

***Исследование  $R(K^*)$  аномалии в эксперименте ATLAS на БАК***

**Аспирант: Виктор Синецкий**

**Научный руководитель: д.ф.-м.н. профессор  
Смирнова Лидия Николаевна**

В октябре 2017 г. эксперимент ATLAS отметил свой 25-летний юбилей. В октябре 1992 г. было опубликовано заявление о намерениях, где были изложены планы строительства детектора с допущением нескольких вариантов создания его подсистем. Строительство детектора ATLAS было завершено в 2008 г. Данные, собранные экспериментами ATLAS и CMS в 2011 -- 2012 гг. при энергиях соударения протонов в системе центра масс 7 и 8 ТэВ, привели к открытию последней недостающей частицы Стандартной модели -- бозона Хиггса. Это открытие было подтверждено во втором сеансе работы БАК при энергии соударения протонов 13 ТэВ, начавшегося в 2015 г., но до настоящего момента не было обнаружено, ни прямых, ни косвенных свидетельств новой физики за пределами Стандартной модели.

В условиях высокой светимости обновленная трековая система ATLAS позволит значительно расширить интервал измерений треков по переменной псевдобыстроты  $\eta$  от  $\eta < 2.5$  до  $\eta < 4$  и использовать информацию о треках на более ранних этапах триггерного отбора событий, например использовать треки при вычислении величины потерянного поперечного импульса, или потерянной энергии  $E_{\text{miss}}^T$ . Новая трековая система увеличит эффективность измерений  $\tau$ -лептонов, эффективность подавления фоновых струй от наложения событий, улучшит определение изолированности для треков мюонов, используемой при их идентификации. Особое значение новая трековая система будет иметь для измерений распадов В-адронов, в первую очередь для подавления фона и увеличения пространственного разрешения при поиске редких распадов  $B_s$ -мезонов.

Детектор ATLAS представляет собой детектор общего назначения цилиндрической конструкции, имеющий  $4\pi$ -геометрию. Основными компонентами установки являются внутренний детектор (Inner Detector, ID), окруженный сверхпроводящим соленоидом, обеспечивающим осевое

магнитное поле 2 Т, калориметрическая система и мюонный спектрометр (Muon Spectrometer, MS) в магнитном поле, генерируемом тремя тороидальными магнитами.

Внутренний детектор (ID) обеспечивает реконструкцию треков в области  $\eta < 2.5$  и состоит из трех подсистем: пиксельного детектора (Pixel Detector), полупроводникового микрострипового детектора (Semiconductor Tracker, SCT) и газонаполненного трекового детектора переходного излучения (Transition Radiation Tracker, TRT). Во время подготовки к сеансу Run 2 (LS1) в дополнение к уже имеющимся трем слоям пиксельного детектора для увеличения эффективности реконструкции первичных вершин был добавлен дополнительный слой пиксельных детекторов, так называемый В-слой (Insertable B-Layer, IBL).

Калориметрическая система детектора ATLAS, предназначенная для измерения энергий элементарных частиц, охватывает область псевдобыстроты  $\eta < 3.2$  и состоит из двух частей: электромагнитного калориметра на основе свинца и жидкого аргона и свинца  $\eta < 3.2$  и адронного, построенного на технологии пластичного сцинтиллятора и стали для  $\eta < 1.7$  и жидкого аргона и свинца для  $1.5 < \eta < 3.2$ .

Мюонный спектрометр (MS) служит для идентификации мюонов, реконструкции их треков и прецизионного измерения импульсов. Спектрометр состоит из центральной, или барельной части, перекрывающей область псевдобыстроты  $\eta < 1.7$  и двух торцевых секций для областей псевдобыстроты  $1.05 < \eta < 2.7$ . Камеры с резистивными пластинами (Resistive Plate Chambers, RPC) и тонкоззорные камеры (Thin Gap Chambers, TGC) служат для триггерного отбора мюонов в областях псевдобыстроты  $\eta < 1.05$  и  $1.0 < \eta < 2.4$  соответственно. Они также определяют координаты мюонов ( $\eta$ ,  $\phi$ ). Мониторируемые дрейфовые трубки (Monitored Drift Tubes, MTD) и

катодные полосковые камеры (Cathode Strip Chambers, CSC) используются для прецизионного измерения импульсов мюонов и координат их треков в областях  $\eta < 2.7$  и  $\eta > 2$  соответственно.

Триггер и система сбора данных осуществляют отбор нужных событий и исключение ненужных, а также обеспечивают запись данных в соответствующих форматах для их последующей обработки. Подробнее о данных системах будет сказано в следующей главе. Важной частью триггерной системы является мюонный триггер.

Триггер первого уровня получает информацию от калориметров и мюонного спектрометра (камер RPC и TGC), осуществляя отбор событий, например, с большими потерями электромагнитной энергии или треки мюонов с большими  $p_T$  ( $> 1$  ГэВ). Параллельно информация с электроники считывания поступает на временное хранение в буферы (Front-End buffers, EF), где хранится некоторое время, равное времени работы L1 триггера  $\sim 2,5$  мкс, пока не будет дана команда на считывание, либо на исключение данной информации из дальнейшего анализа. После идентификации информация об этих характеристиках собирается и отправляется в центральный триггер, где объединяется, и результат сравнивается с 256 программируемыми триггерными элементами, представляющими собой требования к характеристикам найденных объектов. Все вычисления, необходимые для этого, осуществляются центральным триггерным процессором (Central Trigger Processor, СТР). В сеансе Run 2 в дополнение к СТР добавлен так называемый топологический процессор (L1Тор), который позволяет вычислять характеристики комбинаций объектов, такие как угловое расстояние и инвариантная масса двух объектов.

Быстрый трекер (FTK) представляет собой систему электроники, которая проводит глобальную реконструкцию треков для событий, прошедших

триггер первого уровня L1. Иными словами, FTK реконструирует треки во всей области детектора, а не только в RoI, как это делает триггер высокого уровня HLT. Создание быстрого трекера является одним из основных элементов модернизации триггера во втором сеансе работы БАК. С помощью данной электроники реконструируются треки с  $p_T > 15$  ГэВ за время 100 мкс. Таким образом, быстрый трекер позволяет триггеру высокого уровня преодолевать аппаратные ограничения, связанные с увеличением потока данных, и оставить время для более усложненного отбора событий. Быстрый трекер является высокопараллельной аппаратной системой, использующей информацию со всех 12 слоёв внутреннего детектора ID, а именно: с четырех слоев пиксельного детектора (Pixel), включая вставной В-слой (IBL) и восьми слоев полупроводникового микрострипового детектора (SCT).

Исследования физики  $b$ -адронов в эксперименте ATLAS основаны на использовании триггера В-физики. Отбор событий для В-физического анализа осуществляется путем идентификации распадов  $b$ -адронов, включающих пару мюонов в конечном состоянии, имеющих низкие  $p_T$  (2 --- 12 ГэВ). Примерами каналов, с которыми работает В-физика, являются распады с чармонием  $B \rightarrow J/\psi (\rightarrow \mu^+ \mu^-) X$ , редкие распады  $B^0_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^-$  и полуплептонные  $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ .

Триггер, осуществляющий отбор событий В-физики, включает несколько алгоритмов, реализованных в триггере высокого уровня. Основным типом триггеров, используемых для изучения такого типа адронов являются, так называемые, димюонные триггеры. Они требуют идентификации двух противоположно заряженных мюонов в триггере L1, которые затем подтверждаются на HLT, а их треки привязываются к общей вершине. События принимаются, если инвариантная масса пары появляется в окне, соответствующему заданному типу распада.

Процессы нарушения лептонного аромата допускаются в Стандартной модели (СМ) 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 СМ, а также адекватности тех моделей, которые предполагают существование ещё не открытых частиц в шкале энергий порядка ТeВ. Эти теории часто имеют сильно повышенные вероятности распадов, идущих с нарушением лептонного аромата, предоставляя возможность наблюдать их, распады, в текущих экспериментах. Например, ряд моделей за пределами СМ 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 году при энергии протон-протонного соударения 8 ТэВ с интегральной светимостью  $20,3 \text{ фб}^{-1}$ . 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 релятивистского ускорения тау-лептона, а нейтрино – по отсутствующей поперечной энергии.

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  $\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-$

$$Br(\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-) < 3.76 \times 10^{-7}$$

с уровнем доверия 90%.

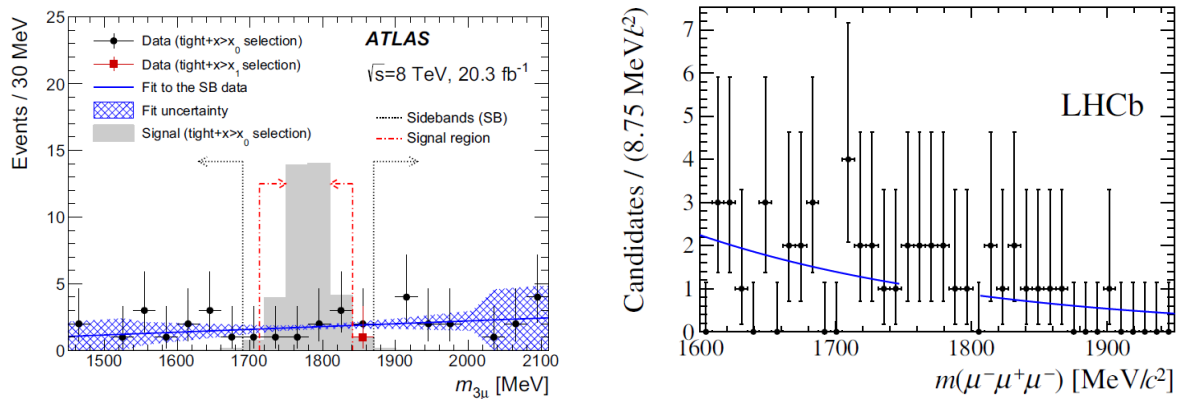


Рис. 3. (левый) Трехмюонное распределение инвариантной массы для  $\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-$ , измеренное в эксперименте ATLAS. Кружки показывают данные после первого жесткого отбора, а квадрат показывает единственную точку данных, оставшуюся после второго жесткого отбора. Области фона и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

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 фб<sup>-1</sup>. 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 СМ взаимодействие лептонов посредством калибровочных бозонов является

инвариантным относительно аромата первых. Процессы изменения 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

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

где  $H$  – адрон, содержащий  $s$ -кварк ( $K$  или  $K^*$ ),  $\Gamma$  – парциальная ширина распада, зависящая от  $q^2$  – инвариантной массы дилептона.

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  $3 \text{ фб}^{-1}$  и записаны в течение 2011 и 2012 гг. Отношение  $R_{K^{*0}}$  было измерено в двух областях квадрата инвариантной массы дилептона

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

на уровне доверия 95%.



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

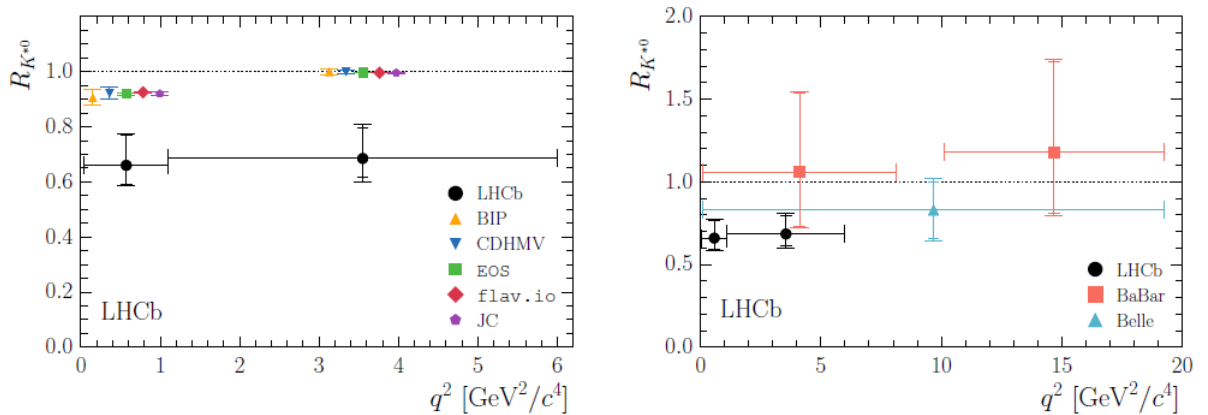


Рис. 4 (левый) Сравнение  $R_{K^{*0}}$  измерений с теоретическими предсказаниями: BIP [12], CDHMV [13-15], EOS [16,17], flav.io [18-20] и JC [21]. (правый) Сравнение  $R_{K^{*0}}$  измерений, сделанных LHCb с результатами предыдущих экспериментов [22,23].

Аналогичные 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 –  $2.6 \sigma$  и составило  $0.745^{+0.090}_{-0.074} {}^{+0.036}_{-0.036}$ .

В конце марта 2019 года были опубликованы результаты анализа данных [25], собранных экспериментом LHCb за 2015 и 2016 гг. Измеренное отношение  $R_{K^+}$  приблизилось к предсказаниям СМ и стало равным  $0.846^{+0.060}_{-0.054} {}^{+0.016}_{-0.014}$  на уровне доверия  $2.5 \sigma$ .

Таким образом, видно, что наблюдаемые отклонения от предсказаний СМ на уровне порядка 2.5 стандартных отклонения не могут 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.

В настоящее время осуществляются похожие исследования  $R(K^*)$  аномалии в эксперименте ATLAS. Подготовлены данные для анализа. Разработаны триггеры. Осуществляется анализ их эффективности. Проводятся работы по

изучению возможности использования нейронных сетей для отбора сигнальных событий. Предполагается, что данная технология улучшит эффективность отбора.