Участие группы ФИАН в эксперименте ATLAS

Группа ЛЭЧ ОЯФА ФИАН под руководством А.П.Шмелевой принимает активное участие в работе эксперимента ATLAS на Большом Адронном Коллайдере (БАК) в Европейском Центре Ядерных Исследований (ЦЕРН).

Используя богатый опыт предыдущих работ с детекторами переходного излучения, объединенная группа МИФИ, ФИАН, ОИЯИ и ЦЕРН в 1989 году предложила новую структуру детектора переходного излучения на основе цилиндрических пропорциональных дрейфовых камер малого диаметра (4 мм). Такая структура детектора должна быть эффективной при работе в условиях очень высокой светимости на ускорителе LHC (БАК). Кроме этого, по измеренному времени дрейфа в камере возможно определение координаты прошедшей заряженной частицы. Таким образом, такой детектор – Transition Radiation Tracker (TRT) – может совмещать в себе функцию регистрации переходного излучения, позволяющую выделять электроны от адронов (режекция) и функцию прослеживания треков заряженных частиц (трекинг).

В 1990 году в Москве был изготовлен первый прототип детектора, содержащий 200 пропорциональных дрейфовых трубок (ДТ) straw (straw – с англ. соломинка). Он испытывался в пучках электронов и пионов ускорителя У-70 в Протвино. Была получена хорошая режекционная способность выделения одиночных электронов от пионов (10⁻³ в области энергий 1-10 ГэВ). Детектор одновременно служил и трековым прибором (угловое разрешение детектора 1,5 мрад).

В августе 1990 года комитет ЦЕРН Detector Research and Development Committee (DRDC) одобрил предложение «Трековый детектор переходного излучения для большого адронного коллайдера LHC». Руководителем проекта, получившего название RD-6, был назначен профессор МИФИ Б.А. Долгошеин.

Начиная с 1991 года, различные прототипы TRT детектора испытывались в пучках электронов и пионов на ускорителе SPS в ЦЕРН. Менялись материалы дрейфовых трубок и радиаторов, геометрическое расположение, газовые смеси, электроника съема информации и пр. Проводились детальные исследования координатных и идентификационных возможностей детектора. Многие сложнейшие вопросы были успешно решены, и эксперимент RD-6 плавно перешел в работу по созданию TRT детектора для эксперимента ATLAS на БАК.



Рис. 1. Установка ATLAS.

Установка ATLAS состоит из трех крупных компонент: внутренний детектор, система калориметров и система мюонных детекторов. Внутренний детектор располагается в непосредственной близости к области взаимодействия встречных пучков и находится в магнитном поле величиной 2 Тл. Он имеет длину более 6 м и диаметр 2,1 м и содержит кремниевый

пиксельный детектор, полупроводниковый стриповый детектор и детектор переходного излучения TRT.

Трековый детектор переходного излучения TRT представляет собой новое поколение детекторов, работающих с высокими потоками частиц. Главная функция TRT в эксперименте ATLAS – идентификация частиц и определение координат трека в 2 Тл магнитном поле.



Рис. 2. Внутренний Детектор (Inner Detector) установки ATLAS.

Конструктивно TRT детектор состоит из центральной (barrel) и двух торцевых (end-cap) частей.

Баррельная часть содержит 52544 ДТ длиной 1,44 метра, расположенных параллельно направлению пучков. В середине анодная нить электрически разделена и сигналы с каждой половины ДТ считываются независимо с двух концов. Таким образом, баррельная часть содержит 105088 каналов информации. Радиатором для генерации переходного излучения служит

полимерный волоконный материал на основе полипропилена, внутри которого и расположены ДТ.



Рис. 3. Схематическое изображение центральной (баррельной) части Внутреннего Детектора ATLAS.

Каждая из двух торцевых частей TRT детектора содержит 122880 ДТ длиной 37 см. Дрейфовые трубки располагаются аналогично велосипедным спицам между внутренними и наружными опорными кольцами (рис.4). Между слоями трубок находятся пленочные радиаторы переходного излучения из полипропилена.

Временное разрешение TRT соответствует частоте 40 МГц работы LHC. TRT позволяет получить в среднем 36 точек на треке с пространственным разрешением 150 мкм. Фактор подавления пионов при эффективности регистрации электронов 90% близок к 10⁻².



Рис. 4. Внешний вид одного колеса торцевой части трекового детектора переходного излучения TRT.

При создании TRT многочисленные разработки и исследования опытных образцов показали, что детектор должен быть построен из легких композитных материалов, основанных на углеродных волокнах. Это позволило обеспечить приемлемую прозрачность детектора для заряженных частиц, достаточную механическую стабильность, высокое пространственное разрешение. Использование специальных композитных материалов дало возможность получить элементы детектора с незначительной зависимостью геометрических параметров от окружающей температуры.

В течение 1996-1999 годов завод «Машиностроитель» (Пермь, Россия) изготовил из композитных материалов с очень высокой точностью (порядка 100 мкм при диаметре наружного кольца около 2 метров) поддерживающие кольца детектора, выиграв коммерческий конкурс, соревнуясь с мощными

зарубежными фирмами. Стоимость проекта составила 1,5 млн долларов США. Финансирование предоставлялось Международным Научно-Техническим Центром МНТЦ, созданным западно-европейскими странами и США для поддержки советской тяжелой промышленности. Получение средств из этого фонда разрешалось только для чисто научных проектов.



Рис. 5. Один из торцевых модулей TRT в лаборатории для проведения инженерных испытаний в ЦЕРН (сотрудники ФИАН - слева Шмелева А.П., справа на переднем плане Муравьев С.В. и сотрудник ЦЕРН Ф. Диттус).

Массовое производство straw и сборка колес ТКТ начались в 2001 г. в ОИЯИ (Дубна) и ПИЯФ (Гатчина). Собранные колеса транспортировались в ЦЕРН. Все это время в ЦЕРН производились приемочные измерения с помощью специально созданных тестовых установок. В них участвовали сотрудники ФИАН Л.Ф. Васильева, Ф.Ф. Каюмов. Основные тесты: на прямолинейность straw, на степень натяжения анодной нити, на герметичность по газу (отсутствие утечек), на стабильность поведения детектора при подаче высокого напряжения. Целью этих измерений была сертификация каждого модуля TRT до того, как он будет интегрирован в структуру торцевых частей Внутреннего Детектора. Эта работа продолжалась 5 лет. Ответственным исполнителем за нее был С.В. Муравьев.



Рис. 6. Старший научный сотрудник ФИАН Л.Ф. Васильева выполняет высоковольтные тесты колес TRT.

Начиная с 1991 года в пучках электронов, пионов и мюонов с энергиями 5-200 ГэВ на ускорителе SPS в ЦЕРН испытывались различные прототипы TRT. Проводились детальные исследования координатных и идентификационных возможностей детектора. Существенную роль в обработке результатов тестовых измерений сыграл В.О. Тихомиров.



Рис. 7. Сотрудник ФИАН В.О. Тихомиров на фоне одного из торцевых детекторов TRT в сборе.

Детектор TRT кроме функции трекинга выполняет так же функцию регистрации рентгеновского переходного излучения и режекции электронов на высоком адронном фоне. Это обеспечивается правильным выбором порогов считывающей электроники. Из-за того, что пороги очень близки, стабильность коэффициента газового усиления является крайне важной задачей. С учетом количества детектирующих элементов в детекторе (около 300 000) выбор высоковольтной системы питания ДТ проводился с учетом специфических требований. Руководил работой И жестких этой С.В. Муравьев. После тестирования нескольких прототипов систем разных производителей, выбор был сделан в пользу системы, разработанной специально под детектор TRT в Дубне (компания HV Sys) с учетом всех его технических особенностей. Всего система обеспечивает стабильным высоким напряжением (1530 В для ксенона в качестве активного газа) 2000 каналов. Точность установленного напряжения составляет 0.1%, что крайне важно с

точки зрения коэффициента газового усиления (отклонение выходного напряжения на 10 В дает изменение коэффициента газового усиления на13% при рабочем напряжении).



Рис. 8. Сотрудник ФИАН К.И. Жуков в одной из лабораторий ЦЕРН.

Высоковольтная система отключает питание ДТ как при превышении заданной величины тока, так и при появлении определенного количества пробоев в течение заданного времени, тем самым предотвращая прожигание стенок камеры электрическим разрядом. Эксплуатацией, тестированием, ремонтом и калибровками высоковольтной системы в настоящее время занимается сотрудник ФИАН Жуков К.И.

Рабочим газом детектора TRT является газовая смесь Xe-CO₂-O₂ (70%-27%-3%). Газовая система детектора была спроектирована и построена инженерами ЦЕРН с учетом всех особенностей и требований детектора. Ее эксплуатацией и контролем занимается С.П. Коновалов.

Перед сборкой газовой системы компоненты её были пропущены через процедуру так называемой валидации, т.е. проверки их на загрязнения,

способные вызвать повышенное радиационное старение TRT. Работы проводились под руководством С.П.Коновалова параллельно на нескольких установках, включающих в себя прототипы TRT и источники мощного радиационного излучения.



Рис. 9. Сотрудник ФИАН С.П. Коновалов в центральной части детектора ATLAS перед установкой в нее детектора TRT.

Неотъемлемой частью современных детекторов является программное обеспечение, позволяющее считывать данные с детектора и следить за его состоянием. В состав компьютерной группы эксперимента ATLAS входит сотрудник ФИАН Гавриленко И.Л. Им осуществляется поддержка, развитие и тестирование программных модулей, осуществляющих реконструкцию треков заряженных частиц во Внутреннем детекторе эксперимента ATLAS. С участием И.Л. Гавриленко была создана новая модульная программа реконструкции (NEWT), которая обеспечивает нахождение треков как во всем внутреннем детекторе, так и в отдельных его компонентах, таких как

трековый детектор переходного излучения, кремниевые стриповые и пиксельные детекторы. Качество реконструкции включает такие критерии, как надежность работы, эффективность нахождения трека и определение его параметров, доля ложных треков, скорость работы и потребляемая память.



Рис. 10. Событие в детекторе ATLAS – кандидат на двухмюонный распад Z бозона. В событии с помощью программы NEWT реконструировано 20 первичных вершин взаимодействия протон-протон.

Сотрудниками ФИАН Р.Ю. Машинистовым и В.О. Тихомировым осуществлялась поддержка и развитие программы мониторинга TRT, предназначенной для отслеживания в режимах online и express-offline работы более 350 тысяч каналов электроники детектора. Программа TRTViewer является основным инструментом для мониторирования текущего состояния каналов электроники TRT, а также для временной настройки и настройке по порогам каналов детектора. TRTViewer имеет два основных режима работы. В режиме Event Display возможен просмотр отдельных событий в детекторе

TRT. Другой режим – режим накопления – позволяет обрабатывать большие объемы данных и в наглядной форме представлять такие параметры, как эффективность работы всех каналов детектора, их шумовые и временные характеристики и т.п. На рис. 11 представлены визуализованные с помощью программы TRTViewer события, зарегистрированные в детекторе TRT. Хорошо видно резкое возрастание загрузки детектора вторичными частицами при переходе от протон-протонных к ядро-ядерным столкновениям.



Рис. 11. Представление двух событий в баррельной части детектора TRT, полученное с помощью программы TRTViewer. Слева – событие от взаимодействия протонов с энергиями 3.5 ТэВ. Справа – одно из первых событий при взаимодействии ионных пучков LHC, зарегистрированных в TRT в ноябре 2010 года.

Для обеспечения бесперебойной работы детектора TRT, а также гарантии качества регистрируемых им данных необходимо осуществлять контроль рабочих систем детектора в том числе 470000 параметров более 22600 компонентов считывающей электроники. Работа с таким объемом данных требует внедрения автоматических программных средств хранения.

При создании инфраструктуры хранения к основным задачам относятся организация структурированного хранения данных с реализацией

возможности совместного использования различных по типу и назначению баз данных, а также реализация рационального доступа к данным. Такая организация позволит в дальнейшем полностью восстановить процесс эксперимента.



Рис. 12. Сотрудник ФИАН Р.Ю. Машинистов около баррельного модуля детектора TRT.

Сотрудником ФИАН Р.Ю. Машинистовым на основе СУБД Oracle была создана база данных конфигураций системы сбора данных детектора TRT. База данных позволяет хранить конфигурации считывающей электроники за все время эксплуатации детектора, а также эффективно управлять текущими конфигурациями.

Также были созданы программные средства доступа к данным и управления базой данных. При этом разработанные средства позволяют получать информацию за любой интересующий временной промежуток за время 5 секунд.

Начиная с конца 2009 года, когда после годового перерыва заработал ускоритель LHC, к лету 2011 года были проделана большая работа по изучению свойств различных детекторов установки ATLAS, проведены их калибровки, определены их точные положения в пространстве. Были получены и опубликованы первые физические результаты.



Рис. 13. Сотрудники ФИАН О.В. Новгородова, Ф.Ф. Каюмов и В.О. Тихомиров в ATLAS Control Room во время набора данных.

В июне 2012 года на совместном семинаре экспериментов ATLAS и CMS в ЦЕРН было объявлено о статистически значимом обнаружении новой частицы с массой около 125.5 ГэВ. Эта частица предположительно является последним недостающим звеном Стандартной Модели – бозоном Хиггса, который обеспечивает механизм возникновения масс элементарных частиц. Последующий анализ, учитывающий всю набранную к началу 2013 года статистику, подтвердил данное предположение.



Рис. 14. Распределения по инвариантной массе двух γ-квантов: вверху – полученное в эксперименте, внизу – после вычета фона. Пик в районе 126 Гэв принадлежит частице – кандидату на бозон Хиггса.

В начале 2013 года первый этап работы ускорителя БАК завершился. Сам коллайдер и эксперименты готовятся к работе с повышенной светимостью и полной энергией протонов в системе центра масс 14 ГэВ. В этом режиме установки должны заработать в начале 2015 года.

В группе ЛЭЧ ФИАН (руководитель А.П. Шмелева) в эксперименте АТLAS в разные годы работали Л.Ф. Васильева, И.Л. Гавриленко, К.И. Жуков, Ф.Ф. Каюмов, С.П. Коновалов, Р.Ю. Машинистов, С.В. Муравьев, О.В. Новгородова, В.О. Тихомиров. По материалам работы защищено две кандидатских диссертации и опубликовано более 200 статей в ведущих мировых изданиях.

Наиболее значимые публикации:

- 1. W.W. Armstrong et al. ATLAS: Technical proposal for a generalpurpose pp experiment at the Large Hadron Collider at CERN. CERN-LHCC-94-43, Dec 1994. 289pp.
- 2. T. Akesson et al. Electron identification with a prototype of the transition radiation tracker for the ATLAS experiment. CERN-PPE-97-161, Nov 1997. 14pp. Nucl.Instrum.Meth.A412:200-215, 1998.
- 3. T. Akesson et al. Straw tube drift-time properties and electronics parameters for the ATLAS TRT detector. Nucl.Instrum.Meth.A449:446-460, 2000.
- 4. T. Akesson et al. Tracking performance of the transition radiation tracker prototype for the ATLAS experiment. Nucl.Instrum.Meth.A485:298-310, 2002.
- 5. T. Akesson et al. ATLAS transition radiation tracker test-beam results. Nucl.Instrum.Meth.A522:50-55, 2004.
- 6. G. Aad et al. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. Journal of Instrumentation, 3:S08003, 2008.
- 7. E. Abat et al. The ATLAS TRT barrel detector. Journal of Instrumentation, 3:P02014, 2008.
- 8. E. Abat et al. The ATLAS TRT electronics. Journal of Instrumentation, 3:P06007? 2008.
- 9. E. Abat et al. The ATLAS TRT end-cap detectors. Journal of Instrumentation, 3:P10003, 2008.
- 10. E. Abat et al. The ATLAS Transition Radiation Tracker (TRT) proportional drift tube: Design and performance. Journal of Instrumentation, 3:P02013, 2008.

- 11. G. Aad et al. Expected performance of the ATLAS experiment : detector, trigger and physics. arXiv:0901.0512 CERN-OPEN-2008-020. Geneva : CERN, 2009. 3 v.
- 12. G. Aad et al. Performance of the ATLAS Detector using First Collision Data. J. High Energy Phys. 09 (2010) 056.
- 13. A. S. Boldyrev et al. The ATLAS transition radiation tracker. Instrum. and Exp. Techn., 55 (2012) pp.323-334.
- 14. G. Aad et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *PHYSICS LETTERS B*, 716(1):1–29, SEP 17 2012.

Ссылки:

- 1. ЦЕРН: <u>http://www.cern.ch</u>
- 2. Эксперимент ATLAS: <u>http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Collaboration</u>
- 3. Результаты эксперимента ATLAS (публикации, доклады и т.д.): <u>https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic</u>
- 4. Полный список публикаций ATLAS по физическим результатам: <u>https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/Publications</u>