

**Учреждение Российской Академии Наук
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН**

На правах рукописи

Жуков Константин Игоревич

**МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПИТАНИЯ
ДЛЯ ГАЗОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПЕРЕХОДНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
ПО ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

**Специальность 01.04.01 –
«Приборы и методы экспериментальной физики»**

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

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Канцеров Вадим Абдурахманович

Москва – 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Актуальность темы	4
Цель диссертационной работы	6
Научная новизна работы	6
Практическая ценность работы	7
Основные результаты, представленные к защите	7
Апробация работы	8
Публикации	8
Структура и объем диссертации	8
ГЛАВА 1. БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТЫ.	
ЭКСПЕРИМЕНТ ATLAS.....	9
1.1 Ускоритель	9
1.2 Эксперименты на LHC	11
1.2.1 Физика на ускорителе LHC	12
1.2.2 Эксперимент CMS	13
1.2.3 Эксперимент TOTEM.....	15
1.2.4 Эксперимент ALICE.....	16
1.2.5 Эксперимент LHCb.....	18
1.3 Эксперимент ATLAS.....	19
1.3.1 Предназначение	19
1.3.2 Детектор ATLAS	21
1.3.3 Внутренний детектор	23
Пиксельный детектор.....	23
Полупроводниковый трековый детектор	24
Трековый детектор переходного излучения	25
1.3.4 Калориметры.....	26
1.3.5 Мюонный спектрометр	28
Мониторируемые дрейфовые камеры (MDT).....	29
Катодные полосковые камеры (CSC)	29
Резистивные плоские камеры (RPC).....	30
Тонко-зазорные камеры (TGC).....	31
1.3.6 Магнитная система.....	31
1.3.7 Триггер, сбор данных (DAQ) и компьютерные мощности.....	32
ГЛАВА 2. ТРЕКОВЫЙ ДЕТЕКТОР ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	35
Введение	35
2.1 Переходное излучение	36
2.2 Требования и решения	39
Способности восстановления треков.....	40
Идентификация частиц	41
2.3 Конструкция детектора	43
2.3.1 Модули цилиндрической части и колеса торцевых частей детектора.....	43
2.3.2 Дрейфовая трубка	46
2.3.3 Рабочие смеси газов и газовая система	49
Компоненты рабочей газовой смеси.....	50
Активная газовая система	53
2.3.4 Газовое охлаждение и вентиляция	55
2.3.5 Считывающая электроника	58

ГЛАВА 3. ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ ТРЕКОВОГО ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ATLAS	62
3.1 Выбор высоковольтного источника питания для трекового детектора переходного излучения	62
3.2 Технические требования к высоковольтному источнику для TRT-детектора ATLAS	71
3.3 Исследование характеристик HV крейта	75
Методика проверки и калибровки канала высоковольтного источника	77
ГЛАВА 4. ПРИЕМКА КОЛЕС END-CAP ЧАСТИ ДЕТЕКТОРА ПЕРЕД ЕГО СБОРКОЙ	81
Введение	81
4.1 Стенд проверки геометрических точностей.....	82
4.2 Проверка на газовые течи	84
4.3 Стабильность работы колес детектора под высоким напряжением длительное время	85
4.4 Приборы для обнаружения электрических пробоев в straw	86
4.5 Проверка напряжения нити и прямолинейности дрейфовой камеры straw	90
4.5.1 Измерения натяжения вольфрамовой проволочки	90
4.5.2 Изучение прямолинейности пропорциональных камер straw	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	94
БЛАГОДАРНОСТИ.....	96
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	98
Список аббревиатур	102
ПРИЛОЖЕНИЕ. Изучение характеристик пропорциональных камер	103

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Предметом диссертации являются:

1. исследование критических условий работы трекового детектора переходного излучения;
2. разработка соответствующего высоковольтного источника питания;
3. исследование опытных образцов и отработка методики тестирования многоканальной системы высоковольтного питания для трекового детектора переходного излучения (TRT);
4. установка системы в эксперимент ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) на Большом адронном коллайдере LHC, внедрение в единую систему контроля эксперимента.

Трековый детектор переходного излучения TRT является одним из важнейших элементов внутреннего детектора (Inner Detector) в эксперименте ATLAS и выполняет две функции: детектора переходного излучения и координатного детектора. TRT расположен вблизи точки взаимодействия пучков коллайдера и поэтому практически недоступен для обслуживания в течение всего времени эксплуатации. В связи с этим очень остро стоит проблема надежности функционирования всего детектора в целом.

TRT состоит из пассивного радиатора (стопки полипропиленовых фольг в торцевых частях и полиимидных волокон в центральной части) и детектирующих элементов, называемых straw (от англ. straw – соломинка). Это цилиндрические пропорциональные дрейфовые трубки диаметром 4 мм и длиной 370 мм для торцевых частей детектора и 1440 мм для центральной части. Всего таких трубок в детекторе 298 304.

Каждая straw подключается к высоковольтному источнику питания напряжением 1530 В. Количество таких трубок столь велико, что было довольно трудно обеспечить каждую отдельным источником питания.

В связи с этим было предложено сгруппировать их по высоковольтному питанию, обеспечив каждую группу отдельным предохранителем, тем самым сократив количество высоковольтных каналов до 2000.

Трековый детектор переходного излучения будет выполнять свои функции при наибольшей светимости ускорителя $2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Это обеспечено за счет использования самых передовых технологий в производстве детектора и обеспечения его работы. Детектор позволяет восстанавливать трек заряженной частицы, имея в среднем 36 координат частицы при пересечении трубок. В пространстве между слоями straw размещены высокоструктурированные радиаторы, обеспечивающие переходное излучение заряженных частиц при пересечении ими границ раздела сред. Фотоны переходного излучения регистрируются дрейфовыми трубками наряду с сигналами от релятивистских частиц. Эффективная регистрация переходного излучения позволяет выделять электроны на высоком адронном фоне (режекция пионов).

Совмещение в трековом детекторе переходного излучения функций измерения координат проходящей релятивистской частицы и идентификации электронов требует высокой стабильности коэффициента газового усиления в straw. А это, в свою очередь, требует прецизионной установки и стабилизации во времени высоковольтного напряжения питания дрейфовых трубок (менее 0.1%).

Также важным требованием к высоковольтной системе питания является необходимость точной диагностики состояния straw по количеству допустимых пробоев в камере в единицу времени и своевременное быстрое отключение высоковольтной линии. Отказ в работе системы диагностики пробоев может привести к прожиганию тонкой катодной стенки трубки, утечке дорогостоящего газа Хе и выходу из строя всего детектора переходного излучения. Такого высоковольтного источника не было найдено среди существующих промышленных образцов. Такие источники питания не соответствовали тем или иным требованиям TRT

В связи с этим была разработана, изготовлена и установлена в эксперимент новая многоканальная высоковольтная система питания.

Цель диссертационной работы

- Определение критических условий работы straw в реальном эксперименте на коллайдере. Анализ возможностей современных промышленных источников питания с целью использования их в TRT для надежной идентификации электронов.
- Исследование характеристик straw с целью определения требований к высоковольтному источнику питания.
- Разработка требований и изготовление нового источника высоковольтного питания, удовлетворяющего специфическим требованиям трекового детектора и обеспечивающего высоковольтным питанием ~ 2000 каналов TRT.
- Разработка методики тестирования и калибровки каждого канала системы высоковольтного питания.

Научная новизна работы

1. Исследованы критические режимы работы трекового детектора переходного излучения.
2. Определение набора требований к источнику высоковольтного питания, на основании которого изготовлен новый высоковольтный источник питания, обеспечивающий работу TRT в критических условиях на ускорителе LHC.
3. Разработана методика тестирования уникальной многоканальной системы высоковольтного питания.
4. Предложена оригинальная схема подачи высокого напряжения на дрейфовые трубки, обеспечивающая компромисс между общим количеством каналов высоковольтного питания и минимальным

количеством отключаемых трубок, в случае обнаружения дефектной straw.

5. Разработана методика калибровки каждого канала высоковольтной системы питания, обеспечивающая необходимую точность установки и измерения выходных параметров (напряжения и тока) каналов питания.
6. В результате разработки нового высоковольтного источника питания и методик его тестирования, а также калибровки получена уникальная, высоконадежная и недорогая система высоковольтного питания, обеспечивающая необходимую стабильность напряжения для идентификации электронов. Система уже более четырех лет работает в реальных условиях эксперимента. За это время не было ни одного серьезного отказа в ее работе.

Практическая ценность работы

В ходе выполнения настоящей работы была разработана и создана высоковольтная система питания трекового детектора переходного излучения эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере LHC. Результаты этой работы могут быть использованы в физических экспериментах на ускорителях заряженных частиц и космофизических экспериментах.

Основные результаты, представленные к защите

- Результаты исследований критических режимов работы straw в трековом детекторе переходного излучения.
- Разработка структуры и организация многоканальных систем высоковольтного питания с числом каналов питания порядка 2000 и количеством питаемых элементов порядка 300 000.
- Разработка уникальной высоковольтной системы питания трекового детектора переходного излучения в эксперименте ATLAS, обеспечивающей высокую надежность работы straw и стабильную режекцию пионов.

- Разработка методики исследования, тестирования и калибровки высоковольтных источников питания для физики высоких энергий.

Апробация работы

Основные результаты и выводы, содержащиеся в диссертации, докладывались и обсуждались на рабочих совещаниях коллаборации ATLAS, научных конференциях и сессиях по физике элементарных частиц в России, а также международных конференциях.

Публикации

Сущность и новизна исследований, выполненных по теме данной диссертации, изложены в статьях, опубликованных в журналах «Приборы и техника эксперимента», Journal of Instrumentation, в трудах российских и международных конференций по физике элементарных частиц. Всего по теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 3 – в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, а также приложения.

Диссертация содержит 112 страниц, включая 65 рисунков, 4 таблицы и список цитируемой литературы из 44 ссылок.

ГЛАВА 1

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТЫ. ЭКСПЕРИМЕНТ ATLAS

1.1 Ускоритель

В декабре 1994 года, спустя пять лет после запуска LEP (Large Electron-Positron – от англ. большой электрон-позитронный) коллайдера, Совет Европейского центра ядерных исследований (CERN) одобрил создание протон-протонного коллайдера, работающего с двумя пучками протонов, вращающихся в одном кольце в противоположные стороны. Пучки должны ускоряться до энергии 7 ТэВ. Этот проект получил название Большой адронный коллайдер (LHC, Large Hadron Collider) см. рис. 1-1. Эта установка сможет позволить физикам со всего мира изучить режим энергий, схожий с теми условиями, в которых пребывала наша вселенная спустя лишь 10-12 секунд после Большого взрыва, когда температура была все еще порядка 10^{16} кельвинов.

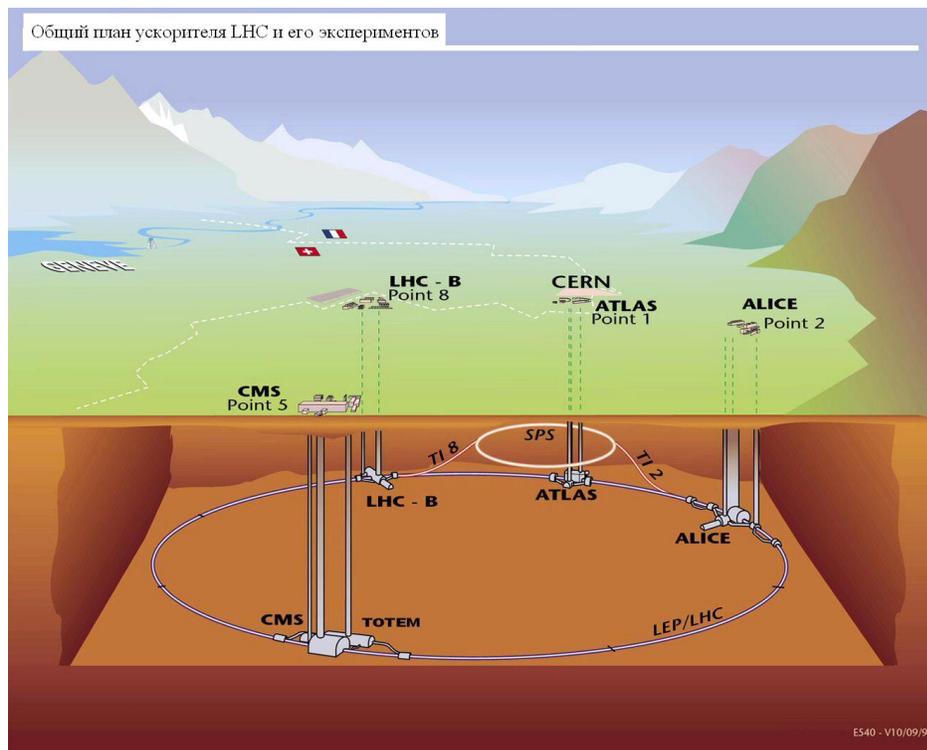


Рисунок 1-1 Общий вид ускорителя LHC и экспериментов

Новый ускоритель установлен в 27-километровый кольцевой туннель, который был построен еще для LEP. Для того чтобы достигнуть энергии центра масс $\sqrt{s} = 14$ ТэВ и беспрецедентной светимости $\sim 10^{34}$ см⁻²с⁻¹, 1232 дипольных магнита LHC необходимо охладить до 1.9 К – температуры, при которой гелий становится сверхтекучим. После этого, магниты могут создать магнитное поле величиной 8.4 Тл. Новейшая конструкция магнитов «два в одном» позволяет обеим транспортным трубам пучков расположиться в одном криостате (см. рис. 1-2), что заметно снижает габариты и стоимость. Общее количество гелия, около 96 тонн, позволяет охладить ускоритель LHC массой в 37 000 тонн. Это делает коллайдер самой большой в мире криогенной системой. Год спустя после запуска LHC обеспечивал также прямые столкновения Pb-Pb, в основном для эксперимента ALICE. Эти ионы имели энергию 2.8 МэВ/нуклон, обеспечивая полную энергию центра масс 1.15 ПэВ и номинальную светимость 10^{27} см⁻²с⁻¹. Более детально характеристики ускорителя показаны в таблице 1-1.

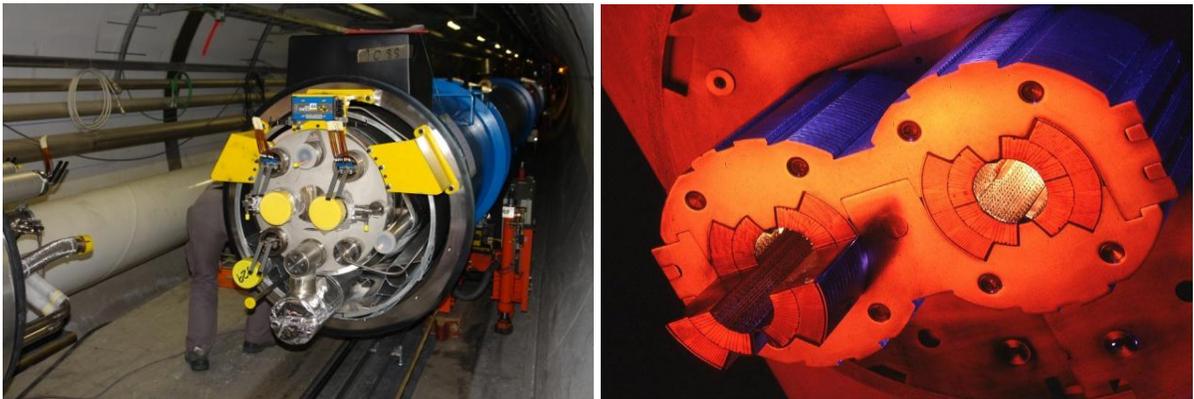


Рисунок 1-2 Установка криомагнитов в туннель LHC (слева), сверхпроводящий дипольный магнит (справа)

Таблица 1-1 Некоторые параметры ускорителя и пучка [1]

Энергия протонов	7 ТэВ
Энергия инжекции	450 ГэВ
Поле диполя	8.4 Тл
Ток при номинальной светимости	11 850 А
Светимость	$2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Период между сгустками	25нс
Частиц в пучке	10^{11}
Число сгустков	2808
Длина сгустков (r.m.s.)	7.5 см
Событий на 1 пересечение сгустков	19
Запасенная энергия пучка	362 Дж (~80 кг тротила)
Энергетические потери на оборот	6.7 кэВ
Синхротронная радиационная мощность за круг	3.6 кВт

1.2 Эксперименты на LHC

На ускорителе LHC запланированы четыре основных эксперимента, а именно: два больших многоцелевых детектора, ATLAS [2] и CMS [3], эксперимент на тяжелых ионах ALICE [4] и спектрометр LHCb [5]. Также запланирован дополнительный эксперимент для частиц с малыми углами рассеяния (TOTEM) [6], который установлен вблизи CMS. Задачей экспериментов ATLAS и CMS является проверка широкой области физики Стандартной модели [7] и, возможно, даже физики за ее пределами, в то время как задачей ALICE, LHCb и TOTEM является более специализированная физическая программа.

1.2.1 Физика на ускорителе LHC

Физический потенциал Большого адронного коллайдера охватывает широкую область точнейших измерений и поиск новых физических явлений. Ниже кратко приведены только наиболее интересные его задачи, связанные с поиском новых частиц.

Несмотря на весь успех теоретической и экспериментальной физики элементарных частиц за последние пару десятилетий, множество фундаментальных вопросов так и остается без ответа. Одним из главных в этом контексте является вопрос нарушения электрослабой симметрии. Другими словами, почему фотон – безмассовый, а W- и Z-бозоны относительно очень тяжелые. Ответ на этот вопрос тесно связан с поиском так называемого бозона Хиггса – последней важной компоненты Стандартной модели. До сих пор мы не способны были наблюдать эту частицу непосредственно, однако измерения на последних ускорителях позволили определить нижнюю границу диапазона потенциальной массы Хиггс-бозона. Например, из данных с ускорителя LEP можно было заключить, что его масса не может быть меньше чем 114.4 ГэВ [8], а на основе точных измерений на ускорителях LEP, SLD и TEVATRON был определен верхний предел диапазона – 280 ГэВ [9]. Мощность LHC, с энергией центра масс порядка 14 ТэВ, позволяет рождаться частицам с очень большими массами. Таким образом, энергетически возможно произвести, пронаблюдать и измерить Хиггс-бозон, если, конечно, он существует.

Одним из наиболее обещающих дополнений к Стандартной модели является Суперсимметрия [10], которая объединяет строительные блоки материи с фундаментальными силами и приводит к многим новым видам частиц. Суперсимметрия также требует существования нескольких видов Хиггс-бозонов. Хотя ни одной суперсимметричной частицы до сих пор не обнаружено, есть много указаний, что LHC, с его способностью создавать тяжелые частицы, сможет ответить на вопрос, проявляется ли Суперсимметрия в природе. Открытие Суперсимметрии и доказательство существования легкой суперсимметричной частицы, нейтралино, сможет

дать многообещающего кандидата на темную материю, большую составляющую массы нашей вселенной. Таким образом, на LHC возможно создать естественную связь между физикой частиц и космологией.

1.2.2 Эксперимент CMS

Физическая программа CMS (Compact Muon Solenoid – *от англ.* компактный мюонный соленоид) [3] включает в себя исследование нарушения электрослабой симметрии (посредством возможного наблюдения одного или более Хиггс-бозонов), поиск явлений, не вписывающихся в Стандартную модель (такие как суперсимметрия или дополнительные измерения), детальное изучение физики Стандартной модели, нарушения CP-симметрии и кварк-глюонной плазмы (QGP – Quark-gluon plasma) [11]. CMS детектор представляет второй многоцелевой эксперимент на ускорителе LHC. Как видно из его названия, он имеет компактные размеры и большой сверхпроводящий соленоидальный магнит, обеспечивающий поле 4 Тл. При своих относительно небольших размерах (15 м в высоту, 22 м в длину) весит он 12 500 тонн, почти в два раза тяжелее установки ATLAS. Среди всего прочего, детектор включает в себя:

- **Силиконовый внутренний детектор** (т.н. пиксели и стрипы – *от англ.* pixel, strip) [12][13], перекрывающий активную область площадью 250 м², содержит 44 млн. и 9,3 млн. считывающих каналов для пикселов и стрипов соответственно (рис. 1-3).
- **Электромагнитный калориметр (ECAL)** [14], расположенный вокруг трекера и состоящий из 80 000 кристаллов PbWO₄ (рис. 1-3). Считывание организовано с помощью лавинных фотодиодов (APDs) и вакуумных фототриодов (VPTs). Адронный калориметр, состоящий из слоев медь/сталь/латунь/сцинтиллирующий тайл, окружает электромагнитный калориметр.
- **Мюонная система** [15], встроенная в зазоры слоев бугеля (рис. 1-3). Она объединяет в себе катодные стриповые камеры (CSCs – Cathode Strip Chambers), резистивные плоские камеры (RPCs – Resistive Plate

Chambers) и дрейфовые трубки (DTs – Drift Tubes). Каждый вид детектора был оптимизирован в соответствии со своей задачей (регистрация треков, триггер и т.д.).

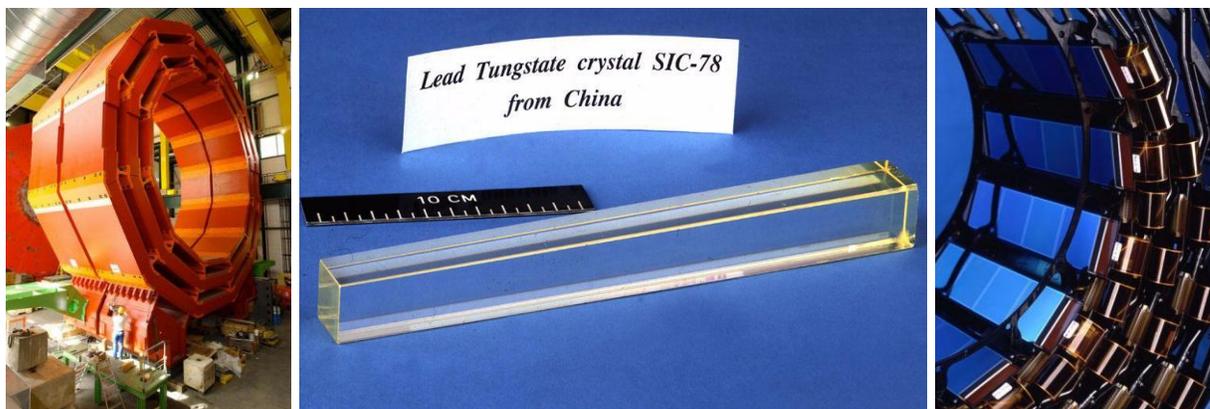


Рисунок 1-3 CMS: Цилиндрическое бугельное кольцо (слева), кристалл $PbWO_4$ (в центре), кремниевый трекер (справа)

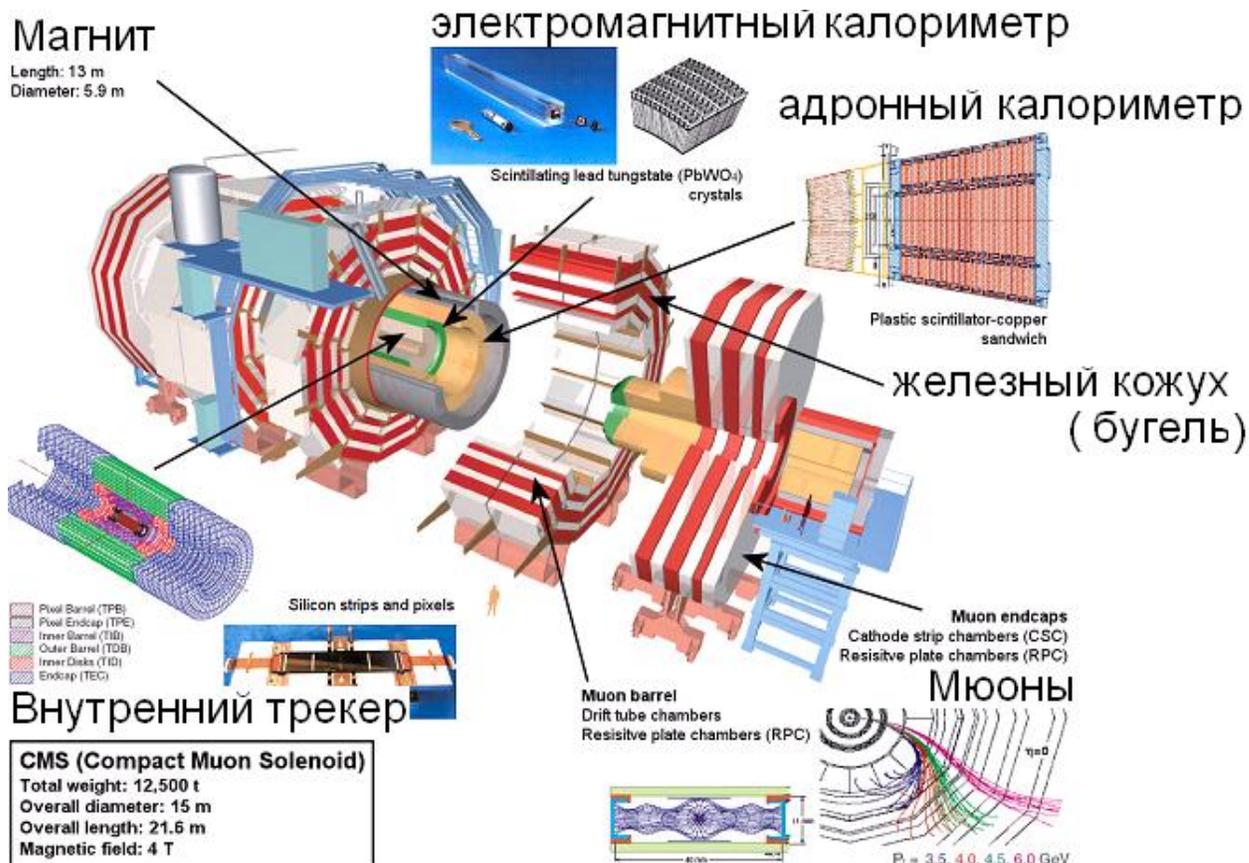


Рисунок 1-4 Устройство детектора CMS

1.2.3 Эксперимент TOTEM

Эксперимент TOTEM [6] будет измерять общее число pp-поперечных соударений и изучать малые углы упругого рассеяния и дифракционных распадов на LHC. Спустя два года после предложения о его строительстве в 1997 году, CMS был выбран как оптимальное место для установки TOTEM. Его главными частями являются:

- Два **трековых телескопа**, которые встроены прямо в CMS, способствуют регистрации треков заряженных частиц и являются триггером для частиц в интервале псевдобыстрот $3 < |\eta| < 6.8$.
- Силиконовые детекторы в **дефлекторах** (Roman pots) (рис. 1-5), которые будут установлены на 147-, 180- и 220-метровых расстояниях от точки взаимодействия на оси пучка, чтобы определять общее число pp-поперечных столкновений.
- **Микроустановки** (Microstations, MS) разработаны, чтобы определять головные «пучко-подобные» протоны в окружающей области коллайдера. Они встроены в транспортную трубу пучка и расположены на расстоянии 18 метров от точки взаимодействия и отходят от области пучка на расстояние около 3 мм при его низкой светимости. Их основное преимущество – независимость точной механики от вакуумных камер и полная стойкость в смысле вакуумных утечек. Силиконо-стриповый детектор стал очень удачным технологическим выбором.



Рисунок 1-5 Римский дефлектор эксперимента TOTEM (слева), клетка для поля эксперимента ALICE TPC (в центре), гибридный детектор LHCb VeLo (справа)

1.2.4 Эксперимент ALICE

Эксперимент на тяжелых ионах ALICE (A Large Ion Collider Experiment – от англ. эксперимент большой ионный коллайдер) [4] имеет своей целью изучение физики сильно взаимодействующей материи при крайне высоких плотностях энергий, где, как ожидается, формируется новая фаза материи – кварк-глюонная плазма (QGP) [11]. Кроме протон-протонных столкновений в эксперименте ALICE будут изучать столкновения ионов свинца с энергией центра масс более чем 1 ПэВ. Главной целью физики тяжелых ионов является запись многочисленного числа частиц, возникающих при столкновениях. При мощностях ЛНС при каждом столкновении будет рождаться около 50 000 частиц. Большая часть их должна быть отслежена и идентифицирована. Только после этого может возникнуть ясная картина и найдены основные критерии, указывающие на различные стадии в эволюции обычной материи к кварк-глюонной плазме и обратно. Детектор ALICE объединяет следующие детекторы:

- **Внутреннюю трековую систему** (ITS – inner tracking system), включающую в себя силиконовые пикселы, дрейфовые и стриповые детекторы для восстановления треков и измерения dE/dx .
- Главный трековый детектор ALICE – **время-проекционная камера** (TPC – time projection chamber) [16], имеет газовый объем 88 м^3 и является самой большой в мире (рис. 1-6). Она работает с газовой смесью Ne-CO₂ в пропорции 90/10.
- **Детектор переходного излучения** (TRD) большой площади (126 м^2) и высокого разрешения (1.2 млн. каналов) [17] обеспечивает отделение пионов и быстрый триггер для регистрации высокоэнергетичных электронов. Детектор γ -квантов переходного излучения использует радиаторы волокно/пена и работает на газовой смеси 85%Xe-15%CO₂.
- Много-зазорные камеры с резистивными пластинами (MRPCs) используются во **время-пролетном детекторе** (TOF – time-of-flight), наполненном газовой смесью на основе C₂F₄N₂. Его временное

разрешение около 50 пс (250 мкм зазоры) обеспечивает режим 1 кГц/см².

- **Калориметр** для фотонов и электронов (PHOS), состоящий из ~20 000 PbWO₄ кристаллов.
- **Мюонная трековая система**, построенная на Cathode Pad Chambers (CPCs), с газовой смесью Ar-CO₂ в пропорции 80/20.

Соленоидальный магнит, унаследованный с бывшего эксперимента L3, переделан, чтобы обеспечивать однородное поле внутри магнита не меньше чем 2-4 мТл.



Рисунок 1-6 Детектор ALICE

1.2.5 Эксперимент LHCb

Эксперимент LHCb [5] – это однозадачный спектрометр с углом захвата приблизительно от 15 мрад до 300 (250) мрад на сгибаемой (несгибаемой) плоскости. Выбор геометрии детектора основывался на том факте, что высокоэнергетичные b - и b^- -адроны преимущественно возникают в одном и том же конусе. В состав детектора LHCb (см. рис. 1-7), имеющего длину 19.7 м, входят следующие компоненты:

- **Силиконо-стриповый локатор вершины (VeLo – от англ. vertex locator)** с высоким разрешением, преимущественно для определения вторичных вершин событий и точных время-пролетных измерений (рис. 1-4).
- **Два кольцевых черенковских детектора (RICH1 и RICH2)** для определения частиц (K- π разделение), захват изображения осуществляется при помощи пиксельного гибридного детектора фотонов (HPD).
- **Трековая система** на четырех станциях, обеспечивающая восстановление треков частиц и дающая информацию о связи данных с калориметров и с мюонных камер, которая состоит из силиконового микро-стрипового внутреннего детектора (TT) и внешнего трекера на пропорциональных камерах (T1-T3).
- **Калориметры**, чтобы определять положение и энергию фотонов, электронов и адронов, используя «шашлык» свинец-сцинтиллятор ECAL, потом HCAL со структурой железо-сцинтилляционные тайлы и т.н. пре-ливневый (PS) и сцинтиллирующий детектор (SPD) для снижения фона пионов.
- **Мюонный детектор**, состоящий из пяти многоканальных пропорциональных камер (MWPC) и трековых станций (M1-M5), отделяющих мюоны и предоставляющих высокоэффективный нулевой триггер.

- «Теплый» дипольный магнит весом 1600 тонн располагается прямо за черенковским детектором и обеспечивает однородное поле 4 мТл.

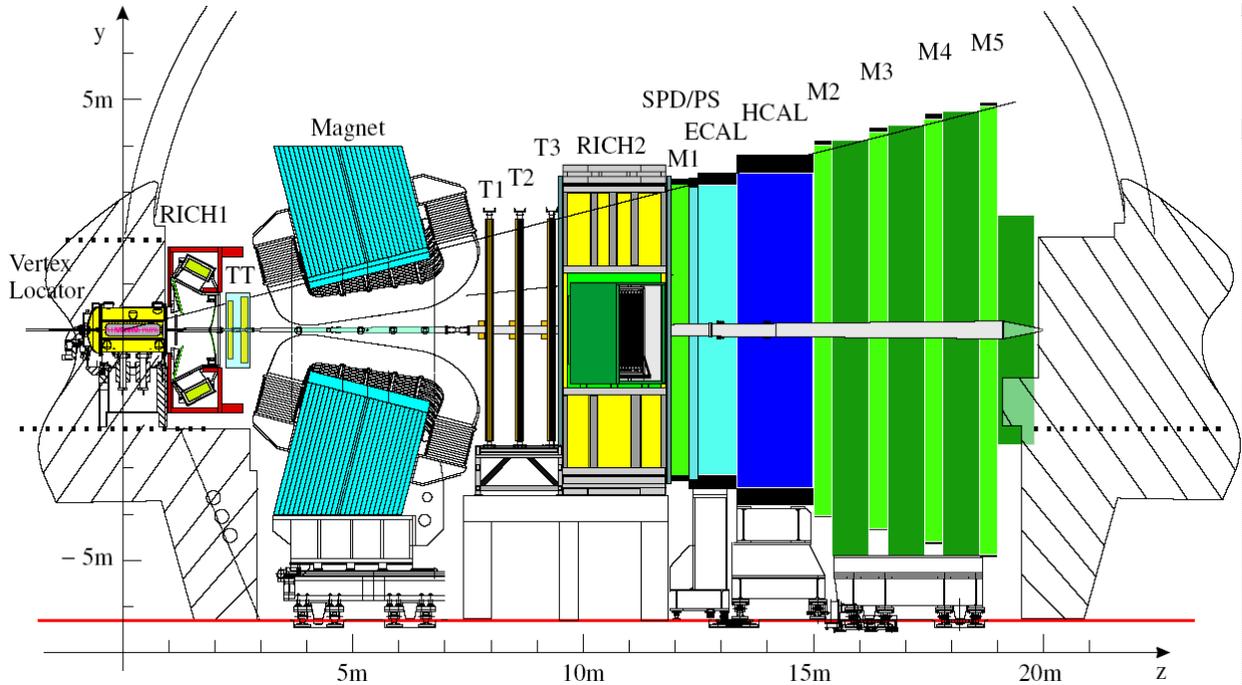


Рисунок 1-7 Детектор LHCb. Поперечный разрез

1.3 Эксперимент ATLAS

1.3.1 Предназначение

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS – от англ. тороидальная установка для большого адронного коллайдера) [2] – это один из четырех крупных экспериментов по физике элементарных частиц на ускорителе LHC, позволяющий исследовать фундаментальную природу материи и основных сил, формирующих нашу вселенную (см. рис. 1-8). С помощью него будет осуществлен поиск новых событий после лобового столкновения протонов, ускоренных до энергии выше 7 ТэВ. Плотность энергии в подобных высокоэнергетических столкновениях сравнима с энергией столкновения частиц в ранней вселенной, спустя менее одной миллиардной секунды после Большого взрыва. ATLAS вместе с CMS является крупнейшим проектом и

собранием усилий ученых, когда-либо предпринятых в физике. Этот эксперимент включает усилия около 3000 ученых и инженеров, приехавших из более чем 150 университетов и лабораторий 35 стран мира.

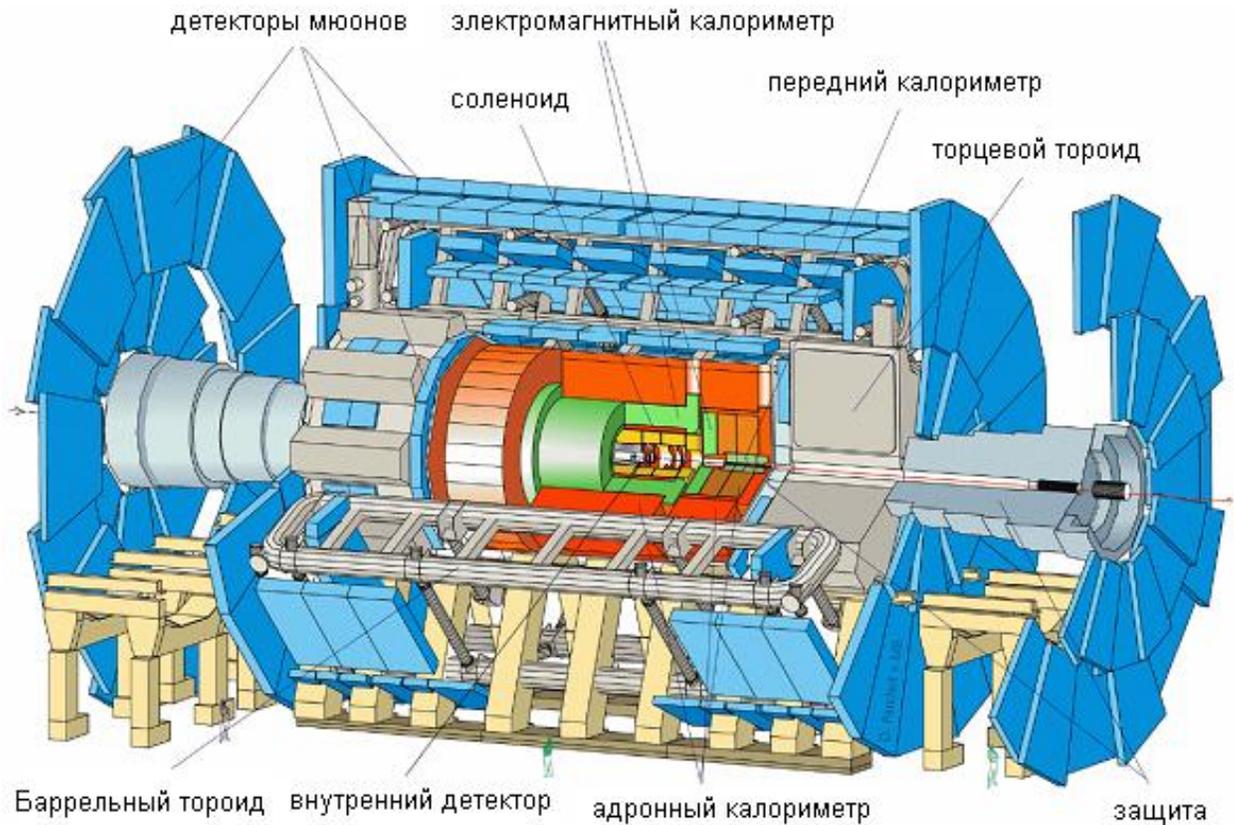


Рисунок 1-8 Устройство детектора ATLAS

Эксперимент ATLAS состоит из четырех составных частей, которые кратко описаны далее в этой главе.

1. **Внутренний детектор** (Inner Detector, ID) [18] – измеряет траектории каждой заряженной частицы и обеспечивает идентификацию электронов. Он состоит из пиксельного детектора, полупроводникового трекового детектора (SCT, semiconductor tracker) и трекового детектора переходного излучения (TRT, transition radiation tracker).
2. **Калориметры**, состоящие из жидко-аргонового электро-магнитного калориметра LAr (Liquid Argon), окружающего внутренний детектор, и

адронных калориметров, включающих в себя три части: жидко-аргоновый End-cap калориметр HEC, находящийся с торцов ЭМ калориметра, так называемый Forward калориметр FCal (также на жидком аргоне) и Tile калориметр, окружающий ЭМ LAr.

3. **Мюонный спектрометр**, включающий в себя четыре различных вида детекторов: MDT-детектор (Monitoring Drift Tubes – мониторируемые дрейфовые трубки) и CSC (Cathode Strip Chambers – катодные полосковые камеры) – для высокоточного определения траектории, RPC (Resistive Plate Chambers – резистивные камеры) и TGC-детекторы (Thin Gap Chambers – камеры с тонкими зазорами) – используются в качестве триггера.
4. **Магнитная система**, состоящая из двух частей: цилиндрический соленоид вокруг внутреннего детектора и ЭМ жидко-аргонового калориметра и тороидальный сверхпроводящий торцевой магнит, обеспечивающие магнитное поле 2-8 Тл.

Эксперимент ATLAS имеет большой физический потенциал с основной задачей поиска нарушения электрослабой симметрии, в частности обнаружение (или нет) Хиггс-бозона, гипотетической частицы, которая, если существует, объяснила бы механизм образования массы частиц. Большое поперечное сечение производства b -кварков позволяет всесторонне изучить B -физику. В ATLAS есть широкий потенциал для поиска физики за гранью Стандартной модели, например, таких явлений, как суперсимметрия, минимально суперсимметричная Стандартная модель и Техниколор.

1.3.2 Детектор ATLAS

В искусственной пещере размером 53 м в длину, 35 м в ширину и 40 м в высоту установлен 7000-тонный детектор АТЛАС (рис. 1-9). Установка размером с Триумфальную арку в Париже находится ниже уровня земли на 100 метров. По сравнению со своими размерами точность, с которой она выставлена, впечатляет. Смещение опор детектора (см. Рис. 1-10) и его

компонент по отношению к проходящему пучку ЛHC будет постоянно мониторироваться, и не должно превышать сотых долей миллиметра.

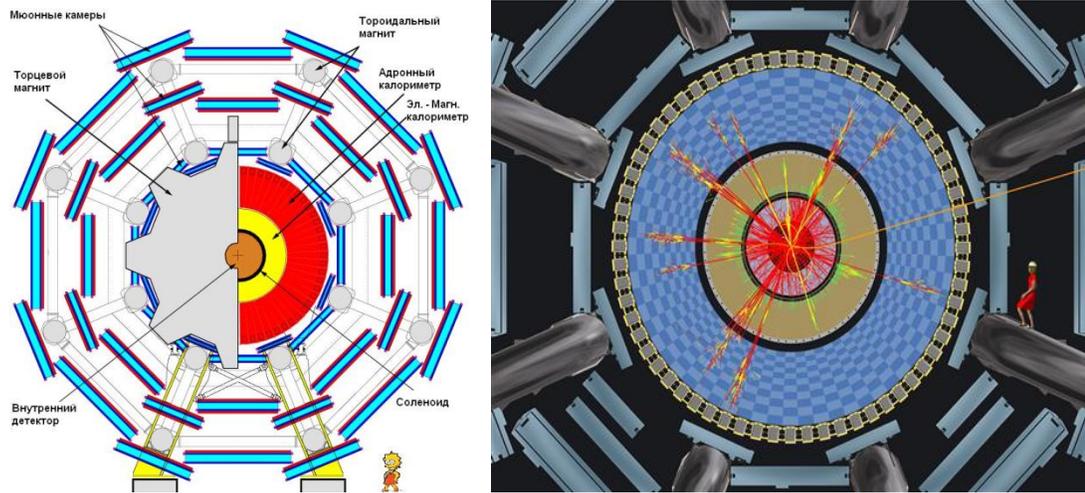


Рисунок 1-9 Слева: схематичное поперечное сечение детектора АТЛАС в плоскости ХУ. Справа: моделирование события в детекторе АТЛАС

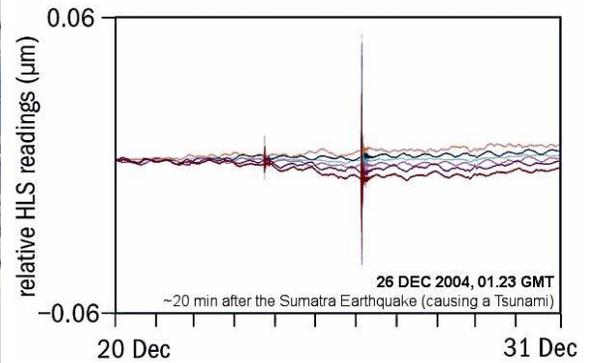
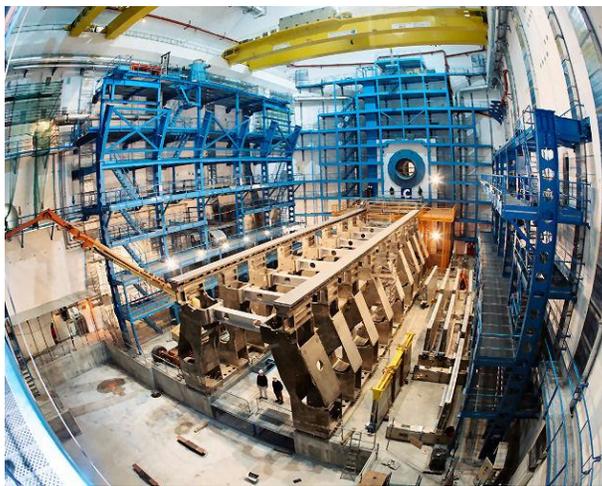


Рисунок 1-10 Слева: вид на пещеру АТЛАСа в процессе установки опор в феврале 2004 года. Справа: зарегистрированные возмущения, показывающие деформации поддерживающих структур (вызванные цунами на Суматре)

1.3.3 Внутренний детектор

Внутренний детектор [18], как видно из рис. 1-11, занимает всю центральную область ATLASa. Его основной задачей является проследить заряженную частицу от области взаимодействия до калориметра. Он имеет 7 метров в длину и радиус 1.15 метра. Соленоид окружает внутренний детектор и обеспечивает магнитное поле 2 Тл, чтобы позволить провести измерения импульсов. Он включает три подсистемы, которые кратко описаны в следующих параграфах.

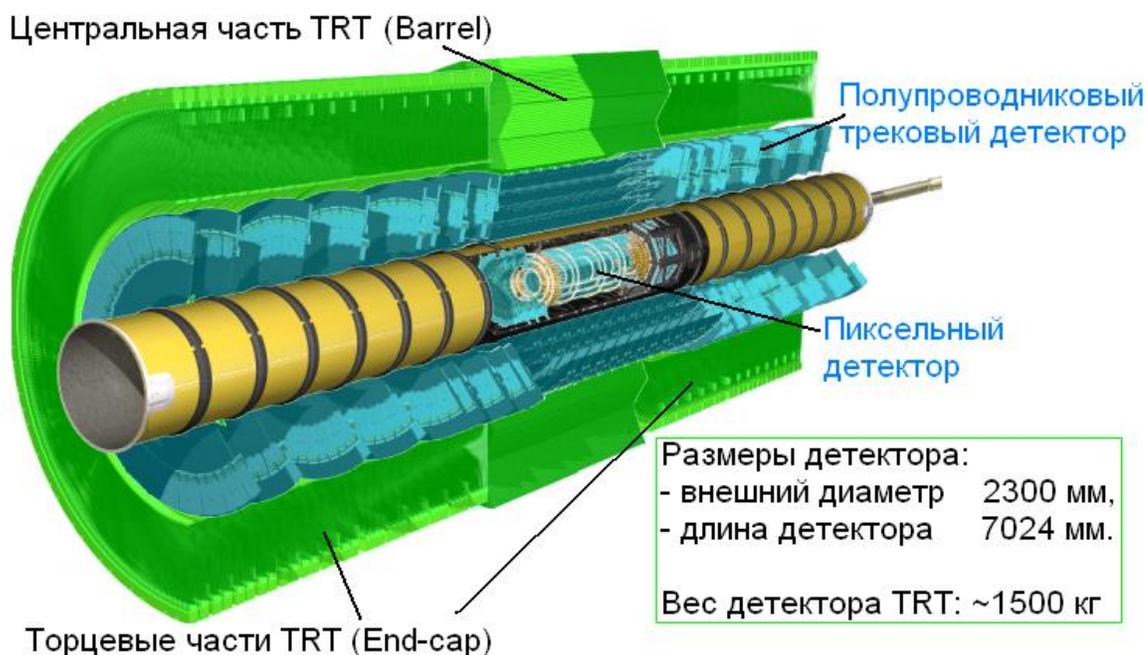


Рисунок 1-11 Вид на Внутренний детектор

Пиксельный детектор

Сенсоры, расположенные ближе всего к точке взаимодействия, формируют **Пиксельный детектор** (от англ. Pixel – элемент изображения) (см. рис. 1-12) [19]. Это высокогранулярная структура, обеспечивающая высокоточные измерения вблизи точки взаимодействия (разрешение 12 мкм по r-φ-координатам и 110 мкм по оси z). Эта система включает три точных координаты по всей области захвата и почти полностью определяет

предельное разрешение импульса и возможность Внутреннего детектора обнаруживать короткоживущие частицы, такие как W-адроны. Детектор содержит по три цилиндра с тремя дисками на каждой стороне. Каждый пиксельный модуль состоит из 47 268 элементов (разрешением 50×400 мкм и 50×600 мкм), с которых производится считывание информации при помощи 16 чипов. Общее количество пикселей (80 млн.¹) перекрывает площадь 1.7 м^2 . Ожидается, что за 10 лет эксплуатации пиксельный детектор будет подвержен ионизирующему излучению в 300 кГр и нейтронному влиянию $5 \times 10^{14} \text{ МэВ} \cdot \text{неq}/\text{см}^2$. Пиксельная система может быть установлена независимо от Внутреннего детектора.

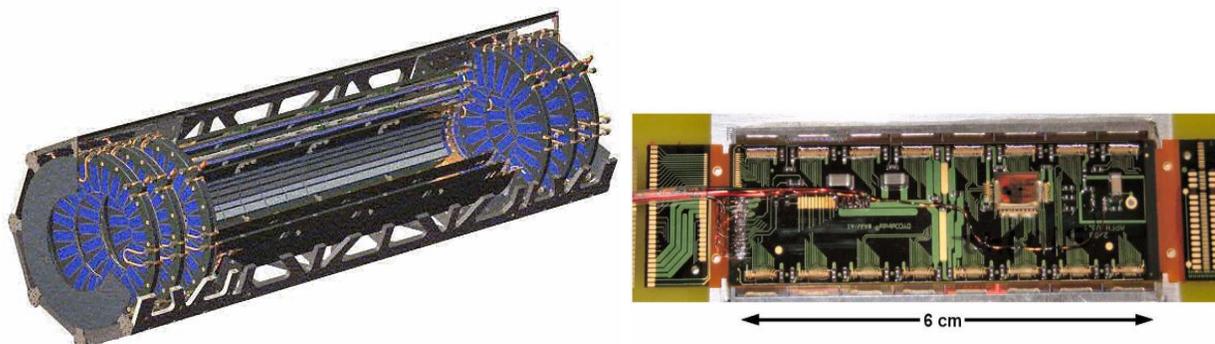


Рисунок 1-12 Компьютерная модель Пиксельного детектора (слева), каждый модуль содержит 46 080 каналов (справа)

Полупроводниковый трековый детектор

Немного подальше от точки взаимодействия расположен **полупроводниковый трековый детектор** (SCT, Semiconductor tracker) (см. рис. 1-13) [20], с помощью которого производятся еще четыре измерения координат трека частицы (с точностью 16 мкм по r-φ и 580 мкм по z-координате). В полупроводниковом трекере используются слои кремния (силикона), разделенные в узкие полосы около 80 мкм шириной и несколько см длиной. Каждый слой имеет два набора полос, расположенных под углом 2.3° относительно друг друга. В четырех внутренних слоях цилиндра полосы ориентированы параллельно оси пучка, в то время как в 9 торцевых дисках с

¹ Система содержит 80 мега-пиксельную цифровую камеру, делающую 40 млн. снимков в секунду

обоих сторон они идут радиально. Полупроводниковый трекер состоит из 4088 модулей, перекрывающих активную площадь в 61 м^2 . По своей значимости он занимает первое место среди подобных когда-либо созданных детекторов.

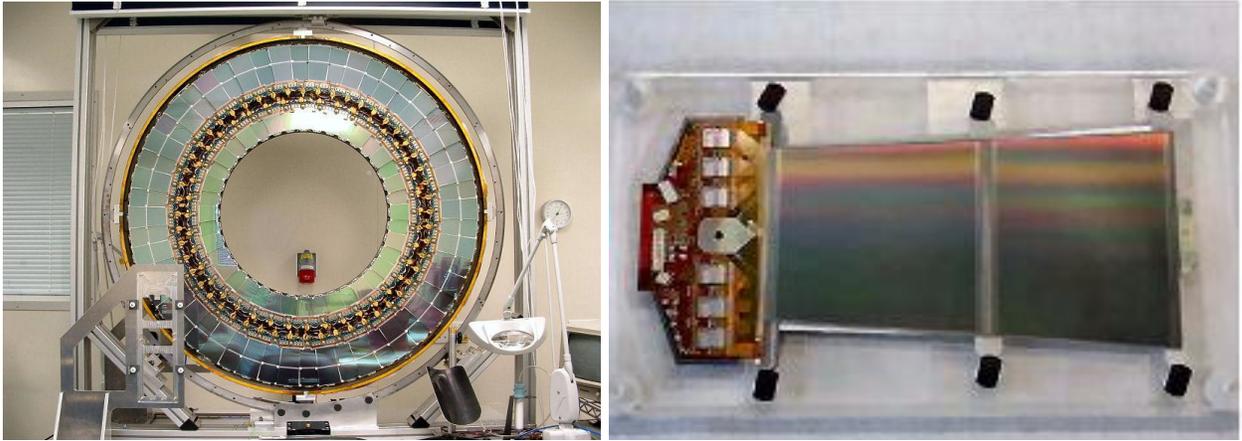


Рисунок 1-13 Собранный торцевой диск полупроводникового трекера (слева), содержащий модули (справа)

Трековый детектор переходного излучения

На больших радиусах становится слишком дорого перекрывать большие площади силиконовыми полосками, поэтому необходимы другие детекторы. Трековый детектор переходного излучения (TRT) состоит из 372 032 газонаполненных дрейфовых трубок, называемых «straw». Они представляют собой цилиндрические трубочки диаметром 4 мм и длиной 40-150 см, внутри которых по оси цилиндра натянута покрытая золотом 30 мкм вольфрамовая проволочка. Straw располагаются вдоль оси в цилиндрической части детектора и радиально в его двух торцевых частях (см. рис. 1-14). Трубки измеряют еще 36 точек на треке частицы для его последующего восстановления и обеспечивают идентификацию электронов, используя переходное излучение от встроенных радиаторных фольг и волокон. Трековый детектор переходного излучения более детально описан в Главе 2.

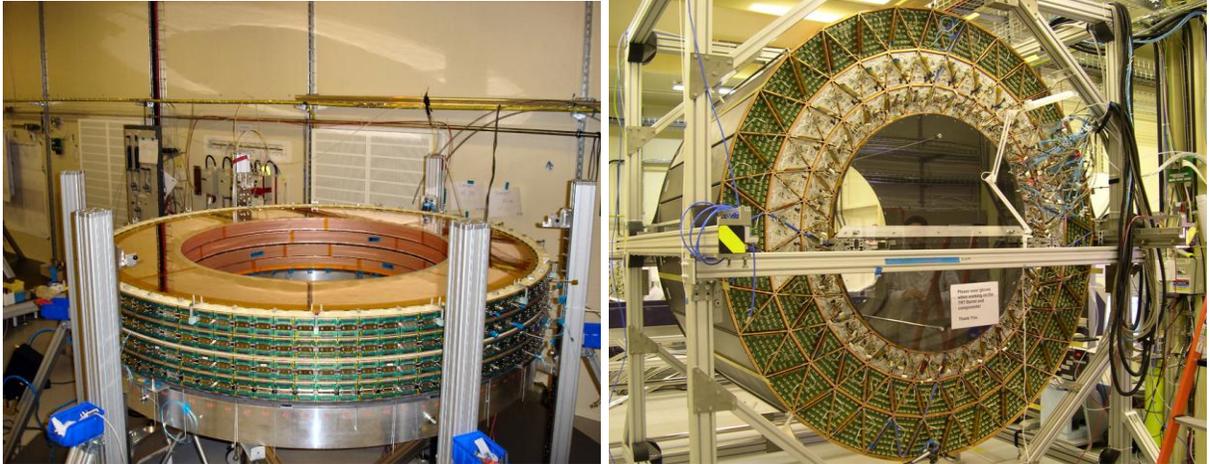


Рисунок 1-14 Четыре 8-слойных торцевых колеса типа А на сборочном столе (слева).
Завершенная цилиндрическая часть детектора в момент установки электроники (справа)

1.3.4 Калориметры

Система калориметров ATLAS (см. рис. 1-15) состоит из электромагнитного калориметра (ECal – *от англ. Electromagnetic calorimeter*) и адронного калориметра (HCal – *от англ. Hadronic calorimeter*).

Электромагнитный калориметр измеряет энергию высокоэнергетичных позитронов, электронов и фотонов. В установке ATLAS используется жидко-аргоновый калориметр [21] со свинцовым поглотителем, погруженным в жидко-аргоновую ванну при температуре 90 К и давлении в 1 атмосферу. Случайная частица взаимодействует с металлическими пластинами и образует каскады вторичных частиц (рис. 1-15). При попадании в жидкий аргон они производят электрон-позитронные пары при ионизационных столкновениях. Продукты ионизации собираются на чувствительном электроде, к которому их направляет соответствующее электрическое поле.

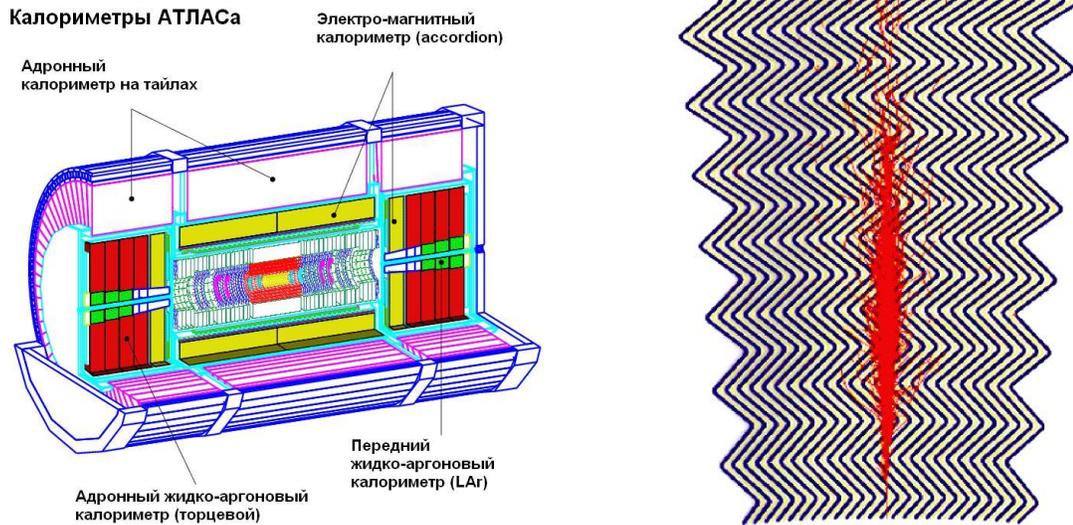


Рисунок 1-15 Схематичный вид на калориметры АТЛАСа (слева). Смоделированный ливень в электромагнитном калориметре (справа)

Адронный калориметр окружает электромагнитный и преобразует более тяжелые частицы – в основном протоны, нейтроны, пионы и каоны – в «адронные ливни». Он измеряет энергию и направление «джетов» – асимптотичную форму партонов (кварков и глюонов) – а также способен предположить наличие частиц, которые нельзя измерить непосредственно (такие как нейтрино), посредством поиска недостающего момента. Для того чтобы измерить направление, в котором теряется энергия, калориметр сегментирован.

Адронный калориметр разделен на три части, каждая из которых лучшим образом подходит для различных требований и радиационных условий в соответствующей области. Калориметр на тайлах [22] состоит из стальных пластин и сцинтилирующих тайлов, которые испускают свет пропорционально выделенной энергии. Жидко-аргоновый торцевой калориметр (рис. 1-16) использует медные пластины, окруженные жидким Ar.

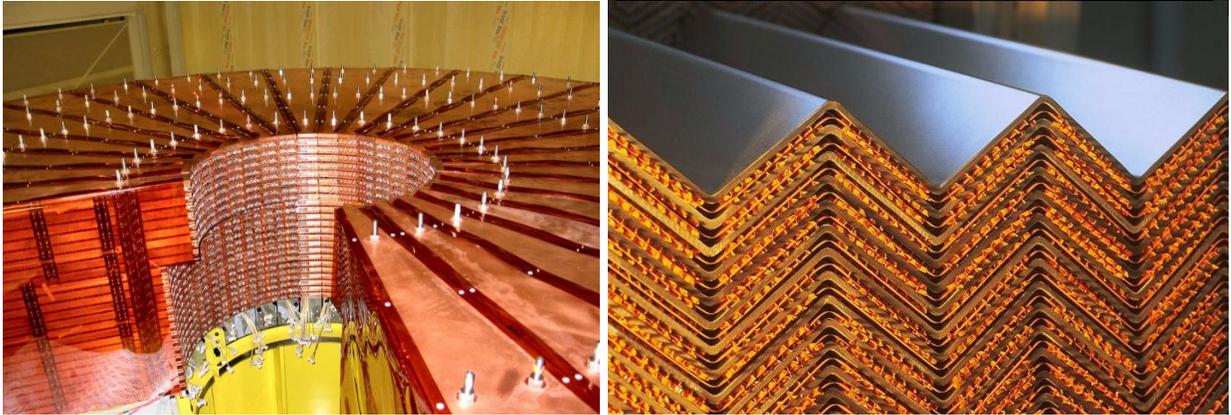


Рисунок 1-16 Торцевой адронный калориметр (слева). Структура электромагнитного калориметра (справа)

Передний калориметр, который формирует часть электромагнитного калориметра, покрывает область псевдобыстроты $3.2 < |\eta| < 4.9$ и представляет собой объединение медных и вольфрамовых ячеек, заполненных жидким аргоном. Калориметр имеет около 180 000 электронных каналов.

1.3.5 Мюонный спектрометр

Высокоэнергетичные мюоны способны пересечь детектор целиком. Более чем в 200 раз тяжелее электронов, они едва взаимодействуют с атомными ядрами в тяжелом материале калориметра, таким образом они не производят подобных электромагнитных ливней. Они прослеживаются только электрон-ионными парами, создающимися вдоль их траектории, и потери энергии 1 ГэВ на метр стали в основном позволяют каждому мюону покинуть детектор. Мюонный спектрометр ATLASa включает в себя четыре различных технологии детекторов (рис. 1-17), две из которых обеспечивают высокоточное определение траектории (MDT – Monitored Drift Tubes; CSC – Cathode Strip Chambers), а две другие используются в качестве триггера (RPC – Resistive Plate Chambers; TGC – Thin Gap Chambers). Они кратко описаны в следующих параграфах.

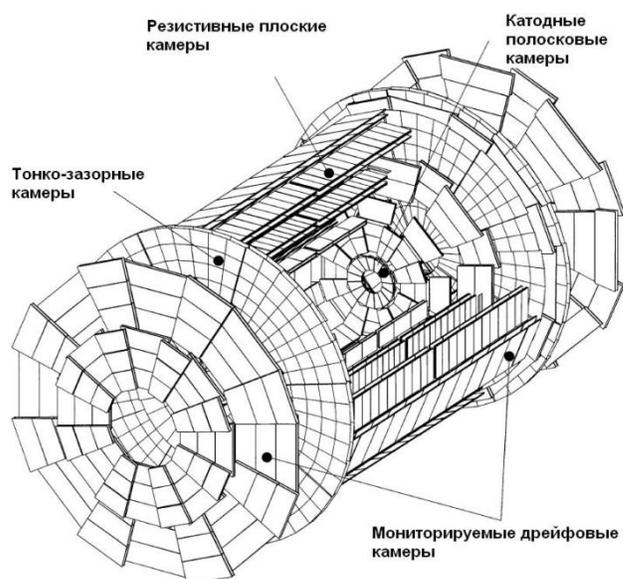


Рисунок 1-17 Различные технологии детекторов в мюонной системе АТЛАСа (слева). Торцевые мюонные камеры с мониторируемыми дрейфовыми трубками (MDT)

Мониторируемые дрейфовые камеры (MDT)

След и моменты мюонной траектории записываются тремя станциями Мониторируемых дрейфовых трубок (рис. 1-17). Траектории мюонов с энергией 10-1000 ГэВ, искривленные в тороидальном магнитном поле 0.5 Тл, измеряются внутри диапазона псевдобыстроты $|\eta| \leq 2.7$ с очень высокой точностью даже на высочайшей светимости. Мюонная система состоит из 1200 камер с примерно 400 000 алюминиевыми трубками длиной 1.2-6.0 м и диаметром 30 мм с 50 мкм покрытой золотом вольфрамовой проволокой, заполненными смесью Ag-CO₂ (93%-7%) при давлении 3 атмосферы и коэффициентом газового усиления 20 000. Они покрывают активную площадь 5500 м².

Катодные полосковые камеры (CSC)

Для измерения мюонов, движущихся на малых углах к оси пучка, дрейфовые камеры не подходят из-за высокого радиационного фона. Для этой цели используются 64 катодные полосковые камеры, имеющие 4 слоя. Они перекрывают переднюю область в диапазоне псевдобыстроты $2.1 < |\eta| < 2.7$. Они состоят из набора близко расположенных параллельных

проволочек в ограниченном объеме, заполненном газом. С внешней стороны этот объем закрыт полосками считывающих электродов (см. рис. 1-18).

Резистивные плоские камеры (RPC)

Резистивные плоские камеры (рис. 1-18) установлены в качестве триггеров в цилиндрической области Мюонного спектрометра. Они должны удовлетворять следующим требованиям: 97% эффективности и временное разрешение 2-3 нс, и работать с частотой выше 100 Гц/см². Разрешение по φ-координате порядка 5-10 мм. Каждый слой сделан из двух 2 мм тонких бакелитовых электродов (линейное сопротивление $\rho=10^{10}$ Ом/см), с верхними поверхностями, покрытыми графитом, и внутренними поверхностями, защищенными льняным маслом. Ортогональные дву-панельные полоски считывания позволяют независимо измерить η- и φ-координаты. Используется газовая смесь C₂H₂F₄ + iso-C₄H₁₀ + SF₆ в процентном отношении 96.7%+3%+0.3%. Свыше тысячи RPC элементов покрывают площадь около 3500 м².

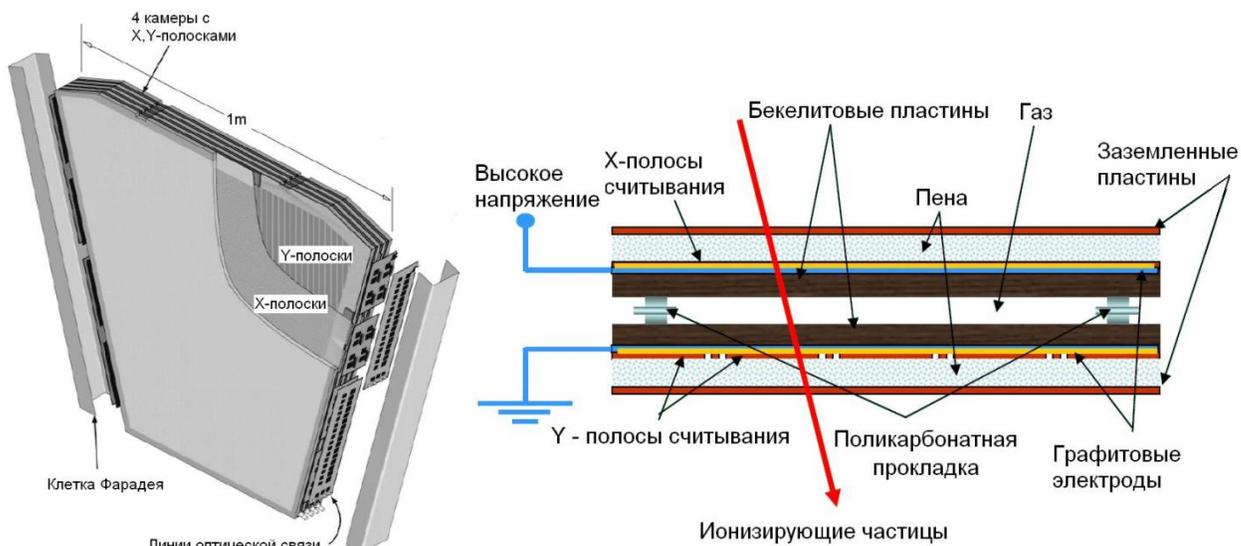


Рисунок 1-18 Схематичный вид катодной полосковой камеры (слева). Схематичный разрез резистивной плоской камеры (справа)

Тонко-зазорные камеры (TGC)

Триггерная система в торцевой области сделана из тонких камер с зазором, трудоемкой технологией, схожей с многопроволочными пропорциональными камерами, с увеличенным шагом анодной проволоки по сравнению с катод-анодным зазором. Они работают в режиме насыщения, используя смесь газов 55% CO₂ и 45% n-пентана (n-C₅H₁₂), обладающей высоким ослаблением сигнала. Их преимущества заключаются в низкой чувствительности к механическим деформациям, стабильности амплитуды импульса и отсутствии формирования стримеров, обеспечивая короткое время дрейфа и, таким образом, хорошее временное разрешение (несколько нс).

1.3.6 Магнитная система

Две магнитные системы установлены в эксперименте ATLAS. Полый цилиндрический **соленоид** (рис. 1-19), окружающий внутренний детектор и обеспечивающий поле 2 Тл, силовые линии которого параллельны оси пучка. Заряженные частицы, пришедшие от точки столкновения, отклоняются магнитным полем по радиусам кривизны пропорциональным их моментам.

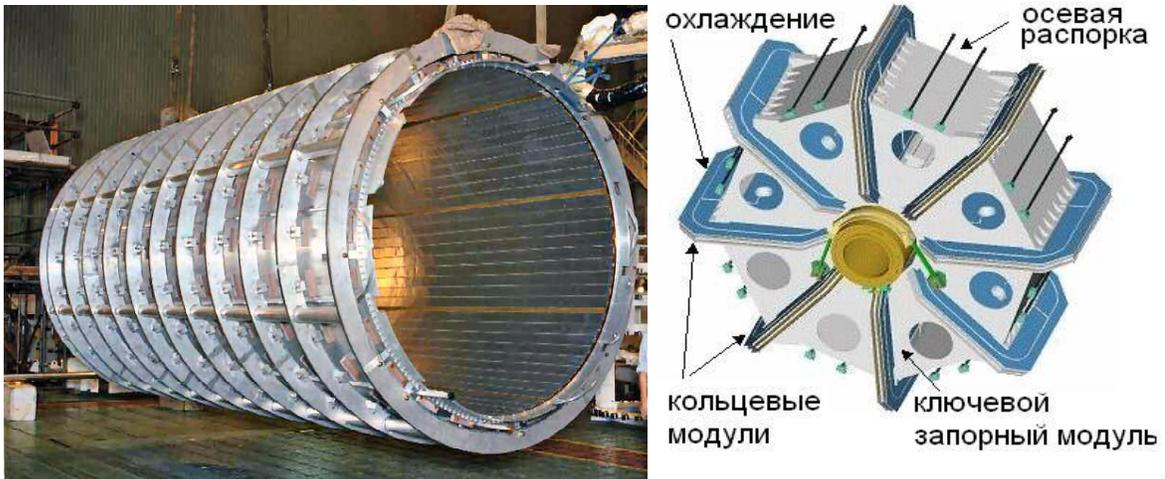


Рисунок 1-19 Цилиндрический соленоид АТЛАС (слева). Схематичный вид на тороидную торцевую крышку

Чтобы измерить с высокой точностью мюоны, проходящие через калориметр, был разработан **тороидальный** сверхпроводящий магнит. Ток в тороиде составляет 20 500 ампер, а сам он генерирует интегральное магнитное поле 2-8 Тл/м с квази-кольцевыми линиями поля в плоскости, определяемой осью пучка (см рис. 1-20). Важной особенностью тороида является увеличение искривляющей способности на более высоких значениях псевдобыстроты. Тороидальный магнит представляет собой полый цилиндр длиной 25 м и два торцевых тороида длиной 5 м, каждый из этих элементов помещен в отдельный криостат. Тороидальный магнит имеет общий диаметр 20 м и вес более 1300 тонн.

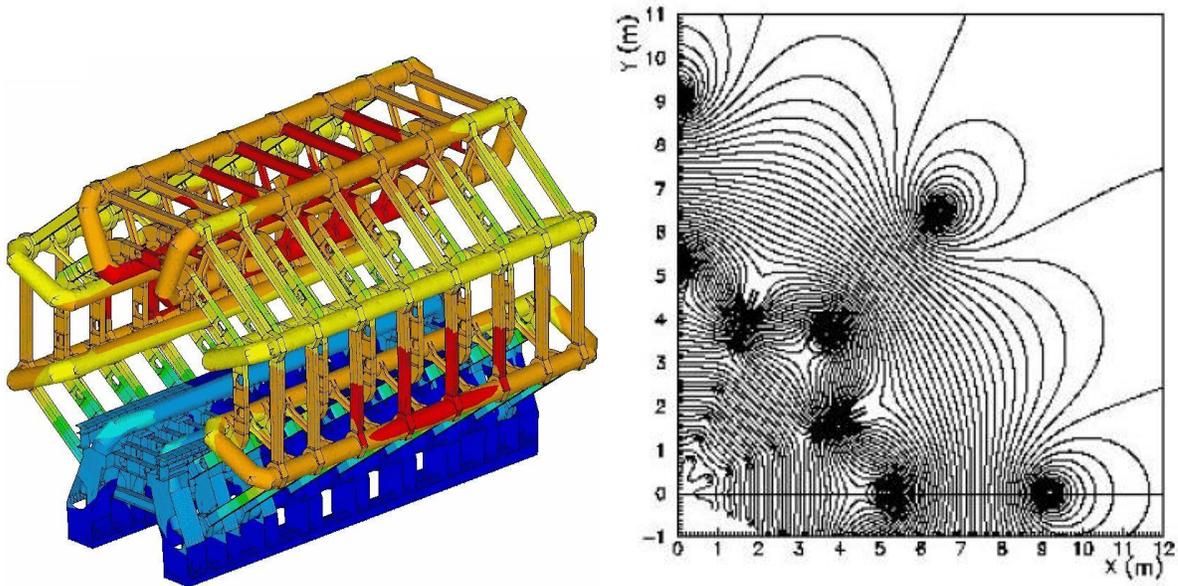


Рисунок 1-20 Тороидальный сверхпроводящий магнит ATLAS (слева) и изображение его квази-кольцевых линий магнитного поля в плоскости XY (справа)

1.3.7 Триггер, сбор данных (DAQ) и компьютерные мощности

Частота пересечения сгустков 40 МГц может привести к частоте взаимодействия около 10^9 Гц при светимости $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Для того чтобы выбрать интересующие взаимодействия из пересечения сгустков, существует сложная трех уровневая система триггеров, снижающая огромный объем данных к частоте событий около 100 Гц, которую система сбора данных способна записать (см. рис. 1-21). Каждый уровень триггера улучшает

результат, полученный на предыдущем уровне и, если необходимо, добавляет дополнительный выбранный критерий отбора.

Первый уровень триггера (LVL 1) работает с информацией от калориметра и мюонных детекторов. Требуется около 2 мкс для принятия решения. Оно включает время распространения сигналов по кабелям между детектором и подземной вычислительной комнатой, где располагается логика триггера.

Второй уровень триггера (LVL 2) отбирает выбранные события, сравнивая с первым уровнем, используя полную информацию с ячеек всех детекторов, включая внутренний трековый детектор, который не используется в первом триггере. Таким образом частота событий снижается до ~ 1 кГц. Многие события анализируются независимо триггерной системой второго уровня, используя процессорные фермы.

Для событий, отобранных вторым уровнем триггера, выполнен «постройщик» событий. Каждый считывающий буфер содержит фрагменты многих событий для малой части детектора. «Постройщик» событий собирает все фрагменты одного события в один участок памяти – память процессора Фильтра событий. Процессор фильтра событий работает с использованием процессорных ферм, действующих на данных полного события.

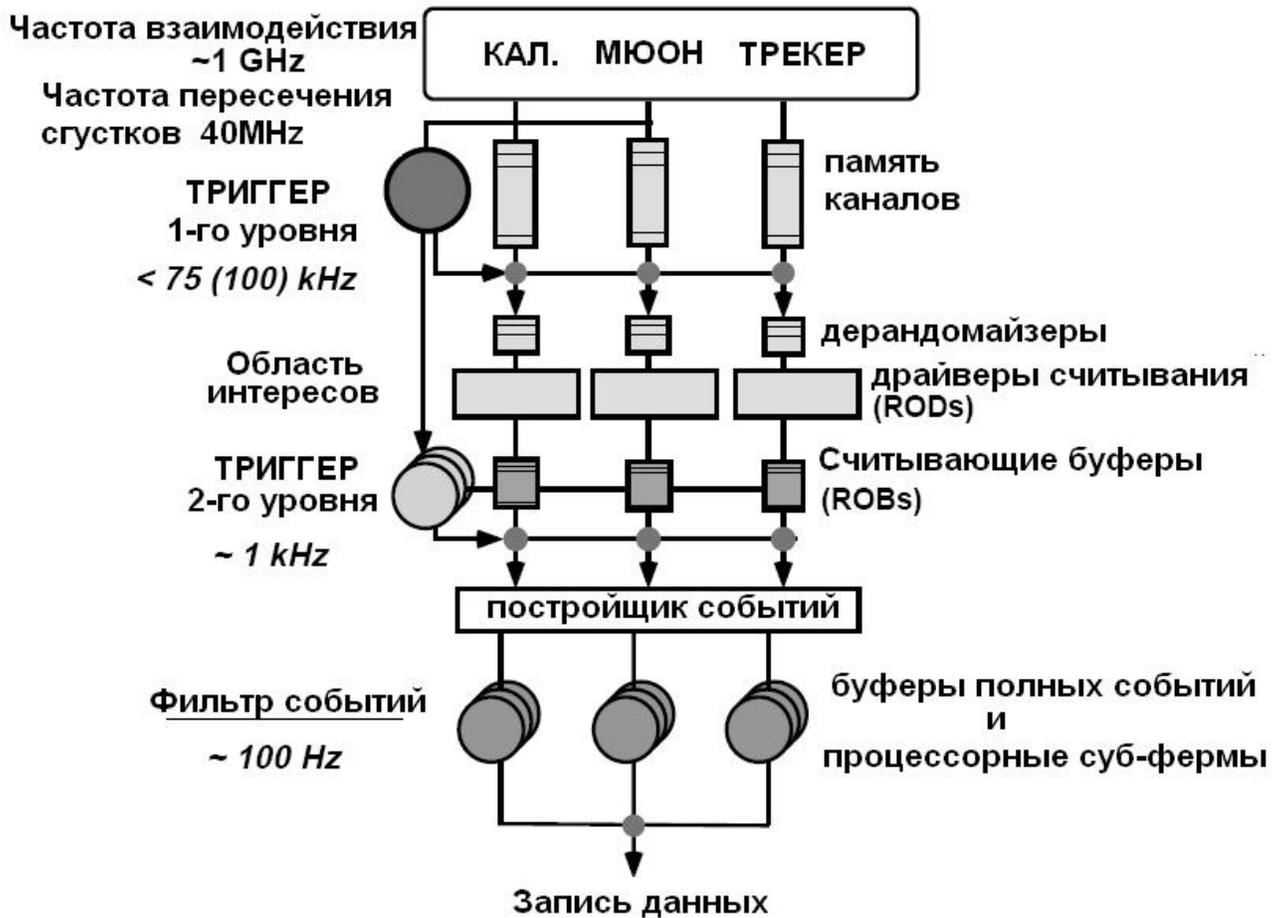


Рисунок 1-21 Архитектура триггера эксперимента АТЛАС

Компьютерные мощности ATLAS разрабатывались с учетом специфики анализа данных, получаемых с детекторов ATLASa. Количество данных при ожидаемых 10^9 событиях в год с эквивалентным объемом одного события 1 Мбайт потребует свыше 1 Петабайта (10^{15} байт) ежегодно. Этот объем эквивалентен миллиону компакт дисков (стопка около 1 км высотой!) или емкость примерно 5000-10 000 жестких дисков от домашних компьютеров. Чтобы проанализировать эти данные, понадобится компьютерная мощность, эквивалентная 50 000 домашних компьютеров.

ГЛАВА 2

ТРЕКОВЫЙ ДЕТЕКТОР ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Введение

Переходное излучение возникает, когда релятивистская частица пересекает границу раздела двух сред с различными электрическими и/или магнитными свойствами. Это явление было впервые предсказано и рассмотрено В.Л.Гинзбургом и И.М.Франком более шестидесяти лет назад [23]. Они показали, что при переходе из одного вещества в другое возникает новый тип электромагнитного излучения, которое было названо переходным. Оно сопровождает частицы, которые движутся со скоростью как большей, так и меньшей фазовой скорости света. Впоследствии это явление привлекло внимание экспериментаторов, которые показали в начале 1970-х годов XX века возможность использования Детекторов переходного излучения (TRD – *от англ.* Transition Radiation Detector). Сейчас разнообразные детекторы переходного излучения используются как в экспериментах физики высоких энергий на ускорителях (например, PHENIX, ATLAS или ALICE), так и в экспериментах с космическими лучами (такие как PAMELA, AMS и ACCESS).

В эксперименте ATLAS трековый детектор переходного излучения (TRT – *от англ.* Transition Radiation Tracker) представляет собой комбинацию трекового детектора на пропорциональных дрейфовых трубках (straw) и детектора переходного излучения для идентификации частиц. В дополнение к этому он имеет относительно низкую стоимость по сравнению с другими решениями детектирования треков частиц. Таким образом, TRT является важной частью трековой системы ATLASa и в тоже время значительно улучшает идентификацию электронов на высоком радиационном фоне при энергиях ускорителя LHC.

2.1 Переходное излучение

Излучаемая энергия при прохождении частицы с зарядом ze через границу между вакуумом и веществом с плазменной частотой ω_p :

$$I = (\alpha z^2 \gamma h \omega_p) / 3, \quad (2.1)$$

$$\text{где } \hbar \omega_p = (\sqrt{4\pi N_e r_e^3 m_e c^2}) / \alpha = \sqrt{4\pi N_e a_\infty^3} 2 \times 13.6 \text{ эВ} \quad (2.2)$$

Здесь N_e – концентрация электронов в среде, r_e – классический радиус электрона, a_∞ – радиус Бора. Для полипропилена и подобных ему материалов $\hbar \omega_p = 20$ эВ.

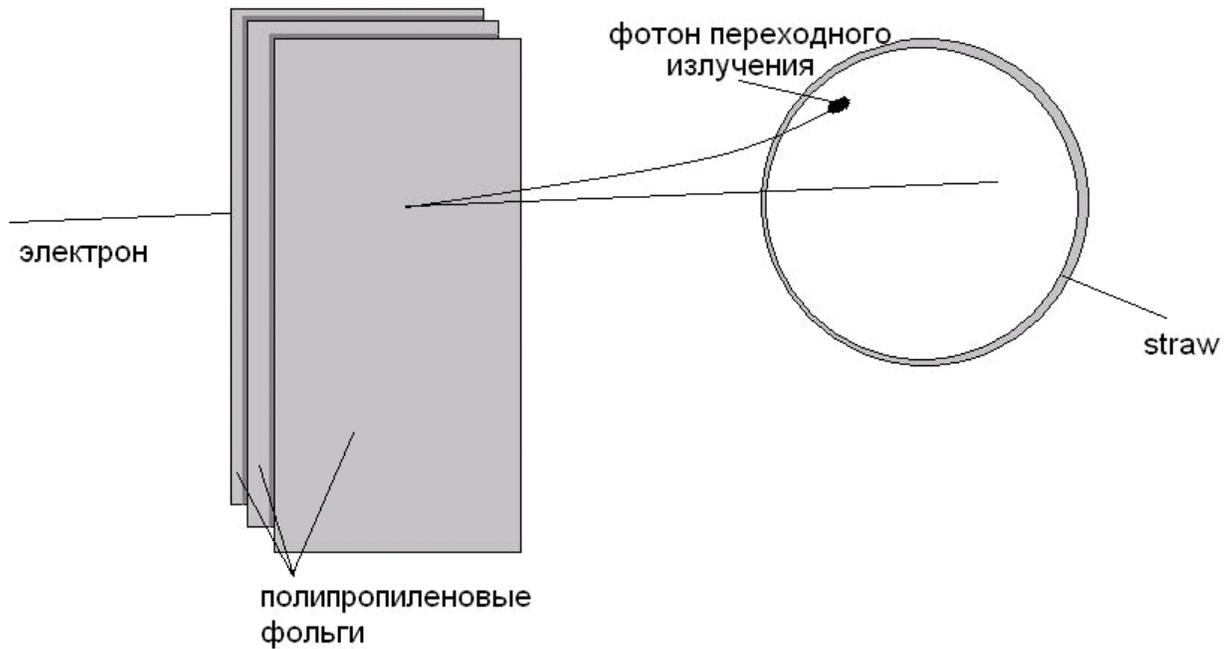


Рисунок 2-1 Фотон переходного излучения, испущенный под малым углом, когда электрон пересек границу материалов с различными диэлектрическими постоянными (для TRT: CO₂ и полипропилен)

Таким образом, это излучение позволяет идентифицировать частицы на высоких релятивистских энергиях, где Черенковское излучение или измерения ионизации не позволяют эффективно определять частицы. Разделение адронов и электронов возможно при значениях моментов от 1 ГэВ/с до 100 ГэВ/с или выше, верхняя граница определяется не только частицами, достигающими Ферми-плато, но также излучением высокорелятивистских частиц. Угловое распределение переходного излучения достигает максимума при угле $\theta=1/\gamma$, тем самым становится коллимированным вдоль направления испускания частиц. Полная энергия, испускаемая одной фольгой полипропилена, зависит от квадрата разности плазменных частот двух материалов. Если разница велика ($\hbar\omega_{\text{возд}} \approx 0.7$ эВ и $\hbar\omega_{\text{полипропил}} \approx 21$ эВ), то отношение

$$E \approx \frac{2}{3} \alpha \gamma \hbar \omega_p \quad (2.3)$$

где $\alpha=1/137$. Среднее число испущенных фотонов порядка $\alpha\gamma$:

$$\langle N \rangle \approx (\alpha \gamma \hbar \omega_p) / (\hbar \langle \omega \rangle) \quad (2.4)$$

Для того чтобы усилить поток фотонов, используется периодическая структура из большого числа фольг, перемежающаяся с детекторами рентгеновских лучей, т.е. слоями дрейфовых трубок заполненных газом с большим числом Z для эффективного поглощения рентгена, таким как чистый Хе или смесь Хе-СО₂. Обычно в качестве радиаторов используют тонкие фольги лития, полипропилена/полиэтилена или карбона. Радиаторы могут быть не только пленками, а также в виде гранул, пены или сплетеных волокон.

При оптимизации детектора, отношение $n_{\text{перех.}}/n_{\text{иониз.}}$ должно быть максимальным, где $n_{\text{перех.}}$ – это число ионов, производимое квантами переходного излучения при входе в камеру, а $n_{\text{иониз.}}$ – число ионов производимое заряженными частицами, пересекающими камеру (последнее обычно приводит к лавинам с низкой энергией). Потери энергии могут быть возмущены рентгеновским излучением (см. рис. 2-2, «хвост» распределения). Оптимизация сборки радиатор-камера должна также включать эффект ослабления рентгеновских лучей в радиаторе [18].

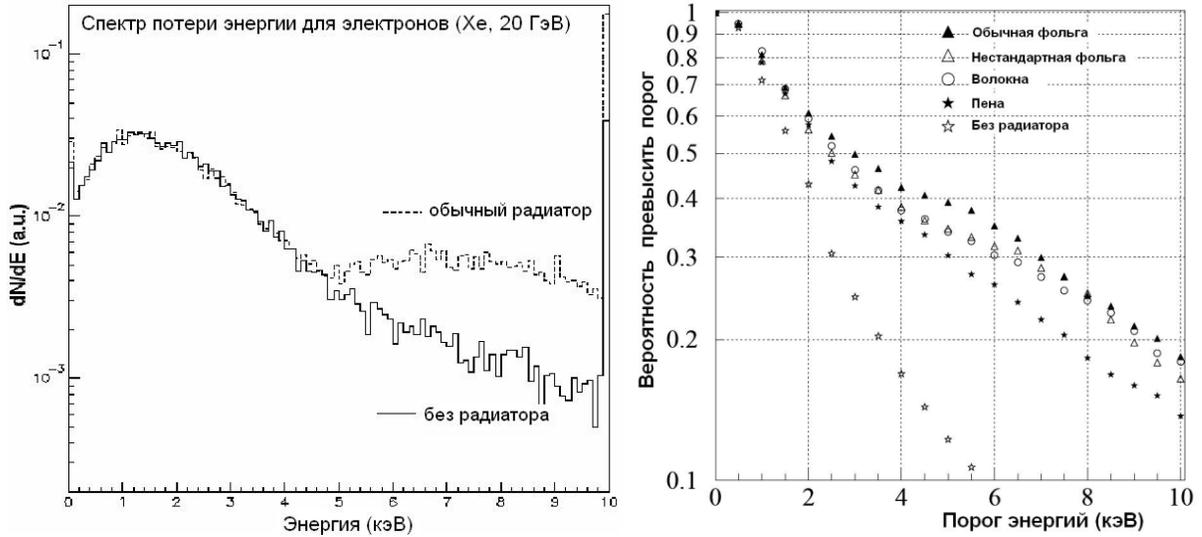


Рисунок 2-2 Спектр переходного излучения для 20 ГэВ (слева). Измеренная вероятность выделения энергии выше определенного порога в одиночной камере как функция порога, для различных видов радиаторов (справа)

Для торцевых колес используется радиатор фольгового типа, который позволяет оптимизировать параметры (толщину пленок и зазоры), чтобы обеспечить лучший поток переходного излучения. Решение, которое в конечном счете подошло для цилиндрических модулей центральной части, это использование полиэтилен/полипропиленовых волокон, ориентированных перпендикулярно к траектории прохождения заряженной частицы, что почти так же эффективно, как и обычный радиатор из фольги. Характеристики различных радиаторов переходного излучения были измерены на тестовом 200 ГэВ пучке электронов. На рис. 2-2 показана возможность наблюдать выделение энергии в одиночной камере при определенном пороге, как зависимость величины порога от радиаторов различного типа.

2.2 Требования и решения

Трековый детектор переходного излучения, являющийся важнейшей частью Внутреннего детектора (рис. 1-11), окружает пиксельный детектор, расположенный ближе всего к оси пучка, и полупроводниковый трековый детектор с его слоями кремниевых полосок-сенсоров. Это крупномасштабный газовый детектор, обеспечивающий выделение электронов на высоком адронном фоне с возможностью традиционного восстановления треков заряженных частиц (до 36 точек на трек). Современные материалы позволяют ему работать в условиях высокого радиационного фона при максимальной светимости ускорителя $2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Он обладает хорошей радиационной стойкостью и относительно низкой стоимостью в сравнении с другими технологиями восстановления треков в больших объемах, при высокой загрузке детектора.

На расчетной светимости ускорителя ЛHC $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ средняя частота счета пропорциональной камеры – около 12 МГц, с ожидаемым максимумом в 20 МГц для самых внутренних трубочек цилиндрической части и самых ближних к точке взаимодействия камер торцевой части. Основной вклад дадут ионизирующие треки, однако низко-энергетичные фотоны и медленные нейтроны также внесут ощутимую лепту (рис. 2-4). Благодаря инновационному дизайну считывающей электроники будет обеспечено должное пространственное разрешение и эффективность.

После десяти лет эксплуатации самые засвеченные камеры получают дозу радиации около 10 Мрад и подвергнутся воздействию нейтронов выше $2 \cdot 10^{14} \text{ нейтр./см}^2$. Эти цифры включают в себя 50-процентный запас фактора безопасности. Полная ожидаемая радиационная доза при переводе в ионизационный ток – 0.15 мкА/см и равна $\sim 10 \text{ Кл/см}$ суммарного заряда на проволочку. Показано, что дрейфовые трубки должны выдержать подобные дозы радиации без каких-либо заметных деградаций как их механических и электрических свойств, так и производительности [24][25]. Вынужденная радиоактивность Хе, запасенная в детекторе, будет порядка 8 мКи, что

накладывает некие ограничения на доступ и техническое обслуживание TRT-детектора [26].

Способности восстановления треков

Наиболее интересными параметрами работы TRT являются максимальное время дрейфа и изменение времени дрейфа в трубке. Они определяют наиболее важную трековую характеристику – точность измерения времени дрейфа, (т.е. пространственное разрешение) и эффективность измерения времени дрейфа. Эффективность регистрации попадания обеспечивается низко-уровневым порогом электроники, когда частица пересекает камеру.

Пространственное разрешение определяется как среднеквадратичное Гауссовского фитирования (т.е. приближения) пика остаточного распределения. Эффективность измерения времени дрейфа использует только часть распределения, лежащего внутри диапазона $\pm 2.5\sigma$ от положения центра пика. Этот интервал был выбран как оптимальный для верной реконструкции трека с высокой точностью, обеспечивающейся составляющими TRT-детектора [25].

Низко-уровневый дискриминатор определяет с высокой эффективностью смещение dE/dx от минимально ионизирующих частиц. Точное расстояние дрейфа во время тестового пучка получалось при экстраполяции трека при помощи позитронного чувствительного телескопа на силиконовых микро-полосах (с точностью около 5 мкм), расположенным перед и после дрейфовых камер. Приближение всех экспериментальных данных зависимости времени (t) от радиуса (R) в полиноме третьей степени используются затем для реконструкции месторасположения во всех камерах. Типичное т.н. взаимоотношение $R-t$ показано на рис. 2-3, где время дрейфа показано в зависимости от расстояния от проволочки.

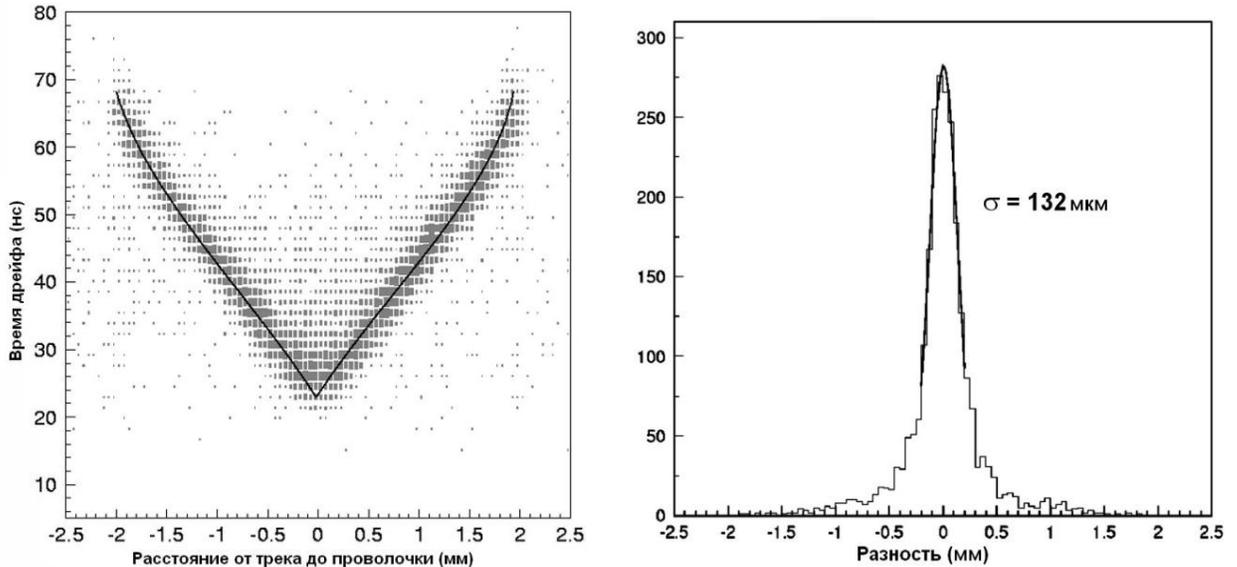


Рисунок 2-3 Измеренные отношения между временем дрейфа (t) и расстоянием от проволочки (R) для камер с невычисленной частотой (слева). Соответствующее распределение результирующих остатков (справа), показывающих положение с точностью 132 мкм при 82% эффективности регистрации времени дрейфа. Картинки сформированы на тестовом пучке без магнитного поля (2004 год)

Тестовый пучок [27] показал, что определенные 250 эВ установлены как разумный нижний предел, в соответствии с однокамерной вероятностью шума около 4.6%. На низких частотах счета была достигнута точность положения 132 мкм и эффективность измерения времени дрейфа 87%, с общей эффективностью регистрации события близкой к 96%.

Сейчас величина нижнего порога в TRT установлена на уровне 300 эВ. Среднее время сбора заряда электронов составляет ~ 48 нс. Электроника обеспечивает пространственное разрешение 130 мкм.

Идентификация частиц

Идентификация частиц происходит в газовой смеси на основе Хе при конверсии фотонов переходного излучения, которое излучается, когда заряженная ультра релятивистская частица пересекает границу раздела двух сред – полипропиленовых волокон и фольг и CO_2 газа в случае TRT детектора. Таким образом выделение энергии в т.д.п.и является суммой

ионизационных потерь заряженной частицы (2.5 кэВ в среднем) и поглощения фотонов переходного излучения (>5 кэВ).

Дискриминатор с высоким порогом, установленным примерно на 6-7 кэВ, оптимизирован для разделения электронов и пионов. Электронные треки содержат больше высоко-пороговых соударений чем пионные, и ясное электрон-пионное разделение может быть достигнуто при подсчете числа высоко-пороговых соударений вдоль реконструированного трека (рис. 2-4).

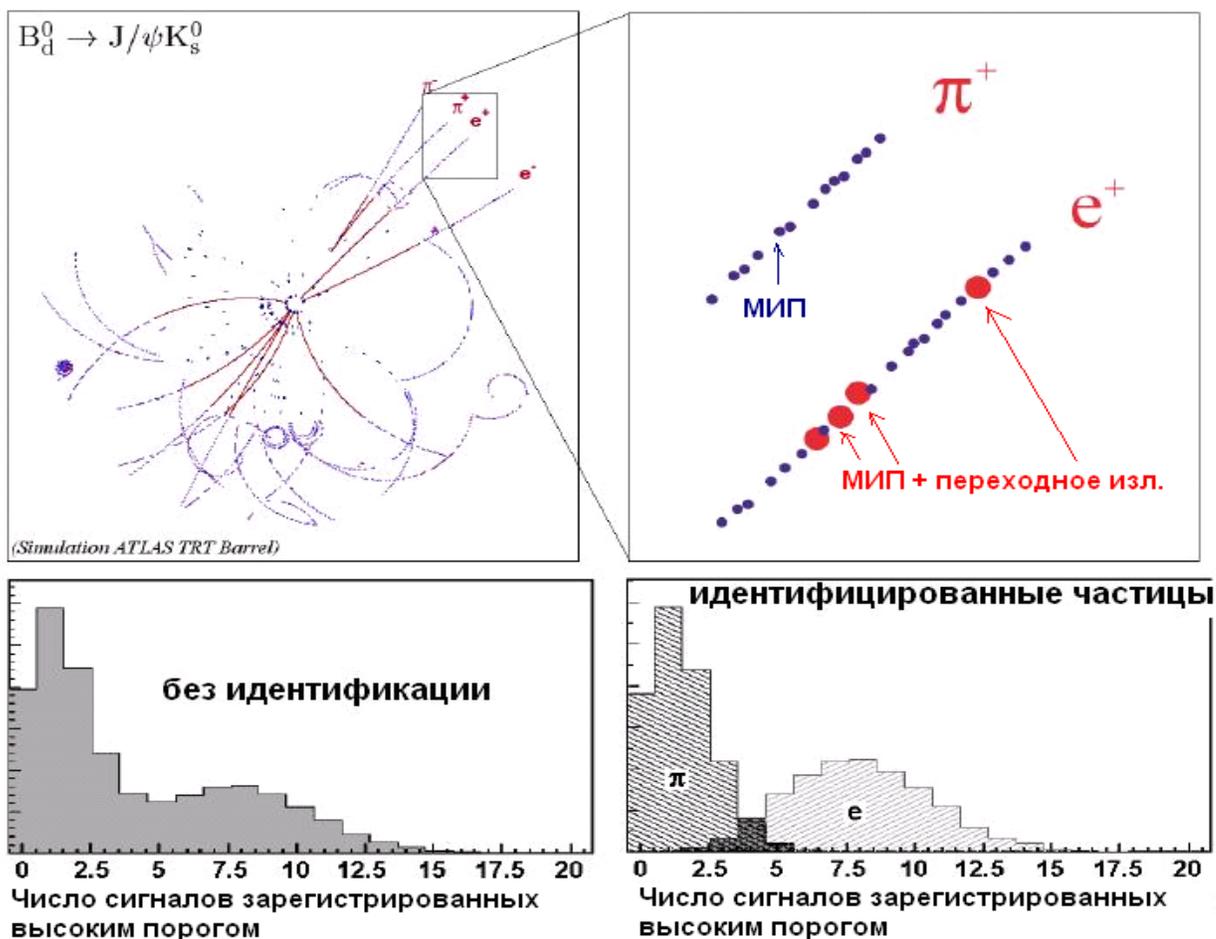


Рисунок 2-4 Иллюстрация событий от электрон-позитронного и пионного трека (моделирование). Большие красные точки указывают на срабатывания straw от конвертации фотонов переходного излучения на треке, маленькие синие точки – от минимально ионизирующих частиц. Внизу показано разделение пионов и электронов

2.3 Конструкция детектора

2.3.1 Модули цилиндрической части и колеса торцевых частей детектора

Трековый детектор переходного излучения имеет длину 6.8 м и диаметр 2.2 м. При этом является внешней оболочкой Полупроводникового детектора и Пиксельного детектора как самая внешняя часть Внутреннего детектора, который заключен в магнитный соленоид, обеспечивающий магнитное поле величиной 2 Тл, необходимое для отслеживания заряженных частиц. Детектор TRT обеспечивает регистрацию следов заряженных частиц на больших радиусах с помощью множества измерений координат трека (до 36 точек).

Как показано на рисунке 1-11, TRT включает в себя цилиндрическую и две торцевые части. Весит детектор примерно 1500 кг. Цилиндрическая часть перекрывает ± 75 см (по отношению к точке взаимодействия) вдоль направления линии пучка посредством дрейфовых трубок, расположенных вдоль его оси, в то время как две торцевые части с радиально ориентированными трубочками охватывают треки от частиц с псевдобыстротой $|\eta| < 0.8$. Таким образом, треки заряженных частиц с $|\eta| < 2.5$ и моментом $p_T > 0.5$ ГэВ пересекает примерно 36 камер, на радиусах между 56 см (64 см) и 107 см (103 см) в цилиндрической (торцевой) части TRT

Цилиндрическая часть состоит из трех радиальных секций, каждая из которых содержит 32 одинаковых модуля типа 1, 2 и 3. Самый внутренний модуль содержит по 329 трубочек, средний по 520 трубочек и самый внешний – 793 трубочки. Таким образом цилиндрическая часть TRT содержит 52 544 длинных укрепленных дрейфовых камер 150 см длиной. Чтобы ограничить загрузку (долю каналов задействованных на пересечение сгустков), каждая проволока электрически разделена посередине стеклянной вставкой, и считывание происходит с обоих ее концов. Пространство между камерами заполнено материалом радиатора, состоящим из полипропиленовых волокон низкой плотности, распределенных случайным образом, для производства переходного излучения. Каждый

модуль помещен в усиленную пластиковую оболочку из углеродного волокна, что обеспечивает жесткость и рассеивает часть тепла, производимого облученными трубочками. Особое расположение в форме шевронов разработано специально, чтобы понизить вероятность потери трека в зазоре между модулями.

Торцевая часть т.д.п.и состоит из колес двухразличных типов, называемых А и В (изначально было три типа колес). Каждая полная торцевая часть содержит 159 744 пропорциональной камеры. Колеса типа А и типа В используют 39 см камеры. Слои камер перемежаются со стопками радиаторов из 13 полипропиленовых фольг, каждая 15 мкм толщины, разделенных приблизительно 200 мкм сетчатой прокладкой (см. рис. 2-5). Колеса типа А состоят из 3072 камер, организованных в четыре ступенчатых слоя по 768 трубок в каждом (образуя тем самым 4-х плоскостное колесо). Колеса типа В имеют 8 таких ступенчатых слоев. Камеры вставлены и приклеены к внутреннему и внешнему карбоновому контуру кольца с просверленными отверстиями, с допусками порядка сотой доли миллиметра (рис. 2-5).

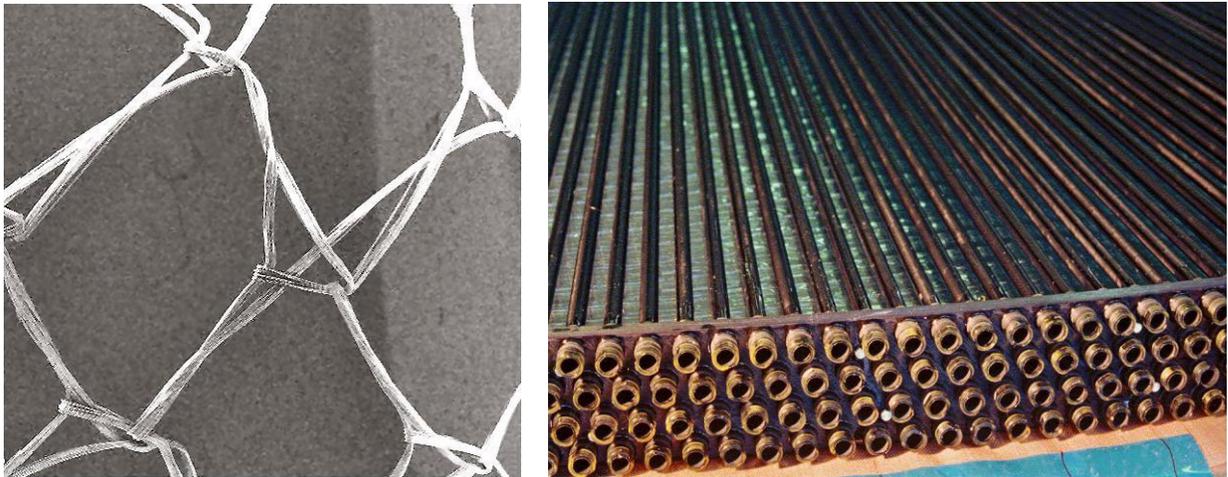


Рисунок 2-5 Слева: разделение радиаторных фольг осуществляется при помощи полипропиленовой сетки из волокон, которая включает 10% материала радиатора. Диаметр нити около 20 мкм. Справа: четырех ступенчатые слои камер, перемежающиеся со стопками радиаторных фольг, вклеенные в карбоновые контуры колес

Высоковольтные и сигнальные разъемы монтированы на гибких печатных платах, которые для удобства называют web-разъем (**Wheel End-cap Board** – от *англ.* плата для торцевых колес) Несгибаемая стеклотекстолитовая плата содержит подвижную часть, электронные компоненты и служит одновременно частью контура газового объема. Гнущаяся каптоновая² створка подводит сигнал и линии высоковольтного питания к отверстиям с направленными внутрь лепестками, обеспечивающими контакт с анодной проволокой внутри камеры (см. рис. 2-6). На один канал питания приходится 32 камеры, а web-разъем содержит 3 таких канала.

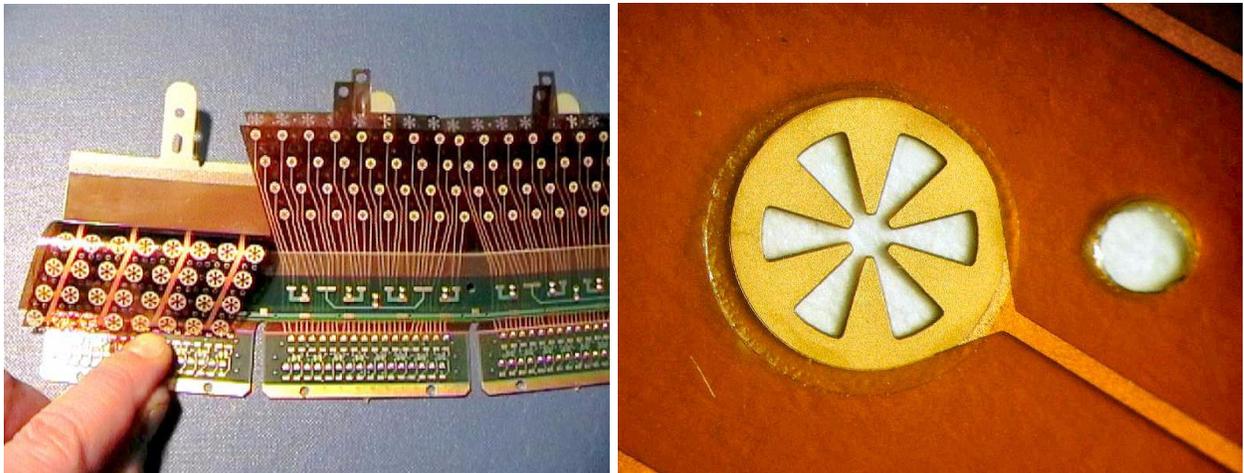


Рисунок 2-6 Соединение web-разъема, обеспечивающего высоковольтное питание и считывание электроникой

Третье карбоновое кольцо на внешнем радиусе вместе с упрощенными текстолитовыми платами (пассивный web-разъем) приклеен к активным WEB-ам, таким способом образуя внешнюю часть газового коллектора, обеспечивая прочность конструкции. Внутренний коллектор окружен восемью усиленными полиамидными картерами, приклеенными к внутреннему карбоновому кольцу.

² Kapton® - материал, разработанный компанией DuPont

Производство колес детектора было размещено в России (ОИЯИ, г. Дубна и ПИЯФ, г. Гатчина) (см. рис. 2-7). Четыре слоя с пропорциональными камерами собирались в модули, представляющие собой 8-слойное колесо (т.е. два 4-слойных колеса спаривались), которые затем переправлялись в ЦЕРН на тестирование.



Рисунок 2-7 Сборка колес торцевых частей т.д.п.и в России (слева). Вид на модуль цилиндрической части т.д.п.и: печатная плата, пропорциональные камеры и радиатор

Из-за своей различной геометрии, модули цилиндрической и торцевых частей отличаются между собой, но, несмотря на это, удовлетворяют одинаковым требованиям по упругости, пространственной стабильности, минимальности количества вещества и другим обязательным характеристикам любого внутреннего детектора в экспериментах на коллайдерах. Дополнительные сведения о конструкции колес и торцевой части детектора могут быть найдены в работах [18] и [28]. Процедура сборки колес была оптимизирована для серийного производства. Контроль качества осуществлялся на всех этапах сборки (см. гл. 4). Детали производства, входной контроль всех компонентов, проводимые тесты, а также хранение готовых изделий описано на соответствующих ресурсах [29].

2.3.2 Дрейфовая трубка

Одиночная дрейфовая трубка представляет собой пропорциональный счетчик, работающий в режиме пропорционального газового усиления, в

цилиндрической геометрии. Анод состоит из тонкой вольфрамовой позолоченной проволоки диаметром 30 мкм, натянутой вдоль оси внутри трубочки, которая является катодом. Полярная геометрия выбрана тут по двум причинам. Во-первых, из-за того, что газовое усиление, инициируемое электронами, достигается только в области с большим полем вблизи анодной проволоки. Во-вторых, постоянный фактор умножения достигается в малой области усиления, что является неотъемлемой частью цилиндрических счетчиков. В случае TRT отрицательное высокое напряжения подается на трубочку, тем самым оставляя анодную проволоку под нулевым потенциалом.

Технические характеристики трекового детектора переходного излучения главным образом определяются свойствами радиаторов переходного излучения, детектирующими элементами (straw) и обработкой сигналов. Вкратце касаясь переходного излучения эта часть диссертации сосредоточена более детально на характеристиках straw. Геометрия камер, рабочая газовая смесь и рабочие параметры будут обсуждаться в следующих параграфах.

Многие требования для улучшения характеристик детекторов на LHC уникальны, поэтому зачастую приходилось искать новые решения. Большой диаметр трубок обеспечил бы высокую эффективность регистрации, но не был бы способен справиться с высокими частотами пересечения сгустков (40 МГц, соотв. 25 нс) из-за большого времени дрейфа. 4 мм диаметр трубок TRT представляет собой компромисс между скоростью отклика, числом кластеров ионизации, механической и эксплуатационной стабильностью.

Дрейфовые трубки сделаны из 60 мкм многослойной ленты углерод-полиамид-алюминий-каптон-полиуретан (см. рис. 2-8). Их производят скручивая два типа лент на сердечнике при температуре примерно 200 °C (рис. 2-8). Четыре усиленных карбоновых волокна приклеиваются вдоль трубочки, обеспечивая необходимую механическую жесткость для безопасной работы. В системах с анодным считыванием сопротивление катода должно поддерживаться как можно более низким (меньше 300 Ом/м). Тонкий алюминиевый слой служит в качестве второго проводящего слоя,

который защищает против возможных потерь проводимости. Резкое ослабление сигнала может быть вызвано частичным удалением внутреннего углеродно-каптонового слоя после нескольких электрических пробоев [30].

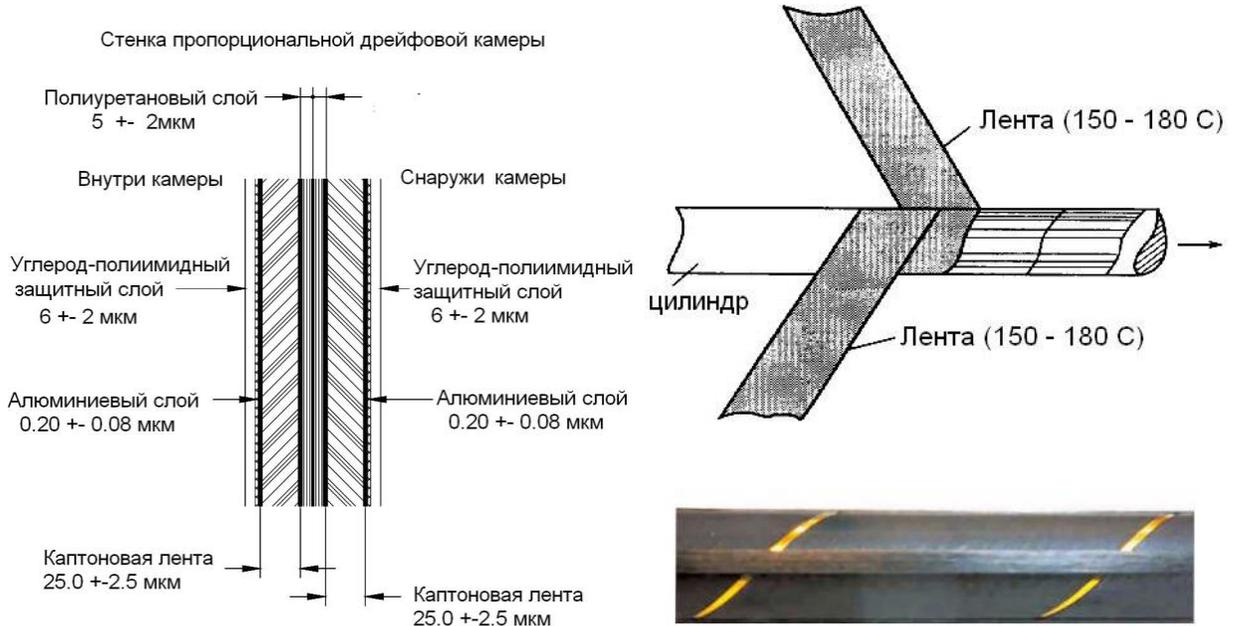


Рисунок 2-8 Многослойная лента (слева) используется для производства straw наматыванием на точный сердечник (справа сверху). Четыре углеродных волокна снаружи трубочки обеспечивают жесткость (внизу справа)

Были проведены исследования характеристик проволочек диаметром 30 мкм и 50 мкм [18]. Максимальное приемлемое газовое усиление в камере составляет $2 \cdot 10^4$ для 50 мкм проволоки, после которого частота стримеров и эффекты пространственного заряда начинают влиять на работу straw. В конце концов выбор был сделан в пользу меньшего диаметра.

Анодная проволочка толщиной 31 мкм [31], сделанная из покрытого золотом вольфрама, была произведена компанией Toshiba. Точность диаметра проволочки и ее соосность с трубкой должны быть лучше чем 1% и 2% соответственно. Электрическое сопротивление – около 60 Ом/м. Для всего TRT потребовалось около 450 км проволоки при производстве. Образцы проволоки от каждой бухты проверялись на электрическое сопротивление и на прочность на разрыв. Качество поверхности проволоки и

изменения диаметра (см. рис. 2-9) проверялись с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM – от англ. Scanning Electron Microscope).

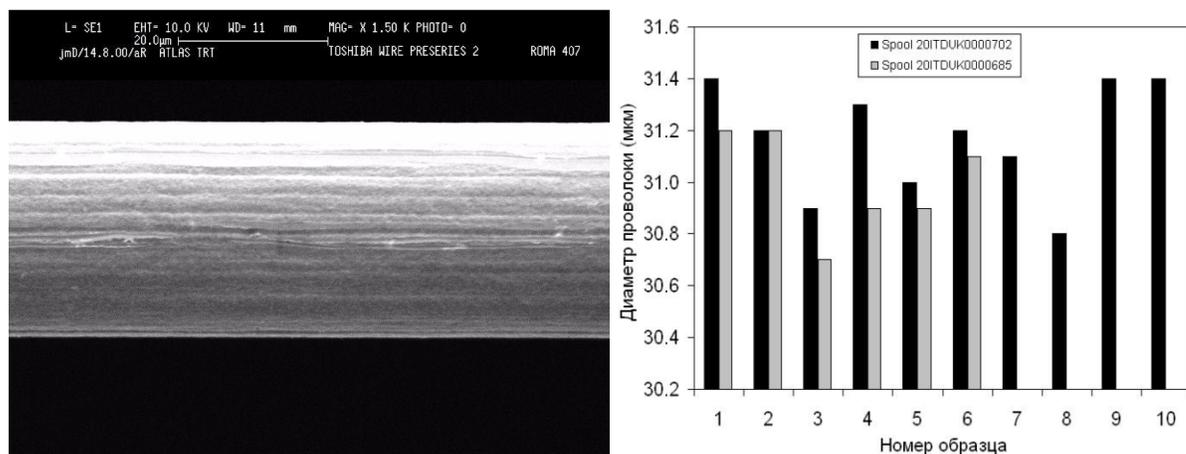


Рисунок 2-9 Слева: изображение качества поверхности проволочки с электронного микроскопа (SEM). Справа: изменения диаметра проволоки

Как отмечалось выше, анодная проволока находится под нулевым потенциалом (через защитный диод) и сигнал считывается через последовательный резистор 24 Ом front-end электроникой (см. раздел 2.3.5).

2.3.3 Рабочие смеси газов и газовая система

Выбор составляющих рабочей газовой смеси определялись ограничениями выбора диапазона по физическим требованиям безопасности окружающей среды и финансовой разумности. В условиях старения следует избегать классических водородо-углеродных рабочих газов, особенно в эру новых высокоэнергетичных, высокочастотных экспериментов на коллайдерах. Они часто взрывоопасны и поэтому требуют огромных усилий для обеспечения должной безопасности при эксплуатации.

От первоначального выбора Xe-CF₄-CO₂ (70%-20%-10%) пришлось отказаться, и смесь была изменена на Xe-CO₂-O₂ (70%-27%-3% соответственно) из-за нерешенной проблемы использования CF₄ в детекторе (разрушение стеклянных вставок внутри трубочек под воздействием HF).

Среди других возможностей была принята замкнутая газовая система с газовой очисткой (для экономии Xe), которая была адаптирована для

подготовки, мониторинга и восстановления газа. Высокая стоимость ксенона требует рециркуляцию 2.5 м^3 газовой смеси.

Компоненты рабочей газовой смеси

Как основной компонент смеси ксенон Xe был выбран за свое превосходное поглощение рентгеновских лучей. Доля ксенона в газовой смеси 70% является оптимальным равновесием между эффективным поглощением переходного излучения и рабочей стабильностью смеси.

Диоксид углерода CO_2 , являющийся гасящей люминесценцию добавкой, также называемый «холодным газом», обеспечивает отличные характеристики времени дрейфа, а именно плато постоянной скорости дрейфа в трубочке, низкую продольную диффузию и малое отклонение в магнитных полях. И даже больше, он представляет собой стабилизирующий фактор в газовой смеси, эффективно поглощая УФ фотоны, производимые в процессе ионизации и, таким образом, пространственно ограничивая лавины. В большей степени, чем вдоль проволоки, лавины развиваются радиально, как стримеры, в случае очень больших образований зарядов от сильно ионизирующих частиц с низким значением момента или непредвиденных увеличений значений электрического поля. Подавление поперечных распространений стримеров ограничивает их в так называемый самогасящий режим. Как рабочий режим, он более благоприятный чем полный разряд между катодом и анодом. Минимум 6% диоксида углерода необходимо TRT детектору чтобы ограничить разряды самогасящим режимом.

Чтобы улучшить так называемое старение и защитные характеристики от искр диоксида углерода, необходимо добавление примеси. Чтобы восстановить скорость дрейфа и минимизировать накопления, желательно использовать быстрый молекулярный газ. Однако использование огнеопасных газов в экспериментах на ЛНС запрещено, требования безопасности очень жесткие и нелегко выполнимы для больших детекторов.

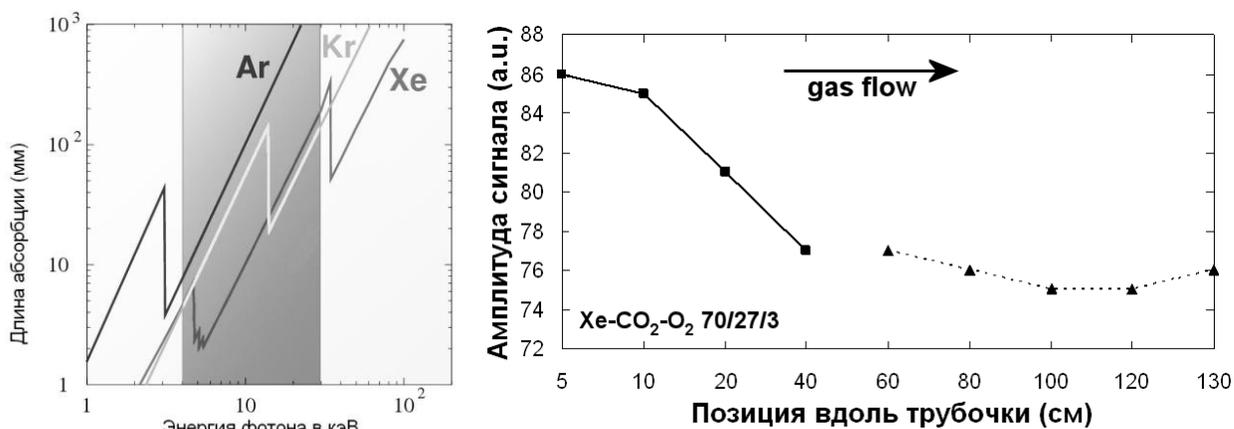


Рисунок 2-10 Длина поглощения фотона различными газами (слева). Справа: газовое усиление вдоль трубочки цилиндрической части детектора, наблюдаемое после облучения в течение 1.5 часов на идентичной максимальной ожидаемой плотности тока на БАК 0.125 мкА/см, при нормальном течении потока газа. Проволока камеры была разбита на две части стеклянным соединением и считывание происходило с обоих концов

Тетрафторид углерода (CF_4) изначально был выбран для рабочей газовой смеси TRT детектора. Несмотря на его эффективность в подавлении нагара на углеводородных или силикон-содержащих проволоках, его использование позже стало объектом дискуссий. Было обнаружено, что фтор-содержащие составляющие (CF_x , F, $\text{F}_2\dots$) вызывают разрушение стеклянных соединителей проволоки внутри трубочки в центральной части детектора и может повредить другие компоненты детектора при долгом использовании [32]. Сверх того, большое количество молекул CF_4 в соединении с радиацией и влажностью на уровне 1000 ppm (частиц на миллион) приводит к образованию кислоты HF , которая может серьезно повредить слой золота на проволоке [24] и сократить время жизни стеклянных соединений, что в конечном итоге приведет к обрыву анодной проволоки.

Так как обе газовые смеси Xe-CF_4 и Xe-CO_2 не могут обеспечить стабильную работу при достаточном диапазоне напряжений в дрейфовых трубках, пришлось в смесь включить еще одну добавку. Углеводородные газы стабилизируют коэффициент усиления, но они склонны к полимеризации на анодной проволочке.

Наконец альтернатива была найдена. В смесь добавили кислород O_2 , и смесь получила следующий состав: 70%Xe – 27%CO₂ – 3%O₂. Концентрация

кислорода ниже 3.5-4% не влияет на характеристики TRT детектора, однако количества газа более 2% достаточно, чтобы обеспечить стабильность работы. Сам по себе кислород «прозрачный» для ультрафиолетовых фотонов, так что стабилизация обеспечивается молекулами озона (O_3), производимого в лавинах. Косвенные потери в амплитуде из-за высокой электроотрицательности озона были измерены на уровне 13% от текущей плотности тока 0.125 мкА/см (рис. 2-10 справа), соответствуют концентрации кислорода O_2 не более чем 150 ppm – эффект, не оказывающий заметного влияния на характеристики детектора [26].

Новая газовая смесь имеет очень хорошие очищающие свойства по отношению к углеводородным отложениям. Недостаток, однако, остается: кислород не подавляет и не удаляет силиконовые отложения с проволоочки так хорошо, как это делает смесь с CF_4 . Хотя все возможные измерения были проведены, чтобы снизить риск силикон содержащих загрязнений в системе, это ухудшение сохраняет возможность использования смеси на основе $Ar-CF_4$ как вариант для коротких запусков для чистки детектора в дальнейшей работе.

Замена основной газовой смеси в 2002 году потребовала заново померить характеристики газа, особое внимание уделить фактору безопасности. Оказалось, что в некоторой степени новая газовая смесь 70%Xe – 27% CO_2 – 3% O_2 имеет сходство с первоначальной смесью Xe- CF_4 - CO_2 (см. рис. 2-11).

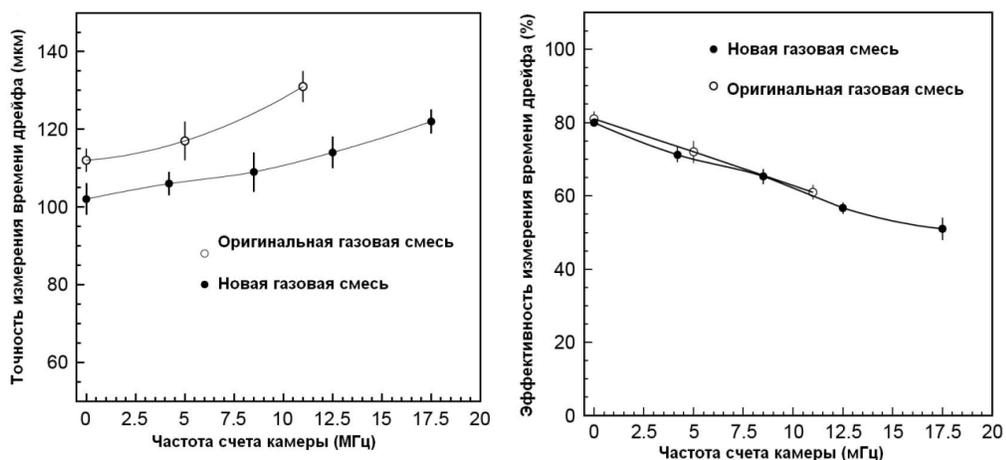


Рисунок 2-11 Пространственное разрешение (слева) и эффективность (справа) как функция частоты (на тестовом пучке в 2002 году)

Активная газовая система

Циркуляционная активная газовая³ система для TRT-детектора [33] состоит из следующих основных компонентов (рис. 2-12):

- первичная газовая станция (газовые баллоны, сосуды Дьюара)
- газовый смеситель
- 500-литровый буферный объем
- предраспределитель и насосный модуль (в помещении USA15)
- модуль распределения (в пещере детектора UX15)
- система очистки с буферным объемом
- модуль удаления CO₂
- модуль восстановления газовой смеси
- газ-анализирующая система

³ Активный газ – это устоявшийся термин для TRT детектора, относится к рабочей смеси газов в камерах.

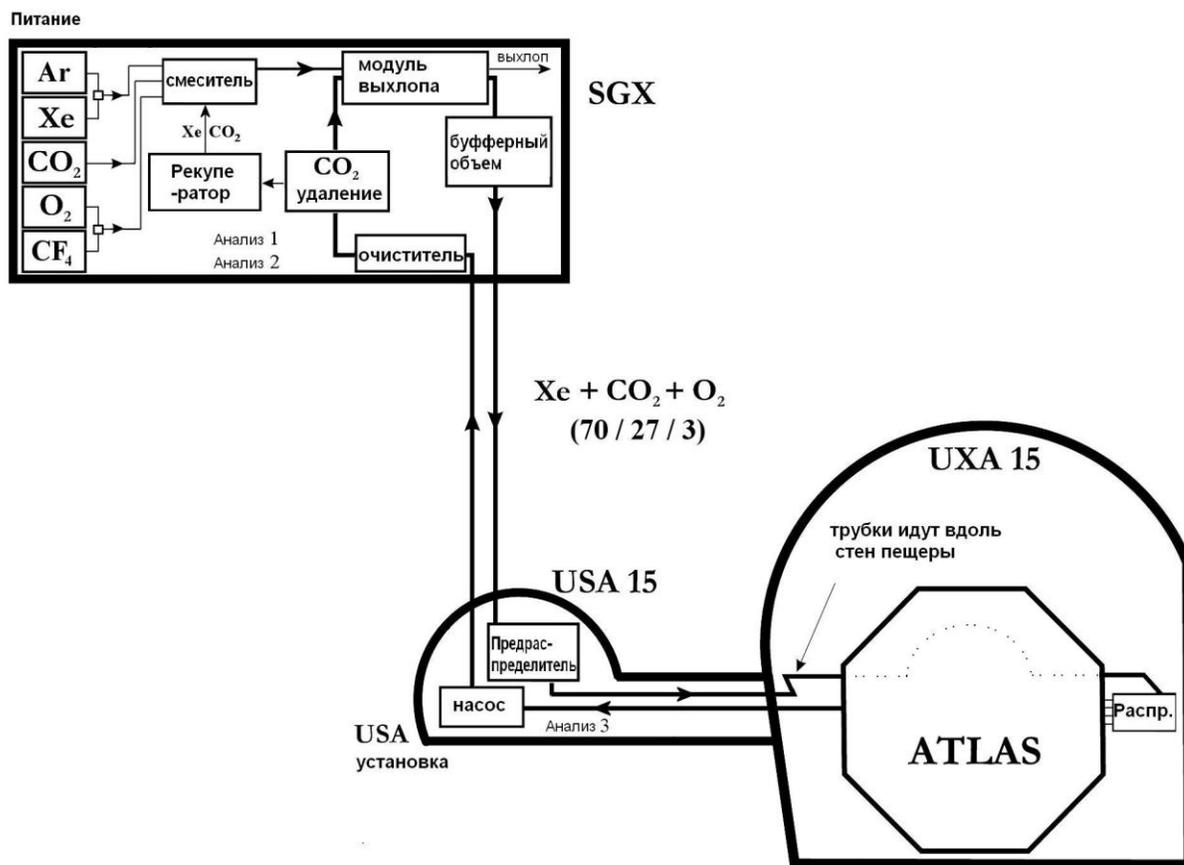


Рисунок 2-12. Схема активной газовой системы ATLAS TRT с ее функциональными блоками

Газовая система должна обеспечивать рабочей газовой смесью ($\text{Xe}-\text{CO}_2-\text{O}_2$ 70/27/3) 84 детекторных модуля, с частотой циркуляции около одного объема в час. По экономическим причинам газ циркулирует в замкнутом объеме со встроенной системой очистки (т.е. входящей в замкнутую систему). Вследствие радиации от коллайдера и нормального газового усиления в камерах производится небольшое количество озона O_3 , который конвертируется в O_2 при помощи катализатора в модуле очистки.

Стабильность газовой смеси очень важна в любых газовых детекторах. В отличие от других детекторов, в TRT имеют место несколько процессов, которые могут изменить требуемый состав газов, такие как, например, диффузия CO_2 , заполняющего пространство между камерами детектора, через стенки трубок. Содержание CO_2 постоянно измеряется и

корректируется системой удаления CO_2 . Таким же образом количество потерь ксенона в межтрубковый объем должно удерживаться на максимально низком уровне, чтобы избежать потерь переходных фотонов вне объема детектирующих элементов, которые ухудшают способность идентифицировать частицы.

Пропорции газовой смеси должны оставаться стабильными, чтобы обеспечить точность характеристик детектора. Например, снижение концентрации ксенона негативно влияет на эффективность режекции пионов, в то время как увеличение концентрации кислорода быстро приводит к потере сигнала. Говоря точнее, увеличение количества ксенона на 5% от номинального улучшает режекцию пионов 1.5 раза, но приводит к увеличению частоты разрядов в 3 раза. Хотя повышенный уровень кислорода может увеличить рабочий коэффициент безопасности, он значительно портит энергетическое разрешение. Изменения в составе газа могут значительно повлиять на кривую скорости дрейфа и, таким образом, немедленно повлиять на зависимость $R-t$, которая используется для реконструкции координат частиц в камере.

2.3.4 Газовое охлаждение и вентиляция

Работа TRT-детектора в условиях больших потоков частиц, высокого радиационного фона приводит к необходимости охлаждения [34][35][36] не только front-end (электроники считывания) интерфейсной электроники, но также и самих трубок. Средняя энергия, выделяемая в straw, – около 2.5 кэВ на частицу для МИП. Ионизационный ток приводит к общему рассеянию энергии около 10-20 мВт на канал на пиковой светимости ускорителя. Чтобы поддерживать характеристики детектора и сохранять установленный экспериментально градиент температуры в детекторе, необходимо охлаждение детектора. Эта тепловая мощность должна эффективно убираться.

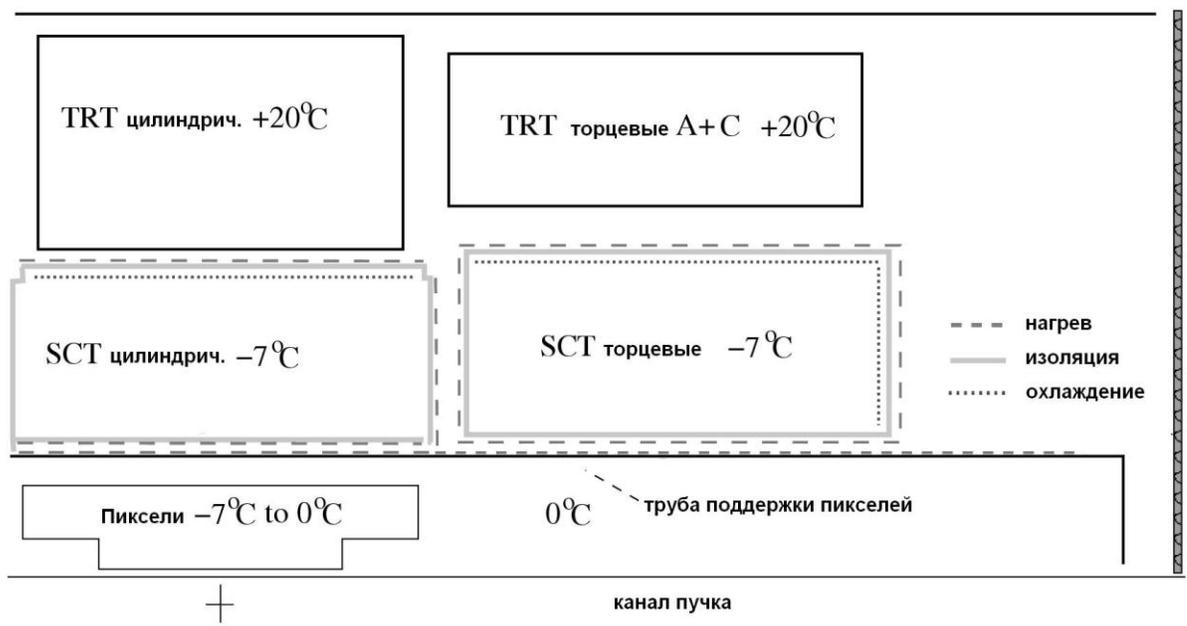


Рисунок 2-13 Схема охлаждения внутреннего детектора [34]

Внутренний детектор должен быть в целом теплонейтральным, и три его подсистемы не должны обмениваться теплом между собой. Если силиконовые детекторы и пиксельные детекторы работают в холоде (от -7°C до 0°C) в среде азота, то TRT детектор работает в тепле ($+20^{\circ}\text{C}$) в среде CO_2 (см. рис. 2-13). Поэтому теплоэкраны или теплоизоляторы необходимы вокруг холодных частей.

Полная тепловая нагрузка от камер TRT (от электроники) – около 3360 Вт (32 040 Вт) для торцевой части и 800 Вт (10 200 Вт) для цилиндрической.

Электроника охлаждается при помощи жидкого фреона C_6F_{14} при температуре 16°C , текущего по трубкам системы охлаждения в тепловом контакте с панелями считывающей электроники. Камеры торцевых частей охлаждаются потоками CO_2 , продуваемыми с частотой 150 м^3 в час, что соответствует примерно 18 изменениям объема в час (6 м^3 объем детектора, 2.5 м^3 суммарный объем трубок охлаждения).

Колебания давления должны держаться на уровне не больше ± 5 мбар. При таком большом потоке изменения давления происходят со скоростью

больше 1 миллибара в секунду, что делает систему безопасности детектора крайне важной.

Тепло передается через теплообменники к C_6F_{14} (см. рис. 2-14). В цилиндрических модулях тепло просто передается оболочке модулей и удаляется при помощи охлаждающих трубок с фреоном.

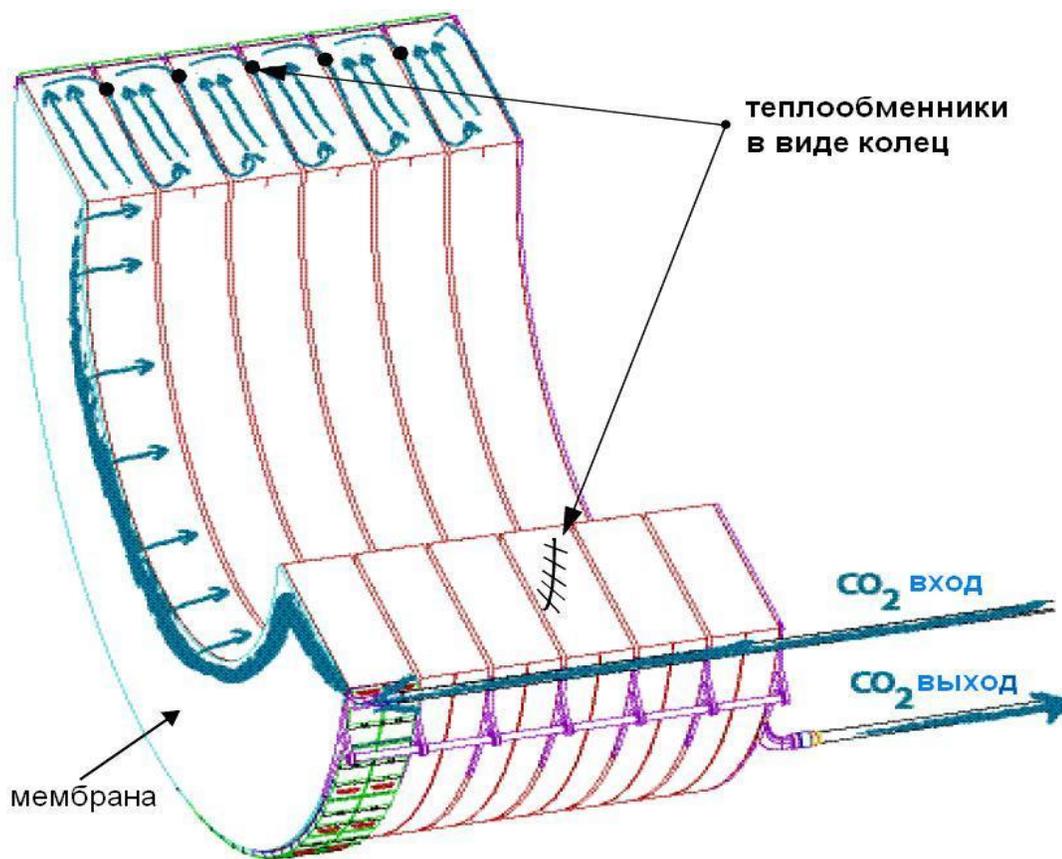


Рисунок 2-14. Схема CO_2 охлаждения потоками группы колес

Еще одна задача обдува CO_2 в TRT детекторе – это вентиляция. Как уже упоминалось выше, концентрация азота в CO_2 должна быть ниже 1% и испарение воды ниже 500 ppm. Чтобы избежать нежелательного поглощения переходных фотонов в межкамерном пространстве, уровень ксенона должен быть ниже 0.1%.

То обстоятельство, что имеются различные охлаждающие газы для TRT детектора (CO_2) и силиконового/пиксельного детекторов (N_2),

необходимо обеспечить два независимых газовых объема. Это вытекает из того факта, что азот несовместим с работой TRT детектора, а диоксид углерода взаимодействует с системой FSI (частото-сканирующая интерферометрия) силиконовых и пиксельных детекторов, что к тому же добавляет риск образования кислоты.

2.3.5 Считывающая электроника

В основе архитектуры считывающего интерфейса лежат биполярные усилитель и формирователь (ASDBLR) [37][38] и цифровой чип CMOS (DTMROC) [39][40]. Она сделана на заказ под требования TRT-детектора. Ниже указан лишь короткий обзор, в котором указаны наиболее важные моменты.

Для достижения желательного пространственного разрешения и характеристик переходного излучения, считывающая электроника должна обеспечивать следующее:

1. Усиливать входящий сигнал с анодной проволоочки.
2. Формировать усиленный сигнал (время нарастания импульса – 7.5 нс, ширина выходного – 20 нс) и удалять «хвосты», возникающие от дрейфа ионов для того, чтобы оставить мертвое время малым и достигнуть требуемой эффективности при полной светимости (60% на 20 МГц).
3. Применять низкоуровневый порог (300 эВ) для обнаружения минимально ионизирующей частицы для функционирования в режиме трекера. Применять высокоуровневый порог (~6 кэВ) для обнаружения сигналов от фотонов переходного излучения для идентификации электронов.
4. Получать временную информацию о пролете частицы с точностью 3 нс для низкоуровневых сигналов, для того, чтобы привести текущую позицию трека (с точностью <160 мкм) относительно момента прихода импульса.

5. Хранение временной информации о состоянии самого канала передачи данных и информации о том, достиг или нет входной сигнал величины низкого или высокого порога. Это должно быть сделано для каждой ветви, пересекаемой в течение мертвого времени триггера первого уровня.
6. Для каждого принятия триггерного сигнала первого уровня (L1A), извлечение информации о канале передачи данных соотносится с пересечением ветви, которая дает начало триггеру и двум последующим пересечениям ветвей.
7. Накопленные в считывающем драйвере данные (Read-out Driver) от многих каналов должны сжиматься, форматироваться и отсылаться в буфер считывания.
8. Измерения времени и контроль чипа DTMROC управляются временной и контрольной панелью, TRT-TTC, которая осуществляет это через стандартный протокол ATLAS TTC для набора чипов TRT.

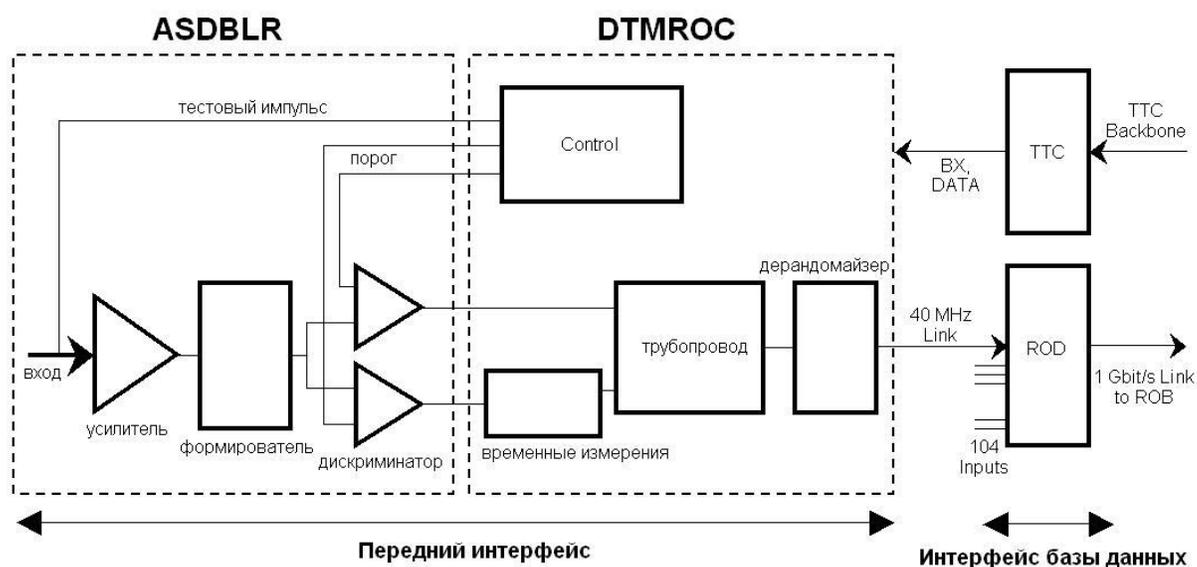


Рисунок 2-15 Схема front-end (передний) интерфейса и интерфейса баз данных в ATLAS

Задачи 1-6 выполняются электроникой, расположенной непосредственно на детекторе (см. рис. 2-16), включающей две интегрированные цепочки, аналоговой ASDBLR (Amplifier-Shaper-Discriminator with BaseLine Restoration) и цифровой DTMROC (Drift Time Measurements Read-out Chip). Установки порога на ASDBLR контролируются DTMROC.

Задача 7 реализована с помощью интерфейса баз данных, который расположен вне детектора в подземной сервисной зоне USA15. Обработка аналогового сигнала и функциональных блоков DTMROC показаны на рис. 2-17 и рис. 2-18.



Рисунок 2-16 Интерфейсные панели электроники торцевой части (слева) и цилиндрической части детектора (справа)

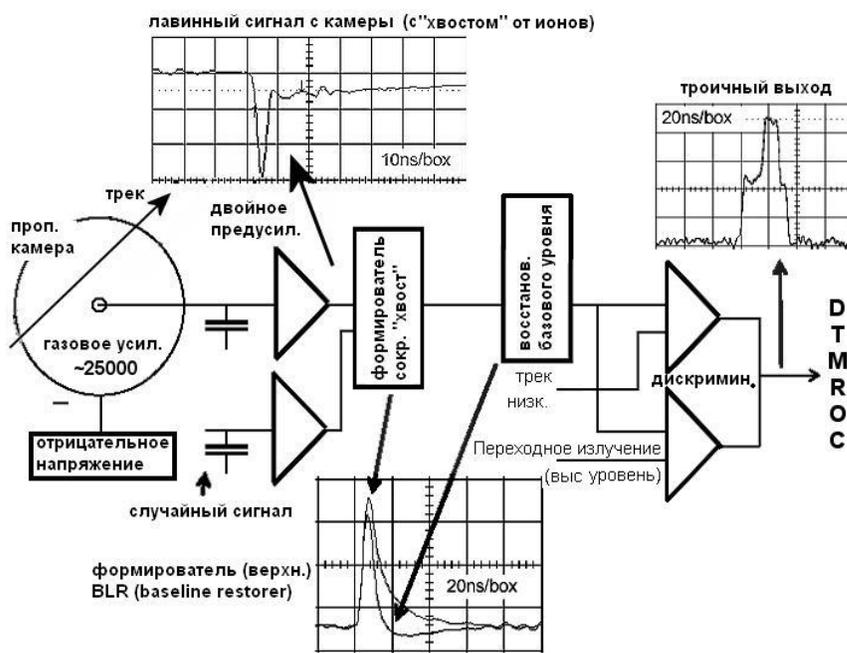


Рисунок 2-17 Схема аналоговой части TRT интерфейсной электроники (ASDBLR)

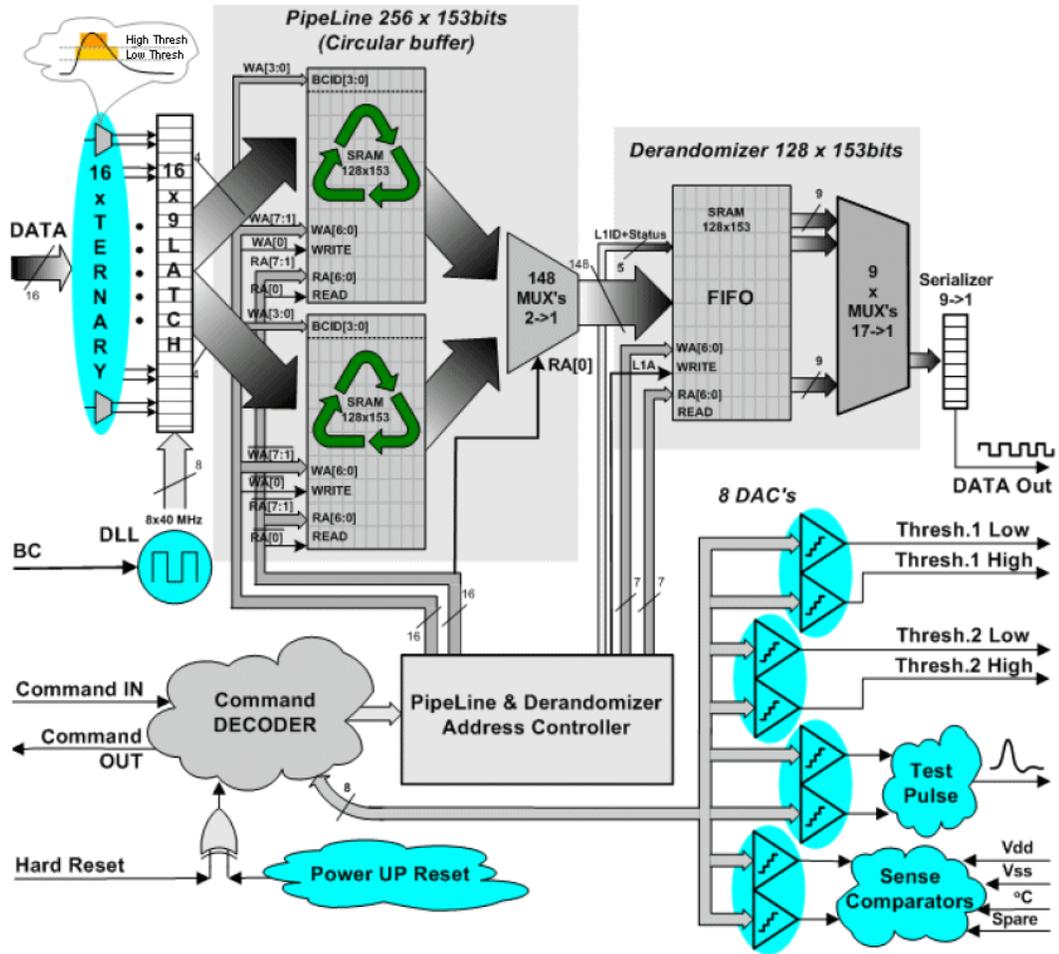


Рисунок 2-18 Схема цифровой части TRT интерфейсной электроники (DTMROC)

ГЛАВА 3

ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ ТРЕКОВОГО ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ATLAS

3.1 Выбор высоковольтного источника питания для трекового детектора переходного излучения

Характерной особенностью Трекового Детектора Переходного Излучения является то, что этот детектор в установке ATLAS является практически абсолютная недоступность его обслуживания, так как TRT представляет собой внутреннюю часть установки (Inner Detector).

Большое количество дрейфовых трубок в TRT (примерно 300 000 штук) определяет достаточно высокую вероятность выхода из строя какой-либо из них. Обеспечение диагностики неисправных straw и их своевременное отключение является важным моментом в работе TRT

Последствия таких неисправностей могут быть весьма серьезными. Так, например, падение анодной проволочки на катод при обрыве может вызвать прогорание катода – тонкой стенки straw. Многократный искровой пробой между анодом и катодом также может привести к прогоранию катода. В свою очередь прогорание катода с образованием сквозного отверстия приведет к утечке дорогостоящего газа Хе, являющегося основным рабочим веществом детектора (самих straw).

Все это предъявляет специфические требования к высоковольтной системе питания straw. Система питания дрейфовых трубок сама должна диагностировать наличие пробоев в них и быстро отключать питание, задолго до образования сквозных отверстий в катоде.

Поскольку практически нереально обеспечить каждую straw отдельным источником высоковольтного питания (примерно 300 000 каналов),

необходимо объединять straw в группы, каждая из которых будет обеспечиваться одним высоковольтным источником питания.

Исходя из структуры TRT и оптимизации количества высоковольтных каналов на детектор при разумных токах потребления, принятое максимальное количество straw, подключаемых к одному высоковольтному каналу, равно 192.

Таблица 3-1 Распределение линий высоковольтного питания (каналов) в модулях детектора

Торцевая часть (сторона А)	
Общее число HV линий	768
Общее число straw	147 456
Торцевая часть (сторона В)	
Общее число HV линий	512
Общее число straw	98 304
Центральная часть	
Общее число HV линий	704
Общее число straw	52 544
Общее число высоковольтных линий	1984
Общее число straw	298 304

Таблица 3-2 Токи, ожидаемые в одном регистрирующем элементе (straw) для модулей разного типа в условиях работы детектора при максимальной светимости ускорителя LHC

	Кол-во straws	Кол-во линий	straw/ линия	I(mA)/straw при полной светимости	Общий I(mA)/line	I _{max} / линии mA
Торцевая часть (сторона А)	147456	768	192	0.0045	0.864	1.7
Торцевая часть (сторона В)	98304	512	192	0.0045	0.864	1.7
Центральная часть модуль типа 1	10528	192	55	0.02	1.1	1.7
Центральная часть модуль типа 2	16640	192	87	0.01	0.87	1.7
Центральная часть модуль типа 3	25376	320	80	0.006	0.48	1.7

Тогда для питания всех straw TRT потребуется ~2000 высоковольтных каналов (линий). Максимальный ток в отдельной линии ожидается ~1.7 мА.

Итак, каждый из 2000 высоковольтных каналов должен обеспечить питание 192 дрейфовым камерам напряжением отрицательной полярности до 2 кВ (рабочее напряжение 1530 В) при максимальном токе нагрузки до 3 мА (с двойным запасом относительно ожидаемого 1,7 мА).

Одним из принципиальных требований к высоковольтному источнику питания для TRT-детектора является наличие надежной защиты от пробоев. Пробои в straw опасны тем, что приводят к разрушению поверхности катода, вплоть до образования отверстий, что в свою очередь приводит к утечке рабочей смеси газов, содержащей дорогостоящий Хе. Поэтому контроль за

количеством пробоев и их частотой является одним из важных требований к системе высоковольтного питания.

Критическая ситуация в камере может быть в двух случаях:

- Короткое замыкание анодной проволоочки на катод, например вследствие обрыва проволоочки. В этом случае необходимо ограничить ток короткого замыкания по величине и во времени. Это достаточно просто обеспечивается практически всеми высоковольтными источниками питания путем фиксирования предельно допустимого тока в нагрузке. В случае превышения предельного тока высоковольтный канал отключается.
- Несколько сложнее защита от многократных пробоев в straw между катодом и анодом вследствие провисания проволоочки или других причин искажения электрического поля (например, образование неровностей на поверхностях внутри straw во время длительной эксплуатации детектора). В этом случае критерием для отключения высоковольтного питания является количество пробоев или их частота. Если их количество превышает допустимое, то катод разрушается, вплоть до прожигания отверстия.

Были проведены исследования на предмет стабильности высокого напряжения во времени, стабильности калибровок во времени и определения допустимого количества пробоев, при котором straw не выходит из строя.

На первом этапе исследований в качестве источника высоковольтного питания использовался промышленный одноканальный источник питания CAEN 126.

В этом источнике питания, как и в последующих разработках CAEN устанавливаемый порог по току потребления I_{trip} определяется неким средним током нагрузки за определенный интервал времени. Этот средний ток в нагрузке определяется как постоянной составляющей (например, током при коротком замыкании), так и импульсным током пробоя и частотой пробоя, т.е. интегральным током нагрузки.

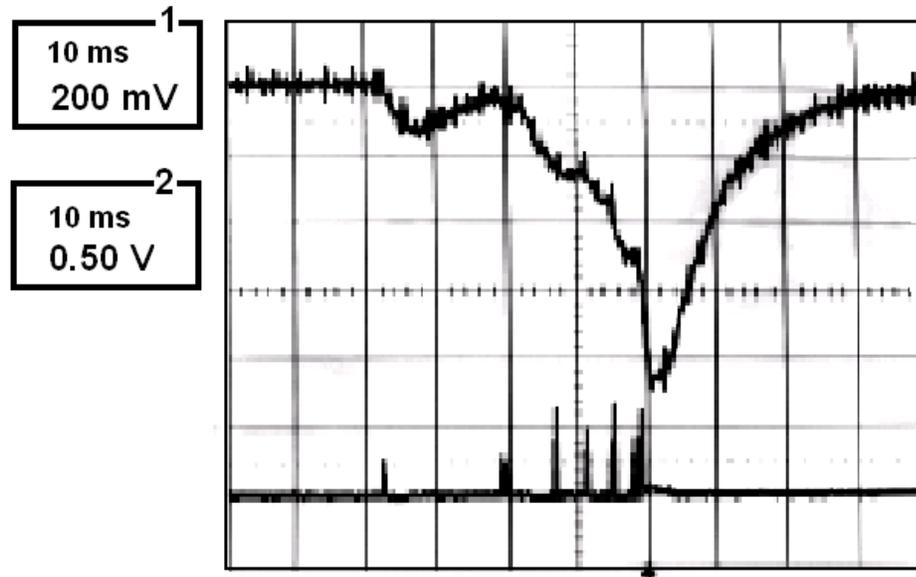


Рисунок 3-1 Характерная осциллограмма изменения тока нагрузки, полученная в условиях пробоев в straw (верхний луч осциллограммы). Нижний луч – пробои в камере straw

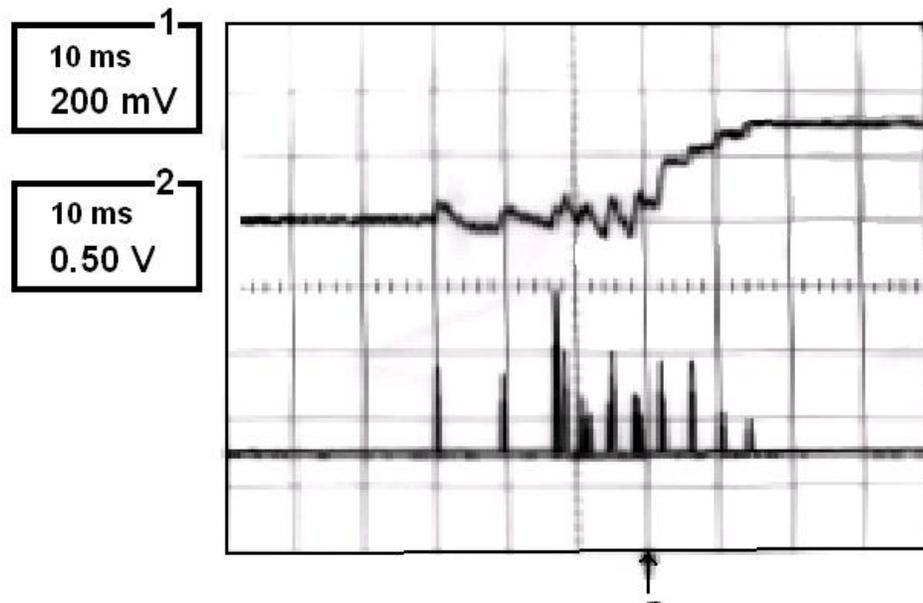


Рисунок 3-2 Осциллограмма, на которой можно видеть изменение выходного напряжения при наличии пробоев в straw (верхний луч осциллограммы). Нижний луч – пробои в камере straw

Триггером запуска осциллографа служил сигнал отсечки по току I_{trip} .

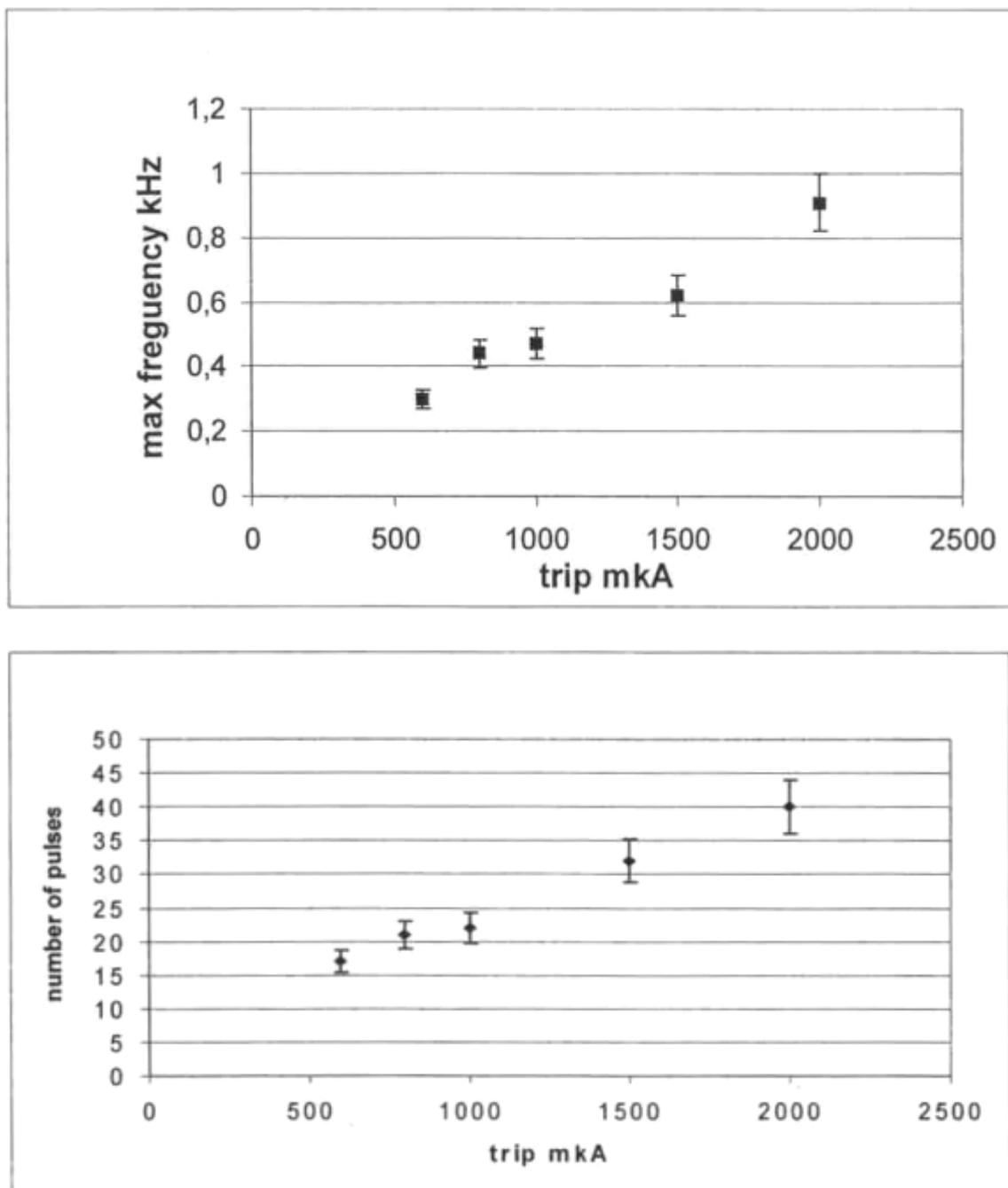


Рисунок 3-3 Представлены зависимости порогового тока (I_{trip}) отключения высоковольтного источника от частоты пробоев (сверху) и количества пробоев (снизу)

Анализ экспериментальных данных, полученных при работе с высоковольтным источником CAEN 126, позволил перейти к исследованию возможности использования многоканальной системы высоковольтного питания фирмы CAEN в качестве рабочего варианта для TRT эксперимента ATLAS.

Была использована система SY1527, укомплектованная многоканальным источником питания A1734N.

Источник SY1527 (см. рис. 3-4) представляет собой крейт в стандарте EuroMechanic. В нижней части крейта расположен силовой блок питания, сзади размещаются модули высоковольтных каналов. Всего в крейте может быть размещено 16 модулей одинарной ширины. В исследованиях использовался модуль A1734, содержащий 12 независимых каналов питания.



Рисунок 3.4 Источник питания SY1527

На передней панели расположен монитор, отображающий состояние параметров каналов питания, миниклавиатура, а так же разъемы различного коммуникационного назначения.

Схема подключения одного из высоковольтных каналов к straw приведена на рис. 3-5.

Straw объединены в группы по 8, в цепь питания каждой из таких групп включен специальный высоковольтный предохранитель Fuse. Имитация аварийной ситуации (пробой в одной из straws) осуществляется путем прогибания straw в точке ее облучения радиоактивным источником Fe^{55} . Прогибание стенки камеры приводит к искажению электрического поля и к пробоям от заряженных частиц источника.

Сигнал снимался для контроля напряжения на камере (точка 1 на рис. 3-5). В цепи высоковольтного питания снимался сигнал от искровых пробоев (точка 2 на рис. 3-5). Результаты фиксировались на двухлучевом цифровом запоминающем осциллографе.

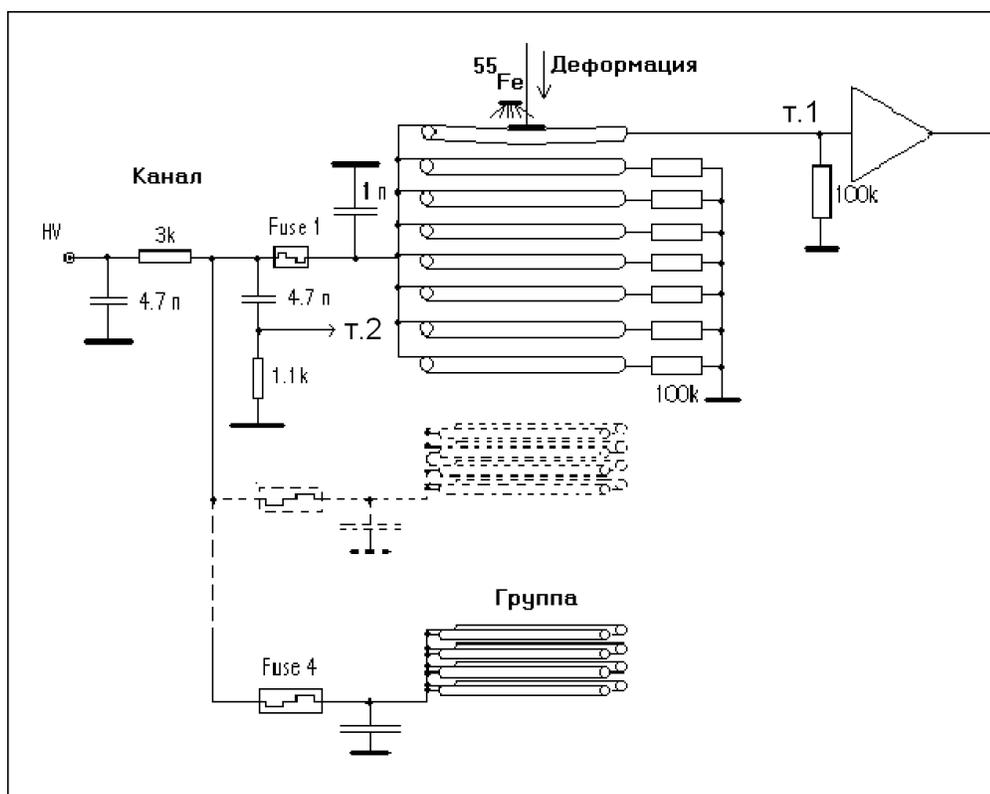


Рисунок 3-5 Схема подключения одного из высоковольтных каналов к straw

На рис. 3-6 приведены осциллограммы сигналов. Здесь ch1-сигналы от пробоев, полученные с анода straw (т.1 рис. 3-5), ch2 – изменение напряжения на катоде камеры.

$dT=0$ и $dT=0.2c$ – время задержки срабатывания trip-логики (trip delay). Если в течение этого времени ток нагрузки превысит пороговое значение, сработает trip-логика и высокое напряжение будет отключено.

Один из главных недостатков CAEN как раз и состоит в том, что dT может иметь дискретные значения 0, 200, 300 мс.

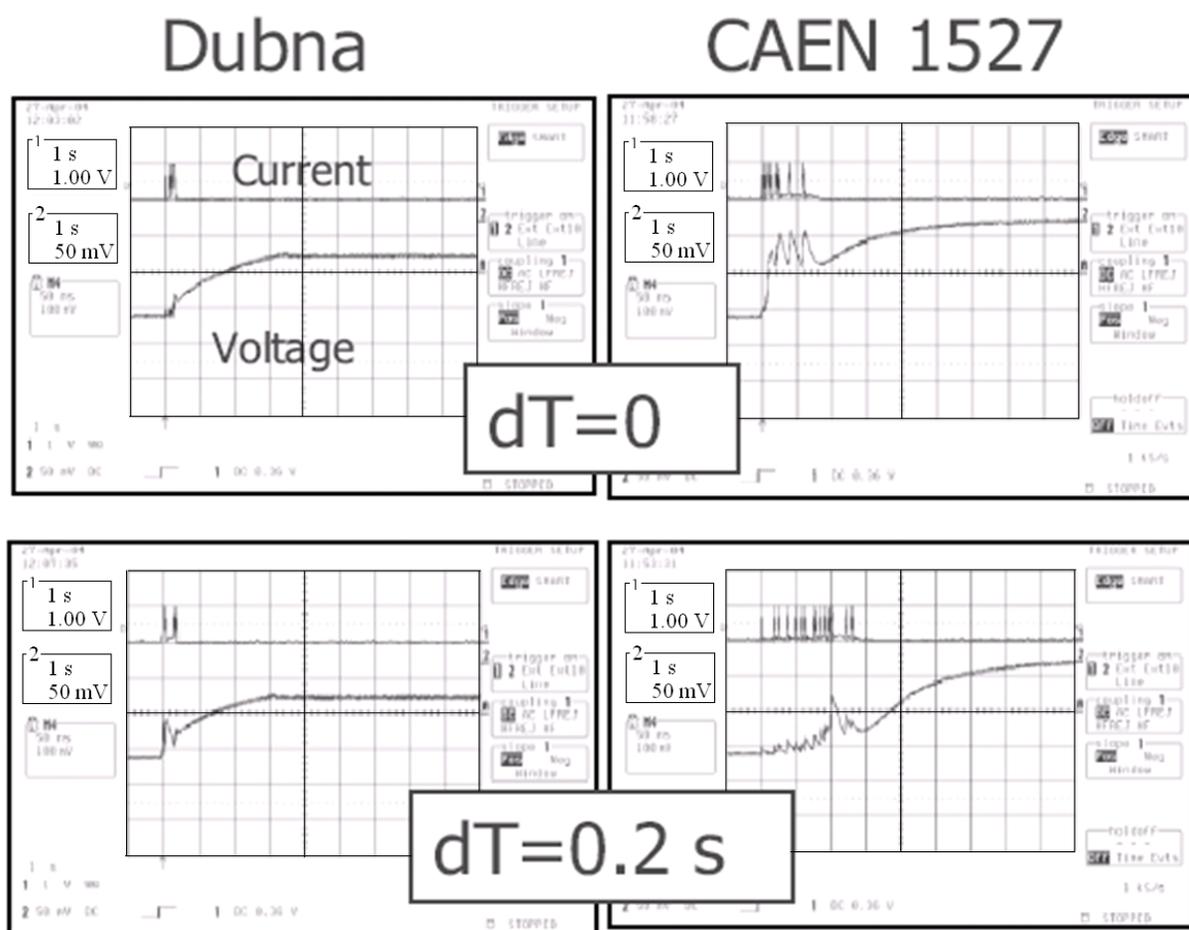


Рисунок 3-6 Осциллограммы сигналов для высоковольтных систем справа CAEN (Италия) и слева HVSys (Дубна, Россия). Масштаб по горизонтали 1 сек/дел.

Согласно осциллограммам при $dT=0$ полное отключение высокого напряжения происходит через 100 мс. Это может быть опасным для straw.

Кроме того, при включении высокого напряжения возникает выброс, в два раза превышающий установленное напряжение и который, несмотря на то, что он довольно короткий (около секунды), может спровоцировать разряд в дрейфовой трубке.

Еще одним серьезным недостатком высоковольтной системы питания САЕН является высокая стоимость, связанная с большой избыточностью возможностей системы, рассчитанной на самые различные области применения.

Стоимость всей системы высоковольтного питания TRT ATLAS на основе источников САЕН составляло ~500 000 €.

Исходя из экономических соображений, а также с целью приведения характеристик высоковольтного источника питания в соответствие с требованиями детектора, была сделана попытка разработки новых источников питания TRT-детектора ATLAS, стоимостью, по крайней мере, в 2 раза ниже, чем САЕН.

В институте ОИЯИ (компания ООО «Высоковольтные системы», Россия, Дубна) группа специалистов взялась за такую разработку. Наша задача состояла в формулировании четкого технического задания (ТЗ) и последующего контроля полученной продукции.

3.2 Технические требования к высоковольтному источнику для TRT-детектора ATLAS

Количество высоковольтных каналов – 2000. Каждый канал должен иметь независимый контроль и управление. Основные требования к каналу:

- | | |
|--|---------------|
| 1. Максимальная выходная мощность | 6 Вт |
| 2. Диапазон выходных напряжений | 500–2000 В |
| 3. Полярность | отрицательная |
| 4. Точность установки выходного напряжения | 0.1% (10 бит) |
| 5. Шаг регулирования напряжения | 1.56 В |

6. Разброс выходного напряжения от канала к каналу	менее 1%
7. Стабильность выходного напряжения	0.1%
8. Пульсация выходного напряжения	<50mVpp
9. Рабочий ток на нагрузке	<1.5мА
10. Предельный выходной ток	3 мА
11. Точность контроля тока и напряжения	12 бит
12. Время задержки срабатывания trip-логики	20, 50, 100, 150 мс
13. Управление источником и контроль параметров обеспечивается с помощью ПК через стандартный интерфейс (RS-232, USB).	

В соответствии с изложенными требованиями был разработан и изготовлен прототип высоковольтного источника питания, содержащий базовый (силовой) блок питания, обеспечивающий работу 420 каналов (20 модулей по 24 канала в каждом модуле). Модули размещены в крейте EuroMechanica. В опытном образце в крейте был размещен один модуль и контроллер, который через интерфейс RS232 связан с ПК, управляющим работой системы. Магистраль считывания и управления в крейте – последовательная. Внешний вид опытного образца высоковольтного крейта и высоковольтный модуль на 24 канала представлены на рис. 3-7.

На первом опытном образце крейта были проведены тщательные исследования всех параметров системы. Особое внимание было обращено на систему защиты straw от пробоев.

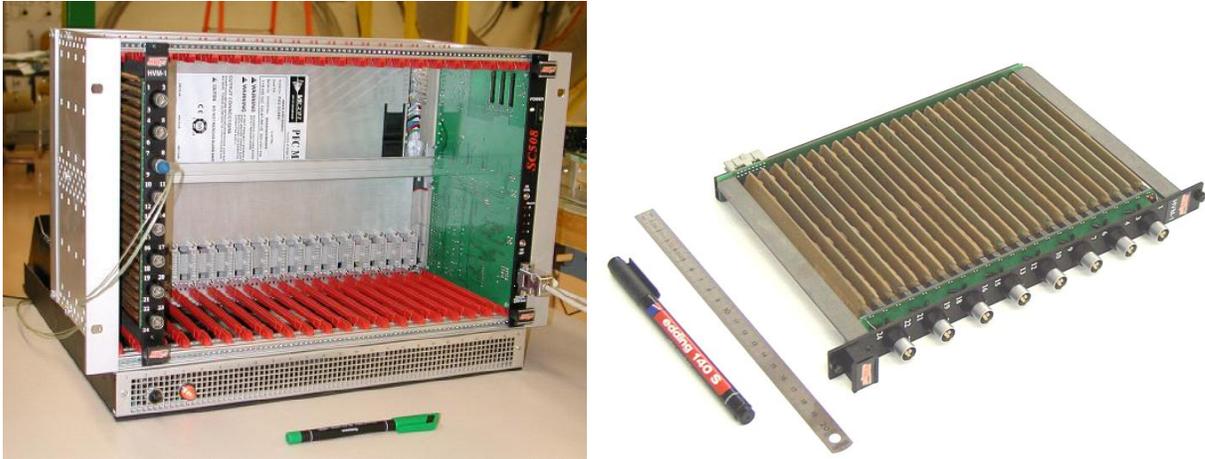


Рисунок 3-7 Опытный образец высоковольтного крейта и высоковольтный модуль на 24 канала

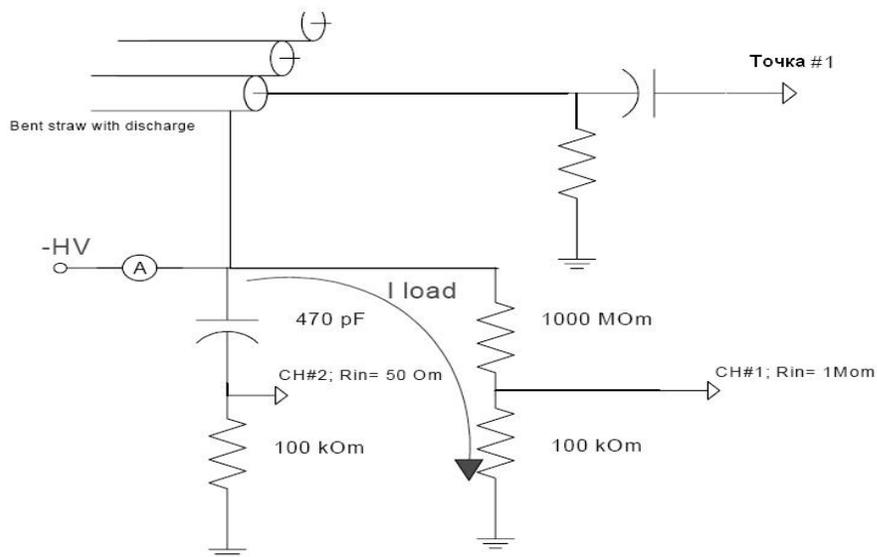


Рисунок 3-8 Схема измерений и методика тестирования trip-логики (защиты от пробоев) была аналогична схеме при исследованиях с CAEN источником

Второй канал осциллографа показывает сигналы пробоев в straw (CH#2 на рис. 3-8). Первый канал – изменение напряжения высоковольтного питания в результате отключения высокого напряжения от trip-логики (CH#1 на рис. 3-8).

Отмечена четкая зависимость задержки времени отключения высокого напряжения от задаваемой длительности так называемой «защитной задержки» (trip-логика) в диапазоне 0 - 200 мс (см. рис. 3-9).

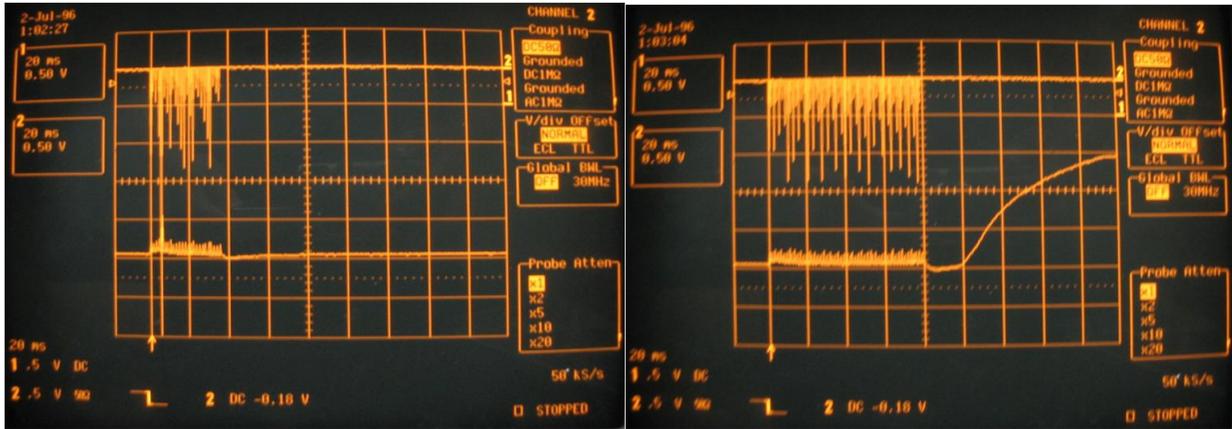


Рисунок 3-9 Осциллограммы отключения высокого напряжения в зависимости от величины trip-delay. Слева на рисунке длительность 40 нс, отключения не происходит, справа – длительность 80 нс, происходит отключение

Из рис. 3-6 видно, что дубненский высоковольтный источник питания отключается быстрее, чем САЕН (минимальное dT в САЕН 150 мс, в дубненском – 50 мс), что является положительным отличием новой системы.

В результате проведенных исследований характеристик опытного образца крейта был отмечен ряд замечаний и недоработок:

- Напряжение U_{set} , устанавливаемое от ПК пользователем, напряжение контроля U_{mon} и выходное напряжение на нагрузке U_{real} отличались между собой более, чем на 20 В.
- Предельный ток нагрузки каждого канала 2 мА было рекомендовано увеличить до 3 мА.
- Начальное напряжение в канале 500 В (Stand-By) допустимо, но при включении 500 В источник дает выброс напряжения (вследствие переходного процесса), который достигает 1500 В, что недопустимо.
- Пульсации составляли ~20 мВ pp, что не соответствовало требованиям. Кроме того, были выбросы напряжения на выходе с частотой ~100 кГц.

- Интерфейс связи с ПК RS-232 слишком медленный. Рекомендован интерфейс USB.
- Очень трудоемкая и ненадежная методика тестирования trip-логики.

С учетом этих рекомендаций был изготовлен следующий крейт с полным составом модулей на 21 канал (20 модулей в крейте) с новым силовым блоком, обеспечивающим предельный ток нагрузки в каждом канале 3 мА и с управлением через USB интерфейс.

Исследование характеристик HV крейта

При исследовании характеристик этого крейта отработывалась методика для массового тестирования всех последующих **6** крейтов (всего **2200** HV каналов). Для защиты от пробоев в высоковольтной системе предусмотрено отключение высокого напряжения при превышении порога по току в цепи нагрузки выше определенной величины (trip-логика). Принцип работы trip-логики представлен на рис. 3-10. В случае возникновения пробоев (верхняя кривая) высоковольтная система переходит в режим стабилизации по току в цепи нагрузки, при этом напряжение на выходе высоковольтного источника понижается до величины, при которой ток в цепи нагрузки не превышает заданный предел (нижняя кривая). Если пробой не прекращается в течении времени ΔT , то высокое напряжение отключается до безопасной величины вплоть до нуля (на рис. 3-10 эта безопасная величина составляет 500 В).

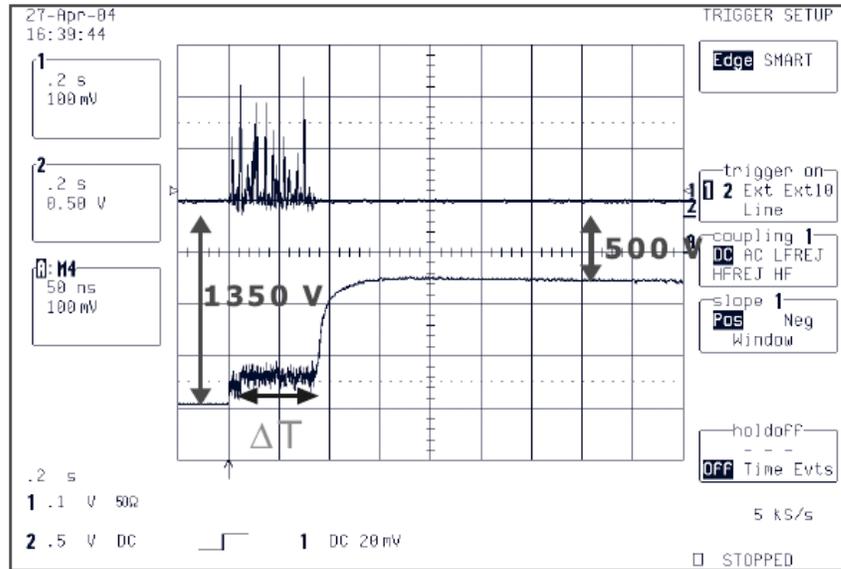


Рисунок 3-10 Демонстрация работы системы защиты от пробоев (trip-логика). Масштаб по горизонтали 0.2 с/клетка

Полное число выходов высоковольтной системы ATLAS TRT составляет 1984. С учетом запасных ячеек полное число высоковольтных выходов, которые необходимо проверить на предмет соответствия их функциональных параметров технической спецификации, превышает 2200. Для упрощения и ускорения процесса проверки trip-логики была разработана электрическая схема, имитирующая электрические разряды, возникающие в цепи нагрузки высоковольтного питания. Схема имитатора приведена на рис. 3-11.

Нажатием кнопки К запускается одновибратор, задающий длительность пачки импульсов частотой 1кГц. Сформированная пачка импульсов (50 импульсов за 50 мс) управляет высоковольтным ключом HTS30.

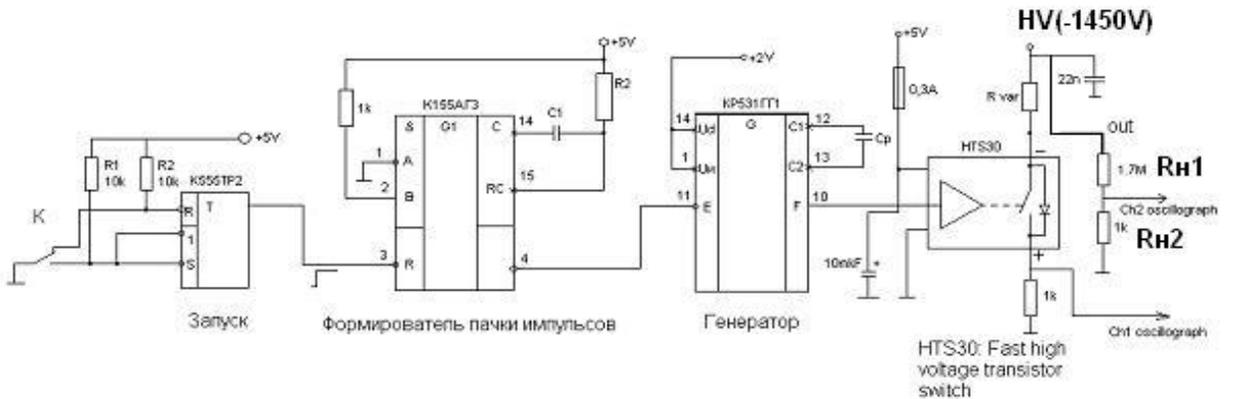


Рисунок 3-11 Схема имитатора пробоев

Методика проверки и калибровки канала высоковольтного источника

Проверка системы управления крейтом от ПК через USB. Программное обеспечение для согласования крейта с USB интерфейсом предоставлена разработчиком крейта.

1. Проверка работы trip-логики (системы защиты высоковольтного источника питания от пробоев в straw и короткого замыкания анода на катод). Для этого теста выход системы (один канал) подключается к схеме имитатора пробоев (рис. 3-11). Импульсный ток пробоя задается резистором R_{var} в нагрузке высоковольтного ключа, постоянный ток нагрузки, эквивалентный току, обусловленному радиационным фоном в рабочих условиях на ускорителе, задается резисторами R_{n1} и R_{n2} (1050 мкА). Ток отключения высокого напряжения I_{trip} устанавливается 1150 мкА. В схеме задается режим, соответствующий 50 пробоям за 50 мс, превышение тока 100 мкА. Нажатием кнопки К имитируются условия, являющиеся критическими для работы straw. В системе управления высоким напряжением задается два режима задержки trip-логики: 50 ms и 100 ms. В первом режиме не должно происходить отключение высокого напряжения, во втором – высокое напряжение отключается.

2. В каждом высоковольтном канале измеряются и записываются параметры устанавливаемого напряжения U_{set} , мониторируемого источником напряжения U_{mon} и реального напряжения на выходе U_{real} . Напряжение U_{real} измеряется внешним цифровым вольтметром. На основе полученных результатов определяются поправочные коэффициенты с помощью которых приводятся к соответствию параметры U_{set} , U_{mon} и U_{real} . Эти поправочные коэффициенты вводятся в программное обеспечение, управляющее высоковольтной системой.
3. Проверка величины пульсаций на высоковольтном выходе под нагрузкой ($I_n=3$ мА) осуществляется с помощью осциллографа (см. рис. 3-12).

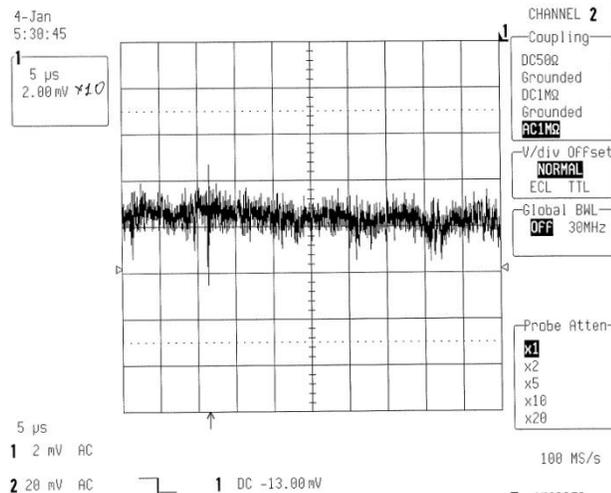


Рисунок 3-12 Пульсации на высоковольтном выходе при токе нагрузки 3 мА. Напряжение – 1350 В

После проведенных исследований и проверок окончательным критерием отключения высоковольтного канала при пробоях было принято наличие 50 пробоев за 50 мс.

Полученные экспериментальным путем поправочные коэффициенты могут быть использованы для коррекции U_{set} , U_{real} , U_{mon} , чтобы привести их к полному соответствию.

Кроме того, измерения U_{real} проведены для каждого канала в приближенных к эксперименту условиях путем подключения его к резистивной нагрузке, обеспечивающей ток в канале ~ 1.5 мА. Измерения проводились при 3 значениях напряжения: 1200 В, 1550 В и 1800 В.

Распределения напряжений U_{real} и U_{mon} по одному крейту при напряжении 1750 В приведены на рис. 3-13.

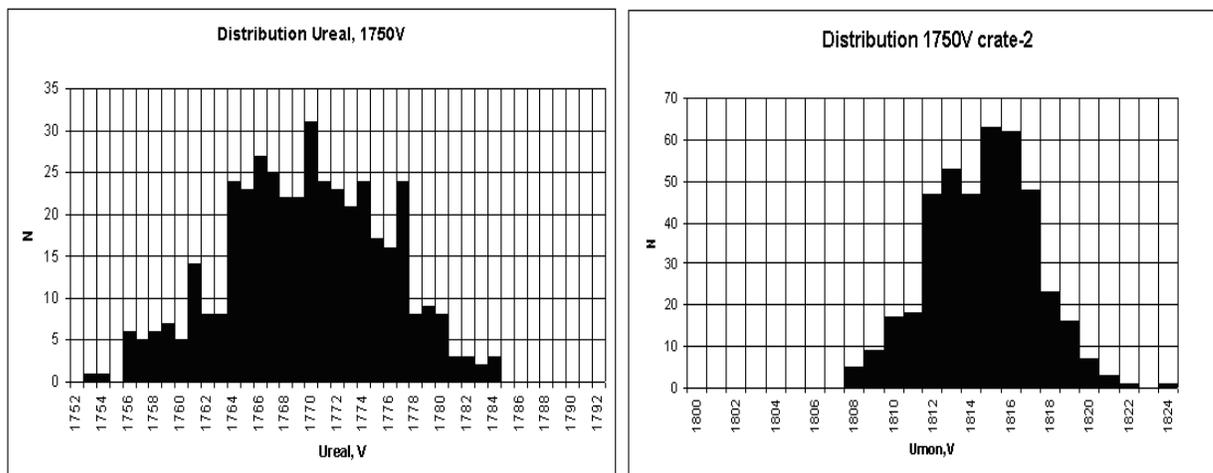


Рисунок 3-13 Распределения напряжений U_{real} и U_{mon} по одному крейту при напряжении 1750 В

Как видно из приведенных распределений (рис. 3-13), полный разброс выходного напряжения составляет величину $\pm 0.8\%$, что приводит к разбросу коэффициента газового усиления в пропорциональных камерах на уровне $\pm 20\%$ ($dU \leq 10$ В при коэффициенте газового усиления $5 \cdot 10^4$ и $dG = 10\%$). Чтобы уменьшить этот разброс, была проведена калибровка всех 1984 высоковольтных линий (см. рис. 3-14).



Рисунок 3-14 Распределение выходных напряжений U_{real} в крайних торцевых частях детектора после калибровки. Установленное напряжение – 1500 В. Разброс ± 2 В.

В результате проведенной калибровки и после введения поправочных коэффициентов для каждой высоковольтной линии разброс значений выходных напряжений и мониторируемых величин выходного напряжения (U_{real} и U_{mon}) составляет ± 2 В, т.е. $\sim 0.1\%$ от рабочего напряжения.

ГЛАВА 4

ПРИЕМКА КОЛЕС END-CAP ЧАСТИ ДЕТЕКТОРА ПЕРЕД ЕГО СБОРКОЙ

Введение

Детектор TRT состоит из 96 модулей центральной части (Barrel) и 112 колес торцевой части (End-cap). Всего детектор содержит 372 032 пропорциональных трубки straw. Все модули и колеса должны были пройти серию технических проверок прежде чем быть подключенными к считывающей электронике и быть собранными во Внутренний детектор вместе с кремниевым стриповым детектором и пикселями. Проверки были разработаны, чтобы обеспечить надежную работу детектора в течение всех 15 лет эксперимента на LHC.

Эти проверки были организованы в чистом помещении для сборки детектора TRT непосредственно перед ее началом. Схематичный вид помещения показан на рис. 4-1. Тесты включали в себя проверки на газовую герметичность колес, проверки натяжения нитей и их эксцентриситет внутри трубок straw, их механическая прочность, точность изготовления колес и надежная изоляция по высокому напряжению.

Следующие параграфы описывают различные установки для соответствующих тестов и измерений для колес детектора TRT. Во многом такие же стенды применялись для проверок центральной части (barrel) детектора TRT.

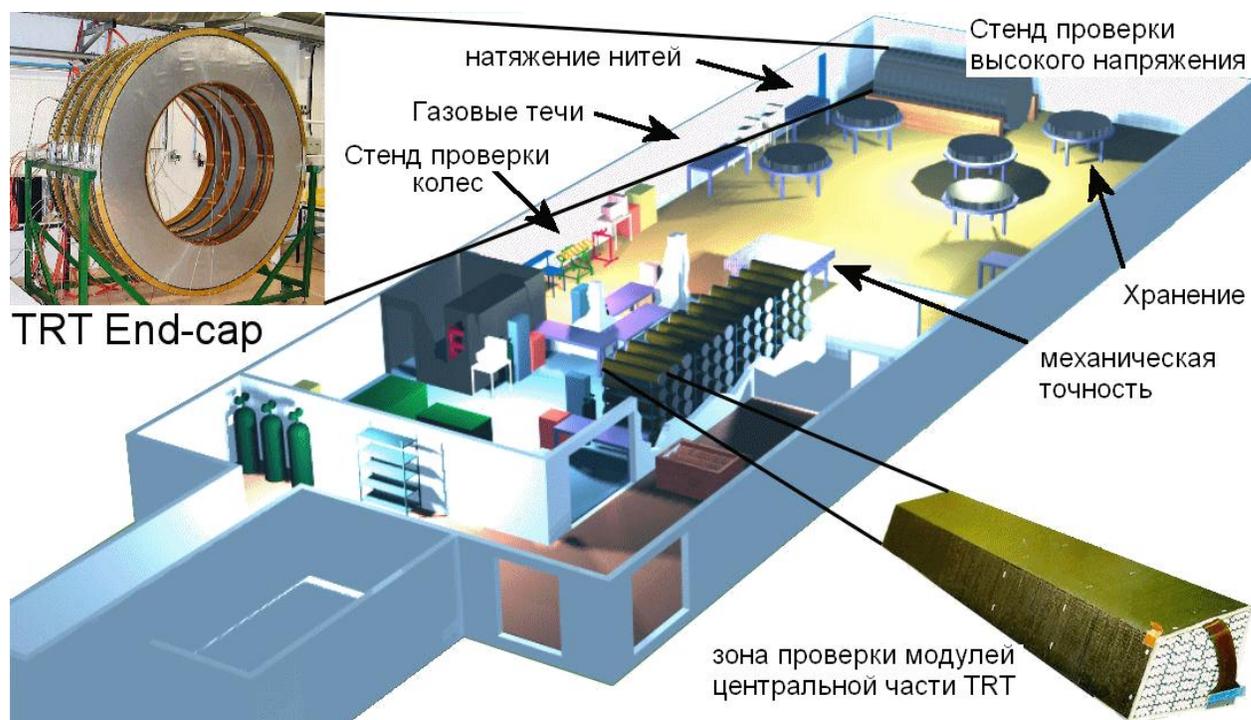


Рисунок 4-1 Схематичное изображение помещения для сборки детектора TRT и проведения приемки колес End-cap и модулей Barrel

4.1 Стенд проверки геометрических точностей

Так как детектор TRT располагается между кремниевыми детекторами и жидко-аргоновым калориметром, крайне важным было соблюдение геометрических точностей изготовления модулей детектора на предмет его геометрического согласования с другими системами. Требуемая точность изготовления и сборки детектора TRT (диаметр 2.2 м, длина 6.8 м) составляет 0.1 мм. Все критические размеры колес и модулей детектора были проверены и сравнены с проектной спецификацией. Эти размеры включали в себя внутренний и внешний радиусы, а так же толщину колес детектора (End-cap), длину, плоскостность и отсутствие изгибов вращения для модулей центральной части (Barrel).

Стенд для измерения колес состоял из вращающейся рамы, на которой были установлены измерительные датчики, и эталонной плоскости, которая позволяла точно измерять колеса, а также калибровать сам стенд. Измерения

проводились на координатном столе из гранита размером 2м*2м и кривизной поверхности менее 7 мкм.

Стенд для измерений показан на рис. 4-2.

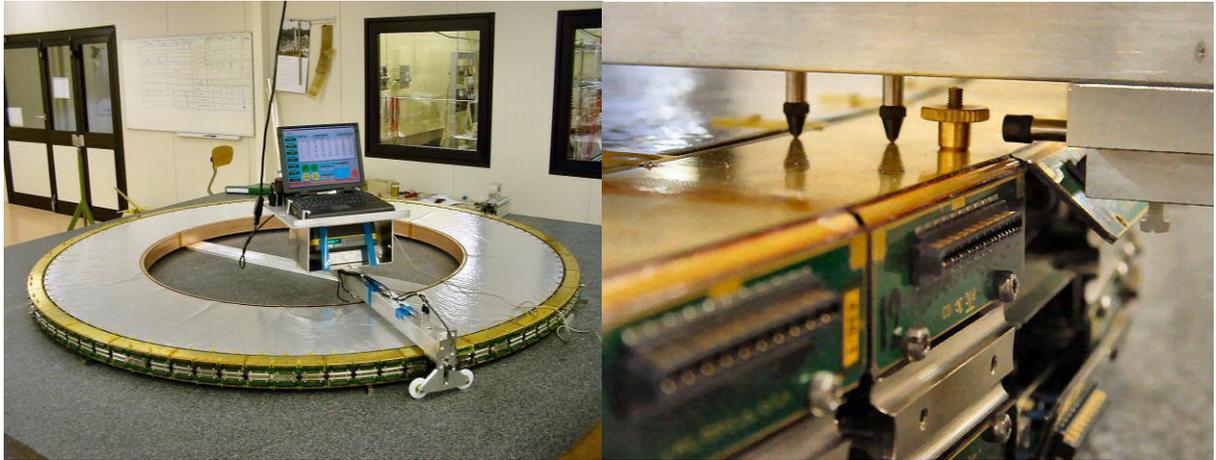


Рисунок 4-2 Стенд для проверки геометрических измерений

В частности, были сделаны следующие измерения:

- Радиальное положение верхней и нижней частей внутреннего газового картера, относительно внутреннего контура, обращенного к кремниевому детектору.
- Верхнее положение верхней стенки внутреннего газового картера над поверхностью стола.
- Верхнее положение над поверхностью стола внутреннего, среднего и внешнего радиуса разъема электроники, что служило контролем окончательной высоты колес детектора после сборки.
- Радиальное положение центра отверстий снаружи разъемов электроники, через которые проходят длинные шпильки, соединяющие колеса вместе.

4.2 Проверка на газовые течи

Первый тест на газовые течи колес делался при их изготовлении после того, как пропорциональные камеры клеивались во внутренний и внешний контуры углепластиковых колец. Целью такой проверки было обнаружить возможные течи из-за дефектов склеенного соединения между пластиковой частью straw трубок и отверстиями в углепластиковых кольцах.

Для проверки герметичности в ЦЕРН [41][42] собранное колесо подсоединялось к чистой газовой системе и заполнялось аргоном до относительного давления 20 мбар. Течь измерялась в единицах мбар/мин./бар посредством измерения падения давления со временем и вычислялась по формуле:

$$R_L = \frac{p(t_1) - p(t_2)}{t_1 - t_2} \cdot \frac{1000}{p(t_1) - p_{atm}}, \quad (4.1)$$

где t_1 и t_2 – начало и конец измерения (мин.)

$p(t_1)$, $p(t_2)$ – давление в мбар в газовом объеме в соответствующий момент времени

p_{atm} – атмосферное давление (мбар).

Для крайне малых течей линейное приближение подходит для описания экспоненциального закона падения давления. Крайне малая величина падения давления 1 мбар/мин./бар обусловлена высокой стоимостью Хе.

Сама установка для измерения газовых течей представлена на рис. 4-3.

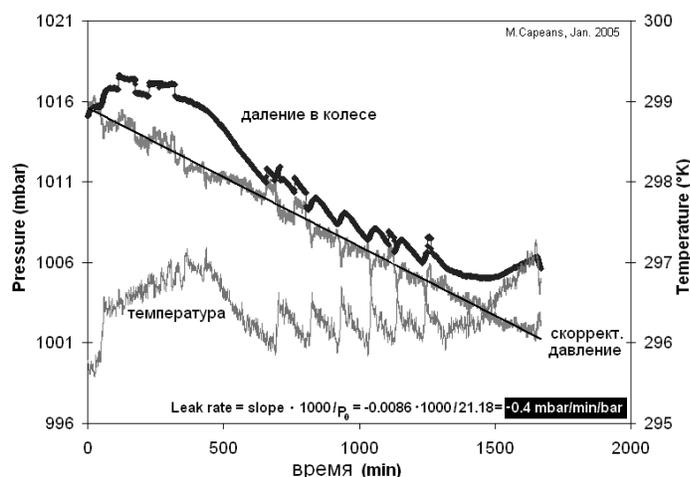
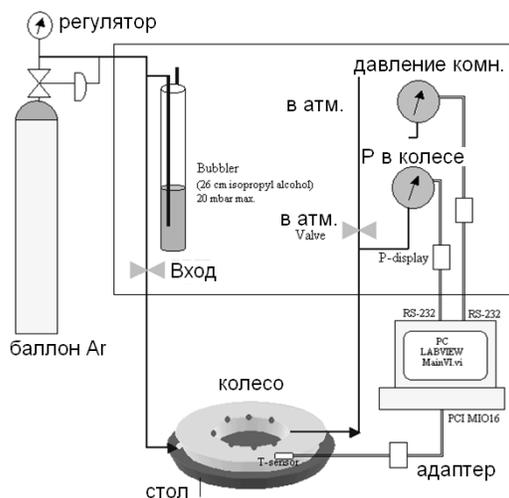


Рисунок 4-3 Стенд поиска газовых течей (слева). Типичная кривая изменения давления со временем (справа)

4.3 Стабильность работы колес детектора под высоким напряжением длительное время

Первичная проверка высоковольтной стабильности компонентов детектора была проведена на стадии производства для обнаружения короткого замыкания и утечек тока по внешним поверхностям колес и модулей детектора. Они проводились на воздухе и при обдуве CO_2 газом перед и после закрытия газовых манифолдов (распределителей).

Более долгая проверка стабильности высокого напряжения проводилась в ЦЕРН [43] с целью выявить плохо изолированные каналы. Стенд содержал 16 независимых высоковольтных линий питания, подсоединенных к разъемам, питающим группы по 192 straw в каждой (см. рис. 4-4). Тест проводился в течение 15 дней на газовой смеси Ar-CO_2 (70/30) на напряжении -1550 В, что соответствует коэффициенту газового усиления 10^5 , что в 2-4 раза больше номинальной величины. Токи и число пробоев записывались в течение более 2 недель. Все каналы с пробоями в течение последних 10 дней проверялись на предмет их полного исключения из работы.

Проблемная straw, вызывающая пробой, обнаруживается при помощи специального тестового прибора (см. рис. 4-5). Канал исключался из работы выпаиванием 24 Ом резистора, если обнаруживалось более чем два пробоя. Опыт показал, что высоковольтные пробой в основном исчезают спустя некий период времени, указывая на некий «чистящий процесс» внутри камеры после первого подключения высокого напряжения.

Приемлемая утечка тока не должна превышать 150 нА/192 камеры, т.е. оставаться ниже 1 нА на проволочку.



Рисунок 4-4 Высоковольтный стенд для проверки колес TRT на наличие утечек тока и пробоев по высокому напряжению

4.4 Приборы для обнаружения электрических пробоев в straw

Предложенная и исследованная в главе 3 высоковольтная система питания straw TRT детектора обеспечивает надежную защиту от прогорания стенок катода во время пробоев внутри straw путем быстрого отключения

высокого напряжения высоковольтной линии, обеспечивающей питание 192 камерам.

Последующим пережиганием специального предохранителя, через который осуществляется питание лишь 8 камер, можно исключить из работы только группу, содержащую дефектную straw, оставив тем самым остальные 184 камеры в рабочем состоянии [44].

При работе с TRT на стенде, а также во время большой остановки на пучке есть возможность исключать из работы отдельные камеры, а не всю группу из 8, например путем выпаивания последовательного резистора (~20 Ом) в анодной цепи. Диагностика отдельной пробивающейся straw возможна путем анализа сигналов с анодов при ее пробое и проводилась на стенде, схема которого приведена на рис. 4-5. Для исследований использовался прототип – фрагмент TRT на 32 трубочки.

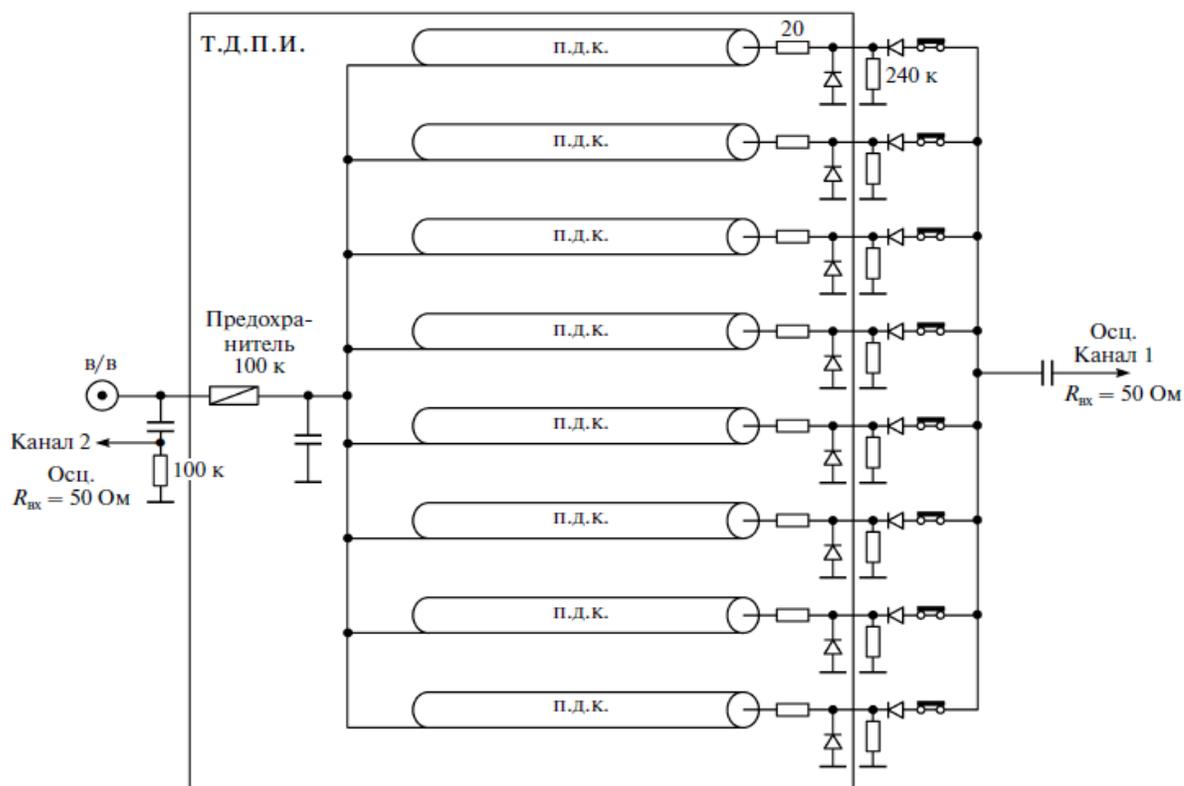


Рисунок 4-5 Схема стенда, на котором проводилась диагностика отдельной пробивающейся камеры

Пробой в одной камере инициировался прогибанием трубочки в области облучения радиоактивным источником ^{55}Fe . На вход осциллографа сигнал подавался непосредственно с анода без усиления. Типичная картина сигналов с анода пробивающейся straw представлена на рис. 4-6. Последовательно включенные диоды в анодной цепи подавляют наведенные пробоем положительные сигналы в невозмущенных камерах.

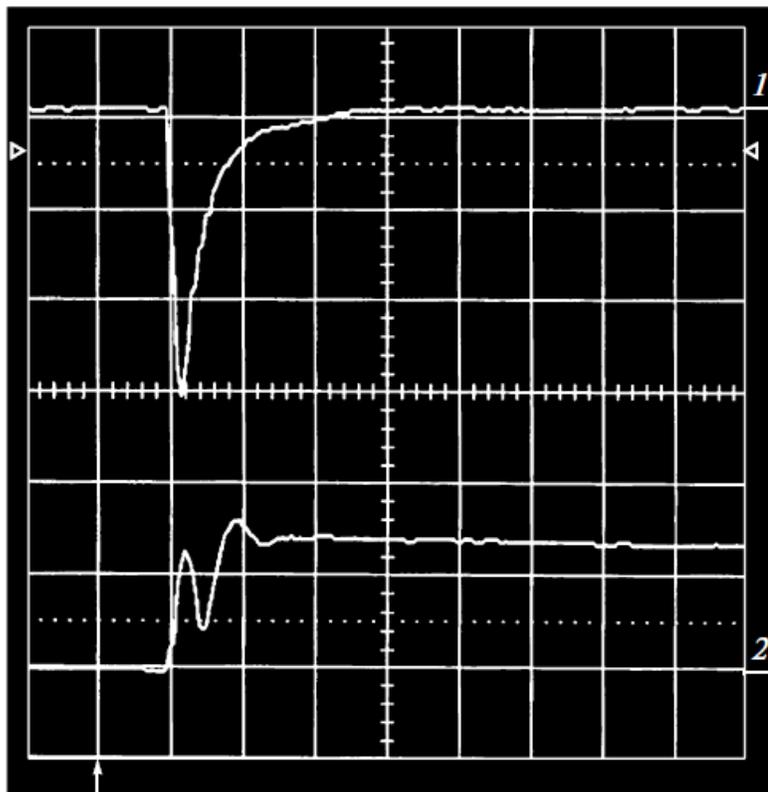


Рисунок 4-6 Осциллограмма сигналов с анода отдельной пробивающейся straw: 1 – пробой, 2 – сигнал с анодной проволоочки. Масштабы: по вертикали – 2 В/деление (1), 0.2 В/деление (2), по горизонтали – 0.2 мкс/деление

Объединение всех анодов исследуемой группы трубочек (рис. 4-5) позволяет обнаружить наличие пробивающейся straw в группе. Затем можно просканировать аноды каждой камеры. Чтобы выявить отдельную пробивающуюся straw, сигналы с анодов могут быть сформированы с помощью дискриминатора и поданы на пересчет. Число импульсов пробоя в заданном интервале времени дает объективную оценку состояния пропкмеры.

На основе проведенных исследований был разработан и изготовлен прибор для диагностики каждой из пробивающихся камер в группе из 32 straw, составляющих один так называемый WEB-разъем TRT. Схема прибора представлена на рис. 4-7. Серия аналоговых ключей MAX313CPE выполняет функцию подключения каждого анода группы из 8 straw к схеме регистрации числа пробоев. Управление ключами осуществляется с помощью переключателя на 9 положений (0-8), таким образом, номер группы из 8 straw определяется номером монитора, а положение переключателя определяет номер трубочки в группе. Четыре аналогичных монитора, управляемых одним переключателем, обслуживают 32 трубочки детектора. При нулевом положении переключателя (0) все 32 трубки подключаются к мониторам, что необходимо в начале теста для обнаружения хотя бы одной пробивающейся straw во всем секторе из 32. Таким образом, сразу определяется наличие или отсутствие пробивающейся straw в группе. Схема регистрации высвечивает в двоичном коде количество пробоев в соответствующей straw. Необходимо уточнить, что пробоев должно быть несколько, потому что довольно часто при включении возможны одиночные пробои, которые не опасны для работы пропкамеры.

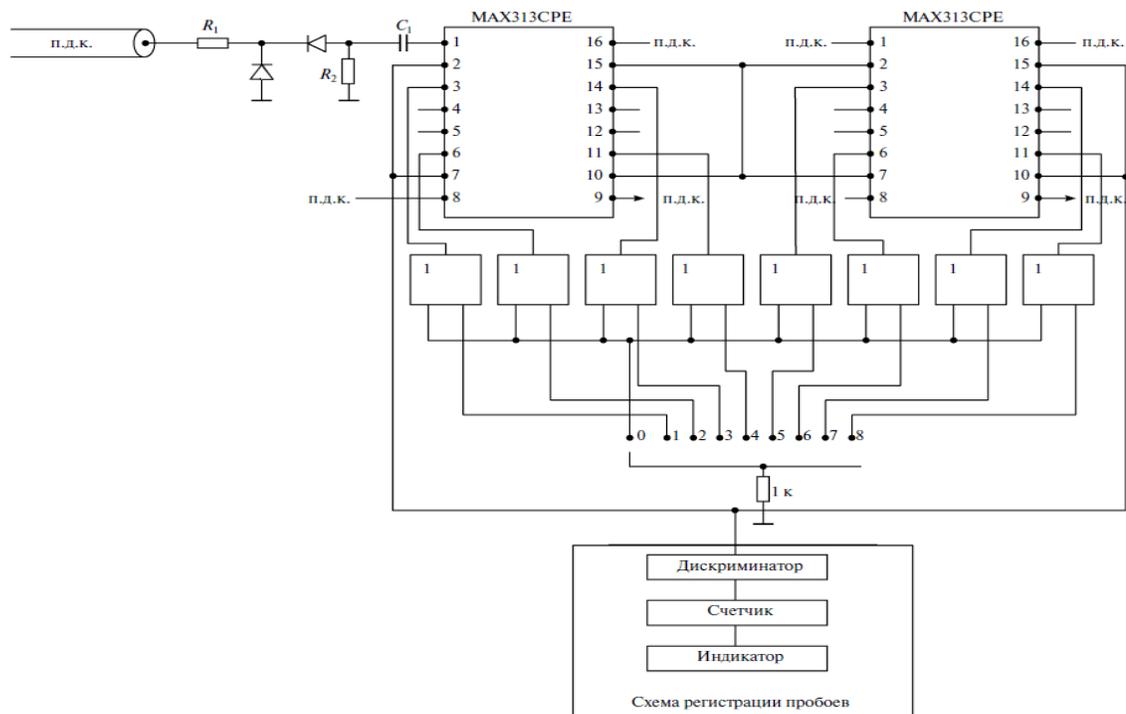


Рисунок 4-7 Схема прибора для поиска пробивающейся straw камеры

Кроме пробоев между анодом и катодом внутри straw возможны пробои по высокому напряжению вне ее, в области подключения высокого напряжения к катоду, а также по поверхности печатной платы или в случае дефектной емкости высоковольтного фильтра. Поскольку высокое напряжение подается на катоды всей группы из 8 straw (см. рис. 4-5), поиск места пробоя возможен путем анализа сигналов с анодов всех 8 камер одновременно. Следует отметить, что в случае пробоя высокого напряжения с катода на землю, на анодах появляется наведенный сигнал положительной полярности, в отличие от сигнала при пробое анод-катод внутри камеры.

Здесь критическим является появление хотя бы одного пробоя. Изоляция на воздухе должна быть абсолютно надежной.

Прибор прошел испытания и использовался при тестировании TRT детектора на стендах и во время сборки детектора перед погружением в шахту эксперимента ATLAS.

4.5 Проверка натяжения нити и прямолинейности дрейфовой камеры straw

4.5.1 Измерения натяжения вольфрамовой проволоочки

Натяжение вольфрамовой нити внутри дрейфовых камер следует контролировать, чтобы обеспечить стабильность работы трубочки. Провисание ее из-за плохого натяжения уменьшает расстояние между анодной проволочкой и катодной трубкой, а это в свою очередь приводит к электрическим пробоям внутри трубки.

Компактный дизайн колес детектора (а также модулей центральной части) не позволяет использовать классический метод магнитного резонанса, когда в сильном магнитном поле ток в проволочке вызывает ее колебания. Этот метод требует электрического контакта с анодной проволочкой и доступ к отдельной трубочке, чтобы разместить магнитные катушки. Поэтому для тестов с кольцами TRT был предложен другой метод измерений.

Натяжение нити в граммах можно получить по изменению емкости, которое возникает благодаря колебанию проволоочки в камере под напряжением, когда она возбуждается механически или акустически со своей собственной частотой. Анализ спектров, написанный на LabView[®], извлекает резонансную частоту из довольно сложного сигнала отклика посредством Фурье анализа (рис. 4-8). Собственная частота ν (Гц) переводится в натяжение T (г) используя формулу:

$$T=4\mu L^2 \nu^2/g \quad (4.2)$$

где μ - погонная масса проволоочки (14,6 мг/м для Au-W проволоочки диаметром 31 мкм),

L – свободная длина проволоочки (38,6 см в идеальном случае),

g – ускорение свободного падения (9,81 м/с² для Женевы).

Таким образом номинальное натяжение в 60 грамм дает резонансную частоту 260 Гц.

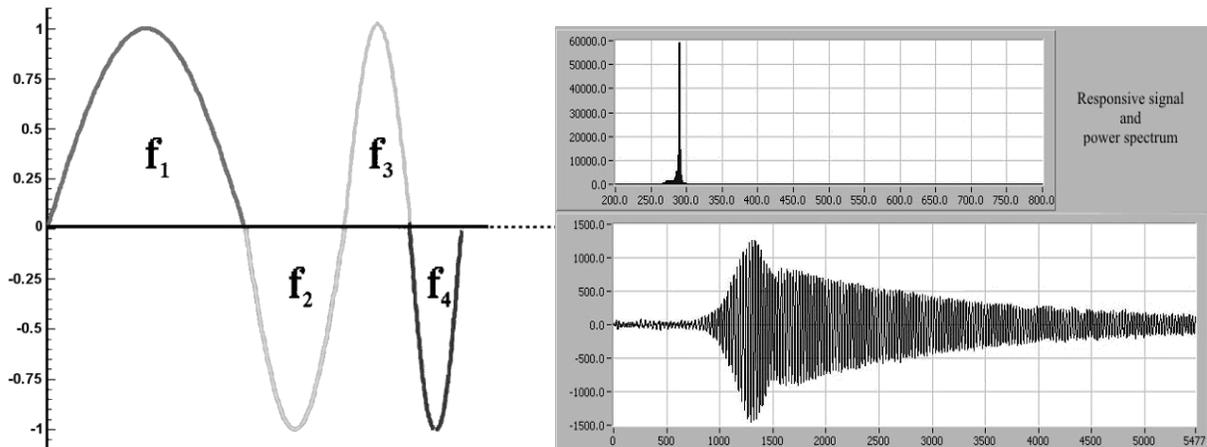


Рисунок 4-8 Волнообразный сигнал возбуждения с увеличивающейся частотой (слева). Сложный отклик (снизу справа) преобразуется посредством Фурье анализа в резонансный пик (справа вверху)

4.5.2 Изучение прямолинейности пропорциональных камер straw

Изучение прямолинейности straw также являлось важным критерием при приемке колес и модулей детектора TRT. Эксцентриситет проволоочки внутри камеры приводит к искажению электрического поля, делая его неоднородным вдоль трубочки. Смещение проволоочки может быть выражено, как изменение коэффициента газового усиления вдоль трубочки, так как значение эксцентриситета не может быть измерено непосредственно в колесах и модулях TRT. На рис. 4-9 приведены распределения отклонений коэффициентов газового усиления в дрейфовых трубках. Также на рисунке приведен допуск отклонения, в пределах которого все straw имеют смещение проволоочки менее 400 мкм. После проверок менее 0,04% камер были отключены из-за неприемлемого отклонения коэффициента газового усиления, что подтвердило высокое качество изготовления детектора.

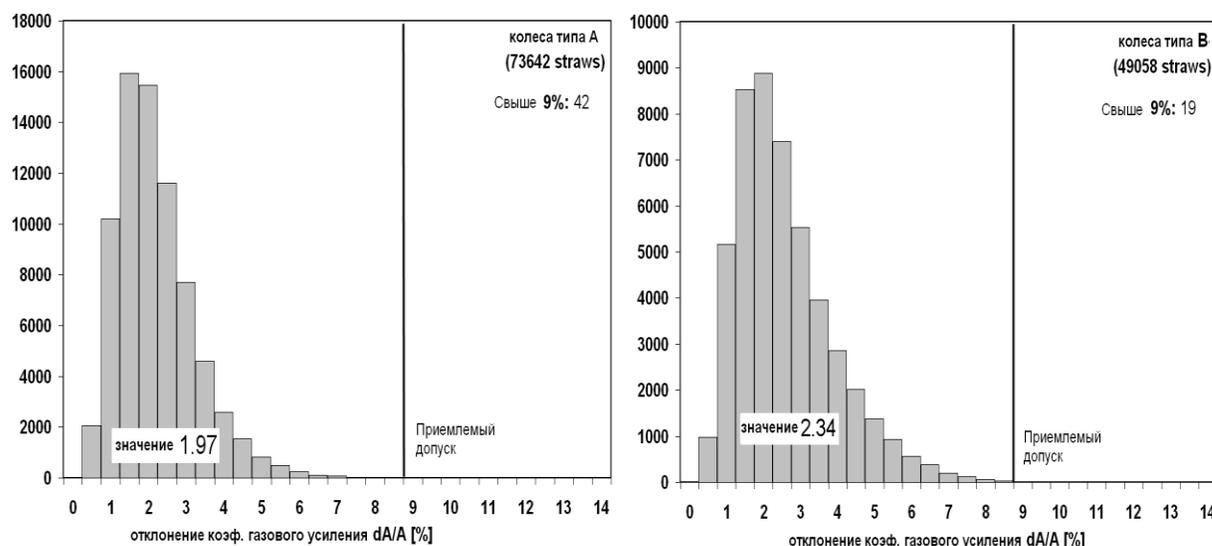


Рисунок 4-9 Измеренное распределение относительного отклонения коэффициента газового усиления в отдельных пропорциональных камерах. Диаграммы содержат информацию о первых 122 880 straw

Критериями отключения камер являются:

- Каналы с отсутствующим сигналом или отключенные из-за проблем в работе (искривление straw, высоковольтные пробой, натяжение нити).

- Искривленные или нецилиндрические трубки с неприемлемой неоднородностью поля.
- Отключенные из-за проблем с высоким напряжением (нестабильность, темновые токи, повторяющиеся пробой).
- Отключенные из-за слабого натяжения нити (менее 40г).
- Отсутствие отклика или малые амплитуды сигналов из-за плохого электрического контакта или высокого сопротивления.

Всего по результатам этих тестов было исключено из работы около 0.2% дрейфовых трубок.

Таким образом 40 колес End-cap так же как и 96 модулей Barrel, содержащие ~300 000 пропорциональных камер, прошли приемку перед установкой считывающей электроники. Многочисленные тесты продолжались до самой установки полностью собранного Внутреннего детектора в установку ATLAS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате разработки нового высоковольтного источника питания, методик его тестирования и калибровки получена уникальная высоконадежная и недорогая многоканальная система высоковольтного питания, удовлетворяющая условиям работы трекового детектора переходного излучения. Первые физические результаты установки ATLAS были получены с помощью трекового детектора переходного излучения. На треках космических мюонов были измерены вероятности образования фотонов переходного излучения для разных значений импульсов мюонов.

Основные результаты и выводы:

1. Исследованы и определены безопасные условия работы дрейфовой трубочки диаметром 4 мм при газовом усилении $\sim 4 \times 10^4$ в условиях высоких загрузок, близких к возникающим при максимальной светимости LHC. Для газовой смеси Xe/CO₂/O₂ (70/27/3%) указанное газовое усиление достигается при величине напряжения на катоде 1530 В. Условием безаварийной работы дрейфовой трубочки является ограничение количества пробоев в единицу времени величиной не более 50 пробоев за 50 мс при величине тока 1.5 мА. При этом высоковольтный источник работает в режиме ограничения по току.
2. На основе выбранного критерия, а также исследования промышленного высоковольтного источника питания фирмы CAEN был определен набор требований к источнику питания и изготовлена новая высоковольтная система питания, удовлетворяющая специфическим требованиям TRT, обеспечивающая требуемую стабильность коэффициента газового усиления для работы детектора в режиме идентификации электронов.
3. Разработана методика калибровки каждого канала высоковольтной системы питания, обеспечивающая необходимую точность установки и измерения напряжения и тока в каждом канале.

4. Разработана методика тестирования уникальной многоканальной системы высоковольтного питания TRT-детектора.
5. Предложена оригинальная схема подачи высокого напряжения на straw, обеспечивающая компромисс между общим количеством каналов высоковольтного питания и минимальным количеством отключаемых трубок в случае обнаружения дефектной straw.

БЛАГОДАРНОСТИ

С самого начала этой работы столько людей помогало мне, что совершенно невозможно выразить мою признательность всем им.

Я хотел бы выразить особую благодарность моему первому научному руководителю, к сожалению, безвременно ушедшему, Муравьеву Сергею Вадимовичу. Еще будучи студентом Московского инженерно-физического института (МИФИ), мне посчастливилось работать с Сергеем. Под его руководством я участвовал в работах по тестированию трекового детектора переходного излучения в эксперименте АТЛАС и, в особенности, работах по высоковольтному питанию детектора. Сергей Вадимович обладал теми редкими качествами, которые позволяли ему успешно сочетать в себе инженера высокого класса, физика, глубоко понимающего работу детекторов, и отзывчивого человека, готового всегда прийти на помощь советом или делом. Работая с ним, я приобрел бесценный опыт, который позволил мне завершить работу над диссертацией после его ухода.

Также я бесконечно признателен моему второму научному руководителю, человеку, которого я считаю своим учителем, Вадиму Абдурахмановичу Канцерову. Я начал работать с ним так же, еще учась в институте. И на протяжении всех последующих лет всегда работал с нескрываемым удовольствием. Вадим Абдурахманович давал мне не только практические знания, которых я от него почерпнул немало, но так же и житейскую мудрость и опыт, которые зачастую много ценнее теории.

Кроме этого, мне хотелось бы поблагодарить Шмелеву Алевтину Павловну, чья поддержка и помощь позволили мне на протяжении многих лет работать с такими замечательными людьми. Без ее участия выполненная мной работа была бы просто невозможна. Мне очень повезло работать в ее группе, и я надеюсь, что я буду еще долго работать под ее руководством.

Я хотел бы особенно поблагодарить Крамаренко Виктора Алексеевича, Мовчана Сергея Александровича и Сучкова Сергея Ивановича, которые

проделали немалый труд при чтении и анализе моей работы, и за их ценные замечания, которые мне очень помогли.

Хочу также выразить особую признательность Пешехонову Владимиру Дмитриевичу, Мялковскому Владимиру Владимировичу, Каюмову Фреду Фатыховичу, Астахову Валерию Ивановичу за помощь в написании этой работы.

Наконец, я хотел поблагодарить замечательных людей, с которыми мне посчастливилось работать в Европейском центре ядерных исследований: Сулина Владимира, Йоланту Ользовска, Кристофа Рембсера, Данилевича Евгения, Красина Илью, Логинова Андрея, Нила Диксона, Франсиско Перес Гомеса, Жерома Бендотти, Ахназарова Валерия.

Считаю своим долгом выразить благодарность всем моим соавторам, друзьям и коллегам за искреннюю, дружескую поддержку при подготовке этой работы.

Я также признателен оппонентам, проделавшим немалый труд при чтении и анализе работы, и за отмеченные, безусловно, ценные замечания, а также всем, написавшим отзыв на автореферат.

Посвящается Сергею Вадимовичу Муравьеву.

Женева, октябрь 2011 года

Константин Жуков

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. O. Brüning, et al., LHC Design Report Vol.1, CERN-2004-003, CERN, Geneva 2004.
2. ATLAS Collaboration, ATLAS Technical Proposal, CERN/LHCC/94-43, CERN, Geneva, 1994.
3. CMS Collaboration, CMS, the Compact Muon Solenoid: Technical Proposal, CERN-LHCC-94-38, CERN, Geneva, 1994.
4. ALICE Collaboration, ALICE: technical proposal for a large ion collider experiment at the CERN, CERN-LHCC 95-71, CERN, Geneva, 1995.
5. LHCb Collaboration, LHCb: Technical Design Report - Reoptimized Detector Design and Performance, CERN-LHCC-2003-030, CERN, Geneva, 2003.
6. The TOTEM Collaboration, TOTEM Technical Design Report, CERN-LHCC-2004-002, 7 January 2004.
7. S. F. Novaes, Standard Model: An Introduction, Proceedings of the 10th Jorge Andre Swieca Summer School: Particle and Fields, World Scientific, Singapore, 2000, hep-ph/0001283, and references therein.
8. R. Barate, et al., Search for the standard model Higgs boson at LEP, Phys. Lett. B 565 (2003) 61.
9. The LEP Electroweak Working Group, <<http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>>
10. S. Martin, A Supersymmetry Primer, contribution to “Perspectives on Supersymmetry”, G. Kane (ed.), World Scientific, Singapore, 1998, hep-ph/9709356, and references therein.
11. P. Jacobs and X. Wang, Matter in extremis: ultrarelativistic nuclear collisions at RHIC, Prog. Part. Nucl. Phys. 54 (2005) 443, hep-ph/0405125, and references therein.

12. CMS Collaboration, CMS, the Tracker System Project: Technical Design Report, CERN-LHCC-98-006, CERN, Geneva, 1997.
13. CMS Collaboration, The CMS Tracker TDR: Addendum 1, CERN-LHCC-2000-016, CERN, Geneva, 2000.
14. CMS Collaboration, The Electromagnetic Calorimeter Project: Technical Design Report, CERN-LHCC-97-033, CERN, Geneva, 1997.
15. CMS Collaboration, CMS, the Muon Project: technical design report, CERN-LHCC-97-032, CERN, Geneva, 1997.
16. ALICE Collaboration, ALICE: Technical Design Report of the Time Projection Chamber, CERN/LHCC 2000–001, CERN, Geneva, 2001.
17. ALICE Collaboration, A Transition Radiation Detector for Electron Identification within the ALICE Central Detector, CERN/LHCC 99–13, CERN, Geneva, 1999.
18. ATLAS Collaboration, ATLAS Inner Detector Technical Design Report, CERN/LHCC/97-17, ATLAS TDR 5, 30 April 1997.
19. F. Hüggling, on behalf of the ATLAS Pixel collaboration, The ATLAS Pixel Detector, IEEE NSS & MIC Conference Record (2004).
20. M. Turala, for the ATLAS SCT collaboration, The ATLAS semiconductor tracker, Nucl. Instr. and Meth. A 466 (2001) 243-254.
21. ATLAS Collaboration, *Liquid Argon Calorimeter: Technical Design Report*, LHCC-96-41, CERN, Geneva, 1996.
22. ATLAS Collaboration, Tile Calorimeter: Technical Design Report, LHCC-96-42, CERN, Geneva, 1996.
23. Гинзбург В. Л., Франк И. М. Излучение равномерно движущегося электрона, возникающее при его переходе из одной среды в другую (рус.) // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. С. 15.

24. T. Åkesson, et al, Aging studies for the ATLAS Transition Radiation Tracker (TRT), Nucl. Instr. and Meth. A 515 (2003) 166-179.
25. T. Åkesson, et al, Straw tube drift-time properties and electronics parameters for the ATLAS TRT detector, Nucl. Instr. and Meth. A 449 (2000) 446-460.
26. T. Åkesson, et al, Operation of the ATLAS Transition Radiation Tracker under very high irradiation at the CERN LHC, Nucl. Instr. and Meth. A 522 (2004) 25-32.
27. T. Åkesson, et al, ATLAS Transition Radiation Tracker test-beam results, Nucl. Instr. and Meth. A 522 (2004) 50-55.
28. T. Åkesson, et al, Status of design and construction of the Transition Radiation Tracker (TRT) for the ATLAS experiment at the LHC, Nucl. Instr. and Meth. A 522 (2004) 131-145.
29. M. Capeans, on behalf of the ATLAS TRT collaboration, The Transition Radiation Tracker of the ATLAS Experiment, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 51, 994-1000 (2004).
30. T. Åkesson, et al, Study of straw proportional tubes for a transition radiation detector/tracker at LHC, Nucl. Instr. and Meth. A 361 (1995) 440-456.
31. A. Romaniouk, Specification for gold-plated tungsten wire, ATL-IT-ES-0012, CERN, March 2000.
32. M. Capeans, Aging and materials: lessons for detectors and gas systems, Nucl. Instr. and Meth. A 515 (2003) 73-88.
33. F. Hahn, et al, The ATLAS TRT (active) Gas System Modules, ATLAS Internal Note, CERN, 2004.
34. R. Hawkings, et al, Inner Detector Thermal Management and Environmental Gas, ATL-IC-EN-0009, CERN, 2003.

35. J. Godlewski and P. Skarby, The Straw Cooling System in the ATLAS TRT, ATL-INDET-2002-022, CERN, 2002.
36. J. Grognez, H. Danielsson and M. Bosteels, TRT End-Caps CO₂ Cooling and Ventilation System, ATL-IT-ES-0033, CERN, 2005.
37. B. Bevensee, et al, An Amplifier-Shaper-Discriminator with Baseline Restoration for the ATLAS Transition Radiation Tracker, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 43, 1725-1731 (1996).
38. N. Dressnandt, et al, Implementation of the ASDBLR Straw Tube Readout ASIC in DMILL Technology, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 48, 1239-1243 (2000).
39. C. Alexander, et al, Progress in the Development of the DTMROC Time Measurement Sci. Vol. 48, 514-519 (2001).
40. V. Ryjov, et al, Implementation of the DTMROC-S ASIC for the ATLAS TRT Detector in a 0.25 μ m CMOS technology, IEEE NSS & MIC Conference Record (2002).
41. ATLAS TRT Quality Procedure, Procedure for the gas leak test of 4-plane wheels, ATL-IT-QP-0083 v.2, CERN, 2002.
42. M. Capeans, et al, Active gas tightness test, ATL-IT-QP-0083 and addendum ATLIT-TP-0007, CERN, 2002-2004.
43. ATLAS TRT Test Procedure, Long-term HV test, ATL-IT-TP-0009, CERN, 2002.
44. К.И.Жуков, В.А.Канцеров и др. Приборы для обнаружения электрических пробоев в пропорциональных дрейфовых камерах трекового детектора переходного излучения эксперимента ATLAS. Приборы и техника эксперимента. №6 стр. 21-23. 2010.

Список аббревиатур

ACCESS	Эксперимент для космической станции по изучению состава космических лучей
ALICE	Эксперимент на коллайдере LHC в ЦЕРН
AMS	Эксперимент на международной космической станции
ASDBLR	Базовый чип считывающей электроники в детекторе TRT
ATLAS	Тороидальная установка на LHC, эксперимент на коллайдере ЦЕРН
CERN	Европейский центр ядерных исследований, ЦЕРН, г. Женева, Швейцария
CMS	Компактный мюонный соленоид, эксперимент на коллайдере LHC в ЦЕРН
CSC	Катодная полосковая камера (от англ. Cathode Strip Chamber)
DTMROC	Чип считывающей электроники для измерения времени дрейфа
ECAL/ECal	Электромагнитный калориметр
HCAL/HCal	Адронный калориметр
LAr	Жидко-аргоновый калориметр (от англ. Liquid argon)
LHC	Большой адронный коллайдер (от англ. Large Hadron Collider)
LHCб	Эксперимент на коллайдере LHC в ЦЕРН
MDT	Мониторирующая дрейфовая трубка (от англ. Monitored Drift Tubes)
PAMELA	Эксперимент по исследованию темной материи и астрофизики легких ядер (от англ. A Payload for Antimatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics)
RICH	Черенковский счетчик (от англ. Ring-Imaging CHerenkov counter)
RPC	Резистивные плоские камеры (от англ. Resistive Plate Chamber)
SCT	Полупроводниковый трекер эксперимента ATLAS (от англ. Semiconductor Tracker)
SEM	Сканирующий электронный микроскоп (от англ. Scanning Electron Microscope)
SPD	Детектор со сцинтилирующими площадками (от англ. Scintillator Pad Detector)
TGC	Тонко-зазорная камера (от англ. Thin Gap Chamber)
TOTEM	Один из экспериментов на коллайдере LHC в ЦЕРН
TRT	Трековый детектор переходного излучения эксперимента ATLAS
UX15	Подземная экспериментальная зона в ATLAS
VELO	Детектор, определяющий координату вершин событий (от англ. Vertex Locator) (of the LHCb experiment)
WEB	Электронная плата на колесах торцевой части детектора (от англ. Wheel End-cap Board)(ATLAS TRT)
WTS	Тестовая станция для колес (от англ. Wheel Test Station) (ATLAS TRT)
МИП	Минимально-ионизирующая частица (от англ. Minimum ionizing particle)
ОИЯИ	Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна
ПНЯФ	Петербургский институт ядерной физики им. П.Н.Константинова, г. Гатчина

ПРИЛОЖЕНИЕ

Изучение характеристик пропорциональных камер

Вступление

Экспериментальные исследования и разработка быстро становятся трудоемкими и дорогостоящими, когда возникает необходимость оптимизировать какой-либо продукт к его применению, что относится и газовым детекторам. И в эту подготовку может входить все от простой регулировки до изменения геометрии детектора и замены рабочей газовой смеси. Для того чтобы понять зависимости характеристик детектора от рабочих параметров (геометрии, газа, рабочей точки), используют моделирование, что значительно упрощает задачу по сравнению с необходимыми исследованиями в лаборатории.

В этой главе рассматривается общий принцип работы пропорциональных дрейфовых трубок с различными газами, а также проблемы и трудности, возникающие при конструировании таких сложных детекторных систем, как TRT детектор эксперимента ATLAS. Здесь рассматриваются вопросы, связанные с газовым усилением и дрейфом электронов в трубочке.

Атмосферные условия, однако, не всегда записываются вместе с экспериментальными результатами, которые доступны из сравнения с компьютерными данными. Это означает, что если не оговорено дополнительно, то данное моделирование происходит при стандартных условиях, а именно при температуре 22°C и давлении $10^5\text{ Па} = 1\text{ атм}$.

Далее будет дан краткий обзор процессов в газовых детекторах.

Основные процессы в газовых детекторах

Ключевым вопросом в работе ионизационных камер является понимание того, как возникает заряд (а так же, как исчезает) и как он движется в электромагнитном поле. Электроны тут играют главную роль. Возникнув в газовом объеме посредством ионизационных потерь внешнего излучения, они перемещаются под действием электрического поля в направлении анодной проволоки, подвергаясь умножению, прежде чем образовать достаточное для детектирования количество заряда. На чувствительном электроде они могут затем произвести сигнал тока, при том как прямо, так и косвенно (посредством их отраженных зарядов). Эти процессы определяют различные типы газовых лавинных детекторов. Далее предложен краткий обзор некоторых важных процессов в газовых детекторах, опустив при этом маловажные детали.

1. Движение электронов и ионов в газах

Во внешнем электрическом поле напряженностью E , электростатическая сила будет двигать заряды от их точки образования. Случайная скорость теплового движения v_e будет складываться с дрейфовой скоростью w_e в заданном направлении.

$$w_e = \frac{eE}{m_e} \cdot \tau = \frac{eE}{m_e} \cdot \lambda \quad (1)$$

$$v_e = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}} \quad (2)$$

где λ – свободный пробег электрона, а τ – среднее время между столкновениями.

Скорость дрейфа для ионов w_{ion} в ослабленном электрическом поле E/p описывается следующим соотношением:

$$w_{ion} = \mu_{ion} \frac{E}{p} \quad (3)$$

Подвижность ионов μ_{ion} остается почти постоянной, одинакова для положительных и отрицательных ионов, и внутри широкого диапазона напряженности поля E и газового давления p имеет типичную величину 0.5 – 1.5 $\text{cm}^2 \text{ атм/В сек}$ (см. рис. 1)

Например, подвижность ионов Xe^+ в ксеноне показана на рисунке 1 для обоих спиновых состояний $2P_{1/2}$ и $2P_{3/2}$. Как отмечалось ранее, подвижность ионов остается постоянной в хорошем приближении вне области образования лавины ($E < 10\text{-}20 \text{ кВ/см}$). Для удобства, тут показана зависимость подвижности ионов от электрического поля при давлении 101,3 кПа, а не как это принято зависимость подвижности от отношения E/p или E/N , где N – плотность газа.

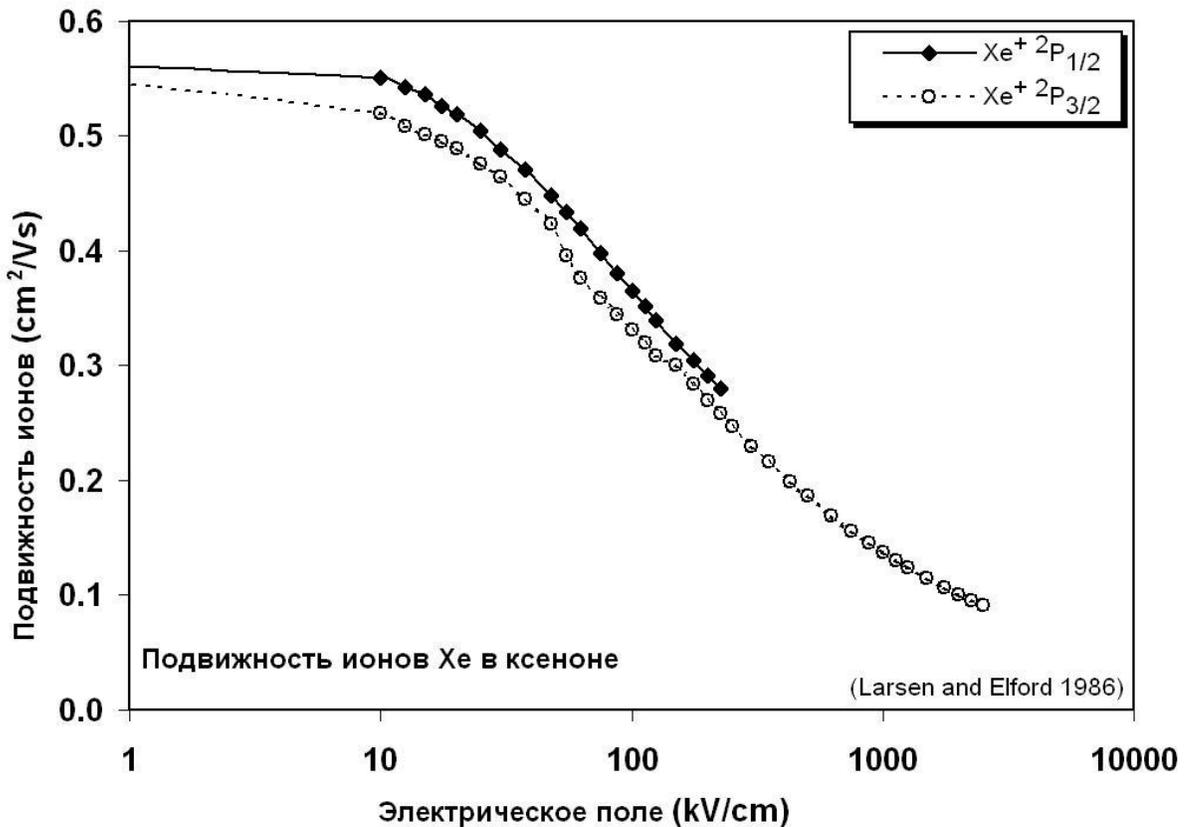


Рисунок 1 Подвижность ионов Xe^+ в ксеноне. Исследования нулевого поля основано на предположениях

Есть по крайней мере три способа для увеличения величины подвижности свободных электронов, чтобы они способны достичь гораздо большей энергии между столкновениями с нейтральными молекулами. Их дрейфовая скорость значительно увеличивается с E/p , достигая локальных максимумов и минимумов в некоторых смесях без дальнейшего увеличения напряженности электрического поля.

Вследствие столкновений с молекулами газа электроны отклоняются от направления электрического поля. Их диффузия вдоль любого выбранного направления x описывается распределением Гаусса со среднеквадратичным отклонением:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{2D_x}{w_e}} \quad (4)$$

где D – это зависимый от поля коэффициент диффузии.

В позиционно-чувствительных детекторах диффузия, направленная перпендикулярно линиям электрического поля E (поперечная диффузия $D_T \perp E$), играет основную роль в определении разрешения в этом направлении (т.н. ширину кластера). Продольное распространение ($D_L \parallel E$) влияет на пространственно-временное разрешение (как и в ТРС детекторах) или на длительность сигнала. В отличие от случая электронов, процессы диффузии незначительны для более тяжелых ионов, и они следуют за силовыми линиями электрического поля.

В большинстве газовых лавинных детекторов дрейф положительных ионов отвечает за формирование сигнала. Эти сигналы обычно имеют быстрый рост и уменьшаются иногда с длинным «хвостом», что ограничивает быстрое усиление, собирая только маленькую часть общего заряда.

Иногда для избавления от этого «хвоста» необходимо обеспечить электронику специальной схемой, чтобы избежать накопления сигнала и, таким образом, укоротить мертвое время детектора. Например, для камер

детектора ATLAS TRT полное время сбора ионов – около 60 мкс (сравните с временем пересечения сгустков 25 нс), в то время как электронный сигнал имел длительность около 3-4 нс, и, таким образом, внося менее 5% от собранного заряда.

2. Процессы ионизации в газах

Быстрые заряженные частицы, проходя через объем газа, создают вдоль своего пути ионизованные и возбужденные молекулы газа. Вторичные процессы, такие как дальнейшая ионизация посредством энергии первичных электронов (дельта-электронов) или перенос энергии из метастабильных состояний («эффект Пеннинга») также вносят вклад в конечное число свободных ионных пар в газе, что представляет практический интерес.

Средняя энергия, необходимая для создания ионной пары называется W -величиной, которая имеет типичный порядок для газов 25-35 эВ/ион пару. Хотя средняя энергия ионизации электрона последней тесно связанной оболочки исчисляется 10-20 эВ в большинстве газов, часть энергии случайной частицы тратится на неионизирующие процессы (например, возбуждения молекул). Величина W для соответствующих газов TRT детектора можно посмотреть в таблице 1.

Таблица 1 Средняя W -величина для электронов и фотонов в различных газах

Газ	W (эВ/ион. пару)
Xe	22.1±0.1
Ar	26.4±0.5
CO ₂	33.0±0.7
CF ₄	29.2±1.0
O ₂	30.8±0.4

Не совсем корректно считать флуктуацию σ_0 в значении числа пар ионов N_0 , образуемых случайной частицей, подчиняющейся распределению Пуассона и, таким образом, имеющей стандартное отклонение равное квадратному корню из N_0 . В действительности, многие детекторы показывают флуктуацию меньше, чем предсказанная. Таким образом, возникает эмпирическая константа, так называемый фактор Фано F , на который умножается предсказанная вероятность, давая тем самым экспериментально наблюдаемую вероятность.

$$\sigma_0 = F N_0 \quad (5)$$

Оценка значения фактора Фано в пропорциональных газах лежит в пределах от 0.05 до 0.30. Тесно связан с фактором Фано еще так называемый эффект Пеннинга, который играет ключевую роль в моделировании. Он описывает ионизацию посредством передачи заряда во время столкновений метастабильных атомов с нейтральными атомами или молекулами.

3. Газовое усиление

В электрических полях порядка $\sim 10^4$ В/см электроны начинают достигать все большей и большей энергии между двумя столкновениями, производя такие явления, как возбуждение или ионизация. Когда энергия электрона достигает первого ионизационного потенциала молекулы газа, результатом взаимодействия может быть электрон-ионная пара. Первичный электрон продолжает свое движение в электрическом поле. Свободный путь ионизации определяется как среднее расстояние, которое электрон вынужден пролететь между двумя ионизирующими взаимодействиями. Обратная величина называется первым коэффициентом Таунсенда, α , и представляет собой число электрон-ионных пар, производимых на единице длины дрейфа. Увеличение числа электронов тогда может быть описано как:

$$\frac{dn}{n} = \alpha \cdot dx \quad (6)$$

В однородном поле (между параллельными пластинами) плотность электронов возрастает экспоненциально с расстоянием, как лавинный процесс:

$$n(x) = n_0 e^{\alpha dx} \quad (7)$$

Характерной особенностью трекового детектора переходного излучения является практически абсолютная недоступность его обслуживания, так как TRT представляет собой внутреннюю часть установки (Inner Detector). При этом коэффициент газового усиления должен быть стабильным во времени (см. рис. 2).

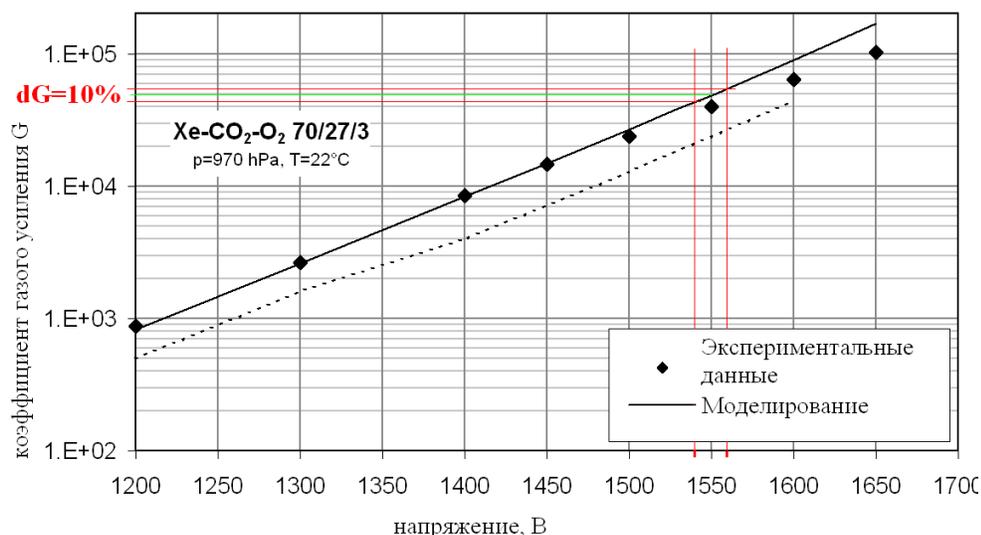


Рисунок 2 Зависимость коэффициента газового усиления от напряжения на straw. Рабочее напряжение 1530 В. Газовая смесь Xe-CO₂-O₂ (70:27:3%). Из экспериментальных данных и симуляции $dU \leq 10$ В при коэффициенте газового усиления $5 \cdot 10^4$ и $dG=10\%$

В цилиндрической геометрии, такой как в трубочках детектора TRT, поле возрастает в направлении лавины, и рост даже больший. Так называемые пропорциональные трубочки работают в области, где собранный заряд пропорционален числу первичных электрон-ионных пар, возникших от случайной частицы. Дальнейшее увеличение поля может привести, через фазу ограниченной пропорциональности, в область Гейгера-Мюллера, где величина выходного импульса в основном постоянна вне зависимости от

числа первичных электронов. Этот режим может быть использован для счета событий. Рис. 3 показывает более детально различные области работы газонаполненных детекторов.

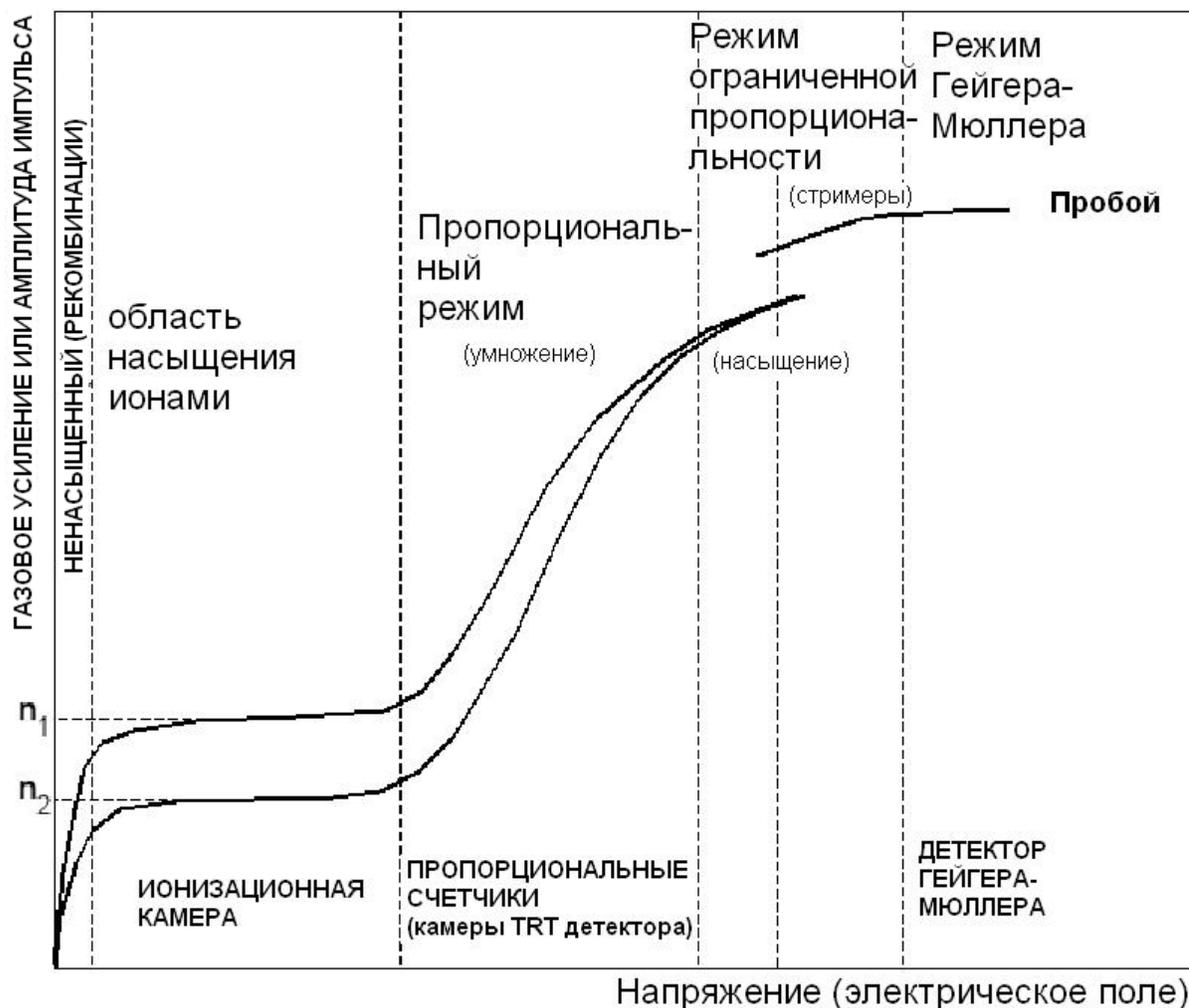


Рисунок 3 Области работы газонаполненных детекторов. Две кривые показывают общее число зарядов (прямо связанное с коэффициентом усиления или амплитудой импульса) в зависимости от приложенного напряжения (т.е. величины электрического поля) для различного числа начальных пар ионов ($n_1 > n_2$). При самой низкой величине электрического поля рекомбинации снижают величину собранного заряда ниже обычного числа ионных пар. При увеличении напряжения достигается ионное насыщение. С дальнейшим увеличением напряжения достигается порог газового усиления. Внутри некоторой области собранный заряд пропорционален числу ионных пар (пропорциональный режим). При дальнейшем увеличении поля нелинейные процессы, такие как пространственный заряд, уменьшают наклон кривой усиления (режим ограниченной пропорциональности). В режиме Гейгера-Мюллера амплитуда импульса постоянна, несмотря на число ионных пар от начального излучения. Особый режим работы это самогасящийся стримерный режим, где все еще зависимые от напряжения лавины локально ограничены

4. Процессы присоединения в кислороде

Вместе с процессами создания зарядов также идут процессы потери заряда, в частности присоединение электронов. Для ограничения раннего пробоя из-за присоединения электронов часто используются добавки к рабочей смеси газов, имеющих электроотрицательную природу (высокое сродство к электрону). Например, тетра-фторид углерода (CF_4) увеличивает дрейфовую скорость, а также известен тем, что ограничивает или восстанавливает отложения на проволочке до определенного уровня. Такие добавки, как кислород, SF_6 , CF_6Br или другие галогенсодержащие составляющие отодвигают точку разряда и, таким образом, обеспечивают безопасность работы. Даже контролируемые уровни воды, испаряемой в рабочую смесь газов (иногда получаемой из влажности окружающей среды) могут иметь положительные качества, например частичное восстановление потерь проводимости поверхности электрода, вызванное старением. Потери первичных электронов ионизации в дополнительных процессах ухудшают энергетическое разрешение из-за сильных флуктуаций размера кластеров. Удаление вторичных электронов из лавин снижает коэффициент умножения, но также задерживает высоковольтный разряд.

Далее показано более детализированное описание механизмов присоединения в кислороде, происходящие в смеси на основе Хе:

Диссоциативное присоединение

Присоединение электронов к свободной молекуле кислорода в общем описывается двумя процессами: двойным и тройным присоединением.

Первое, называемое также «диссоциативное присоединение», описывает следующий процесс:

- Присоединение электрона переводит молекулу кислорода в возбужденное состояние. Испускаемая энергия в процессе снятия возбуждения разрушает молекулу на нейтральный атом кислорода и анион кислорода.



Взяв энергию диссоциации для молекулы кислорода, $D=5,08$ эВ, и энергию сродства электрона к аниону O^- , $A = 1,46$ эВ, порог для подобного процесса лежит при энергиях электрона $D-A = 3,6$ эВ.

При более низких энергиях имеют место другие механизмы.

- Снова присоединение электрона переводит молекулу кислорода в возбужденное состояние.



возбужденная молекула кислорода может снять возбуждение при существовании третьего тела M (другой молекулы или атома газа)

или передать выделенную энергию кинетически (если возбуждение энергетически неразрешено). Электрон остается присоединенным к молекуле кислорода.



Снятие возбуждения может также вызвать отделение электрона.

