

在 $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}$ 的 e^+e^- 湮没中 D_s^+ 单标记的研究及 $D_s^+D_s^-$ 对产生截面的测定*

白景芝	班勇 ⁵	卞建国	陈爱东	陈光培	陈宏芳 ¹	陈和生
陈江川	陈鑫东	陈宇	陈元柏	程宝森	崔象宗	丁慧良
董燎原 ⁷	杜志珍	高翠山	高美丽	高树琦	顾建辉	顾树棣
顾维新	郭子金	过雅南	韩世温	韩缨	何景棠	何炬
何康林	何瑁 ²	衡月昆	胡贵云	胡海明	胡敬亮	胡琼辉
胡涛	黄秀萍	黄光顺 ⁷	黄因智	姜春华	金艳	巨新
柯尊建	赖元芬	郎鹏飞	李灿国	李德	李海波 ⁷	李家才
李金	李佩琴	李蔚	李卫国	李小南	李新华	李学潜 ⁸
李忠朝	刘斌	刘峰 ⁶	刘怀民	刘靖	刘觉平 ¹⁰	刘荣光
刘延	刘钟秀	柳峰	鲁公儒 ⁹	吕峰	吕军光	罗小兰
马恩成	马基茂	毛慧顺	毛泽普	孟祥承	莫晓虎	聂晶
漆纳丁	祁向荣 ⁵	钱诚德 ⁴	屈云河	邱进发	阙友昆	荣刚 ¹¹
邵毓莺	沈本蔚	沈定力	沈红	沈肖雁	盛华义	石峰
史焕章	宋晓非	孙汉生	孙良峰	孙永昭	唐素秋	童国梁
王锋	王岚	王临洲	王灵淑	王佩良	王平	王少敏
王运永	王至勇	魏诚林	吴宁	吴义根	席德明	夏小米
谢跃红	许国发	薛生田	颜洁	严武光	杨长友	杨春敏
杨宏勋	杨晓峰	叶铭汉	叶树伟 ¹	叶云秀 ¹	于传松	喻纯旭
俞国威	虞炎华 ³	郁忠强	苑长征	袁野	张炳云	张长春
张纯	张达华	张德红	张会领	张建	张家文	张良生

2000-05-10 收稿, 2001-01-18 收修改稿

* 国家自然科学基金(19991480, 19825116)和中国科学院“九五”重大基础研究基金资助(K105T-02)

1) 联系人: 班勇

张 雷 张 琳 张勤俭 张少强 张学尧² 张月元 章 平
 赵棣新 赵海文 赵家伟¹ 赵京伟 赵 萌 赵维仁 赵政国
 郑建平 郑林生 郑志鹏 周宝庆 周 莉 朱科军 朱启明
 朱永生 祝玉灿 朱自安 庄保安

(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 230026)

2(山东大学物理系 济南 250100)

3(杭州大学物理系 杭州 310028)

4(上海交通大学应用物理系 上海 200030)

5(北京大学技术物理系 北京 100871)

6(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

7(中国高等科学技术中心 北京 100080)

8(南开大学物理学院 天津 300071)

9(河南师范大学物理与信息工程学院 新乡 453002)

10(武汉大学物理与电子信息学院 武汉 430072)

摘要 利用北京正负电子对撞机(BEPC)和北京谱仪(BES),基于在质心系能量 $\sqrt{s}=4.03\text{GeV}$ 的 e^+e^- 湮没中, D_s^+ 单标记的分析结果,测定了 $D_s^+ \rightarrow \overline{K}^{*0} K^+$ 和 $D_s^+ \rightarrow \overline{K}^0 K^+$ 衰变的分支比。其结果 $Br(D_s^+ \rightarrow \overline{K}^{*0} K^+) = (3.02 \pm 0.94 \pm 0.91)\%$, $Br(D_s^+ \rightarrow \overline{K}^0 K^+) = (3.28 \pm 1.22 \pm 0.94)\%$ 与世界平均值在误差范围内一致。用 $\phi\pi^+$, $\overline{K}^{*0} K^+$, $\overline{K}^0 K^+$ 作为单标记,共观测到 94 ± 13 个 D_s^+ 事例,测得在 e^+e^- 湮没中 $D_s^+ D_s^-$ 对产生的截面为 $\sigma_{D_s^+ D_s^-}^{\text{prod}} = 451 \pm 63 \pm 118\text{pb}$ 。

关键词 北京正负电子对撞机(BEPC) 北京谱仪(BES) D_s^+ 介子 D_s^+ 单标记 分支比 产生截面 辐射修正

1 引言

测定奇异粲介子对 $D_s^+ D_s^-$ 在 $\sqrt{s}=4.03\text{GeV}$ 的 e^+e^- 湮没中的产生截面,对于加深理解粲偶素 $\psi_c(c\bar{c})$ 的产生和衰变机制都有重要的意义。双耦合道模型^[1]预期在这个能量点上 $D_s^+ D_s^-$ 对的产生截面约为 750pb 。通过比较产生截面的理论预期值和实验测量结果,可以进一步发展理论模型,增进人们对粲介子产生机制的了解。

1992—1994年间,BES实验组^[2]在BEPC的质心系能量 $\sqrt{s}=4.03\text{GeV}$ 处共采集了 $22.3 \pm 0.9\text{pb}^{-1}$ 积分亮度的数据。利用这些数据,基于 $D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+$ 单标记分析测得 $D_s^+ D_s^-$

对产生的观测截面为 $\sigma_{D_s^+D_s^-}^{\text{obs}} = 320 \pm 56 \pm 81\text{pb}^{[3]}$. 为了减小统计误差,本文中又增加了 \overline{K}^0K^+ 和 \overline{K}^0K^+ 两个衰变模式来共同测定 $D_s^+D_s^-$ 对产生的观测截面. 经过辐射修正后,得到 $D_s^+D_s^-$ 对的产生截面.

D_s^+ 的单标记是研究 D_s^+ 的对产生及其衰变特性的基础. 筛选出的 D_s^+ 单标记数据样本的清晰程度将影响 D_s^+ 遍举相对衰变分支比和单举衰变分支比测定的最可几值和误差,以及产生截面测定的中心值和误差. 因此,本文将从事例筛选和 D_s^+ 单标记分析开始,分别给出 D_s^+ (除特别说明外,本文中各种粒子均包括其电荷共轭态)衰变到 \overline{K}^0K^+ 和 \overline{K}^0K^+ 相对于衰变到 $\phi\pi^+$ 的分支比和 $D_s^+D_s^-$ 的产生截面的测定值.

2 D_s^+ 单标记的分析研究

在 $\sqrt{s}=4.03\text{GeV}$ 处, D_s^+ 是在 e^+e^- 的湮没过程中成对产生的. 由于谱议的几何接收度,粒子的探测效率,在线数据获取的触发效率和数据离线处理的重建效率等因素,对于大部份的事例仅有一个 D_s^+ 可以被完整地重建出来. 这个可以被完整地做不变质量重建的 D_s^+ 称为 D_s^+ 的单标记.

利用选出的 D_s^+ 单标记样本,可以测定 D_s^+ 的纯轻子衰变分支比^[4]、半轻子衰变分支比^[5]、绝对分支比^[3]、单举衰变分支比^[6]和 $D_s^+D_s^-$ 产生截面. 从单标记的分析研究中还可以精确地测定 D_s^+ 的质量. D_s^+ 单标记的分析研究和样本的筛选,是在 D_s^+ 对产生过程中研究 D_s^+ 物理的基础.

2.1 事例筛选

事例的筛选条件是根据 D_s^+ 介子衰变的末态特征设定的.

首先荷电径迹要通过一些预选条件以便去掉大部分本底. 这些预选条件包括:事例中每一条荷电径迹动量模的和要大于 $1.5\text{GeV}/c$;径迹碰撞参数的平均值在 xy 平面上的分量小于 1.2cm (来自于 K_s^0 衰变产生的 $\pi^+\pi^-$ 不做此要求)、在 z 方向上的分量小于 20cm ;每个事例中至少要有3条荷电径迹在主漂移室中被很好地重建出;为了优化动量测量和粒子识别,要求荷电径迹在 $|\cos\theta| < 0.8$ 的立体角范围内,此处 θ 是径迹方向与束流方向的夹角.

通过预选的径迹,由TOF和 dE/dx ^[7]联合判别粒子类型以便赋予质量. 每一条径迹对于 π 或 K 的假设要求预期的飞行时间(或 dE/dx)与测量的飞行时间(或 dE/dx)的差在 $3\sigma_{\text{TOF}}$ (或 $3\sigma_{dE/dx}$)之内一致. 在此基础上,如果归一化的似然函数值的比 $LR_{\text{TOF}, dE/dx}^{K(\pi)} \geq 0.5$,则该径迹被认定为 $K(\pi)$. 这里 $LR_{\text{TOF}, dE/dx}^{K(\pi)}$ 被定义为

$$LR_{\text{TOF}, dE/dx}^{K(\pi)} = \frac{e^{-0.5(\Delta_{\text{TOF}}^{K(\pi)})^2} e^{-0.5(\Delta_{dE/dx}^{K(\pi)})^2}}{e^{-0.5(\Delta_{\text{TOF}}^K)^2} e^{-0.5(\Delta_{dE/dx}^K)^2} + e^{-0.5(\Delta_{\text{TOF}}^{\pi})^2} e^{-0.5(\Delta_{dE/dx}^{\pi})^2}}, \quad (2.1)$$

其中

$$\Delta_{\text{TOF}} = \frac{T_{\text{测量}} - T_{\text{预期}}}{\sigma_{\text{TOF}}}; \quad (2.2)$$

$$\Delta_{dE/dx} = \frac{dE/dx_{\text{测量}} - dE/dx_{\text{预期}}}{\sigma_{dE/dx}}, \quad (2.3)$$

式中 $T_{\text{测量}}$ 和 $dE/dx_{\text{测量}}$ 分别是荷电粒子的飞行时间和在漂移室工作气体中最可几电离能损; $T_{\text{预期}}$ 和 $dE/dx_{\text{预期}}$ 分别是在假定该荷电粒子是 K 或 π 的情况下预期的飞行时间和最可几电离能损值^[7].

通过粒子识别的径迹按照确定的末态 ($K^+ K^- \pi^+$ 和 $\pi^+ \pi^- K^+$) 做各种可能的组合并计算每一种组合的总能量 E . 要求总能量在 $\pm 50\text{MeV}$ 内与束流能量一致. 此要求对应 $2.5\sigma_E$ 的判选条件.

假定通过能量选择的每一种组合的径迹都来自过程 $e^+ e^- \rightarrow X \bar{X}$ 中母体 X 或 \bar{X} 的衰变, 对每一种组合做能量守恒的 1C 运动学拟合. 凡满足 1C 拟合的几率大于 15% (对于 $K^+ K^- \pi^+$ 道) 或 25% (对于 $\pi^+ \pi^- K^+$ 道) 的组合都被接收作为候选组合而进一步地被分析研究. 对于有些事例, 满足这种拟合的候选组合可能有两种或两种以上. 在事例分析、分支比和截面计算中将对多种组合做修正.

2.2 事例分析

为了在候选的事例中找出特定衰变模式的事例, 并且进一步地压低组合背景, 还要根据衰变模式和事例的拓扑对候选事例做进一步的分析判选.

2.2.1 $\phi\pi^-$ 衰变模式

在此衰变模式中, 只研究 $K^+ K^- \pi^+$ 的特定终态. 图 1(a) 给出在通过判选条件事例的候选组合中 $K^+ K^-$ 的不变质量随 $K^+ K^- \pi^+$ 不变质量分布的散点图. 在 $m_{K^+ K^- \pi^+} = 1.97\text{GeV}$ 和 $m_{K^+ K^-} = 1.02\text{GeV}$ 邻近区域, 出现一个集中分布的事例集, 它们对应 D_s^+ 衰变到 $\phi\pi^+$ 的事例. 把图 1(a) 中凡满足 $|m_{K^+ K^- \pi^+} - 1968.8| < 15\text{MeV}$ 的组合点投影到 $K^+ K^-$ 不变质量坐标, 观测到如图 1(b) 所示的 ϕ 信号, 它对应 $D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+$ 衰变中的 ϕ . 由于 D_s^+ 的自旋为 0, 它衰变到一个自旋为 1 的 ϕ 和一个自旋为 0 的 π^+ , 因此 ϕ 必定处在螺旋度等于零的态中, 从而使 K^+ 的螺旋角 θ_{K^+} (即在 ϕ 的静止坐标系中 K^+ 的运动方向与在 D_s^+ 的静止坐标系中 ϕ 的运动方向的夹角) 具有 $\cos^2 \theta_{K^+}$ 的分布形式. 图 1(c) 给出在满足 $|m_{K^+ K^- \pi^+} - 1968.8| < 15\text{MeV}$ 并且 $|m_{K^+ K^-} - 1020| < 18\text{MeV}$ 的候选组合中 $\cos \theta_{K^+}$ 的分布. 其分布形式与预期的 $\cos^2 \theta_{K^+}$ 一致. 图中的曲线是拟合的结果, 圆点是蒙特卡罗模拟的结果. 实验数据和蒙特卡罗模拟结果都没有做接收度的校正.

为了进一步压低偶然组合的背景, 根据 $D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+$ 事例拓扑, 要求每一种组合均满足 $|\cos \theta_{K^+}| \geq 0.25$. 蒙特卡罗数据的研究表明, 此选择条件仅丢掉约 4% 的好事例, 但却可以排除大量的本底. 在此基础上, 为了选出 $D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+$ 的事例, 在每一种组合中进一步要求 $K^+ K^-$ 的不变质量与 ϕ 的质量差小于 18MeV (对应 $2.5\sigma_m$ 的选择条件), 把图 1(a) 中凡满足这些条件的组合向 $K^+ K^- \pi^+$ 的不变质量坐标轴投影, 得到如图 1(d) 所示的 $\phi\pi^+$ 的不变

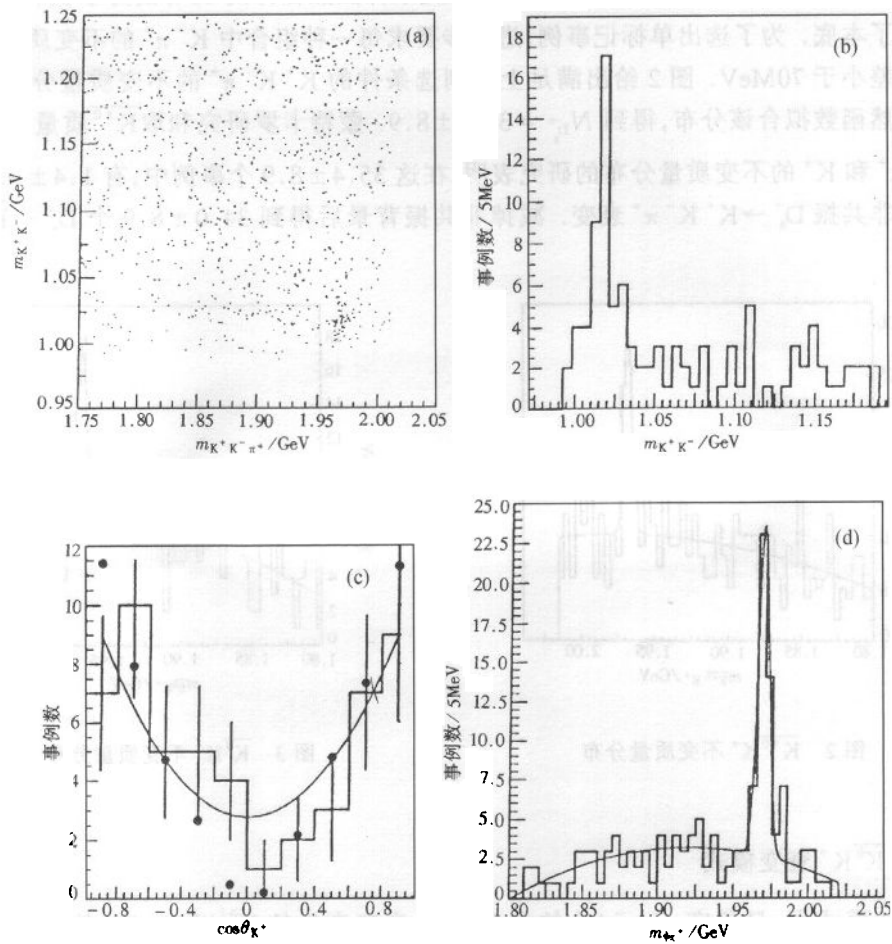


图 1 (a) 候选事例中 K^+K^- 的不变质量随 $K^+K^-\pi^+$ 不变质量分布;(b) K^+K^- 的不变质量分布;(c) $D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+, \phi \rightarrow K^+K^-$ 衰变的候选事例中 K^+ 介子螺旋角 θ_{K^+} 的 $\cos\theta_{K^+}$ 的分布;(d) $\phi\pi^+$ 的不变质量分布

质量分布。整个的分布由相空间的背景和来自 D_s^+ 衰变产生的 $K^+K^-\pi^+$ 的不变质量分布组成。用一个多项式质量函数近似地描述相空间的分布,高斯函数描述来自 D_s^+ 衰变产生的 $K^+K^-\pi^+$ 的不变质量分布,构造一个似然函数来拟合,得到单标记事例数 $N_{D_s^+} = 37.5 \pm 6.5$ 。来自非共振 $D_s^+ \rightarrow K^+K^-\pi^+$ 和 $D_s^+ \rightarrow \overline{K}^{*0}K^+$ 的事例小于 0.5,可以忽略。

2.2.2 $\overline{K}^{*0}K^+$ 衰变模式

在此衰变模式中,也只研究 $K^+K^-\pi^+$ 的特定终态。类似于 $\phi\pi^+$ 衰变模式, \overline{K}^{*0} 衰变产生的 π^+ 介子的螺旋角 θ_{π^+} 也具有 $\cos^2\theta_{\pi^+}$ 的分布形式。由于此模式中末态 K^\pm 和 π^+ 的动量分布范围比 $\phi\pi^+$ 模式中的宽,造成 K^\pm 和 π^+ 的误判率较高。而且, \overline{K}^{*0} 的共振宽度远大于 ϕ 介子的共振宽度,这使得 $\overline{K}^{*0}K^+$ 不变质量的组合本底高于 $\phi\pi^+$ 的本底。为了优化信

噪比,要求每一种组合满足 $|\cos\theta_{\pi^+}| \geq 0.45$. 此条件虽然丢掉约 15% 的好事例,但却大大地压低了本底. 为了选出单标记事例,进一步要求每一种组合中 $K^+ K^- \pi^+$ 的不变质量与 \overline{K}^{*0} 质量的差小于 70 MeV. 图 2 给出满足上述判选条件的 $K^+ K^- \pi^+$ 的不变质量分布. 用同样的似然函数拟合该分布,得到 $N_{D_s^+} = 35.4 \pm 8.9$. 蒙特卡罗研究和取 \overline{K}^{*0} 质量范围之外的 $K^+ \pi^+$ 和 K^+ 的不变质量分布的研究表明,在这 35.4 ± 8.9 个事例中,有 1.4 ± 0.7 个事例来自非共振 $D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$ 衰变. 减掉非共振背景后得到 34.0 ± 8.9 个 $D_s^+ \rightarrow \overline{K}^{*0} K^+$ 事例.

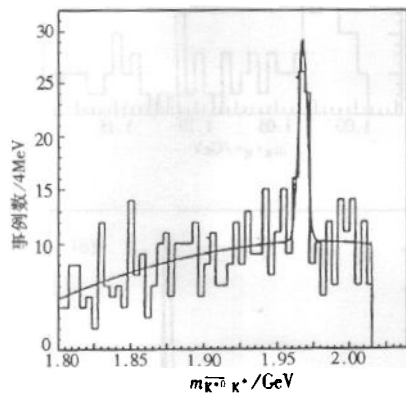


图 2 $\overline{K}^{*0} K^+$ 不变质量分布

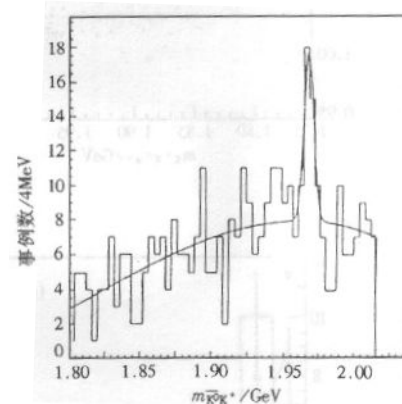


图 3 $\overline{K}^{*0} K^+$ 不变质量分布

2.2.3 $\overline{K}^0 K^+$ 衰变模式

在此模式中,只研究 $\pi^+ \pi^- K^+$ 的末态. D_s^+ 衰变产生的 K^0 以 68.3% 的几率衰变到 $\pi^+ \pi^-$. 根据此衰变模式的拓扑形态和 $\pi^+ \pi^-$ 的不变质量,可以选出单标记事例. 在事例的候选组合中,要求 $\pi^+ \pi^-$ 产生顶点在 xy 平面上的投影 $l_{xy} \geq 0.9 \text{ cm}$, z 向坐标分量差的绝对值小于 3.5 cm. 为了选出 D_s^+ 事例,进一步要求 $\pi^+ \pi^-$ 的不变质量与 K^0 的质量差小于 25 MeV. 图 3 给出满足上述条件的 $\overline{K}^0 K^+$ 的不变质量分布. 用同样的质量分布函数拟合这个分布,得到 $N_{D_s^+} = 22.0 \pm 7.3$.

2.2.4 D_s^+ 单标记样本总数

联合 $D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+$, $\overline{K}^{*0} K^+$ 和 $D_s^+ \rightarrow \overline{K}^0 K^+$ 3 个单标记模式,共找到 D_s^+ 单标记事例总数为 94 ± 13 .

3 相对衰变分支比的测定

D_s^+ 的第 i 个衰变模式相对于 $\phi \pi^+$ 衰变模式的相对分支比 $\frac{Br^{mode(i)}}{Br^{\phi\pi^+}}$ 仅依赖于在两个衰

变模式中观测到的单标记者例数 $N(D_s^+ \rightarrow \text{mode}(i))$, $N(D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+)$ 和它们的接收度 $A_{MC}^{\text{mode}(i)}$ 和 $A_{MC}^{\phi\pi^+}$, 并可以表示为

$$\frac{Br^{\text{mode}(i)}}{Br^{\phi\pi^+}} = \frac{N(D_s^+ \rightarrow \text{mode}(i)) \times A_{MC}^{\phi\pi^+}}{N(D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+) \times A_{MC}^{\text{mode}(i)}}. \quad (3.1)$$

3.1 接收度

此处的接收度是谱仪硬件系统对该事例的接收效率,重建程序对每个衰变事例的重建效率和分析程序对该事例判选、分析效率的总和.

为了求出接收度,利用 $e^+e^- \rightarrow D_s^+D_s^-$ 的蒙特卡罗产生子,要求其中一个 D_s^+ 分别 100% 地衰变到 $\phi\pi^+$, $\overline{K}^{*0}K^+$ 和 \overline{K}^0K^+ , 另一个 D_s^- 按照已测量出的分支比随机地衰变到可能的末态. 这种蒙特卡罗事件的物理数据通过 BES 探测器模拟程序,生成蒙特卡罗模拟数据,对它们进行事例重建,再通过 D_s^+ 单标记者例的筛选和分析程序,求出每个衰变模式的单标记者例数,从而可以计算出对每个单标记道的接收度.

表 1 列出了 3 个 D_s^+ 单标记模式的接收度. 在计算接收度过程中,已对单个事例中的多种组合、落入 D_s^+ 信号区内的偶然组合本底及来自另一侧的 D_s^- 单标记者例数做了修正.

3.2 $D_s^+ \rightarrow \overline{K}^{*0}K^+$ 和 $D_s^+ \rightarrow \overline{K}^0K^+$ 的相对分支比

将从各道观测到 D_s^+ 单标记者例数及各道的接收度代入到(3.1)式,可计算出 D_s^+ 衰变的相对分支比. 其结果列于表 1. 其中第一项误差是统计误差,第二项为系统误差,系统误差主要来源于蒙特卡罗接收度的不确定性和质量谱拟合范围及背景多项式的变化,而其它绝大多数系统误差的贡献在此比值中已经自动相互抵消. 作为对比,表中也列出了 1998 年世界平均的相对分支比值(PDG98)^[8]. 从表 1 中可以看出,本实验测定的相对分支比与世界平均值在误差范围内一致. 因此,可以联合 3 个衰变道一起测定 $D_s^+D_s^-$ 产生的观测截面.

表 1 3 个 D_s^+ 衰变模式的接收度和测定的相对分支比

	$\phi\pi^+$	$\overline{K}^{*0}K^+$	\overline{K}^0K^+
接收度 A_{MC}^{mode}	0.0674	0.0731	0.0435
$\frac{Br^{\text{mode}}}{Br^{\phi\pi^+}}$	1	$0.84 \pm 0.26 \pm 0.13$	$0.91 \pm 0.34 \pm 0.13$
PDG98 $\frac{Br^{\text{mode}}}{Br^{\phi\pi^+}}$	1	0.92 ± 0.34	1.00 ± 0.39

取 PDG98^[8] 给出的 $D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+$ 的分支比 $Br(D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+) = (3.6 \pm 0.9)\%$, 根据表 1 中列出的相对分支比,得到 $D_s^+ \rightarrow \overline{K}^{*0}K^+$ 和 $D_s^+ \rightarrow \overline{K}^0K^+$ 的分支比分别为

$$Br(D_s^+ \rightarrow \overline{K}^{*0}K^+) = (3.02 \pm 0.94 \pm 0.91)\%$$

和

$$Br(D_s^+ \rightarrow \overline{K}^0K^+) = (3.28 \pm 1.22 \pm 0.94)\%,$$

其中第一项误差是统计误差,第二项为系统误差. 此处的系统误差又增加了一项归一化分支比的不确定性. 此结果与 PDG98^[8] 给出的世界平均值 $Br(D_s^+ \rightarrow \overline{K}^{*0} K^+) = (3.3 \pm 0.9)\%$ 和 $Br(D_s^+ \rightarrow \overline{K}^0 K^+) = (3.6 \pm 1.1)\%$ 在误差范围内一致.

4 $D_s^+ D_s^-$ 对产生截面的测定

4.1 $D_s^+ D_s^-$ 对产生截面的测定方法

基于 D_s^+ 单标记的分析,可以测出 $D_s^+ D_s^-$ 对产生的观测截面 $\sigma_{D_s^+ D_s^-}^{\text{obs}}$. $\sigma_{D_s^+ D_s^-}^{\text{obs}}$ 与观测到的单标记事例总数 N_{D_s} 及数据样本的总积分亮度 $\int L dt$ 的关系如下:

$$N_{D_s} = 2 \int L dt \sigma_{D_s^+ D_s^-}^{\text{obs}} \sum_{i=1}^n Br^{\text{mode}(i)} A_{MC}^{\text{mode}(i)}, \quad (4.1)$$

式中 n 是用于测定产生截面的 D_s^+ 单标记衰变模式数. 离线分析过程中只要找到对应 n 个衰变模式的 D_s^+ 单标记事例总数,估算出各道的接收度,再根据衰变到该模式的分支比,就可以测定 $\sigma_{D_s^+ D_s^-}^{\text{obs}}$. 通过辐射修正,从观测截面 $\sigma_{D_s^+ D_s^-}^{\text{obs}}$ 可以计算出产生截面 $\sigma_{D_s^+ D_s^-}^{\text{prod}}$.

4.2 $D_s^+ D_s^-$ 对产生的观测截面

基于 D_s^+ 单标记的分析,联合 3 个衰变模式中观测到的 D_s^+ 单标记事例总数 $N(D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+, K^{*0} K^+, \overline{K}^0 K^+)$ 、总的积分亮度、各衰变模式的接收度和分支比,可由下式测定 $D_s^+ D_s^-$ 产生的观测截面,

$$\sigma_{D_s^+ D_s^-}^{\text{obs}} = \frac{N(D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+, \overline{K}^{*0} K^+, \overline{K}^0 K^+)}{2 \int L dt (Br^{\phi\pi^+} A_{MC}^{\phi\pi^+} + Br^{K^{*0} K^+} A_{MC}^{K^{*0} K^+} + Br^{\overline{K}^0 K^+} A_{MC}^{\overline{K}^0 K^+})}. \quad (4.2)$$

式中分母中的因子 2 表示对于实际数据,作单标记分析时并不区分对产生中的 D_s^+ 和 D_s^- .

将经过单标记分析得到 $D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+, \overline{K}^{*0} K^+, \overline{K}^0 K^+$ 3 个衰变模式的 94 ± 13 个 D_s^+ 单标记事例数、表 1 给出的接收度、PDG98^[8] 给出的各道衰变的分支比和 22.3 pb⁻¹ 的积分亮度,代入式(4.2),求得 $D_s^+ D_s^-$ 对产生的观测截面为

$$\sigma_{D_s^+ D_s^-}^{\text{obs}} = (330 \pm 46 \pm 84) \text{pb},$$

其中第一项误差是统计误差,第二项是系统误差. 系统误差测定的主要依据是事例筛选和分析等条件的变化对观测截面的影响. 其中也包括亮度、接收度、分支比的不确定性. 这些不确定性对截面测定值的影响约为 25%.

4.3 $e^+ e^-$ 的初态辐射修正和 $D_s^+ D_s^-$ 对的产生截面^[9]

由于初态的正负电子在产生 $D_s^+ D_s^-$ 对时还会辐射出光子,正负电子之间也会交换虚光子即产生顶角修正,这些被称作初态修正的过程会影响 $D_s^+ D_s^-$ 对的产生截面. 实验中

观测到的截面与理论上的玻恩级截面的关系为^[9]:

$$\sigma_{\text{obs}}(s) = \int_0^{x_{\text{max}}} dx \cdot F(x, s) \tilde{\sigma}_B(s(1-x)), \quad (4.3)$$

其中 $\tilde{\sigma}_B(s) = \sigma_B(s) |1-n(s)|^{-2}$, $\sigma_B(s)$ 为玻恩级截面, $|1-n(s)|^{-2}$ 为真空极化因子, x_{max} 由 $D_s^+D_s^-$ 对产生的能量阈值 $s_{\text{thres}} = (2m_{D_s})^2 = s(1-x_{\text{max}})$ 决定; 函数 $F(x, s)$ 在文献[10]中绘出. 公式(4.3)依赖于在实验点的能量之下玻恩级截面随能量的变化行为. 对此, 本文中辐射修正是基于 Couple-Channel Model 和 P-wave phase space 机制而做的. 根据每一种理论模型, 计算出观测截面 σ_{obs} 与产生截面即玻恩级截面 σ_B 的比

$$g(D_s^+D_s^-)_{\text{mode}} = \frac{\sigma_{\text{obs}}}{\sigma_B}$$

在 $\sqrt{s}=4.03\text{GeV}$ 处, 根据两种理论模型计算出的辐射修正的系数为^[9]

$$g(D_s^+D_s^-) = 0.73 \pm 0.04,$$

两个模型预期值之差的一半被设定为辐射修正系数的系统误差.

通过对 $D_s^+D_s^-$ 对产生的观测截面做辐射修正, 可以得到在 $\sqrt{s}=4.03\text{GeV}$ 能量下 $D_s^+D_s^-$ 对产生的截面

$$\sigma_{D_s^+D_s^-}^{\text{pred}} = \frac{\sigma_{D_s^+D_s^-}^{\text{obs}}}{g(D_s^+D_s^-)} = (451 \pm 63 \pm 118)\text{pb}.$$

5 小结

利用 BES 在 BEPC 质心系能量 4.03GeV 处获取的 $\int L dt = 22.3 \pm 0.9 \text{ pb}^{-1}$ 的数据基于 3 个 D_s^- 单标记道共观测到 94 ± 13 个 D_s^+ . 利用 PDG98^[8]给出的 $D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+$ 的分支比, 测定 $D_s^+ \rightarrow \overline{K}^{*0}K^+$ 和 $D_s^+ \rightarrow \overline{K}^0K^+$ 的分支比分别为 $Br(D_s^+ \rightarrow \overline{K}^{*0}K^+) = (3.02 \pm 0.94 \pm 0.91)\%$ 和 $Br(D_s^+ \rightarrow \overline{K}^0K^+) = (3.28 \pm 1.12 \pm 0.94)\%$, 与 PDG98^[8]给出的分支比在误差范围内一致. 联合这 3 个单标记道测得 $D_s^+D_s^-$ 产生截面 $\sigma_{D_s^+D_s^-}^{\text{pred}} = (451 \pm 63 \pm 118)\text{pb}$, 其中心值明显地小于双耦合道^[1]预期的 $\sigma_{D_s^+D_s^-}^{\text{Th(CCM)}} \approx 750\text{pb}$.

感谢与 M. Mendelkern 教授, J. Scherltz 教授和 W. Dunwoodie 教授多次有益的讨论.

参考文献 (References)

- 1 Eichten E et al. Phys. Rev., 1980, **D21**:203; Lockman W S. Mark III Memorandum. D and D_s Production in the Range $3.8 < \sqrt{s} < 4.5\text{GeV}$, 1987
- 2 DING Hui-Liang et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1992, **16**(9):769—789 (in Chinese); (丁慧良等. 高能物理与核物理, 1992, **16**(9):769—789)
- BAI Jing-Zhi et al. NIM., 1994, **A344**:319—334
- 3 BAI Jing-Zhi et al (BES Collab.). Phys. Rev. D, 1995, **52**(7):3781—3784

- 4 BAI Jing-Zhi et al (BES Collab.). Phys. Rev. Lett. ,1995,74(23):4599—4602
- 5 BAI Jing-Zhi et al (BES Collab.). Phys. Rev. ,1997,D56(7):3779—3782
- 6 BAI Jing-Zhi et al (BES Collab.). Phys. Rev. ,1998,D57:28; RONG Gang (BES Collab.). Direct Measurement of $B(D_s^+ \rightarrow K^{*0} X)$ and $B(D_s^+ \rightarrow K^{*0} X)$. Talk Given at Hadron'99. Beijing,1999; Nucl. Phys. ,2000,A675:363c
- 7 RONG Gang et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. ,1996,20(7):577—587(in Chinese)
(荣刚等. 高能物理与核物理,1996,20(7):577—587)
- 8 Haidt D et al. The European Physical Journal C,1998,3:1—4
- 9 BAI Jing-Zhi et al (BES Collab.). Contribution Paper to ICHEP'98. Canada.1998
- 10 Sov J. Nucl. Phys. ,1985,41:466

**Measurement of Production Cross Section of $D_s^+ D_s^-$ in
 $e^+ e^-$ Annihilation at the Center-of-Mass Energy
of $\sqrt{s} = 4.03\text{GeV}^*$**

BAI Jing-Zhi BAN Yong⁵ BIAN Jian-Guo CHEN Ai-Dong CHEN Guang-Pei CHEN Hong-Fang¹ CHEN He-Sheng CHEN Jiang-Chuan CHEN Xin-Dong CHEN Yu CHEN Yuan-Bo CHENG Bao-Sen CUI Xiang-Zong DING Hui-Liang DONG Liao-Yuan⁷ DU Zhi-Zhen GAO Cui-Shan GAO Mei-Li GAO Shu-Qi GU Jian-Hui GU Shu-Di GU Wei-Xin GUO Zi-Jin GUO Ya-Nan HAN Shi-Wen HAN Ying HE Jing-Tang HE Ju HE Kang-Lin HE Mao² HENG Yue-Kun HU Gui-Yun HU Hai-Ming HU Jing-Liang HU Qiong-Hui HU Tao HUANG Xiu-Ping HUANG Guang-Shun⁷ HUANG Yin-Zhi JIANG Chun-Hua JIN Yan JU Xin KE Zun-Jian LAI Yuan-Fen LANG Peng-Fe LI Can-Guo LI De LI Hai-Bo⁷ LI Jia-Cai LI Jin LI Pei-Qin LI Wei LI Wei-Guo L. Xiao-Nan LI Xin-Hua LI Xue-Qian⁸ LI Zhong-Chao LIU Bin LIU Feng⁶ LIU Huai-Min LIU Jing LIU Jue-Ping¹⁰ LIU Rong-Guang LIU Yan LIU Zhong-Xiu LIU Feng LU Gong-Ru⁹ LÜ Feng LÜ Jun-Guang LUO Xiao-Lan MA En-Cheng MA Ji-Mac MAO Hui-Shun MAO Ze-Pu MENG Xiang-Cheng MO Xiao-Hu NIE Jing QI Na-Ding QI Xiang-Rong⁵ QIAN Cheng-De⁴ QU Yun-He QIU Jin-Fa QUE You-Kun RONG Gang¹¹ SHAO Yu-Ying SHEN Ben-Wei SHEN Ding-Li SHEN Hong SHEN Xiao-Yan SHENG Hua-Yi SHI Feng SHI Huan-Zhang SONG Xiao-Fei SUN Han-Sheng SUN Liang-Feng SUN Yong-Zhao TANG Su-Qiu TONG Guo-Liang WANG Feng WANG Lan WANG Lin-Zhou WANG Ling-Shu WANG Pei-Liang WANG Ping WANG Shao-Min WANG Yun-Yong WANG Zhi-Yong WEI Cheng-Lin WU Ning WU Yi-Gen XI De-Ming XIA Xiao-Mi XIE Yue-Hong XU Guo-Fa XUE Sheng-Tian YAN Jie YAN Wu-Guang YANG Chang-You YANG Chun-Min YANG Hong-Xun YANG Xiao-Feng YE Ming-Han YE Shu-Wei¹ YE Yun-Xiu¹ YU Chuan-Song YU Chun-Xu YU Guo-Wei YU Yan-Hua³ YU Zhong-Qiang YUAN Chang-Zheng YUAN Ye ZHANG Bing-Yun ZHANG Chang-Chun ZHANG Chun ZHANG Da-Hua ZHANG

De-Hong ZHANG Hui-Ling ZHANG Jian ZHANG Jia-Wen ZHANG Liang-Sheng
 ZHANG Lei ZHANG Lin ZHANG Qin-Jian ZHANG Shao-Qiang ZHANG Xue-Yao²
 ZHANG Yue-Yuan ZHANG Ping ZHAO Di-Xin ZHAO Hai-Wen ZHAO Jia-Wei¹
 ZHAO Ling-Wei ZHAO Meng ZHAO Wei-Ren ZHAO Zheng-Guo ZHENG Jian-Ping
 ZHENG Lin-Sheng ZHENG Zhi-Peng ZHOU Bao-Qing ZHOU Li ZHU Ke-Jun ZHU
 Qi-Ming ZHU Yong-Sheng ZHU Yu-Can ZHU Zi-An ZHUANG Bao-An

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

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

2 (Department of Physics, Shandong University, Jinan 250100, China)

3 (Department of Physics, Hangzhou University, Hangzhou 310028, China)

4 (Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

5 (Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

6 (Institute of Particle Physics, Hua Zhong Normal University, Wuhan 430079, China)

7 (China Center for Advanced Science and Technology (CCAST), Beijing 100080, China)

8 (College of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

9 (College of Physics and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453002, China)

10 (College of Physics and Electronic Information Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract Measurement of the production cross section of the $D_s^+D_s^-$ in e^+e^- annihilation at the Center-of-Mass Energy of $\sqrt{s}=4.03\text{ GeV}$ is reported in the paper. The cross section for the $D_s^+D_s^-$ production has been measured using a data sample of 22.3 pb^{-1} collected with BES detector at BEPC e^+e^- collider. The D_s^+ mesons are reconstructed in the $\phi\pi^+$, $\overline{K}^{*0}K^+$ and \overline{K}^0K^+ decay modes. A total number of 94 ± 13 singly tagged D_s^+ events is obtained from the three modes. This yields the cross section value $\sigma_{D_s^+D_s^-}^{\text{prod}} = (451 \pm 63 \pm 118)\text{ pb}$ for $D_s^+D_s^-$ production. Based on the numbers of singly tagged D_s^+ events for each of the three decay modes, the decay branching fractions for $D_s^+ \rightarrow \overline{K}^{*0}K^+$ and \overline{K}^0K^+ have been determined to be $(3.02 \pm 0.94 \pm 0.91)\%$ and $(3.28 \pm 1.22 \pm 0.94)\%$, respectively.

Key words Beijing Electron Positron Collider (BEPC), Beijing Spectrometer (BES), D_s^+ Meson, D_s^+ single tag, branching fraction, production cross section, radiative correction

Received 10 May 2000, Revised 18 January 2001

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

1) Corresponding Author: RONG Gang