

Измерение вероятности смешивания квантово-коррелированных B_d^0 мезонов в эксперименте Belle

Анна Нарваткина, Мурад Ясавеев, Павел Пахлов

4 декабря 2025

Осцилляция нейтральных B -мезонов

Для начала рассмотрим одиночное рождение B -мезона, флейворные состояния $|B^0\rangle$ и $|\bar{B}^0\rangle$ не являются собственными для оператора \hat{H} :

$$|B_L\rangle = p|B^0\rangle + q|\bar{B}^0\rangle$$
$$|B_H\rangle = p|B^0\rangle - q|\bar{B}^0\rangle$$

В таком случае, флейворные состояния эволюционируют следующим образом:

$$|B^0(t)\rangle = e^{-iMt} e^{-\frac{\Gamma}{2}t} \left[\cos\left(\frac{\Delta m}{2}t\right) |B^0\rangle + i\frac{q}{p} \sin\left(\frac{\Delta m}{2}t\right) |\bar{B}^0\rangle \right]$$

$$|\bar{B}^0(t)\rangle = e^{-iMt} e^{-\frac{\Gamma}{2}t} \left[\cos\left(\frac{\Delta m}{2}t\right) |\bar{B}^0\rangle + i\frac{p}{q} \sin\left(\frac{\Delta m}{2}t\right) |B^0\rangle \right]$$

Квантово-коррелированное рождение B^0 -мезонов

Теперь перейдем к рассмотрению коррелированного рождения пары $B^0 - \bar{B}^0$, волновая функция записывается следующим образом:

$$|\psi(t_1, t_2)\rangle = |B^0(t_1)\rangle \otimes |\bar{B}^0(t_2)\rangle \pm |\bar{B}^0(t_1)\rangle \otimes |B^0(t_2)\rangle$$

Вероятность осцилляции:

$$\begin{aligned} W_{B^0 B^0}(t_1, t_2) = W_{\bar{B}^0 \bar{B}^0}(t_1, t_2) &= \frac{1}{2} e^{-\Gamma(t_1+t_2)} \left[\cos\left(\frac{\Delta m}{2} t_1\right) \sin\left(\frac{\Delta m}{2} t_2\right) \right. \\ &\quad \left. \pm \sin\left(\frac{\Delta m}{2} t_1\right) \cos\left(\frac{\Delta m}{2} t_2\right) \right]^2 \end{aligned}$$

Сравнение одиночного рождения и квантово-коррелированного рождения пары

Для одиночного рождения: разность масс и время жизни $B_{H,L}$ -мезонов таковы, что B^0 -мезон успевает проосциллировать с вероятностью $(18.60 \pm 0.11)\%$

А для рождения квантово-коррелированной пары вероятность осцилляции одного из B^0 -мезонов в случае:

- С-нечётной функции – $(18.60 \pm 0.11)\%$
- С-чётной функции – $(41.96 \pm 0.16)\%$

[A.E. Bondar, Eur.Phys.J.C 85 \(2025\)](#)

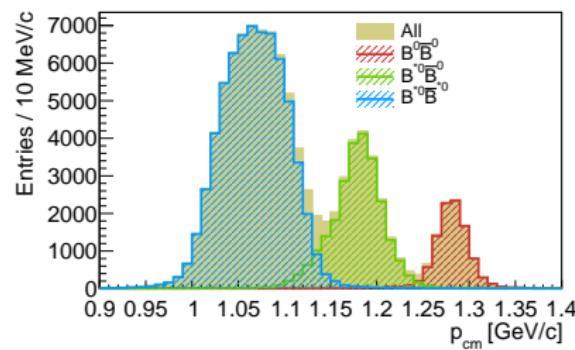
В случае скоррелированных B -мезонов в С-нечётном состоянии осцилляции подавлены, а в С-чётном усилены

$\Upsilon(5S)$ -резонанс

В отличие от $\Upsilon(4S)$, где $B^0 - \bar{B}^0$ рождаются только в C -нечётном состоянии, на $\Upsilon(5S)$ имеют место все случаи:

- C -нечётное состояния: $B^0 \bar{B}^0$, $B^{*0} \bar{B}^{*0}$ + те же распады с π^0
- C -чётное состояния: $B^0 \bar{B}^{*0}$, $B^{*0} \bar{B}^0$ + те же распады с π^0
- состояния без определенной C -чётности: $B^{*0} B^- \pi^+$, $B^{*0} B^{*-} \pi^+$ + зарядово сопряжённые

Импульсное распределение на моделировании:



Пики соответствуют разным процессам: $e^+ e^- \rightarrow B^{*0} \bar{B}^{*0}$ (левый), $e^+ e^- \rightarrow B^{*0} \bar{B}^0$ (средний) и $e^+ e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0$ (правый)

Мотивация

- Различие в вероятностях смешивания позволяет идентифицировать процесс $B^* \bar{B}$ в событиях $e^+ e^- \rightarrow B^{(*)} \bar{B}^{(*)}$ по дилептонам, что может дать дополнительные ограничения на энергетическую зависимость сечения $\sigma(e^+ e^- \rightarrow B^{(*)} \bar{B}^{(*)})$
- Предполагается, что пары $B \bar{B}$ рождаются только в состояниях с определённой C -чётностью
- Возможно изучать квантово-коррелированные пары $B^{(*)} \bar{B}^{(*)}$ на $\Upsilon(5S)$ по временной зависимости (что значительно сложнее из-за систематических эффектов вершинной реконструкции и вторичных лептонов), тогда как мы предлагаем изучать интегрированную по времени вероятность осцилляций

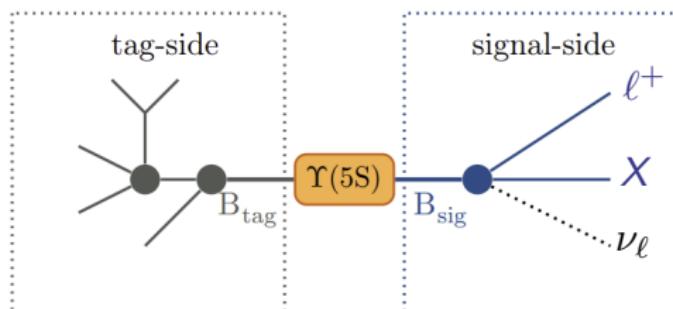
Идея анализа

Задача: Измерить вероятности осцилляции B^0 -мезонов в разных C -состояниях, сравнить с теоретическими предсказаниями

Метод: Полное восстановление одного B -мезона или пары $B - \pi$ для определения моды распада $\Upsilon(5S)$

Полное восстановление необходимо, чтобы измерить импульс B -мезона, по которому определяется C -чётность состояния

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

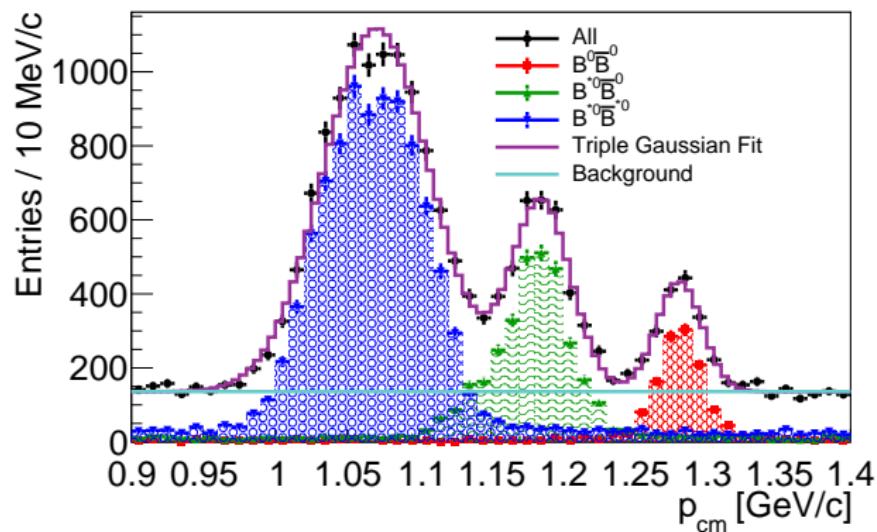


Определение флейвора второго B^0 в событии по лептону

В событии восстанавливается лептон (электрон или мюон):

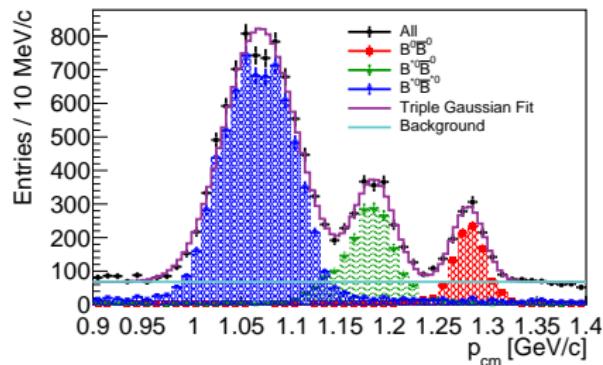
- $dr < 0.5$ см, $|dz| < 2$ см
- eID/muID > 0.9
- $p_{lep} > 1.0$ ГэВ/с – против вторичных лептонов

Распределение на моделировании, включая фон от континуума:



Вероятности осцилляции

$B^0\ell^-$ пары на моделировании:

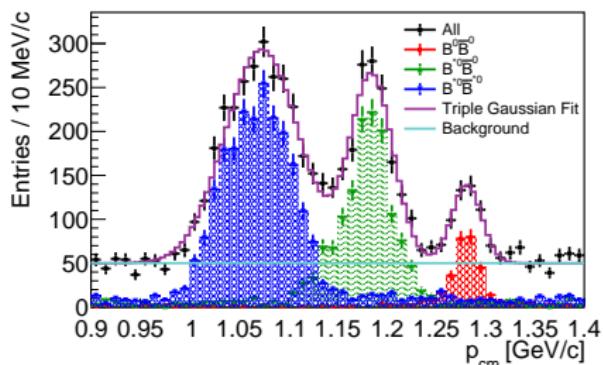


$$N_{B^0\bar{B}^0} = 924 \pm 114$$

$$N_{B^{*0}\bar{B}^0} = 1547 \pm 145$$

$$N_{B^{*0}\bar{B}^{*0}} = 7010 \pm 258$$

$B^0\ell^+$ пары на моделировании:



$$N_{B^0\bar{B}^0} = 338 \pm 85$$

$$N_{B^{*0}\bar{B}^0} = 1168 \pm 142$$

$$N_{B^{*0}\bar{B}^{*0}} = 2283 \pm 173$$

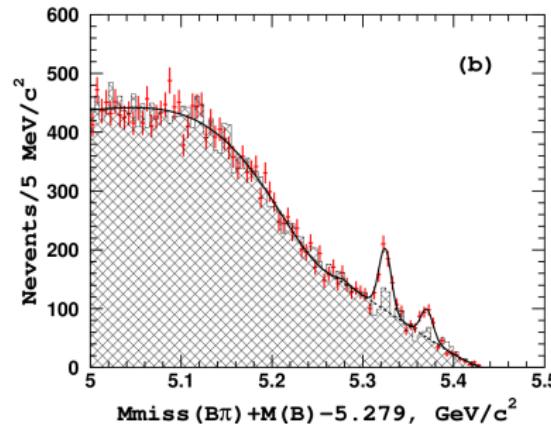
Ожидаемая точность для вероятностей осцилляции: $(26.7 \pm 1.2)\%$ для $B^0\bar{B}^0$ событий, $(43.0 \pm 1.0)\%$ для $B^0\bar{B}^{*0}$ событий и $(24.5 \pm 0.4)\%$ для $B^{*0}\bar{B}^{*0}$ событий

Осцилляция B^0 в состоянии без определенной C -чётности

$\Upsilon(5S) \rightarrow B^{(*)0} B^{(*)-} \pi^+$, в трех-частичном распаде нет пиков в импульсном распределении

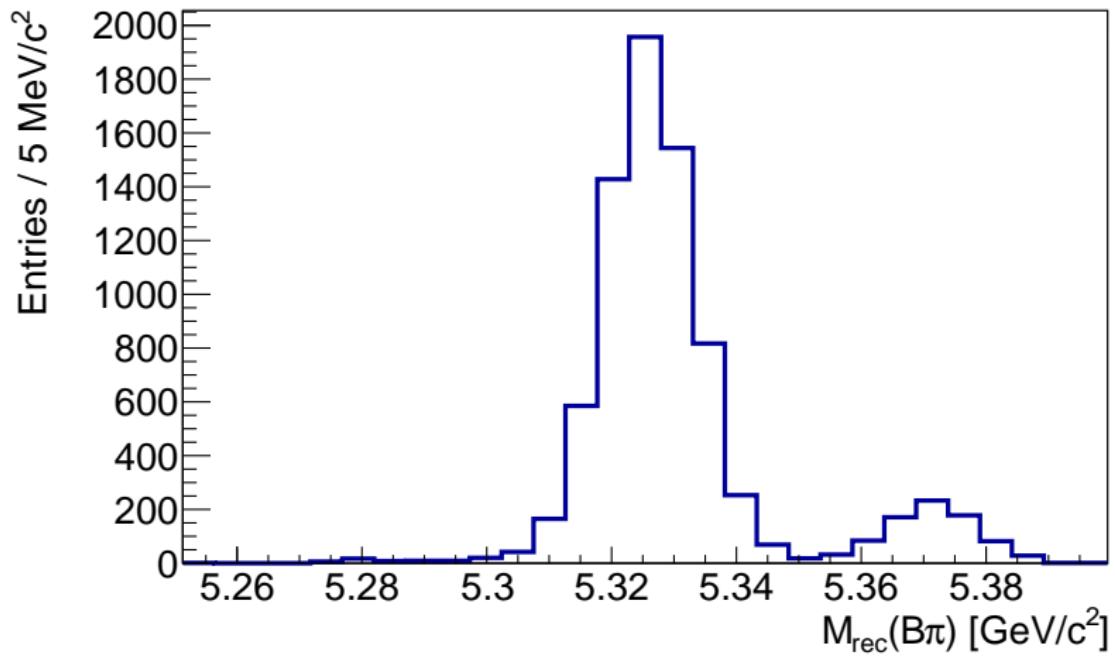
Сигнальная переменная: поправленная масса отдачи в системе $B\pi$:

$$M'_{rec}(B\pi) = \sqrt{(E_{cms} - E_{B\pi})^2 - p_{B\pi}^2} + M(B) - 5.279$$



A. Garmash, Phys.Rev.Lett. 116 (2016)

Распределение массы отдачи на моделировании



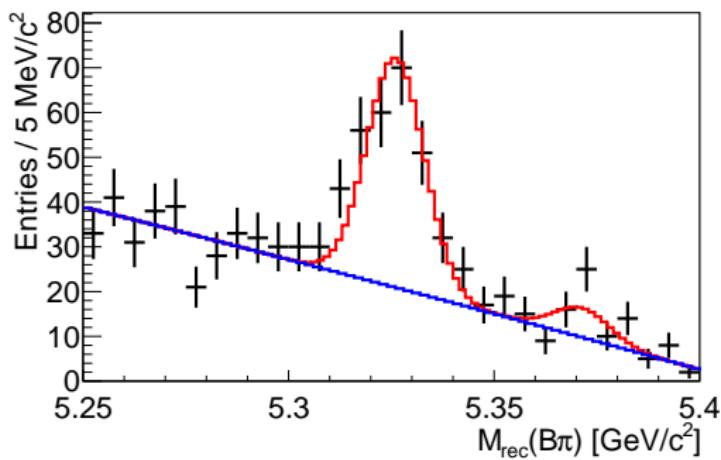
Пики соответствуют следующим событиям: $e^+ e^- \rightarrow B^{*0} B^- \pi^+$ или $e^+ e^- \rightarrow B^0 B^{*-} \pi^+$ (левый), $e^+ e^- \rightarrow B^{*0} B^{*-} \pi^+$ (правый)

Вероятность осцилляции по событиям с лептоном

В событии восстанавливается лептон (электрон или мюон):

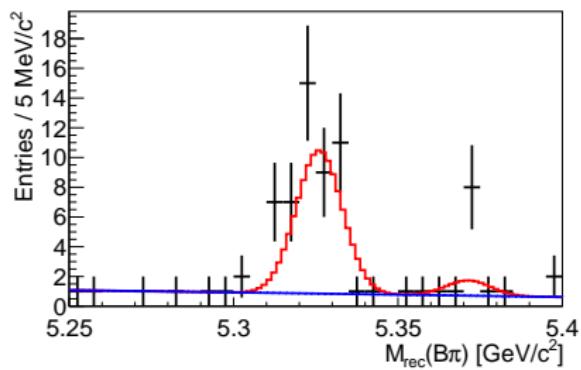
- $dr < 0.5$ см, $|dz| < 2$ см
- eID/muID > 0.9
- $p_{cm} > 1.0$ ГэВ/с – против вторичных лептонов

Распределение на моделировании:



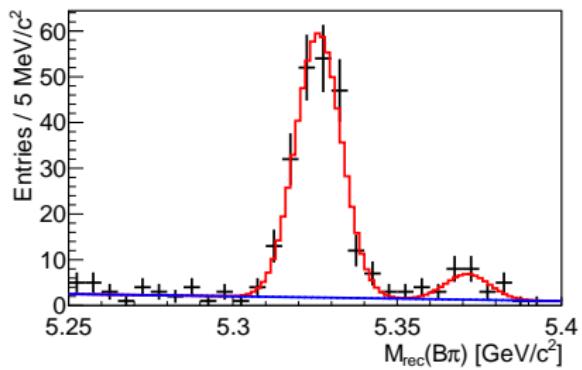
Вероятности осцилляции

$B\pi\ell^-$ пары на моделировании:



$$N_{B\bar{B}^*\pi} = 37 \pm 17$$

$B\pi\ell^+$ пары на моделировании:



$$N_{B\bar{B}^*\pi} = 222 \pm 36$$

Ожидаемая точность для вероятности осцилляции $(14.3 \pm 2.2)\%$

Заключение и планы

Мы получили оценку точности измерений вероятностей осцилляции для четырех способов производства B^0 :

- $B\bar{B} - (26.7 \pm 1.2)\%$
- $B\bar{B}^* - (43.0 \pm 1.0)\%$
- $B^*\bar{B}^* - (24.5 \pm 0.4)\%$
- $B^{(*)}B^{(*)}\pi^+ - (14.3 \pm 2.2)\%$

Планы:

- Оптимизация критериев отбора (`sigProb`, $M(B^0)$, `muID` и `eID`)
- Изучение фона (вторичные лептоны, фейки и отражение B^+ , B_s на B^0)
- Колибровка фитирующей функции (размытие пучка, ISR и т. д.)
- Изучение систематических неопределенностей

Дополнительные слайды

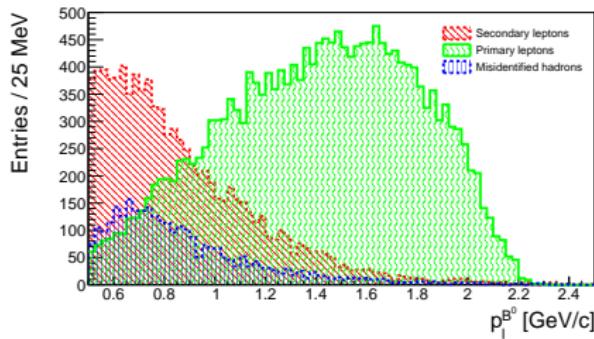
Стратегия

- Значение, которое вносят неправильно таггированные события, планируется получить с помощью оптимизации импульса лептона в системе покоя B -мезона ($p_l^{B^0}$), используя $\Upsilon(4S)$ данные
- Импульс лептона в системе центра масс (p_l^*) планируется использовать для подавления фоновых событий
- Импульс лептона в лабораторной системе (p_l^{lab}) будет использован для борьбы с фейками

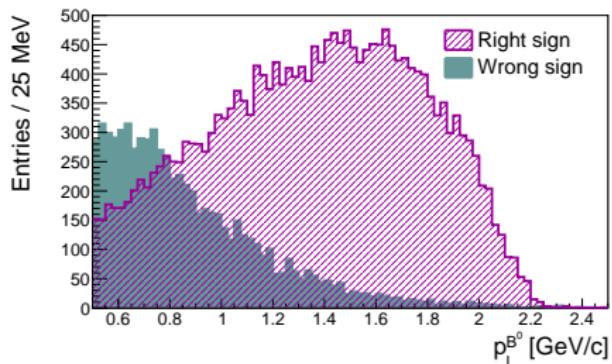
Оптимизация $p_T^{B^0}$

Первичные, вторичные и
неправильно

идентифицированные адроны:



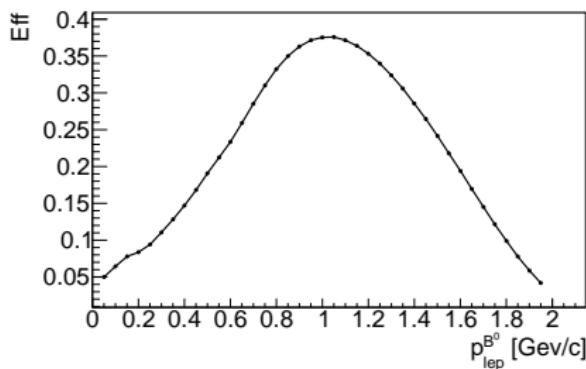
Правильный и неправильный
знаки:



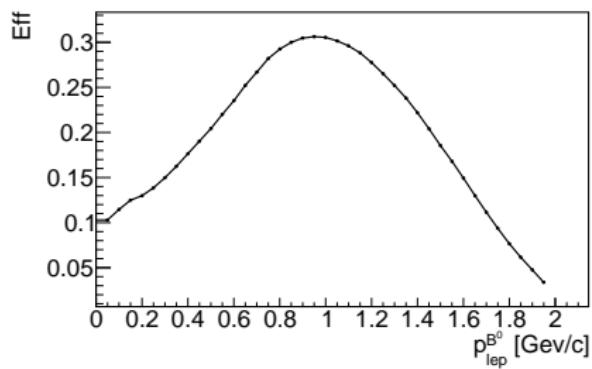
Оптимизация основана на распределениях правильного и
неправильного знака с учетом неправильно идентифицированных
адронов

Оптимизация $p_I^{B^0}$

$p_I^{B^0}$ на $\Upsilon(4S)$:



$p_I^{B^0}$ на $\Upsilon(5S)$:



$$\begin{aligned}Eff &= \varepsilon \cdot (1 - 2\varpi)^2 \\p_I^{B^0} &> 1.0 \text{ GeV/c} \\ \chi_d^{true} &= \frac{\chi_d^{raw} - \varpi}{1 - 2\varpi}\end{aligned}$$

Оптимизация $M(B^0)$

- $\text{sigProb} > 0.01$
- $\text{elID}/\text{mulID} > 0.9$
- $p_T^{B^0} > 1.0 \text{ GeV}/c$
- $1.4 > p_T^{B^0} > 0.9 \text{ GeV}/c$

$B^0 \rightarrow$	$ M(B^0) - 5.279 <$
$D^- \pi^+$	$0.03 \text{ GeV}/c^2$
$D^{*-} \pi^+$	
$D^- \pi^+ \pi^0$	$0.045 \text{ GeV}/c^2$
$D^{*-} \pi^+ \pi^0$	
$D^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$0.02 \text{ GeV}/c^2$
$D^{*-} \pi^+ \pi^+ \pi^-$	
$D_s^+ D^-$	$0.01 \text{ GeV}/c^2$
$D_s^{*+} D^-$	
$D_s^+ D^{*-}$	
$D_s^{*+} D^{*-}$	
$J/\psi K^+ \pi^-$	