

用联合 D^0 和 D^+ 单双标记测定 分支比的方法*

荣刚 赵家伟¹ 罗春晖 严武光 徐春成 张达华
衡月昆 何康林 赵海文 毛慧顺 马基茂 陈宏芳¹ 张纯

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

¹(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

摘要 报道了用“联合 D^0 和 D^+ 单双标记”测定衰变分支比的方法。基于北京谱仪(BES)在北京正负电子对撞机(BEPC)质心系能量 $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$ 处获取的数据,利用联合 D^0 和 D^+ 单双标记的方法,可以测定 D^0 和 D^+ 介子单举和遍举衰变分支比。作为该方法的应用举例,利用 BES 实验组发表的数据,在 90% 置信度的情况下,测得 $D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu$ 衰变过程分支比的上限为 $Br(D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu) < 1.6\%$ 。此上限值与 BES 曾发表的结果一致。

关键词 北京谱仪(BES) 北京正负电子对撞机(BEPC) D 介子 单标记 双标记 单举衰变 分支比

1 引言

北京谱仪(BES)实验组^[1]于 1992—1994 年间,在北京正负电子对撞机(BEPC)质心系能量 $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$ 处,采集了 22.3pb^{-1} 积分亮度的数据。采集这些数据的目的是研究奇异粲介子 D_s 的产生和衰变特性。在 $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$ 的 e^+e^- 湮没的末态中,除了 $D_s^+D_s^-$ 外,还产生很多非奇异的粲介子和它们的激发态。为了能利用这些数据研究这些非奇异粲介子的产生和衰变特性,我们发展了“联合 D^0 和 D^+ 单双标记的方法”^[1]。利用这一方法,可以解决在单标记 D 介子的反冲侧, \bar{D}^0 和 D^- 互为污染的问题,从而使利用这些数据较广泛地测定 D^0 和 D^+ 介子的单举和遍举衰变分支比成为可能^[2-8]。

2001-05-16 收稿

* 国家自然科学基金(19991480,19825116),中国科学院九五重大项目(KT95T-03)资助

1) RONG Gang. A Method for Determination of Inclusive and Exclusive Decay Branching Fractions of D^+ and D^0 Mesons with the Data Taken at $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$ in e^+e^- Annihilation, BES Interior MEMO, Dec., 1995

2 方法

在 $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$ 处, 粲介子 D^0 和 D^+ 主要通过以下模式产生, 即

$$\begin{aligned} e^+ e^- &\rightarrow D^+ D^-, D^0 \bar{D}^0, \\ &D^+ D^{*-}, D^{*+} D^-, D^0 \bar{D}^{*0}, \bar{D}^0 D^{*0}, \\ &D^{*+} D^{*-}, D^{*0} \bar{D}^{*0}, \end{aligned}$$

其中 D^* 级联衰变为 D 介子. 因为 D^{*-} 既可以衰变到 $\pi^- \bar{D}^0$, 也可以衰变到 $\pi^0 (\gamma) D^-$, 故末态成对产生的 D 介子可为 $D\bar{D}$, $D\bar{D} + X$ (X 为 $\pi^0 (\gamma)$), $D^+ \bar{D}^0$ ($D^0 D^-$) + X (X 为 $\pi^0 (\gamma)$) 和 $\pi^- (\pi^+)$).

如果在一个事例中, 一个 D 介子被完整地重建, 那么反冲系统必定对应另一个 D 介子的衰变. 只有一个 D 介子被完全重建的事例被称为单标记, 而两个 D 介子均被完全重建, 或一个 D 介子被完全重建而另一个 D 介子被部分重建的事例被称为双标记. 对单标记 D 介子, 其反冲侧的 \bar{D} 介子既可能是中性的, 也可能是带电的. 对于特定标记的 D 介子, 无法知道其反冲侧是 \bar{D}^0 还是 D^- (称此 \bar{D}^0 和 D^- 互为污染), 导致无法用传统的双标记方法^[9] 测量 D 介子的单举和遍举衰变分支比. 为了解决这一困难, 我们发展了一套“联合 D^0 和 D^+ 单双标记方法”^[2] 来测定 D^0 和 D^+ 介子单举和遍举衰变分支比.

2.1 联合 D^0 和 D^+ 双标记方法

为了测定 D^0 和 D^+ 介子的单举 P (P 为任何一种粒子, 如 $\pi^\pm, K^\pm, K^0, K^{*0}, \phi$ 等) 粒子衰变的分支比, 可以在单标记 D^0 和 D^+ 的反冲侧寻找并测定 P 粒子的数目, 分别记为 $N_{D_{\text{tag}}^{D^0}}^{PX}$ 和 $N_{D_{\text{tag}}^{D^+}}^{PX}$. 此处上标 X 表示在单标记 D 介子的反冲侧, 还可能有其它种类的粒子. 这样的标记分别称为 D^0 和 D^+ 的双标记. 它们与单标记 D^0 反冲侧的 D^- 和 \bar{D}^0 的数目 (记为 $N_{D_{\text{tag}}^{D^0}}^{D^-}$ 和 $N_{D_{\text{tag}}^{D^0}}^{\bar{D}^0}$), 及单标记 D^+ 反冲侧的 D^- 和 \bar{D}^0 的数目 (记为 $N_{D_{\text{tag}}^{D^+}}^{D^-}$ 和 $N_{D_{\text{tag}}^{D^+}}^{\bar{D}^0}$) 的关系为

$$N_{D_{\text{tag}}^{D^0}}^{PX} = \epsilon_1 N_{D_{\text{tag}}^{D^0}}^{D^-} B(D^- \rightarrow PX) + \epsilon_2 N_{D_{\text{tag}}^{D^0}}^{\bar{D}^0} B(\bar{D}^0 \rightarrow PX), \quad (1)$$

$$N_{D_{\text{tag}}^{D^+}}^{PX} = \epsilon_1 N_{D_{\text{tag}}^{D^+}}^{D^-} B(D^- \rightarrow PX) + \epsilon_2 N_{D_{\text{tag}}^{D^+}}^{\bar{D}^0} B(\bar{D}^0 \rightarrow PX), \quad (2)$$

其中 ϵ_1 和 ϵ_2 是在 $D^- \rightarrow PX$ 和 $\bar{D}^0 \rightarrow PX$ 的衰变过程中, 探测到粒子 P 的效率, $B(D^- \rightarrow PX)$ 和 $B(\bar{D}^0 \rightarrow PX)$ 是分支比. 蒙特卡罗研究表明, ϵ_1 和 ϵ_2 在 1.5% 的范围内是一致的, 因此可以近似地取 $\epsilon \approx \epsilon_1 \approx \epsilon_2$, 而 ϵ_1 和 ϵ_2 的差别对计算分支比的影响可以作为系统误差来考虑.

记单标记 D^0 和 D^+ 介子总数分别为 $N_{D_{\text{tag}}^{D^0}}$ 和 $N_{D_{\text{tag}}^{D^+}}$, η 和 β 分别是在单标记 D^0 和 D^+ 的反冲侧 D^- 和 \bar{D}^0 所占的比例, 则反冲侧的 \bar{D}^0 和 D^- 介子总数可以通过以下公式得到:

$$N_{D_{\text{tag}}^{D^0}}^{\bar{D}^0} = (1 - \eta) N_{D_{\text{tag}}^{D^0}}, \quad N_{D_{\text{tag}}^{D^+}}^{\bar{D}^0} = \beta N_{D_{\text{tag}}^{D^+}}, \quad (3)$$

$$N_{D_{\text{tag}}^{D^0}}^{D^-} = \eta N_{D_{\text{tag}}^{D^0}}, \quad N_{D_{\text{tag}}^{D^+}}^{D^-} = (1 - \beta) N_{D_{\text{tag}}^{D^+}}. \quad (4)$$

由以上方程联立,可以得到 D^0 和 D^+ 介子单举衰变到 P 粒子的分支比:

$$\begin{aligned}
 B(D^0 \rightarrow PX) &= \frac{1}{\epsilon(1-\beta-\eta)} \left[(1-\beta) \frac{N_{D_{tag}^0}^{PX}}}{N_{D_{tag}^0}} - \eta \frac{N_{D_{tag}^+}^{PX}}}{N_{D_{tag}^+}} \right], \\
 B(D^+ \rightarrow PX) &= \frac{1}{\epsilon(1-\beta-\eta)} \left[(1-\eta) \frac{N_{D_{tag}^+}^{PX}}}{N_{D_{tag}^+}} - \beta \frac{N_{D_{tag}^0}^{PX}}}{N_{D_{tag}^0}} \right].
 \end{aligned} \tag{6}$$

2.2 η 和 β 的测定

为了测 D 介子的单举和遍举衰变的分支比,必须要知道在单标记 D^0 和 D^+ 的反冲侧, D^- 和 \bar{D}^0 所占的百分比 η 和 β . 利用绝对双标记和单标记的方法,都可以测出 η 和 β .

2.2.1 双标记方法

文献[2]和[10]中给出 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, $K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$ 和 $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ 单标记中性和带电 D 介子样本筛选的详细过程及单标记样本的分析结果. 图 1(a), (b) 和 (c) 分别给出对应上述 3 种衰变模式的 $K^- \pi^+$, $K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$ 和 $K^- \pi^+ \pi^+$ 组合的不变质量分布. 该工作中给出, 从 3 个不变质量谱拟合分别得到 $4207 \pm 196 \pm 92$, $2716 \pm 158 \pm 88$ 和 $2234 \pm 120 \pm 49$ 个单标记 D^0 和 D^+ 介子的衰变事例, 其中第一项误差为统计误差, 第二项为改变事例判选分析条件、拟合参数初值和不同背景多项式时引起的事例数的不确定, 即系统误差.

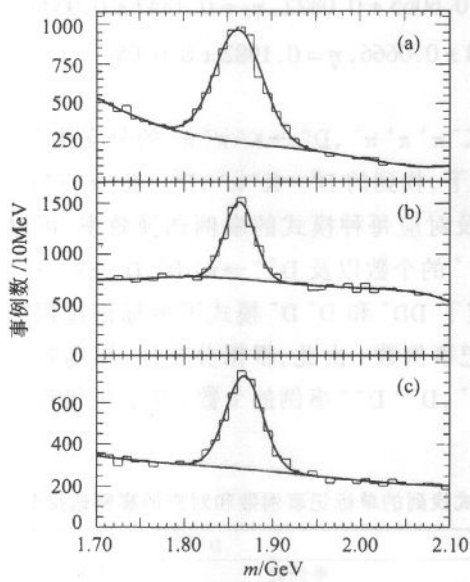


图 1 $K^- \pi^+$ (a), $K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$ (b) 和 $K^- \pi^+ \pi^+$ (c) 组合的不变质量分布

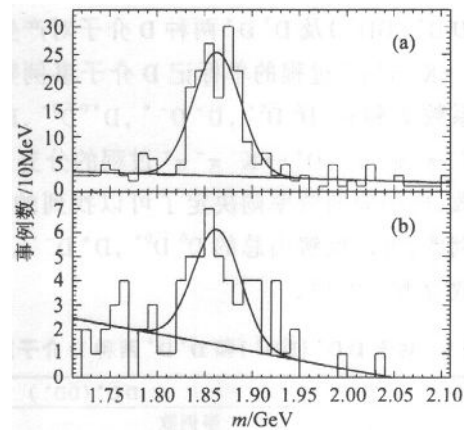


图 2 在单标记 D 介子的反冲侧, $K^+ \pi^-$, $K^+ \pi^- \pi^- \pi^+$ 组合的不变质量分布

为了测定 η 和 β , 在单标记 D^0 和 D^+ 的反冲侧寻找 $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ 和 $K^+ \pi^- \pi^- \pi^+$. 图 2(a) 和 (b) 分别给出在单标记 D^0 和 D^+ 的反冲侧, 组合出的 $K^+ \pi^-$ 和 $K^+ \pi^- \pi^- \pi^+$ 的不变质量分布. 蒙特卡罗数据的研究表明, 对应图 2(a) 和 (b) 数据, BES 质量分布的均方根偏差为 $\sigma_m = 23.8 \text{ MeV}$. 用固定均方根偏差 $\sigma_m = 23.8 \text{ MeV}$ 的高斯函数加一次多项式背景对不变质量

谱做最大似然拟合,在 D^0 和 D^+ 单标记的反冲侧,分别得到 $N_{D_{tag}^0} = 140 \pm 12$ 和 $N_{D_{tag}^+} = 30 \pm 6$ 个 $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$, $K^+ \pi^- \pi^- \pi^+$ 事例. 蒙特卡罗研究给出,在 D 介子单标记样本的反冲侧,观测到 $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ 和 $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^- \pi^+$ 的效率分别为 $\epsilon_{\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-} = 0.4234$ 和 $\epsilon_{\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^- \pi^+} = 0.1258$. 根据各标记道的效率和已知的衰变分支比,可以得到 $\beta_1 = 0.5235 \pm 0.1047$, $\eta_1 = 0.2116 \pm 0.0732$.

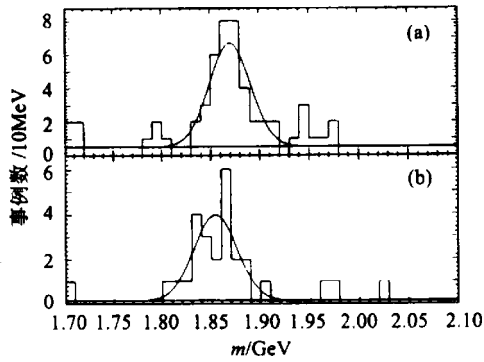


图 3 在单标记 D 介子的反冲侧, $K^+ \pi^- \pi^-$ 组合的不变质量分布

同理,在 D^0 和 D^+ 的反冲侧,也可以寻找 $D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-$ 事例. 图 3(a)和(b)分别给出在 D^0 和 D^+ 的反冲侧, $K^+ \pi^- \pi^-$ 组合的不变质量分布. 同样,用一高斯函数加一次多项式背景来拟合该不变质量谱,在 D^0 和 D^+ 单标记的反冲侧,分别得到 $N_{D_{tag}^0}^{D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-} = 32.0 \pm 6.0$ 和 $N_{D_{tag}^+}^{D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-} = 22.0 \pm 4.7$ 个 $D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-$ 事例. 通过蒙特卡罗研究得到,在单标记 D 介子的反冲侧,观测到 $D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-$ 衰变的效率为 $\epsilon_{D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-} = 0.275$. 利用这些数据,得到 $\beta_2 = 0.6065 \pm 0.0822$, $\eta_2 = 0.1847 \pm 0.0346$.

取两组数据测定结果的平均,得: $\beta = 0.5650 \pm 0.0666$, $\eta = 0.1982 \pm 0.0405$.

2.2.2 单标记方法

利用已知的 $D^{*+} \rightarrow \pi^+ D^0$, $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$, $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ 的分支比^[11],和在 $D \bar{D}^*$ ($\bar{D} D^*$) 及 $D^* \bar{D}^*$ 两种 D 介子对产生模式下,找到的 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$ 和 $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ 过程的单标记 D 介子事例数,以及对应每种模式的事例选择效率,可以测定系数 β 和 η . $D^0 \bar{D}^{*0}$, $D^+ D^{*-}$, $D^{*0} \bar{D}^{*0}$, $D^{*+} D^{*-}$ 的个数以及 $D^{*+} \rightarrow \pi^+ D^0$, $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$, $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ 过程的分支比决定了 $D \bar{D}^*$ 和 $D^* \bar{D}^*$ 模式下单标记过程的事例数,而相应的效率则决定了可以找到的单标记事例数. 由此,根据分支比、探测效率和事例数,可以反解出总的 $D^0 \bar{D}^{*0}$, $D^+ D^{*-}$, $D^{*0} \bar{D}^{*0}$, $D^{*+} D^{*-}$ 事例的个数. 然后即可计算出系数 β 和 η 的值.

表 1 对于 $D \bar{D}^*$ ($\bar{D} D^*$) 和 $D^* \bar{D}^*$ 两种 D 介子产生模式找到的单标记事例数和对应的事例选择效率

	$D \bar{D}^*$ ($\bar{D} D^*$)		$D^* \bar{D}^*$	
	事例数	效率	事例数	效率
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$	2181 ± 144	$(42.4 \pm 2.1)\%$	1734 ± 81	$(38.5 \pm 1.9)\%$
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$	1423 ± 120	$(16.5 \pm 0.8)\%$	1303 ± 68	$(14.4 \pm 0.7)\%$
$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$	1845 ± 107	$(30.1 \pm 1.5)\%$	414 ± 52	$(27.4 \pm 1.4)\%$

单标记事例的选择方法与以上所述方法相同,只是要根据组合出的 D 介子的动量来区分 $D \bar{D}^*$ ($\bar{D} D^*$) 和 $D^* \bar{D}^*$, 分别得出这两种模式下的单标记事例数. 这样得到的 $D \bar{D}^*$ ($\bar{D} D^*$) 和 $D^* \bar{D}^*$ 模式下单标记事例的不变质量分布如图 4 和图 5 所示. 表 1 给出对应每种模式单标记的事例数和事例选择效率. 根据这些值,可求得

$$\beta' = 0.553 \pm 0.006, \quad \eta' = 0.196 \pm 0.020.$$

利用这两种方法测定的结果,与利用由遍举 DD^* 和 $D^* \bar{D}^*$ 产生截面的测定值^[12] 计算得到的 $\beta'' = 0.5460 \pm 0.0662$ 和 $\eta'' = 0.1768 \pm 0.0175$ ^[13] 在误差范围内一致.

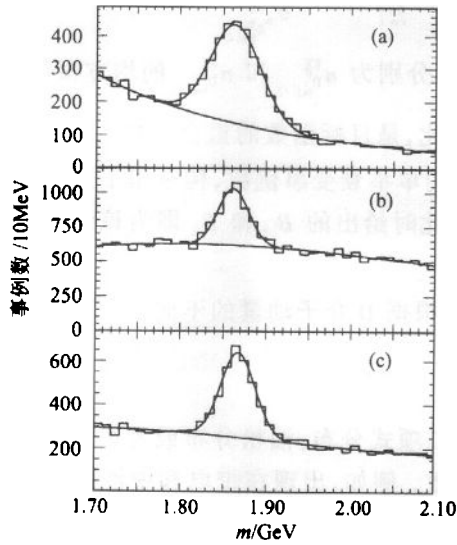


图 4 $D \bar{D}^*$ ($D^* \bar{D}$) 产生模式下, $K^- \pi^+$ (a), $K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$ (b) 和 $K^- \pi^+ \pi^+$ (c) 组合的不变质量分布

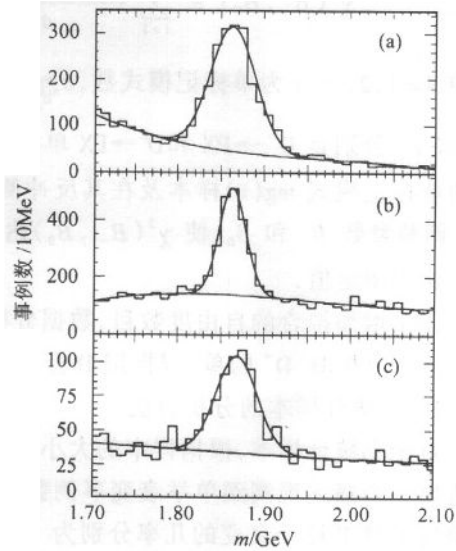


图 5 $D \bar{D}^*$ 产生模式下, $K^- \pi^+$ (a), $K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$ (b) 和 $K^- \pi^+ \pi^+$ (c) 组合的不变质量分布

2.3 单标记 D 介子反冲侧中性和带电 D 介子总数

在中性和带电单标记 D 介子的反冲侧,中性和带电 D 介子的总数为

$$N_{D_{tag}^0} = (1 - \eta) N_{D_{tag}^0} + \beta N_{D_{tag}^+}, \quad (7)$$

$$N_{D_{tag}^-} = \eta N_{D_{tag}^0} + (1 - \beta) N_{D_{tag}^+}. \quad (8)$$

根据实验上测定的 D^* 和 D^0 单标记样本数,及其反冲侧中性和带电 D 介子所占的百分比(即利用从单标记 D 介子样本测定的 β' 和 η' 的值),得到在单标记 D 介子反冲侧,中性和带电 D 介子的总数分别为

$$N_{D_{tag}^0} = 6801 \pm 276, \quad N_{D_{tag}^-} = 2356 \pm 161.$$

利用这些单标记 D 介子样本,可以研究 D^0 和 D^* 介子的单举和遍举衰变的特性,测定其单举和变举衰变分支比.

2.4 最小二乘和最大似然分析方法

2.4.1 大统计样本的分析方法

对于大统计样本,即可以直接利用公式(5)和(6)计算中性和带电 D 介子单举衰变分支比,也可以利用由实验上观测到的数据去拟合公式(1)和(2)而得到. 具体方法如下:

利用由公式(1)和(2)预期的,在单标记 D^0 和 D^* 的反冲侧中性和带电的 D 介子单举

衰变的事例数 $N_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}}$ 和 $N_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}}$, 以及实验上在中性和带电 D 介子的反冲侧观测到的 D 介子单举衰变的事例数 $n_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}}$ 和 $n_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}}$, 构造一个目标函数

$$\chi^2(B_-, B_0) = \sum_{i=1}^m \frac{(N_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}} - n_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}})^2}{\sigma_{n_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}}}^2} + \sum_{i=1}^m \frac{(N_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}} - n_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}})^2}{\sigma_{n_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}}}^2},$$

式中 $i=1, 2, \dots, m$ 为单标记模式数, $\sigma_{n_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}}}$ 和 $\sigma_{n_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}}}$ 分别为 $n_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}}$ 和 $n_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}}$ 的均方根偏差,

B_- 和 B_0 分别是 $D^- \rightarrow \text{PX}$ 和 $D^0 \rightarrow \text{PX}$ 单举衰变分支比, 是目标函数的拟合参数. 利用从不同的单标记模式 tag(i) 样本及在其反冲侧观测到的单举衰变事例数, 构造出上述目标函数. 调整参数 B_- 和 B_0 , 使 $\chi^2(B_-, B_0)$ 达到最小, 此时给出的 B_- 和 B_0 即为该衰变过程分支比的测定值.

为了增加拟合的自由度数, 数据分析中可以根据 D 介子动量的不同值^[8,9], 把来自 $D\bar{D}^*$ ($\bar{D}D^*$) 和 $D^*\bar{D}^*$ 的单、双标记 D 介子样本分开.

2.4.2 小统计样本的分析方法

对于小统计样本, 根据样本的大小, 可以利用二项式分布, 泊松分布或者是高斯分布构造出一个描述观测到单举衰变事例数的几率函数. 例如, 出现在带电和中性 D 介子反冲侧的单举 P 粒子衰变的几率分别为

$$P_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}} = \frac{e^{-(N_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}})} (N_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}})^{n_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}}}}{n_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}}!} \quad \text{和} \quad P_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}} = \frac{e^{-(N_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}})} (N_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}})^{n_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}}}}{n_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}}!},$$

式中 $N_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}}$ 和 $N_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}}$ 是两个参数, 它们是在带电和中性单标记 D 介子的反冲侧, 观测到单举 P 粒子衰变事例数的预期值.

利用上述的两个概率密度函数, 构造一个描述样本整体分布的对数似然函数如下:

$$\ln L(N_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}}, N_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}}, B_{-,0}) = \ln(P_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}} \times P_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}}).$$

根据公式(5), (6)和在单标记的反冲侧观测到的单举衰变的事例数, 及探测效率以及 η 和 β , 对于给定的衰变分支比, 通过改变 $N_{D_{\text{tag}}^+}^{\text{PX}}$ 和 $N_{D_{\text{tag}}^0}^{\text{PX}}$ 两个参数使得似然函数达到最大值.

从似然函数与衰变分支比的变化关系曲线, 可以测得带电和中性 D 介子单举衰变分支比的最可几值和误差.

3 应用

应用以上讨论的方法, 文献[2—8]分别完成带电和中性 D 介子的几个单举和遍举衰变分支比的测定. 文献[2]和[10]报道了 BES 合作组基于在 $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$ 处获取的 22.3pb^{-1} 的数据, 测得的 $D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu$ 衰变分支比的上限. 作为此方法应用的例子, 利用该工作中报道的结果, 在此用本文中报道的方法, 讨论 $D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu$ 衰变分支比上限的测定.

前面的分析给出, 在单标记 D^0 和 D^+ 样本的反冲侧, 共有 2356 ± 161 个 D^- 介子. 文献[2]和[10]报道, 在单标记 D 介子的反冲侧, 没有找到 $D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu$ 的衰变过程. 该工作的分

析程序对 $D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu$ 事例的寻找效率为 $\epsilon_{D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu} = 0.0652$.

实验观测到 n 个 $D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu$ 遍举半轻子衰变事例满足以 N 为预期值的泊松分布,其几率为

$$P(N) = \frac{N^n}{n!} e^{-N},$$

其中 $N = B \times N_{D^+} \times \epsilon_{D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu}$, B 是衰变分支比, N_{D^+} 是在单标记样本的反冲侧 D^+ 介子总数 n_{D^+} 的参数. N_{D^+} 服从高斯分布. 构造似然函数

$$L(B, N_{D^+}) = \frac{N^n}{n!} e^{-N} \times \frac{e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{n_{D^+} - N_{D^+}}{\sigma_{n_{D^+}}} \right)^2}}{\sqrt{2\pi\sigma_{n_{D^+}}}},$$

其中 $n_{D^+} \pm \sigma_{n_{D^+}} = 2356 \pm 161$. 积分掉参数 N_{D^+} ,

得到:
$$L(B) = \int L(B, N_{D^+}) dN_{D^+}.$$

$D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu$ 遍举半轻子衰变的分支比值与其似然函数的关系如图 6 所示. 从分支比等于零的位置向等于 100% 的方向对似然函数积分, 积到总面积的 90% 的位置, 得到对置信度为 90% 的分支比上限, 如图中箭头所示位置. 该上限为

$$B(D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu) < 1.6\%.$$

此上限值与 BES 合作组在文献[2]和[8]中报道的结果相同.

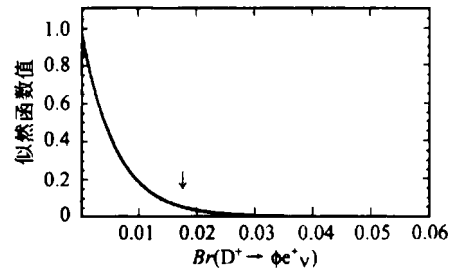


图 6 似然函数与分支比的关系

4 结语

在 $e^+ e^-$ 对撞质心系能量 $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$ 的末态中, 有大量 $D^0 \bar{D}^0, D^- D^{*+}, D^{*+} D^{*-}, D^{*0} \bar{D}^0$ 介子对. D^+ 经过级联衰变后, 这些成对的介子变成 $D^0 \bar{D}^0 X, D^0 D^- X, D^+ \bar{D}^0 X, D^- D^+ X$. 因此, 对于单标记的 D^+ 介子, 其反冲侧既可能是 D^- 也可能是 D^0 . 同理, 对于单标记的 D^0 介子, 其反冲侧既可能是 \bar{D}^0 也可能是 D^- . 对于在单标记 D 介子的反冲侧要寻找带电 D 介子的衰变事例而言, 反冲侧的中性 D 介子对带电 D 介子造成污染, 反之亦然. 因此, 不能用传统的双标记方法^[7]测定 D^0 和 D^+ 介子的单举和遍举衰变分支比.

利用本文讨论的“联合 D^0 和 D^+ 单双标记的方法”, 可以有效地解决单标记 D 介子反冲侧 D^0 和 D^+ 互为污染的问题. 从而, 可以较好地利用这些数据测定 D 介子的单举和遍举衰变分支比. 进而拓宽了 BES 实验组利用在 $e^+ e^-$ 对撞质心系能量 $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$ 处采集的, 主要用于 D_s 物理研究的数据, 来研究 D 介子物理的内容.

与“利用单标记 D 介子的粲量子数与其反冲侧总电荷的平衡方法”^[2,8] 比较, 此方法优点是, 对于每一个单标记 D 介子, 并不直接统计其反冲侧是中性还是带电 D 介子. 因此, 数据中因 γ 转换而产生的 e^+ 和 e^- (当 e^+ 或 e^- 之一逃离 BES 所覆盖的立体角时) 或因 D^{*+} 衰变而产生的 π^+ 均不会对确定反冲侧是中性还是带电 D 介子造成误判. 这一点对处理低统计样本实验结果至关重要. 不足之处是对单举分之比值的误差估计得过于保守.

作为此方法的应用举例,利用 BES 实验组报道过的结果,在 90% 置信度的情况下测定 $B(D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu)$ 衰变分支比的上限为 $B(D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu) < 1.6\%$.

感谢 BEPC 同事和 BES 合作组成员对 BES 实验在 4.03GeV 能量处的数据采集及数据处理所做出的突出贡献. 正是在此基础上,在进行 D 物理实验研究的工作中,本工作所述方法才得以提出并得到成功的应用. 在工作中,曾与李金、赵政国、朱永生、薛生田、张子平、W. Dunwoodie, F. A. Harris, R. Malchow, J. M. Izen 和 X. C. Luo 等教授做过多次认真的讨论. 在此表示感谢.

参考文献 (References)

- 1 BAI Jing-Zhi et al. N. I. M., 1994, A344:319—334; DING Hui-Liang et al. HEP & NP, 1992, 16(9):669 (in Chinese) (丁慧良等. 高能物理与核物理, 1992, 16(9):669)
- 2 RONG Gang. Recent Preliminary Results on D Meson Decays from BES. In: Alan Astbury, Proceedings of the 29th International Conference on High Energy Physics (Volume II), Vancouver, Canada: World Scientific, 1998. 1242—1246
- 3 LUO Chun-Hui. Determination of the Branching Fractions for $D^0(D^+) \rightarrow K^+ X$ Based on the Data Taken at $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$. Master Thesis, Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, 1997 (in Chinese) (罗春晖. 在 4.03GeV 能量上 $D^0(D^+) \rightarrow K^+ X$ 衰变分支比的确定. 硕士论文, 中国科学院高能物理研究所, 1997)
- 4 XU Chun-Cheng. Study of Inclusive Semi-Leptonic (μ) Decays of D Mesons. PhD. Thesis, Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, 1997 (in Chinese) (徐春成. D 介子的单举 μ 子半轻子衰变的研究. 博士论文, 中国科学院高能物理研究所, 1997)
- 5 HENG Yue-Kun, RONG Gang, YAN Wu-Guang. Measurement of the Branching Fractions for the Decays $D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu$ and $D^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$. In: Proceedings of the Chinese National Conference on High Energy Physics, Chengde, 1999. 274 (in Chinese); (衡月昆, 荣刚, 严武光. $D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu$ 和 $D^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ 的分支比的测量. 见: 高能物理学会第五届会员代表大会暨全国高能物理大会会议集, 承德, 1998, 274)
- HENG Yue-Kun. Study of the Exclusive Semi-Leptonic Decays of D Mesons. PhD. Thesis, Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, 1999 (in Chinese) (衡月昆. D 介子的单举半轻子衰变的研究. 博士论文, 中国科学院高能物理研究所, 1999)
- 6 ZHAO Jia-Wei, RONG Gang, CHEN Hong-Fang. Measurement of Inclusive Semi-Leptonic (electronic) Decay Branching Fractions of D^0 and D^+ . In: Proceedings of the Chinese National Conference on High Energy Physics, Chengde, 1999. 291 (in Chinese); (赵家伟, 荣刚, 陈宏芳. D^0, D^+ 介子单举半轻子(电子)衰变分支比的测量. 见: 高能物理学会第五届会员代表大会暨全国高能物理大会会议集, 承德, 1998, 219)
- ZHAO Jia-Wei. Test of QED with the Reactions of $e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$ at LEP2000 and Study of the Inclusive Semi-Leptonic Decays of D^0 and D^+ Mesons at BES. PhD. Thesis, University of Science and Technology of China, 2001 (in Chinese) (赵家伟. 在 LEP2000 上利用 $e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$ 反应检验 QED 以及在北京谱仪上 D 介子单举半轻子衰变的研究. 博士论文, 中国科学技术大学, 2001)
- 7 RONG Gang (BES Collab.). Recent Results on Study of D Physics from BES. In: Proceedings of the Chinese National Conference on High Energy Physics, Chengde, 1999. 68—79 (in Chinese) (荣刚(BES 合作组). 北京谱仪 D 物理研究的近期结果. 见: 高能物理学会第五届会员代表大会暨全国高能物理大会会议集. 承德, 1998, 68—79)
- 8 BAI Jing-Zhi et al. HEP & NP, to be published (in Chinese) (白景芝等. 高能物理与核物理, 待发表)
- 9 Baltusaitis R M et al (MARK-III Collab.). PRL, 1995, 54: 1976; BAI Jing-Zhi et al (BES Collab.). PRD, 1997, 56:3779
- 10 BAI Jing-Zhi et al (BES Collab.). PRD, 2000, 62:052001
- 11 Particle Data Group. The European Physical Journal C, 2000, 15:1—4

- 12 ZHAO Hai-Wen, YAN Wu-Guang, MAO Hui-Shun. Measurement of the D^+ (2010) Branching Fractions and D Meson Production Cross-section in e^+e^- Annihilation at $E_{cm} = 4.03\text{GeV}$. In: Proceedings of the 5th BES Annual Meeting, Zhangjiajie, Hunan, June 1996, 229—239
- 13 RONG Gang, LUO Chun-Hui, YAN Wu-Guang. Measurement of Inclusive ϕ decay Branching Fractions of D^+ (D^0) Mesons and Search for $D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu$. In: Proceedings of the 5th Annual Meeting, Zhangjiajie, Hunan, June 1996, 131—143;
RONG Gang, YAN Wu-Guang, XU Chun-Cheng et al. Study of K^0 and K^{*0} Inclusive Decays of D^+ (D^0) Mesons at $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$. In: Proceedings of the 5th Annual Meeting, Zhangjiajie, Hunan, June 1996, 143—148

A Method of Combined D^0 and D^+ Single and Double Tags to Measure Their Branching Fractions and Its Application

RONG Gang ZHAO Jia-Wei¹ LUO Chun-Hui YAN Wu-Guang XU Chun-Cheng
ZHANG Da-Hua HENG Yue-Kun HE Kang-Lin ZHAO Hai-Wen MAO Hui-Shun
MA Ji-Mao CHEN Hong-Fang¹ ZHANG Chun

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

¹(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract A method of combined D^0 and D^+ single and double tags to measure their branching fractions is reported. With this method, we can measure the inclusive and exclusive branching fractions of D^0 and D^+ based on the data taken at $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$ using BES detector at BEPC collider. As well known, it is very difficult to study D physics with the data taken at $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$. Compared with the data taken at $\sqrt{s} = 3.77\text{GeV}$, where it is just at the threshold of the pure pairs of $D^+ D^-$ and $D^0 \bar{D}^0$ productions. While at $\sqrt{s} = 4.03\text{ GeV}$ $D^+ \bar{D}^{*0}$ and $D^+ \bar{D}^{*+}$ can also be produced and then the so-called contaminated final states $D^+ \bar{D}^0$ and $D^- D^0$ can be produced via the cascade decays of the D^{*+} to charged and neutral D . This makes some trouble for the study. The key to solve this problem is how to determine the ratios β , which denotes the recoil \bar{D}^0 production against the tagged D^+ , and η , which denotes the recoil D^- production against the tagged D^0 . We developed the double tag method and single tag method to determine these two parameters, and compared them with cross section method developed by us before. They are consistent with each other within errors, so that the validity of this method was proved. As an example of its application, we set the upper limit for $D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu$ decay to be $Br(D^+ \rightarrow \phi e^+ \nu) < 1.6\%$ at 90% C. L.. This value is consistent with that BES Collaboration published.

Key words BES, BEPC, D meson, single tag, double tag, inclusive decay, branching fraction

Received 16 May 2001

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19991480, 19825116) and The Chinese Academy of Sciences (KJ95T - 03)