

# 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:

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

# 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:

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

A.E. Bondar, Eur.Phys.J.C 85 (2025)

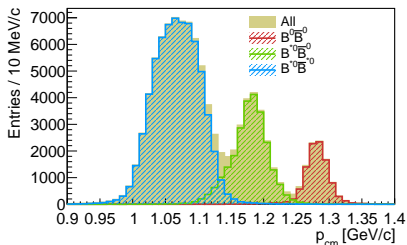
В случае скоррелированных  $B$ -мезонов в  $C$ -нечётном состоянии осцилляции подавлены, а в  $C$ -чётном усилены

# $\Upsilon(5S)$ -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  $\pi^0$
- $C$ -чётное состояния:  $B^0\bar{B}^{*0}$ ,  $B^{*0}\bar{B}^0$  + те же распады с  $\pi^0$
- 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)

- 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

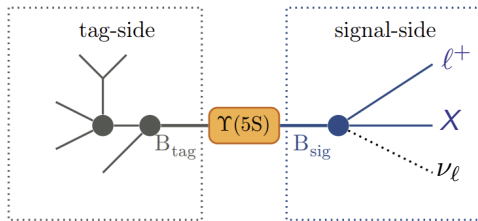
# Идея анализа

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

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

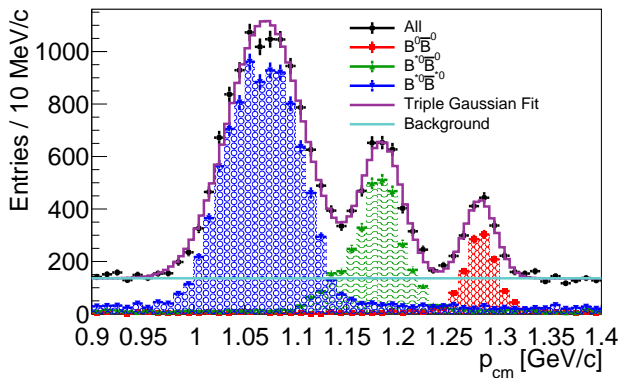


# Определение флейвора второго $B^0$ в событии по лептону

В событии восстанавливается лептон (электрон или мюон):

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

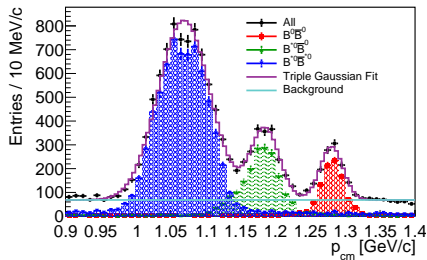
Распределение на моделировании, включая фон от континуума:





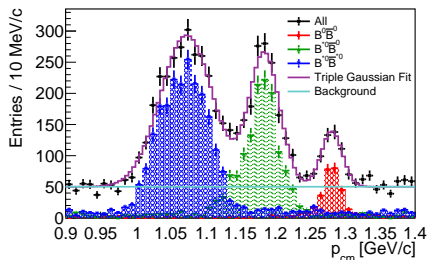
# Вероятности осцилляции

$B^0 \ell^-$  пары на моделировании:



$$\begin{aligned}N_{B^0 \bar{B}^0} &= 924 \pm 114 \\N_{B^{*0} \bar{B}^0} &= 1547 \pm 145 \\N_{B^{*0} \bar{B}^{*0}} &= 7010 \pm 258\end{aligned}$$

$B^0 \ell^+$  пары на моделировании:



$$\begin{aligned}N_{B^0 \bar{B}^0} &= 338 \pm 85 \\N_{B^{*0} \bar{B}^0} &= 1168 \pm 142 \\N_{B^{*0} \bar{B}^{*0}} &= 2283 \pm 173\end{aligned}$$

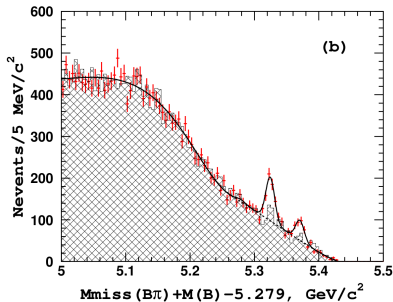
Ожидаемая точность для вероятностей осцилляции:  $(26.7 \pm 1.2)\%$  для  $B^0 \bar{B}^0$  событий,  $(43.0 \pm 1.0)\%$  для  $B^0 \bar{B}^{*0}$  событий и  $(24.5 \pm 0.4)\%$  для  $B^{*0} \bar{B}^{*0}$  событий

# 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

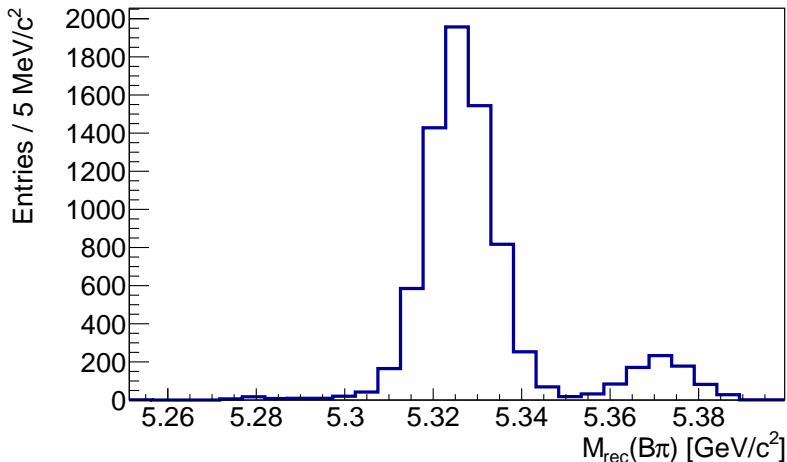
Сигнальная переменная: поправленная масса отдачи в системе  $B\pi$ :

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



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

# Распределение массы отдачи на моделировании



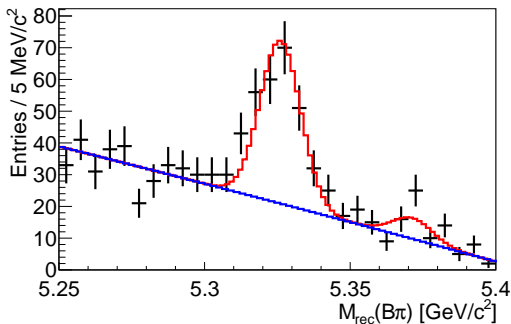
Пики соответствуют следующим событиям:  $e^+e^- \rightarrow B^{*0}B^-\pi^+$  или  $e^+e^- \rightarrow B^0B^{*-}\pi^+$  (левый),  $e^+e^- \rightarrow B^{*0}B^{*-}\pi^+$  (правый)

# Вероятность осцилляции по событиям с лептоном

В событии восстанавливается лептон (электрон или мюон):

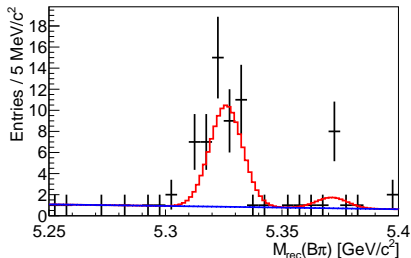
- $dr < 0.5$  см,  $|dz| < 2$  см
- $eID/\mu ID > 0.9$
- $p_{cm} > 1.0$  GeV/c – протв вторичных лептонов

Распределение на моделировании:



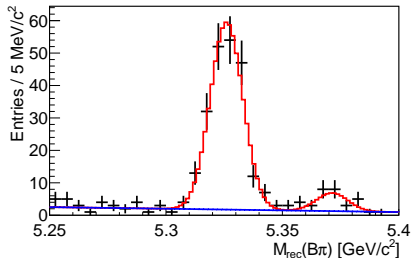
# Вероятности осцилляции

$B\pi\ell^-$  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:

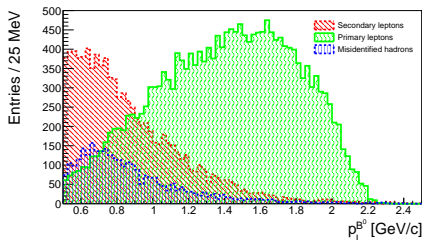
- Оптимизация критериев отбора (sigProb,  $M(B^0)$ , muID и eID)
- Изучение фона (вторичные лептоны, фейки и отражение  $B^+$ ,  $B_s$  на  $B^0$ )
- Колебровка фитирующей функции (размытие пучка, ISR и т. д.)
- Изучение систематических неопределенностей

## Дополнительные слайды

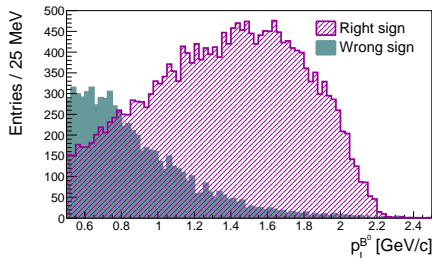
- Значение, которое вносят неправильно таггированные события, планируется получить с помощью оптимизации импульса лептона в системе покоя  $B$ -мезона ( $p_l^{B^0}$ ), используя  $\Upsilon(4S)$  данные
- Импульс лептона в системе центра масс ( $p_l^*$ ) планируется использовать для подавления фоновых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



Первичные, вторичные и  
неправильно  
идентифицированные адроны:

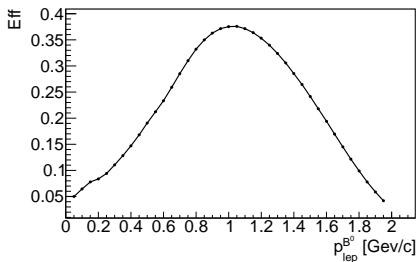


Правильный и неправильный  
знаки:

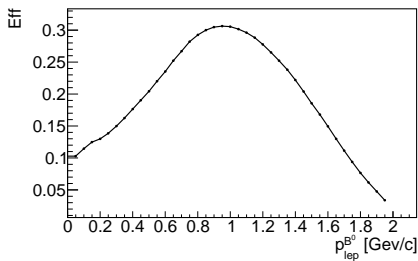


Оптимизация основана на распределениях правильного и  
неправильного знака с учетом неправильно идентифицированных  
адронов

$p_l^{B^0}$  на  $\Upsilon(4S)$ :



$p_l^{B^0}$  на  $\Upsilon(5S)$ :



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

# Оптимизация $M(B^0)$

- $\text{sigProb} > 0.01$
- $\text{elD}/\text{mulD} > 0.9$
- $p_l^{B^0} > 1.0 \text{ GeV}/c$
- $1.4 > p_{B^0}^* > 0.9 \text{ GeV}/c$

| $B^0 \rightarrow$          | $ 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 $\text{GeV}/c^2$  |
| $D_s^{*+} D^-$             |                        |
| $D_s^+ D^{*-}$             |                        |
| $D_s^{*+} D^{*-}$          |                        |
| $J/\psi K^+ \pi^-$         |                        |
|                            |                        |