[2]</sup>. 很多模型都试图描述  $e^+e^-$  对撞后的介子辐射衰变以及强子化过程<sup>[3-7]</sup>, 但由于迄今为止的  $e^+e^-$  对撞机在低能区的低统计量, 均不能明确地确定这些模型的参数或区分不同的模型.

本文将 TELESIS 方法引入 KLOE 的数据分析之中<sup>[8]</sup>. 此运动学拟合方法最早来源于 MARK3, 北京谱仪 (BES) 对其作了进一步的发展. 以  $\phi \rightarrow \gamma\eta \rightarrow 3\gamma$  的分析为例, 表 1 列出了 KLOE 原先所用运动学拟合方法和 TELESIS 方法的主要异同点, 可见 TELESIS 方法更为简单、快捷.

2001-05-09 收稿

\* 国家自然科学基金资助

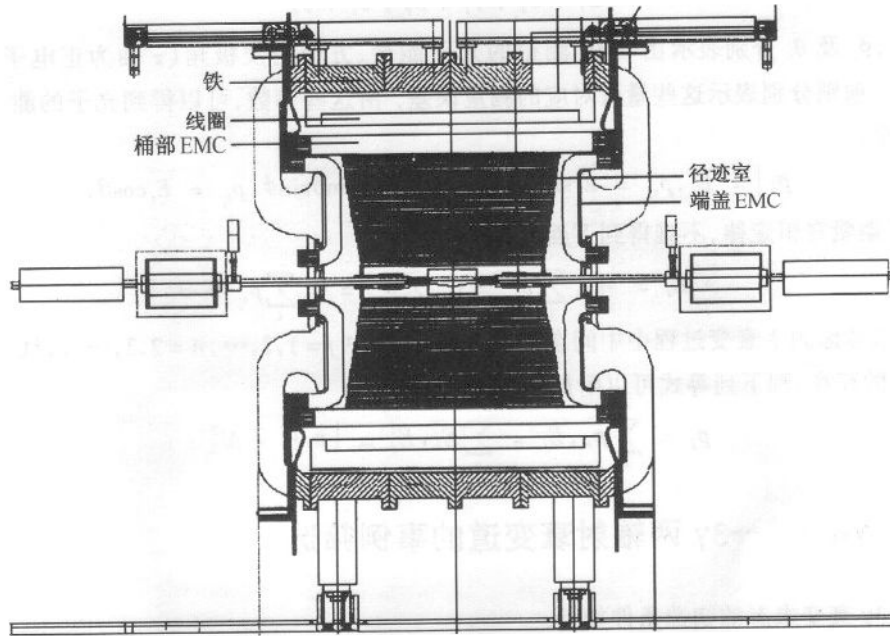


图 1 KLOE 探测器的平面示意图

表 1 KLOE 原先所用运动学拟合方法和 TELESIS 方法的比较

| KLOE                                  |       | TELESIS                                |      |
|---------------------------------------|-------|--|------|
| 拟合参数:20(个)                            |       | 拟合参数:9(个)                              |      |
| $(E_i \pm \sigma_{E_i})/\text{MeV}$   | 15(个) | $(E_i \pm \sigma_{E_i})/\text{MeV}$    | 9(个) |
| $(x_i \pm \sigma_{x_i})/\text{cm}$    |       | $\theta_i \pm \sigma_{\theta_i}$ (方位角) |      |
| $(y_i \pm \sigma_{y_i})/\text{cm}$    |       | $\Phi_i \pm \sigma_{\Phi_i}$ (极角)      |      |
| $(z_i \pm \sigma_{z_i})/\text{cm}$    |       |  |      |
| $t_i \pm \sigma_{t_i}$ ns             |       |  |      |
| $\phi$ 顶点:                            | 3(个)  |  |      |
| $V_x = 0.0 \pm 0.2(\text{cm})$        |       |  |      |
| $V_y = 0.000 \pm 0.002(\text{cm})$    |       |  |      |
| $V_z = 0.0 \pm 2.0(\text{cm})$        |       |  |      |
| 束流能量:                                 | 2(个)  |  |      |
| $E_{e^+} = 510.0 \pm 0.7(\text{MeV})$ |       |  |      |
| $E_{e^-} = 510.0 \pm 0.7(\text{MeV})$ |       |  |      |
| 约束条件:8(个)                             |       | 约束条件:5(个)                              |      |
| $t_i - L_i/c = 0$                     | 3(个)  |  |      |
| 能、动量守恒                                | 4(个)  | 能、动量守恒                                 | 4(个) |
| $M_{\gamma\gamma} = M_{\eta}$         | 1(个)  | $M_{\gamma\gamma} = M_{\eta}$          | 1(个) |

对每个末态粒子,TELESIS 都要对下面的参数(能量及角度)进行拟合(这里只考虑  $\phi$  的纯中性衰变道):

$$E_i \pm \sigma_{E_i}, \phi_i \pm \sigma_{\phi_i}, \theta_i \pm \sigma_{\theta_i} \quad (1)$$

这里  $E_i, \phi_i$  及  $\theta_i$  分别表示由 EMC 测得的光子能量、方位角及极角 ( $z$  轴为正电子束流方向), 后一项则分别表示这些量所对应的测量误差. 由这些参数, 可以得到光子的能、动量之间的关系:

$$|\mathbf{p}_i| = E_i, p_{x_i} = E_i \sin\theta \cos\phi, p_{y_i} = E_i \sin\theta \sin\phi, p_{z_i} = E_i \cos\theta. \quad (2)$$

根据能、动量守恒定律, 不难得到下面的表达式:

$$\sum_i E_i = M_X, \sum_i p_{x_i} = 0, \sum_i p_{y_i} = 0, \sum_i p_{z_i} = 0. \quad (3)$$

如果考虑到  $\phi$  衰变过程中中间态  $X_j (X_j \rightarrow n\gamma)$ , 其中  $j = 1, 2, \dots, n = 2, 3, \dots, i$ , 且  $k = 1, 2, 3, \dots, i$  的存在, 则下列等式可以附加到表达式(3)中:

$$\mathbf{p}_j = \sum_n \mathbf{p}_k, E_j = \sum_n E_k, E_j^2 = |\mathbf{p}_j|^2 + M_{X_j}^2 \quad (4)$$

## 2 $\phi \rightarrow \gamma\eta, \gamma\pi^0 \rightarrow 3\gamma$ 两辐射衰变道的事例筛选

$\phi \rightarrow 3\gamma$  衰变末态的初选条件如下:

首先要求漂移室没有探测到带电径迹 ( $N_{ch} = 0$ ), 接下来是对“好”光子的选择, 满足下面两个条件的光子, 被认为是“好”光子. 一个是时间窗口 (TW) 的选择, 即  $|t - L/c| < 5\sigma_t$  (其中  $t$  和  $L$  分别是重建后光子在 EMC 中的时间和相互作用点至 EMC 击中点之间的长度;  $c$  代表光速;  $\sigma_t$  是时间分辨), 这是一个较松的选择条件; 另一个是与探测器接收度有关的选择, 由于没有用 QCAL 的信息, 因此只选择满足极角在 EMC 有效探测区  $21^\circ < \theta < 159^\circ$  范围内的径迹.

经上面的选择后, 考虑到噪声光子的存在, 要求每个事例中的“好”光子数不能少于 3 个. 最后对每个事例中所有 3 个“好”光子的组合做运动学拟合, 并选择  $\chi^2$  最小的一组作为所需要的三光子末态事例而留作下面的进一步分析. 本工作分析了 KLOE 探测器 2000 年 11 月收集的部分数据 (积分亮度为  $\int \mathcal{L} dt \approx 1.27 \text{pb}^{-1}$ ), 其积分亮度由大角度 Bhabha 事例估计而得.

在 TELESIS 方法中有专门的程序 (squirrel) 以检验拟合结果. 如果所拟合参数的 PULL 分布是平均值接近于 0.0 且标准偏差接近于 1.0 的高斯分布, 则认为拟合结果较为理想, 否则还要对误差矩阵做进一步的修正. 图 2 分别给出了所选出的  $\phi \rightarrow 3\gamma$  事例的运动学拟合的  $\chi_{ac}^2$  分布以及能量、 $\theta$  角、 $\phi$  角的 PULL 分布, 其中极角  $\theta$  的 PULL 分布的标准差  $\sigma_\theta \approx 1.5$ , 与理想的 PULL 分布差别较大. 这是由于现在只有能量小于 200.0 MeV 光子的极角分辨数据, 而能量大于 200.0 MeV 光子的极角分辨值是由 0.0—200.0 MeV 的数据外推而得的, 等有了进一步的实验数据后, 相信 PULL 分布会有很大的改善.

### 2.1 $\phi \rightarrow \gamma\eta \rightarrow \gamma\gamma\gamma$

#### 2.1.1 事例筛选

由于此过程含有一个中间态  $\eta$ , 将  $\eta$  质量的约束加入到运动学拟合之中, 称其为“5C 拟

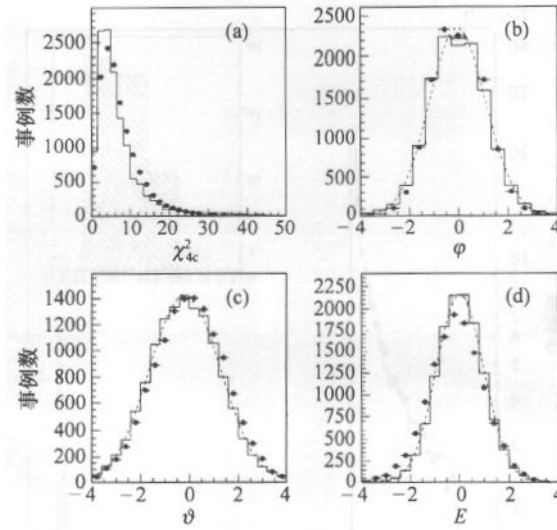


图 2 运动学拟合后的  $\chi^2_{4c}$  分布和 PULL 分布  
 (a) 为  $\chi^2_{4c}$  分布; (b), (c), (d) 分别为  $\phi, \theta$  角和能量的 PULL 分布.  
 ● 数据, — MC, …… 高斯分布.

合”.

$\phi \rightarrow \pi^0 \gamma \rightarrow 3\gamma$  (它的分支比约为  $Br(\phi \rightarrow \eta \gamma \rightarrow 3\gamma)$  的 1/4) 和  $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma \gamma$  是本小节所研究的  $\phi \rightarrow \eta \gamma \rightarrow 3\gamma$  过程的主要本底.

从图 3 可以看出, 位于图两端 ( $|\Delta E_{\gamma_{1,2}}| = |E_{\gamma_1} - E_{\gamma_2}| > 323.0 \text{ MeV}$ , 这里  $E_{\gamma_1}$  和  $E_{\gamma_2}$  分别代表来源于中间态  $\eta$  的两个光子的能量) 的两个峰主要是  $\phi \rightarrow \gamma \pi^0 \rightarrow 3\gamma$  本底造成的. 因而可以通过  $|\Delta E_{\gamma_{1,2}}| < 323.0 \text{ MeV}$  条件有效地排除  $\phi \rightarrow \gamma \pi^0 \rightarrow 3\gamma$  本底. 而另外一个非常有用的选择条件是  $\cos \theta_{1,2} < 0.0$  ( $\theta_{1,2}$  是末态三光子中来自中间态  $\eta$  的两光子夹角). 图 4 显示来源于  $\phi \rightarrow \gamma \eta \rightarrow 3\gamma$  和  $\phi \rightarrow \gamma \pi^0 \rightarrow 3\gamma$  的  $\theta_{1,2}$  分别分布于小于  $-0.3$  和大于  $0.8$  的范围内, 因而此选择条件也能很好地排除  $\phi \rightarrow \gamma \pi^0 \rightarrow 3\gamma$  本底.

$\phi \rightarrow \gamma \eta \rightarrow 3\gamma$  过程中的辐射光子与中间态  $\eta$  之间夹角的选择 ( $\cos \theta_{\eta\gamma_3} \leq -0.998$  或  $\theta_{\eta\gamma_3} \geq 176.4^\circ$ ), 可以排除部分  $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma \gamma$  本底.

对每个事例中末态光子能量之和的选择 ( $\sum_i E_{\gamma_i} \geq 800.0 \text{ MeV}$ ) 可以排除可能来自于  $\phi \rightarrow K_s^0 K_l^0$  及  $\phi$  的其它辐射衰变等本底道 (在这些本底道中, 带电粒子没被探测器探测到, 因而只剩下可探测的中性粒子的) 污染.

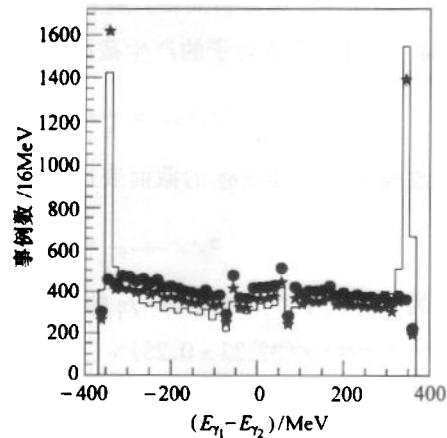


图 3 中间态  $\eta$  衰变出的两个光子能量之差的分布  
 — 数据, ● MC( $\gamma\eta$ ), ★ MC( $\gamma\pi^0$ ).

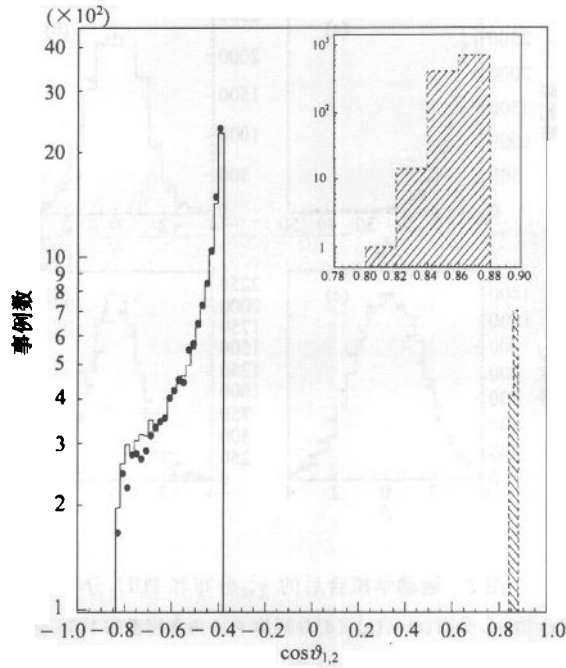


图 4 末态三光子中来自中间态  $\eta$  的两光子夹角  
 —— 数据,  $\bullet$  MC( $\eta$ ),  $\cdots \cdots$  MC( $\pi^0$ ).

2.1.2 结果及与 KLOE 的比较

经运动学拟合后的  $\chi^2$  判选及上面所提到的其它选择条件后, 总共有 13023 个  $\phi \rightarrow \eta\gamma \rightarrow 3\gamma$  的候选者被挑选出来.

本分析的选择效率由对建立在 GEANFI 软件包<sup>[9]</sup> 基础上的产生子及经过全探测器模拟的 Monte Carlo 数据分析而得. 最后总效率  $\epsilon_{\eta\gamma}$  为  $(65.5 \pm 0.4)\%$ .

$e^+e^-$  对撞中  $\phi$  介子的产生截面可以表达为

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi} = \frac{N_{\phi \rightarrow \eta\gamma \rightarrow 3\gamma}^{\text{exp}}}{\epsilon_{\eta\gamma} \cdot \mathcal{L} \cdot (1 + \delta)} \cdot \frac{1}{Br(\phi \rightarrow \eta\gamma \rightarrow 3\gamma)}, \quad (5)$$

或将过程  $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \eta\gamma$  的截面表达为

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \eta\gamma} = \frac{N_{\phi \rightarrow \eta\gamma \rightarrow 3\gamma}^{\text{exp}}}{\epsilon_{\eta\gamma} \cdot \mathcal{L} \cdot (1 + \delta)} \cdot \frac{1}{Br(\eta \rightarrow \gamma\gamma)},$$

上面的表达式中  $\delta$  是过程  $\phi \rightarrow \eta\gamma$  的辐射修正;  $\mathcal{L}$  是本分析所用数据的率;  $Br(\eta \rightarrow \gamma\gamma) = (39.33 \pm 0.25)\%$  (PDG2000), 且  $Br(\phi \rightarrow \eta\gamma \rightarrow 3\gamma)$  的值可以利用 PDG2000 的数据得出:

$$Br(\phi \rightarrow \eta\gamma \rightarrow 3\gamma) = (5.10 \pm 0.13) \times 10^{-3}.$$

从表达式(5)或(6)可以给出  $\phi$  介子产生截面的系统误差表达式

$$\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma}\right)^2 = \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\mathcal{L}}{\mathcal{L}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Br}{Br}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon}\right)^2 \quad (7)$$

其中,事例数  $N$  的系统误差主要是选择条件所带来的误差(当选择条件作小量变化时,引起选择事例数及选择效率的变化,以此便可得到表达式(7)右边的第一项);亮度  $\mathcal{L}$  的误差由实验中亮度的计算方法给出<sup>[10]</sup>,而分支比的误差来源于 PDG 所给的数据;最后一项选择效率的系统误差由不同的 Monte Carlo 产生子(GEANFI, BABAYAGA)估计而得. 最后得到表达式(5)或(6)的系统误差分别为 6.1% 和 5.6%. 由表达式(5)和(7)计算得到的  $\phi$  介子产生截面列于表 2 中. 表 2 同时列出了其它实验结果及理论预言值<sup>[12,13]</sup>(此结果运用了 PDG2000 的数据). 由于 KLOE 和 CMD-2 给出的是未做辐射修正(即  $\delta = 0.0$ )的结果,作为比较也将未修正的值列于表 2 中. 而辐射修正  $(1 + \delta) = 0.76$  是文献[14]详细的计算结果. 综合以上结果可见本文与其它实验结果及理论预言值基本一致.

表 2  $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi}$  的实验结果及理论预言值

| $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi}/\mu\text{b}$       | $(1 + \delta)$ | 实验或理论                | $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi}/\mu\text{b}$       | $(1 + \delta)$ | 实验或理论                    |
|--|----------------|----------------------|--|----------------|--------------------------|
| $3.07 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.19(\text{syst.})$ | 1.00           | 本工作                  | $4.04 \pm 0.04(\text{stat.}) \pm 0.25(\text{syst.})$ | 0.76           | 本工作                      |
| $3.19 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.26(\text{syst.})$ | 1.00           | KLOE <sup>[11]</sup> | $4.11 \pm 0.10$                                      |                | Theo. <sup>[12,13]</sup> |
| $3.114 \pm 0.034 \pm 0.048$                          | 1.00           | CMD-2                |  |                |                          |

而由表达式(6)和(7)可以估算出  $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \gamma\eta$  过程的截面. 表 3 列出了本工作和其它实验的测量结果.

表 3  $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \gamma\eta}$  的实验测量结果

| $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \gamma\eta}/\text{nb}$ | 实验室                  | $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \gamma\eta}/\text{nb}$ | 实验室                 |
|---|----------------------|---|---------------------|
| $52.4 \pm 0.5(\text{stat.}) \pm 2.9(\text{syst.})$                  | 本工作                  | $53.2 \pm 1.2(\text{stat.}) \pm 1.6(\text{syst.})$                  | SND <sup>[15]</sup> |
| $52.4 \pm 0.4(\text{stat.}) \pm 3.8(\text{syst.})$                  | KLOE <sup>[11]</sup> |   |                     |

## 2.2 $\phi \rightarrow \gamma\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma\gamma$

### 2.2.1 事例筛选

此  $\phi$  的辐射衰变过程的末态有 3 个光子,其主要本底道为  $\phi \rightarrow \gamma\eta \rightarrow \gamma\gamma\gamma$ (信号/本底  $\sim 1/4$ ) 和  $e^+e^- \rightarrow 3\gamma$ (此过程在  $\phi$  介子峰值附近的截面可以由 QED 估计出  $\sigma_{\text{sim}} = (2.01 \pm 0.05) \text{nb}$ <sup>[16]</sup>). 由这些截面的大小不难看出,由于本底的截面相当大(相对于信号道),在确定选择条件时,一定要仔细认真以尽可能多的排除本底、保留信号. 考虑到在过程  $\phi \rightarrow \pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma$  中有中间态  $\pi^0$  的存在,将  $\pi^0$  质量这个约束条件放入运动学拟合(5C-fit)中. 事例筛选时对  $\chi^2$  做了如下的要求:

$$\chi_{4c}^2 \leq 20.0 \text{ 和 } \chi_{5c}^2 \leq 10.0.$$

图 5 是中间态  $\pi^0$  衰变出的光子能量分布. 比较实验数据和 MC 数据不难看出能量 ( $E_{\gamma_{1,2}}$ ) 大于 450MeV 或小于 50MeV 的光子大多来源于  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma\gamma$  的本底道;而能量介于 110MeV 和 200MeV 或介于 340MeV 和 420MeV 之间的光子大多来源于  $\phi \rightarrow \gamma\eta \rightarrow 3\gamma$  本底道. 由于  $\pi^0$  衰变成一对光子,所以如果一个光子的能量较高,则另一光子的能量应较低,也就是说,能量为 110—200MeV 的光子和能量为 340—420MeV 的光子是成对出现的,因而这里只要求  $E_{\gamma_{1,2}} \leq 340\text{MeV}$  便可以排除本底.

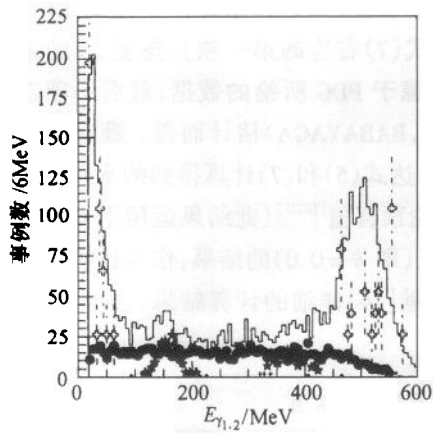


图 5  $\pi^0$  衰变出的光子能量分布  
— 数据, ● MC, ★ MC( $\gamma\eta$  本底),  
÷ MC( $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  本底).

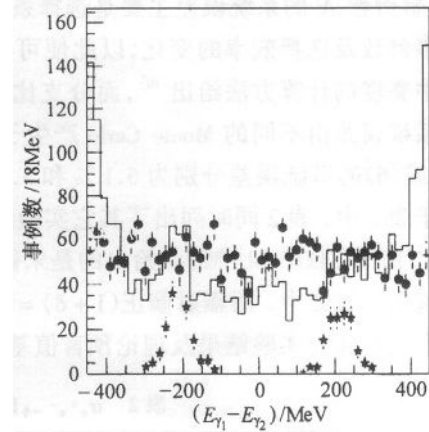


图 6  $\pi^0$  衰变出的两光子能量之差  
— 数据, ● MC, ★ MC( $\gamma\eta$  本底).

如图 6 所示,  $\phi \rightarrow \gamma\eta \rightarrow 3\gamma$  的本底都落在  $120.0 \leq |\Delta E_{\gamma_{1,2}}| \leq 280.0 \text{ MeV}$  区间内(其中  $\Delta E_{\gamma_{1,2}}$  为  $\pi^0$  衰变出的两光子能量之差), 因而可以通过限制  $|\Delta E_{\gamma_{1,2}}| < 120.0 \text{ MeV}$  或  $|\Delta E_{\gamma_{1,2}}| > 280.0 \text{ MeV}$  便可有效地排除该本底.

本分析过程的选择效率由 MC 产生的  $\phi \rightarrow \gamma\pi^0 \rightarrow 3\gamma$  衰变模式的数据估计而得, 最终效率为  $(8.4 \pm 0.3)\%$ .

由表达式(5)以及与其相似的与  $\phi \rightarrow \gamma\pi^0 \rightarrow 3\gamma$  过程有关的  $\phi$  的产生截面的表达式可以推算出这两过程的分支比之比

$$\mathcal{R} = \frac{Br(\phi \rightarrow \eta\gamma \rightarrow 3\gamma)}{Br(\phi \rightarrow \pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma)} = \frac{N_{\phi \rightarrow \eta\gamma \rightarrow 3\gamma}^{\text{exp}}}{\epsilon_{\eta\gamma}} \cdot \frac{\epsilon_{\pi^0\gamma}}{N_{\phi \rightarrow \pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma}^{\text{exp}}}, \quad (8)$$

式中  $\epsilon_{\eta\gamma}$  和  $\epsilon_{\pi^0\gamma}$  分别为  $\phi \rightarrow \eta\gamma \rightarrow 3\gamma$  和  $\phi \rightarrow \pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma$  过程的选择效率;  $N_{\phi \rightarrow \eta\gamma \rightarrow 3\gamma}^{\text{exp}}$  和  $N_{\phi \rightarrow \pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma}^{\text{exp}}$  分别是事例筛选后最终获得的上面两个  $\phi$  的辐射衰变道的事例数.

### 2.2.2 结果与比较

经上面的筛选后, 共获得 433 个  $\phi \rightarrow \pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma$  过程的候选者. 利用 MC 对  $\phi \rightarrow \pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma$ ,  $\phi \rightarrow \eta\gamma \rightarrow 3\gamma$  及  $e^+e^- \rightarrow 3\gamma$  三过程的模拟, 发现在这些候选者中信号与本底的比例为

$$\frac{N_s}{N_b} = \frac{441}{1},$$

可见, 上面的选择条件能够较好地排除本底.

由表达式(8)可以估算出两过程的分支比之比

$$\mathcal{R} \approx 3.9 \pm 0.2(\text{stat.}) \pm 0.4(\text{syst}).$$

运用上一节的结果(表 3), 过程  $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma$  的截面可以由下面的表达式推算出:

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma} = \frac{\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \eta\gamma} \cdot Br(\eta \rightarrow 2\gamma)}{\mathcal{R}} \quad (9)$$

另一方面,此截面也可以由理论估算出<sup>[17]</sup>

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^0 \gamma \rightarrow 3\gamma} = \frac{12\pi \Gamma_{\phi \rightarrow e^+e^-} \Gamma_{\phi \rightarrow \pi^0 \gamma}}{m_\phi^2 \Gamma_\phi^2} \quad (10)$$

最后,将本文的结果、其它实验室的结果以及理论预言值列于表4中,可见这些结果能够比较好地吻合.

表4  $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^0 \gamma \rightarrow 3\gamma}$  的比较

| $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^0 \gamma \rightarrow 3\gamma}/\text{nb}$ | 实验或理论               | $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^0 \gamma \rightarrow 3\gamma}/\text{nb}$ | 实验或理论                |
|---|---------------------|---|----------------------|
| $5.3 \pm 0.3(\text{stat.}) \pm 0.6(\text{syst.})$   | 本工作                 | $5.6 \pm 0.5 \pm 0.3$   | ND <sup>[18]</sup>   |
| $5.12 \pm 0.15^{+0.38}_{-0.35}$   | SND <sup>[17]</sup> | $5.82^{+0.27}_{-0.82}$  | 理论预言 <sup>[17]</sup> |

### 3 结论

TELESIS 已成功地移植于 KLOE 实验的数据分析中. TELESIS 方法与 KLOE 原先所用的运动学拟合方法相比,优点是拟合参数少、所需约束条件少. 由上面的结果可以看出,用 TELESIS 分析方法得到的结果与 KLOE 实验给出的结果以及和理论的预言一致.

KLOE 合作组成员与作者的多次有益讨论,给予了作者极大的帮助;感谢 DAΦNE 及 KLOE 为本文的实验研究提供数据;感谢意大利核物理研究院(INFN)的 Frascati 国家实验室(LNF)提供计算机环境.

### 参考文献 (References)

- Dell'Agnello S. The KLOE Detector. In: Bianco S et al. *Physics and Detectors for DAΦNE*. Frascati: SIS-Ufficio Pubblicazioni, 1999. 381—391; TONG Guo-Liang. *Physics*, 2000, **29**(3):169—173(in Chinese)  
(童国梁. *物理*, 2000, **29**(3):169—173)
- Ametller L. Electromagnetic  $\eta$  decays. In: Maiani L, Panzeri G, Paver N. *The Second DAΦNE Physics Handbook*. Frascati: SIS-Ufficio Pubblicazioni, 1995. 427—444
- O'Donnell P. *Rev. Mod. Phys.*, 1981, **53**:673
- O'Donnell P. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 1997, **39**:201
- Bramon A, Grau A, Panzeri G. *Phys. Lett.*, 1995, **B334**:240
- Benayoun M et al. *Z. Phys.*, 1996, **C72**:221
- Achasov N et al. *Int. J. Mod. Phys.*, 1992, **A7**:3187
- XU Guo-Fa. The Analysis of  $\phi$  Decay to  $3\gamma$  Final States by Using the TELESIS Method, KLOE Memo No. 232/01
- Antonelli A et al. GEANFI program-version 1.2, KLOE Memo 23, 3/93
- Denig A. KLOE Luminosity Measurement, KLOE General Meeting, Dec. 11—12, 2000
- KLOE Collab. KLOE First Results on Hadronic Physics, 30th International Conference on High Energy Physics, Osaka, Japan, hep-ex/0006036
- Akhmetshin R R et al. hep-ex/0008019
- Achasov N et al. hep-ex/0009036
- Akhmetshin R R et al. *Phys. Lett.*, 1999, **B460**:242—247; Kuraev E A, Fadin V S. *Sov. J. Nucl. Phys.*, 1985, **41**:466
- Achasov M N et al. *J. Exp. Theo. Phys.*, 2000, **90**:17—23
- Achasov M N et al. hep-ex/9809013



17 Achasov M N et al. Eur. Phys. J., 2000, C12:25—33

18 Dolinsky S I et al. Phys. Rep., 1991, 202:99—170

## Analysis of $\phi$ Decay to $3\gamma$ Final States with the TELESIS

XU Guo-Fa TONG Guo-Liang HUANG Xiu-Ping LÜ Feng YU Guo-Wei

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** DAΦNE (Double Annular Φ-factory for Nice Experiment) is the Frascati (Italy) electron positron collider operating at the energy of 510 MeV, a rather low energy with respect to the other existing factories. DAΦNE includes two collision points, and KLOE detector is located at one of these points. The KLOE detector is designed primarily for the goal of detecting direct CP violation in  $K^0$  decays with a sensitivity of  $\sim 10^{-4}$  in  $\Re(\epsilon'/\epsilon)$ , with a vast amount of other physics subjects.  $\phi$  radiative decays, especially its pure neutral final states are very important subjects to test the Chiral Perturbation Theory approach both in the anomalous and non-anomalous sectors. In this paper, a new kinematic fit method——TELESIS——is used for the data analysis of  $\phi$  radiative decay  $\phi \rightarrow \gamma\eta \rightarrow 3\gamma$  and  $\phi \rightarrow \gamma\pi^0 \rightarrow 3\gamma$  based on a part of 2000' data collected by KLOE detectors in DAΦNE, the  $\phi$  produced cross section and the partial cross section of  $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \gamma\pi^0 \rightarrow 3\gamma$  have been obtained as follows:

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi} = (4.04 \pm 0.04 \pm 0.24) \mu\text{b},$$

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \gamma\pi^0 \rightarrow 3\gamma} = (5.3 \pm 0.3 \pm 0.6) \text{nb}.$$

These results are in good agreement with that of VEPP and theoretical predictions.

**Key words** TELESIS kinematic fit,  $\phi$  radiative decay, cross section

Received 9 May 2001

\* Supported by National Natural Science Foundation of China