

Эксперимент ATLAS

О.Л. Федин, Е.Г. Данилевич, А.Ю. Залите, С.Н. Коваленко, Л.Г. Кудин, В.П. Малеев,
А.В. Надточий, С.К. Патричев, Ю.Ф. Рябов, Е.В. Седых, Д.М. Селиверстов,
Э.М. Спириденков, А.Е. Христачев, В.А. Щегельский

1. Введение

Основной вклад ПИЯФ в эксперимент ATLAS [1] состоял в разработке и создании детектора переходного излучения Transition Radiation Tracker (TRT), который является частью внутреннего детектора (Inner Detector). Помимо TRT (рис. 1), внутренний детектор состоит из пиксельного вершинного детектора (Pixel Detector) и полупроводникового стрипового детектора SCT (Semi-Conductor Tracker).

Детектор TRT спроектирован для работы в соленоидальном магнитном поле напряженностью 2 Тл при проектной светимости коллайдера LHC (Large Hadron Collider). TRT будет обеспечивать измерение координат треков, используя данные с индивидуальных дрейфовых трубок (straw), и идентификацию электронов, основанную на регистрации фотонов переходного излучения, которые рождаются в пленках радиатора, расположенных между слоями трубок, при прохождении через них заряженных частиц. Геометрия детектора TRT позволяет регистрировать заряженные частицы с поперечным импульсом $p_t > 0,5$ ГэВ/с и с параметром псевдобыстроты $|\eta| < 2,1$. TRT вносит важный вклад в точность измерения импульсов частиц внутренним детектором,

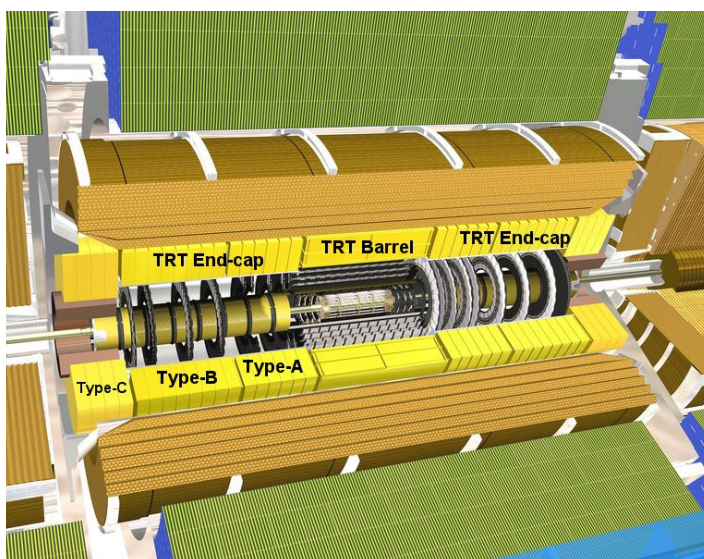


Рис. 1. Детектор переходного излучения TRT в эксперименте ATLAS.

обеспечивая прецизионные измерения координат трека в плоскости $R-\phi$. Точность измерения координаты трека одной дрейфовой трубкой должна быть не хуже 180 мкм. Детектор TRT, совместно с жидкоаргоновым электромагнитным калориметром, будет использоваться для идентификации электронов. Идентификация электронов на LHC является гораздо более сложной задачей, чем на существующих адронных коллайдерах, т.к. фон от КХД струй на LHC больше в сотни раз. Поэтому использование переходного излучения для выделения чистого сигнала от инклюзивных электронов с поперечными импульсами p_t в диапазоне от 20 до 40 ГэВ/с дает дополнительные возможности для подавления фона. Использование переходного излучения также важно при регистрации процессов распада частиц в электрон-позитронные пары для подавления огромного комбинаторного фона от заряженных адронов, а также для идентификации низкоэнергетических электронов в адронных струях от b кварков.

2. Конструкция и основные свойства дрейфовых трубок

Рабочие условия в эксперименте ATLAS [2] накладывают строгие требования на выбор материалов, конструкции, активной газовой смеси и рабочей точки дрейфовых трубок, чтобы гарантировать безопасную и эффективную работу в жестких радиационных условиях. Достаточно большой диаметр дрейфовой трубки способен обеспечить высокую эффективность регистрации

заряженных частиц, но не позволяет собрать все электроны за короткое время между пересечениями пучков 25 нс. Диаметр трубки 4 мм был выбран исходя из оптимизации следующих параметров: скорости отклика, числа ионизационных кластеров, механической и операционной стабильности. Дрейфовые трубки изготавливались из 35 мкм многослойной пленки, произведенной на основе 25 мкм каптоновой пленки. С одной стороны пленки для обеспечения электрической проводимости нанесен алюминиевый слой толщиной 0,2 мкм. Для защиты алюминиевого слоя от повреждения при электрических разрядах на него нанесен графито-полиамидный слой толщиной 5-6 мкм, содержащий примерно 55% углерода. С обратной стороны пленка покрыта 4-5 мкм термосварочным полиуретановым слоем. Трубка изготавливается путем намотки двух пленок шириной 10 мм на металлический стержень при температуре $\sim 260^{\circ}\text{C}$. Каптоновая пленка сама по себе обладает плохими механическими свойствами, поэтому дрейфовые трубки, изготовленные из такой пленки, подвержены деформациям из-за изменений температуры и влажности. Для улучшения механических свойств трубок, они армируются четырьмя углеволоконными нитями, которые приклеиваются к наружным стенкам трубки под углом 90° по отношению друг к другу при помощи специальной машины Straw Reinforcement Machine (SRM), разработанной в CERN. SRM - полуавтоматическое устройство, в котором углеволоконные нити проходят через последовательность роликов, смачиваются эпоксидной смолой и приклеиваются с равномерным натяжением на поверхность дрейфовых трубок. Для армирования дрейфовых трубок в ПИЯФ был организован специализированный участок (рис. 2), на котором было произведено армирование ~ 110000 дрейфовых трубок длиной 1650 мм. Контроль качества произведенных трубок включал проверку расслаивания армирующих нитей из углеволокна и измерения геометрии трубок (кривизна, внутренний и внешний диаметры, отсутствие локальных деформаций или дефектов). При производстве ~ 6000 трубок в месяц выход дрейфовых трубок требуемого качества составил 98%.

В качестве анодной проволоки дрейфовой трубки была выбрана позолоченная проволока из вольфрама диаметром 30 мкм. Для повышения эффективности регистрации фотонов переходного излучения в дрейфовой трубке используется газовая смесь на основе ксенона ($70\% \text{Xe} + 27\% \text{CO}_2 + 3\% \text{O}_2$). Доля ксенона 70% выбрана с целью обеспечить высокую эффективность регистрации фотонов переходного излучения. Добавка к рабочей смеси CO_2 и O_2 обеспечивает стабильность работы трубки и минимизирует время сбора электронов. Детектор TRT будет работать при напряжении 1530 В, которое отвечает для выбранной смеси коэффициенту газового усиления $2,5 \times 10^4$ [3]. Выделение энергии в дрейфовой трубке складывается из ионизационных потерь заряженных частиц (в среднем ~ 2 кэВ) и поглощенной энергии фотонов переходного излучения (>5 кэВ).

При проектной светимости LHC частота срабатывания трубок (загрузка) составляет около 12 МГц [4]. Кроме ионизирующих частиц вклад в загрузку вносят также медленные нейтроны и



Рис. 2. Участок для армирования дрейфовых трубок (Straw Reinforcement Machine).

низкоэнергетические фотоны. Тепловыделение детектора TRT прямо пропорционально нагрузке и будет составлять около 10–20 мВт на трубку при проектной светимости LHC. Температурный градиент вдоль каждой трубки не должен превышать 10°C для того, чтобы сохранить стабильность работы детектора и однородность коэффициента газового усиления. Для охлаждения детектора применяется продувка газом CO₂ вдоль трубок, что также позволит удалять ксенон, который может попадать во внешний объем детектора в случае нарушения герметичности трубок и приводить к ухудшению эффективности регистрации фотонов переходного излучения из-за поглощения их вне рабочего объема детектора.

3. Подготовка дрейфовых трубок

Перед использованием трубок для сборки модулей детектора TRT, они проходили через несколько подготовительных этапов. Армированная трубка имеет длину 1650 мм. На первом этапе трубка разрезается на 4 или 3 коротких трубки (4 длиной ~400 мм для модулей детектора TRT типа А и В, или 3 длиной ~500 мм для модулей детектора TRT типа С). Предварительная нарезка трубок по длине не требовала высокой точности и служила только для удобства дальнейшей работы. Нарезанные трубки проходили через проверку проводимости внутренней поверхности трубки, т.к. от этого зависит распределение высокого напряжения и распространение сигнала вдоль трубки. После этого на один из концов трубки накладывалась токопроводящая паста для обеспечения проводимости между внутренней и внешней поверхностями. Затем, к трубке приклеивались наконечники (end-plugs), служащие для подачи газа в трубку, фиксации анодной проволоки и фиксации трубки в модуле детектора. На последнем этапе наконечник, расположенный на внешнем радиусе модуля детектора TRT, обрезается по длине так, чтобы полная длина трубки с наконечниками с точностью ~100 мкм соответствовала номинальной.

Полностью подготовленные трубки проходили через несколько ступеней контроля качества. Сначала все трубки проверялись на герметичность под избыточным давлением 1 атм. Если давление в дрейфовой трубке падает более чем на 0,1 мбар/бар за минуту, трубка отбраковывалась. После этого трубки проверялись на прямолинейность и, одновременно с этим, измерялась их длина с высокой точностью (~10 мкм). Трубки с кривизной (сагиттой) менее 200 мкм и длиной, отличающейся от номинальной не более чем на 100 мкм, использовались для сборки модулей детектора TRT. На последнем этапе производился визуальный контроль дрейфовых трубок с целью поиска различных дефектов.

Технология подготовки дрейфовых трубок потребовала создания уникальных установок, которые были спроектированы и произведены совместно ПИЯФ и CERN. В ПИЯФ был организован специализированный участок для подготовки трубок (рис. 3), на котором было изготовлено и проверено более 170 000 трубок для модулей детектора TRT типов А и В и более 47 000 трубок для модулей типа С. При производительности 320 трубок в день выход составил 96%.

4. Конструкция торцевой части детектора TRT

Конструкция детектора TRT [5] отвечает общим требованиям, предъявляемым к любому трекеру для коллайдерного эксперимента, таким как жесткость и стабильность конструкции, минимальное



Рис. 3. Участок по подготовке дрейфовых трубок для сборки модулей детектора TRT в ПИЯФ.

количество вещества в детекторе. Детектор TRT состоит из центральной части (barrel) и двух торцевых частей (end-cap). Полная длина детектора 6,8 м, диаметр около 2 м.

Каждая торцевая часть TRT состоит из двух наборов одинаковых независимых модулей типа А и типа В. Каждый модуль содержит 8 слоев радиально ориентированных дрейфовых трубок.

Двенадцать 8-слойных модулей типа А расположены между $827 < Z < 1715$ мм с каждой стороны от точки взаимодействия пучков. Каждый модуль состоит из 6144 трубок, расположенных в 8 последовательных слоях, разделенных расстоянием 8 мм вдоль оси Z. Каждый слой содержит 768 трубок в азимутальной плоскости. Свободное пространство между последовательными слоями трубок, равное 4 мм, заполнено полипропиленовыми пленками радиатора толщиной 15 мкм. Расстояние между трубками в азимутальной плоскости варьируется от 5,2 мм на внутреннем радиусе 640 мм до 8,4 мм на внешнем радиусе 1010 мм. Модули типа А собирались в ПИЯФ.

Восемь 8-слойных модулей типа В с каждой стороны расположены между $1719 < Z < 2725$ мм. Модули типа В идентичны модулям типа А, за исключением увеличенного до 15 мм расстояния между последовательными слоями трубок. Это свободное пространство также заполнено пленками радиатора. Количество пленок примерно в два раза больше по сравнению с модулями типа А. Модули типа В собирались в ОИЯИ в Дубне.

Таким образом, торцевая часть детектора TRT содержит всего 245760 трубок. В среднем трек от заряженной частицы будет пересекать от 32 до 45 трубок в зависимости от η .

5. Конструкция и сборка модулей детектора TRT

Основным сборочным элементом детектора TRT является 8-слойный модуль, который собирался из двух 4-слойных модулей.

Дрейфовые трубки вставлялись и клеивались (рис. 4) без каких-либо механических усилий в прецизионно просверленные отверстия во внутреннем и внешнем углепластиковых кольцах, которые служили поддерживающей структурой для трубок. Трубки, будучи армированы углеволоконными нитями, сами по себе являются частью механической структуры модуля. Прямолинейность трубок должна быть лучше 300 мкм, т.к. стабильность работы трубки сильно зависит от смещения анодной проволоки от оси трубки. Поэтому каждая трубка подвергается визуальному контролю на прямолинейность после установки и после клеивания. В случае необходимости, искривленные трубки заменялись. Собранный механический модуль (углепластиковые кольца с трубками) проходила через процедуру испытания на герметичность.



Рис. 4. Сборка модулей детектора TRT в ПИЯФ. Установка и клейка трубок в поддерживающие углепластиковые кольца.

Для подачи высокого напряжения на катоды трубок и считывания сигналов с анодной проволоки применялись гибкие печатные платы (Wheel Electronic Board – WEB). Гибкая печатная плата содержит два гибких слоя с разводкой на полиамидной пленке. Каждый такой слой содержит отверстия с металлизированными лепестками. Первый гибкий слой используется для обеспечения надежного высоковольтного соединения с катодом трубки. Специальные непроводящие заглушки вставляются через лепестки в дрейфовые трубки. Металлизированные лепестки раздвигаются заглушкой, создавая контакт с внутренней поверхностью трубки. Сигнальные соединения осуществляются таким же образом – с использованием второго гибкого слоя печатной платы и специально разработанных

позолоченных медных втулок, которые вставляются через лепестки гибкой печатной платы во втором слое. Эти втулки используются для фиксации анодной нити на внешнем радиусе трубки (рис. 5). Другой тип медных втулок, покрытых изоляцией с внешней стороны, используется для фиксации нити на внутреннем радиусе трубки. Печатные платы WEB предназначены для передачи сигналов на платы электроники посредством трех разъемов, каждый из которых соответствует 32 каналам.



Рис. 5. Сборка модулей детектора TRT в ПИЯФ. 4-слойный модуль подготовлен к натяжению нитей

Третье углепластиковое кольцо на внешнем радиусе приклеивается к жесткой части плат WEB. На противоположную сторону поддерживающих колец, соединенных с платами, приклеиваются стеклотекстолитовые пластины, обеспечивая создание прочной механической структуры. Такая структура служит в качестве газового объема для 4-слойного модуля на внешнем радиусе. Газовый объем на внутреннем радиусе создается из формованных каптоновых структур, которые приклеиваются к внутреннему кольцу. Газовая смесь подается в модуль через внешний газовый объем одного из двух 4-слойных модулей, собранных в 8-слойный модуль, затем через дрейфовые трубки во внутренний газовый объем и далее через восемь пластиковых соединительных элементов во внутренний объем второго 4-слойного модуля, откуда

проходит через трубки в обратном направлении, попадая во внешний газовый объем другого модуля.

Для сборки модулей в ПИЯФ был создан специальный участок. Помимо собственно механической сборки, процесс сборки включал подготовку деталей для сборки, промежуточные и финальные испытания модулей, по результатам которых для каждого модуля составлялся паспорт.

Каждая деталь, используемая для сборки модулей, полученная от производителя или изготовленная в ПИЯФ, проверялась на пригодность для сборки. Некоторые детали проходили через несколько этапов предварительной сборки, прежде чем использовались для сборки модулей (например, дрейфовые трубки, гибкие печатные платы, формованные структуры из каптона). На всех этапах сборки производился контроль качества.

Так как детектор TRT расположен в установке ATLAS между детектором SCT и жидкоаргоновым калориметром, его геометрические размеры жестко ограничены (с точностью ~ 100 мкм). Критические размеры, такие как внутренний и внешний радиусы и толщина модуля, проверялись во время сборки и сравнивались со спецификацией.

Для проверки на герметичность собранные модули заполнялись аргоном с избыточным давлением 20 мбар. Величина утечки определялась путем измерения падения давления в модуле за достаточно большой период времени 4-8 часов. Модуль считался прошедшим испытания, если после применения температурных и объемных поправок утечка не превышала 1 мбар/бар в минуту.

Натяжение анодных проволок измерялось сразу после их установки в дрейфовые трубки, а также после окончания сборки модуля. Эти измерения повторялись и после доставки модулей в CERN. Контроль натяжения анодных проволок необходим для избежания нестабильностей работы дрейфовой трубки вследствие смещения анодной проволоки под действием силы тяжести, или электростатического смещения. Отклонение натяжения анодной проволоки от номинального значения может происходить из-за её проскальзывания после крепления путем обжимки (crimping) медной втулки. Все дрейфовые трубки с натяжением анодной проволоки менее 55 г, или уменьшением натяжения более чем на 5 г отсоединялись от электроники, предназначенной для съема сигнала. Для определения натяжения проволок использовалось устройство, с помощью которого механически возбуждались колебания анодной проволоки и при помощи емкостного считывания измерялась характерная частота колебания проволоки. Устройство для измерения натяжения анодных

проволок было разработано и произведено в ПИЯФ. В среднем не больше чем одна проволока из 3072 (4-слойный модуль) отсоединялась в связи с тем, что ее натяжение было вне спецификации.

На всех стадиях сборки для поиска и ремонта дефектных элементов проводились высоковольтные испытания модулей. После сборки двух 4-слойных модулей в 8-слойный проводился окончательный долговременный высоковольтный тест при напряжении 1480 В с использованием двухкомпонентной газовой смеси, содержащей 70% Ar + 30% CO₂. Продолжительность такого теста составляла несколько недель. Темновой ток при таких испытаниях не должен превышать 150 нА для группы из ~200 дрейфовых трубок.

Все испытания модулей повторялись после их доставки в CERN до того, как они поступали на стадию окончательной сборки отдельных модулей в торцевую часть детектора, на которую устанавливалась электроника считывания сигналов.

6. Испытания модулей и критерии приемки

Строгие требования к качеству собранных модулей [6] следовали из необходимости обеспечения стабильной и надежной работы детектора TRT в течение многих лет функционирования коллайдера LHC. Необходимо было создать детектор, у которого количество неработающих каналов не превышает 1%, хотя, с точки зрения



Рис. 6. Вид 8-слойного модуля, подготовленного для теста на стенде WTS (Wheel Test Station) с радиоактивными источниками ⁵⁵Fe.

эффективности восстановления треков заряженных частиц, допускалось до 3% неработающих каналов. Для выполнения этой задачи все модули проходили через различные испытания и процедуры контроля качества. Тщательная проверка и анализ собираемых модулей позволяли устранять проблемы непосредственно в процессе производства.

Все характеристики собираемых модулей записывались в базу данных. В таких крупномасштабных проектах, как TRT, база данных необходима не только для простого учета сборочных компонент на складе, но и для документирования сложных результатов испытаний, для отслеживания причин неполадок детектора из-за особенностей процесса сборки. Даже через годы

работы детектора информация о партии использованных при сборке компонентов, а также об условиях окружающей среды во время испытаний может быть получена из базы данных.

Проверка прямолинейности дрейфовых трубок или измерение смещения анодной проволоки по отношению к номинальному положению внутри дрейфовой трубки является наиболее важным из всех критериев приемки. При смещении анодной проволоки более чем на 400 мкм локальное увеличение электрического поля значительно изменяет коэффициент газового усиления. При этом значительно возрастает частота высоковольтных пробоев и растет количество высокоамплитудных сигналов, что делает работу дрейфовой трубки крайне нестабильной. Поэтому такие трубки должны отключаться от системы подачи высокого напряжения. Смещение анодной проволоки в дрейфовой трубке может происходить по нескольким причинам, например, из-за неправильного механического позиционирования анодной проволоки, изгиба или нецилиндричности дрейфовой трубки и т.д.

Измерение смещения анодной проволоки основано на измерении коэффициента газового усиления вдоль длины трубки. Измерения выполнялись для 8-слойного модуля, размещенного вертикально на специализированной установке Wheel Test Station (WTS), оборудованной набором радиоактивных источников ⁵⁵Fe (рис. 6).

Испытательный стенд WTS состоит из высокоточной механики для перемещения радиоактивных источников, электроники считывания информации с дрейфовых трубок, компьютерного управления, специализированного программного обеспечения и базы данных, в которой хранятся все измеренные спектры, вычисленные параметры спектров, а также информация о внешних условиях измерений (температура, влажность, параметры электроники и т.д.). ПИЯФ внес основной вклад в проектирование и создание этой установки.

Источники ^{55}Fe установлены на шести рычагах разной длины. При автоматическом вращении рычагов каждый источник последовательно облучает все дрейфовые трубки. Таким образом измеряется амплитуда сигналов вдоль каждой отдельной трубки для шести положений источников. Трубки заполнены газовой смесью 70% Ar + 30% CO₂. Для идеально прямой дрейфовой трубки с анодной проволокой, расположенной в её центре, амплитуды сигналов должны быть одинаковы для всех шести положений радиоактивных источников вдоль трубки. Используя калибровочные кривые изменения коэффициента газового усиления и изменения ширины фотопика в зависимости от изгиба дрейфовой трубки, можно получить информацию о смещении анодной проволоки. Калибровочные кривые были определены в экспериментах с контролируруемыми деформациями дрейфовых трубок. Изменение коэффициента газового усиления определяется как разница между максимальным и минимальным значениями амплитуды фотопика, отнесенная к максимальному значению. Дополнительная информация о форме фотопика дает возможность определить характер деформации трубки (изгиб, сжатие и т.д.). С учетом возможных неопределенностей было принято решение отключать трубки с изменением коэффициента газового усиления более 9%. Результаты испытаний сохранялись в базе данных и обобщались в так наз. электронных паспортах модулей.

Все модули детектора TRT были собраны в заданные коллаборацией ATLAS сроки и с высоким качеством. Менее 0,1% каналов не работали после окончания сборки. После доставки в ЦЕРН модули детектора снова прошли испытания, и результаты испытаний оказались в полном соответствии с измерениями, сделанными ранее в ПИЯФ.

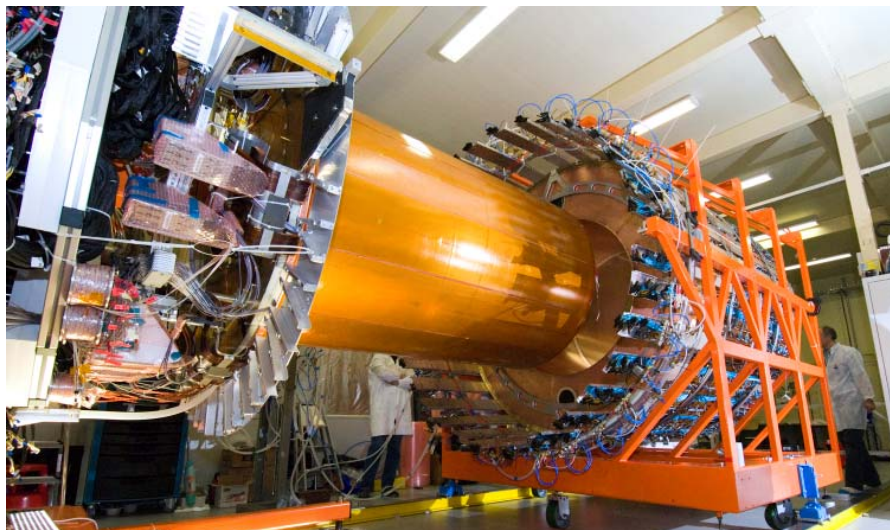


Рис. 7. Вид торцевой части детектора TRT во время интеграции с торцевой частью детектора SCT в ЦЕРН.

7. Ввод детектора TRT в эксплуатацию

В 2004–2006 гг. была произведена сборка всех торцевых модулей детектора TRT в единое целое – торцевые части детектора TRT (рис. 7). Перед окончательной установкой в шахту эксперимента ATLAS в начале 2007, детектор TRT был принят в качестве действующей системы, как отдельно, так и совместно с кремниевым стриповым детектором (SCT). Были проведены окончательные испытания электроники детектора, высоковольтной системы, системы охлаждения детектора, и проверена герметичность системы снабжения газовой смесью. Проводились сеансы набора данных от космического излучения, как в самостоятельном режиме, так и совместно с детектором SCT. Основной целью набора данных от космического излучения была проверка совместной работы детекторов SCT и TRT, чтобы выяснить их взаимное влияние друг на друга. Для представления и анализа данных с детектора TRT в ПИЯФ была разработана программа TRT Viewer. Данная

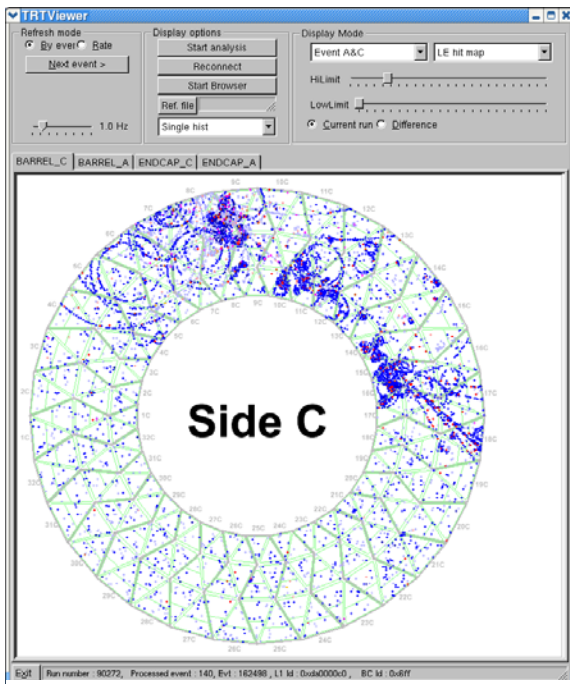


Рис. 8. Графический интерфейс программы TRT Viewer разработанной в ПИЯФ для отображения информации с детектора TRT.

программа позволяет отображать события, зарегистрированные детектором TRT, т.е. дрейфовые трубки, в которых были зарегистрированы сигналы при прохождении заряженных частиц, а также основные характеристики детектора. На рис. 8 показан графический интерфейс программы, на котором показано одно из событий, зарегистрированных детектором TRT во время набора космических данных. Хорошо видны треки от заряженных частиц, закручивающиеся в магнитном поле соленоида.

Физики ПИЯФ внесли ключевой вклад в создание программного обеспечения для моделирования работы детектора TRT с использованием пакета программ GEANT4, а также в создание и развитие алгоритмов для идентификации электронов с использованием информации с TRT детектора в рамках программного обеспечения эксперимента ATLAS.

Литература

1. T. Akesson, O. Fedin, A. Khristachev, L. Kudin, S. Kovalenko, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, Yu. Ryabov, V. Schegelsky, D. Seliverstov, E. Spiridenkov, A. Zalite *et al.*, "The transition radiation tracker of the ATLAS experiment". IEEE Transactions, Nuclear Science **51**, 994 (2004).
2. M. Cappeans, O. Fedin, A. Khristachev, L. Kudin, S. Kovalenko, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, Yu. Ryabov, V. Schegelsky, D. Seliverstov, E. Spiridenkov, A. Zalite *et al.*, "Recent aging studies for the ATLAS transition radiation tracker". IEEE Transactions, Nuclear Science **51**, 960 (2004).
3. T. Akesson, O. Fedin, A. Khristachev, L. Kudin, S. Kovalenko, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, Yu. Ryabov, V. Schegelsky, D. Seliverstov, E. Spiridenkov, A. Zalite *et al.*, "ATLAS Transition Radiation Tracker test-beam results". Nucl. Instr. Meth. A **522**, 50 (2004).
4. T. Akesson, O. Fedin, A. Khristachev, L. Kudin, S. Kovalenko, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, Yu. Ryabov, V. Schegelsky, D. Seliverstov, E. Spiridenkov, A. Zalite *et al.*, "Operation of the ATLAS Transition Radiation Tracker under very high irradiation at the CERN LHC". Nucl. Instr. Meth. A **522**, 25 (2004).
5. T. Akesson, O. Fedin, A. Khristachev, L. Kudin, S. Kovalenko, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, Yu. Ryabov, V. Schegelsky, D. Seliverstov, E. Spiridenkov, A. Zalite *et al.*, "Status of design and construction of the Transition Radiation Tracker (TRT) for the ATLAS experiment at LHC". Nucl. Instr. Meth. A **522**, 131 (2004).
6. P. Cwetanski, O. Fedin, A. Khristachev, L. Kudin, S. Kovalenko, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, Yu. Ryabov, V. Schegelsky, D. Seliverstov, E. Spiridenkov, A. Zalite *et al.*, "Acceptance Tests and Criteria of the ATLAS Transition Radiation Tracker". IEEE Transactions, Nuclear Science **52**, 2911 (2005).