

# Belle 实验 $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$ 道中性 $D$ 介子 混合参数测量的本底研究

彭涛, 李龙科, 张子平

(中国科学技术大学近代物理系, 安徽合肥 230026)

**摘要:** 在 Belle 非对称  $e^+e^-$  对撞机实验中, 通过  $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$  道的含时达里兹分析, 可以实现对  $D^0-\bar{D}^0$  混合参数的灵敏测量. 详细地讨论了事例的筛选和本底分析方法, 给出了信号和各类本底谱函数的具体形式.

**关键词:**  $D^0-\bar{D}^0$  混合; 对撞机实验; 本底研究

**中图分类号:** O572.24      **文献标识码:** A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2012.01.006

**引用格式:** Peng Tao, Li Longke, Zhang Ziping. Backgrounds studies on  $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$  decay in the mixing parameters measurement of neutral  $D$  meson at Belle [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(1): 37-40.

彭涛, 李龙科, 张子平. Belle 实验  $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$  道中性  $D$  介子混合参数测量的本底研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(1): 37-40.

## Backgrounds studies on $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$ decay in the mixing parameters measurement of neutral $D$ meson at Belle

PENG Tao, LI Longke, ZHANG Ziping

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** In the asymmetrical  $e^+e^-$  collider experiment at Belle, a sensitive measurement of  $D^0-\bar{D}^0$  mixing parameters can be obtained from a time dependent Dalitz analysis of  $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$  decay channel. The related event selection and background studies were discussed, and all the distribution functions of signal and backgrounds were given.

**Key words:**  $D^0-\bar{D}^0$  mixing;  $e^+e^-$  collider experiment; background study

### 0 引言

中性介子之间的混合现象, 已经在  $K^0-\bar{K}^0$  和  $B^0-\bar{B}^0$  以及  $B_s^0-\bar{B}_s^0$  系统中观测到, 但是对于  $D^0-\bar{D}^0$  系统, 由于标准模型的 CKM 与 GIM 效应使得混合被强烈地压低, 理论预期值非常小. 实验上若能观

测到超出标准模型预言的  $D^0-\bar{D}^0$  混合, 将意味着新物理现象的发现. 假如存在标准模型以外的作用过程, CP 破坏效应也将会增大. 因此,  $D^0-\bar{D}^0$  混合的测量对精细检验标准模型理论, 揭示可能存在的新物理以及对  $B$  介子 CP 破坏的测量都具有非常重要的意义. 两个  $B$  介子工厂的实验 Belle 和 BABAR

收稿日期: 2011-07-19; 修回日期: 2011-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(10875115, 10935008)资助.

作者简介: 彭涛, 男, 1986 年生, 博士生. 研究方向: 实验高能物理. E-mail: ptd8606@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 张子平, 教授. E-mail: zpz@ustc.edu.cn

以及 CDF 之前都报道测到了超出  $3\sigma$  的混合存在的迹象<sup>[1-3]</sup>,但至今尚未在任何单一的物理过程中以超过  $5\sigma$  的精度确认其存在. 因此  $D^0-\bar{D}^0$  混合的测量是 B 介子工厂实验中最令人感兴趣的、受到普遍关注的物理课题之一.

日本 KEKB 非对称  $e^+e^-$  对撞机设计运行在  $\gamma(4S)$  态能区,  $e^+$  和  $e^-$  束流能量分别为 3.5 GeV 和 8 GeV. Belle 是该对撞机上唯一的大立体角磁谱仪,包含了硅顶点探测器(SVD),50 层的中心漂移室(CDC),气凝硅胶阈切伦科夫计数器阵列(ACC),飞行时间闪烁计数器(TOF),CsI(Tl)晶体电磁量能器(ECL)以及轭流线圈外的  $\mu$  和  $K_L^0$  探测器(KLM),详见文献[4].

理论上定义  $D^0$  和  $\bar{D}^0$  的质量本征态,

$|D_{1,2}\rangle = p|D^0\rangle \pm q|\bar{D}^0\rangle$ ,  $|p|^2 + |q|^2 = 1$ , 它们的质量和宽度分别记为  $M_1, M_2$  和  $\Gamma_1, \Gamma_2$ , 混合参数  $x$  和  $y$  定义为

$$x = \frac{\Delta M}{\Gamma} = \frac{M_2 - M_1}{\Gamma}; \quad y = \frac{\Delta\Gamma}{\Gamma} = \frac{\Gamma_2 - \Gamma_1}{\Gamma}. \quad (1)$$

式中,  $\Gamma = (\Gamma_2 + \Gamma_1)/2$  是  $D_1$  和  $D_2$  的平均宽度.

对于  $D^0$  的强子衰变,可以通过其两体衰变道  $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$  和三体衰变道  $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$ ,  $K_s^0 K^+ K^-$ ,  $K^+ \pi^- \pi^0$  等对混合效应进行精确的测量. Belle 实验的前期研究结果可见文献[5-7]. 对本文讨论的  $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$  衰变道,描写事例特征的 4 个关键可观测量可以选取为

$$M = m_{K_s^0 \pi^+ \pi^-},$$

$$Q = m_{K_s^0 \pi^+ \pi^-} - m_{K_s^0 \pi^+ \pi^-} - m_{\pi^+},$$

$D^0$  的固有衰变时间  $t$  及其误差估计  $\sigma_t$ .  $D^0-\bar{D}^0$  混合的信息包含在衰变振幅的平方中:

$$|M|^2 \equiv |\langle K_s^0 \pi^+ \pi^- | D^0(t) \rangle|^2,$$

或  $|\bar{M}|^2 \equiv |\langle K_s^0 \pi^+ \pi^- | \bar{D}^0(t) \rangle|^2$ .

由于末态为三体,包含了多个两体的中间共振态,物理分析需要用到达里兹分析的方法,即对事例在由变量  $m_{K_s^0 \pi^+}^2, m_{K_s^0 \pi^-}^2$  组成的两维达里兹平面上的分布进行含时的似然拟合,得到混合参数的测量值以及各可能的中间共振态的特征参数. 似然函数由信号和各类本底的分布函数构成,可写成如下的形式<sup>[7]</sup>:

$$2\ln \mathcal{L} = 2 \sum_{i=1}^n \ln [f_{\text{sig}}^i(M, Q) p_{\text{sig}}(m_{K_s^0 \pi^+}^2, m_{K_s^0 \pi^-}^2, t_i) + \sum_{\alpha=1}^m f_{\text{bkg}, \alpha}^i(M, Q) p_{\text{bkg}, \alpha}(m_{K_s^0 \pi^+}^2, m_{K_s^0 \pi^-}^2, t_i)]. \quad (2)$$

这里,  $i$  跑遍所有的  $n$  个事例候选者,  $\alpha$  是对  $m$  类本

底求和;  $p_X$  分别是信号(sig)和  $\alpha$  类本底(bkg,  $\alpha$ )的分布函数;  $p_{\text{sig}}$  由衰变矩阵元的平方和信号在达里兹平面上的选择效率,同时卷积探测器的分辨函数构造而成;  $p_{\text{bkg}, \alpha}$  则可由对通过探测器模拟的蒙特卡罗数据或实验数据信号区边带事例的仔细研究获得,详见文献[7].  $f_X^i$  是逐个事例  $X$  类的分支比,是前面定义的物理观测量( $M, Q$ )的函数. 事例的选择区间可取为  $1.81 < M < 1.92$  GeV,  $0 < Q < 20$  MeV, 在此区间内准确无误的本底分析对通过达里兹拟合获得正确的物理结果至关重要.

## 1 事例的重建

在衰变链  $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi_s^+$ ,  $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$  中,  $\pi_s^+$  标记了所产生的  $D^0$  的味道. 结合 CDC 的  $dE/dx$ , ACC 及 TOF 信息构建的似然函数可用以鉴别  $\pi, K, p$  带电径迹. 事例选取应尽量压制  $e^+e^- \rightarrow \bar{B}B$  过程的强本底,筛选由  $e^+e^- \rightarrow D^{*+} D^{*-}$  过程产生的  $D^0$ , 可以通过选取适当的  $D^*$  质心系动量  $p^*(D^*)$  截断条件来实现,我们取  $p^*(D^*) > 2.5$  GeV.  $K_s^0$  由一对  $\pi^+$  和  $\pi^-$  带电径迹重建, Belle 有标准的程序包实现(不在此详述),要求不变质量在  $K_s^0$  名义质量的  $\pm 10$  MeV 窗口内.  $D^0$  的衰变顶点由另外两条带电  $\pi$  介子径迹重建,重建的  $K_s^0$  不被用于  $D^0$  的顶点重建,但它的四动量被加入用以计算  $D^0$  的四动量. 由于  $D^{*\pm}$  的寿命极短,它的产生顶点即为  $D^0$  的产生顶点,由对撞点(IP)约束的顶点拟合给出. 最后要求  $\pi_s$  必须来自  $D^0$  产生顶点,在此约束条件下再次拟合  $\pi_s$  的动量,以改善  $D^*$  的动量分辨.  $D^0$  的固有时  $t$  由其在  $e^+e^-$  质心系中的衰变长度,即产生顶点和衰变顶点之间的距离  $l$  和动量  $p$  给出:

$$t = (m_p l) / (cp). \quad (3)$$

$t$  的误差估计  $\sigma_t$  由  $D^0$  的衰变顶点,产生顶点和动量的误差矩阵  $V_{\text{det}}, V_{\text{IP}}, V_p$  以及它们之间的协方差  $\text{cov}(X, Y)$  计算得到:

$$\sigma_t^2 = \left[ \frac{\partial t}{\partial i} \right]^T V_i \left[ \frac{\partial t}{\partial i} \right], \quad (4)$$

$$V_i = \begin{pmatrix} V_{\text{det}} & \text{cov}(\text{det}, \text{IP}) & \text{cov}(\text{det}, p) \\ \text{cov}(\text{IP}, \text{det}) & V_{\text{IP}} & \text{cov}(\text{IP}, p) \\ \text{cov}(p, \text{det}) & \text{cov}(p, \text{IP}) & V_p \end{pmatrix}. \quad (5)$$

$\text{cov}(X, Y)$  的值由 IP 约束的顶点拟合中得到. 我们要求  $\sigma_t$  小于 1 000 fs, 以进一步减除错误选择的本底事例.

## 2 信号和本底 ( $M, Q$ ) 分布的拟合

该衰变道的本底可以分为两类：随机  $\pi_s$  本底和组合本底。随机  $\pi_s$  本底指的是一个随机的低能软  $\pi$  带电径迹和正确重建的  $D^0$  组成错误的  $D^{*\pm}$ ，其余的本底过程都被归于组合本底。我们也仔细研究了来自  $D^0$  四体衰变的本底，即  $D^0$  衰变到 4 个以上的末态粒子，发现这类本底只占总本底的 4%，比

较小，所以将其也归入组合本底中。各类本底的分布特征由对通过探测器模拟的蒙特卡罗数据的仔细研究获得。

研究发现信号和本底过程的 ( $M, Q$ ) 分布可以用如下的函数形式进行二维拟合：

(I) 信号事例。信号的  $M$  分布可用三高斯 ( $G_3$ ) 加晶体球函数 (CB) 来表示， $Q$  分布可用一个高斯函数 ( $G$ ) 加分叉学生氏函数 ( $S_b$ ) 表示。  $M$  分布中

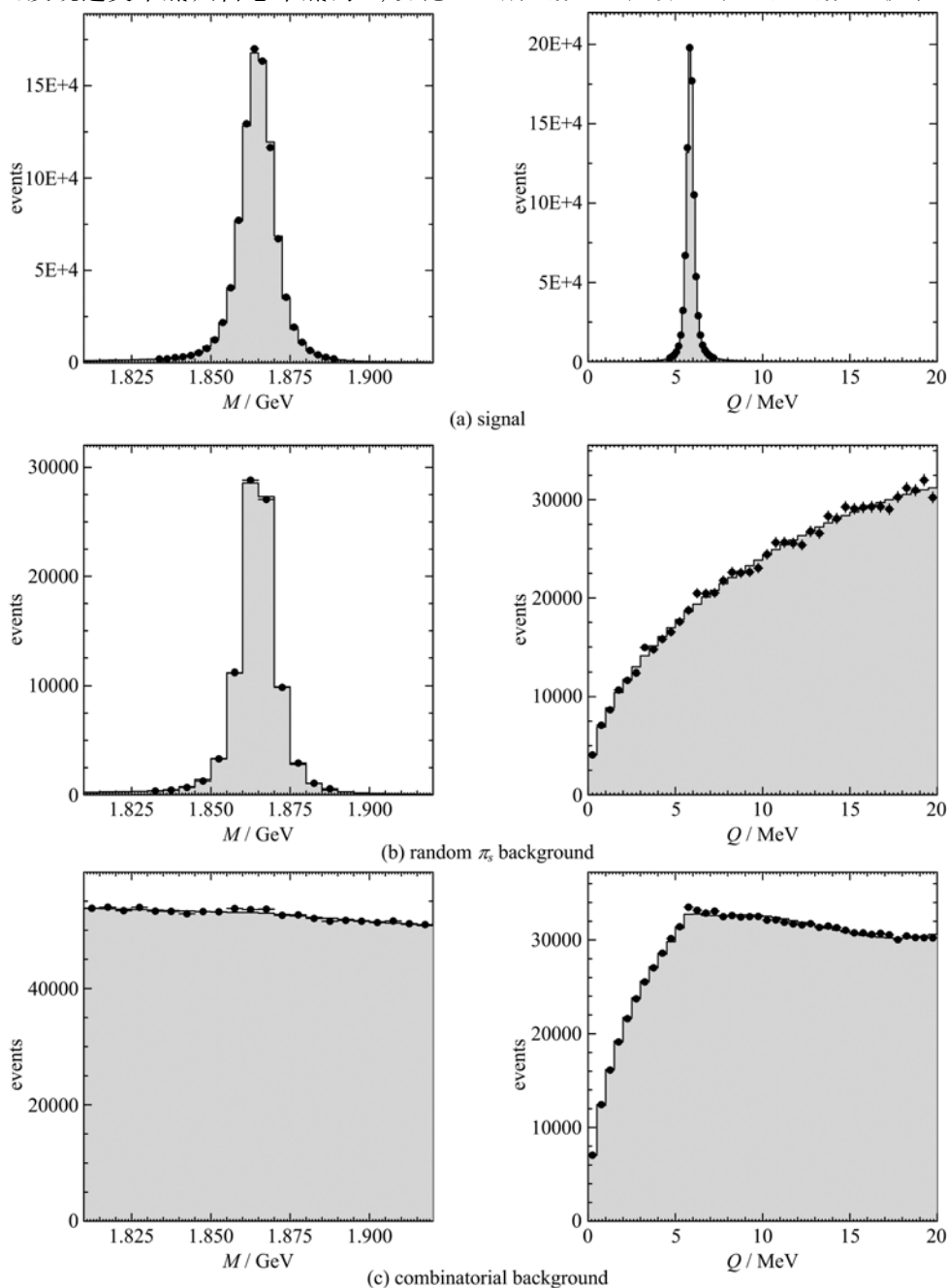


图 1  $1.81 < M < 1.92$  GeV,  $0 < Q < 20$  MeV 区间内信号,  $\pi_s$  本底和组合本底的拟合结果

Fig. 1 The  $M$  and  $Q$  distribution of signal, random  $\pi_s$  background and combinatorial background in  $1.81 < M < 1.92$  GeV and  $0 < Q < 20$  MeV region

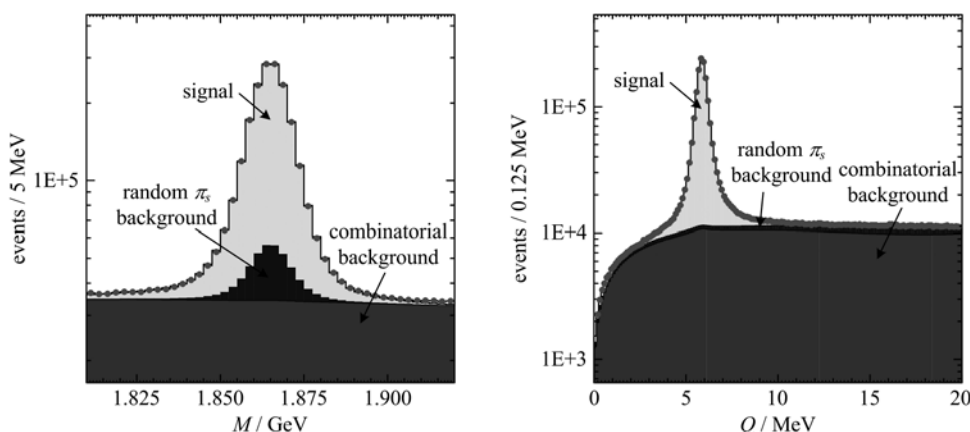


图 2  $1.81 < M < 1.92 \text{ GeV}$ ,  $0 < Q < 20 \text{ MeV}$  区间内信号对实验数据的拟合结果

Fig. 2 The projections of  $M$  and  $Q$  for data in  $1.81 < M < 1.92 \text{ GeV}$  and  $0 < Q < 20 \text{ MeV}$  region including signal, random  $\pi_0$  background and combinatorial background

的 CB 函数主要是为了描写含末态辐射(FSR)的事例分布, 占总信号事例的 0.4%. 具体为

$$F_{\text{sig}}(M, Q) = N \cdot [(1 - f_{\text{FSR}}) \cdot G_3(M, \mu, f_2, f_3, \Delta, \sigma_2/\sigma, \sigma_3/\sigma) + f_{\text{FSR}} \cdot \text{CB}] \cdot [(1 - f_G) \cdot S_b(Q, \mu_Q, \sigma_Q, \Delta_{\sigma_Q}, N_H, N_L) + f_G \cdot G(Q, \Delta_Q, \sigma_G/\sigma_Q)]. \quad (6)$$

式中,  $\sigma_Q = \sigma_Q^0 \cdot (1 + c_1 |M - \mu| + c_2 |M - \mu|^2)$ ,  $f_{\text{FSR}}$  是末态辐射(FSR)事例占总信号事例的比例( $f$  含义下同).

(II) 随机  $\pi_0$  本底. 由于这类本底的  $D^0$  是真实的, 它的  $M$  分布应和上面信号的  $M$  部分相同, 记为  $F_{\text{sig}}(M)$ , 则两维拟合函数可表示为

$$F_{\text{rnd}} = N \cdot F_{\text{sig}}(M) \times (Q^{1/2} + \alpha Q^{3/2}). \quad (7)$$

(III) 组合本底. 我们对  $D^0$  的四体衰变本底和其他组合本底用不同的函数形式进行拟合, 具体形式为

$$F_{\text{cmb}} = N \cdot [(1 - f_{\text{dib}}) \cdot (1 + \alpha M) \cdot (Q^{1/2} + \beta Q^{3/2} + \gamma Q^{5/2}) + f_{\text{dib}} \cdot F_{\text{dib}}(M, Q)], \quad (8)$$

$$F_{\text{dib}}(M, Q) = N' \cdot [(1 - f_{\text{GM}}) \cdot (a M^2 + b M + 1) + f_{\text{GM}} \cdot G(M, \mu_M, \sigma_M)] \cdot [(1 - f_G) \cdot S_b(Q, \mu_Q, \sigma_Q, \Delta_{\sigma_Q}, N_H, N_L) + f_G \cdot G(Q, \Delta_Q, \sigma_G/\sigma_Q)]. \quad (9)$$

图 1 给出了上述信号和本底分布函数的拟合结果, 和数据符合得相当好.

通过上述拟合, 确定了信号和各类本底的谱参数后, 就可用来拟合实验数据, 结果见图 2, 和实验数据符合得相当好. 在  $(M, Q)$  的  $3\sigma$  区间内, 信号纯度达到了 95.6%, 组合本底约占 3.6%, 其余为随机  $\pi_0$  本底.

### 3 结论

我们通过对  $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$  衰变道蒙特卡罗数据

和实验数据的分析, 得出实验数据中信号和各类本底的  $(M, Q)$  分布, 由每个事例的  $(M, Q)$  值就可以确定信号和各类本底的相对分支比  $f_x^i$ , 将其用于含时达里兹分析, 就能基于大样本的  $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$  衰变道事例, 实现对  $D^0 - \bar{D}^0$  混合参数的精确测量.

#### 参考文献 (References)

- [1] Starič M, Golob B, Abe K, et al (Belle Collaboration). Evidence for  $D^0 - \bar{D}^0$  mixing[J]. Phys Rev Lett, 2007, 98: 211803.
- [2] Aubert B, Bonal M, Boutigny D, et al (BABAR Collaboration). Evidence for  $D^0 - \bar{D}^0$  mixing[J]. Phys Rev Lett, 2007, 98: 211802.
- [3] Aaltonen T, Adelman J, Akimoto T, et al (CDF Collaboration). Evidence for  $D^0 - \bar{D}^0$  mixing using the CDF II detector[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100: 121802.
- [4] Abashian A, Gotowa K, Morgan N, et al (Belle Collaboration). The Belle detector [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2002, 479: 117-232.
- [5] Li J, Zhang Z P, Schwartz A J, et al (Belle Collaboration). Search for  $D^0 - \bar{D}^0$  mixing in  $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$  decays and measurement of the doubly-Cabibbo-suppressed decay rate[J]. Phys Rev Lett, 2005, 94: 071801.
- [6] Zhang L M, Zhang Z P, Li J, et al (Belle Collaboration). Improved constraints on  $D^0 - \bar{D}^0$  mixing in  $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$  decays from the Belle detector[J]. Phys Rev Lett, 2006, 96: 151801.
- [7] Zhang L M, Zhang Z P, Adachi I, et al (Belle Collaboration). Measurement of  $D^0 - \bar{D}^0$  mixing parameters in  $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$  decays[J]. Phys Rev Lett, 2007, 99: 131803.