

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074

Памяти профессора Б.А. Долгошеина

ТРЕКОВЫЙ ДЕТЕКТОР ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТА ATLAS

© 2012 г. А. С. Болдырев***, В. Г. Бондаренко**, В. Н. Бычков, **Б. А. Долгошеин****,
О. Л. Федин****, И. Л. Гавриленко*, Ю. В. Гусаков, Н. Григалашвили, Я. В. Гришкевич***,
В. А. Канцеров**, С. В. Катунин****, Ф. Ф. Каюмов*, Г. Д. Кекелидзе, Е. М. Хабарова,
Н. В. Клопов****, Н. В. Кондратьева**, С. П. Коновалов*, Н. А. Короткова***,
С. Н. Коваленко****, В. А. Крамаренко****, Л. Г. Кудин****, И. А. Кудряшов***, К. А. Левтеров,
В. М. Лысан, С. П. Лобастов, В. П. Малеев****, Р. Ю. Машинистов*,
В. В. Мялковский, С. В. Морозов**, **С. В. Муравьев***, А. В. Надточий****, Н. В. Никитин***,
О. В. Новгородова*, Е. Г. Новодворский****, С. Б. Олешко****, С. К. Патричев****,
В. Д. Пешехонов, А. С. Романюк**, Ю. Ф. Рябов****,
А. А. Савенков, Е. В. Седых****, Д. М. Селиверстов****, А. П. Шмелева*,
С. Ю. Сивоклоков***, С. Ю. Смирнов**, Л. Н. Смирнова***, В. В. Сосновцев**,
С. И. Сучков*, В. В. Сулин*, В. О. Тихомиров*, Л. Ф. Васильева*, К. И. Жуков*

Объединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

**Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН)*

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

***Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"*

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

****НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова*
Россия, 119991, Москва, Воробьевы горы, 1, стр. 2

*****Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН*

Россия, 188300, Гатчина Ленинградской обл, Орлова роща

Поступила в редакцию 27.07.2011 г.

Описан трековый детектор переходного излучения (т.д.п.и.) установки ATLAS, являющейся одним из двух детекторов общего назначения на Большом адронном коллайдере (ЛНС). Приведено описание конструкции детектора и выполняемых им задач. Детектор полностью смонтирован и введен в эксплуатацию. Представлены первые физические результаты, полученные т.д.п.и. при измерениях космических мюонов в установке ATLAS.

1. ВВЕДЕНИЕ

Трековый детектор переходного излучения (т.д.п.и.) или TRT (Transition Radiation Tracker) является частью внутреннего детектора установки ATLAS [1] — одного из двух детекторов общего назначения на Большом адронном коллайдере (ЛНС — Large Hadron Collider). Внутренний детектор расположен в центре установки ATLAS в непосредственной близости от области соударений протонов высоких энергий и помещен внутри соленоида с магнитным полем 2 Тл. Детектор имеет цилиндрическую конструкцию, его задачей является прецизионное измерение координат и

импульсов заряженных частиц, а также вершин первичных и вторичных взаимодействий. Импульсы заряженных частиц измеряются выше порога 0.5 ГэВ/с в области псевдобыстрот $|\eta| < 2.5$. При измерении неупругих событий с минимальными условиями отбора возможно измерение импульсов при меньшем пороге — 0.1 ГэВ/с. Кроме того, с помощью т.д.п.и. обеспечивается идентификация электронов в области псевдобыстрот $|\eta| < 2.0$ и в интервале импульсов 0.5–150 ГэВ/с.

Впервые идея создания комбинированного т.д.п.и. была предложена группой МИФИ—ФИАН [2], исходя из опыта разработки и эксплу-

атации детектора TRD (Transition Radiation Detector) для эксперимента HELIOS [3]. В создание т.д.п.и. установки ATLAS вместе с институтами и группами ЦЕРН, Дании, Польши, Швеции, Турции и США значительный вклад внесли российские институты: ПИЯФ, МИФИ, ФИ РАН, НИИЯФ МГУ и ОИЯИ.

Отличие ЛНС от всех предыдущих и действующих в настоящее время коллайдеров состоит в том, что основным источником радиационного фона при планируемой высокой светимости $\geq 2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ являются частицы, образованные во взаимодействиях ускоренных протонов в области соударений. Наибольшую опасность этот радиационный фон представляет для внутреннего детектора установки ATLAS. Полагается, что все свои задачи т.д.п.и. будет выполнять при самой высокой светимости ЛНС. Это обеспечивается использованием наиболее передовых технологий при создании детектора.

В данной работе приведено общее описание внутреннего детектора установки ATLAS и выполняемых им задач. Описаны сенсорный элемент т.д.п.и., принцип генерации и регистрации переходного излучения, структура т.д.п.и., модули детектора, система электроники считывания и передачи сигналов. Представлены результаты первых измерений т.д.п.и. в составе установки ATLAS. Сформулированы основные итоги работы по созданию т.д.п.и. и первых результатов измерений.

2. ВНУТРЕННИЙ ДЕТЕКТОР УСТАНОВКИ ATLAS

Внутренний детектор установки ATLAS размещен внутри цилиндрического соленоида, симметричного относительно точки пересечения протонных пучков в центре детектора. Ось соленоида совпадает с осью пучков. Внутренний детектор занимает область протяженностью ± 3512 мм по оси пучков, его внешний радиус составляет 1150 мм. Он содержит три различных, дополняющих друг друга типа детекторов. Внутреннюю часть, наиболее близкую к оси столкновений, занимают прецизионные пиксельные и микростриповые кремниевые детекторы. В центральной части (барреле) они размещаются на цилиндрах с осями вдоль направления пучка, а в торцевых частях смонтированы на дисках, плоскости которых перпендикулярны пучку. Конструкция детектора выбрана с таким расчетом, чтобы частицы, вылетающие из области столкновения протонов, пересекали плоскости детектора под углами, близкими к нормали.

Пиксельные и микростриповые кремниевые детекторы составляют дискретную трековую систему внутреннего детектора. Ее дополняет “не-

прерывная” трековая система, состоящая из тонкостенных дрейфовых трубок (straw) диаметром 4 мм, расположенных близко друг к другу, и допускающая регистрацию до 36 координат пересечения частицей трубок. Пространство между трубками заполнено высокоструктурированными пластиковыми материалами, которые обеспечивают генерацию переходного излучения заряженных частиц при пересечении ими этого множества слоев. Фотоны переходного излучения регистрируются дрейфовыми трубками наряду с сигналами от ионизационных потерь (поэтому трековая система именуется трековым детектором переходного излучения). Эффективная регистрация переходного излучения позволяет разделять треки адронов и электронов.

В центральной части т.д.п.и. трубки имеют длину 144 см и расположены параллельно оси детектора. В центре трубки на ее анодной проволоке имеется разделитель, позволяющий снимать электронный сигнал с половины длины трубки. Т.д.п.и. в барреле позволяет определить только $(R-\varphi)$ -координату трека, где φ — азимутальный угол в плоскости (x, y) , перпендикулярной оси z , а R — радиус в этой плоскости относительно оси детектора. В торцевых областях т.д.п.и. трубки имеют длину 37 см и расположены радиально в пространстве между радиусами R от 644 до 1004 мм. Собственное координатное разрешение трубки составляет 130 мкм. Полное количество каналов считывания сигналов детектора составляет 350848. На рис. 1 [1] показано расположение элементов внутреннего детектора.

Комбинация прецизионных детекторов на малых радиусах и дрейфовых трубок на больших радиусах обеспечивает надежную реконструкцию треков и высокую точность измерения координат $(R-\varphi)$ и z . Сигналы трубок позволяют существенно повысить координатную точность во внешней области внутреннего детектора. Меньшая пространственная точность трубок по сравнению с прецизионными детекторами компенсируется их большим количеством и значительным увеличением измеряемой длины трека. Возможность реконструкции близких вторичных вершин от распадов тяжелых частиц обеспечивается преимущественно самым внутренним слоем пиксельных детекторов, размещенных на цилиндре с радиусом 5 см.

Оценка количества вещества в т.д.п.и. в единицах радиационных длин X_0 , которое пересекает частица, вылетающая из области соударений пучков под углами, соответствующими псевдобыстротам $\eta = 0$ и $\eta = \pm 1.8$, дает значения $0.264X_0$ и $0.219X_0$.

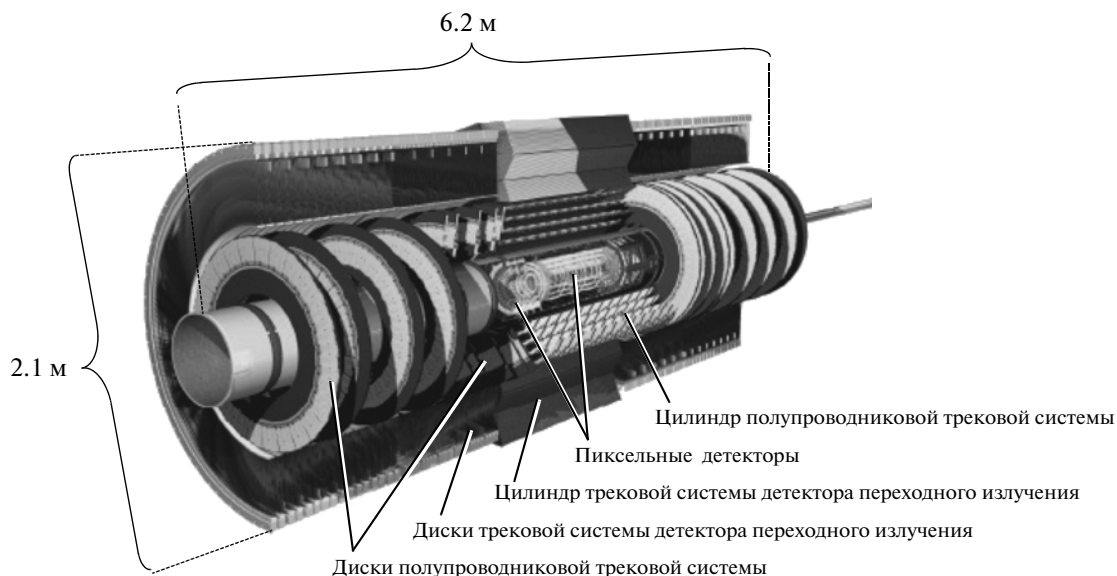


Рис. 1. Схема внутреннего детектора установки ATLAS. Показаны цилиндры и диски пиксельных детекторов, цилиндры и диски полупроводникового трекового детектора и внешний объем, занимаемый т.д.п.и.

3. СЕНСОРНЫЙ ЭЛЕМЕНТ Т.Д.П.И.

Рабочим элементом или сенсором т.д.п.и. служит тонкостенная трубка диаметром 4 мм. Конструкция трубки была разработана исходя из условия минимальной толщины ее стенок при достаточной механической прочности и электрической проводимости [4]. Исходным материалом для стенок трубки послужила полиимидная пленка (Dupond) толщиной 25 мкм. На пленку были нанесены три слоя покрытий: на одну сторону пленки – слой алюминия толщиной 0.2 мкм и защитный слой графита, смешанного с полиимидом, толщиной 5–6 мкм; на другую сторону – слой полиуретана толщиной 5 мкм. Для изготовления трубки две полосы пленки совмещались сторонами с полиуретановым покрытием и спекались при температуре 200–250°C. Структура стенки трубки и процесс ее изготовления показаны на рис. 2а, 2б [4]. Дополнительно для увеличения механической прочности трубки на ее внешнюю поверхность приклеивались волокна углепластика – всего четыре волокна на одинаковом угловом расстоянии. Волокна содержат 1000 нитей диаметром 8 мкм и проходят вдоль оси трубки (рис. 2в) [4]. Электрическое сопротивление стенок трубки, которые служат катодом, составило <math><300\text{ Ом/м}</math>.

В центре трубки размещена анодная проволока толщиной 31 мкм, выполненная из вольфрама с золотым покрытием толщиной 0.5–0.7 мкм. Анодная проволока находится под нулевым потенциалом, и сигнал с нее подается непосредственно на считывающую электронику. Сопротивление анода составляет 60 Ом/м, а емкость собран-

ной трубки <math><10\text{ пФ}</math>. Потенциал катода составляет –1530 В, что обеспечивает газовое усиление вблизи анода $2.5 \cdot 10^4$ при выбранной рабочей газовой смеси Xe(70%)/CO₂(27%)/O₂(3%). Давление газа в трубке на $(5–10) \cdot 10^2$ Па превышает атмосферное. Трубки работают при температуре +20°C. Такой температурный режим требует постоянного контроля и специальных мер поддержания, поскольку соседние полупроводниковые детекторы работают при пониженной температуре.

Временной анализ электронного сигнала трубки обеспечивает измерение расстояния прохождения частицы от анода за счет практически постоянной скорости дрейфа электронов от ионизационного следа прошедшей частицы в рабочем газе. Схема временного сигнала приведена на рис. 3 [5]. Чем ближе к аноду проходит частица, тем меньше время прихода сигнала с трубки относительно начальной точки. При нормальных условиях полное время сбора электронов в трубке составляет ~48 нс, и точность измерения координаты прохождения частицы (расстояния до проволоки) составит ~130 мкм. Сигнал ионизационных потерь частицы регистрируется при низком пороге, 300 эВ. Для регистрации фотонов переходного излучения используется высокий порог, 6 кэВ.

Принцип генерации и регистрации переходного излучения показан на рис. 4 [6]. Фотоны переходного излучения испускаются под малым углом $\theta = 1/\gamma$ (где γ – лоренц-фактор частицы) к направлению движения частицы. Эффективное поглощение фотонов переходного излучения низкой энергии осуществляется ксеноном, который является основным компонентом рабочей

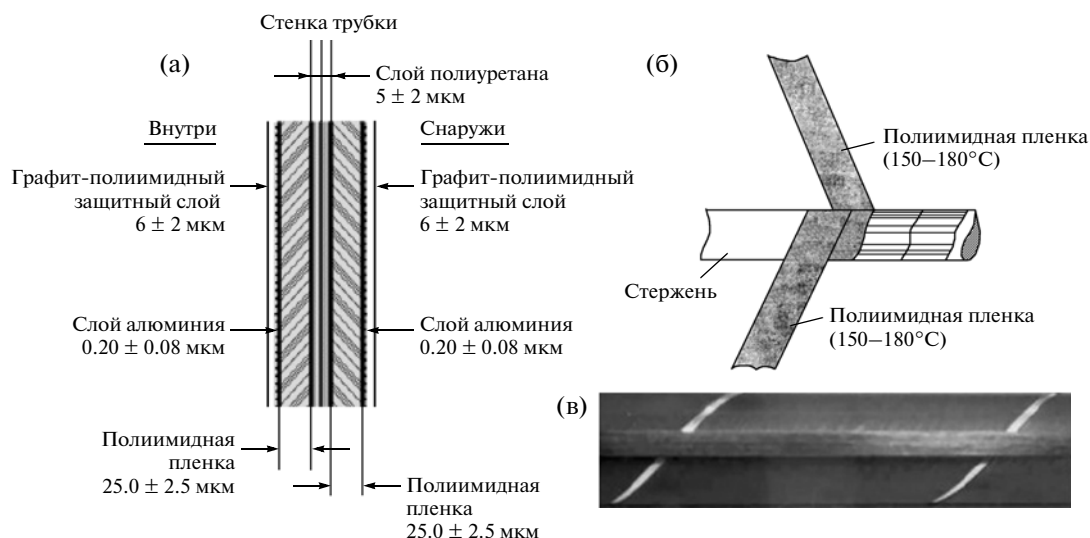


Рис. 2. Структура стенки трубки т.д.п.и. (а), процесс изготовления трубки (б) и фотография готовой трубки с приклеенной вдоль оси трубки нитью углепластика (в).

газовой смеси детектора. Фотоны переходного излучения при регистрации обеспечивают значительно большее энерговыделение, чем ионизационные потери релятивистских частиц. Поэтому они легко выделяются при использовании высокого порога регистрации сигнала.

Относительное положение трубок и соответственно характерные расстояния между трубками показаны на рис. 5 на примере центральной части т.д.п.и. Среднее расстояние между трубками составляет ~ 7 мм. Между трубками расположено ве-

щество радиатора. Трубки окружены оболочкой, заполненной газом CO_2 , предохраняющим объем внутри трубки от возможных загрязнений извне.

4. СТРУКТУРА Т.Д.П.И.

Трековый детектор переходного излучения содержит 96 продольных модулей в барреле и 112 модулей в торцевых областях с общим количеством дрейфовых трубок 298304. Общая длина детектора 5.5 м, внешний диаметр 2.2 м. Длина трубок в барреле составляет 144 см, на торцах – 37 см. Анодная проволока в трубках барреля имеет механическую поддержку в середине трубки. Эта пластиковая поддержка изолирует две половины проволоки. Сигнал снимается отдельно с каждой стороны трубки, т.е. с участка длиной 71.2 см. Размер нечувствительной области составляет 2 см. В девяти самых нижних слоях барреля трубки разделены на три части, и сигнал с обеих сторон снимается с участка длиной лишь 31.2 см.

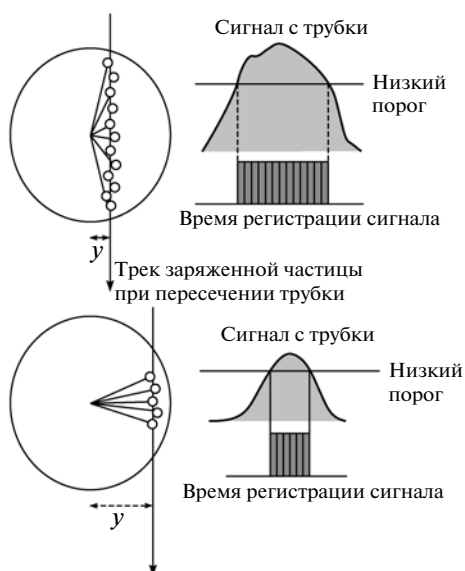


Рис. 3. Схема прохождения заряженной частицы через трубку. Расстояние y координаты внутри трубки определяется по времени прихода переднего фронта импульса с низким порогом регистрации.

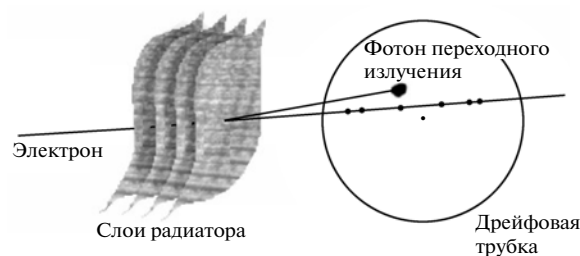


Рис. 4. Принцип регистрации фотона переходного излучения, испущенного электроном при пересечении слоев радиатора, в дрейфовой трубке.

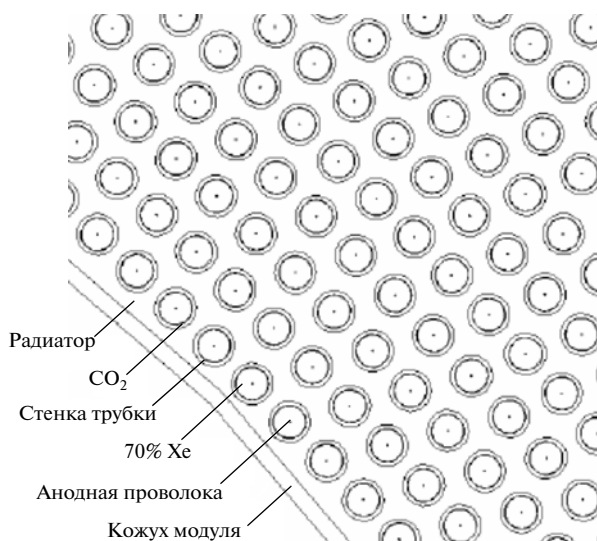


Рис. 5. Схема расположения трубок в модуле центральной части т.д.п.и.

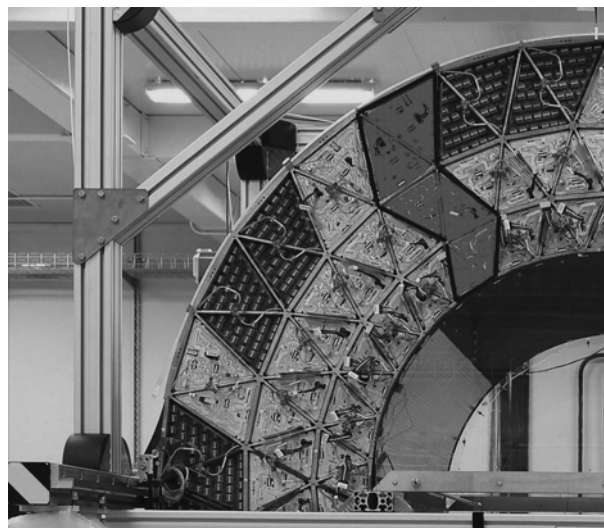


Рис. 6. Фотография сектора барреля т.д.п.и. установки ATLAS. Жирной линией выделены по одному внешнему, среднему и внутреннему модулю.



Рис. 7. Монтаж модуля торцевой части т.д.п.и. установки ATLAS в CERN (CERN-EX-9804025 02).

На рис. 6 [1] приведена фотография сектора барреля т.д.п.и. установки ATLAS. На снимке отчетливо видна структура трех радиальных слоев модулей.

На рис. 7 приведена фотография готового модуля торцевой части т.д.п.и. Модули торцевых областей смонтированы на механических конструкциях из углепластика с прецизионно выполненными отверстиями для монтажа трубок, конструкции были изготовлены на заводе «Машиностроитель» в г. Пермь.

Общий вид центральной части т.д.п.и. и микростриповых кремниевых детекторов в процессе сборки показан на рис. 8 [1], торцевая часть т.д.п.и. в полной сборке — на рис. 9 [1].

Каждый торцевой элемент т.д.п.и. [7] состоит из двух блоков модулей типов А и Б, имеющих форму диска с удаленной внутренней областью. Ближайший к центру блок состоит из 12 модулей типа А, каждый из которых имеет восемь слоев трубок с промежутком между слоями 8 мм. Внешний блок содержит 12 модулей типа Б, по восемь слоев трубок в каждом модуле, но с промежутком

между слоями 15 мм. Каждый слой имеет 768 радиально ориентированных трубок длиной 37 см, равномерно распределенных по азимутальному углу. Между слоями трубок размещен радиатор из слоев фольги полипропилена толщиной 15 мкм, разделенных полипропиленовой сеткой. Трубки охлаждает поток углекислого газа.

Использование в рабочей газовой смеси ксенона, который является дорогим газом, потребовало создания для т.д.п.и. замкнутой циркуляционной газовой системы. В такой системе необходим постоянный контроль качества газовой смеси и ее чистоты. Примеси могут как привноситься извне, проникая через стенки трубки, так и появляться под действием излучения от конструктивных материалов детектора в процессе эксплуатации. Суммарный объем газовой системы т.д.п.и. составляет 3 м³. Для защиты трубок от диффузионных воздействий извне они помещены в оболочки, продуваемые углекислым газом. В газовой системе используется катализатор, удаляющий вредные примеси, возникающие под воздействием излучения, и расщепляющий накапливающийся озон. Все материалы, используемые в детекторе, прошли контроль чистоты, в том числе на устойчивость при облучении.

Большой поток частиц приводит к значительному току ионизации в газе и, следовательно, к большому выделению тепла. Тепловыделение пропорционально скорости счета в отдельной трубке и изменяется от 10 до 20 мВт для наиболее загруженных трубок нижних слоев барреля при планируемой светимости ЛНС. Для поддержания постоянного газового усиления изменение температуры вдоль каждой трубки не должно превышать 10°C. Отвод тепла для трубок в центральной части т.д.п.и. на торцах происходит по-разному. Описание этих систем приведено в разд. 5.

При номинальной светимости ЛНС $2 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ скорость счета на каждую трубку в наиболее близких к центру областях достигает 20 МГц. Ионизационный ток при этом достигает 0.15 мкА на 1 см длины анодной проволоки. Это соответствует величине полного собранного заряда ~10 Кл/см после 10 лет эксплуатации детектора в наиболее нагруженных участках. Проведенные испытания, включая прямые тесты на старение, продолжительностью ~1000 ч продемонстрировали стабильность работы дрейфовых трубок заданной конструкции в течение всего требуемого периода эксплуатации. Некоторый минимальный уровень загрязнения не может быть исключен. Наиболее опасные органо-кремниевые примеси в газе не должны превышать 10^{-11} . Включенный в газовую систему катализатор выполняет эту задачу. В случае проявления эффектов старения в процессе эксплуатации детектора использование

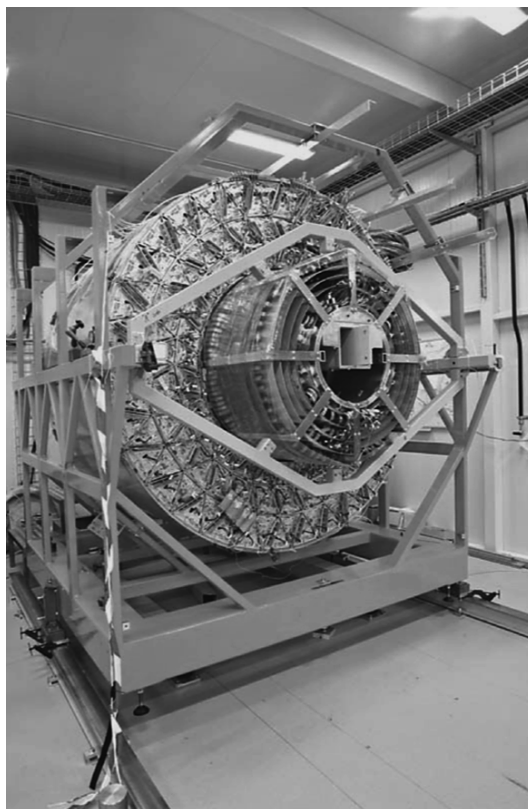


Рис. 8. Центральная часть т.д.п.и. и системы микро-стриповых кремниевых детекторов установки ATLAS в сборке.

в течение нескольких дней в качестве рабочей газовой смеси $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ позволяет эффективно удалить осадения, включающие кремний, с анодных проволок [8].

5. СТРУКТУРА МОДУЛЕЙ Т.Д.П.И.

Центральная часть т.д.п.и. содержит 73 слоя трубок, находящихся в объеме, заполненном материалом из полипропиленовых волокон, а торцевые части – 160 плоскостей трубок, проложенных пленками, обеспечивающими генерацию переходного излучения для идентификации электронов. Все частицы с поперечными импульсами выше 0.5 ГэВ/с и значениями псевдобыстроты $|\eta| < 2.0$ пересекают по своей траектории 36 дрейфовых трубок, исключая переходную область между баррелем и торцевыми модулями при $0.8 < |\eta| < 1.0$. В этой области минимальное количество пересекаемых трубок достигает 22. Электрон с энергией > 2 ГэВ способен создать в среднем от 7 до 10 сигналов с высоким порогом, вызванных переходным излучением.

Центральная часть т.д.п.и. [9] имеет три кольцевых слоя модулей, по 32 модуля в каждом. С краев они поддерживаются рамой, которая служит ос-

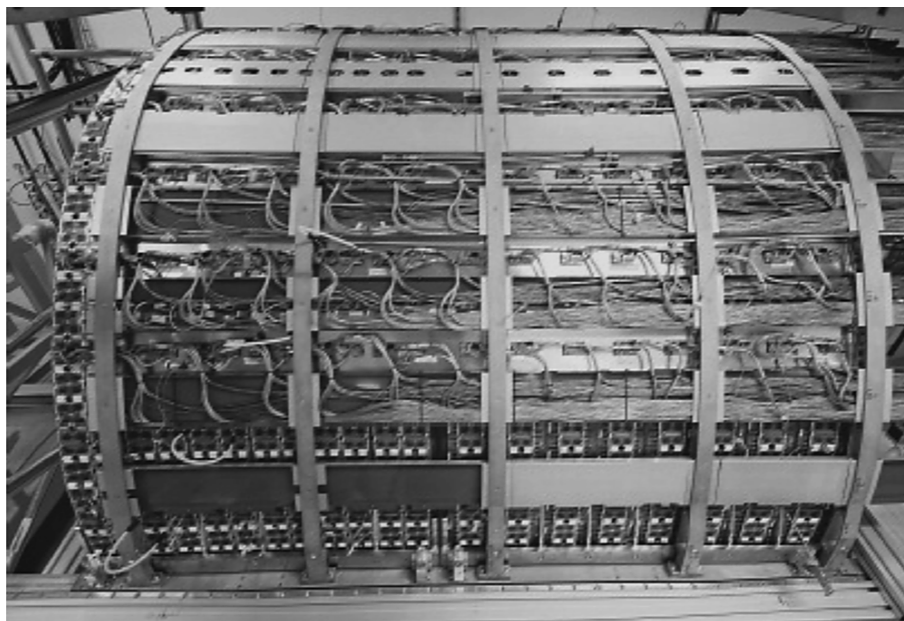


Рис. 9. Торцевая часть т.д.п.и. в полной сборке. Слева направо внутри расположены 12 модулей типа А и 8 модулей типа В, окруженных системами сервиса и механической поддержки.

новным элементом поддерживающей структуры барреля внутреннего детектора. Каждый модуль имеет оболочку из углепластика, внутренний объем модуля заполнен трубками, размещенными в матрице из волокон полипропилена диаметром 19 мкм, служащих для генерации переходного излучения. Трубки образуют аксиально однородное пространство со средним промежутком ~ 7 мм. Оболочки модулей расположены не в проективной геометрии, чтобы уменьшить объем нечувствительной области для треков с большими поперечными импульсами. Основные параметры барреля приведены в табл. 1.

Допуски для механических конструкций определяются собственным разрешением трубок в ($R-\phi$)-плоскости, равным 130 мкм и предполагающим, что положение проволок известно с точностью ± 50 мкм. Оболочка модуля барреля, выполненная из углепластика с высокой теплопроводностью толщиной 400 мкм, имеет плоскостность в пределах 250 мкм, что, согласно измерениям, соответствует максимальной деформации < 40 мкм при полной нагрузке.

Оболочка модуля также служит распределителем для углекислого газа CO_2 , циркулирующего снаружи трубок. Это позволяет предотвратить

Таблица 1. Параметры модулей центральной части (барреля) и торцевых модулей

	$ z _{\min}$, мм	$ z _{\max}$, мм	R_{\min} , мм	R_{\max} , мм	Число модулей	Число слоев	Число трубок в модуле
Баррель (обе стороны)	0	780	554	1082	96	73	52544
Модуль типа 1 (внутренний)	400	712.1	563	624	32	9	329
Модуль типа 1 (внешний)	7.5	712.1	625	694		10	
Модуль типа 2	7.5	712.1	697	860	32	24	520
Модуль типа 3	7.5	712.1	863	1066	32	30	793
Торцевые модули (одна сторона)	827	2744	615	1106	20	160	122880
Модуль типа А	848	1705	644	1004	12	8	6144
Модуль типа В	1740	2710	644	1004	8	8	6144

Примечание. Жирным шрифтом выделены общие параметры, включающие электронику и сервисы. Все остальные параметры приведены для отдельных модулей и активной области. Центральные модули типа 1 имеют два типа трубок (см. разд. 4, конец первого абзаца).

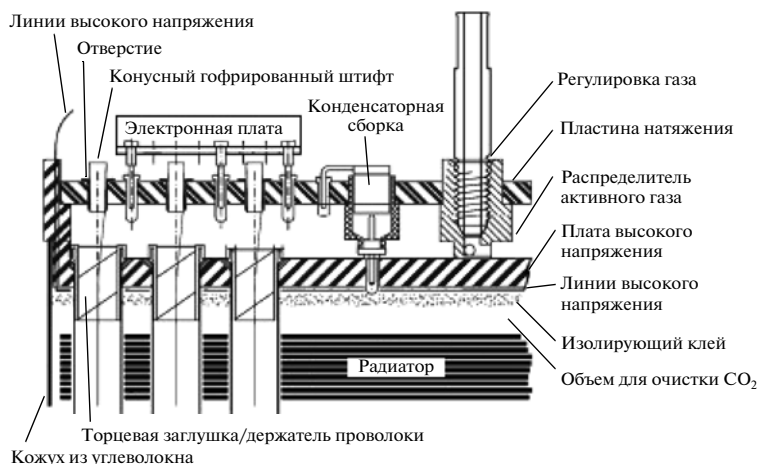


Рис. 10. Конструкция края центрального модуля. Показано соединение концов трубок с платой высокого напряжения, соединение проволок с передней панелью через платы натяжения и ввод газа в отдельные трубки через распределитель активного газа.

пробои высокого напряжения и снизить концентрацию ксенона, скапливающегося вследствие утечек из трубок и способного поглощать переходное излучение вне трубок. Тепло, рассеиваемое трубками, передается оболочке модуля через углекислый газ. Каждая оболочка модуля охлаждается двумя специальными каптоновыми трубками, расположенными в острых углах каждого модуля. Они служат также для возврата теплоносителя (C_6F_{14}) системы охлаждения считывающей электроники.

Край модуля барреля с его компонентами показан на рис. 10 [1]. Центральным элементом является плата высокого напряжения, удовлетворяющая жестким требованиям к плоскостности и чистоте для предотвращения разрядов и обеспечения механической точности расположения трубок. Платы высокого напряжения подгонялись индивидуально после производства. Платы натяжения смонтированы на платах высокого напряжения и обеспечивают натяжение и электрическое соединение проволок. Кроме того, они закрывают объем активного газа и служат электрическим экраном для активных элементов модуля.

Механические и электрические испытания модулей и трубок проводились на стадиях сборки и транспортировки модулей в CERN. Длина модулей находилась в интервале 1461.5–1462.9 мм, кривизна отдельного модуля не превышала 1 мм. Жесткие требования предъявлялись к удержанию газа, натяжению проволок, прямолинейности трубок, стабильности высокого напряжения. Модули, установленные в барреле, имеют 98.5% действующих каналов.

Каждая торцевая часть детектора состоит из двух комплектов отдельных модулей типа А и Б (см. рис. 11 [1] и табл. 1). Модуль с восемью плос-

костями трубок состоит из двух основных сборочных блоков, каждый из которых содержит четыре плоскости. При сборке блоков с четырьмя плоскостями трубки вставлялись и клеивались в отверстия, с высокой точностью просверленные в заземленном внутреннем и внешнем кольцах, выполненных из углепластика. Кольца и трубки образуют несущую механическую конструкцию блоков. Отдельные слои трубок, прослоенные радиатором, смещены по азимутальному углу относительно друг друга на $3/8$ азимутальной ширины трубки в каждом слое. Это обеспечивает оптимальную однородность по числу пересекаемых трубок для прямого трека с большим поперечным импульсом. Число пересекаемых трубок изменяется с радиусом и составляет от ~ 6 до ~ 4 трубок в модуле с восемью их слоями.

Многослойные печатные платы, состоящие из жесткой стеклотекстолитовой части и гибкой части, изготовленной из полиимидной пленки, обеспечивают контакт высокого напряжения и съем сигнала с торцевых модулей, как показано на рис. 12 [1]. Стеклотекстолитовая жесткая часть плат приклеена к торцам колец и служит одной из стенок внешнего газового объема отдельного блока. Гибкая часть обеспечивает гальваническое подключение к катодам (стенкам) и анодам трубок печатных плат с помощью имеющихся на них металлизированных лепестков для подачи высокого напряжения и считывания сигнала.

Для надежности электрического соединения гибкие “лепестки” в слое высокого напряжения прижимаются к внутренней стенке трубки введением пластиковых втулок. Для фиксирования анодной проволоки применяются специальные тонкостенные медные пины с изоляционным пластиковым покрытием для одного конца трубки

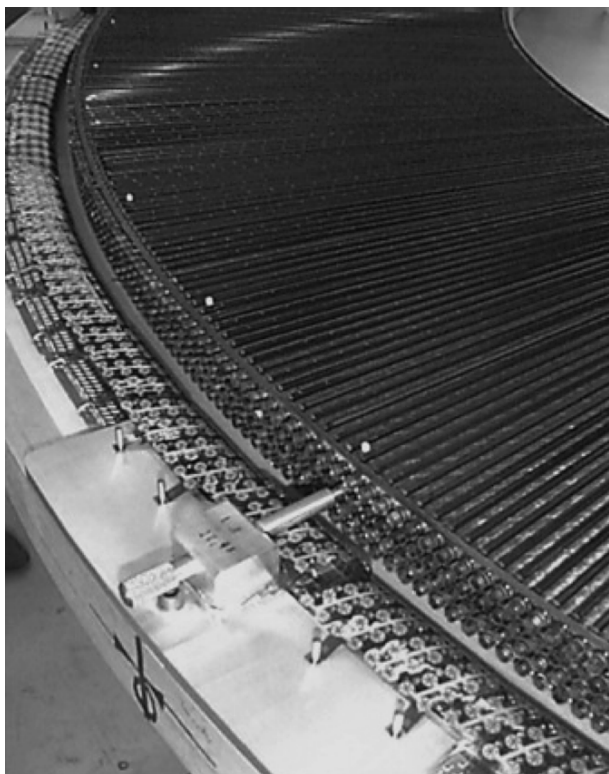


Рис. 11. Фотография торцевого модуля с четырьмя плоскостями в процессе сборки. Видны внешнее и внутреннее углеродные кольца, первый слой трубок и первый блок из полипропилена под ними, а также пластиковые втулки, обеспечивающие размещение и крепление трубок к внешнему углеродному кольцу.

и цельнометаллические — для другого. Механическим соединением обеспечивается контакт сигнального слоя и металлического покрытия пина, удерживающего положение проволоки. В блоке с четырьмя слоями трубок всего имеется 32 такие

платы, каждая из которых обслуживает сектор азимутального угла, содержащий 96 трубок.

Каждый сектор разделен на три группы по 32 канала считывания и 12 групп из восьми трубок по высокому напряжению, имеющих общий предохранитель и блокирующий конденсатор. Кольцо из углепластика, несущее трубки и жестко-гибкие платы, совместно с третьим таким кольцом и обычным стеклотекстолитовым слоем обеспечивает жесткую структуру по периметру внешнего кольца, которое также служит распределителем газа (см. рис. 12 [1]). Внутренний распределитель газа выполнен из усиленного полиимидного материала.

Тепло, рассеиваемое трубками, удаляется потоком углекислого газа, который протекает между трубками снизу вверх — от меньшего радиуса к большему. Каждая группа модулей имеет собственную систему охлаждения CO_2 , в которой газ последовательно проходит все модули группы. Теплообменники, охлаждаемые C_6F_{14} , расположены между соседними модулями. Высокие требуемые потоки газа, $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ для модулей типа А и $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ для модулей типа Б, обеспечиваются замкнутой системой, способной поддерживать внутри детектора небольшое избыточное по отношению к атмосферному давление газа $0\text{--}500 \text{ Па}$ со стабильностью $\pm 50 \text{ Па}$.

Как и модули барреля, все торцевые модули прошли процедуры контроля как в процессе сборки, см., например, [10, 11], так и после поставки в CERN, что позволило обеспечить свыше 99% действующих каналов.

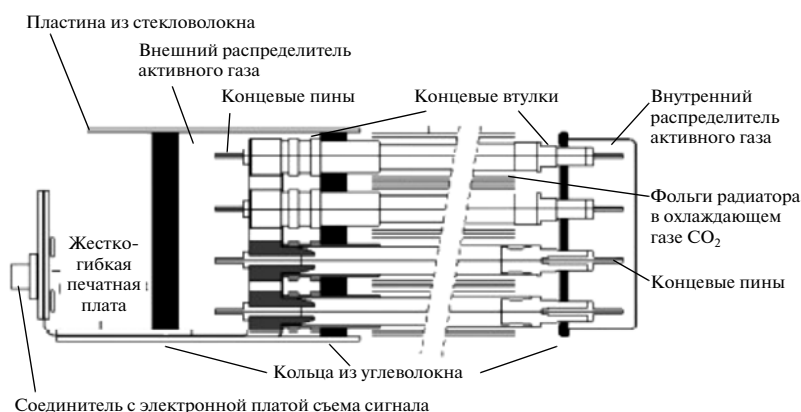


Рис. 12. Конструкция краев внутреннего и внешнего торцевых модулей. Показаны пластиковые втулки, обеспечивающие позиционирование и крепление трубок на внутреннем и внешнем углеродных кольцах, концевые пины, удерживающие и позиционирующие проволоки, внутренний и внешний распределители потока газа и жестко-гибкая печатная плата, используемая для высоковольтного соединения трубок и проволоки с электроникой съема сигнала.

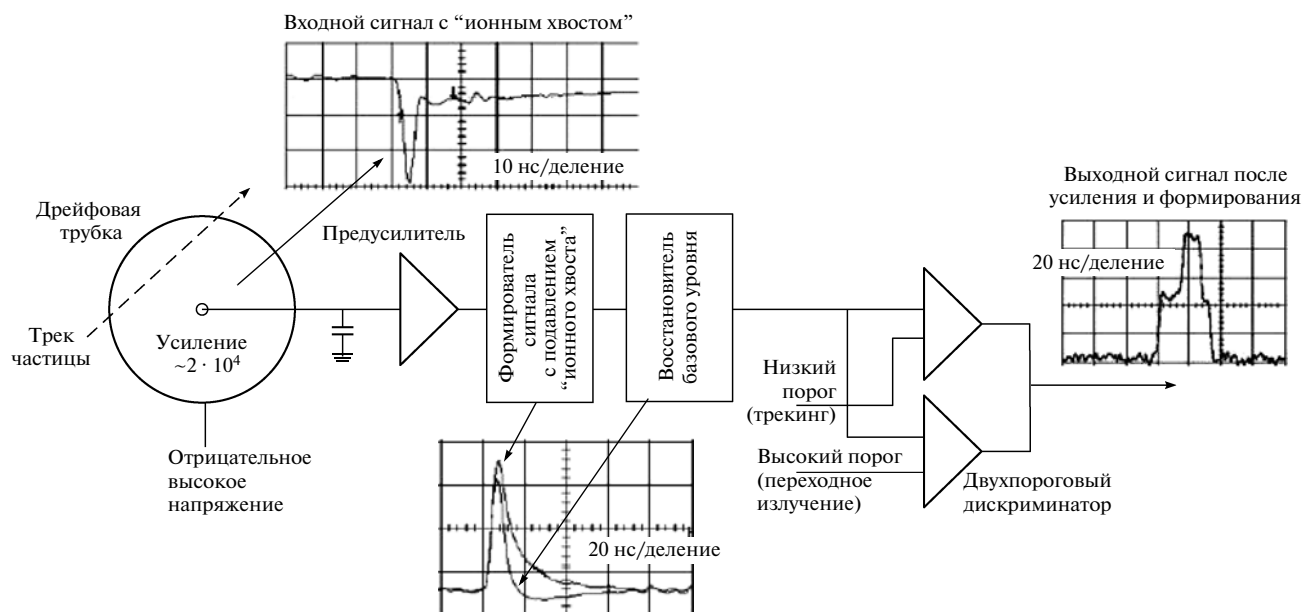


Рис. 13. Схема электроники считывания т.д.п.и. Показаны формы входного сигнала и сигналов после усиления и формирования, основной реконструкции и двухпороговой дискриминации, которая обеспечивает выходной сигнал, соответствующий либо низкому порогу, либо одновременно низкому и высокому порогам.

6. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОНИКИ СЧИТЫВАНИЯ И ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ

Система считывания электрических сигналов т.д.п.и. имеет следующие общие черты с другими подсистемами внутреннего детектора:

- получение синхронизированного с пересечениями сгустков частиц коллайдера временного сигнала с частотой 40.08 МГц, который используется в качестве временной метки сигнала, генерированного в электронике считывания с низким уровнем шумов;

- генерация сигнала и его хранение в бинарном или цифровом буфере в течение ~3.2 мкс, что сравнимо с временем задержки триггера первого уровня L1, составляющим 2.5 мкс;

- в зависимости от сигнала триггера L1 следует передача содержания буфера, ассоциированного с данным пересечением сгустков частиц или несколькими пересечениями, в драйвер чтения (ROD) детектора.

Считывание информации линией связи осуществляется под управлением сигнала триггера L1 от калориметров или мюонных детекторов через центральный триггерный процессор. Внутренний детектор не входит в систему триггера L1. Напряжение питания на сенсорах детекторов и считывающей электронике обеспечивается внешними источниками.

Обработка аналоговых сигналов и дискриминаторов порогов для регистрации релятивистских частиц и переходного излучения, а также последующая временная оцифровка и транспортиров-

ка сигналов осуществляются размещенными на детекторе специализированными микросхемами ASIC двух типов.

Сигнал т.д.п.и. на каждом этапе цепочки чтения показан на рис. 13 [1]. Цепочка чтения сигнала включает:

- аналоговую восьмиканальную ASIC [12], именуемую ASDBLR и изготовленную по Bi-CMOS радиационно устойчивой DMILL-технологии; микросхема выполняет усиление, формирование и базовую реконструкцию сигнала и включает в себя два дискриминатора: один — действующий при низком пороге (порядка 250 эВ) — для регистрации сигналов частиц с минимальной ионизацией, другой — действующий при высоком пороге (порядка 6 кэВ) — для регистрации переходного излучения;

- последующая 16-канальная ASIC, изготовленная по коммерческой радиационно стойкой 0.25 мкм CMOS-технологии [13]; микросхема выполняет измерения времени дрейфа с шагом ~3 нс и включает в себя цифровую линию передачи для удержания данных на время задержки триггера L1, буфер и 40 Мбит/с последовательный интерфейс, кроме того, она содержит необходимый интерфейс для сигнала временной метки, триггера и управления, а также цифроаналоговый преобразователь для установки порогов дискриминаторов аналоговой ASIC и контрольную систему генерации аналоговых сигналов для входа в аналоговую ASIC.

Таблица 2. Некоторые рабочие параметры т.д.п.и.

Высоковольтное напряжение:	
максимальное напряжение	2000 В
рабочее напряжение	1530 В
Максимальный ток	3 мА
Сегментация	Один на ~200 трубок 1984 каналов
Напряжение электроники (низковольтное напряжение):	
аналоговое напряжение	± 3 В
цифровое напряжение	2.5 В
Ток	6.5 кА
Сегментация	1/32
Энергоснабжение:	
электроника считывания	22 кВт
кабели и регуляторы	~23 кВт
полная мощность (начальный этап работы)	~44 кВт

Некоторые рабочие параметры детектора приведены в табл. 2.

Обе микросхемы ASIC размещены на передней панели, присоединенной к детектору. Всего существует 12 различных панелей для барреля и 3 — для торцевой части детектора. Охлаждение электро-

ники осуществляется системой на основе монофазной жидкости C_6F_{14} .

При эксплуатации детектора сигналы с низким порогом используются для реконструкции треков. Это соответствует ~15% от среднего сигнала, ожидаемого от релятивистских частиц. Средний уровень загрузки шумами трубок составляет ~2%. При этом небольшая часть каналов (1%) имеет шумовую загрузку свыше 10%, что, однако, мало по сравнению с ожидаемой максимальной загрузкой трубок 40%.

Вся цепочка электроники считывания была испытана потоком нейтронов $\sim 4 \cdot 10^{14}$ см⁻² и γ -квантов с суммарной дозой 80 кГр. В результате усиление микросхемы ASDBLR изменилось на ~25%, однако для порогов и уровня шумов, после стандартной процедуры компенсации напряжения, изменений не наблюдалось.

7. ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЕТЕКТОРОМ

Готовность т.д.п.и. как части установки ATLAS к работе была продемонстрирована на первых пучках Большого адронного коллайдера и в измерениях частиц космического излучения, проникающих в детектор, расположенный в подземной шахте, сквозь ~100 м грунта и бетонных конструкций. Практически первые физические результаты эксперимента ATLAS были получены с помощью т.д.п.и. На треках космических мюонов были измерены вероятности образования фотонов переходного излучения для разных значений импульсов мюонов. Результаты этих измерений приведены на рис. 14 [14]. Вероятность сигнала с высоким порогом, соответствующего регистрации γ -кванта переходного излучения, приведена на этом рисунке в зависимости от лоренц-фактора мюона. Точками показаны данные, полученные экспериментально. Сплошной линией на рисунке показана аппроксимация экспериментальных данных для мюонов. Измерения космических мюонов осуществлялись центральной частью детектора (баррелем), поскольку конфигурация детектора оптимальна для измерения вертикального потока космических мюонов.

Результаты для космических мюонов соответствуют данным, полученным в период 2008–2010 гг. Результаты измерений в пучках ускорителя согласуются с результатами измерений установки ATLAS на космических мюонах вплоть до значений лоренц-фактора $\sim 10^3$, т.е. во всей области чувствительности детектора для эффективной идентификации электронов. Результаты согласуются как для барреля, так и для торцевых областей, несмотря на различную структуру радиатора в них.

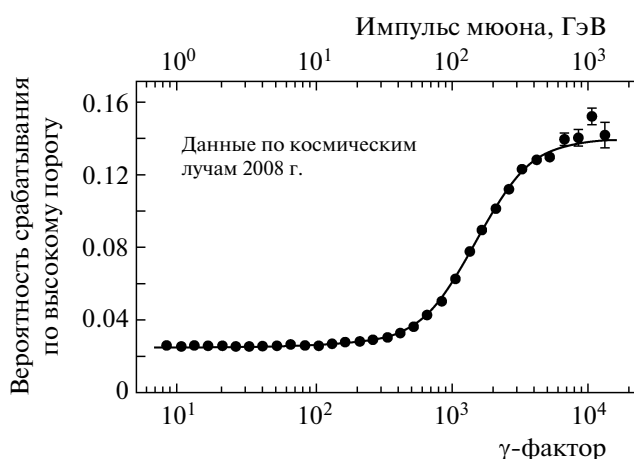


Рис. 14. Зависимость вероятности образования фотонов переходного излучения в т.д.п.и. установки ATLAS от лоренц-фактора космического мюона: точки — эксперимент; линия — результат аппроксимации.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Международным сотрудничеством TRT эксперимента ATLAS разработан и создан крупномасштабный комбинированный трековый детектор переходного излучения, который является частью установки ATLAS на Большом адронном коллайдере LHC и служит составным элементом внутреннего детектора установки. Трековый детектор переходного излучения предназначен для измерения треков заряженных частиц и идентификации электронов, образованных в центральной области взаимодействий как протонов, так и тяжелых ионов тэраэлектронвольтных энергий при светимости ускорителя $>2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Особенностью т.д.п.и. являются его большие размеры: длина детектора 5.5 м, внешний диаметр 2.2 м. Сенсорные элементы детектора – 298304 тонкие дрейфовые трубки. Количество каналов электроники 350848.

Центральная часть т.д.п.и. изготовлена в Соединенных Штатах Америки, торцевые модули и механические конструкции барреля – в России. Контрольные испытания после сборки и монтажа т.д.п.и. в установку ATLAS показали, что более 99% каналов электроники находятся в рабочем состоянии.

В настоящее время т.д.п.и. введен в эксплуатацию и участвует в работе эксперимента ATLAS. Получены первые физические результаты по вероятности образования фотонов переходного излучения в детекторе мюонами космических лучей. Эти результаты согласуются с данными испытаний на ускорителе.

Проведенные в процессе создания детектора исследования показали, что он сможет успешно работать в сложных условиях эксперимента без доступа к детектору более 10 лет.

Работа выполнена в составе коллаборации ATLAS. Авторы выражают благодарность сотрудникам институтов, входящих в состав коллаборации: Faculty of Sciences, Department of Physics, Bogazici University, Istanbul, Turkey; Brookhaven National Laboratory, Physics Department, Upton, United States of America; CERN, Geneva, Switzerland; Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Kobenhavn, Denmark; Faculty of Physics and Applied Computer Science of the AGH-University of Science and Technology, Krakow, Poland; The Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Science, Krakow, Poland; Duke University, Department of Physics, Durham, United States of America; Universite de Geneve, Section de Physique, Geneve, Switzerland; Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, CNRS-IN2P3, Universite Joseph Fourier, Grenoble Cedex, France; Hampton University, Department of Physics, Hampton, United States of

America; Indiana University, Department of Physics, Bloomington, United States of America; Lunds Universitet, Fysiska Institutionen, Lund, Sweden; INFN Milano and Universita di Milano, Dipartimento di Fisica, Milano, Italy; Max-Planck-Institut für Physik, Muenchen, Germany; LAL, University of Paris-Sud, Orsay, France; Department of Physics, University of Oslo, Oslo, Norway; University of Pennsylvania, Department of Physics & Astronomy, Philadelphia, United States of America; University of Pittsburgh, Department of Physics and Astronomy, Pittsburgh, United States of America; Instituto de Fisica Corpuscular, Centro Mixto UVEG-CSIC, Valencia, Spain; Departamento de Fisica Atomica, Mol. y Nuclear, University of Valencia and Instituto de Microelectronica de Barcelona, Barcelona, Spain; University of British Columbia, Department of Physics, Vancouver, Canada; Yale University, Department of Physics, New Haven CT, United States of America.

Работы, представленные в данной публикации, были долевым образом поддержаны следующими финансовыми агентствами: Европейским Союзом (DGXII), Международным Научным фондом, Датским исследовательским советом естественных наук, Шведским исследовательским советом, Фондом Кнута и Алисы Валленберг, Министерством науки и высшего образования Польши, Международным Научно-технологическим центром, Американским Фондом гражданских исследований и развития и грантами Департамента энергетики США и Фонда национальной науки США, Канадским Советом по естественным наукам и инженерным исследованиям, Министерством образования и науки Российской Федерации, грантом Президента РФ по поддержке научных школ НШ-4142.2010.2, НШ-3489.2008.2, НШ-4404.2010.2, Международной ассоциацией содействия развитию сотрудничества с учеными из новых независимых государств из состава бывшего Советского Союза, Турецким Агентством по атомной энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ATLAS Collaboration*. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. JINST 3 S08003. Published by Institute of Physics Publishing and SISSA, 2008.
2. *Dolgoshein B.* // Proc. of ECFA Study Week on Instrumentation Technology for High-Luminosity Hadron Colliders. (Barcelona, Sept. 14–21, 1989) CERN 89-10/ECFA 89–124. Geneva, CERN, 1989. V. 2. P. 650; *Akesson T., Fabian C.W., Sauli F. et al.* // in “The feasibility of experiments at high luminosity at the Large Hadron Collider”. CERN-88-02. Geneva, CERN, 1988. P. 31.
3. *Dolgoshein B.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1986. V. A252. P. 137; *Dolgoshein B.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1993. V. A326. P. 434.

4. *Abat E., Addy T.N., Akesson T.P.A. et al.* // JINST. 2008. V. 3. P02013.
5. *Cetin S.A.* CERN-THESIS-2004-20, Istanbul: Bogazi-ci University, 2002.
6. *Cwetanski P.* CERN-THESIS-2006-025 HU-P-D-133. Helsinki, Yliopistopiano, 2006.
7. *Abat E., Addy T.N., Akesson T.P.A. et al.* // JINST. 2008. V. 3. P10003.
8. *Capeans M., Akesson T., Anghinolfi F. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. V. 51. P. 960.
9. *Abat E., Addy T.N., Akesson T.P.A. et al.* // JINST. 2008. V. 3. P02014.
10. *Богуславский И.В., Бычков В.Н., Вирясов К.С. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3. № 3. С. 103.
11. *Гусаков Ю.В., Жуков И.А., Лысан В.М. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3. № 3. С. 111.
12. *Abat E., Addy T.N., Akesson T.P.A. et al.* // JINST. 2008. V. 3. P06007.
13. *Akesson T., Anghinolfi F., Dressnandt N. et al.* // IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec. 2002. V. 1. P. 549.
14. ATLAS Collaboration. *Aad G., Abbott B., Abdallah J. et al.* // Eur. Phys. J. 2010. V. C70. P. 787.