

# Проверка лептонной универсальности в редких распадах прелестных кварков: $b \rightarrow sl^+l^-$

Dmitriy Zubov

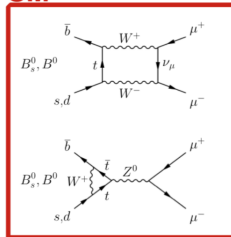
National Research Nuclear University «MEPhI»

17.11.2021

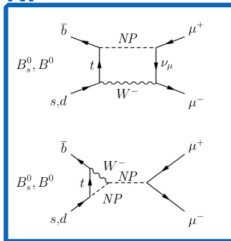
# Почему редкие распады В-мезонов

- ▶ Распады мезонов, для которых вероятность  $\mathcal{B}$  подавлена в СМ, позволяют заметить эффекты Новой физики даже без прямого рождения новых тяжелых частиц.
- ▶ Неизвестные частицы, слишком тяжелые для рождения на БАКе, могут оказывать значительное влияние на частоту процесса в петлях.
- ▶ Большая масса b-кварка открывает широкое поле для косвенных поисков новой физики.
- ▶ Пример: подавленный распад  $B^0$  и  $B_s^0$  мезонов.

SM



NP

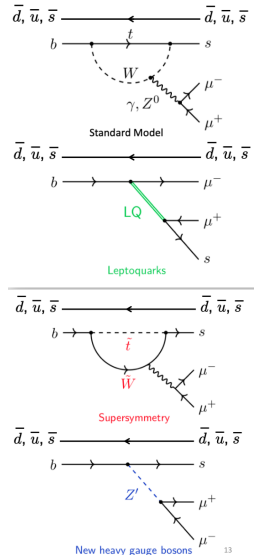


# Переход $b \rightarrow sl^+l^-$

В СМ процессы изменения аромата кварка без изменения заряда, ( $u \leftrightarrow c \leftrightarrow t$ ) и ( $d \leftrightarrow s \leftrightarrow b$ ), запрещены на древесном уровне.

Возможные измерения:

- ▶ Измерение вероятности распада  $\mathcal{B}$
- ▶ Измерение угловых распределений
- ▶ Проверка лептонной универсальности



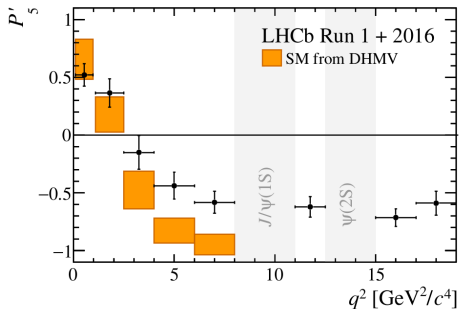
# Аномалии

Отклонения в вероятности распада  $\mathcal{B}$ :

- ▶  $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$
- ▶  $B \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$
- ▶  $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu^+ \mu^-$

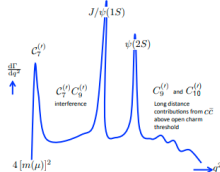
Отклонения в угловых распределениях:

- ▶  $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$
- ▶  $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu^+ \mu^-$



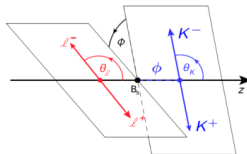
- ▶ Complementary information from different observables
- ▶ Flavour anomalies observed coherently for all observables

## Branching fractions



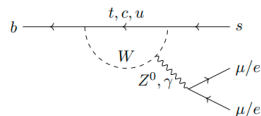
- ▶ Conceptually “simple”
- ▶ Significant hadronic uncertainties

## Angular observables



- ▶ Reduced dependence on form factors
- ▶ Probes structure of potential NP

Lepton universality  
see Shun Watanuki's talk



- ▶ Compare  $\mu^+\mu^-$  and  $e^+e^-$  final states
- ▶ Theoretically clean

Full version [here](#)

arXiv:1304.6325

$$\frac{d^4\Gamma[\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-]}{dq^2 d\vec{\Omega}} = \frac{9}{32\pi} \sum_i I_i(q^2) f_i(\vec{\Omega})$$

$$\frac{d^4\bar{\Gamma}[B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-]}{dq^2 d\vec{\Omega}} = \frac{9}{32\pi} \sum_i \bar{I}_i(q^2) f_i(\vec{\Omega})$$

$$S_i = (I_i + \bar{I}_i) / \left( \frac{d\Gamma}{dq^2} + \frac{d\bar{\Gamma}}{dq^2} \right)$$

$$A_i = (I_i - \bar{I}_i) / \left( \frac{d\Gamma}{dq^2} + \frac{d\bar{\Gamma}}{dq^2} \right)$$

$i$	$I_i$	$f_i$
1s	$\frac{3}{4} [ \mathcal{A}_{\parallel}^L ^2 +  \mathcal{A}_{\perp}^L ^2 +  \mathcal{A}_{\parallel}^R ^2 +  \mathcal{A}_{\perp}^R ^2]$	$\sin^2 \theta_K$
1c	$ \mathcal{A}_0^L ^2 +  \mathcal{A}_0^R ^2$	$\cos^2 \theta_K$
2s	$\frac{1}{4} [ \mathcal{A}_{\parallel}^L ^2 +  \mathcal{A}_{\perp}^L ^2 +  \mathcal{A}_{\parallel}^R ^2 +  \mathcal{A}_{\perp}^R ^2]$	$\sin^2 \theta_K \cos 2\theta_t$
2c	$- \mathcal{A}_0^L ^2 -  \mathcal{A}_0^R ^2$	$\cos^2 \theta_K \cos 2\theta_t$
3	$\frac{1}{2} [ \mathcal{A}_{\perp}^L ^2 -  \mathcal{A}_{\parallel}^L ^2 +  \mathcal{A}_{\perp}^R ^2 -  \mathcal{A}_{\parallel}^R ^2]$	$\sin^2 \theta_K \sin^2 \theta_t \cos 2\phi$
4	$\sqrt{\frac{1}{2}} \text{Re}(\mathcal{A}_0^L \mathcal{A}_{\parallel}^{L*} + \mathcal{A}_0^R \mathcal{A}_{\parallel}^{R*})$	$\sin 2\theta_K \sin 2\theta_t \cos \phi$
5	$\sqrt{2} \text{Re}(\mathcal{A}_0^L \mathcal{A}_{\perp}^{L*} - \mathcal{A}_0^R \mathcal{A}_{\perp}^{R*})$	$\sin 2\theta_K \sin \theta_t \cos \phi$
6s	$2 \text{Re}(\mathcal{A}_{\parallel}^L \mathcal{A}_{\perp}^{L*} - \mathcal{A}_{\parallel}^R \mathcal{A}_{\perp}^{R*})$	$\sin^2 \theta_K \cos \theta_t$
7	$\sqrt{2} \text{Im}(\mathcal{A}_0^L \mathcal{A}_{\parallel}^{L*} - \mathcal{A}_0^R \mathcal{A}_{\parallel}^{R*})$	$\sin 2\theta_K \sin \theta_t \sin \phi$
8	$\sqrt{\frac{1}{2}} \text{Im}(\mathcal{A}_0^L \mathcal{A}_{\perp}^{L*} + \mathcal{A}_0^R \mathcal{A}_{\perp}^{R*})$	$\sin 2\theta_K \sin 2\theta_t \sin \phi$
9	$\text{Im}(\mathcal{A}_{\parallel}^{L*} \mathcal{A}_{\perp}^L + \mathcal{A}_{\parallel}^{R*} \mathcal{A}_{\perp}^R)$	$\sin^2 \theta_K \sin^2 \theta_t \sin 2\phi$

# Угловые наблюдаемые

$$F_L = S_{1c} = \frac{|\mathcal{A}_0^L|^2 + |\mathcal{A}_0^R|^2}{|\mathcal{A}_0^L|^2 + |\mathcal{A}_0^R|^2 + |\mathcal{A}_{\parallel}^L|^2 + |\mathcal{A}_{\parallel}^R|^2 + |\mathcal{A}_{\perp}^L|^2 + |\mathcal{A}_{\perp}^R|^2}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{d(\Gamma + \bar{\Gamma})/dq^2} \frac{d^4(\Gamma + \bar{\Gamma})}{dq^2 d\vec{\Omega}} = \frac{9}{32\pi} & \left[ \frac{3}{4}(1 - F_L) \sin^2 \theta_K + F_L \cos^2 \theta_K \right. \\ & + \frac{1}{4}(1 - F_L) \sin^2 \theta_K \cos 2\theta_l \\ & - F_L \cos^2 \theta_K \cos 2\theta_l + S_3 \sin^2 \theta_K \sin^2 \theta_l \cos 2\phi \\ & + S_4 \sin 2\theta_K \sin 2\theta_l \cos \phi + S_5 \sin 2\theta_K \sin \theta_l \cos \phi \\ & + \frac{4}{3} A_{\text{FB}} \sin^2 \theta_K \cos \theta_l + S_7 \sin 2\theta_K \sin \theta_l \sin \phi \\ & \left. + S_8 \sin 2\theta_K \sin 2\theta_l \sin \phi + S_9 \sin^2 \theta_K \sin^2 \theta_l \sin 2\phi \right] \end{aligned}$$

$$P_1 = \frac{2 S_3}{(1 - F_L)} = A_T^{(2)},$$

$$P_2 = \frac{2}{3} \frac{A_{\text{FB}}}{(1 - F_L)},$$

$$P_3 = \frac{-S_9}{(1 - F_L)},$$

$$P'_{4,5,8} = \frac{S_{4,5,8}}{\sqrt{F_L(1 - F_L)}},$$

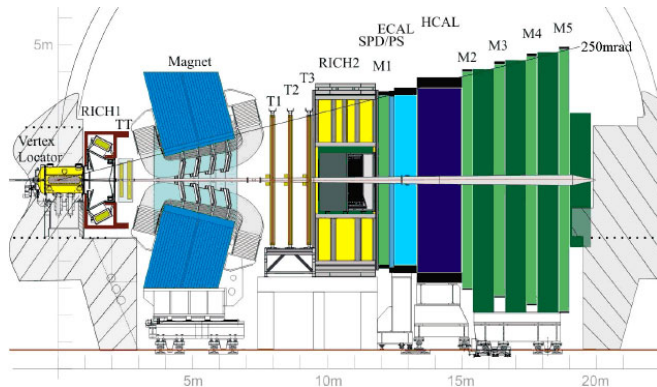
$$P'_6 = \frac{S_7}{\sqrt{F_L(1 - F_L)}}.$$

# Проверка лептонной универсальности

- ▶ В СМ взаимодействие лептонов с калибровочными бозонами не зависит от сорта лептонов.
- ▶ Отличия в вероятности распада  $\mathcal{B}$  возникают из-за разницы в фазовых пространствах и эффектов спиральности.
- ▶  $R_M = \frac{B \rightarrow M \mu^+ \mu^-}{B \rightarrow M e^+ e^-} \simeq 1$
- ▶ Экспериментально наблюдались нарушения лептонной универсальности для некоторых процессов со значимостью 2-3  $\sigma$ :
  - ▶  $B^0 \rightarrow K^{*0} l^+ l^-$ ,  $B^0 \rightarrow K_s^0 l^+ l^-$  и  $B^+ \rightarrow K^{*+} l^+ l^-$   
[arXiv:2110.09501],  $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$  [arXiv:2103.11769]

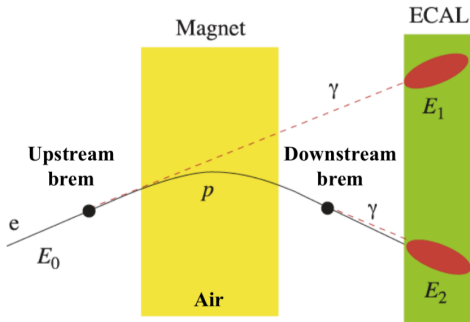


# Детектор LHCb



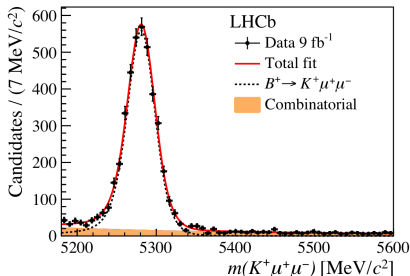
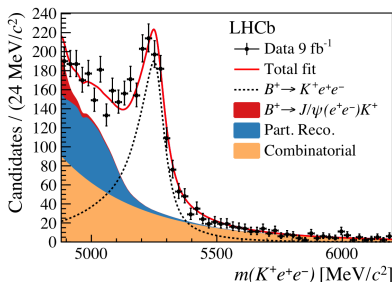
## Электроны и мюоны

- ▶ При прохождении через вещество детектора электроны с большой вероятностью излучают жесткий тормозной фотон.



- ▶ Такой фотон, как правило, излучается до магнита.
- ▶ Для восстановления энергии электрона ищут фотон ( $E_T > 75$  МэВ), направление которого совпадает с начальным направлением электрона.

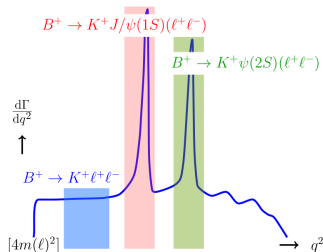
# Электроны и мюоны



- ▶ Даже после восстановления энергии тормозным фотоном разрешение инвариантных масс с электронами хуже чем с мюонами.
- ▶ Контроль разницы между эффективностью электронов и мюонов лежит в основе стратегии анализа.

# Стратегия анализа

- ▶ Измерялось двойное отношение  $R_K$
- ▶ Многие систематики сокращаются при измерении двойного отношения
- ▶ Число событий каждого процесса определялось фитом инвариантной массы частиц конечного состояния
- ▶ Эффективности вычислялись с использованием симуляции



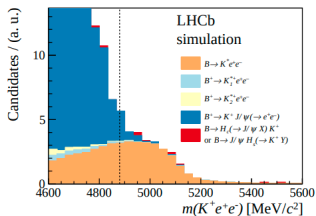
$$\begin{aligned}
 R_K &= \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi[\rightarrow \mu^+ \mu^-] K^+)} \bigg/ \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi[\rightarrow e^+ e^-] K^+)} = \\
 &= \frac{N(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\varepsilon(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)} \cdot \frac{\varepsilon(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}{N(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)} \times \\
 &\times \frac{\varepsilon(B^+ \rightarrow J/\psi[\rightarrow \mu^+ \mu^-] K^+)}{N(B^+ \rightarrow J/\psi[\rightarrow \mu^+ \mu^-] K^+)} \cdot \frac{N(B^+ \rightarrow J/\psi[\rightarrow e^+ e^-] K^+)}{\varepsilon(B^+ \rightarrow J/\psi[\rightarrow e^+ e^-] K^+)}
 \end{aligned}$$

# Отбор событий и фоновые процессы

- ▶ Условия соответствия PID и ограничения на инвариантные массы позволяют снизить фон от других распадов  $B$ -мезонов до пренебрежимого уровня:
  - ▶ Условие отбора  $m_{K^+e^-} > m_{D^0}$  подавляет фоновый процесс  $B^+ \rightarrow \bar{D}^0(+e^{\nu})e^+\bar{\nu}$ ;
  - ▶ Отбор по PID подавляет процесс  $B \rightarrow K\pi_{(\rightarrow e^+)}^+\pi_{(\rightarrow e^-)}^-$
- ▶ Многомерная селекция (BDT) снижает вклад комбинаторного фона и увеличивает сигнальную значимость

Остаточные фон отсекается ограничением на  $m(K^+l^+l^-)$ :

- ▶  $B^+ \rightarrow K^+J/\psi(\rightarrow e^+e^-)$
- ▶ Частично восстановленный распад  $B \rightarrow K^+\pi^-e^+e^-$



## Измерение $R_{J/\psi}$

- ▶ Чтобы убедиться, что эффективности оцениваются правильно проверялось

$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi [\rightarrow \mu^+ \mu^-] K^+)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi [\rightarrow e^+ e^-] K^+)} = 1$$

- ▶ Результат проверки:

$$R_{J/\psi} = 0.981 \pm 0.020(\text{stat} + \text{syst})$$

- ▶ Сопласуется с предсказанием СМ и результатами предыдущих измерений.

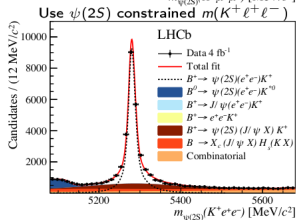
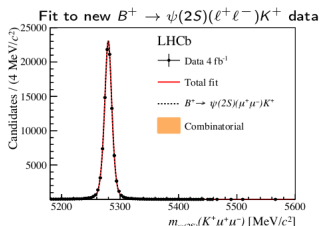
# Измерение $R_{\psi(2S)}$

$$R_{\psi(2S)} = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \psi(2S)[\rightarrow \mu^+\mu^-]K^+)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi[\rightarrow \mu^+\mu^-]K^+)} \bigg/ \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \psi(2S)[\rightarrow e^+e^-]K^+)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi[\rightarrow e^+e^-]K^+)}$$

- ▶ Независимая проверка метода двойного отношения за пиком  $J/\psi$
- ▶ Результат хорошо согласуется с СМ:

$$R_{J/\psi} = 0.997 \pm 0.011(\text{stat} + \text{syst})$$

- ▶ Результат может быть интерпретирован как самая точная проверка лептонной инвариантности в распаде  $\psi(2S) \rightarrow l^+l^-$

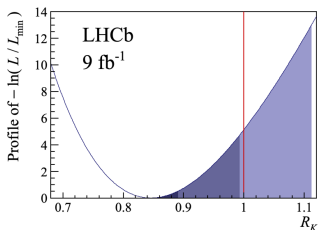
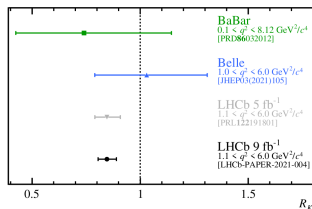


# Результаты измерения $R_K$ на данных 1-ого и 2-ого раунда

$$R_K = 0.846^{+0.042}_{-0.039}(\text{stat})^{+0.013}_{-0.012}(\text{syst})$$

- ▶ Доказательство нарушения лептонной универсальности на уровне  $3.1\sigma$
- ▶ На основе полученного  $R_K$  и ранее полученного  $\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)$  [JHEP06(2014)133] было вычислено  $\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)$ :

$$\frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}{dq^2} = (28.6^{+1.5}_{-1.4}(\text{stat}) \pm 1.4(\text{syst})) \times 10^{-9} \frac{c^4}{\text{GeV}^2}$$





# Заключение

- ▶ Все эти отклонения не производят впечатления чего-то беспорядочного. Измеренные величины отклоняются не куда попало, а в одном общем направлении.
- ▶ Похоже, что аномалии наблюдаются именно для мюонов, и все они дают предпочтение одному вполне конкретному варианту их взаимодействия с кварками.
- ▶ Накопленный теоретиками опыт показывает, что именно так должна проступить Новая физика: мы сразу несколькими способами нащупываем в законах микромира какой-то неожиданный сбой.

На подходе ряд других измерений LHCb:

- ▶  $R_K^*$ ,  $R_{pK}$ ,  $R_\phi$  и др.
- ▶  $R_K$  и  $R_K^*$  для высоких  $q^2$
- ▶ Угловые анализы  $B^+ \rightarrow K^* e^+ e^-$  и  $B^+ \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$  распадов
- ▶  $b \rightarrow s \tau^+ \tau^-$  и проверки лептонной универсальности с  $\tau$ -лептонами