

Задачи модернизации трековой системы детектора ATLAS

В. В. Синецкий^{1,2,*}, Л. Н. Смирнова²

¹Физический Институт РАН имени П. Н. Лебедева. Россия, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53

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

(Статья поступила 04.12.2018; Подписана в печать 04.02.2019)

В обзоре представлены этапы модернизации трековой системы детектора ATLAS на Большом адронном коллайдере (БАК). Рассмотрен период от момента создания детектора до дальнейшей его работы в режиме высокой светимости HL-LHC. Показаны изменения конструкции детектора на разных этапах и разрешения при измерениях треков заряженных частиц, качество восстановления вершин в условиях высокой светимости коллайдера, приводящей к одновременной регистрации в среднем 200 событий с рождением двух и более заряженных частиц при соударениях сгустков протонов. Указаны физические задачи, для решения которых критичны реализуемые и планируемые изменения трековой системы ATLAS.

PACS: 07.05.Hd, 07.05.Kf

УДК: 53.07.

Ключевые слова: Большой адронный коллайдер, БАК, эксперимент ATLAS, внутренний детектор, ИТк, быстрый трекер, ФТК, модернизация.

ВВЕДЕНИЕ

В октябре 2017 г. эксперимент ATLAS отметил свой 25-летний юбилей. В октябре 1992 г. было опубликовано заявление о намерениях [1], где были изложены планы строительства детектора с допущением нескольких вариантов создания его подсистем. Строительство детектора ATLAS [2] было завершено в 2008 г. Данные, собранные экспериментами ATLAS и CMS [3] 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 [4, 5]. 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_T^{miss} . Новая трековая система увеличит эффективность измерений τ -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 B -адронов, в первую очередь для подавления фона и увеличения

пространственного разрешения при поиске редких распадов B_s -мезонов.

В данном обзоре рассматривается только модернизация трекинговой системы детектора. Для получения информации о развитии других систем детектора можно обратиться к [6–12].

1. ЭТАПЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ДЕТЕКТОРА ATLAS

На рисунке 1 представлен план работы Большого адронного коллайдера, включающий три так называемых долгих останковки (Long Shutdown, LS) в работе ускорителя, в течении которых проводятся модернизации как самого ускорительного комплекса, так и детекторов, осуществляющих регистрацию столкновений частиц (протонов или ядер) [13]. Непосредственно для установки ATLAS определены три этапа модернизации:

- этап Phase 0 во время первой длинной останковки (LS1);
- этап Phase 1 во время второй длинной останковки (LS2);
- этап Phase 2 во время третьей длинной останковки (LS3).

Этап модернизации Phase 0 осуществлялся с начала 2013 года по начало 2015 года. За этот период увеличилась энергия протон-протонных столкновений в системе центра масс с 8 ТэВ до 13 ТэВ. Пиковая светимость достигла величины $L = 2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, то есть выросла в 1.5 раза. Среднее число столкновений протонов в одном пересечении сгустков достигло величины $\langle \mu \rangle = 80$. Интегральная светимость, собранная к концу второго сеанса Run 2, составила 149 фб^{-1} .

В начале 2019 г. начнется второй этап модернизации БАК [14], который продлится до 2020 г. За

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



Рис. 1: План эксплуатации и модернизации БАК, включая его работу в режиме высокой светимости HL-LHC [13]

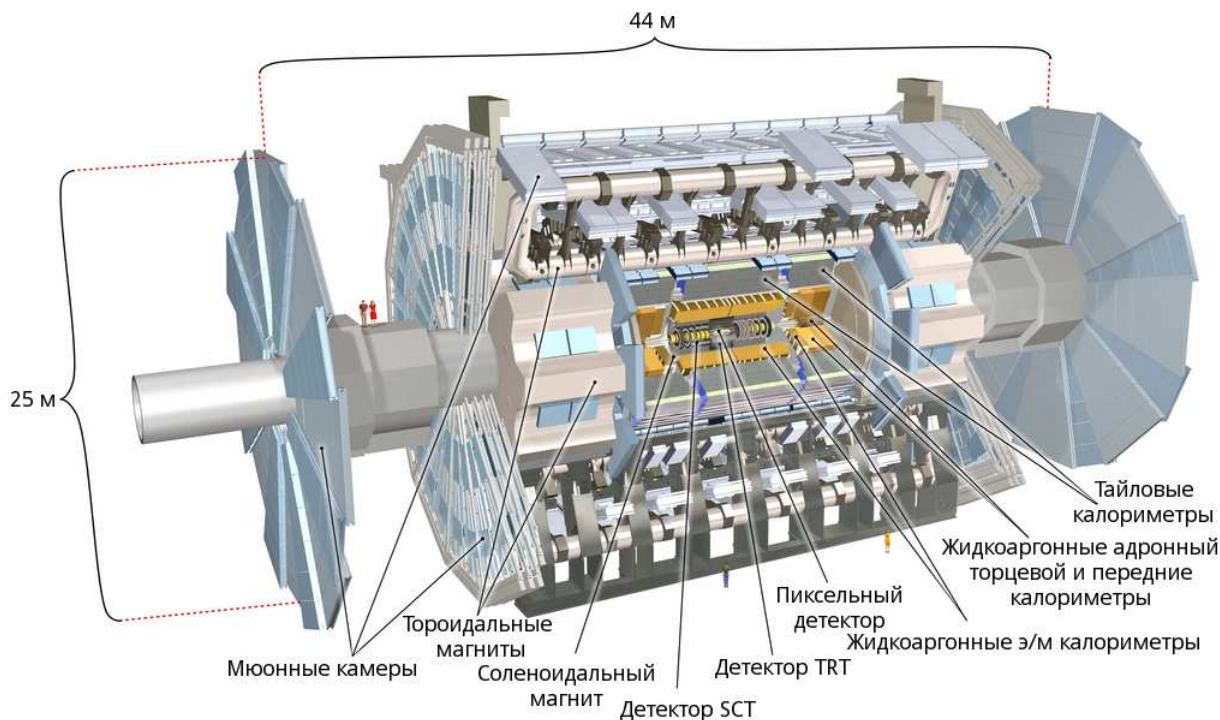


Рис. 2: Общий вид детектора ATLAS [2]

это время на коллайдере планируется довести энергию протон-протонных столкновений до 14 ТэВ, выйдя таким образом на проектную величину. Планируемая интегральная светимость за период 2021–2023 гг. составляет 300 fb⁻¹.

Завершающий этап модернизации будет осуществляться с начала 2024 г. до середины 2026 г. [15, 16]. На этом этапе БАК претерпит довольно серьёзную реконструкцию. В частности, планируется об-

новление криогенных систем, криостатов, компонентов и узлов магнитов, коллиматоров, высоковакуумных систем, электрооборудования; применение новых материалов, стойких к высокой температуре. В данной конфигурации ускорительная система будет работать предположительно порядка 10 лет. Планируется довести значение пиковой светимости до величины $L = 5 - 7 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, среднее число столкновений протонов на одно пересечение сгустков составит ве-

личину $\langle \mu \rangle = 200$, интегральная светимость к 2037 г. достигнет 3000 фб^{-1} .

2. НАЧАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА ATLAS

Детектор ATLAS представляет собой детектор общего назначения цилиндрической формы с 4π -геометрией и симметрией вперед–назад. На момент первого запуска БАК детектор имел структуру, показанную на рис. 2.

Внутренний детектор (ID) предназначен для прецизионной реконструкции треков частиц в области псевдобыстрот $|\eta| < 2.5$ и включает в себя следующие подсистемы: пиксельный детектор (Pixel Detector), полупроводниковый микростриповый детектор (Semiconductor Tracker, SCT), газонаполненный трековый детектор переходного излучения (Transition Radiation Tracker, TRT). Внутренний детектор помещен в аксиальное магнитное поле 2 Тл. Окружают внутренний детектор и магнитный соленоид электромагнитный и адронный калориметры, предназначенные для измерения полной энергии электромагнитных и адронных ливней соответственно. Окружающий калориметры мюонный спектрометр (MS) служит для идентификации мюонов, прецизионного измерения их импульсов и реконструкции треков в области псевдобыстрот $|\eta| < 2.7$. Мюонный спектрометр имеет три тороидальных магнита из сверхпроводящих катушек, создающих магнитное поле, обеспечивающее 1.5 – 7.5 Тл. В магнитном поле спектрометра размещены быстродействующие триггерные детекторы в виде резистивных камер (Resistive Plate Chambers, RPC) и тонкоззорных камер (Thin Gap Chambers, TGC), а также прецизионные измерительные детекторы (мониторируемые дрейфовые трубки (Monitored Drift Tubes, MTD) и катодные полосковые камеры (Cathode Strip Chambers, CSC)).

Внутренний детектор

Пиксельный детектор расположен в центре внутреннего детектора, то есть ближе всего к оси пучка, на расстоянии 50–120 мм. Центральная часть пиксельного детектора представляет из себя три концентрические цилиндрические слоя, расположенные вдоль оси пучка, а торцевая — 3 диска, расположенные по обе стороны от центральной части, параллельно друг другу и перпендикулярно оси пучка. Размеры чувствительного элемента составляют $50 \times 400 \text{ мкм}$.

Детектор SCT окружает пиксельный детектор и расположен на расстоянии 30–50 см от оси пучка. Он включает в себя 4 центральных цилиндрических слоя и 9 торцевых слоёв с каждой стороны. Чувствительными элементами данной системы являются полоски длиной 6.4 см, расположенные с промежутком 80 мкм.

Каждый элемент детектора включает в себя 2 полоски, закрепленные под углом 40 мрад, что позволяет измерять как продольную, так и поперечную координаты трека.

Детектор TRT является внешней системой внутреннего детектора, то есть окружает две предыдущие системы. Он покрывает меньшую область псевдобыстрот, чем пиксельный детектор и детектор SCT — $|\eta| < 2$. Чувствительные элементы TRT представляют собой газонаполненные трубки, являющиеся катодом, диаметром 4 мм, в центре которых натянута анодная нить. Такая трубка представляет собой пропорциональную дрейфовую камеру, позволяющую определить расстояние от центра трубки до трека заряженной частицы по времени дрейфа электронов ионизации. В центральной части трубки TRT расположены параллельно оси пучка и имеют длину 144 см. В торцевых областях трубки расположены радиально относительно оси пучка и имеют длину 37 см [2].

3. ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ PHASE 0

Во время первой долгой остановки БАК (LS1) между первым слоем пиксельного детектора (B -Layer) и новым меньшим радиусом трубы пучка был установлен дополнительный вставной B -слой (Insertable B -Layer, IBL) [17, 18]. Основная мотивация — улучшить качество разрешения первичных вершин, что является критичным для реконструкции, например, сигналов физики в каналах, содержащих b -струи. Примером может служить процесс ассоциированного с векторным бозоном рождения бозона Хиггса с его последующим распадом на b кварки $WH, H \rightarrow b\bar{b}$.

Вставной B -слой состоит из 14 кронштейнов (стойка) из углеродного волокна (рис. 3). Длина каждого из них составляет 64 см, ширина — 2 см. Плоскость слоя детекторов наклонена на 14° по азимутальному углу. Детекторы IBL окружают пучковую трубу на среднем расстоянии 33 мм от её центра, покрывая область по псевдобыстроте $|\eta| < 3$. Каждый кронштейн снабжен трубками с CO_2 -охлаждением и оборудован 32 чипами электроники считывания (FE-I4), соединёнными с кремниевыми чувствительными элементами. Чипы FE-I4 изготовлены с помощью 130 нм CMOS-технологии и состоят из 26880 пиксельных ячеек, организованных в матрицы из 80 ячеек по вертикали с шагом 50 мкм и 336 ячеек по горизонтали с шагом 250 мкм.

В мае 2014 г. детектор IBL был успешно установлен внутри ATLAS и введен в эксплуатацию [19]. В 2015 г. с началом сеанса Run 2 он был полностью включен в работу, что позволило увеличить эффективность реконструкции треков во внутреннем детекторе, точность измерения треков и параметров вершин распадов B -мезонов, увеличило разрешение измерения времени жизни B_s^0 . Предварительные расчеты изменения вре-

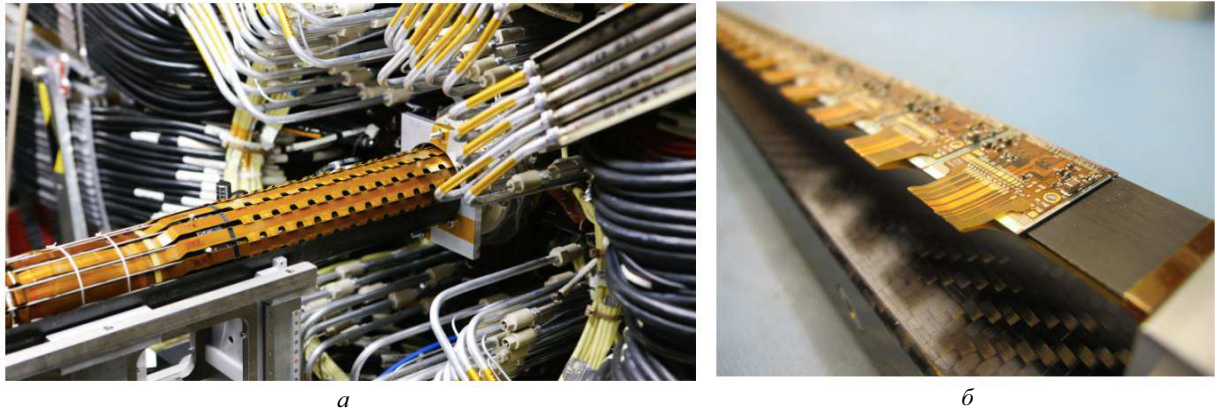


Рис. 3: *а* — Процесс установки вставного *B*-слоя детектора ATLAS; *б* — Сектор детектора IBL, одиночные модули которого установлены на несущих конструкциях из углеродного волокна [19]

мени жизни поазаны на рис. 4 из работы [20]. Это может улучшить точность измерений фазы ϕ_s , характеризующей степень нарушения *CP*-симметрии в распадах B_s^0 мезонов, в эксперименте ATLAS на данных второго сеанса.

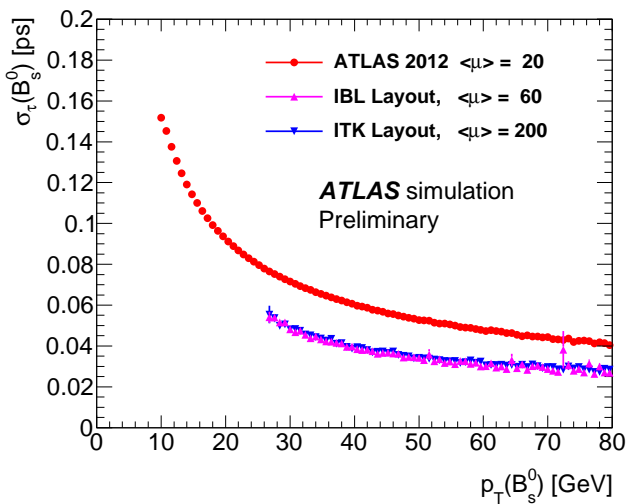


Рис. 4: Зависимость разрешения времени жизни B_s^0 от его поперечного импульса p_T для различных конфигураций детектора, предсказанная в 2013 г. [20]

4. ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ PHASE 1

В результате модернизации Phase 1 в течение 2019–2020 гг. в систему триггера детектора ATLAS планируется добавить так называемый быстрый трекер (Fast Tracker, FTK) [21, 22]. Это изменение в структуре триггера непосредственно связано с реконструкцией треков во внутреннем детекторе, а следовательно, и с самой трековой системой детектора ATLAS. В насто-

ящее время происходит постепенный ввод в эксплуатацию данной техники и проверка корректности её работы, правильности снимаемых с неё данных.

Быстрый трекер 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 области интереса вокруг трека (Region of Interest, RoI), как это делает триггер высокого уровня HLT. С помощью данной электроники реконструируются треки с $p_T > 1$ 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, а именно: с четырех слоёв пиксельного детектора, включая вставной *B*-слой и восьми слоёв полупроводникового микрострипового детектора. На рис. 5 приведены структура аппаратной системы быстрого трекера и эффективности реконструкции треков для двух типов частиц. Видно, что эффективность реконструкции быстрым трекером близка к эффективности реконструкции офлайн-алгоритмов в HLT.

Данное улучшение даёт возможность эффективнее определять некоторые сигнатуры. Например, лучше реконструировать τ -лептоны, которые играют особую роль и наименее изучены в процессах Стандартной модели, таких, например, как распад бозона Хиггса на τ -лептоны. τ -лептон, имеющий массу 1.77 ГэВ, как известно, единственный лептон (и его античастица, конечно), который может распадаться не только на другой лептон и пару нейтрино, но и на адроны. Как правило, происходят распады на 1 или 3 заряженных адрона, также могут присутствовать и нейтральные адроны. На рис. 6 схематично показано, что сигнатура распада на адроны очень похожа на струю адронов. Чрезвычайно большое сечение многоструйных событий

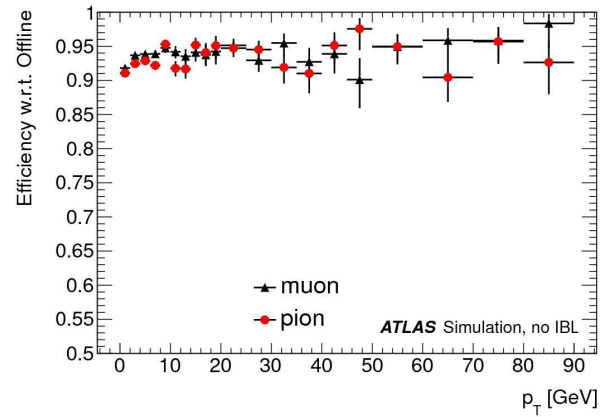
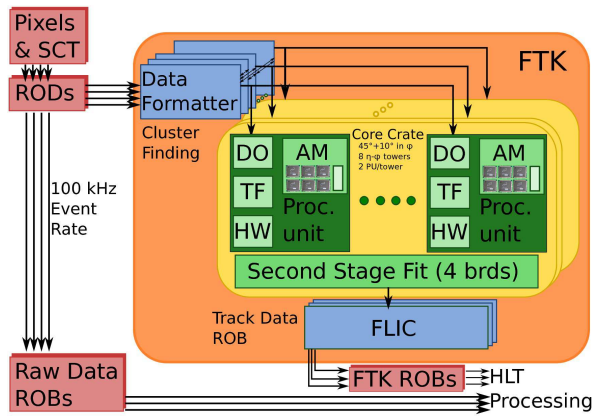


Рис. 5: На левом рисунке показан функциональный эскиз аппаратной системы быстрого трекера. На правом рисунке изображены эффективности реконструкции треков во внутреннем детекторе посредством быстрого трекера по отношению к эффективности реконструкции с помощью офлайн-алгоритмов для мюонов и пионов [21]

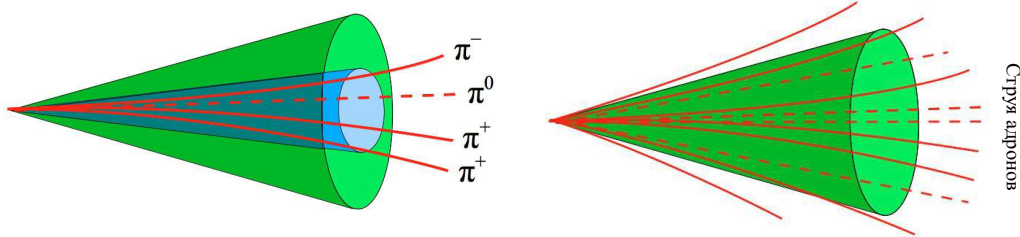


Рис. 6: На левом рисунке показан распад тау-лептона на три заряженных пиона и нейтральный пион. Все продукты распада сгруппированы в узком синем конусе. На правом рисунке изображена струя адронов, частицы которой распределены в большом зелёном конусе [21]

является основным фоном для струй от таонов. Для того, чтобы разделить таоны от струй, используется топология распада. Сигнал от распада таона характеризуется тем, что все треки от заряженных продуктов распада сосредоточены в узком конусе с небольшим или нулевым количеством треков в окружающем пространстве (изоляция конусе, RoI). В то время как треки фоновых струй располагаются по всему изоляционному конусу. В триггере первого уровня трекинг информация недоступна, поэтому реконструкция осуществляется на основе данных с калориметров. Для триггера на распад таона требуется узкий изоляционный конус. На втором уровне триггера сперва накладываются калориметрические ограничения, чтобы уменьшить поток RoI до приемлемых значений, затем реконструкция треков осуществляется в оставшихся RoI. Эти два шага уменьшают эффективность распознавания таонов. Таким образом, используя FTK, можно осуществлять быстрый отброс КХД фона, имея информацию о треках на начальном этапе отбора событий на втором уровне триггера.

Кроме того, введение быстрого трекера в структуру триггерной системы детектора ATLAS является существенным для отбора событий B -физики. Программа B -физики эксперимента ATLAS включает поиск полуплептонных распадов $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ [23]. Суще-

ствуют алгоритмы отбора таких распадов, например $B_c^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- D_s^{(*)+} (\rightarrow K^+ K^- \pi^+)$, для реконструкции которых в дополнение к паре мюонов осуществляется поиск дополнительных треков во внутреннем детекторе, которые затем объединяются и фитируются в общую вершину. Планируется, что благодаря быстрому трекеру можно будет достичь лучшей эффективности обнаружения распадов подобного типа.

5. ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ PHASE 2

К концу сеанса Run 3 радиационные разрушения материалов внутреннего детектора достигнут критического предела. Кроме того, в сеансе Run 4 HL-LHC детектору предстоит работать в более жестких радиационных и эксплуатационных условиях. Поэтому будет проведена полная замена внутреннего детектора. Новый внутренний детектор (Inner Tracker, ITk) будет сконструирован полностью из кремния и состоять из двух подсистем: пиксельный детектор (Pixel) [24] и стриповый детектор (Strip Detector) [25] (рис. 7).

Изначально к конструкции внутреннего детектора выдвигались следующие требования: покрытие области псевдобыстроты по крайней мере $|\eta| < 2.7$ и как

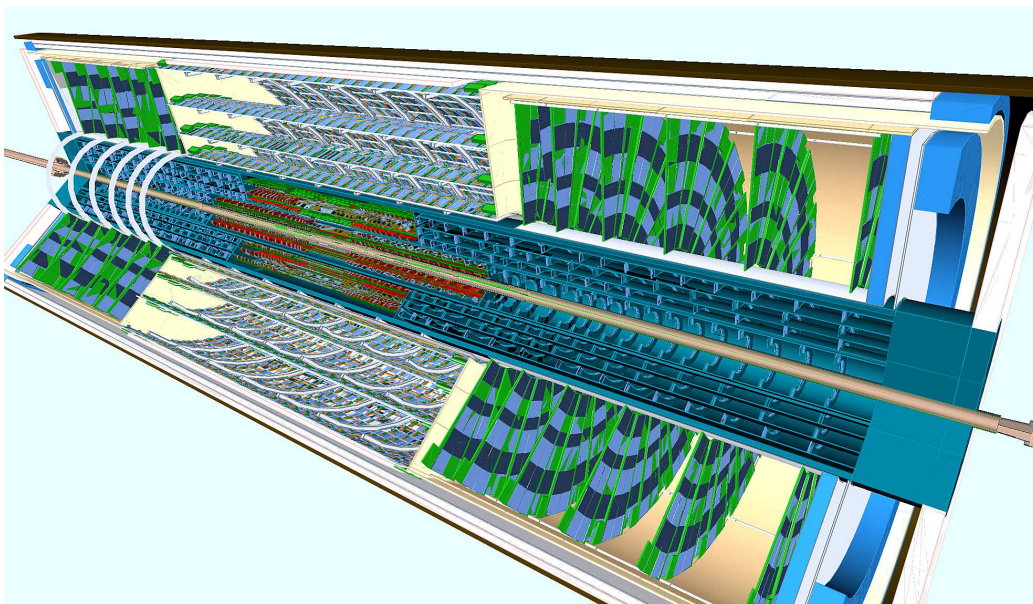


Рис. 7: Модель нового внутреннего детектора. Все чувствительные элементы будут созданы на основе кремния [25]

минимум 14 срабатываний на трек (то есть среагировать на пролетающую заряженную частицу должно не менее 14 чувствительных элементов пикселей и стрипов вместе взятых) [15]. Модель данной конструкции изображена в левой части рисунка 8. Пиксельный детектор показан красным цветом и состоит из четырёх слоёв в центральной части и шести слоёв в каждой из боковых частей. Стриповый детектор, изображенный синим цветом, состоит из пяти слоёв в центральной части и семи слоёв в каждой из боковых частей. Горизонтальные и вертикальные линии обозначают центральные цилиндрические (барельные) и торцевые слои, соответственно.

Важной характеристикой в усовершенствовании модели внутреннего детектора было расширение области реконструкции треков по псевдобыстроте до $|\eta| < 4$ путём добавления в пиксельном детекторе дополнительных слоёв в торцевые области. Таким образом, количество этих слоёв достигло 12 [16].

Окончательный вариант модели конструкции внутреннего детектора [24] предусматривает сохранение области «видимости» детектора по псевдобыстроте до $|\eta| < 4$ и изменение конфигурации слоёв в центральной части детектора с 4 пиксельных и 5 стриповых слоёв на 5 пиксельных и 4 стриповых (правая часть рисунка 8). Также рассматривались два варианта компоновки так называемые «наклонная» и «расширенная» [24, 25].

Пиксельный детектор

Пиксельный детектор, как уже говорилось, состоит из пяти центральных цилиндрических слоёв и четырёх кольцевых слоёв с каждого торца установки. Де-

тектор позволяет покрывать область по псевдобыстроте вплоть до $|\eta| < 4$. Пиксельный детектор отделен от стрипового специальной пиксельной опорной трубой (Pixel Support Tube, PST). Кроме того, так как во время эксплуатации установки в сеансе Run 4 в центре детектора ожидаются сильные радиационные поля, предусмотрена возможность замены двух внутренних слоёв центральной части детектора. Для облегчения процесса замены эти слои отделены от трёх внешних специальной внутренней опорной трубой (Inner Support Tube, IST). Сенсоры представляют собой пиксели размером 50×50 мкм и толщиной 100 либо 150 мкм.

Выше уже говорилось, что в результате эволюции конструкции внутреннего детектора количество кольцевых слоёв пиксельного детектора было увеличено. Сделано это было потому, что опыт эксплуатации установки ATLAS и моделирование показали: минимизация числа неверно реконструированных треков достигается путём увеличения минимального числа срабатываний чувствительных элементов. В верхней части рисунка 9 продемонстрировано поведение отношения количества реконструированных треков к числу сгенерированных при возрастающем количестве протон-протонных взаимодействий на одно пересечение протонных сгустков (pile-up). Условием отбора реконструированных треков является требование срабатывания по крайней мере 9 чувствительных элементов внутреннего детектора. Видно, что при увеличивающемся числе протон-протонных столкновений в сгустке увеличивается и отношение реконструированных к сгенерированным трекам, что свидетельствует о повышении числа неверно реконструированных треков. Усиление критерия отбора по числу срабатываний чувствительных элементов с 9 до 11 приводит к устранению этого

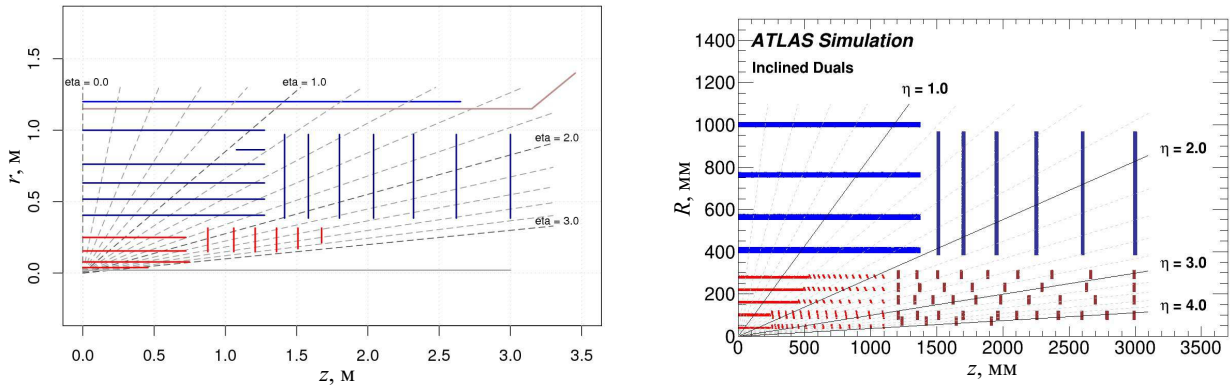


Рис. 8: Схематическое изображение ITk для фазы HL-LHC ATLAS. Здесь показаны только один квадрант и только активные элементы детектора. Горизонтальная ось — это ось вдоль линии луча, а нуль — точка взаимодействия. Вертикальная ось — это радиус, измеренный от точки взаимодействия. Внешний радиус задается размерами соленоида. Красные и синие линии представляют собой слои пиксельного и стрипового детектора, соответственно. Горизонтальные и вертикальные линии представляют собой барельные и торцевые слои, соответственно. Синяя линия вне детектора — катушка магнита соленоида. В левой части представлен начальный вариант конструкции ITk [14], в правой — конечный [24]

эффекта (нижняя часть рисунка 9). В конечном счёте, дальнейшее моделирование показало, что необходимо поднять этот критерий до 13 срабатываний. Стоит отметить, что впоследствии было решено в области псевдобыстрот $|\eta| > 2.7$ уменьшить данный критерий отбора на уровне до 9 срабатываний. Это связано с улучшением характеристик детектора, снижением затрат и сложности.

Стриповый детектор

Стриповый, или микрополосковый, детектор внутреннего трекера состоит из четырёх центральных цилиндрических слоёв и шести дисковых слоёв с обоих торцов установки. Данная система охватывает область псевдобыстроты $|\eta| < 2,7$. Чувствительные элементы представляют собой тонкие полоски из кремния. Центральные слои занимают область от -1400 мм до 1400 мм параллельно оси пучка (оси Z). Два внутренних слоя центральной части снабжены короткими полосками длиной 24.1 мм. Два внешних слоя имеют более длинные полоски длиной 48.2 мм. Промежуток между полосками в обоих случаях составляет 75.5 мкм. Диски торцевого слоя находятся в областях между 1512 мм и 3000 мм по оси Z с каждой стороны. Чувствительные элементы в дисках распределены радиально и направлены в сторону пучка. Длина полосок меняется от 19 мм в наиболее приближенной к оси пучка части слоя до 60.2 мм в наиболее отдаленной его части. Промежуток между сенсорами варьирует от 69.9 мкм до 80.7 мкм. Каждый элемент детектора включает в себя две полоски, закрепленные под углом 52 мрад в центральной части и 40 мрад в торцевой, что позволяет измерять продольную и поперечную координаты трека.

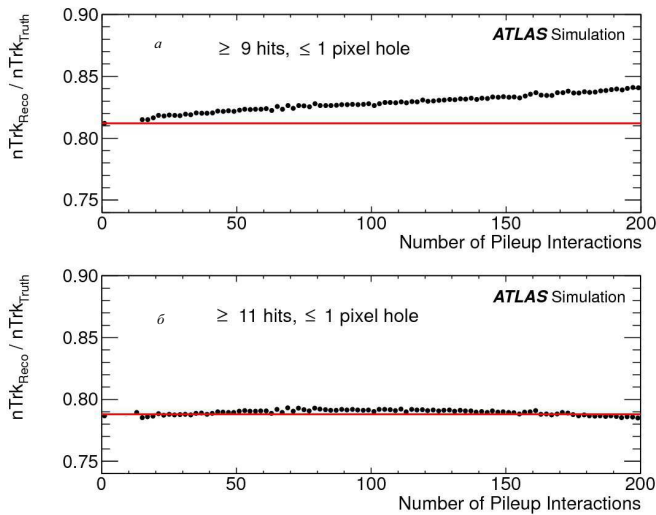


Рис. 9: Отношение количества реконструированных и сгенерированных треков для $t\bar{t}$ -событий в зависимости от числа протон-протонных взаимодействий на одно пересечение сгустков (pile-up). Рассматриваются два различных способа отбора треков. Требуется 9 срабатываний (реагирование чувствительных элементов) для одного трека — а, требуется 11 срабатываний на один трек — б [15]

На рис. 10 показана эффективность реконструкции треков определенных заряженных частиц при различных поперечных импульсах в зависимости от псевдобыстроты. Видна отличная степень реконструкции мюонов в обоих случаях. Превышение эффективности реконструкции электронов над эффективностью реконструкции пионов обуславливается, отчасти, учетом тормозного излучения при реконструкции трека.

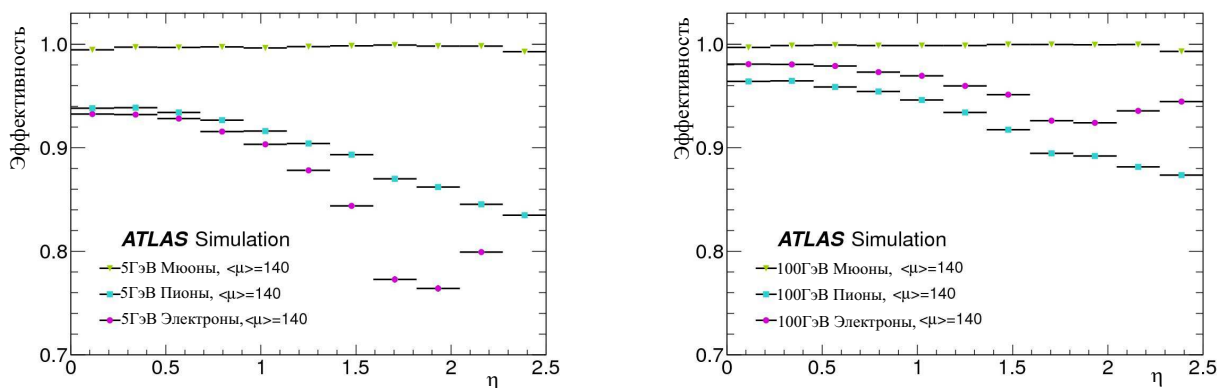


Рис. 10: Эффективность реконструкции треков как функция псевдобыстроты для мюонов, пионов и электронов с $p_T = 5$ ГэВ (слева) и $p_T = 100$ ГэВ (справа) при числе протон–протонных взаимодействий в одном пересечении сгустков $\langle \mu \rangle = 140$ [15]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении всего периода работы детектора ATLAS проводится совершенствование трековой системы установки. В данном обзоре кратко были описаны основные вехи развития внутренней трековой системы установки ATLAS, которые произошли и которые предстоит реализовать. Модернизация внутреннего детектора позволит обеспечить устойчивую работу детектора ATLAS до конца сеанса высокой светимости или почти в течение 20 лет.

МГУ и ФИАН принимают активное участие в модернизации систем детектора ATLAS. Группа МГУ проводит модернизацию программного обеспечения системы триггера для выделения распадов B -мезонов на коллайдере. Осуществляется разработка программного обеспечения для быстрого трекера (FTK) (ссылка на статью для конц потоков). Группа ФИАН принимает активное участие в создании нового внутреннего трекера (ITk), который будет установлен во время третьей долгой остановки (LS3) к началу сеанса Run 4.

[1] ATLAS Collaboration // CERN-LHCC-92-004. 1992.
 [2] ATLAS Collaboration // JINST. 2008. **3**. S08003.
 [3] CMS Collaboration // JINST. 2008. **3**. S08004.
 [4] ATLAS Collaboration // Phys. Lett. B. 2012. **716**. P. 1 – 29
 [5] CMS Collaboration // Phys. Lett. B. 2012. **716**. P. 30 – 61
 [6] T. Kawamoto, S. Vlachos, L. Pontecorvo, J. Dubbert, G. Mikenberg, P. Iengo, C. Dallapiccola, C. Amelung, L. Levinson, R. Richter, D. Lellouch // ATLAS-TDR-020. 2013.
 [7] M. Aleksa, W. Cleland, Y. Enari, M. Fincke-Keeler, L. Hervas, F. Lanni, S. Majewski, C. Marino, I. Wingerter-Seez // ATLAS-TDR-022. 2013.
 [8] ATLAS Collaboration // ATLAS-TDR-023. 2013.
 [9] ATLAS Collaboration // ATLAS-TDR-026. 2017.
 [10] ATLAS Collaboration // ATLAS-TDR-027. 2017.
 [11] ATLAS Collaboration // ATLAS-TDR-028. 2017.
 [12] ATLAS Collaboration // ATLAS-TDR-029. 2017.
 [13] I. Bejar Alonso, L. Rossi // CERN-ACC-2015-0140. 2015.
 [14] ATLAS Collaboration // LHCC-I-020. 2011.
 [15] ATLAS Collaboration // LHCC-I-023. 2012.
 [16] ATLAS Collaboration // LHCC-G-166. 2015.
 [17] ATLAS Collaboration // ATLAS-TDR-19. 2010.
 [18] ATLAS Collaboration // ATLAS-TDR-19-ADD-1. 2012.
 [19] A. La Rosa on behalf of ATLAS Collaboration // JINST. 2016. **11**. C12036.
 [20] ATLAS Collaboration // ATL-PHYS-PUB-2013-010. 2013.
 [21] ATLAS Collaboration // ATLAS-TDR-021. 2013.
 [22] ATLAS Collaboration // EPJ Web of Conferences. 2017. **137**. 12001.
 [23] L.N. Smirnova, S.M. Turchikhin // Phys. Part. Nucl. 2017. **48**, №. 5. P. 801.
 [24] ATLAS Collaboration // ATLAS-TDR-030. 2018.
 [25] ATLAS Collaboration // ATLAS-TDR-025. 2017.

The Goals of Upgrading the ATLAS Tracker System

V. V. Sinetckii^{1,2,a}, L. N. Smirnova¹

¹*P.N.Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences. Moscow 119991, Russia*

²*Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^avv.sineckiy@physics.msu.ru

The review presents the stages of modernization of the tracker system of the ATLAS detector at the Large Hadron Collider (LHC). The period from the moment of the detector creation to its further operation in the high luminosity mode of the HL-LHC is considered. Changes of the detector design at different stages, resolution when measuring tracks of charged particles, the quality of the recovery of vertices under conditions of high luminosity of the collider, leading to simultaneous recording of 200 events on average with the birth of two or more charged particles during collisions of proton bunches are shown. The physical goals are indicated, for the solution of which the realizable and planned changes of the ATLAS track system are critical.

PACS: 07.50.Ek, 07.07.Df.

Keywords: Inner TracKer, ITk, FastTracKer, FTK, upgrade, ATLAS, LHC.

Received 04 December 2018.

Сведения об авторах

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