

Измерение абсолютных вероятностей инклюзивных распадов B_s -мезонов в D -мезоны в эксперименте Belle

Мурад Ясавеев

Высшая школа экономики

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,
посвященная 70-летию В.А. Рубакова

Мотивация к изучению B_s^0 -мезонов

Исследования свойств B_s^0 -мезонов важны с точки зрения:

- изучения сильного взаимодействия при низких энергиях;
- измерения параметров Стандартной модели;
- поиска проявлений Новой физики.

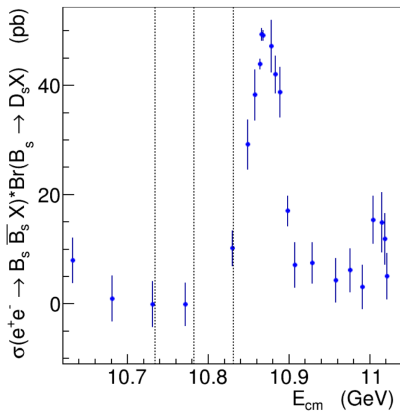
Источники B_s^0 -мезонов:

- адронные машины (Tevatron, LHC);
- $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(5S) \rightarrow B_s^{(*)} \bar{B}_s^{(*)}$ (КЕКВ).

Рождение B_s^0 -мезонов на энергии $\Upsilon(5S)$ -резонанса

f_s – вероятность рождения пары B_s^0 -мезонов на энергии $\Upsilon(5S)$ -резонанса

$$\mathcal{B}(\Upsilon(5S) \rightarrow D_s^\pm X)/2 = f_s \cdot \mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) + f_{B\bar{B}X} \cdot \mathcal{B}(B \rightarrow D_s^\pm X)$$



Вероятность инклюзивного распада $B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X$

Экспериментальное значение

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (93 \pm 25)\%$$

Теоретическая оценка

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (92 \pm 11)\%$$

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X) = (8 \pm 7)\%$$

Прямое измерение в эксперименте Belle:

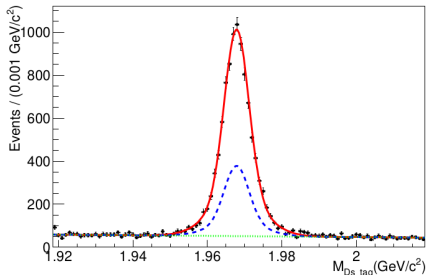
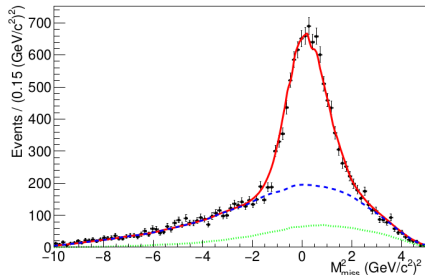
$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (60.2 \pm 5.8 \pm 2.3)\% \text{ (Belle [PRD 105, 012004](#), 2022);}$$

$$\frac{\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X)}{\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X)} = 0.416 \pm 0.018 \pm 0.092 \text{ (Belle [JHEP08\(2023\)131](#))}$$

Результат прямого измерения в эксперименте Belle

Полулептонный таг: $B_s^0 \rightarrow D_s^- X l^+ \nu_l$

$$M_{miss}^2 = (\sqrt{s}/2 - \delta E - E_{D_s l})^2 - (\vec{p}_{D_s l})^2$$

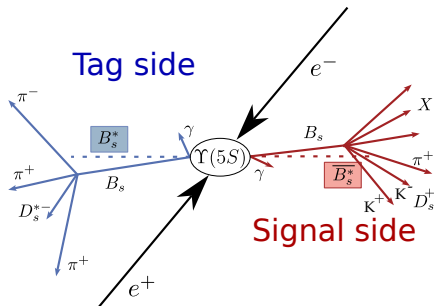


Цель: новое измерение $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X)$ при помощи адронного тагирования. Первое прямое измерение $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X)$ и $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^\pm X)$.

Измерение всех трёх вероятностей даёт возможность проверки результата, так как их сумма должна превышать 100%.

Идея прямого измерения

- Восстановление и отбор кандидатов в B_s^0 -мезоны выполняется в FEI;
- Число тагирующих B_s^0 -кандидатов определяется при помощи подгонки $M(B_s)$ -распределения;
- Для каждого B_s^0 строится остаток события, в котором осуществляется поиск D -мезонов;



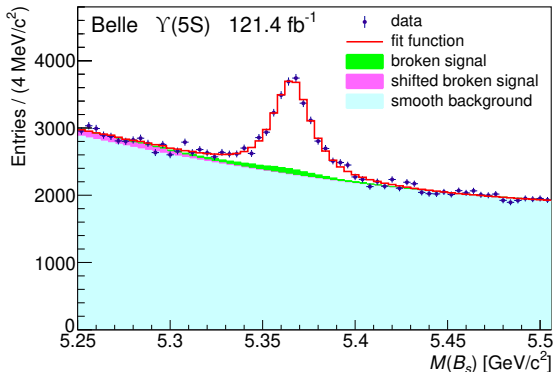
Идея прямого измерения

- Восстановление и отбор кандидатов в B_s^0 -мезоны выполняется в FEI;
- Число тагирующих B_s^0 -кандидатов определяется при помощи подгонки $M(B_s)$ -распределения;
- Для каждого B_s^0 строится остаток события, в котором осуществляется поиск D -мезонов;
- Двумерное распределение $[M(B_s) \text{ vs. } M(D)]$ аппроксимируется для получения числа пар $B_s - D$:

$$N_{B_s-D} = N_{B_s} \cdot \mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D/\bar{D}X) \cdot \mathcal{B}_D \cdot \varepsilon_D^{\text{ROE}},$$

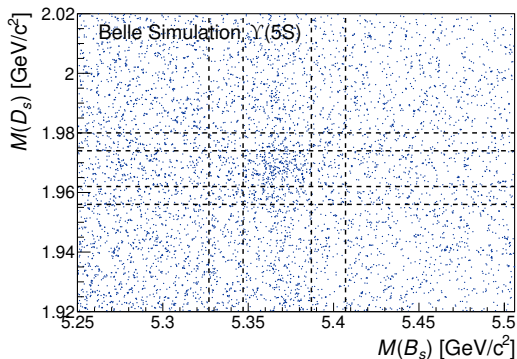
$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D/\bar{D}X) = \frac{N_{B_s-D}}{N_{B_s} \cdot \mathcal{B}_D \cdot \varepsilon_D^{\text{ROE}}}.$$

Массовое распределение тагирующих B_s^0 -кандидатов



Распад	Требование к \mathcal{P}_{B_s}	Число кандидатов, N_{B_s}
$B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X$	> 0.0012	12500 ± 310
$B_s^0 \rightarrow D^0 / \bar{D}^0 X$	> 0.0050	9610 ± 190
$B_s^0 \rightarrow D^\pm X$	> 0.0200	6485 ± 120

Двумерное распределение

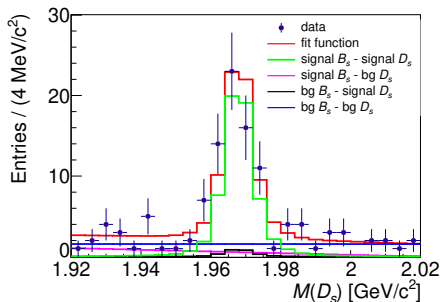
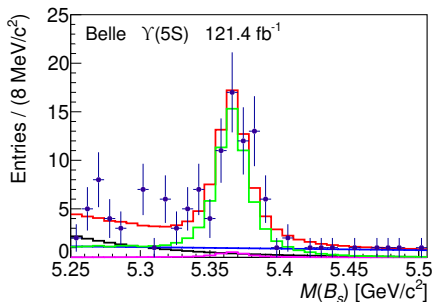


Пара $B_s - D$ может быть четырёх типов:

- сигнальный B_s – сигнальный D ;
- сигнальный B_s – фоновый D ;
- фоновый B_s – сигнальный D ;
- фоновый B_s – фоновый D .

Подгонка двумерного распределения $[M(B_s) \text{ vs. } M(D_s)]$ в данных

$D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+$:

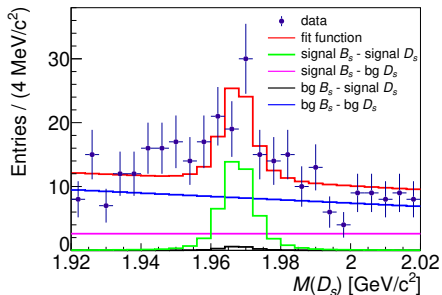
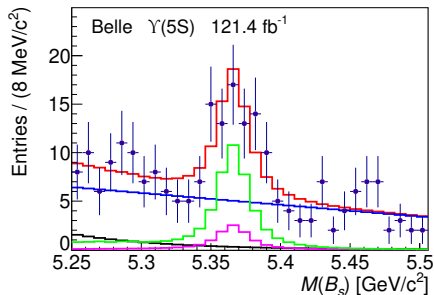


$$N_{B_s - D_s} = 85 \pm 12$$

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (73.0 \pm 10.6 \pm 5.2)\%$$

Подгонка двумерного распределения $[M(B_s) \text{ vs. } M(D_s)]$ в данных

$$D_s^+ \rightarrow \bar{K}^{*0} K^+$$

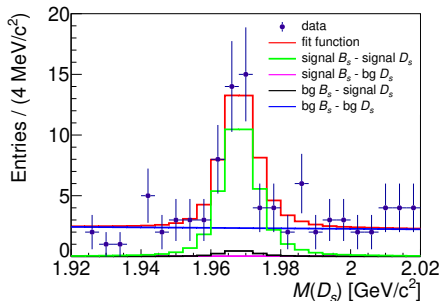
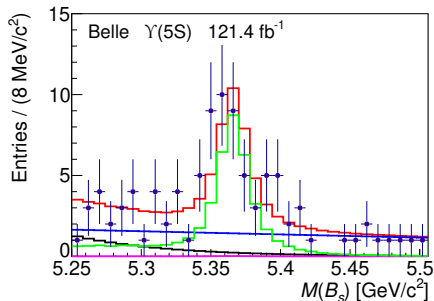


$$N_{B_s - D_s} = 63 \pm 13$$

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (54.1 \pm 11.7 \pm 3.7)\%$$

Подгонка двумерного распределения $[M(B_s) \text{ vs. } M(D_s)]$ в данных

$D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^+$:



$$N_{B_s - D_s} = 55 \pm 10$$

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (88.2 \pm 16.2 \pm 7.0)\%$$

Результат измерения $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X)$

$$\phi\pi^+ : \mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (73.0 \pm 10.6 \pm 5.2)\%;$$

$$\bar{K}^{*0}K^+ : \mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (54.1 \pm 11.7 \pm 3.7)\%;$$

$$K_S^0 K^+ : \mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (88.2 \pm 16.2 \pm 7.0)\%.$$

Эти значения усредняются при помощи метода HFLAV, учитывающего корреляцию систематических ошибок:

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (68.6 \pm 7.2 \pm 4.0)\%.$$

P-value подгонки равен 28%. Результат измерения согласуется с предыдущим результатом эксперимента Belle ($60.2 \pm 5.8 \pm 2.3$)%.

Усреднение результатов двух измерений:

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (63.4 \pm 4.5 \pm 2.2)\%.$$

Вероятности распадов $\Upsilon(5S)$ -резонанса

Используя новое значение $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X)$, пересчитывается значение f_s при помощи метода, описанного в Ref.(JHEP08(2023)131):

$$f_s = (21.8 \pm 0.2 \pm 2.0)\%. \quad (1)$$

Для улучшения точности используется условие

$$f_s + f_{BVX} + f_{\mathcal{B}} = 1.$$

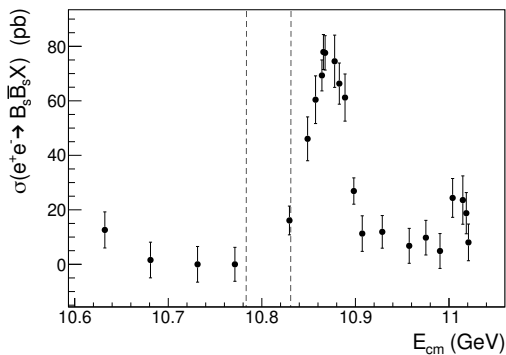
В результате подгонки трёх вероятностей находим:

$$\begin{aligned} f_s &= (21.4_{-1.7}^{+1.5})\%; \\ f_{BVX} &= (73.8_{-2.9}^{+1.5})\%; \\ f_{\mathcal{B}} &= (4.8_{-0.5}^{+3.6})\%. \end{aligned}$$

Эти результаты уточняют предыдущие значения

$$\begin{aligned} f_s &= (22.0_{-2.1}^{+2.0})\% \text{ (Belle JHEP08(2023)131),} \\ f_{BVX} &= (75.1 \pm 4.0)\%, f_{\mathcal{B}} = (4.9 \pm 0.6)\% \text{ (Belle JHEP06(2021)137)} \end{aligned}$$

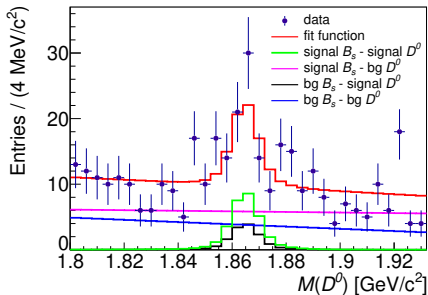
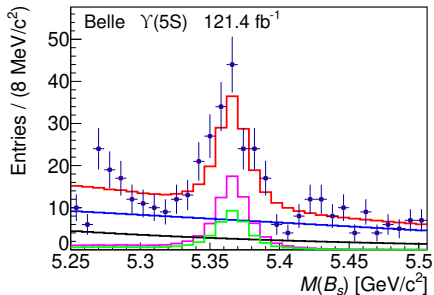
Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow B_s^0 \bar{B}_s^0 X$



Данная зависимость может использоваться в объединенном феноменологическом анализе различных измеренных сечений в подходе связанных каналов с целью изучения структуры $\Upsilon(5S)$ - и $\Upsilon(6S)$ -резонансов.

Подгонка двумерного распределения $[M(B_s) \text{ vs. } M(D^0)]$ в данных

$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$:



$$N_{B_s - D^0} = 56 \pm 16$$

$$B(B_s^0 \rightarrow D^0 / \bar{D}^0 X) = (21.5 \pm 6.1 \pm 1.8)\%$$

Результат измерения $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X)$

Используя новое значение $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X)$ и отношение $\frac{\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X)}{\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X)} = 0.416 \pm 0.018 \pm 0.092$, получим:

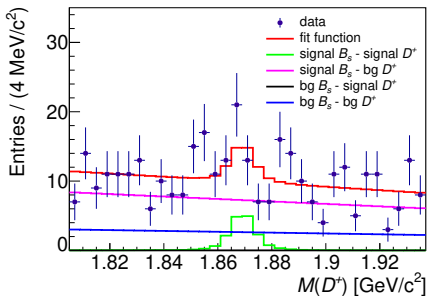
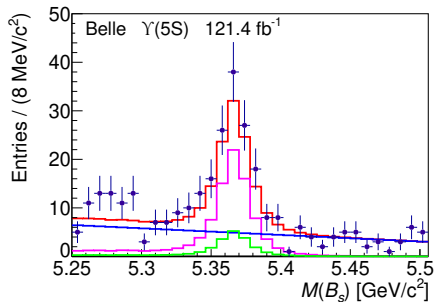
$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X) = (26.5 \pm 2.3 \pm 5.9)\%.$$

Это значение усредняется с результатом нашего измерения $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X) = (21.5 \pm 6.1 \pm 1.8)\%$:

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X) = (23.9 \pm 4.1 \pm 1.8)\%.$$

Подгонка двумерного распределения $[M(B_s) \text{ vs. } M(D^+)]$ в данных

$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$:



$$N_{B_s - D^+} = 34 \pm 12$$

$$B(B_s^0 \rightarrow D^\pm X) = (12.6 \pm 4.6 \pm 1.3)\%$$

Сумма трёх вероятностей

Обновлённые значения $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X)$ и $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X)$, а также новое значение $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^\pm X)$:

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (63.4 \pm 4.5 \pm 2.2)\%,$$

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X) = (23.9 \pm 4.1 \pm 1.8)\%,$$

$$\mathcal{B}(B_s \rightarrow D^\pm X) = (12.6 \pm 4.6 \pm 1.3)\%.$$

Сумма трёх вероятностей равна $(99.9 \pm 7.6 \pm 3.8)\%$. Аналогичная сумма для B^+ - и B^0 -мезонов равна $(107.9 \pm 3.4)\%$, что согласуется с суммой вероятностей расадов B_s^0 -мезона.

Закключение

Разработан метод адронного тагирования одного B_s -мезона в событиях $e^+e^- \rightarrow B_s^* \bar{B}_s^*$.

Метод позволил измерить абсолютные вероятности инклюзивных распадов:

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X) = (68.6 \pm 7.2 \pm 4.0)\%,$$

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X) = (21.5 \pm 6.1 \pm 1.8)\%,$$

$$\mathcal{B}(B_s \rightarrow D^\pm X) = (12.6 \pm 4.6 \pm 1.3)\%.$$

Новые значения $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X)$ и $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X)$ согласуются с результатами предыдущих измерений, вероятность

$\mathcal{B}(B_s \rightarrow D^\pm X) = (12.6 \pm 4.6 \pm 1.3)\%$ измерена впервые.

Уточнены вероятности распадов $\Upsilon(5S)$ -резонанса:

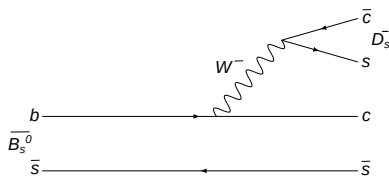
$$f_s = (21.3^{+1.6}_{-1.7})\%;$$

$$f_{BBX} = (73.9^{+1.6}_{-3.0})\%;$$

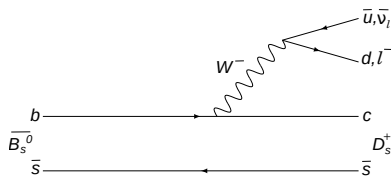
$$f_{\mathcal{B}} = (4.8^{+3.7}_{-0.5})\%.$$

Discussion of the result

The main contribution to $B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X$ have the following diagrams:

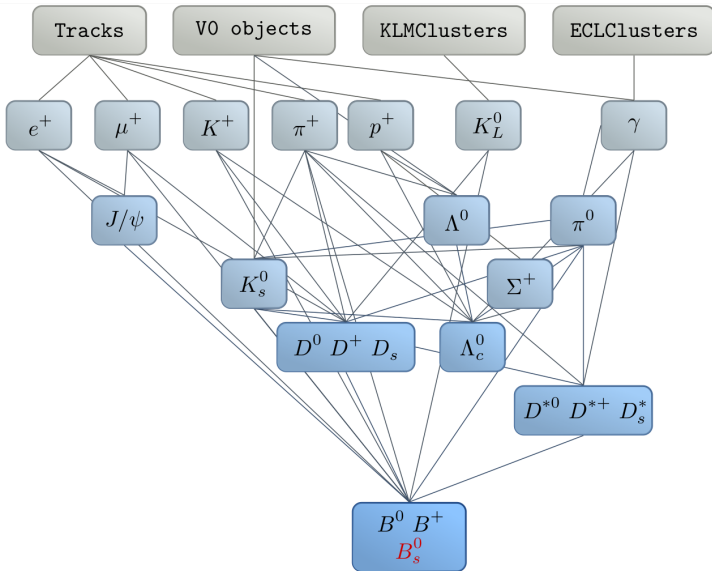


(a)



(b)

The fragmentation fraction of the $c\bar{s}$ pair into D_s^+ mesons of $(85 \pm 10)\%$, assumed in theoretical estimate, is probably an overestimate. Thus, measurements of the inclusive branching fractions of the B_s^0 meson provide information about dynamics of its decays.



FEI variables

- B_s
 - SigProb of each daughter;
 - R_2 and $\cos \theta_{thrust}$, where θ_{thrust} is the angle between the thrust of the B candidate and the rest of the event (ROE);
 - Masses of the $\rho (\rightarrow \pi\pi)$ and $a_1 (\rightarrow 3\pi)$ candidates (if they are available).
- D_s^*
 - SigProb of each daughter;
 - M .
- D_s
 - SigProb of each daughter;
 - M ;
 - χ^2 of mass-vertex fit;
 - for 3-body decays: masses of all pairs of daughters (ϕ, K^*, ρ).
- J/ψ
 - SigProb of each daughter;
 - M .

FEI variables

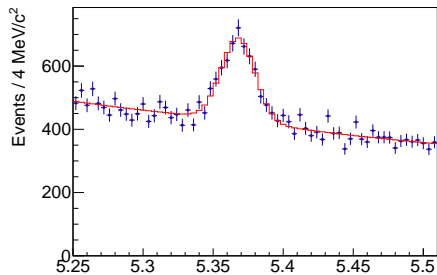
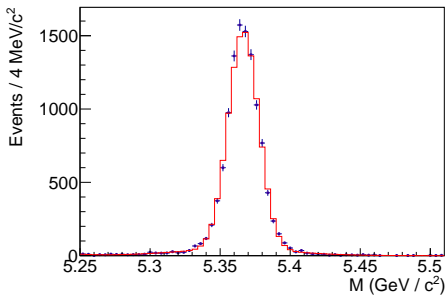
- K_S
 - nisKsFinder output;
 - M .
- π^0
 - M ;
 - p ;
 - decay angle.
- γ
 - number of hits in cluster;
 - E_9/E_{25} ratio;
 - E ;
 - p_t .
- $\pi^\pm, K^\pm, \mu^\pm, e^\pm$
 - identification variables;
 - p ;
 - p_t .

FEI reconstruction channels

$B_s^0 \rightarrow$	$B^+ \rightarrow$	$B^0 \rightarrow$
$D_s^- \pi^+$	$\bar{D}^0 \pi^+$	$D^- \pi^+$
$D_s^- \pi^+ \pi^0$	$\bar{D}^0 \pi^+ \pi^0$	$D^- \pi^+ \pi^0$
$D_s^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$\bar{D}^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$D^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$
$D_s^{*-} \pi^+$	$\bar{D}^{*0} \pi^+$	$D^{*-} \pi^+$
$D_s^{*-} \pi^0 \pi^+$	$\bar{D}^{*0} \pi^+ \pi^0$	$D^{*-} \pi^+ \pi^0$
$D_s^{*-} \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$\bar{D}^{*0} \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$D^{*-} \pi^+ \pi^+ \pi^-$
$D_s^- D_s^+$	$D_s^+ \bar{D}^0$	$D_s^+ D^-$
$D_s^{*-} D_s^+$	$D_s^{*+} \bar{D}^0$	$D_s^{*+} D^-$
$D_s^- D_s^{*+}$	$D_s^+ \bar{D}^{*0}$	$D_s^+ D^{*-}$
$D_s^{*-} D_s^{*+}$	$D_s^{*+} \bar{D}^{*0}$	$D_s^{*+} D^{*-}$
$J/\psi K^+ K^-$	$J/\psi K^+$	$J/\psi K_S^0$
$J/\psi K^+ K^- \pi^0$	$J/\psi K_S^0 \pi^+$	$J/\psi K^+ \pi^-$
	$J/\psi K^+ \pi^+ \pi^-$	
$\bar{D}^0 K^- \pi^+$	$D^- \pi^+ \pi^+$	$D^{*-} K^+ K^- \pi^+$
$\bar{D}^{*0} K^- \pi^+$	$D^{*-} \pi^+ \pi^+$	
$D_s^- K^+$		

$D^0 \rightarrow$	$D^+ \rightarrow$	$D_s^+ \rightarrow$
$K^- \pi^+$	$K^- \pi^+ \pi^+$	$K^+ K^- \pi^+$
$K^- \pi^+ \pi^0$	$K^- \pi^+ \pi^+ \pi^0$	$K^+ K_S^0$
$K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$K_S^0 \pi^+$	$K^+ K^- \pi^+ \pi^0$
$K_S^0 \pi^+ \pi^-$	$K_S^0 \pi^+ \pi^0$	$K^+ K_S^0 \pi^+ \pi^-$
$K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	$K_S^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$K^- K_S^0 \pi^+ \pi^+$
$K^+ K^-$	$K^+ K^- \pi^+$	$K^+ K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$
$K^+ K^- K_S^0$		$K^+ \pi^+ \pi^-$
		$\pi^+ \pi^+ \pi^-$
		$K^+ K_S^0 \pi^0$
		$K_S^0 K_S^0 \pi^+$
		$\eta' \pi^+$
		$\eta' \pi^+ \pi^0$

Simultaneous fit



Event selection

$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D_s^\pm X)$:

- B_s :
 - $|p_{cm} - 0.42| < 0.09 \text{ GeV}/c$;
 - $\mathcal{P}_{B_s} > 0.0012$.
- D_s :
 - $|dr| < 0.5 \text{ cm}, |dz| < 2.0 \text{ cm}$;
 - $\mathcal{L}_{K/\pi} > 0.1, \mathcal{L}_{\pi/K} > 0.1$;
 - $\phi\pi^+$: $|M_{KK} - 1.019| < 0.040 \text{ GeV}/c^2, |\cos\theta_{hel}| > 0.3$;
 - K^*K^+ : $|M_{K\pi} - 0.892| < 0.100 \text{ GeV}/c^2, |\cos\theta_{hel}| > 0.3$;
 - $K_S^0K^+$: $|M_{K_S^0} - 0.498| < 0.015 \text{ GeV}/c^2 + \text{standard criteria}$.

$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X)$:

- B_s :
 - $|p_{cm} - 0.42| < 0.09 \text{ GeV}/c$;
 - $\mathcal{P}_{B_s} > 0.005$.
- $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$:
 - $|dr| < 0.5 \text{ cm}, |dz| < 2.0 \text{ cm}$;
 - $\mathcal{L}_{K/\pi} > 0.6, \mathcal{L}_{\pi/K} > 0.1$.

$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow D^\pm X)$

- B_s :
 - $|p_{cm} - 0.42| < 0.09 \text{ GeV}/c$;
 - $\mathcal{P}_{B_s} > 0.02$.
- $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$:
 - $|dr| < 0.5 \text{ cm}, |dz| < 2.0 \text{ cm}$;
 - $\mathcal{L}_{K/\pi} > 0.1, \mathcal{L}_{\pi/K} > 0.6$.

Systematic uncertainty

Source	Channel			Combined
	$\phi\pi^+$	$\bar{K}^{*0}K^+$	$K_S^0K^+$	
Signal shape	2.3	1.8	1.6	2.0
Broken signal	0.9	0.9	0.9	0.9
Smooth background	1.6	1.0	1.1	1.4
Tracking	1.1	1.1	1.1	1.1
K/π identification	2.1	1.9	0.7	1.7
K_S^0 reconstruction	–	–	2.3	0.6
D_s momentum	0.8	0.6	0.2	0.6
Dalitz plot	0.8	0.8	–	0.6
FEI efficiency	3.6	3.6	3.6	3.6
MC statistics	4.4	4.5	5.7	2.7
$\mathcal{B}(D_s \rightarrow KK\pi)$	1.9	1.9	–	1.4
$\mathcal{B}(D_s \rightarrow K_S K)$	–	–	2.4	0.6
$\mathcal{B}(K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)$	–	–	< 0.1	–
Total	7.2	6.9	7.9	5.9

Systematic uncertainty

Source	$B_s^0 \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X$	$B_s^0 \rightarrow D^\pm X$
Signal shape	2.0	0.6
Broken signal	1.1	2.9
Smooth background	0.3	0.9
Tracking	0.7	1.1
K/π identification	1.2	3.0
D momentum	0.2	<0.1
FEI efficiency	2.1	2.1
MC statistics	7.5	9.0
$\mathcal{B}(D \rightarrow K\pi(\pi))$	0.8	1.7
Total	8.3	10.4

Correlated uncertainties

Source	Semileptonic tag	This work	Combined
Uncorrelated	3.0	5.3	2.6
Tracking	1.1	1.1	1.1
K/π identification	1.3	1.7	1.5
$\mathcal{B}(D_s \rightarrow KK\pi)$	1.5	1.4	1.4
$\mathcal{B}(D_s \rightarrow K_S K)$	0.4	0.6	0.5
Total			3.5

Results at the $\Upsilon(4S)$ resonance

	$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow D^0 X), \%$	$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow D^+ X), \%$	$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow D_s X), \%$
Result	$54.54 \pm 0.81 \pm 0.59$	$37.68 \pm 0.56 \pm 0.32$	$12.35 \pm 0.39 \pm 0.29$
PDG	55.5 ± 3.2	39.2 ± 3.5	$11.8^{+2.2}_{-2.0}$

	$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow D^0 X), \%$	$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow D^+ X), \%$	$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow D_s X), \%$
Result	$81.39 \pm 0.81 \pm 0.63$	$11.35 \pm 0.37 \pm 0.17$	$12.52 \pm 0.33 \pm 0.24$
PDG	87.6 ± 4.1	12.4 ± 1.3	9.0 ± 1.4

Results at the $\Upsilon(4S)$ resonance

Using the ratio of production rates f^{+-}/f^{00} at the $\Upsilon(4S)$, we find

$$\mathcal{B}(B \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X) = (67.81 \pm 0.56 \pm 1.00)\%,$$

$$\mathcal{B}(B \rightarrow D_s^+/D_s^- X) = (12.35 \pm 0.25 \pm 0.27)\%.$$

These branching fractions are in agreement with the last Belle results:

$$\mathcal{B}(B \rightarrow D^0/\bar{D}^0 X) = (66.65 \pm 0.04 \pm 1.77)\%,$$

$$\mathcal{B}(B \rightarrow D_s^+/D_s^- X) = (11.28 \pm 0.03 \pm 0.55)\%.$$

We take the accuracy with which this test is carried out as a systematic error of our method.