

Учреждение Российской академии наук
Физический институт им. П.Н. Лебедева

На правах рукописи

Машинистов Руслан Юрьевич

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И
ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИИ ТРЕКОВОГО ДЕТЕКТОРА
ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ATLAS (ЦЕРН)**

01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Москва 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
Шмелева Алевтина Павловна
(ФИАН, г. Москва)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Поносов Александр Климентьевич
(НИЯУ МИФИ, г. Москва)

кандидат физико-математических наук,
Нечитайло Владимир Александрович
(ФИАН, г. Москва)

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт ядерной
физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ, г. Москва

Защита состоится « » 2011 г. в часов на заседании
диссертационного совета №Д002.023.02 при Физическом институте им. П.Н.
Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский пр. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института
им. П.Н. Лебедева РАН.

Автореферат разослан « » 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Я.Н. Истомин

Общая характеристика работы.

При проведении современных экспериментов в области физики элементарных частиц ученым приходится сталкиваться с беспрецедентным объемом данных, подлежащих упорядоченному хранению, обработке, графической визуализации и анализу. Современные экспериментальные установки являются сложными детекторами и программными комплексами, призванными решать фундаментальные задачи.

В ноябре 2009 года в Европейском Центре Ядерных Исследований (ЦЕРН) состоялся запуск крупнейшего в мире ускорителя заряженных частиц – Большого Адронного Коллайдера (LHC). На ускорителе установлены четыре крупных эксперимента. Самым крупным экспериментом является ATLAS. Объем физических данных, производимый детектором ATLAS в 2010 г. ежедневно, был равен около 1 Терабайт, и более 3 тысяч физиков со всего мира имели к ним доступ для обработки и анализа. Проект LHC является уникальным. Весь комплекс построен с применением современных уникальных технологий и позволяет достигать недоступных ранее показателей. С марта 2010 г. на ускорителе проводились столкновения протонов с полной энергией 7 ТэВ, при этом было достигнуто пиковое значение светимости $2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. С ноября по декабрь коллайдер работал с пучками ядер свинца. Ядра разгонялись до энергии 1,38 ТэВ в расчете на каждый нуклон и светимость столкновений достигала $3 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В 2014 г. на ускорителе планируется достигнуть энергии столкновений протонных пучков 14 ТэВ и светимости $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Среди важнейших задач, которые предполагается решать в эксперименте при изучении протон-протонных взаимодействий:

- Обнаружение и измерение параметров Хиггс бозона – калибровочной частицы, которая является ключевой в рамках Стандартной Модели в механизме образования масс элементарных частиц.
- Поиск суперсимметричных партнеров известных элементарных частиц.
- Обнаружение процессов, указывающих на возможное существование скрытых размерностей пространства-времени.
- Поиск различных “экзотических” частиц и состояний: мини-черных дыр, частиц с необычными квантовыми числами и т.п.

Данная работа направлена на исследование, анализ и разработку программного обеспечения контроля и управления одного из основных детекторов установки ATLAS - Трекового Детектора Переходного Излучения (TRT), который используется для измерения координат треков, а кроме этого – для идентификации электронов. Созданная система обеспечивает безопасную последовательную работу детектора, а также предоставляет инструменты оценки качества регистрируемых экспериментальных данных.

Актуальность темы.

Для получения физических результатов эксперимента ATLAS обеспечиваются управление и контроль рабочих систем детектора, а также операции сбора, упорядоченного хранения и обработки экспериментальных данных. Работа в этих областях ведутся в каждом из поддетекторов эксперимента.

Во время набора экспериментальных данных необходимо в автоматизированном режиме контролировать состояние рабочих систем детектора. Также необходимо в режиме экспресс-оффлайн контролировать и мониторировать конфигурации системы сбора данных, включая хранение, управление и визуализацию параметров настройки (пороги напряжения, временные задержки и т.д.) компонентов считывающей электроники и триггера. Состояние систем детектора и конфигурация системы сбора данных непосредственно влияют на качество регистрируемых данных, которое также необходимо мониторировать.

Для обеспечения бесперебойной работы детектора TRT, а также гарантии качества регистрируемых им данных необходимо осуществлять контроль рабочих систем детектора и мониторировать около 400000 каналов информации и более 22600 компонентов считывающей электроники. Работа с таким объемом данных требует внедрения автоматических программных средств.

В работе впервые была реализована программная система для мониторинга и контроля конфигураций рабочих систем и контроля качества регистрируемых данных детектора TRT в эксперименте ATLAS. Были

выполнены внедрение и надежная поддержка разработанного программного обеспечения. В системе были учтены следующие положения:

- В условиях длительного этапа подготовки эксперимента и эксплуатации, система предполагает возможные модификации для удовлетворения изменяющимся требованиям в процессе разработки и эксплуатации;
- Система обладает достаточной модульностью для успешной интеграции с существующими компонентами;

Объектом исследования диссертационной работы являются рабочие системы и параметры их конфигураций, программное обеспечение для хранения, обработки и графической визуализации данных детектора TRT в эксперименте ATLAS.

Целью диссертационной работы является проектирование и создание программной системы для мониторинга и контроля конфигураций рабочих систем и контроля качества регистрируемых данных детектора TRT в эксперименте ATLAS.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе **решаются следующие задачи:**

- разработка алгоритмов для хранения, обработки и графической визуализации данных конфигураций рабочих систем и данных событий;
- разработка архитектуры базы данных для хранения данных конфигураций рабочих систем;
- разработка программного обеспечения для контроля состояния, управления параметрами рабочих систем, а также визуализации и хранения данных детектора TRT в эксперименте ATLAS на ускорителе LHC (ЦЕРН).

Основными методами исследований, используемыми в работе, являются методы структурного и функционального анализа, и теории алгоритмов.

Научная новизна работы заключается в разработке уникальных методов и алгоритмов хранения большого объема (~ 1 ТБ) конфигурационных данных детектора TRT, обеспечивающих безопасный и рациональный механизм ввода

новых значений конфигурационных параметров и быстрый поиск условий, при которых были получены данные событий. Разработка методов и алгоритмов графического представления данных детектора TRT для мониторинга состояния рабочих систем и контроля качества регистрируемых данных. Установка ATLAS является крупнейшей в составе экспериментов на ускорителе LHC. Уникальность эксперимента, беспрецедентный объем экспериментальных данных и большое число каналов информации детектора TRT формируют необходимость в разработке новых методов и алгоритмов сбора, обработки и визуализации данных.

Практическая значимость результатов определяется следующим: разработанные методы и алгоритмы были использованы при разработке системы хранения и контроля параметров детектора TRT. Детектор TRT дает большой вклад в измерения координат треков, а кроме этого используется для идентификации электронов. Созданные средства обеспечивают процессы контроля детектора и работу системы сбора данных, делающие возможным получение физических результатов эксперимента.

Внедрение результатов исследований. Была разработана архитектура базы данных для хранения информации системы триггера и сбора данных TDAQ (Trigger/Data Acquisition System) детектора TRT в эксперименте ATLAS. Также была создана разделяемая библиотека C++ для работы с данными систем TDAQ и контроля детектора DCS (Detector Control System).

Были разработаны программные модули для визуализации экспериментальных данных детектора TRT, записанных в файлы, записанных в базы данных детектора и опубликованных при помощи информационной службы.

Публикации и апробации работы.

Основные результаты работы опубликованы докладывались на международном научном семинаре «Первые результаты работы Большого адронного коллайдера и их физическая интерпретация» (INEPLHC-2010, ИФВЭ, Протвино, 2010 г.), международных совещаниях коллаборации ATLAS в

ЦЕРНе, на научных семинарах в ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» и Физическом институте имени П.Н.Лебедева Российской академии наук (ФИАН) (2011 г.), а также на научных конференциях Московского Инженерно-Физического Института (2005-2008 гг.). Результаты опубликованы в виде статей в журналах «Инженерная физика», «Открытое образование», «Датчики и системы», «Journal of High Energy Physics», «European Physical Journal C», «Journal of Instrumentation», а также в изданиях МИФИ и ЦЕРН.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Методы и алгоритмы хранения большого объема (~ 1 ТБ) конфигурационных данных эксперимента, обеспечивающих безопасный и рациональный механизм ввода новых значений конфигурационных параметров и быстрый поиск условий при которых были получены данные событий.
- Методы и алгоритмы графического представления данных эксперимента ATLAS для мониторинга состояния рабочих систем и контроля качества регистрируемых данных.
- Программная библиотека CoolCoralClient обеспечивающая функции хранения и управления конфигурациями рабочих систем детектора TRT. Приложение TRTViewer для мониторинга рабочих систем детектора TRT.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 158 страницах машинописного текста, включая 56 рисунков и 7 таблиц.

Во введении сформулированы цель работы, подчеркнуты ее новизна, практическая ценность, важность и актуальность.

В главе I приведено описание эксперимента ATLAS. Дан обзор физических задач эксперимента, приведено описание архитектуры и устройство экспериментальной установки. Подробно рассматривается устройство Трекового Детектора Переходного Излучения (TRT) в составе Внутреннего Детектора.

Детектор TRT наряду с другими поддетекторами эксперимента обеспечивает распознавание треков частиц, а также идентификацию частиц, главным образом за счет детектирования переходного излучения.

ATLAS является самым крупным экспериментом на LHC, а также имеет самую широкую программу научных исследований на LHC. Среди важнейших задач, которые решаются в эксперименте при изучении протон-протонных взаимодействий:

- Обнаружение и измерение параметров Хиггс бозона – калибровочной частицы, которая является ключевой в механизме образования масс элементарных частиц.
- Поиск суперсимметричных партнеров известных элементарных частиц.
- Обнаружение процессов, указывающих на возможное существование скрытых размерностей пространства-времени.
- Поиск различных “экзотических” частиц и состояний: мини-черных дыр, частиц с необычными квантовыми числами и т.п.

Кроме этого, в эксперименте изучается и “традиционная” физика – сечения образования и множественности, рождение W и Z бозонов, физика В-мезонов и топ-кварка и др. – но в новом масштабе энергий и светимости, которые дает ускоритель LHC.

Кроме протон-протонной физики, ATLAS принимает участие и в ионной программе LHC, в которой изучаются взаимодействия ядер, которые будут ускоряться до 5,5 ТэВ/нуклон. В программе ведется исследование свойств кварк-глюонной материи при сверхвысоких температурах и давлениях, значения которых являются рекордными для существующих ускорителей.

Экспериментальная установка ATLAS имеет луковичную структуру. Ближе к центру расположены полупроводниковые пиксельные и стриповые (SCT) детекторы, функцией которых является прецизионное измерение координат и импульсов заряженных частиц вблизи точки первичного взаимодействия. Их окружает детектор TRT, который также используется для измерения координат треков, а кроме этого – для идентификации электронов. Эти детекторы образуют так называемый Внутренний Детектор, который помещен внутри сверхпроводящего магнита с соленоидальным полем 2 Т.

Внутренний Детектор окружен электромагнитным калориметром на основе жидкого аргона для измерения координат и энергии электронов и гамма-квантов. Следующим слоем служит адронный калориметр для измерения энергии одиночных адронов и адронных струй. Вся система калориметрии обеспечивает также измерение недостающей поперечной энергии в случае ее дисбаланса. Наконец, снаружи установка ATLAS окружена мюонными детекторами различной конструкции и размеров. Мюонные камеры находятся в магнитном поле, создаваемом восемью тороидальными контурами и торцевыми магнитами. Устройство экспериментальной установки ATLAS представлено на рисунке 1.1.

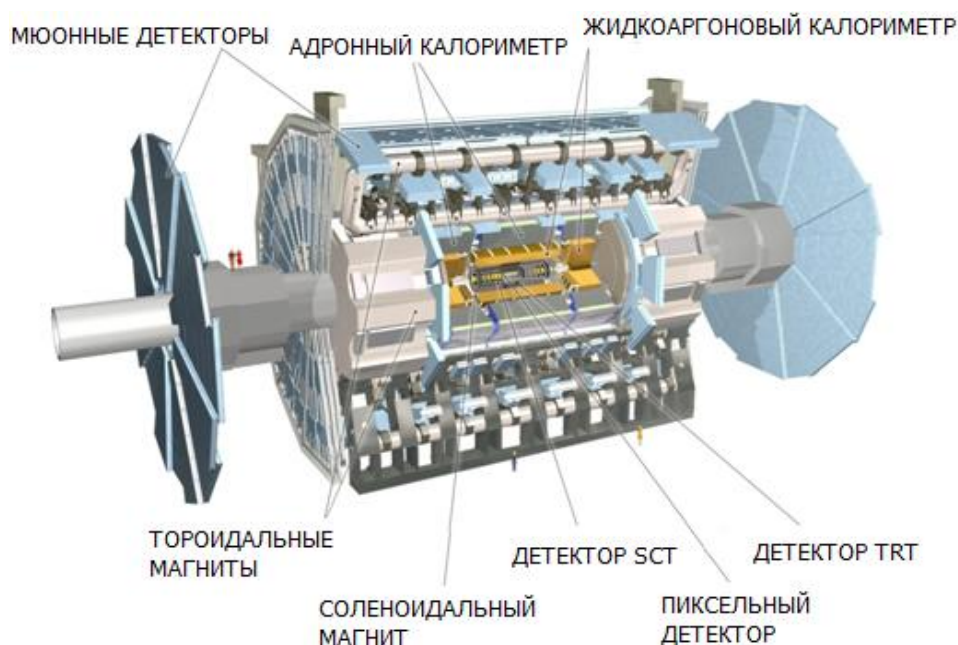


Рис.1.1. Устройство экспериментальной установки ATLAS

Точность измерения импульсов в установке ATLAS составляет для мюонов в центральной области быстрот от 2.5% при поперечном импульсе мюона 100 ГэВ до 11% для частиц с поперечным импульсом 1000 ГэВ. Точность восстановления угла составляет для разных направлений вылета от 0,08 до 1 мрадиан. Прицельный параметр (поперечное расстояние от ближайшей точки трека до оси пучков) может быть измерен с точностью от 11 до 40 мкм.

Большой вклад в точность определения импульса заряженных частиц дает детектор TRT. Пролетающая через дрейфовую трубку (ДТ) детектора TRT заряженная частица, ионизирует газ, создавая вдоль своего трека сгустки

электронов и ионов. Электроны дрейфуют к анодной нити под действием электрического напряжения 1.5 кВ, создавая вторичную ионизацию. Каждый канал TRT позволяет измерять время дрейфа следа заряженной частицы к аноду, обеспечивая координатную точность 150 мкм на ДТ. Детектор TRT позволяет идентифицировать электроны на фоне адронов. Детектор состоит из набора модулей содержащих радиатор рентгеновского переходного излучения и пропорциональную дрейфовую камеру. В детекторе TRT измеряется суммарное энерговыделение от ионизационных потерь заряженной частицы, проходящей через слой медиатора, и от фотоэлектронов, образованных квантами переходного излучения в газовой смеси. Считывающая электроника обеспечивает два независимых настраиваемых порога по амплитуде сигнала с ДТ, что позволяет отделять сигнал с переходным излучением. На рисунке 1.2. представлено изображение сигнала с ДТ.

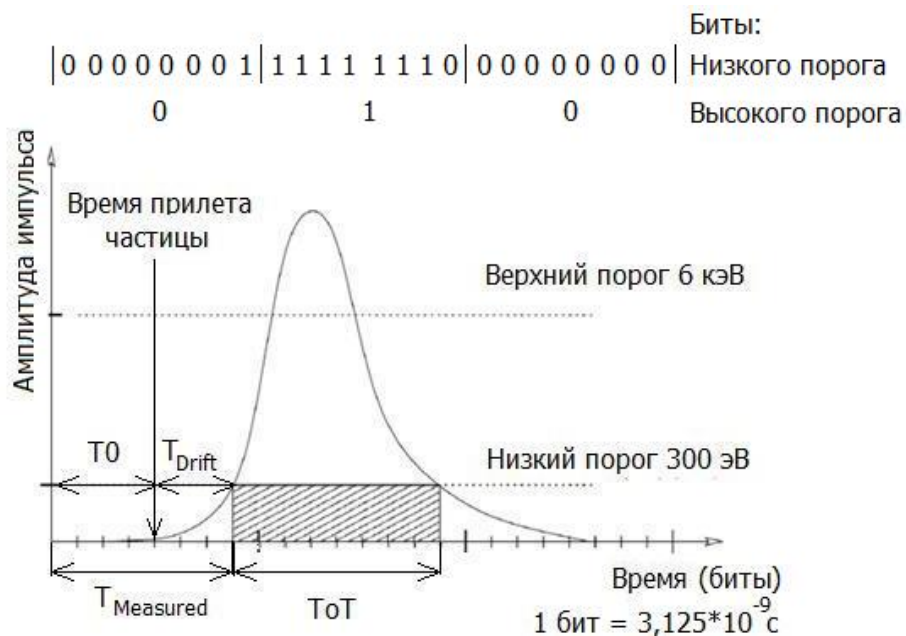


Рис.1.2. Изображение сигнала, полученного с ДТ, где T_0 – время прилета частицы, T_{Drift} – время дрейфа электронов к анодной нити, $T_{Measured}$ - измеренное время, ToT – время, когда сигнал превышает нижний порог

Значения порогов подобрано таким образом, что если сигнал превышает верхний порог, то это свидетельствует о переходном излучении. Нижний порог позволяет отделять сигнал вызванный прохождением частицы от шумов. Время импульса измеряется в битах низкого и высокого порогов. Биты высокого порога равны 25 нс и поделены на 8 бит низкого порога, равных 3,125 нс. Информация о сигнале кодируется следующим образом. Биты низкого порога

принимают значение 1, если амплитуда сигнала превышает низкий порог. Биты высокого порога принимают значения 1, в случае, если сигнал превышает высокий порог. В остальных случаях биты принимают значения 0. Различные эффекты и условия, такие как синхронизация временных параметров детектора TRT и ускорителя LHC, влияют на время прохождения сигнала по каналам и время пролета частицы через ДТ. Данные временные параметры калибруются с периодом 36 часов.

Детектор TRT конструктивно состоит из трех частей: центральной цилиндрической (баррельной) и двух торцевых. Баррельная часть TRT содержит 52544 ДТ длиной около 150 см. Две торцевые части TRT содержат по 122880 радиально ориентированных ДТ. На рисунке 1.3. представлена R-T зависимость детектора TRT для баррельной (а) и торцевых частей (б). Эта зависимость определяет соотношение расстояния трека частицы до анодной нити и времени дрейфа электронов. Первым шагом для этого из измеренного времени T_{Measured} вычитается калибровочная константа T_0 . При этом учитываются различные временные задержки в различных участках детектора. Во второй шаг распределение дистанции от трека до нити фитируется по бинам измеренного времени дрейфа T_{Drift} . Пиковые значения распределения на рисунке отмечены точками. Проведенная через эти точки кривая описывается полиномом третьей степени. R-T зависимость калибруется каждые 24 часа. В результате работы с космическими лучами, при столкновениях протонов с энергиями 900 ГэВ и 7 ТэВ, а также в ионных столкновениях была продемонстрирована высокая стабильность R-T зависимости.

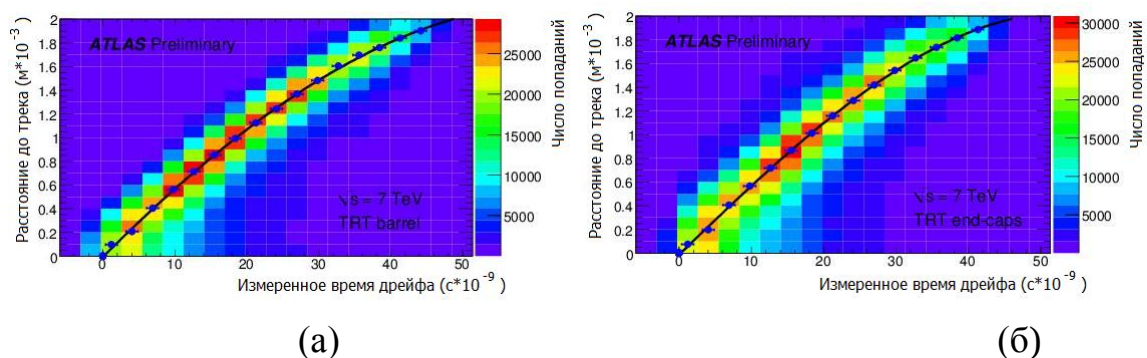


Рис.1.3. R-T зависимость детектора TRT для баррельной (а) и торцевых (б) частей

Режекционная способность (разделение пионов и электронов при 90%-ой эффективности регистрации электронов) в детекторе TRT составляет величину порядка 100 в зависимости от значения импульса и направления вылета частиц.

Эффективность полной реконструкции различных типов частиц в значительной степени зависит от качества отбираемых треков и составляет ~98% для мюонов, 90-95% для пионов и 76-96% для электронов в зависимости от импульса частицы.

Электромагнитный калориметр установки ATLAS имеет очень высокую гранулярность ($\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,025 \times 0,025$ в центральной области быстрот). Главный член, описывающий энергетическое разрешение электромагнитного калориметра, имеет значение порядка $10\%/\sqrt{E}$, постоянный член составляет от 0,2% до 0,5%. Таким образом, при энергии $E > 100$ энергия электронов и гамма-квантов измеряется с точностью, лучшей, чем 1%.

Адронный калориметр имеет гранулярность $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,1 \times 0,1$ в центральной области быстрот и $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,2 \times 0,2$ – в области $|\eta| > 2,5$. Главный член, описывающий энергетическое разрешение калориметра в его центральной части, имеет значение порядка $50\%/\sqrt{E}$.

В главе II приводится описание архитектуры детектора TRT с точки зрения коммутации ДТ и компонентов считывающей электроники: считывающих чипов, контроллеров триггера и считывающих драйверов, привязывая их к соответствующим печатным платам. Также приводится расположение некоторых датчиков системы контроля детектора DCS (Detector Control System) и приводится описание ее баз данных. Подробно описана система сбора данных DAQ (Data Acquisition System).

Баррельная часть TRT содержит 52544 ДТ длиной около 150 см, ориентированных вдоль оси пучков и располагающихся на расстоянии от 56 до 107 см вокруг оси пучков. Анодная нить этих камер в середине разделена изолятором, и сигнал снимается с двух сторон ДТ. ДТ в центральной части организованы по 32 модуля в каждом из 3-х слоев. Пропорциональные камеры объединены в структурные группы по 329, 520 и 793 камеры, соответственно для модулей внутреннего среднего и внешнего слоя. Две торцевые части TRT

содержат по 122880 радиально ориентированных ДТ со считыванием сигнала по наружному радиусу. Торцевые ДТ имеют длину около 40 см и расположены в виде колес, перпендикулярных оси пучка. Каждому считывающему чипу соответствует 16 ДТ, расположенных рядом. Чипы физически смонтированы на печатных платах в порядке, зависящем от места размещения платы в детекторе.

На торцевых частях считывающие чипы смонтированы на прямоугольных платах в 3 группах по 4 чипа. 3 группы чипов на одной плате называются триплетом. Триплет имеет общее соединение для сигналов контроллера триггера ТТС и считывающего драйвера ROD, а также для низкого напряжения. Каждый триплет представляет собой 32-ю часть торцевого кольца. Существует 2 типа торцевых колец. Один стек (32-я часть) торцевой части состоит из 12 триплетов колец типа А и 8 колец типа В, всего 240 считывающих чипов.

Каждый модуль баррельной части состоит из двух неравных по размеру физических печатных плат треугольной формы. Каждая треугольная печатная плата в зависимости от своего типа может быть связана с одной или двумя линиями контроллера триггера ТТС. На рисунке 2.1 представлен внешний вид баррельной части детектора TRT.

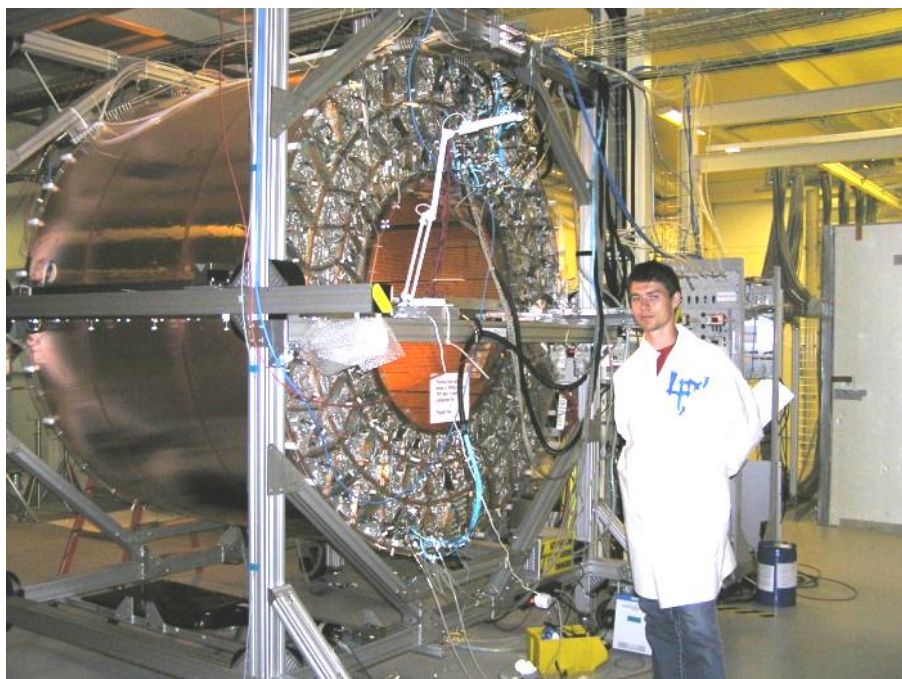


Рис.2.1. Внешний вид баррельной части Трекового Детектора Переходного Излучения TRT

Основной системой, работающей с потоком экспериментальных данных детектора, является система сбора данных DAQ. Система сбора данных позволяет контролировать и управлять конфигурациями считывающей электроники. Система DAQ также управляет запусками детектора, направляя при этом поток экспериментальных данных в итоговое файловое хранилище. Система DAQ осуществляет запись экспериментальных данных по сигналам, выработанным системой триггера Trigger. Система триггера выполняет анализ событий в режиме он-лайн и в случае обнаружения «интересного» события вырабатывает сигнал записи данных. Система сбора данных в том числе управляет и конфигурациями триггера. Совместно эти системы иногда обозначают как систему Trigger/DAQ или TDAQ. Система триггера и сбора данных TDAQ эксперимента ATLAS состоят из трех уровней. Каждый уровень триггера улучшает решения, сделанные на предыдущем уровне, и если необходимо выполняет дополнительные критерии выбора. Начиная с потока данных с частотой 40 МГц, частота выбранных событий может быть уменьшена до 100 Гц для передачи на постоянное хранение.

Система DCS управляет параметрами систем высокого и низкого напряжения, газовой системы, системы охлаждения и т.д., а также обеспечивает последовательную и безопасную работу детектора и выдает большое число данных о статусе системы и параметров аппаратного обеспечения с частотой до 1 Гц. Характеристики рабочих систем влияют на физический анализ и необходимы для понимания поведения детектора.

В главе III приводится описание информационной системы эксперимента ATLAS. При подготовке и проведении современных физических экспериментов, возникает необходимость хранить и обрабатывать большие объемы экспериментальных данных. Данные эксперимента различны по значению и целям использования. В главе приведено описание процесса разработки программного обеспечения для контроля состояния, управления параметрами рабочих систем, а также визуализации и хранения данных детектора TRT.

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 и предоставит ученым всю необходимую информацию. Всего можно выделить три основных типа данных эксперимента: данные событий, данные конфигураций и данные условий. Данные событий содержат информацию о треках частиц. Данные конфигураций включают информацию о настройках рабочих систем эксперимента. Данные условий привязаны к данным событий и включают данные конфигураций, при которых они были получены, а также дополнительные данные мониторинга, которые понадобятся при реконструкции.

В рамках данной работы был выполнен анализ систем эксперимента. Впервые были определены основные системы, включаемые в эксперимент, были определены их функции, взаимосвязь и были даны рекомендации к разработке. На рисунке 3.1 представлена обобщенная схема основных систем эксперимента.

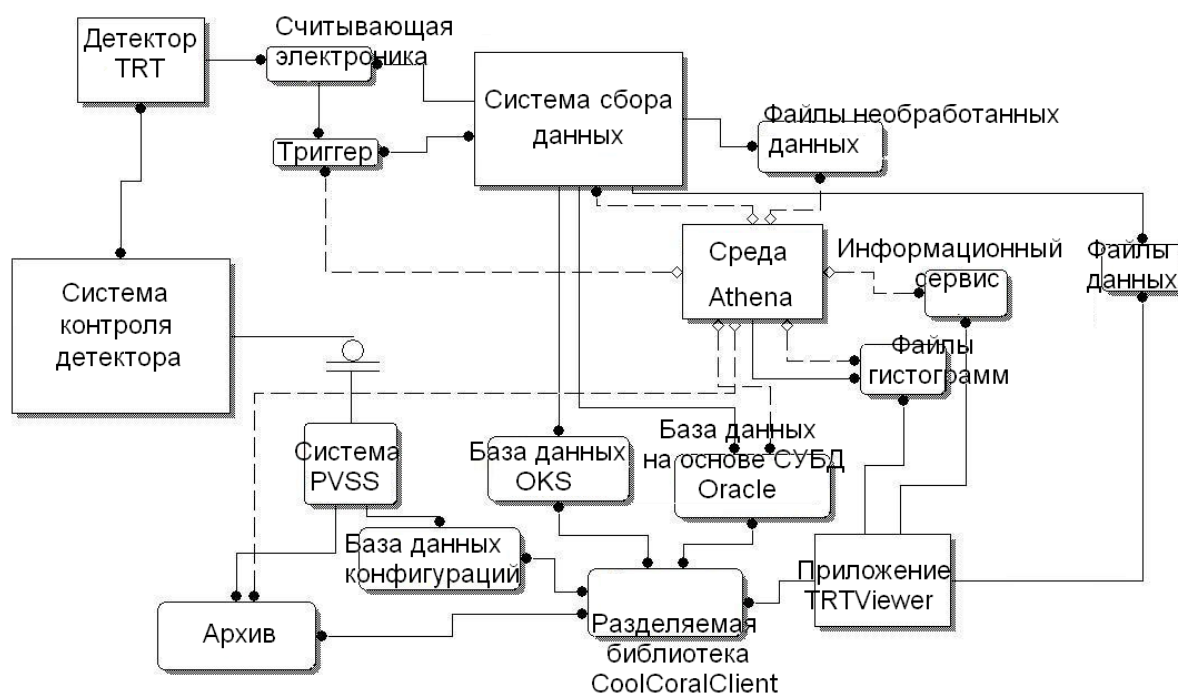


Рис.3.1. Обобщенная схема программного обеспечения детектора TRT в нотации idf1x

В данной главе были сформулированы функции и возможности, которые должны быть обеспечены системами эксперимента. На основе представленных функций и возможностей, была разработана функциональная модель, что позволило выделить основные процессы и этапы обработки данных. Для

иллюстрации модели была использована нотация idf0 с точки зрения обработки экспериментальных данных. Разработка программного обеспечения эксперимента ведется согласно руководящим положениям и требованиям международных стандартов серии ИСО 9000.

Для реализации универсальной системы доступа к данным конфигураций системы DAQ детектора TRT, была разработана разделяемая библиотека C++ CoolCoralClient. В библиотеку CoolCoralClient также были включены программные методы создания и управления базой данных DAQ.

База данных DAQ позволяет хранить конфигурации считывающей электроники за все время эксплуатации детектора TRT, а также эффективное управление конфигурациями: получение конфигурации за выбранный период времени, создание новых конфигураций, сравнение конфигураций и т.д. Конфигурация детектора состоит из параметров элементов 22016 считывающих чипов, 192 считывающих драйверов, 376 групп контроллеров триггера и 94 контроллеров триггера. Всего конфигурация детектора за один временной промежуток содержит более 470000 значений параметров. При этом разработанные программные методы позволяют получить полную конфигурацию DAQ за интересующий временной промежуток за время ~ 5 с. Данные мониторинга и контроля обновляются с частотой несколько герц со скоростью передачи данных порядка нескольких МБ на один сеанс набора данных событий. На настоящий момент база данных системы сбора данных DAQ детектора TRT физически занимает ~ 2,5 ГБ.

Ранее использованная база данных выполняла файловое хранение данных, что многократно увеличивало физический объем хранилища, а также затрудняло выполнение операций запросов, требующих длительного исполнения. Разработанная база данных на основе Oracle гарантированно позволяет справляться с текущим и ожидаемым потоком данных. Реляционная структура данных в Oracle имеет меньший объем физического хранилища за счет сокращения дублирующих данных. Также время обращения к БД на основе Oracle сокращается за счет того, что механизм запроса данных реализован на стороне сервера.

Разработанная система позволяет хранить и получать доступ к параметрам системы DAQ, а также получать доступ к параметрам электроники,

находящимся под управлением системы DCS детектора TRT. Был реализован безопасный и рациональный механизм ввода новых конфигураций, что обеспечивает сохранность данных об уже использованных конфигурациях систем, а также устанавливает правила параллельной работы по конфигурированию детектора несколькими экспертами.

Институтами НИЯУ МИФИ, ФИАН и ПИЯФ велась разработка программного обеспечения TRT Viewer. Данное приложение ориентировано на архитектуру детектора и может использоваться как средство мониторингирования практически всех компонентов детектора. Приложение TRT Viewer широко используется на этапах автономного тестирования детектора TRT. Приложение специально разработано как гибкое устройство быстрой диагностики и отладки. Приложение позволяет изображать треки элементарных частиц путем цветового выделения сработавших ДТ, а также представлять статистические данные и данные мониторинга путем изображения цветowych карт, наложенных на графическое изображение компонентов детектора. В диссертации подробно описывается метод представления графической информации в виде цветowych карт. Также приводится описание процессов получения данных, их декодирования и графического представления. Подробно описываются механизмы конфигурирования работы приложения. В настоящее время ведется дальнейшая разработка и поддержка приложения TRTViewer. На рисунке 3.2. представлен пользовательский интерфейс приложения.

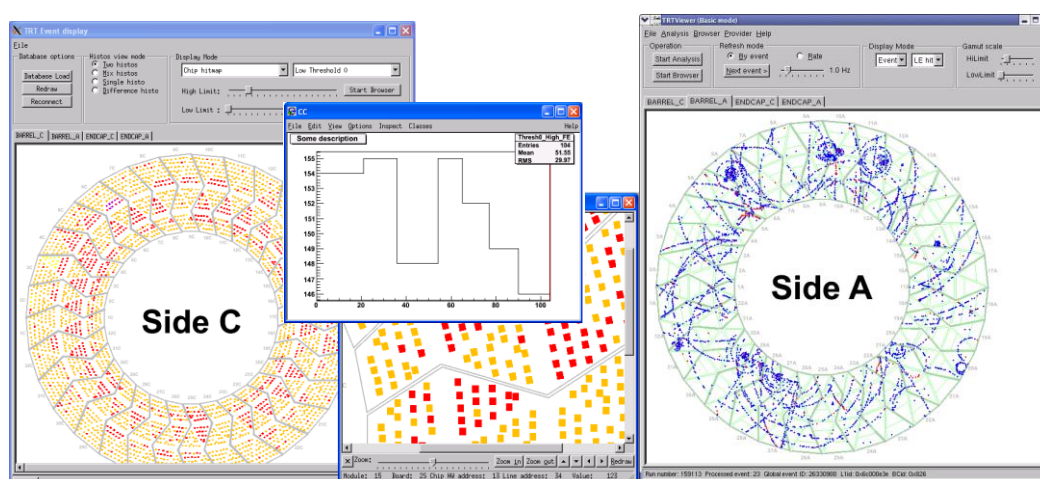


Рис.3.2. Пользовательский интерфейс приложения TRTViewer

В главе IV представлены показатели, демонстрирующие высокое качество работы детектора TRT. Детектор TRT дает большой вклад в точность определения импульса заряженных частиц, а также позволяет выполнять идентификацию электронов на фоне других заряженных частиц при помощи переходного излучения. Также в главе представлены физические результаты полученные в эксперименте ATLAS в 2010 году. Полученные результаты демонстрируют высокую степень слаженности работы всех компонентов эксперимента, а также возможности детектора ATLAS при изучении физики высоких энергий.

На рисунке 4.1 представлены распределения значений разницы расстояний от анода ДТ до трека частицы (Residual), вычисленных из совокупных показаний всех компонентов детектора ATLAS и полученных опытным путем в каждой ДТ детектора TRT. Графики отдельно для баррельной и торцевых частей демонстрируют сравнение значений пространственного разрешения детектора для эмулированных данных методом Монте-Карло и данных, полученных при столкновениях протон-антипротон при 7 ТэВ. При этом распределения, полученные методом Монте-Карло нормированы на число вхождений, которое было получено на реальных данных.

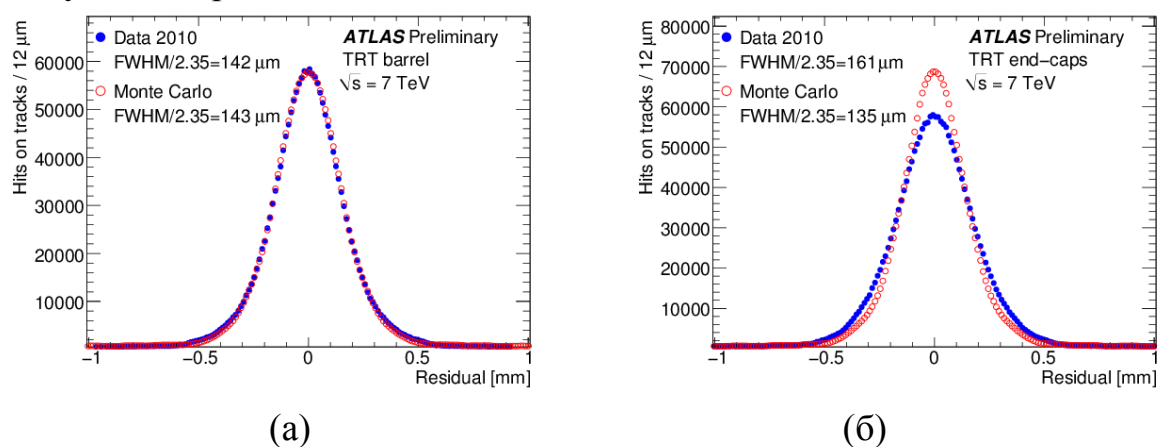


Рис.4.1. Пространственное разрешение TRT для баррельной(а) и торцевых(б) частей при столкновениях на 7 ТэВ

Треки отбирались при условиях $P_T > 1 \text{ ГэВ}$, смещение вдоль оси пучка $|d_0| < 5 \text{ mm}$, более 6 хитов в кремниевых детекторах и не менее 14 хитов в детекторе TRT. В баррельной части Residual для физических данных $\text{FWHM}/2.35 = 142 \text{ мкм}$ оказывается очень близка к значению, полученному методом Монте-Карло моделирования (143 мкм). В торцевых частях Residual для данных (161 мкм) превышает значения, полученные в Монте-Карло

моделирование (135 мкм), поскольку в космических лучах был затруднен трекинг, так как не были готовы алгоритмы реконструкции. Подробные исследования в торцевых частях в космических лучах не проводились.

Трек пересекает порядка 35-40 ДТ, однако не все из них дают хит. На рисунке 4.2 показана эффективность реконструкции данных столкновений на 7 ТэВ и для данных, моделированных методом Монте-Карло. Эффективность реконструкции определяется как доля событий, давших хит на треке, деленное на число ДТ, пересеченное треком. При этом 2% известных неработающих ДТ исключены из области рассмотрения. Эффективность зависит от настроек порогов срабатывания. Как видно из графиков, настройки были выполнены качественно, о чем говорит совпадение данных и результаты моделирования Монте-Карло.

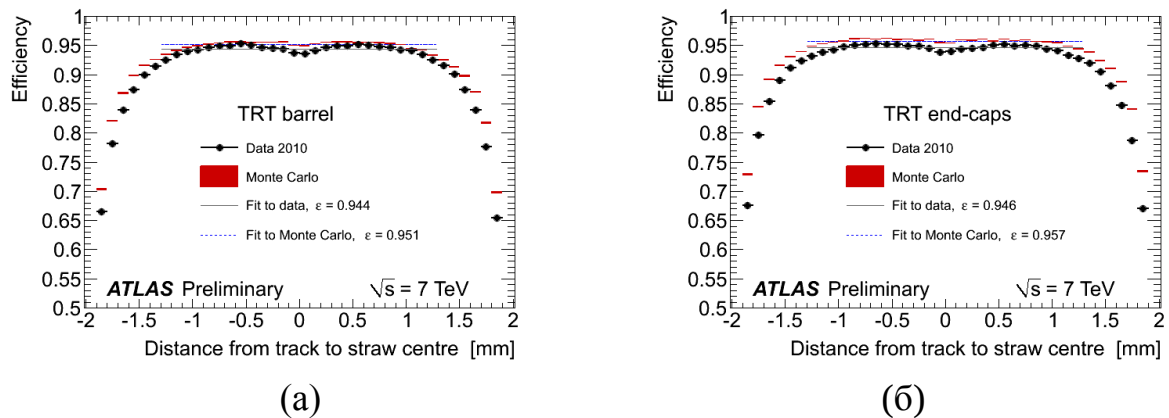


Рис.4.2. Отношение эффективности сигналов к расстоянию от анода до трека для баррельной(а) и торцевых(б) частей

Детектор TRT позволяет выполнять идентификацию электронов на фоне других заряженных частиц при помощи переходного излучения. Энергии фотонов переходного излучения находятся в диапазоне 5-30 кэВ. Для идентификации хитов с переходным излучением электроника TRT позволяет настроить верхний порог порядка 6 кэВ. На рисунке 4.3 представлена вероятность хитов, превысивших верхний порог, как функция от гамма-фактора γ . Для заряженных частиц с $\gamma > 1000$ вероятность увеличивается, позволяя идентифицировать электроны.

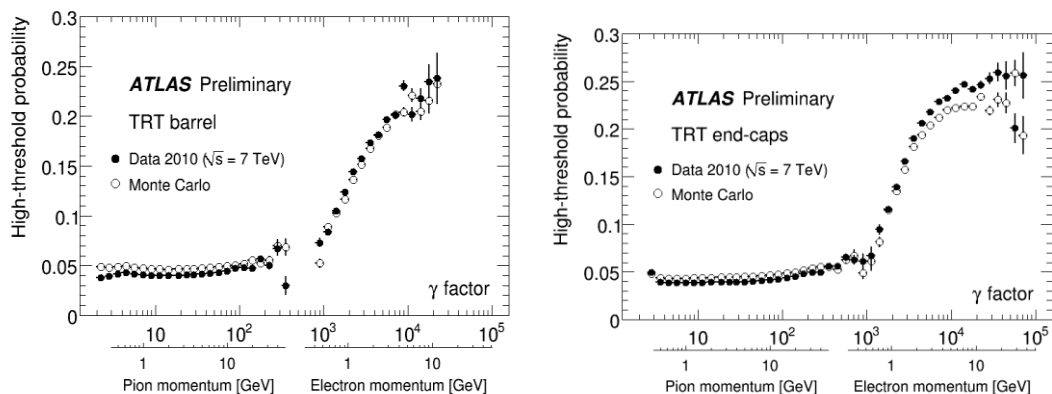


Рис.4.3. Вероятность хита с высоким порогом как функция от Лоренц-фактора, измеренные при столкновениях на 7 ТэВ для баррельной(а) и торцевых(б) частей детектора TRT

В 2010 году эксперимент ATLAS успешно участвовал в программе ускорителя LHC. На рисунке 4.4. представлены гистограммы светимостей выданных ускорителем и записанных детектором ATLAS в 2010 году при столкновении протонов с полной энергией 7 ТэВ. Отношение светимостей, выданных ускорителем и записанных детектором составляет 93,6 %. При этом всего было записано 45 Пбар⁻¹.

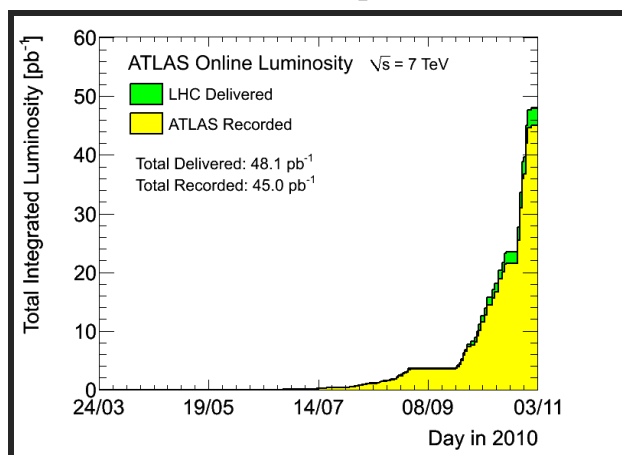


Рис.4.4. Гистограмма светимости в эксперименте ATLAS

Светимость в коллайдере зависит как от количества частиц, циркулирующих в пучке, так и от того, насколько сильно пучки сжаты в месте встречи. Всё это можно измерить экспериментально, но с довольно большой погрешностью. На ускорителе LHC достигнуты беспрецедентные значения светимости и плотности пучков.

В таблице 4.1 представлена сводная таблица для основных компонентов эксперимента ATLAS, в которой приведены проценты качественных записанных

данных. Как видно из таблицы детектор TRT показал абсолютные результаты. Детектор TRT оказался единственным в составе эксперимента, все данные записанные которым были качественными.

Таблица 4.1. Процентное соотношение качественных записанных данных

Внутренний Детектор			Калориметры				Мюонные детекторы			
Пиксельный детектор	Стриповый детектор	Трековый Детектор Переходного Излучения	Жидкоаргоновый электромагнитный	Жидкоаргоновый адронный	Жидкоаргоновый передний	Плиточный	Мониторимые дрейфовые трубки	Баррельные мюонные камеры	Стрипы со считывающим катодом	Торцевые мюонные камеры
99,0	99,9	100	90,5	96,6	97,8	94,3	99,9	99,8	96,2	99,8

В результате работы эксперимента ATLAS в 2010 году были получены следующие физические результаты. Была изучена физика и рождение частиц в мягкой области спектра ($P_T < 2 \text{ GeV}/c$). На рисунке 4.5. представлено значение величины распределения $1/N_{ev} 1/(2\pi p_T) d^2 N_{ch}/d\eta dp_T$ как функция от P_T . Результаты представлены для заряженных частиц при $P_T > 500 \text{ МэВ}$, $|\eta| > 2,5$, $n_{ch} \geq 2$, где P_T – импульс частицы в плоскости, перпендикулярной пучку, η - псевдобыстрота и n_{ch} - число заряженных частиц в событии. Точки отражают данные, а кривые – предсказания различных моделей Монте-Карло. Эти данные необходимы для уточнения теории.

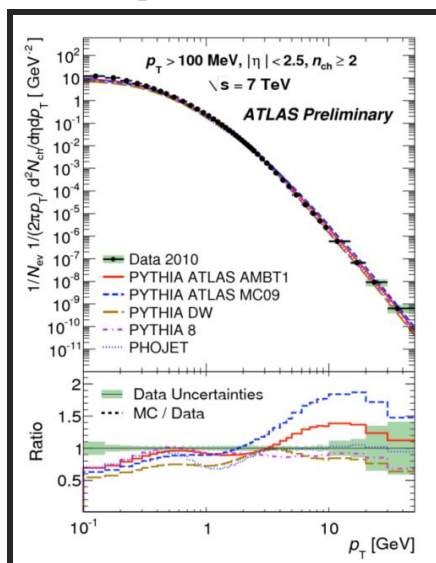


Рис.4.5. Значение величины распределения $1/N_{ev} 1/(2\pi p_T) d^2 N_{ch}/d\eta dp_T$, как функция от P_T

По данным о pp -столкновениях были измерены сечения рождения W и Z -бозонов с последующим их распадом на лептонную пару. Также получена асимметрия рождения W^+ и W^- . Полученные результаты согласуются с теорией. На рисунке 4.6. представлено событие-кандидат $Z \rightarrow \mu\mu$, зарегистрированное на установке ATLAS. На рисунке 4.7 представлено событие-кандидат $W \rightarrow e\nu$. С помощью детектора TRT был идентифицирован электрон – один из продуктов распада W -бозона.

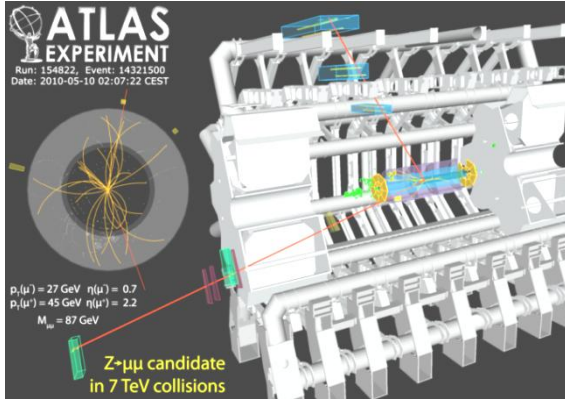


Рис.4.6. Событие-кандидат $Z \rightarrow \mu\mu$, зарегистрированное на установке ATLAS

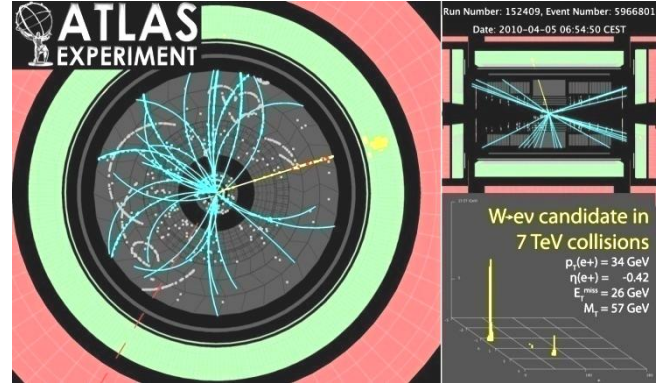


Рис.4.7. представлено событие-кандидат $W \rightarrow e\nu$, зарегистрированное на установке ATLAS

На рисунках 4.8 и 4.9 приведены полученные результаты для W - и Z -бозонов.

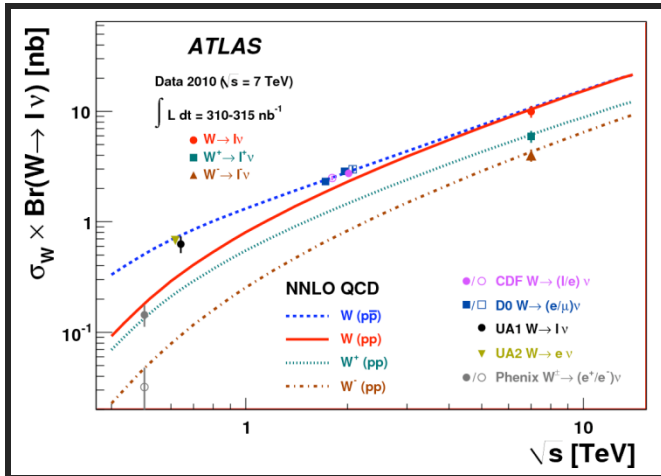


Рис.4.8. Измеренные значения величины $\sigma_W \times \text{Br}(W \rightarrow e\nu)$ и их сравнение с теоретическими расчетами

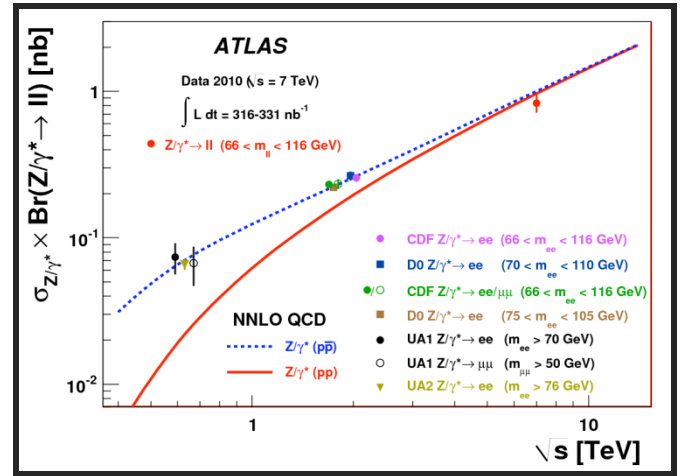


Рис.4.9. Измеренные значения величины $\sigma_{Z/\gamma^*} \times \text{Br}(Z \rightarrow \mu\mu)$ и их сравнение с теоретическими расчетами

В заключении показано, что выполненное исследование позволило получить ряд новых научно-технических результатов, обеспечивающих процесс разработки и интеграции программных модулей в рамках больших информационных систем, эффективность которых подтверждена опытом эксплуатации в ЦЕРН. Основные результаты:

1. Разработаны методы хранения большого объема (~ 1 ТБ) конфигурационных данных эксперимента, обеспечивающих безопасный и рациональный механизм ввода новых значений конфигурационных параметров и быстрого поиска условий при которых были получены данные событий. Созданные методы были использованы при разработке программной библиотеки CoolCoralClient для доступа к данным систем сбора данных DAQ и контроля детектора DCS детектора TRT в эксперименте ATLAS.

2. Разработаны методы графического представления данных эксперимента. Разработанные методы были использованы при создании приложения TRTViewer. Данное приложение ориентировано на архитектуру детектора и может использоваться как средство мониторинга практически всех компонентов детектора. Приложение TRTViewer широко используется на этапах автономного тестирования детектора TRT. Приложение специально разработано как гибкое устройство быстрой диагностики и отладки.

3. Осуществлено внедрение в производственную эксплуатацию в системах мониторинга, контроля детектора и сбора данных всех представленных в данной работе программных модулей. Разработанные средства использовались в качестве основных средств мониторинга и контроля состояния рабочих систем детектора TRT, а также участвовали в процессах контроля качества регистрируемых экспериментальных данных и калибровке считывающей электроники детектора. Детектор TRT вносит большой вклад в получение физических результатов эксперимента ATLAS.

Список публикаций

1. **Р.Ю. Машинистов**, В.И. Метечко, С.Ю. Смирнов, В.О. Тихомиров, Компьютерная ферма Грид МИФИ. Инженерная физика. 2008. №1, С. 54-59
2. **Р.Ю. Машинистов**, Ю.А. Чернышев Ю.А., Разработка программного обеспечения хранения данных в вычислительной инфраструктуре физического эксперимента. Открытое образование 2009, №4, С. 57-62

3. **Р.Ю. Машинистов**, Ю.А. Чернышев Ю.А., Методы хранения экспериментальных данных детектора элементарных частиц на примере эксперимента ATLAS на ускорителе LHC (ЦЕРН). Открытое образование 2010, №2, С. 41-47
4. **Р.Ю. Машинистов**, Ю.А. Чернышев, А.П. Шмелева, Системы управления детектора TRT в эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере. Датчики и системы 2011, №6, С. 47-50
5. G. Aad, E. Abat, .. **R. Mashinistov** et al., Performance of the ATLAS Detector using First Collision Data. J. High Energy Phys. 2010, Vol. 2010, No. 9, p. 1-66
6. G. Aad, E. Abat, .. **R. Mashinistov** et al., The ATLAS Inner Detector commissioning and calibration. European Physical Journal C 2010, Vol. 70, No. 3, p. 787-821
7. E. Abat, T. N. Addy, .. **R. Mashinistov** et al. The ATLAS TRT Barrel detector. Journal of Instrumentation 2008
8. E. Abat, T. N. Addy, .. **R. Mashinistov** et al. The Atlas Transition Radiation Tracker (TRT) proportional drift tube: design and performance. Journal of Instrumentation 2008
9. E. Abat, T. N. Addy, .. **R. Mashinistov** et al. The ATLAS TRT end-cap detector. Journal of Instrumentation 2008
10. E. Abat, A. Abdesselam, .. **R. Mashinistov** et al. Combined performance tests before installation of the ATLAS Semiconductor and Transition Radiation Tracking Detectors. Journal of Instrumentation 2008
11. G. Aad, E. Abat, .. **R. Mashinistov** et al. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. Journal of Instrumentation 2008
12. E. Abat, T. N. Addy, .. **R. Mashinistov** et al. The ATLAS TRT electronics. Journal of Instrumentation 2008
13. G. Aad, E. Abat, .. **R. Mashinistov** et al., Expected performance of the ATLAS experiment: detector, trigger and physics. Preprint CERN-OPEN-2008-020, Geneva, CERN, 2009
14. G. Aad, E. Abat, .. **R. Mashinistov** et al., The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. Journal of Instrumentation 2008
15. G. Aad, E. Abat, .. **R. Mashinistov** et al., Performance of the ATLAS Transition Radiation Tracker with Cosmic Rays and First High Energy Collisions at LHC. IHEP-LHC-2010 International Workshop «First Results from the LHC and their Physical Interpretation», 19-21 October 2010, IHEP, Protvino, Russia, <http://indico.cern.ch/contributionDisplay.py?contribId=24&sessionId=0&confId=94968>
16. Б. Ди Джироламо, **Р.Ю. Машинистов**, А.С. Романюк, Разработка системы хранения данных трекового детектора переходного излучения в

- эксперименте Atlas. Науч. сессия МИФИ-2007: Сб. науч. тр. В 17 т. М.: МИФИ, 2007, Т. 10. С. 49-50
17. А.С. Железко, **Р.Ю. Машинистов** и др., Разработка системы визуализации данных трекового детектора переходного излучения в эксперименте Atlas. Науч. сессия МИФИ-2007. Научно-образовательный центр CRDF. V Конференция. Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях. Физика ядра и элементарных частиц: Сб. науч. тр. М.: МИФИ, 2007, С. 88-90
18. Б. Ди Джироламо, **Р.Ю. Машинистов**, Ю.А. Чернышев, Механизм «интервалов истины» в базах данных условий и конфигураций физического эксперимента Atlas. Науч. сессия МИФИ-2008. XII выставка-конференция. Телекоммуникации и новые информационные. Технологии в образовании: Сб. науч. тр. М.: МИФИ, 2008, С. 41-43
19. В.Г. Бондаренко, Л.Ф. Васильева, ... **Р.Ю. Машинистов** и др, Начало работы эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН. Науч. сессия МИФИ-2009, Том IV: Сб. науч. тр. М.: МИФИ, 2009, С. 1-4
20. **Р.Ю. Машинистов**, Ю.А. Чернышев, Разработка модели программного обеспечения физического эксперимента на примере детектора TRT в эксперименте Atlas (ЦЕРН). Науч. сессия МИФИ-2010. XIV выставка-конференция. Телекоммуникации и новые информационные. Технологии в образовании: Сб. науч. тр. М.: МИФИ, 2010, С. 103-105