



# Разработка метода извлечения $V_{cb}$ из инклюзивных полулептонных распадов $B$ -мезонов в эксперименте Belle

Николай Петерс<sup>1,2</sup>, Павел Пахлов<sup>1,2</sup>, Мурад Ясавеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики

<sup>2</sup> Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук

Секция ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук  
и Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН



## Мотивация

Прекрасный метод измерения элементов матрицы ККМ – исследование **абсолютных вероятностей полулептонных распадов**  
При этом две экспериментальные методики дают различающиеся результаты:

- ▶  $|V_{cb}^{incl}| = (41.97 \pm 0.48) \times 10^{-3}$
- ▶  $|V_{cb}^{excl}| = (39.62 \pm 0.47) \times 10^{-3}$

### Инклюзивные распады $\bar{B} \rightarrow X_c \ell \bar{\nu}$

$$B = |V_{cb}|^2 [\Gamma(b \rightarrow q \ell \bar{\nu}_\ell) + 1/m_{c,b} + \alpha_s + \dots]$$

### Эксклюзивные распады $\bar{B} \rightarrow D \ell \bar{\nu}$

$$B \propto |V_{cb}|^2 f^2, f - \text{формфакторы}$$

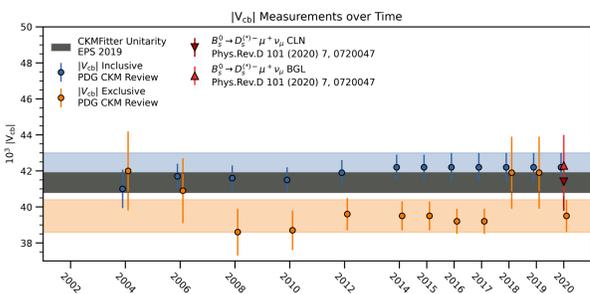
Расхождения обусловлены модельными ограничениями в теоретической и/или экспериментальной методологии

## Измерения $V_{cb}$

Значения  $V_{cb}$  были получены из анализов полулептонных распадов  $B_d^0$  и  $B^\pm$ -мезонов  
**Единственное эксклюзивное измерение** для полулептонных распадов  $B_s^0$ -мезонов  $B_s^0 \rightarrow D_s^{(*)-} \mu^+ \nu_\mu$  с двумя параметризациями формфакторов (LHCb, 2020):

- ▶  $(41.4 \pm 0.6_{(stat)} \pm 0.9_{(syst)} \pm 1.2_{(ext)}) \times 10^{-3}$  (CLN)
- ▶  $(42.3 \pm 0.8_{(stat)} \pm 0.9_{(syst)} \pm 1.2_{(ext)}) \times 10^{-3}$  (BGL)

**Инклюзивный анализ невозможен на БАК**, однако реализуем в Belle



Изображение предоставлено: Marcus Prim

## Метод извлечения $V_{cb}$

$$|V_{cb}| = \sqrt{\frac{B(B_s^0 \rightarrow X_c^- \ell^+ \nu_\ell)}{\tau_{B_s} \Gamma(B_s^0 \rightarrow X_c^- \ell^+ \nu_\ell)}}$$

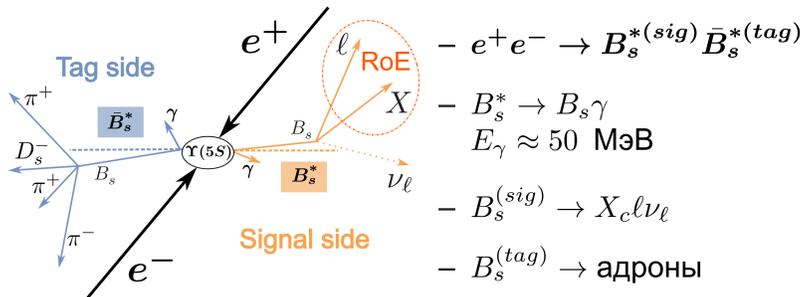
- ▶ Экспериментальное измерение
- ▶ Теоретическое предсказание с  $V_{cb} = 1$

### Operator Product Expansion (OPE)

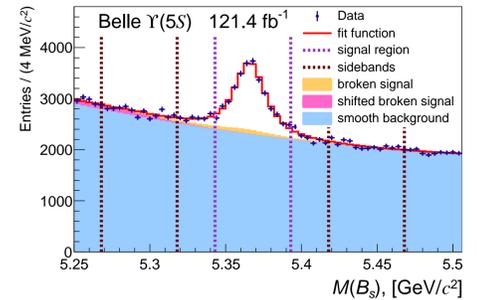
$$d\Gamma = d\Gamma_0 + d\Gamma_{\mu\pi} \frac{\mu_\pi^2}{m_b^2} + d\Gamma_{\mu G} \frac{\mu_G^2}{m_b^2} + d\Gamma_{\rho D} \frac{\rho_D^3}{m_b^3} + d\Gamma_{\rho LS} \frac{\rho_{LS}^3}{m_b^3} + \mathcal{O}(1/m_b^4)$$

Непертурбативные параметры Operator Product Expansion  $\mu_\pi, \mu_G, \rho_D, \rho_{LS}$  не могут быть вычислены из первых принципов КХД, но могут быть получены из подгонки моментов распределений кинематических величин ( $q^2, M_{X_c}, E_\ell$ )

## Адронное тагирование



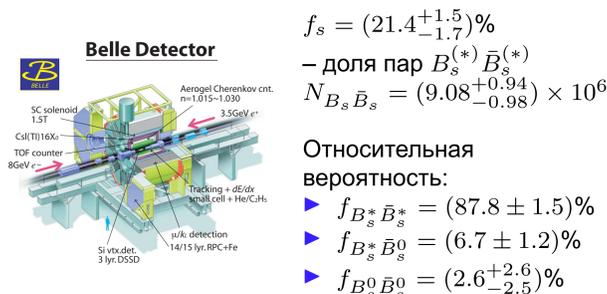
- ▶ Потерянное нейтрино  $\Rightarrow P_{B_s^{(sig)}}$  **не восстанавливается**
- ▶ Каждый  $B_s^*$  испускает **мягкий фотон**, что приводит к **малому размытию угла** между импульсами пары  $B_s$ -мезонов
- ▶ **Тагирование:**  $P_{sig} = (E_{B_s}^{MC}, -\vec{p}_{tag})$ ,  $E_{B_s}^{MC} = 5386$  МэВ
- ▶ Остаток события (RoE):  $\gamma$  и заряженные треки, не ассоциированные с  $B_s^{tag}$   
+ **энергичный заряженный лептон**



Критерии отбора:

- ▶  $sigProb' > 0.0012$
- ▶ выход классификатора FEI
- ▶  $|p_{tag}^* - p_{B_s}^*| < 0.09$  ГэВ/с,
- ▶  $p_{B_s}^* = 0.42$  ГэВ/с
- ▶  $|m_{tag} - m_{B_s}| < 25$  МэВ/с<sup>2</sup>,
- ▶  $m_{B_s} = 5.367$  ГэВ/с<sup>2</sup>

## Данные



- $f_s = (21.4_{-1.7}^{+1.5})\%$
- доля пар  $B_s^{(*)} \bar{B}_s^{(*)}$
- $N_{B_s \bar{B}_s} = (9.08_{-0.98}^{+0.94}) \times 10^6$
- Относительная вероятность:
- ▶  $f_{B_s^* \bar{B}_s^*} = (87.8 \pm 1.5)\%$
- ▶  $f_{B_s^* \bar{B}_s^0} = (6.7 \pm 1.2)\%$
- ▶  $f_{B_s^0 \bar{B}_s^0} = (2.6_{-2.5}^{+2.6})\%$

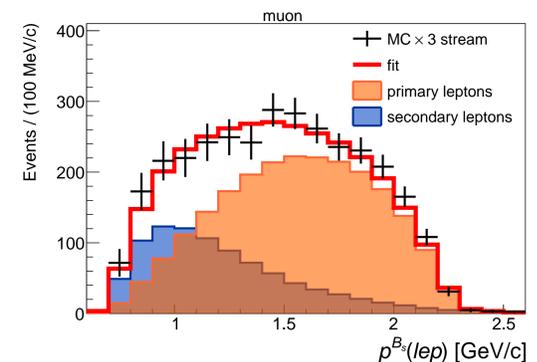
## Измерение $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow X^- \ell^+ \nu_\ell)$

$N_{B_s-\ell}$  извлекается  $\chi^2$ -подгонкой  $p_\ell^{B_s}$   
Заряженный лептон в RoE с  $p_\ell^{B_s} > 0.6$  ГэВ/с

- ▶ Вычитание фоновых событий при помощи взвешенной суммы сайдбендов:  
**Sig** –  $(w_1 \mathbf{SB}_{left} + w_2 \mathbf{SB}_{right})$ ,  
веса  $w_i$  определены интегралами  $m_{tag}$
- ▶ Аппроксимирующие спектры первичных и вторичных лептонов извлекаются при помощи **моделирования Монте-Карло** без применения FEI

## Абсолютная вероятность

Спектры исследованы отдельно для  $e^\pm$  и  $\mu^\pm$



- ▶ MC: 2860
- ▶  $N_{B_s-e} = 2940 \pm 90$
- ▶  $\chi^2/ndf = 1.01$
- ▶ MC: 2415
- ▶  $N_{B_s-\mu} = 2371 \pm 95$
- ▶  $\chi^2/ndf = 0.71$

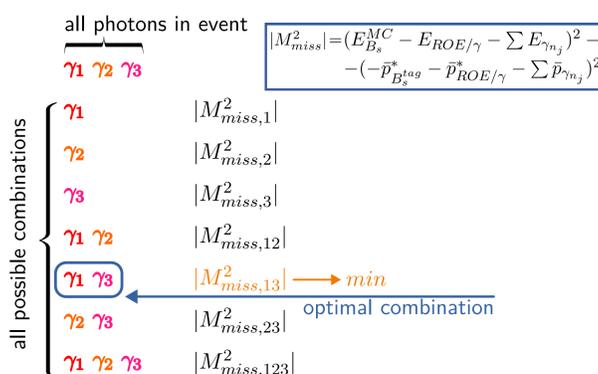
$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow X^- \ell^+ \nu_\ell) = \frac{N_{B_s-\ell}}{N_{B_s}^{tag} \epsilon_\ell}$$

PDG:  $\mathcal{B}(B_s \rightarrow \ell \nu_\ell X) = (9.6 \pm 0.8)\%$

**Ожидаемая точность измерения:**

- ▶  $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow X^- e^+ \nu) = (9.6 \pm 0.7)\%$
- ▶  $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow X^- \mu^+ \nu) = (9.6 \pm 0.9)\%$

## Улучшение разрешения

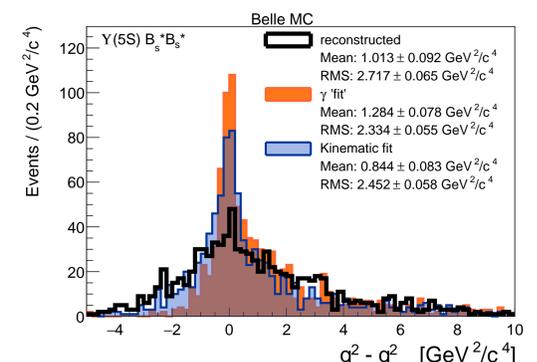


**Реконструированные кинематические параметры имеют низкое разрешение, средние значения смещены**

При этом главная проблема заключается не в разрешениях импульсов отдельных частиц в остатке события, а в **потерянных истинных** или **ошибочно приписанных к остатку события фоновых фотонов**  
Вместо кинематической подгонки импульсов частиц в остатке события  $|M_{miss}^2| \rightarrow 0$ , которая будет не эффективна в случае потерянных частиц, используется **поиск оптимальной комбинации фотонов**, минимизирующей потерянную массу  $|M_{miss}^2|$

## Кинематические спектры

$$q^2 = (P_\nu + P_\ell)^2 = (E_{B_s}^{MC} - E_{X_c})^2 - (\vec{p}_{B_s}^{tag} + \vec{p}_{X_c}^*)^2$$



Дополнительная валидация метода при помощи данных распадов  $\Upsilon(4S)$ -резонанса:

