

Исследования нарушения лептонного аромата, CP-инвариантности и R(K*) аномалии в экспериментах на БАК

В. В. Синецкий^{1,2,*}, О. В. Мешков^{1,2,†}, Л. Н. Смирнова^{1‡}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53

(Статья поступила 17.06.2019; Подписана в печать 01.08.2019)

Представлен обзор результатов экспериментов ATLAS и LHCb на Большом адронном коллайдере (БАК) по исследованию нарушения лептонного аромата, CP-инвариантности в распадах B_s^0 -мезонов и аномалии в значениях отношений относительных вероятностей некоторых В-распадов с участием пар мюонов и электронов, численные значения которых могут свидетельствовать об эффектах новой физики за пределами Стандартной модели. Показано сравнение с результатами других экспериментов.

PACS: 13.20.Ne, 13.25.Nw, 13.30.Ce УДК: 539.126

Ключевые слова: лептонный аромат, CP-инвариантность, Большой адронный коллайдер, БАК, В-мезон.

Новые явления, выходящие за рамки предсказаний стандартной модели, могут влиять на величину CP-нарушений в распадах b-адронов. Одним из чувствительных к таким явлениям является распад $B_s^0 \rightarrow J/\psi \varphi$. Нарушение CP-инвариантности в нем происходит за счет интерференции между прямыми распадами и распадами посредством $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ -осцилляций. Частота этих осцилляций характеризуется разницей Δm_s масс тяжелого (B_H) и легкого (B_L) массовых состояний. Величина CP-нарушения в данном распаде характеризуется величиной φ_s , которая определяется как разница слабых фаз между амплитудой $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ -смешивания и амплитудой распада $b \rightarrow c\bar{c}$.

В предположении отсутствия проявлений новой физики, влияющих на смешивание и распады B_s^0 -мезонов, значение величины $\varphi_s = -0.0363_{-0.0015}^{+0.0016}$ рад оценено путем объединения результатов измерений других наблюдаемых из области физики b-адронов и физики каонов.

Другими характеристиками, описывающими $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ -смешивание, являются ширина распада $\Gamma_s = (\Gamma_L + \Gamma_H)/2$ и разница ширин $\Delta\Gamma_s = \Gamma_L - \Gamma_H$, где Γ_L и Γ_H — ширины распадов легкого и тяжелого массовых состояний соответственно. В рамках СМ значение этого параметра равно $\Delta\Gamma_s = 0.087 \pm 0.021 \text{ пс}^{-1}$ [1].

Предыдущие измерения φ_s и $\Delta\Gamma_s$ были проведены в экспериментах ATLAS, CMS, LHCb. Дополнительные улучшения в измерения фазы φ_s для B_s^0 были достигнуты коллаборацией LHCb в распадах $\psi(2s)\varphi$ и $D_s^+ D_s^-$.

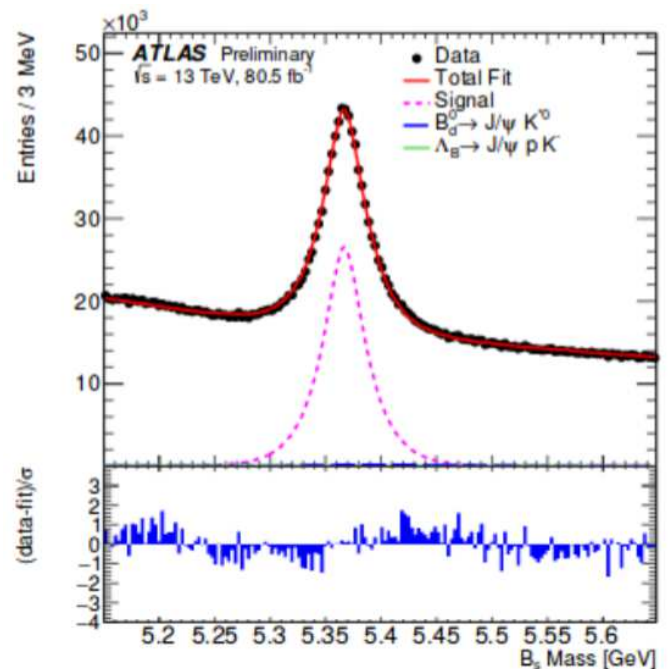


Рис. 1: Массовая проекция фита в линейном масштабе, сплошной красной линией отмечен суммарный фит, пунктирной фиолетовой линией — сигнальная компонента, пунктирной темно-синей линией — компонента распада B_d , сплошной голубой линией — компонента распада Λ_b [1]

На конференции Moriond EW 2019 были доложены новые результаты измерения параметров распада на интегральной светимости БАК 80.5 фб^{-1} , набранные в эксперименте ATLAS в 2015–2017 гг. Результат фазы φ_s , полученный на этих данных составляет $-0.076 \pm 0.034(\text{стат.}) \pm 0.019(\text{сист.})$ рад. На рис. 1 показана массовая проекция фита событий $B_s^0 \rightarrow J/\psi \varphi$.

*E-mail: vv.sineckiy@physics.msu.ru

†E-mail: ov.meshkov@physics.msu.ru

‡E-mail: lms@physics.msu.ru

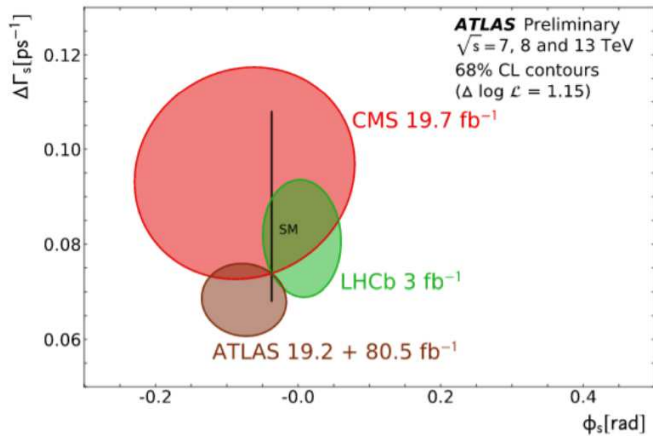


Рис. 2: Контуры функции правдоподобия на плоскости $\varphi_s - \Gamma_s$ [1]

Скомбинированный результат эксперимента ATLAS на данных первого периода работы БАК (Run-1) 19.2 fb^{-1} и в 2015–2017 гг. 80.5 fb^{-1} показан в виде контуров функции правдоподобия на плоскости $\varphi_s - \Gamma_s$ на рис. 2. На этом же рисунке приведены результаты экспериментов CMS и LHCb, а также предсказание SM. Результат эксперимента ATLAS дает значимый вклад в мировое среднее этих параметров.

Процессы нарушения лептонного аромата допускаются в Стандартной модели (SM) с массовыми нейтрино, однако их вероятность является величиной исчезающе малой. Например, вероятность распада $\tau \rightarrow 3\mu$ порядка 10^{-14} [2], что находится вне досягаемости любого сегодняшнего и даже будущего (в сколь-либо осязаемо отдаленной перспективе) эксперимента. Таким образом, обнаружение данных процессов было бы однозначным доказательством существования физики за пределами SM, а также адекватности тех моделей, которые предполагают существование ещё не открытых частиц в шкале энергий порядка ТэВ. Эти теории часто имеют сильно повышенные вероятности распадов, идущих с нарушением лептонного аромата, предоставляя возможность наблюдать их в текущих экспериментах. Например, ряд моделей за пределами SM предсказывают, что вероятность того же распада $\tau \rightarrow 3\mu$ будет порядка $10^{-10} - 10^{-8}$ [3–5].

Изучение нарушения лептонного аромата в безнейтринных распадах таонов осуществляется экспериментами ATLAS и LHCb Большого адронного коллайдера.

Анализ эксперимента ATLAS [6] основывается на данных, набранных в 2012 г. при энергии протон-протонного соударения 8 ТэВ с интегральной светимостью $20,3 \text{ fb}^{-1}$. Источником таонов были выбраны распады $W \rightarrow \tau\nu$, так как в данном случае достигается высокая эффективность триггера и реконструкции: таон определяется как три мюона, лежащих в относительно небольшом конусе, ввиду релятивистской скорости тау-лептона, а нейтрино — по недостающей поперечной энергии.

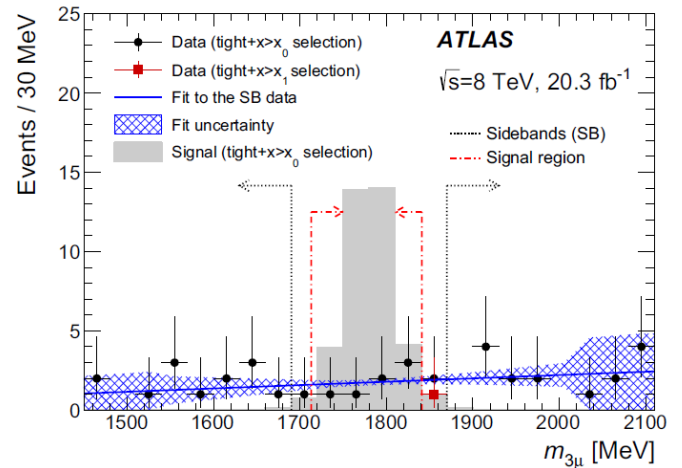


Рис. 3: (левый) Трехмюонное распределение инвариантной массы для $\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-$, измеренное в эксперименте ATLAS. Кружки показывают данные после первого жесткого отбора, а квадрат показывает единственную точку данных, оставшуюся после второго жесткого отбора. Области фона и сигнала обозначены пунктирными и штрихпунктирными стрелками соответственно. (правый) Распределение инвариантной массы для трех мюонов, измеренное в эксперименте LHCb [6]

Кандидаты распада таона на три мюона отбирались в три этапа с использованием технологии машинного обучения BDT (Boosted Decision Tree, деревья принятия решений).

В результате анализа не оказалось ни одного события в окне поиска сигнала, которое бы прошло финальный отбор. Таким образом была установлена верхняя граница на вероятность распада $\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-$

$$Br(\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-) < 3.37 \times 10^{-7}$$

с уровнем доверия 90%.

В анализе коллаборации LHCb [7] использовались тау-лептоны от распада адронов, содержащих b и c-кварки. Анализ базируется на данных, набранных в течение сеанса Run 1 2011–2012 гг., и соответствуют интегральной светимости порядка 3 fb^{-1} . Для отбора событий также применяются технологии машинного обучения: многопеременный классификатор и нейронные сети. В результате, было установлено ограничение на вероятность распада $\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-$

$$Br(\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-) < 4.6 \times 10^{-8}$$

на уровне доверия 90%.

Хотя результат эксперимента LHCb на порядок лучше, чем у ATLAS, однако он в 2.5 раза выше, чем лучший установленный на сегодняшний день коллаборацией Belle [8].

Не менее интересна и проблема лептонной универсальности. В рамках SM взаимодействие лептонов посредством калибровочных бозонов является инвариантным относительно аромата первых. Процессы изме-

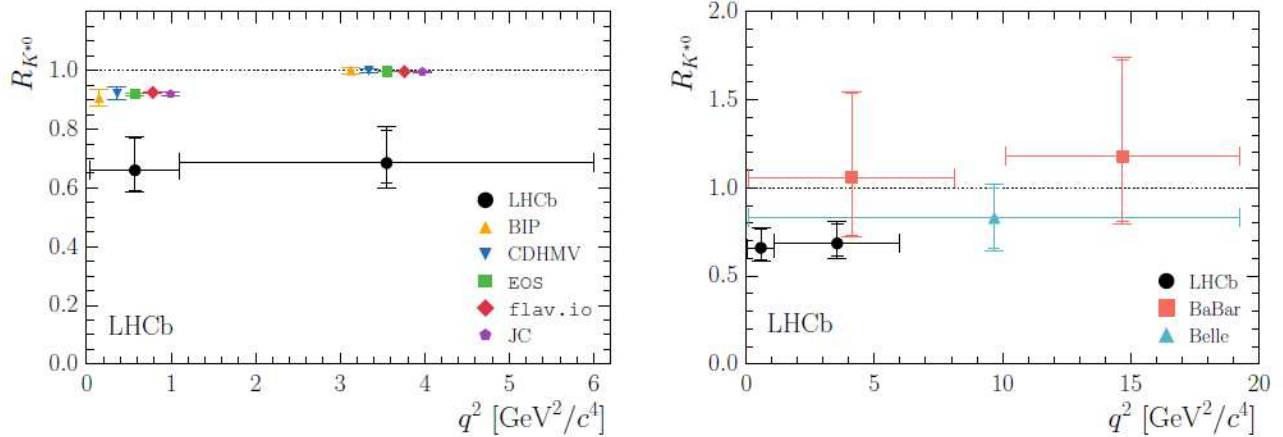


Рис. 4: Слева — сравнение измерений с теоретическими предсказаниями: BIP [12], CDHNV [13–15], EOS [16, 17], flav.io [18–20] и JC [21]. Справа — сравнение $R_{K^{*0}}$ измерений, сделанных LHCb с результатами предыдущих экспериментов [22, 23]

нения аромата с нейтральным током (FCNC), в которых кварк меняет свой аромат без изменения электрического заряда, обеспечивают идеальную лабораторию для проверки лептонной универсальности. СМ запрещает FCNC на древесном уровне и допускает только амплитуды, включающие электрослабые петлевые (пингвиновые и прямоугольные) диаграммы Фейнмана. Отсутствие доминирующего вклада СМ на древесном уровне означает, что такие переходы редки и поэтому чувствительны к существованию новых частиц. Присутствие таких частиц может привести к значительному увеличению или уменьшению скорости конкретных распадов или изменению углового распределения частиц в начальном состоянии. Особенно чувствительными для таких эффектов являются соотношения типа

$$R_H = \frac{\int \frac{d\Gamma(B \rightarrow H\mu^+\mu^-)}{dq^2} dq^2}{\int \frac{d\Gamma(B \rightarrow He^+e^-)}{dq^2} dq^2},$$

$$R_{K^{*0}} = \begin{cases} 0.66^{+0.11}_{-0.07}(\text{стат.}) \pm 0.03(\text{сист. для } 0.045 < q^2 < 1.1 \text{ ГэВ}^2 c^{-4}) \\ 0.69^{+0.11}_{-0.07}(\text{стат.}) \pm 0.05(\text{сист. для } 1.1 < q^2 < 6.0 \text{ ГэВ}^2 c^{-4}) \end{cases}$$

на уровне доверия 95%.

На рис. 2 результат LHCb показан в сравнении с результатами предыдущих экспериментов.

Аналогичный измерения были проведены коллаборацией LHCb и для распадов $B^+ \rightarrow K^+\mu^+\mu^-$ и $B^+ \rightarrow K^+e^+e^-$ [24]. Здесь также наблюдаются отклонения от предсказаний СМ такого же порядка и на том же уровне доверия — 2.6σ и величина отношения составила $0.745^{+0.090+0.036}_{-0.074-0.036}$.

В конце марта 2019 г. были опубликованы результаты анализа данных [25], собранных эксперимен-

где H — адрон, содержащий s -кварк (K или K^*), Γ — парциальная ширина распада, зависящая от q^2 — инвариантной массы пары лептонов.

Согласно представлениям СМ, данное отношение должно быть близко к единице [9, 10]. Однако в исследованиях распада B -мезонов замечаются существенные отклонения от предсказаний СМ.

Коллаборацией LHCb была выполнена проверка лептонной универсальности с помощью измерений отношения вероятностей распадов $B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-$ и $B^0 \rightarrow K^{*0}e^+e^-$ [11]. K^{*0} -мезон реконструировался из конечного состояния $K^+\pi^-$. Данные соответствуют интегральной светимости 3fb^{-1} и записаны в течение 2011 и 2012 гг. Отношение было измерено в двух областях квадрата инвариантной массы двух лептонов

том LHCb за 2015 и 2016 гг. Измеренное отношение приблизилось к предсказаниям СМ и стало равным $0.846^{+0.060+0.016}_{-0.054-0.014}$ на уровне доверия 2.5.

Таким образом, видно, что наблюдаемые отклонения от предсказаний СМ на уровне порядка 2.5 стандартных отклонения не могут пока претендовать на открытие новой физики. За время работы БАК в сеансе Run 2 было набрано значительное количество данных, что позволит более точно проверить эти предсказания.

-
- [1] *ATLAS Collaboration* Measurement of the CP violation phase φ_s in $B^0_s \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS at 13 TeV. ATLAS-CONF-2019-009.
- [2] *Pham X.-Y.* // Eur. Phys. J. 1999. **C8** P. 513; arXiv:hep-ph/9810484 [hep-ph].
- [3] *Raidal M.* et al. // Eur. Phys. J. 2008. **C57** P. 13; arXiv:0801.1826 [hep-ph].
- [4] *Abada et al.* // JHEP. 2014. **1411**. P. 048; arXiv:1408.0138 [hep-ph].
- [5] *Arganda E., Herrero M.J.* // Phys. Rev. 2006. **D73**. 055003; arXiv:hep-ph/0510405 [hep-ph].
- [6] *ATLAS Collaboration* // EPJC. 2016. **76**. P. 232; arXiv:1601.03567.
- [7] *LHCb collaboration* // JHEP 2015. 02. P. 121; arXiv:1409.8548.
- [8] *Belle collaboration* // Phys. Lett. 2010. **B687**. P. 139; arXiv:1001.3221.
- [9] *Hiller G., Kruger F.* // Phys. Rev. 2004. **D69**. 074020; arXiv:hep-ph/0310219.
- [10] *Bouchard C.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. **111**. 162002; arXiv:1306.0434.
- [11] *LHCb collaboration* // JHEP 2017. 08. P. 055; arXiv:1705.05802.
- [12] *Bordone M., Isidori G., Pattori A.* // Eur. Phys. J. 2016. **C76**. P. 440; arXiv:1605.07633.
- [13] *Descotes-Genon S., Hofer L., Matias J., Virto J.* // JHEP 2016. 06. P. 092; arXiv:1510.04239.
- [14] *Capdevila B., Descotes-Genon S., Matias J., Virto J.* JHEP 2016. 10. P. 075; arXiv:1605.03156.
- [15] *Capdevila B., Descotes-Genon S., Hofer L., Matias J.* JHEP 2017. 04. P. 016; arXiv:1701.08672.
- [16] *Serra N., Silva Coutinho R., van Dyk D.* // Phys. Rev. 2017. **D95**. 035029; arXiv:1610.08761.
- [17] *van Dyk D.* et al. EOS - A HEP program for avor observables, <https://eos.github.io/>; D. van Dyk et al., EOS ("delta456" release), doi: 10.5281/zenodo.159680.
- [18] *Bharucha A., Straub D. M., Zwicky R.* // JHEP 2016. 08. P. 098; arXiv:1503.05534.
- [19] *Altmannshofer W., Nieho C., Stangl P., Straub D. M.* Status of the $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ anomaly after Moriond 2017. arXiv:1703.09189.
- [20] *Straub D.* et al. av-io/avio v0.19, doi: 10.5281/zenodo.292991.
- [21] *Jager S., Camalich J.M.* // Phys. Rev. 2016. **D93**. 014028; arXiv:1412.3183.
- [22] *BaBar collaboration, Lees J. P.* et al. // Phys. Rev. 2012. **D86**. 032012; arXiv:1204.3933.
- [23] *Belle collaboration, Wei J.-T.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2009. **103**. 171801; arXiv:0904.0770.
- [24] *LHCb collaboration* // Phys. Rev. Lett. 2014. 162002; arXiv:1406.6482.
- [25] *LHCb collaboration* // Phys. Rev. Lett. 2019. 162002; arXiv:1903.09252.
-

Studies of Lepton Flavor Violation, CP–invariance and $R(K^*)$ anomaly at the LHC experiments

V. V. Sineckii^{1,2,a}, O. V. Meshkov^{1,2,b}, L. N. Smirnova^{1,c}

¹Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

²P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Science. Moscow 119991, Russia

E-mail: ^avv.sineckiy@physics.msu.ru, ^bov.meshkov@physics.msu.ru, ^clns@physics.msu.ru

Review of results of the experiments ATLAS and LHCb at the Large Hadron Collider (LHC) on studies of Lepton Flavor Violation, CP-invariance in B_s^0 -meson decays and anomaly in value of the ratio of branching ratios of some B-decays with muon and electron pairs, which numerical values may demonstrate evidences of new physics outside the Standard Model, is presented. The comparison with results of other experiments is shown.

PACS: 13.20.He, 13.25.Hw, 13.30.Ce

Keywords: lepton flavor, CP–invariance, Large Hadron Collider, LHC, B–meson.

Received 17 June 2019.

Сведения об авторах

1. Синецкий Виктор Владимирович — аспирант; тел.: (495) 932-89-72, e-mail: vv.sineckiy@physics.msu.ru.
 2. Мешков Олег Васильевич — аспирант; тел.: (495) 932-89-72, e-mail: ov.meshkov@physics.msu.ru.
 3. Смирнова Лидия Николаевна — доктор физ.-мат.наук, профессор; (495) 932-89-72, e-mail: lns@physics.msu.ru.
-