

层.在短程力情况下,其厚度按 $|\ln(T_m - T)|$ 规律增长.在类液层和气相界面处,有序参量随 $T$ 按 $(1 - T/T_m)^{-1}$ 规律衰减.临界指数 $\nu$ 的值依赖于固/类液界面的非局域和粗糙程度.最近,对表面熔化的微观研究已发展起来,主要以平均场点阵理论为基础.将这一理论用于具有长程相互作用的Lennard - Jones(LJ)系统,得到无序层厚度的增长规律为 $N_{eq} \sim (T_m - T)^{-1/3}$ .对面心立方金属,在给定温度下,开放 $\{110\}$ 面上的无序层厚度大于 $\{100\}$ 面.

对Ge(111)表面熔化的理论研究也有所进展.1994年,Takeuchi<sup>[20]</sup>等用第一原理分子动力学首次研究了高温Ge(111)表面的相变.结果清楚表明了动力学无序.由晶体到无序表面的转变伴随着表面电子结构的重要改变.由电子态密度的计算揭示:表面存在明显的金属化,更深层保持为半导体.金属化的出现主要是由于第一个双层内大部分分子失去了共价键.Takeuchi等对Ge(111)不完全熔化的物理原因进行了分析,指出:金属化是Ge(111)表面熔化开始并在第一个双层内停止的原因.此理论亦完全可能适合于其他半导体.

### 参 考 文 献

[ 1 ] Frenken J W M, van der Veen J F. Phys. Rev. Lett. , 1985 , 54 : 134 — 137  
 [ 2 ] Stock K D, Menzel E. Surf. Sci. , 1976 , 61 : 272 — 274

[ 3 ] Lagally M. Kinetics of Ordering and Growth at Surfaces. New York : Academic Press, 1990. 343 — 354  
 [ 4 ] Pluis B, Taylor T N, Frenkel D *et al.* Phys. Rev. B , 1989 , 40 : 1353 — 1356  
 [ 5 ] Polcik M, Wilde L, Hanse J. Phys. Rev. Lett. , 1997 , 78 : 491 — 494  
 [ 6 ] Zhu D M, Dash J G. Phys. Rev. Lett. , 1986 , 57 : 2959 — 2962  
 [ 7 ] Larese J Z, Zhang Q M. Phys. Rev. Lett. , 1990 , 64 : 922 — 925  
 [ 8 ] Faraday M. Philos. Mag. , 1859 , 17 : 162 — 195  
 [ 9 ] Beaglehole D, Nason D. Surf. Sci. , 1980 , 96 : 357 — 363  
 [ 10 ] Lied A, Dosch H, Bilgram J H. Phys. Rev. Lett. , 1994 , 72 : 3554 — 3557  
 [ 11 ] Fletcher N H. Philos. Mag. , 1968 , 18 : 1287 — 1300  
 [ 12 ] Makkonen L. J. Phys. Chem. B , 1997 , 101 : 6196 — 6200  
 [ 13 ] McRae E G, Malic R A. Phys. Rev. Lett. , 1987 , 58 : 1437 — 1440  
 [ 14 ] Abraham M, Lay G Le, Hila J. Phys. Rev. B , 1990 , 41 : 9828 — 9835  
 [ 15 ] Mak A, Evans-Lutterodt K W, Blum K *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1991 , 66 : 2002 — 2005  
 [ 16 ] Modesti S, Dhanak V R, Sancrotti M *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1994 , 73 : 1951 — 1954  
 [ 17 ] Meli C A, Greene E F. Phys. Rev. Lett. , 1995 , 74 : 2054 — 2057  
 [ 18 ] Vanselow R, Howe R F. Chemistry and Physics of Solid Surfaces , Springer - Verlag. Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo : Academic Press, 1988. 455 — 489  
 [ 19 ] Lipowsky R, Speth W. Phys. Rev. B , 1983 , 28 : 3983 — 3993  
 [ 20 ] Takeuchi N, Selloni A, Tosatti E. Phys. Rev. Lett. , 1994 , 72 : 2227 — 2230

## 北京谱仪 D<sub>s</sub> 物理研究新进展 \*

顾建辉 张长春 李卫国

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘 要** 简要介绍了北京谱仪 D<sub>s</sub> 物理研究的背景,北京谱仪和北京正负电子对撞机已取得的几项物理结果的内容,及其对国际粒子物理研究的贡献.

**关键词** D<sub>s</sub>, 北京谱仪

\* 国家自然科学基金重大项目

1998 - 07 - 23 收到初稿, 1998 - 12 - 11 修回

# D<sub>s</sub> PHYSICS AT BES

Gu Jianhui Zhang Changchun Li Weiguo

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract** After a short introduction to particle physics, BES and BEPC several D<sub>s</sub> research results and their contribution to particle physics are described.

**Key words** D<sub>s</sub>, Beijing spectrometer (BES)

## 1 引言

### 1.1 粒子物理简介

粒子物理是研究基本粒子的性质及其相互作用的学科。大家都知道,物质是由原子组成的,原子是由原子核和电子组成的,原子核是由质子和中子组成的,质子和中子又是由夸克组成的。到目前为止,实验物理学家还没有观测到夸克和电子有更微小的结构,所以称它们为基本粒子。标准模型是粒子物理中被越来越多的实验所证实的理论,它包括弱电统一理论和量子色动力学。在标准模型中,夸克共有6种,分为3代,即

u	c	t
d	s	b

夸克带有分数电荷,  $u, c, t$  带  $+2/3e$  电荷,  $d, s, b$  带  $-1/3e$  电荷,其中  $e$  为电子电荷的绝对值。反夸克是夸克的电荷对称粒子,所带电荷相反,即:  $\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}$  带  $-2/3e$  电荷,  $\bar{d}, \bar{s}, \bar{b}$  带  $+1/3e$  电荷。夸克的质量相差很大,  $u, d$  夸克的质量仅有约  $10\text{MeV}$ , 即约为  $1\%$  的质子质量,而  $t$  夸克则有约  $180\text{GeV}$ , 即约为  $200$  倍的质子质量。 $c$  夸克的质量约为  $1.5\text{GeV}$ , 即约为  $2$  倍的质子质量。夸克间的作用有强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和引力相互作用。在微观领域中,引力相互作用相对于其他3种作用弱得多,是可以忽略的。强相互作用通过胶子作用,弱相互作用通过  $W, Z$  作用,电磁相互作用则通过光子作用。由夸克组成的粒子称为强子,而其中由3个夸克或反夸克组成的强子称为重子,如质子由  $uud$  三个夸克组成,中子由  $udd$  三个夸克组成。由1个夸克和1个反

夸克组成的粒子称为介子,如  $\pi^+$  介子由  $u\bar{d}$  组成,  $K^+$  介子由  $\bar{s}u$  组成。在标准模型中,基本粒子还包括轻子,轻子也分为3代,即

e	$\mu$	$\tau$
---	-------	--------

其中  $e, \mu, \tau$  带电荷相同,为电子的电荷,  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  为中性,不带电荷。

### 1.2 粲夸克的发现及带粲强子

1974年,丁肇中、Richter各自领导的实验小组分别在固定靶和对撞机实验上几乎同时独立地观测到质量很大,而寿命很长的一个共振态,即由第4种夸克组成的介子<sup>[1]</sup>,两人因此分享了诺贝尔物理奖。当时他们所发现的为  $c$  夸克及其反夸克组成的介子  $c\bar{c}$ , 定名为  $J/\psi$ 。后来人们发现在  $c\bar{c}$  家族中还有  $\chi_c, \chi_{c1}, \chi_{c2}$  等不同态。直到1976年才发现由  $c$  夸克和其他反夸克组成的介子,即  $D$  介子。到1983年发现  $D_s$  即  $c\bar{s}$  的最低能级态。粲夸克是第1个重夸克,即粲夸克比许多常见的介子重。粲物理开辟了一个崭新的研究领域,这是一场从基于强子的物理到基于夸克的物理研究的革命,所以具有独特的研究意义。粲介子的产生和衰变是粲物理的重要内容之一。

### 1.3 D<sub>s</sub> 衰变模型及研究现状

$D_s^+$  是由  $c\bar{s}$  组成的最低能态,同位旋、自旋和宇称为  $I(J^P) = 0(0^-)$ , 质量为  $1968.5 \pm 0.6\text{MeV}$ 。  $D_s^-$  为  $D_s^+$  的电荷共轭态,由  $\bar{c}s$  组成。在以下的讨论中以  $D_s^+$  为例,但仍包含其电荷共轭态。由于  $D_s$  为最低能态,故其衰变只能为弱作用过程(弱衰变),这样,  $D_s$  的寿命较长,约为  $(0.467 \pm 0.017) \times 10^{-12}\text{s}$ 。其衰变主要有两

种模式,即旁观者模式和湮没模式,图1为 $D_s$ 衰变过程费曼图.旁观者模式为其中 $c$ 夸克弱衰变产生虚 $W^+$ 和 $s$ 夸克, $W^+$ 再产生夸克与反夸克,或轻子与中微子等.湮没模式为 $c\bar{s}$ 夸克湮没产生虚 $W^+$ , $W^+$ 再产生夸克与反夸克,或轻子与中微子等.

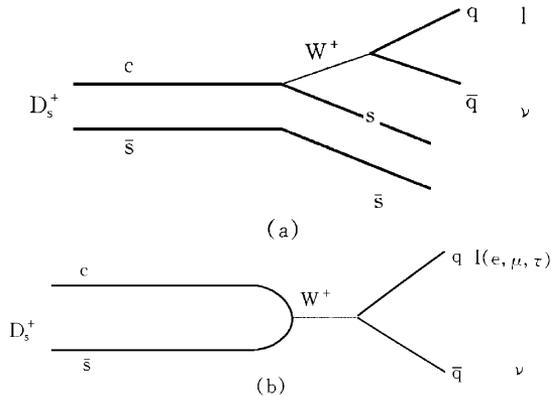


图1  $D_s$ 衰变过程费曼图  
(a)旁观者模式; (b)湮没模式

由于 $c$ 夸克是 $t, b, c$ 三种重夸克中最轻的一种,所以在研究非微扰QCD(量子色动力学)方面具有独特的优势.由于强物理的重要性,国际上有许多小组进行了强物理的研究.固定靶实验和正负电子对撞实验都对粲偶素(charmonium)包括 $J/\psi$ ,等,及 $D$ 介子进行了研究.对 $D_s$ 研究较多的固定靶实验有美国费米实验室的E691等,正负电子对撞实验有美国的MARK, CLEO等.北京谱仪上 $D_s$ 物理研究是在中国科学院高能物理研究所的北京正负电子对撞机(BEPC)及北京谱仪(BES)上完成的.虽然在BES开始 $D_s$ 物理研究前,对 $D_s$ 已有了很多研究,但是,分支比的测量为相对测量,没有不依赖假设的绝对分支比的测量,没有观测到 $D_s$ 纯轻子衰变等.

## 2 BES介绍

### 2.1 BEPC和BES概况

BEPC是1984年动工兴建,于1988年完工的高能物理研究装置,它包括电子直线加速器、输运线和储存环三大部分.直线加速器长约

200m,将电子和正电子加速到1.3GeV(或1.5GeV),并通过输运线注入到储存环中.储存环为周长240m的跑道形加速器,它可以再将正负电子能量加速,其设计最大中心能量(电子、正电子能量之和)为5.6GeV.

正负电子在环内为束团状,其纵向长度为几厘米,横向尺度小于1mm.一般情况下,在环内只有1团正电子,1团负电子,它们沿相同的轨道相向运动,其运转周期为802ns.在每个周期,正负电子在两个对撞点各相遇1次.对撞机的亮度为 $10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 量级.

在其中一个对撞点上建造的BES<sup>[2]</sup>是一个大型通用谱仪,用于测量正负电子对撞产生的末态粒子,如 $K, p, \mu, e$ ,等.它包括多个探测器,从内向外依次为:中心漂移室(CDC)、主漂移室(MDC)、飞行时间计数器(TOF)、电磁簇射量能器(SC)、 $\mu$ 子计数器(MUC)和亮度探测器.在SC与MUC间有螺线管磁铁,在内部产生0.4T的均匀轴向磁场.除探测器外,还有电子学系统、触发判选系统、在线数据获取系统及离线数据处理系统.

### 2.2 BES上的 $D_s$ 数据及粒子识别

在1992年至1994年间,BES在中心能量4.03GeV处取数两年,获得了约 $22.3 \text{pb}^{-1}$ 积分亮度的数据.在作事例分析前,首先要进行粒子识别.光子在SC中有一定的能量沉积,而在内层的MDC和CDC中没有对应的径迹.带电粒子 $K/p$ 由MDC中的能量损失和在TOF上的击中时间组成联合似然函数加以判别.利用TOF和MDC能量损失,以及在SC中的击中图像和沉积能量进行电子识别.对于 $\mu$ 子识别,除MDC的能量损失和飞行时间外,还可以利用最外层的MUC判别 $\mu$ 子.

### 2.3 BES上的 $D_s$ 单标记及双标记

在4.03GeV能量下, $D_s$ 成对产生,而不产生激发态 $D_s^*$ ,这样,每个 $D_s$ 所具有的能量就是质心能量的一半,即2.015GeV.利用这一约束条件作运动学拟合,可以明显地改善 $D_s$ 质量分辨,从而改善 $D_s$ 标记的信噪比.如果只标记其中的一个 $D_s$ 而不管事例的其他部分,称为单标

记;若同时标记一个事例的两个  $D_s$  则称为双标记. 因为  $D_s$  成对产生, 故在标记一个事例的一部分为  $D_s$  后, 该事例的剩余部分必来自另一个  $D_s$ . 这一点是 BES 上  $D_s$  研究的出发点.

### 3 BES 上 $D_s$ 研究结果

#### 3.1 $D_s$ 纯轻子衰变

$D_s$  纯轻子衰变指  $D_s \rightarrow e, \mu$ , 三种过程. 对应图 1 中的湮没过程, 其衰变宽度为

$$\Gamma(D_s \rightarrow l) = \frac{G_F^2}{8} |V_{cs}|^2 f_{D_s}^2 m_{D_s} m_l^2 \left[ 1 - \frac{m_l^2}{m_{D_s}^2} \right]^2$$

其中  $m_l^2$  为轻子质量的平方项, 代表了赝标介子的纯轻子衰变的螺旋度压低因子,  $m_{D_s}$  为  $D_s$  介子的质量,  $G_F$  为弱作用常数,  $V_{cs}$  为  $c, s$  夸克耦合常数,  $f_{D_s}$  为  $D_s$  衰变常数, 它是对  $c, s$  夸克重叠几率的直接度量. 从式中可以看出,  $D_s \rightarrow e$  的分支比将非常小(因电子质量非常小), 故可以忽略. 对  $D_s \rightarrow \mu$  和  $D_s \rightarrow \mu$  过程, 末态都为一个  $\mu$  子, 但事例中丢失的数目不同, 仍可区分这两种过程. 通过测量  $D_s$  纯轻子衰变分支比, 利用  $D_s$  的寿命, 可以从实验上给出  $\Gamma$ , 从而给出  $D_s$  的衰变常数  $f_{D_s}$ . 由于  $D^+$  和  $B^+$  的纯轻子衰变为 Cabibbo 压低过程, 故  $D^+$  和  $B^+$

的衰变常数测量非常困难. 因此  $f_{D_s}$  是实验上比较容易测量的带重夸克的介子衰变常数.  $f_{D_s}$  的测量结果可同格点 QCD 理论计算比较, 以检验非微扰 QCD 理论的正确性. 许多理论对  $f_{D_s}$  作了计算,  $f_{D_s}$  的测量可有效地检验不同的理论计算值, 并且由  $f_{D_s}$  可以比较准确可靠地推算 B 介子的衰变常数  $f_B$ , 而  $f_B$  是研究 CP 破坏、计算  $B\bar{B}$  混合不可缺少的参数. 因此,  $f_{D_s}$  不仅对 D 物理而且对 B 物理都是很重要的.

在 BES 上, 以  $D_s \rightarrow \phi, K^* K, \bar{K}^0 K$  衰变作为单标记, 清楚地观测到  $D_s$  信号, 如图 2 所示. 用最大似然函数法拟合  $D_s$  质量谱得到  $D_s$  的信号数目为 91, 在  $D_s$  的反冲侧找到 3 个纯轻子衰变的候选事例, 其中一个事例反冲侧为单个的电子, 两个事例反冲侧为单个的  $\mu$  子. 图 3 为其中的一个纯轻子衰变候选事例的单事例显示图. 其中, 一个  $D_s$  衰变为  $K^* K (K^* \rightarrow K)$ , 另一个  $D_s$  衰变为  $\mu$ , 穿过探测器而没有留下径迹. 测出  $D_s$  纯轻子衰变的分支比  $B(D_s \rightarrow \mu) = (1.5^{+1.3+0.3}_{-0.6-0.2})\%$ .  $D_s$  介子的衰变常数  $f_{D_s} = (430^{+150+40}_{-130-40}) \text{ MeV}^{[3]}$ .

在分析中还提出另一种方法<sup>[4]</sup>, 即先标记轻子(这里用  $\mu$ ), 再看剩余的部分是否为  $D_s$ , 这样提高了事例标记效率, 改进了统计量, 所得结果与上面的结果在误差范围内一致.

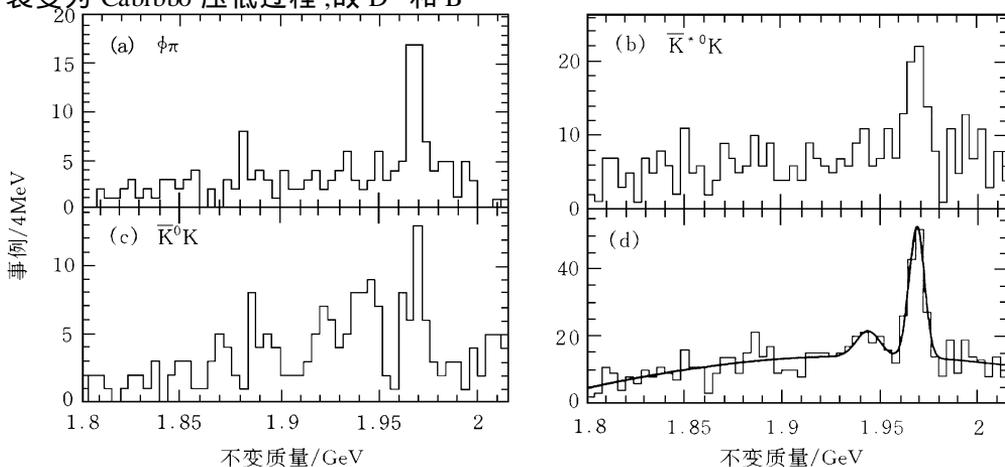


图 2  $D_s$  单标记质量谱

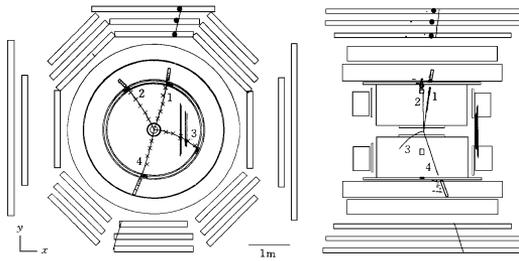


图3 1个纯轻子衰变候选事例的单事例显示图

### 3.2 $D_s$ 绝对分支比

在以前的测量中,例如美国的 CLEO 实验, $D_s$  是单个产生,并且其总数不能直接测量,这样就无法给出  $D_s$  衰变分支比的绝对值,只能给出各衰变道的相对比值,即相对分支比.在美国的 MARK 上,由于其统计很少,故也没有给出  $D_s$  衰变的绝对分支比的测量结果.在 BES 上用  $D_s \rightarrow \phi, K^* K, K_s^0 K$  作双标记,共找到两个双标记事例,用  $D_s \rightarrow \phi$  作单标记归一,给出  $D_s$  的衰变的绝对分支比为:  $B(D_s \rightarrow \phi) = (3.9_{-1.9}^{+5.1+1.8}_{-1.1})\%$  [5].

$D_s$  绝对分支比的测量是  $D_s$  衰变分支比的归一,在过去发表的  $D_s$  衰变道分支比的测量中,60% 是相对于  $D_s \rightarrow \phi$  的分支比的结果.一年之后, CLEO 发表了更为精确的测量结果.这些结果对于  $D_s$  衰变的研究具有重要的标度作用.

### 3.3 $D_s$ 半轻子衰变

$D^+, D^0, D_s^+$  都是包含一个重夸克  $c$  和另一个轻的反夸克  $\bar{d}, \bar{u}, \bar{s}$  的粲介子.按旁观者模式,  $D$  介子的衰变为  $c$  夸克的衰变,另一轻夸克不参与衰变过程,这样  $D$  介子的寿命应近似相等.但事实上,  $D^+$  寿命约为  $D^0, D_s^+$  的两倍,有理论解释是因为在  $D^+$  衰变末态中,强相互作用致使  $D^+$  寿命变长.如果旁观者模式正确,那么  $D^+, D^0, D_s^+$  的半轻子衰变的分宽度应当相等.因为这里不涉及末态强相互作用,仅由  $c$  夸克的衰变决定的.单举半轻子衰变是指在末态中观测到一个轻子即  $e$  或  $\mu$ , 不去分辨其他的粒子.其衰变过程如图 1 的旁观者模式所示.

在 BES 上,以  $D_s \rightarrow \phi, K^* K, K_s^0 K, f_0, K_s^0 K$  作  $D_s$  单标记,找到 159 个  $D_s$  事例,在反冲侧找电子.并且要求除电子外,还有 1 个光

子或带电粒子以区别于纯粒子衰变过程.在去除本底后,最后给出  $D_s \rightarrow eX$  的单举半轻子衰变分支比为:  $B(D_s \rightarrow eX) = (7.7_{-4.3}^{+5.7+2.4}_{-2.1})\%$  [6].利用  $D_s$  的寿命给出  $D_s$  半轻子衰变的分宽度为:

$$\Gamma(D_s \rightarrow eX) = (1.65_{-0.91}^{+1.23+0.51}_{-0.45}) \times 10^{11} \text{ s}^{-1}. \text{ 而}$$

$D^+, D^0$  的半轻子衰变分宽度分别为:  $\Gamma(D^+ \rightarrow eX) = (1.63 \pm 0.18) \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ ,  $\Gamma(D^0 \rightarrow eX) = (1.86 \pm 0.29) \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ .可见,  $D_s, D^+, D^0$  的半轻子衰变的分宽度基本相等.这与重夸克衰变的旁观者模型一致,同时,也提供了  $D^+$  寿命长理论解释的一个实验证据.

### 3.4 $D_s$ 研究的其他物理结果

利用每个  $D_s$  所具有的能量为质心能量的一半作为约束条件作运动学拟合,这样给出  $D_s$  质量测量分辨仅有几个 MeV,可给出精确的  $D_s$  质量.利用图 3 的数据作拟合计算,给出  $D_s$  的质量为  $1968.7 \pm 0.6 \pm 0.5 \text{ MeV}$  [3],与现有的世界平均值一致,并且精度也相当.

我们不仅可以研究  $D_s$  单举半轻子衰变,还可以研究单举  $\phi$  衰变,其过程如图 1 的旁观者模式所示.利用与半轻子衰变类似的方法,给出  $D_s$  单举  $\phi$  衰变的分支比为:  $B(D_s \rightarrow \phi X) = (17.8_{-7.2}^{+15.1+0.6}_{-6.3})\%$ ,如果再利用  $B(D_s \rightarrow \phi) / B(D_s \rightarrow \phi X)$  的理论计算值可推算出  $D_s \rightarrow \phi$  的衰变分支比.所得结果与 3.2 节中的结果一致,这也是对 BES 上物理结果的自我检验 [7].

## 4 BES 上 $D_s$ 物理研究结果意义评述及展望

### 4.1 BES 上 $D_s$ 物理意义评述

在  $D_s$  纯轻子衰变研究方面, BES 于 1993 年就报道了所观测到的两个纯轻子衰变事例,这是世界上最早的报道.由于我们所特有的方法和条件,虽然统计量不如美国的 CLEO 实验组,但 BES 的结果是对  $D_s$  纯轻子衰变分支比的绝对测量,不依赖测量的积分亮度,也不依赖粲产生截面和理论假设.由于 BES 的本底水平很低,还可以作  $D_s$  道研究,这是其他实验

组做不到的。

对于  $D_s \phi$  绝对分支比的测量, BES 最先发表了结果, 并且由于绝对分支比测量的结果, 使得以前对  $D_s \phi$  非直接测量结果不再被《粒子物理综评》<sup>1)</sup> 所引用。

$D_s$  单举半轻子衰变更是 BES 上所独有的物理结果, 因为在 CLEO 等实验上本底太大, 无法完成  $D_s$  单举半轻子衰变的测量, 而在以前的 MARK 实验上, 也因为取得数据太少、统计误差太大而仅能给出其衰变上限。

BES 相对于与它类似的实验组(如 MARK)取得的数据量更大, 并且选取能量点在 4.03 GeV, 不产生  $D_s^*$ , 用束流能量约束作拟合, 大大提高了  $D_s$  标记的信噪比,  $D_s$  物理结果优于同类实验组。

BES 的  $D_s$  物理结果受到国内、国际高能物理界, 包括理论物理和实验物理的重视与接受。BES 上的两项结果, 即  $D_s \mu$  绝对分支比和  $D_s$  衰变常数  $f_{D_s}$ , 以及  $D_s \phi$  绝对分支比已被收入 1996 年版的《粒子物理综评》。在专门阐述赝标介子衰变常数的评注“Pseudoscalar Meson Decay Constants”中, 将 BES 的  $f_{D_s}$  结果列入  $f_{D_s}$  的世界三项测量之一; 在阐述粲介子物理的评注“Note on D Meson”中, 引言一节突出提到中国 BES 和美国 CLEO, E687 合作组在粲物理领域的实验进展, 指出这是中国 BES 的粲介子物理结果首次被收入世界《粒子物理综评》; 在该书“ $D^+$  and  $D_s^+$  Decay Constant”一节中, 指出“衰变常数  $f_{D_s}$  在非微扰 QCD 理论中非常重要, 并且强调它在  $D^0\bar{D}^0$  和  $B^0\bar{B}^0$  混合等感兴趣的物理过程中也是不可缺少和重要的输入参量。然而, 由于  $D_s$  产生截面小和纯轻子衰变分支比低,  $f_{D_s}$  的测量非常困难。但是, 仍然有三个实验完成和发表了  $f_{D_s}$  测量结果。BES 是三个实验之一。BES 上的其他  $D_s$  物理结果(单举半轻子衰变, 单举  $\phi$  衰变分支比测量)也将被收入 1998 年版的《粒子物理综评》。

据不完全统计, BES 的  $D_s$  物理结果被国际

重要学术刊物、学术会议和著名高能物理实验室引用 37 次以上, 其中正式发表论文 15 篇, 实验室预印本 15 篇, 国际会议 2 篇, 登载在《Review of Particle Properties》上的评注 3 篇, 《Particle Physics Booklet》收录 BES 的  $D_s$  物理结果 2 项。引用文章所涉及的粒子物理研究课题主要包括: 国际学术界权威性粲物理综合评述; 关于粲强子与底强子衰变专题性综合评述; 非微扰量子色动力学(QCD)、格点 QCD 和 CP 破坏研究等。

## 4.2 $D_s$ 物理展望

随着 BES 改进完成, BEPC 亮度有所提高, BES 的性能也得到明显的改善。这样, 如果再在  $D_s$  能区取同样时间的数据, 可望得到远好于现在的统计误差的结果。如果北京 粲工厂(BTCF)能够建成, 可用更少的时间获取更大量的实验数据, 得到统计误差更小的结果。同时, 探测器的性能将有质的飞跃, 这样所得物理结果的系统误差也将大大降低, 并且还可以对  $D_s$  未知衰变道进行研究, 使  $D_s$  衰变有个清楚的图像。

## 参 考 文 献

- [1] Auburt J J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1404—1406; Augustin J E *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1406—1408
- [2] 丁慧良等. 高能物理与核物理, 1992, 16: 769—789; Bai J Z *et al.* Nucl. Instr. and Meth. A, 1994, 344: 319—334
- [3] BES Collaboration. Phys. Rev. Lett., 1995, 74: 4599—4602
- [4] BES 合作组. 高能物理与核物理, 1996, 20: 193—203
- [5] BES Collaboration. Phys. Rev. D, 1995, 52: 3781—3784
- [6] BES Collaboration. Phys. Rev. D, 1997, 56: 3779—3782
- [7] BES Collaboration. Phys. Rev. D, 1998, 57: 28—32

1)《粒子物理综评》, 英文名《Review of Particle Physics》, 每两年出版一次, 登载在粒子物理与场的国际权威性学术杂志如《Physical Review D》等上, 公布经更新、增添和校正后的粒子物理测量数据, 发表权威性评论与注释。该书的评注都是由有关学术领域内造诣较深的物理学家撰写的。有“粒子物理的圣经”之称。粒子物理手册(Particle Physics Booklet)是该书的主要部分摘抄本。