

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

СИМОНЕНКО Александр Валерьевич

**Создание системы контроля и изучение характеристик мюонных
счетчиков установки CDF II для экспериментов на Тэватроне.**

Специальность: 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Владимир Викторович Глаголев

Дубна – 2017

Оглавление	
Введение.....	4
ГЛАВА 1.....	9
Коллайдер Тэватрон и детектор CDF.....	9
1.1 Ускорительный комплекс Фермилаба	9
1.1.1 Источник протонов	10
1.1.2 Источник антипротонов	10
1.1.3 Тэватрон.....	10
1.2 Эксперимент CDF	13
1.3 Детектор CDF	14
1.3.1 Система регистрации треков заряженных частиц	17
1.3.2 Калориметрия	20
1.3.3 Мюонная система	22
1.3.4 Система сбора данных и триггеров	25
1.3.5 Система триггерных запретов.....	28
ГЛАВА 2.....	35
Создание системы контроля за сцинтилляционными счетчиками мюонного триггера установки CDF II (2009 - 2012 гг.)	35
2.1 Типы сцинтилляционных счетчиков мюонного триггера	35
2.2 Система управления и мониторинга сцинтилляционных детекторов старого типа.....	37
2.2.1 Аппаратная составляющая	37
2.2.2 Программное обеспечение	38
2.3 Система контроля и мониторинга сцинтилляционных детекторов нового типа	42
2.3.1 Аппаратная составляющая	42
2.3.2 Программное обеспечение	43
2.4 Дополнительные аппаратные средства контроля.....	48
2.5 Интеграция системы мониторинга сцинтилляционных детекторов мюонного триггера в глобальную среду мониторинга установки CDF II	49
2.6 Выводы.....	55

ГЛАВА 3.....	57
Исследование старения сцинтилляционных счетчиков установки CDF в RUN II (1999-2009 гг.).....	57
3.1. Особенности измерений.....	57
3.2 Состав выборки исследуемых сцинтилляционных счетчиков. Методика вычисления постоянной старения сцинтилляционных счетчиков	63
3.2.1 Счетчики верхней и нижней центральной части установки.....	63
3.2.2 Счетчики вокруг магнитных тороидов	65
3.2.3 Дополнительные счетчики центральной части установки	67
3.2.4 Обновленные счетчики центральной части установки	69
3.3 Изучение зависимости технической длины ослабления света от времени для счетчиков нового типа центральной части установки....	71
3.4 Выводы.....	76
ГЛАВА 4.....	77
Измерение заряда ТОП-кварка	77
4.1 Критерии отбора событий.....	78
4.2 Реконструкция $t\bar{t}$ события	82
4.3 Определение заряда b -струи	83
4.4 Фоновые процессы.....	84
4.5 Систематические погрешности	86
4.6 Определение чистоты сигнала.....	87
4.7 Статистическая обработка	88
4.9 Результаты измерения заряда t -кварка	93
4.10 Выводы.....	96
Заключение	97
Литература	99

Введение

Актуальность работы

После появления Стандартной Модели (СМ), которая объяснила существование большого количества различных частиц, открытых с помощью космических лучей и ускорительных экспериментов, активизировались поиски элементарных частиц СМ – кварков и лептонов и исследование их свойств. Одними из значимых открытий прошедших лет было обнаружение c, b, t – кварков, W, Z – бозонов и бозона Хиггса. Однако, СМ не может объяснить многие аспекты, как например, иерархию масс частиц, число поколений кварков и лептонов и др. Эти и другие причины послужили поводом создания новых теорий (за пределами СМ), таких как, модели с 4-м поколением кварков, теория великого объединения, суперсимметрия, теория струн и другие.

Проверкой СМ и поиском частиц и явлений за пределами СМ занимались и занимаются коллайдерные эксперименты, в частности эксперимент CDF [53] на Тэватроне. На CDF выполнена обширная программа исследований свойств частиц, в 1995 г. совместно с экспериментом D0 обнаружен топ-кварк и во втором сеансе CDF изучены его свойства. Масса топ-кварка в 173 ГэВ указывает на константу Юкавы, $y_t \sim 1$. Он распадается в течение 10^{-25} секунды, как «голый кварк» до адронизации. Изучение свойств топ-кварка важно для понимания стандартной модели и поиска новой физики за ее пределами. Так например, в рамках поиска проявлений новой физики вызывает несомненный интерес проверка гипотезы Д. Чанга [35] о существовании экзотического кварка четвертого поколения с зарядом $-4/3$ и массой $\sim 170 \text{ ГэВ}/c^2$ на данных эксперимента CDF.

Экспериментальная установка CDF («the Collider Detector at Fermilab») расположенная на кольце Тэватрона, представляла собой классический пример коллайдерного универсального детектора, состоящего из трековой части, калориметрии и мюонной системы. Подчеркнем роль мюонной системы. Она отбирает процессы с мюонами в конечном состоянии которые позволяют сформировать лучшие триггерные наборы для исследования различных процессов в коллайдерном эксперименте. Кроме того, мюонная система применяется для подавления космического фона. Это налагает высокие требования на эффективность мюонной системы. Разработка системы контроля сцинтилляционных счетчиков мюонного триггера, несомненно, являлась актуальной и необходимой задачей для обеспечения контролируемого и бесперебойного функционирования мюонного триггера.

Цель работы

- 1) Обеспечение высокой эффективности работы мюонной системы установки CDF посредством:
 - создания системы контроля за 1200 сцинтилляционными счетчиками мюонного триггера, включающей аппаратные средства и соответствующее программное обеспечение и интеграции ее в глобальную среду мониторинга установки CDF II.
 - изучение старения сцинтилляционных детекторов мюонной системы CDF с помощью измерения светосбора для постоянной выборки счетчиков из разных подсистем мюонного триггера, а также прогнозирования дальнейшей деградации счетчиков, основываясь на данных за 10 лет наблюдений (1999 – 2009 гг.).
- 2) Проверка гипотезы о существовании экзотического кварка четвертого поколения с зарядом $-4/3$.

Диссертация обобщает результаты завершенных работ автора, выполненных в 2007-2012 гг. в Объединенном институте ядерных

исследований и Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми.

Научная новизна

Впервые проведено длительное (в течение 10 лет) измерение эффективности работы сцинтилляционных счетчиков из различных подсистем мюонного триггера установки CDF. Показано, что у сцинтилляционных счетчиков на основе полистирола ухудшение светосбора происходит в 2 раза медленнее по сравнению со счетчиками на основе поливинилтолуола ($\tau = 10,7$ и $\tau = 5,3$ лет соответственно).

Впервые, на основе 7-летних наблюдений, показано, что техническая длина ослабления света (TAL) для системы «сцинтиллятор + спектросмещающее волокно» уменьшается не более 25% за этот период.

Впервые на данных CDF, набранных с 2002 по 2010 гг., проведены измерения заряда топ-кварка с целью проверки гипотезы о существовании экзотического кварка четвертого поколения с зарядом $-4/3$ и массой ≈ 170 ГэВ/с². Измерения подтвердили согласие результатов со Стандартной моделью.

Практическая значимость

Созданная система контроля за параметрами сцинтилляционных детекторов мюонного триггера установки CDF II позволила непрерывно мониторировать работу счетчиков и минимизировать время восстановления в случае сбоев, тем самым, повысив эффективность регистрации частиц установкой в целом.

Получены уникальные, с точки зрения продолжительности наблюдения (10 лет), данные о старении системы «сцинтиллятор + оптоволокно», которые могут быть использованы при создании экспериментальных установок со

сцинтилляционными пластиковыми детекторами, с целью определения оптимальных материалов и размеров, а также прогнозирования изменения эффективности регистрации во времени.

Личный вклад соискателя

Автором выполнена работа по созданию программного обеспечения системы контроля за параметрами всей совокупности сцинтилляционных счетчиков (~1200 штук) мюонной системы установки CDF II, включая уникальное программное обеспечение собственной разработки и программ интеграции в глобальную систему мониторинга установки CDF II на основе пакета iFIX 5.0.

Автор принимал непосредственное участие в обеспечении непрерывной и эффективной работы мюонного триггера, являясь экспертом данной подсистемы с 2007 до 2011 года включительно. Он измерял светосбор с образцов сцинтилляционных счетчиков из различных подсистем мюонного триггера установки CDF для контроля их старения и прогнозирования дальнейшей деградации.

Автор принимал активное участие в статистическом анализе гипотез при определении заряда топ-кварка.

Автор защищает

- Создание уникальной аппаратно-программной системы управления параметрами (высокое напряжение, пороги дискриминации фоновых сигналов) для всей совокупности сцинтилляционных счетчиков мюонной системы установки CDF II (~1200 счетчиков), включая старые и новые типы детекторов.
- Создание комплекса программ на основе пакета iFIX 5.0 для интеграции системы контроля мюонного триггера в глобальную систему мониторинга установки CDF II.

- Результаты изучения старения сцинтилляционных детекторов различных подсистем мюонного триггера на основе тестирования постоянной выборки счетчиков в течение 10 лет (с 1999 по 2009 гг.).
- Выполнение статистической проверки гипотез в проведении анализа по измерению заряда топ-кварка на данных CDF II.

Апробация работы

Результаты работы докладывались (в том числе и автором) на международных конференциях TOP'08 (Эльба, Италия 18-24.05.2008), Workshop on Jet Spectroscopy (Пиза, Италия, 18-19.04.2011), EPS HEP'2013 (Стокгольм, Швеция, 17-24.07.2013), на семинарах Объединенного института ядерных исследований и на семинарах коллаборации CDF. Основные результаты опубликованы в журналах «Письма в ЭЧАЯ», «Physical Review D», «Nuclear Instruments and Methods in Physics A», «ЭЧАЯ» (обзор).

Результаты, выносимые автором на защиту, опубликованы в работах [25, 28, 29, 38].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Объем диссертации 104 страниц, 40 рисунков, 12 таблиц, 53 наименований цитируемой литературы и электронных источников.

ГЛАВА 1

Коллайдер Тэватрон и детектор CDF

1.1 Ускорительный комплекс Фермилаба

Ускорительный комплекс Фермилаба – совокупность линейных и кольцевых ускорителей расположенных на территории Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми в городке Батавия, штата Иллинойс, недалеко от Чикаго, США. Замыкает цепочку ускорителей коллайдер Теватрон [1]. До того момента, как на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе начали реализовывать протон-протонные столкновения, Теватрон являлся лидирующим коллайдером в мире. На нем сталкивались пучки протонов и антипротонов с энергией $\sqrt{s} = 1,96$ ТэВ в точках пересечения, где располагаются установки CDF (Collider Detector experiment at Fermilab) и D0 (является техническим названием позиции детектора на кольце Теватрона).

Для достижения энергии в 980 ГэВ, пучки протонов и антипротонов проходят через последовательность промежуточных ускорителей (рис. 1).

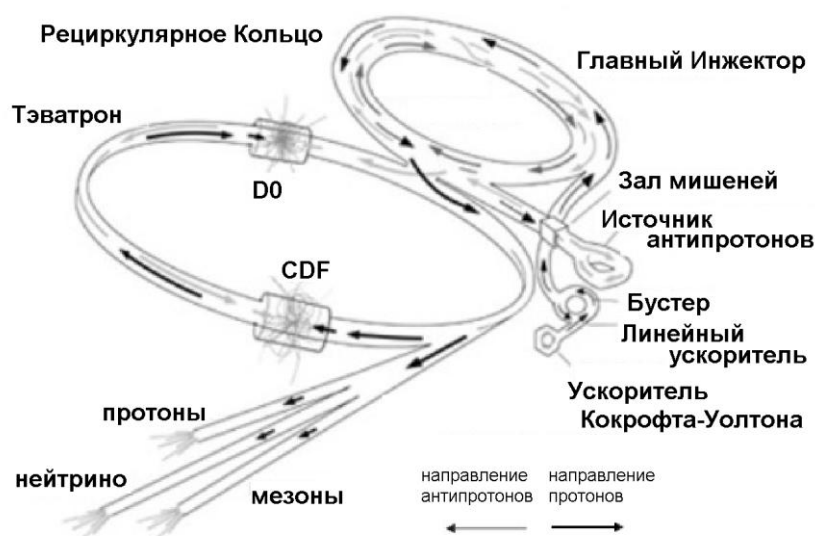


Рис. 1: Схематический вид ускорительного комплекса Фермилаба

1.1.1 Источник протонов

Последовательность ускорителей начинается с предускорителя Кокфорда – Уолтона. Он служит источником отрицательно заряженных ионов водорода, которые ускоряются в электрическом поле до энергии в 750 КэВ. Далее ионы попадают в 150 метровый линейный ускоритель линак, состоящий из радиочастотных резонаторов, где ускоряются до 400 МэВ. Затем, попадая в первый кольцевой ускоритель – бустер, ионы водорода, проходя через углеродную фольгу, избавляются от электронов, а оставшиеся протоны ускоряются до 8 ГэВ. Следующее увеличение энергии происходит на втором кольцевом ускорителе – главном инжекторе, который ускоряет протоны до энергии 150 ГэВ. И только затем протоны инжектируются в Тэватрон, где достигают энергии 980 ГэВ.

1.1.2 Источник антипротонов

Антипротоны рождаются в так называемом «антипротонном источнике». Протоны ускоренные в главном инжекторе до энергии 120 ГэВ бомбардируют никелевую мишень, где в результате соударений образуется веер разного сорта вторичных частиц. Магниты настроены таким образом, чтобы отобрать лишь антипротоны с энергией 8 ГэВ, которые затем накапливаются в рециркулярном кольце. Рециркулярное кольцо располагается в том же тоннеле, что и главный инжектор, но при этом в нем антипротоны не ускоряются, а циркулируют с постоянной энергией 8 ГэВ. Когда количество антипротонов становится достаточным, они инжектируются в главный инжектор и ускоряются, также как и протоны, до энергии 150 ГэВ и далее в Тэватроне до 980 ГэВ.

1.1.3 Тэватрон

Тэватрон – крупнейший из ускорителей Фермилаба, протяженностью около 6 километров. Энергия протонов и антипротонов увеличивается со 150 ГэВ до 980 ГэВ благодаря восьми ускоряющим резонаторам, расположенным вдоль туннеля. Главная цель Тэватрона – действовать как накопительное кольцо, где протоны и антипротоны могут сталкиваться друг с другом с образованием интересующих нас вторичных частиц. Когда достигнута предельная энергия частиц (980 ГэВ), два противоположно вращающихся параллельных пучка частиц пропускаются друг через друга в двух точках: В0 (соответствует установке CDF) и D0 (соответствует одноименной установке) в течении нескольких часов, что носит название «store». Мгновенная светимость в течение «store» определяется следующим выражением:

$$L = fF \frac{N_B N_p N_{\bar{p}}}{2\pi(\sigma_p^2 + \sigma_{\bar{p}}^2)} \quad (1)$$

где f – частота вращения, F – форм-фактор зависящий от длительности сгустка (банча), N_B – количество сгустков, $N_p(N_{\bar{p}})$ – количество протонов (антипротонов) в каждом сгустке и $\sigma_p(\sigma_{\bar{p}})$ – стандартное отклонение пучка в пространстве в точке взаимодействия.

Мгновенная светимость – величина не постоянная в течении «store». Она уменьшается с течением времени. После того как ее значение уменьшается на порядок (в 10 раз), «store» заканчивается и Тэватрон начинает подготовку к новому «store». При этом антипротоны сохраняют, переводя обратно в рециркулярное кольцо. Случается также аварийная остановка «store» из-за квенча (quench) – потери сверхпроводимости магнитами ускорителя и как следствие, расфокусирования пучков частиц.

В таблице 1 собраны основные параметры Тэватрона для периода RUN II (2002 – 2011 гг.).

Таблица 1: Основные параметры Тэватрона для RUN II периода

Параметр	Значение для периода RUN II
Кол-во сгустков (bunches)	36
Общая длительность сгустков [нс]	396
Длина сгустка [м]	0.38
Кол-во протонов/сгусток (N_p)	$2,7 \times 10^{11}$
Кол-во антипротонов/сгусток ($N_{\bar{p}}$)	7×10^{10}
Типичная мгновенная светимость [$см^{-2}сек^{-1}$]	2×10^{32}

Интегральная светимость, полученная от Тэватрона, и светимость эксперимента CDF, записанная на магнитную ленту для периода RUN II, показана на рисунке 2.

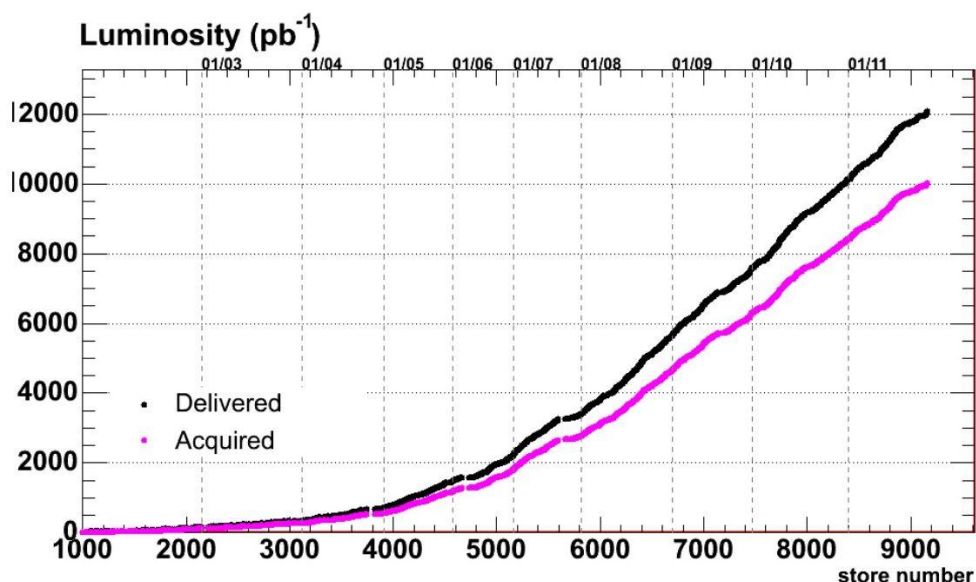


Рис. 2: Интегральная светимость для периода набора данных RUN II. Черная кривая – светимость, доставленная Тэватроном; синяя (серая в черно-белом исполнении) кривая – светимость эксперимента CDF записанная на магнитную ленту

1.2 Эксперимент CDF

В эксперименте CDF участвовали более чем 500 ученых из ~60 институтов со всего мира. Эксперимент стартовал в 1988 году. Одним из крупнейших достижений данного эксперимента по результатам набора данных в течение RUN I с 1992 по 1996 гг., было обнаружение топ кварка в 1995 году, совместно с экспериментом D0 [2, 3]. На тот момент масса топ кварка и сечение образования $t\bar{t}$ составили

$$m_t = 176 \pm 8(stat) \pm 10(syst) \text{ GeV}/c^2, \quad \sigma_{pp}^{t\bar{t}} = 6,8_{-2.4}^{+3.4} \text{ pb}, \quad \text{соответственно [2].}$$

По окончании RUN I последовала серьезная модернизация детекторов установки CDF. Набор реальных физических данных (RUN II) стартовал только спустя 6 лет, в 2002 году. Однако, спустя 9 лет успешной работы и прогресса в исследованиях физики частиц, Тэватрон прекратил свою работу в сентябре 2011 года. В результате RUN II эксперимента CDF в частности:

- Были изучены свойства топ кварка, проведены прецизионные измерения, в том числе, массы топ кварка и его заряда. Первоначальная точность измерений массы $\delta m_t \leq 3 \text{ ГэВ}/c^2$ основывалась на статистике 1 fb^{-1} данных, а к концу периода RUN II, набранная статистика превысила первоначальную в десять раз, что позволило улучшить точность до менее чем 1 $\text{ГэВ}/c^2$. Масса топ кварка полученная на данных CDF на статистике 8,7 fb^{-1} составляет

$$m_t = 173,16 \pm 0,57(stat) \pm 0,74(syst) \text{ ГэВ}/c^2 \text{ [4].}$$

Был измерен заряд топ кварка на статистике 5,6 fb^{-1} [5]. Гипотеза о существовании экзотического кварка четвертого поколения с зарядом - 4/3 и массой $\approx 170 \text{ ГэВ}/c^2$ была отвергнута с 99% уровнем достоверности.

- Была реализована обширная программа по изучению электро-слабых взаимодействий, в том числе была измерена масса W -бозона на $2,2 \text{ фб}^{-1}$ данных с точностью 19 МэВ/с^2 . Текущее значение массы W -бозона, основанное на данных CDF $m_W = 80387 \pm 12(\text{stat}) \pm 15(\text{syst}) \text{ МэВ/с}^2$ [6].
- Был проведен прямой поиск новых явлений, резонансов с большой массой (Z' , W' , s -нейтрино, гравитон), супер-симметричных частиц (стоп, чарджино), новых или возбужденных фермионов (t' , b'), и т.д. До времени окончания работы Тэватрона в 2011 году, подобных частиц обнаружено не было. Результаты соответствовали ожиданиям Стандартной Модели [7, 8, 9, 10, 11, 12].
- Были проведены тесты пертурбативной КХД. Результаты показали хорошее согласие с теорией (суб-структура струй с высоким поперечным моментом, измерение сечения образования

$$Z/\gamma \rightarrow \mu^+ \mu^- + jets.$$

- Впервые было произведено наблюдение $B_S - \bar{B}_S$ осцилляций в 2006 году [13].
- Были исключены значения масс бозона Хиггса в диапазоне 90-109 ГэВ/с^2 и 149-182 ГэВ/с^2 [14]

1.3 Детектор CDF

Установка CDF (рис. 3) представляет собой детектор общего назначения, спроектированный для исследований в рамках стандартной модели и поиска новой физики за ее пределами. Детектор расположен на коллайдере Тэватрон в точке пересечения встречных $p\bar{p}$ – пучков (техническая позиция на

ускорителе обозначается как «В0»). Как и большинство детекторов, используемых в физике высоких энергий, установка CDF имеет цилиндрическую симметрию.

Со времени своего ввода в эксплуатацию детектор CDF претерпел ряд существенных изменений и усовершенствований. Повышение энергии сталкивающихся частиц в системе центра масс с 1,8 до 1,96 ТэВ и увеличение светимости с $2,0 \cdot 10^{31}$ до $3,0 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, с одновременным увеличением числа сгустков в пучке от 6 до 36, потребовало улучшения параметров и обновления отдельных детектирующих систем и соответствующих систем контроля за их параметрами. Был увеличен аксептанс установки, модернизирована большая часть подсистем триггеров всех уровней и системы сбора и хранения данных. Все эти усовершенствования позволили увеличить скорость регистрации событий относительно RUN I [15].

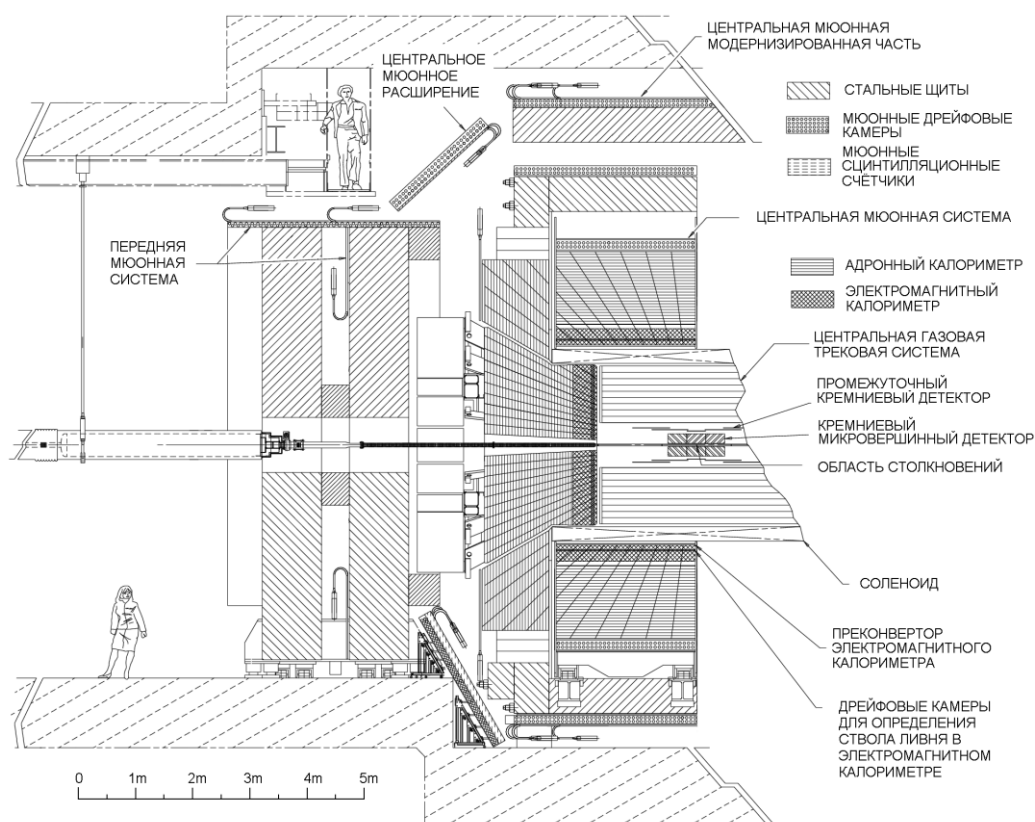


Рис. 3: Установка CDF

В состав детектора CDF входит высокоточная система регистрации треков заряженных частиц, состоящая из кремниевого вершинного детектора и многопроволочной камеры – центрального наружного трекера, которые образуют единую трековую систему и расположены внутри соленоида с индукцией $L = 1,4$ Тл. Далее следует калориметрическая система высокой сегментации состоящая из набора электромагнитных и адронных калориметров [15], где определяют энергии и координаты электронов, фотонов и адронных струй. Снаружи установки по периметру расположена мюонная система, состоящая из сцинтилляционных счётчиков и мюонных дрейфовых камер [15].

CDF использует правостороннюю цилиндрическую систему координат (рис. 4). Положительное направление оси Z параллельно налетающим протонам, а горизонтальная ось X имеет положительное направление наружу от кольца ускорителя. Цилиндрические координаты r , θ , ϕ определяются следующим образом: расстояние в поперечной плоскости $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, полярный угол θ измеряется от направления протонов и азимутальный угол ϕ измеряется относительно оси X [15].

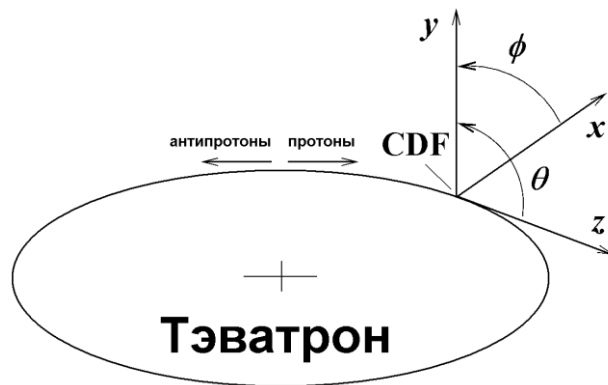


Рис. 4: Система координат, используемая на установке CDF

Используя эти координаты, можно также определить псевдобыстроту η :

$$\eta = -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (2)$$

1.3.1 Система регистрации треков заряженных частиц

Как уже сказано выше, система регистрации треков заряженных частиц располагается внутри магнитного поля 1,4 Тесла, направленного параллельно пучкам частиц, что вызывает перемещение заряженных частиц по окружности в поперечной плоскости.

На рисунке 5 показана трековая система, которая состоит из двух детекторов: Составной кремниевый детектор и Центральный наружный трекер (Central Outer Tracker - COT).

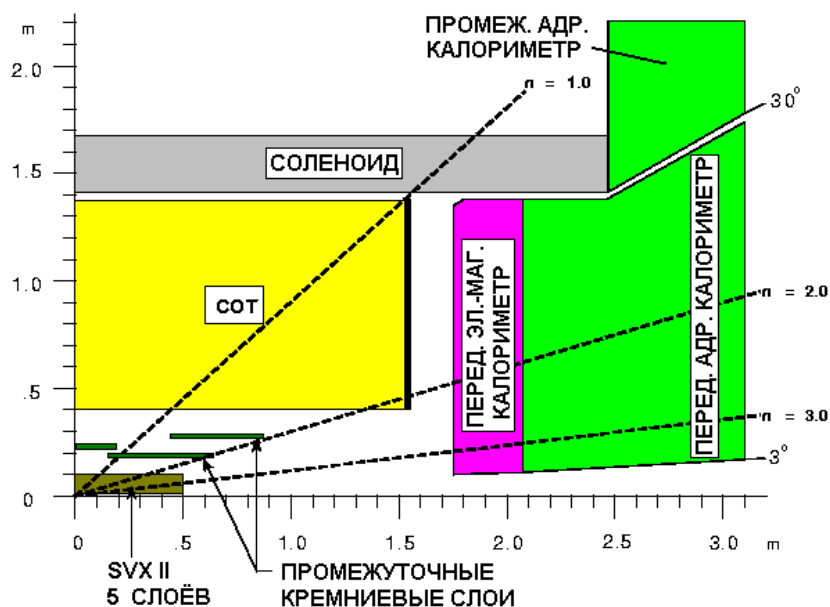


Рис. 5: Система регистрации треков заряженных частиц

Составной Кремниевый Детектор

Составной кремниевый детектор состоит из 8 слоев кремниевых сенсоров (диоды на основе р-п перехода) разделенных на три подсистемы (рис. 6, 7).

Нулевой слой (Layer00 - L00) расположен ближе всего к пучкам налетающих протонов и антипротонов (15 мм) и состоит из односторонних кремниевых микропластин [15, 16].

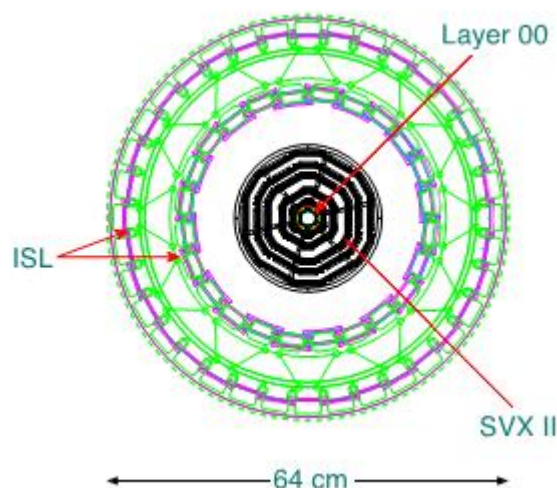


Рис. 6: Составной кремниевый детектор в поперечном разрезе

Следующие пять слоев составляет *Кремниевый вершинный детектор* (Silicon Vertex Detector – SVX), Эти слои сконструированы из двухсторонних кремниевых пластин. Стрипы на одной стороне служат для измерения координат в плоскости $r - \phi$, на другой – в z направлении [15, 16].

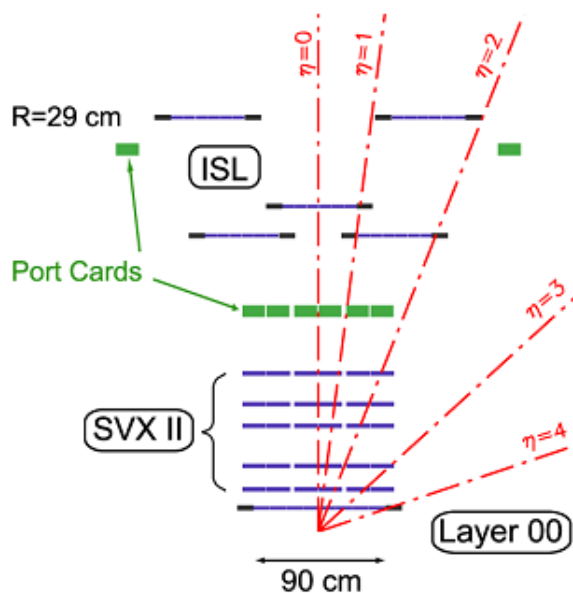


Рис. 7: Составной кремниевый детектор на $r - z$ проекции

Последняя подсистема – *Промежуточный кремниевый детектор* (Intermediate Silicon Layers - ISL). Состоит из одиночного слоя

расположенного по радиусу 22 см в центральной зоне $|\eta| < 1$ и двух слоев по радиусу 20 и 28 см в передней зоне ($1,0 < |\eta| < 2,0$). Используются двухсторонние кремниевые стрипы с 0° и малым углом $\pm 1,2^\circ$ относительно оси пучка [15, 16].

Идентификация вторичных вершин выполнялась с разрешением 40 мкм по прицельному параметру.

Центральный наружный трекер

Центральный наружный трекер (Central Outer Tracker - COT) - многопроволочная газовая дрейфовая камера цилиндрической формы (рис. 8), расположенная по радиусу от 44 до 132 см, способная восстанавливать треки в области $|\eta| < 1$. Состоит из 96 слоев чувствительных проволочек сгруппированных в 8 суперслоев (рис. 8). Четыре суперслоя – аксиальные, проволочки натянуты параллельно оси пучка. Другие четыре слоя являются стерео-слоями, повернутыми на угол $\pm 2^\circ$ по отношению к оси пучка. Каждый суперслой делится по φ на т.н. «суперячейки», и каждая такая ячейка имеет 12 чувствительных проволочек. Максимум дрейфового расстояния приблизительно одинаков для всех суперслоев. Суперячейки повернуты на 35° по отношению к радиальному направлению. Это позволяет компенсировать угол Лоренца для дрейфующих электронов в магнитном поле. Для заполнения камеры использовался стандартный газ – смесь аргона с этаном в равных пропорциях [15, 17].

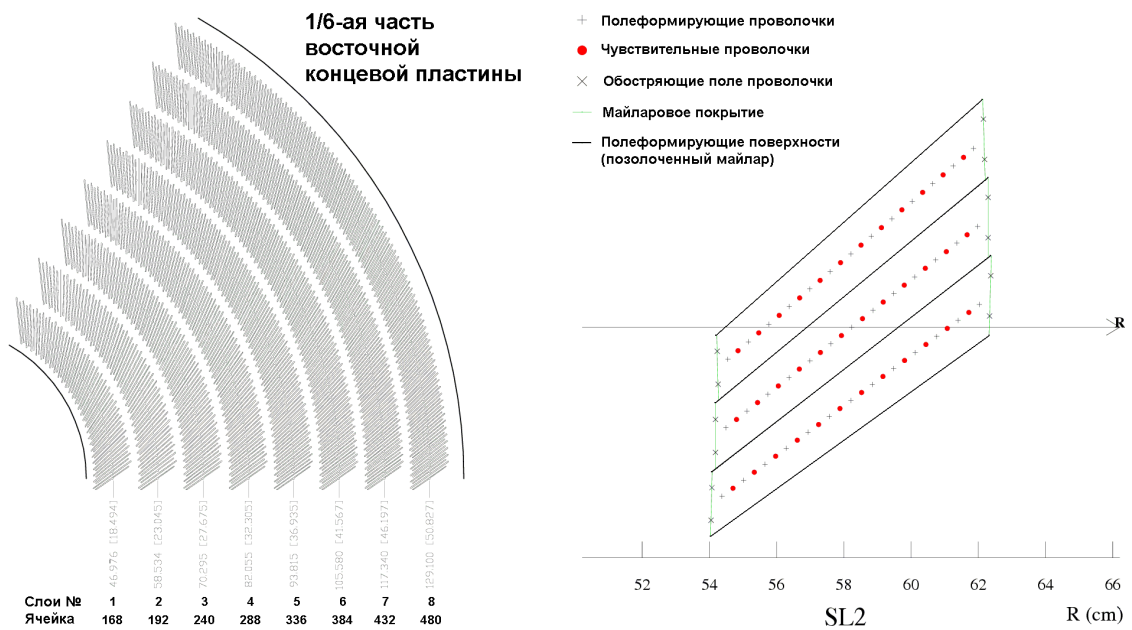


Рис. 8: Центральный Наружный Трекер (COT) в разрезе. Левая половина демонстрирует разрез концевой пластинки; нечётные слои являются стерео суперслоями, а чётные слои являются осевыми суперслоями

1.3.2 Калориметрия

Калориметрический комплекс покрывает область $|\eta| < 3,6$. Как видно на рисунке 9, он включает электромагнитную часть, которая измеряет энергию электронов и фотонов и, соответственно, адронную часть, отвечающую за измерение энергий струй (адронов).

Калориметры условно делятся на две группы – центральную и переднюю [15]. Всего калориметрический комплекс CDF включает 5 калориметров, параметры которых, энергетическое разрешение и область покрытия η , приведены в таблице 2 [15, 18]. Все калориметры состоят из сегментов, т.н. «башень» (tower) по η и ϕ . Сегментация представлена в таблице 3.

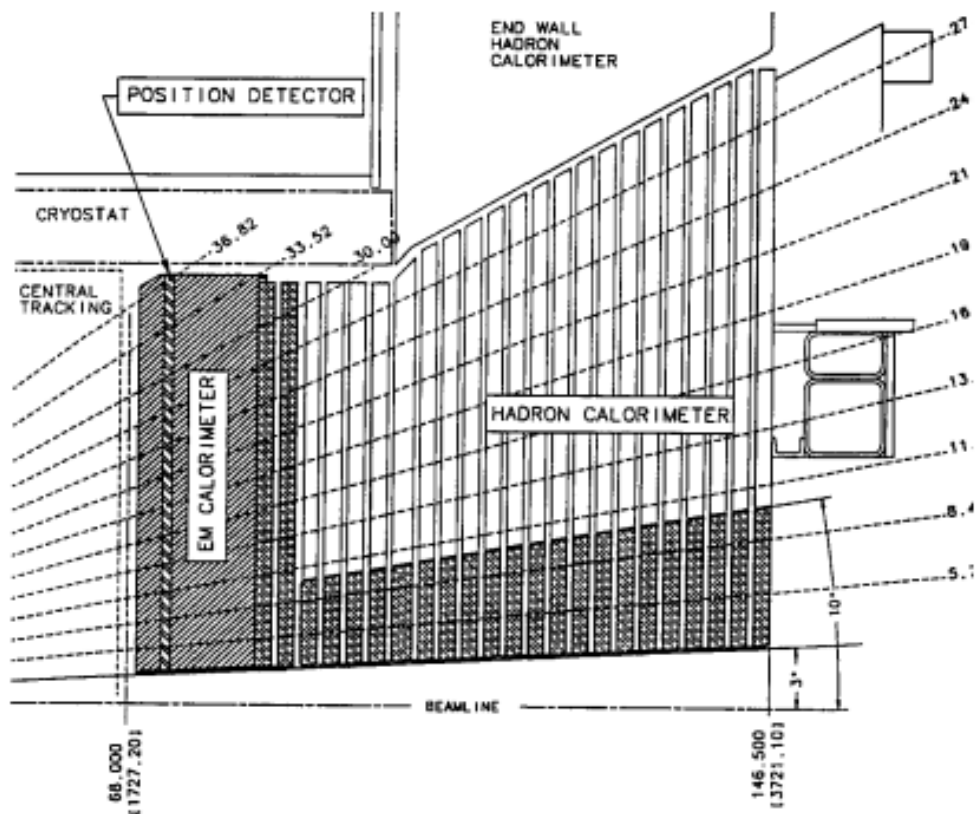


Рис. 9: Разрез верхней части переднего калориметра

Таблица 2: Основные параметры калориметров установки CDF II

калориметр	аббрев. (англ.)	покрытие по псевдобыстроте, η	энергетическое разрешение (%)
центральный электромагнитный	CEM	$ \eta < 1.1$	$13.5 / \sqrt{E_T} \oplus 2$
передний электромагнитный	PEM	$1.1 < \eta < 3.6$	$16 / \sqrt{E_T} \oplus 1$
центральный адронный	CHA	$ \eta < 0.9$	$50 / \sqrt{E_T} \oplus 3$
пристеночный адронный (end-wall)	WHA	$0.7 < \eta < 1.2$	$75 / \sqrt{E_T} \oplus 4$
передний адронный	PHA	$1.2 < \eta < 3.6$	$80 / \sqrt{E_T} \oplus 5$

Таблица 3: Сегментация калориметров установки CDF II

$ \eta $ интервал	$\Delta\varphi$	$\Delta\eta$
0. – 1.1 (1.2 had.)	15^0	~ 0.1
1.1 (1.2 had) – 1.8 (1.2 had.)	7.5^0	~ 0.1
1.8 – 2.1 (1.2 had.)	7.5^0	~ 0.16
2.1 – 3.64 (1.2 had.)	15^0	0.2 – 0.6

Электромагнитные калориметры (СЕМ, РЕМ) состоят из чередующихся слоев свинца и сцинтиллятора на основе полистирола. Полная толщина СЕМ равна $18 X_0$ (радиационных длин), в то время как РЕМ имеет $21 X_0$. В обоих калориметрах на глубине приблизительно $6 X_0$ расположены детекторы определения максимума ливня (СЕС, PES). Измерения положения и поперечного профиля ливня используется для разделения электронов и фотонов [15].

Центральные адронные калориметры (СНА, WНА) состоят из железа и сцинтилляторов на основе РММА полистирола. Однако передний адронный калориметр (РНА) выполнен из тех же материалов, что и электромагнитные калориметры (свинец и полистирол) [15].

1.3.3 Мюонная система

Мюонная система расположена на максимальном удалении от точки пересечения пучков и состоит из сцинтилляционных счетчиков, дрейфовых камер и стального поглотителя. Поглотитель необходим для эффективного подавления фона, идущего от центра установки, что помогает облегчить идентификацию мюонов.

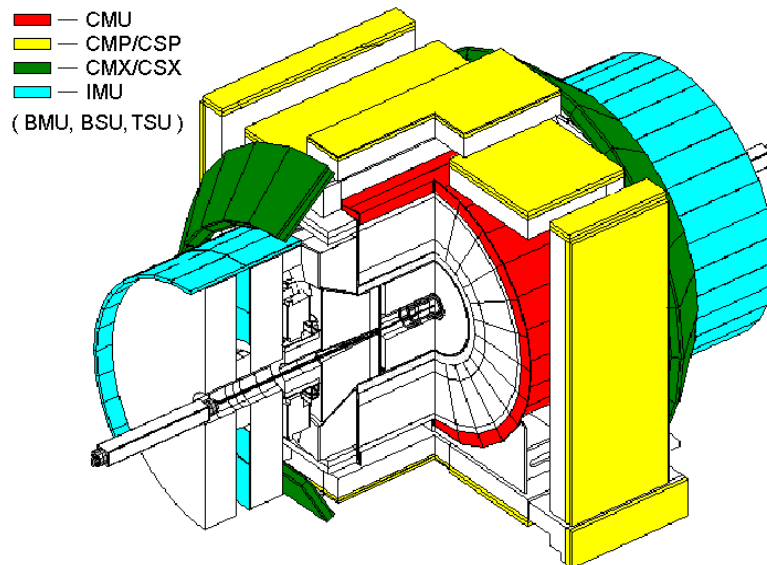


Рис. 10: Четыре части мюонной системы

Мюонная система состоит из 4 частей (рис. 10):

- *Центральный мюонный детектор (Central Muon Detector, CMU)*, расположен сразу за Центральным адронным калориметром, включает в себя 144 модуля с 16 прямоугольными ячейками в каждом. Состоит исключительно из дрейфовых камер. Покрывает область $|\eta| < 0.6$. Требование на минимальный поперечный импульс регистрируемого мюона 1,4 ГэВ / с [15].
- *Дополнение центрального мюонного детектора (Central Muon Upgrade Detector, CMP)*, состоит из дополнительного набора мюонных камер расположенных после слоя стали толщиной 60 см. Камеры имеют фиксированную длину по Z, и образуют прямоугольный короб вокруг цилиндрической части детектора CDF II. CMP покрывает область псевдобыстрот $|\eta| < 0.6$, однако величина зависит от азимута, как показано на рисунке 11. Слой сцинтилляционных счетчиков (Central Muon Scintillator Upgrade, CSP) толщиной 2.5 см смонтирован на внешней поверхности детектора. Для того чтобы CMP мог детектировать мюоны, минимальный p_T должен быть > 2.2 ГэВ/с [15].

- *Расширение центрального мюонного детектора* (Central Muon Extension, CMX) является совокупностью трапецевидных секций из дрейфовых трубок и сцинтилляционных счетчиков (Central Muon Scintillator Extension, CSX). Счетчики расположены на обеих сторонах центрального детектора в пределах полярного угла от 42° до 55° , что доводит покрытие по вседозыстроте с 0.6 до 1.0 [15]. При 55° CMP/CSX система имеет наложение с поверхностью центральной мюонной системы.
- *Промежуточный мюонный детектор* (Intermediate Muon Upgrade, IMU) проектировался как триггер для мюонов в области псевдозыстрот $|\eta| \leq 1.5$ и для определения т.н. «off-line» мюонов с $|\eta| < 2.0$. Как и в предыдущем случае, детектор состоит из дрейфовых камер (BMU) и сцинтилляционных счетчиков (BSU, TSU). Неработающий тороидальный магнит с этапа RUN I вместе с дополнительными стальными пластинами использовались в качестве щита для защиты IMU детектора от адронов [15].

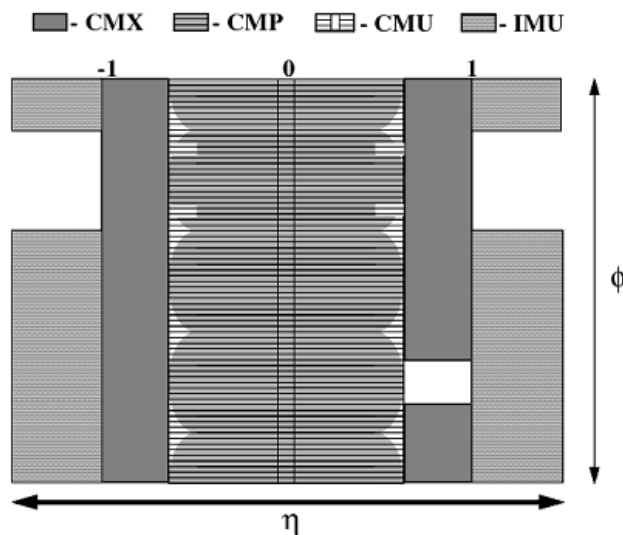


Рис. 11: Покрытие по псевдозыстроте мюонных детекторов CDF

1.3.4 Система сбора данных и триггеров

Система сбора данных CDF способна сохранять поступающие данные со скоростью не более 18 Мбайт/с. При среднем размере события в 170 Кбайт, частота поступления событий равняется 100 Гц. Таким образом, при входящей частоте данных от соударений в 1.7 МГц, триггерная система CDF II должна отклонить более чем 99.99% событий. Чтобы выполнить эту задачу, была разработана трехуровневая архитектура, где каждый уровень уменьшает частоту поступающих событий с минимально возможным временем задержки. Блок-схема триггерной системы представлена на рисунке 12.

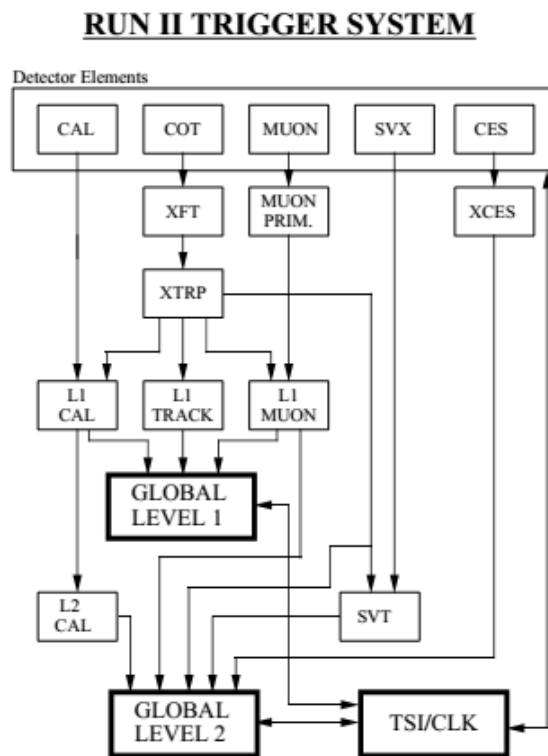


Рис. 12: Блок-схема триггерной системы CDF II

Триггеры первого уровня (L1).

Главная задача системы триггеров первого уровня – провести начальный отбор искомых событий. С помощью сдвигового регистра на 42 цикла

(период одного цикла составляет 132 нс), входящие данные, относящиеся к событию, задерживаются на период длительностью 5544 нс. В течение этого времени триггер первого уровня принимает решение: отклонить или пропустить.

Основные компоненты Триггера 1-го уровня:

- Экстремально быстрый восстановитель трека (Extremely Fast Tracker, XFT) восстанавливает треки в COT;
- Калориметрический триггер (Calorimeter Trigger) отбирает кандидатов на электроны, фотоны и струи в зависимости от величины выделенной энергии;
- Триггер мюонов (Muon Trigger) восстанавливает треки от мюонов, одновременно используя данные XFT триггера при помощи специального программного обеспечения (XTRP), которое позволяет «сшить» восстановленный с помощью XFT трек с мюонным треком.

Возникшие благодаря этим процессам «объекты 1 уровня» поступают на вход глобального триггера 1 уровня (Global Level 1). Он отбирает событие, опираясь на минимально необходимый набор первичных объектов, удовлетворяющих определенным критериям. Триггер первого уровня уменьшает входную частоту записи с 1.7 МГц до 25 кГц на выходе [19].

Триггеры второго уровня (Level 2 trigger).

События успешно прошедшие триггер первого уровня, поступают на вход одного из четырёх асинхронных буферов данных и находятся там пока не будет принято решение: принять или отклонить. В результате, возникает мёртвое время при полной загрузке всех буферов. Для того, чтобы сохранить мёртвое время на уровне 10% при входной частоте данных 25 кГц, триггер второго уровня был разделён на два этапа длительностью по 10 мкс каждый.

В начале триггер второго уровня обрабатывает следующие данные:

- Струи обнаружены в нескольких башнях калориметра. Кластеризация калориметра (L2CAL триггер) дает возможность нахождения полной энергии струи путем суммирования энергии отдельных башен.
- Используются данные системы активных конверторов калориметрической системы (XCES), что уменьшает количество ложных срабатываний от электронов и фотонов, а также улучшает привязку XFT трека на соответствующий кластер калориметра.
- Триггер на основе кремниевого вершинного детектора (SVT) восстанавливает вершинные треки, вычисляя и используя в качестве триггерного прицельный параметр d .
- Поступает также информация о частях треков, включая мюонные, восстановленных в триггере первого уровня.

Далее данные поступают на вход Глобального триггера 2 уровня (Global Level 2), состоящего из набора «альфа» процессоров. Проверяются данные используя определенный набор условий, индивидуальный для каждого процессора.

Триггер 2 уровня уменьшает входную частоту записи с 25 кГц до 350 Гц на выходе.

Триггеры третьего уровня (Level 3 trigger).

На этом этапе происходит полная реконструкция событий при помощи 400 процессоров и соответствующего программного обеспечения.

Триггер третьего уровня образован двумя основными частями: Реконструктором событий (Event Builder, EVB) и L3 обработкой (L3 Farm).

После обработки события триггером второго уровня, EVB собирает все фрагменты события в единый блок данных и отправляет на вход L3 Farm. Тот в свою очередь начинает реконструировать событие, используя оптимизированное программное обеспечение и всю отобранную информацию об этом событии с установки CDF.

При успешном прохождении этого этапа выбранное событие записывается на постоянные носители с частотой 75 Гц для дальнейшей «off-line» обработки.

1.3.5 Система триггерных запретов

Целью триггерного запрета (trigger inhibit - TI) является предотвращение принятия событий с установки CDF, при обнаружении проблемы с детектором, идентифицированной его системой контроля [20].

Существует два типа поступающих сигналов:

- Сигналы от глобальной среды мониторинга на основе пакета iFIX (Main Control System - MCS);
- Быстрые сигналы изменения напряжения от высоковольтных источников питания.

Несмотря на то, что MCS сообщает информацию о скачках напряжения (voltage trip), это происходит относительно медленно (~ сек), в то время как сигналы напрямую от источников высоковольтного напряжения поступают в течении нескольких микросекунд. Таким образом, использование аппаратных сгенерированных сигналов минимизирует вероятность повреждения данных. Кроме того, опыт показывает, что это наиболее частый вид сбоев в работе детекторов, возникающий во время набора данных, поэтому необходимо пытаться ограничить их эффект. Чтобы облегчить счет и идентификацию проблем, создано 16 каналов триггерного запрета, соответствующих отдельным подсистемам детектора или другим системам, связанным с работой Тэватрона. В случае необходимости, количество каналов блокировок может быть легко расширено. Назначения каналов триггерного запрета перечислены в таблице 4.

Таблица 4: Назначение каналов триггерного запрета

Канал	Система
1	Соленоид (Solenoid)
2	Кремниевый вершинный детектор (SVX)
3	Промежуточный кремниевый детектор (ISL)
4	Центральный наружный трекер (COT)
5	Времяпролетная система (TOF)
6	Центральный калориметр (Central Calorimeter)
7	Передний калориметр (Plug Calorimeter)
8	Центральный мюонный детектор (CMU, CMX, CMP)
9	Промежуточный мюонный детектор (IMU)
10	Черенковские счетчики светимости (CLC)
11	Forward (зарезервированно)
12	События Теватрона (TeV Events)
13	Потери Теватрона (TeV Losses) (зарезервированно)
14	Защита стоек (Rack Protection)
15	Блоки питания VME (VME Power Supplies)
16	(неопределенно)

Логика триггерного запрета реализована с использованием коммерческих модулей NIM и САМАС. Любой из каналов запрета может быть замаскирован с пульта управления CDF с использованием блоков выходных регистров в стандарте САМАС. Сигнал «ИЛИ» включающий в себя 16 каналов блокировки посылается как дифференциальный сигнал стандарта ECL на плату Глобального уровня 2 (Global Level 2) расположенную в одном из крейтов управляющим триггерами установки CDF (логический уровень «TRUE» означает блокировку триггера). Система включает в себя один крейт САМАС и два крейта NIM. Доступ к САМАС крейту осуществлялся по той же высокоскоростной линии, которая используется для связи с блоками-дискриминаторами мюонных счетчиков CSX и CSP.

Для каждой подсистемы существует два набора сигналов. Используя логику NIM, формируется сигнал «ИЛИ» совокупности быстрых сигналов от электронных источников всех подсистем CDF II. В случае MCS, формируются сигналы, сообщающие о состоянии различных подсистем. В итоге формируется логический NIM сигнал «ИЛИ» включающий совокупность сигналов MCS для каждой детекторной подсистемы. Последним элементом логической цепочки является электронный блок Lecroy 4516, в котором формируется логический сигнал «ИЛИ» всей совокупности сигналов от MCS и быстрых сигналов от электронных блоков и логический сигнал «И» с возможностью маскировки запрета (inhibit enable mask) сгенерированной программой «Run-Control»:

$$TI = \sum_{i=1}^{16} (Trip_i + MCS_i) * Mask_i \quad (3)$$

Индикацией сигналов запрета служит панель из 16 светодиодов над консолью оператора на пульте управления CDF. Каждому светодиоду соответствовала конкретная подсистема. Для определения времени простоя установки, сигналы от каналов блокировки триггера поступают на соответствующий блок регистратора.

Сигналы глобальной среды мониторинга

Сигналы глобальной среды мониторинга (main control system - MCS) используются для указания статуса отдельных компонентов. Поскольку имеется ограниченное количество каналов триггерного запрета, для обеспечения эффективного обслуживания без изменения программ MCS и независимой работы различных программ мониторинга, каждой отдельной функции внутри определенной детекторной системы соответствовал свой сигнал MCS (например, «muon High Voltage» статус и статус «muon Low Voltage» являются отдельными сигналами). Логический сигнал состояния имеет значение «ИСТИННО», если система находится в состоянии, готовом для набора данных от соударения встречных пучков $p\bar{p}$. Проблемы с

мониторингом могут сами являться причиной запрета. Поэтому происходит инвертирование логических уровней в NIM крейте и берется сигнал OR для генерации запретов. В таблице 5 представлен сводный список требуемых выходных сигналов MCS.

Таблица 5: Сигналы глобальной среды мониторинга

Канал	Статус
1	TI_SVX_HV_OK
2	TI_ISL_HV_OK
3	TI_COT_HV_OK
4	TI_COT_LV_OK
5	TI_TOF_HV_OK
6	TI_TOF_LV_OK
7	TI_CENTRAL_HV_OK
8	TI_STRIP_HV_OK
9	TI_CES_LV_OK
10	TI_XENON_OFF
11	TI_PLUG_HV_OK
12	TI_PES_LV_OK
13	TI_MUON_HV_OK
14	TI_MUON_LV_OK
15	TI_CSP_CSX_OK
16	TI_IMU_HV_OK
17	TI_IMU_LV_OK
18	TI_CLC_HV_OK
19	TI_RACKS_OK
20	TI_VME_POWER_OK

Протокол состоит в том, что для каждого из системных элементов должен существовать определенный статус (индикатор состояния) в SCADA среде iFIX. Значения статуса хранятся в базах данных персональных компьютеров являющихся SCADA узлами, которые контролируют

определенные системы детекторов, и меняют текущие значения определенного статуса в главном узле. Главный узел в свою очередь проверяет, что связь с удаленными узлами мониторинга не теряется, используя процедуру «heartbeat» - проверку коммуникативной связи с частотой порядка 1 секунды. Таким образом, SCADA узел может отправить сообщение об ошибке главному узлу сразу после его обнаружения. Поскольку число флагов TI ограничено, частота их сканирования составляет несколько Гц. В этом случае, время ожидания для запрета не должно быть значительно больше, чем время сканирования SCADA узлов.

Имена статуса записываются в форме CDFS1.TI_XXXXXX, где CDFS1 – название конкретного SCADA узла с базой данных триггерных запретов и TI – префикс обозначающий «Trigger Inhibit».

Ниже приведено описание сигналов MCS используемых для каждого из 16 каналов запрета.

- *Соленоид*

отсутствуют сигналы MCS.

- *Кремниевый вершинный детектор (SVX)*

1. TI_SVX_HV_OK имеет значение ИСТИНА, когда все напряжения смещения SVX имеют значения необходимые для набора данных. Заметим, что в них включены два высоковольтных модуля нулевого слоя L00, поскольку L00 связан с SVX и ISL общими крейтами с высоковольтными блоками CAEN SY127 и SY527.

- *Промежуточный кремниевый детектор (ISL)*

2. TI_ISL_HV_OK аналогично SVX.

- *Центральный наружный трекер*

3. TI_COT_HV_OK имеет значение ИСТИНА, если высоковольтное питание готово для набора данных.

4. TI_COT_LV_OK имеет значение ИСТИНА, если низковольтное напряжение блоков питания ASD правильное.
 - *Времяпролетная система (TOF)*
5. TI_TOF_HV_OK имеет значение ИСТИНА, если высоковольтное питание готово для набора данных.
6. TI_TOF_LV_OK имеет значение ИСТИНА, если низковольтное питание готово для набора данных.
 - *Центральный калориметр*
7. TI_CENTRAL_HV_OK является результатом проверки большого количества источников питания для CEM, CHA, WHA.
8. TI_STRIP_HV_OK имеет значение ИСТИНА, если блоки питания CAEN SY127 для CES, CPR и CCR готовы для набора данных.
9. TI_CES_LV_OK значение поступает с монитора высоковольтных источников и является проверкой А и В источников питания используемых для крейтов shower-max 6U
10. TI_XENON_OFF: ксеноновые излучатели отключены.
 - *Передний калориметр*
11. TI_PLUG_HV_OK: все 12 крейтов CAEN SY527 стабильно выдают необходимое напряжение.
12. TI_PES_LV_OK: результат проверки низковольтных напряжений в SMD крейте.
 - *Центральный мюонный детектор (CMU, CMX, CMP)*
13. TI_MUON_HV_OK имеет отношение к четырем крейтам CAEN SY127 для центральной мюонной системы.
14. TI_MUON_LV_OK включает низковольтное питание для CMX и CMP предусилителей и ASD крейтов, также как и КАМАК крейтов используемых для CSP/CSX дискриминаторов и блоков CCU используемых для top и bottom CSP счетчиков.

15. TI_CSP_CSX_OK имеет отношение к высоковольтным источникам Гамма питающим счетчики CSX и CSP на северной и южной сторонах установки CDF.
- *Промежуточный мюонный детектор (IMU)*
16. TI_IMU_HV_OK: все каналы IMU стабильны при полном напряжении.
17. TI_IMU_LV_OK: проверка ASD крейта, напряжений предусилителей и напряжений питания блоков CCU.
- *Черенковские счетчики светимости (CLC)*
18. TI_CLC_HV_OK: крейт CAEN SY527 готов для набора данных.
- *Защита стоек (Rack Protection)*
19. TI_RACKS_OK имеет значение ИСТИНА, если все стойки включены.
- *Блоки питания VME*
20. TI_VME_POWER_OK имеет значение ИСТИНА, если все блоки питания VME обеспечивают напряжение согласно спецификации.

ГЛАВА 2

Создание системы контроля за сцинтилляционными счетчиками мюонного триггера установки CDF II (2009 - 2012 гг.)

В Объединенном институте ядерных исследований создано и установлено на CDF RUN II [15] более 600 сцинтилляционных счетчиков, предназначенных для эффективной регистрации мюонов. Они составляют примерно половину счетчиков, включенных в так называемый «мюонный триггер», который принципиально необходим для изучения свойств тяжелых кварков, поиска частиц Хиггса, явлений за пределами стандартной модели и других процессов, входящих в программу исследований на Тэватроне. Постоянный контроль и поддержание высокой эффективности работы всех сцинтилляционных детекторов «мюонного триггера» необходимы для нормального функционирования установки CDF II и получения достоверных экспериментальных данных.

Большинство электронных блоков, обеспечивающих высокое напряжение для мюонных счетчиков и контроль их основных параметров, расположены непосредственно на установке. Автоматизация контроля системы мюонных счетчиков впервые появилась в 2001 году [21]. Однако, постепенное увеличение светимости Тэватрона, введение новых устройств более эффективного управления, а также учет накопленных замечаний при работе с детекторами мюонов, привели, в итоге, к созданию новой системы контроля за сцинтилляционными счетчиками в 2009 году.

2.1 Типы сцинтилляционных счетчиков мюонного триггера

Мюонная система установки CDF II включает сцинтилляционные счетчики и дрейфовые камеры. Мюонные сцинтилляционные счетчики

покрывают область псевдобыстрот $0 < |\eta| < 1,5$ и сгруппированы в следующие основные подсистемы (рис. 13):

- Модернизированный центральный мюонный сцинтилляционный детектор – счетчики CSP (CentralScintillatorUpgrade) [2.3] в интервале $0 < |\eta| < 0,6$;
- Расширенный центральный мюонный сцинтилляционный детектор – счетчики CSX (CentralScintillationExtension) в интервале $0,6 < |\eta| < 1,0$;
- Передняя мюонная сцинтилляционная подсистема - счетчики BSU (BarrelScintillatorUpgrade) [2.3], покрывающие снаружи тороиды, и счетчики TSU (ToroidScintillatorUpgrade) расположенные внутри тороидов в интервале $1,0 < |\eta| < 1,5$.

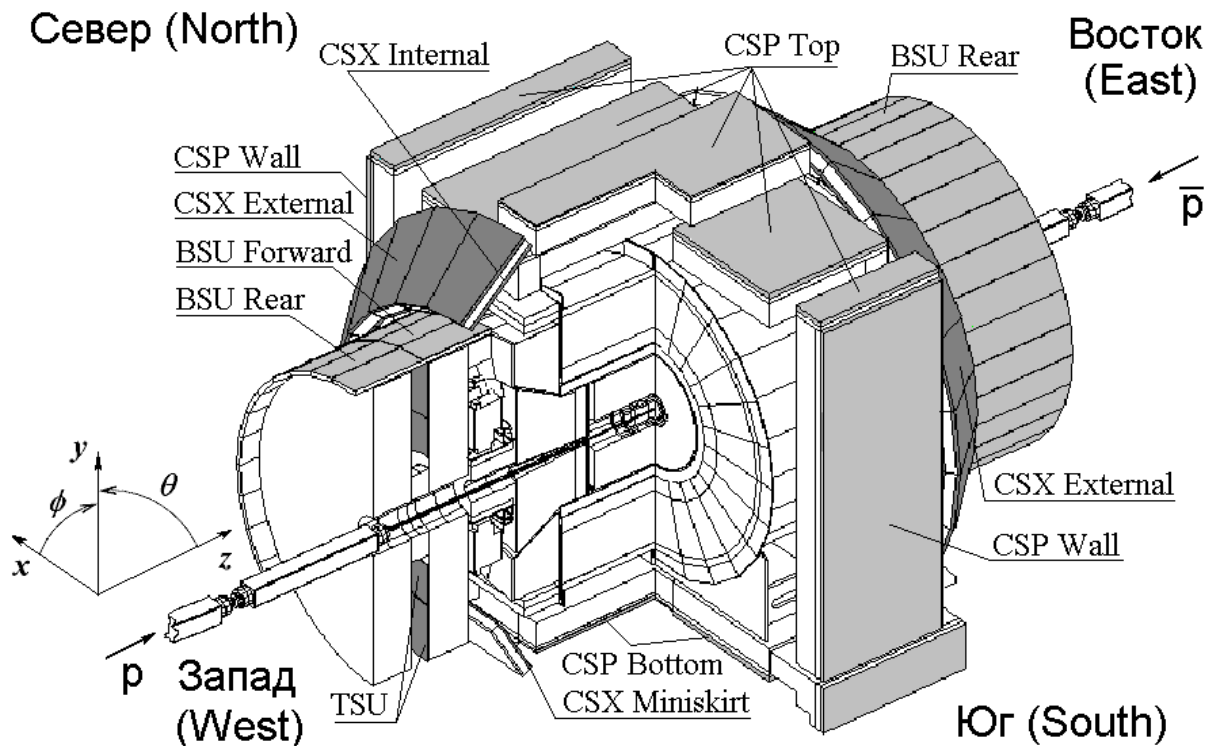


Рис. 13: Расположение сцинтилляционных счетчиков на модернизированной установке CDF II

Используются счетчики разных типов со съемом света с помощью плексигласового световода, с помощью спектросмещающих волокон и, использующие оба указанных способа (модернизированные) [22].

Общее количество мюонных сцинтилляционных счетчиков на CDF II превышает 1200 штук. Они разделяются на два вида по типу используемых ФЭУ, что и определяет метод, применяемый для системы контроля. Будем называть мюонные детекторы, использующие классический съем света световодом и большие ФЭУ - *счетчиками старого типа*, а детекторы, использующие оптоволоконный съем света и миниатюрные ФЭУ – *счетчиками нового типа*.

2.2 Система управления и мониторинга сцинтилляционных детекторов старого типа

К мюонным детекторам старого типа (рис. 13) относятся: CSP Wall (использующиеся с 1992 г.) – Central Scintillation uPgrade for the Wall, CSX (использующиеся с 1994 г.) – Central Scintillation eXtension [23] и MSK – Miniskirt (использующиеся с 2000 г.) разновидность CSX, выделенных в самостоятельную группу [24]. Здесь используются стандартные фотоумножители с диаметром фотокатода 51 мм – ЕМІ 9814В (производства «Electron Tubes Inc.», Великобритания) и плексигласовые световоды в форме прямого (CSP Wall) и изогнутого (CSX, MSK) конусов типа «рыбий хвост».

2.2.1 Аппаратная составляющая

Схема компоновки элементов, образующих систему контроля, представлена на рисунке 14.

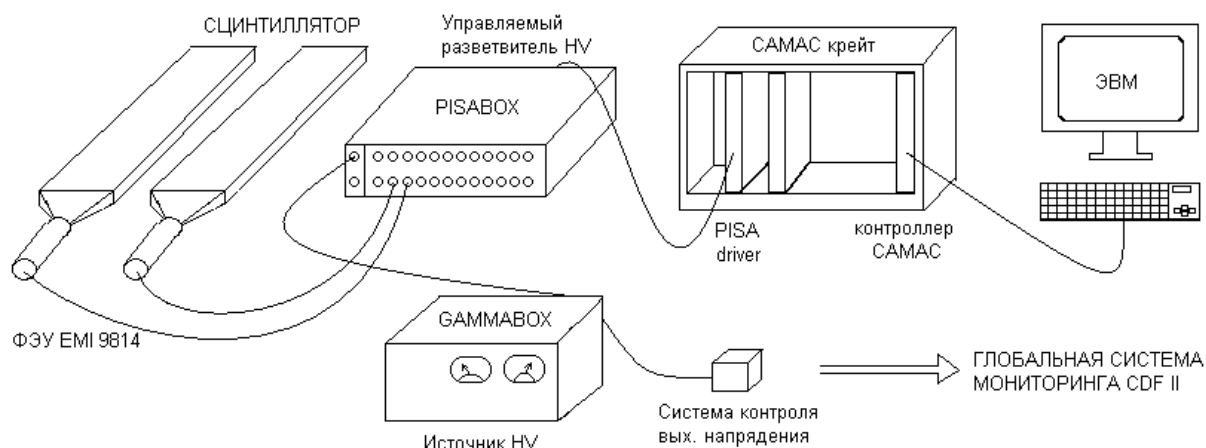


Рис. 14: Компоновка элементов системы контроля для сцинтилляционных детекторов старого типа

Используются источники высокого напряжения «Gamma Power Supply» (сокращенно «Gamma Box», производства «Gamma High Voltage Research Inc.», США), которые обеспечивают до 3000 вольт выходного напряжения при силе тока 75 мА. Выходное напряжение отслеживается системой «Voltman». Питание ФЭУ счетчиков происходит посредством управляемых разветвителей «Pisa Box» (производства CAEN, Италия). Этот блок позволяет запитывать высоким напряжением до 40 счетчиков. Диапазон изменения напряжения для каждого канала порядка 400 вольт. Всего используется 16 таких блоков, обслуживающих ~500 счетчиков. Для дистанционного контроля и настройки высокого напряжения в каналах «Pisa Box» используется специальный интерфейс-коммутатор («Pisa Driver» производства CAEN) стандарта KAMAC, который посредством SCSI-контроллера «Jorway Model 73A» обеспечивает связь между компьютером и разветвителем «Pisa Box».

2.2.2 Программное обеспечение

На рисунке 15 приведена блок-схема кода программы контроля и управления блоками-разветвителями «Pisa Box» - «Pisa Mon».

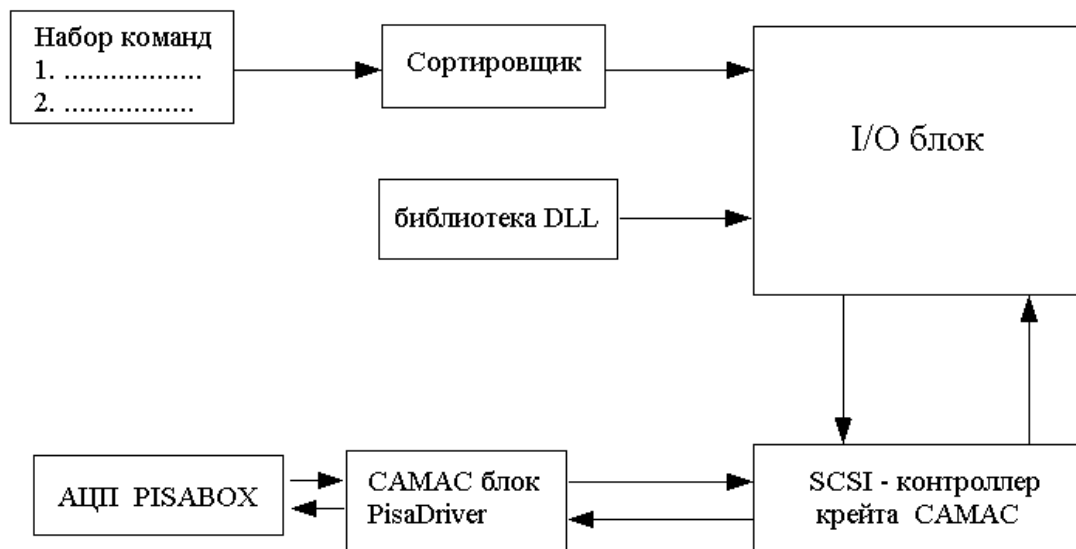


Рис. 15: Блок-схема кода программы «Pisa Mon» для контроля и управления разветвителями «Pisa Box»

Рассмотрим по порядку:

а) Блок набора команд – включает в себя весь спектр команд, которые понимает система контроля. Наиболее важными среди них являются:

- команда чтения напряжений в одном канале разветвителя «Pisa Box» и всего блока в целом;
- команды управления изменением величин напряжения в каналах «Pisa Box»;
- команда вызова дополнительной панели с информацией о счетчике, питаемым данным каналом разветвителя «Pisa Box».

б) Блок сортировщик – единая подпрограмма, которая принимает команду, определяет к какому типу она относится, прикрепляет дополнительные атрибуты и отправляет в I/O блок.

в) I/O блок – эта подпрограмма использует специализированную библиотеку управляющих процедур написанных на языке C++ (библиотека

DLL), посылает команды на интерфейс-коммутатор «Pisa Driver» и получает информацию с него.

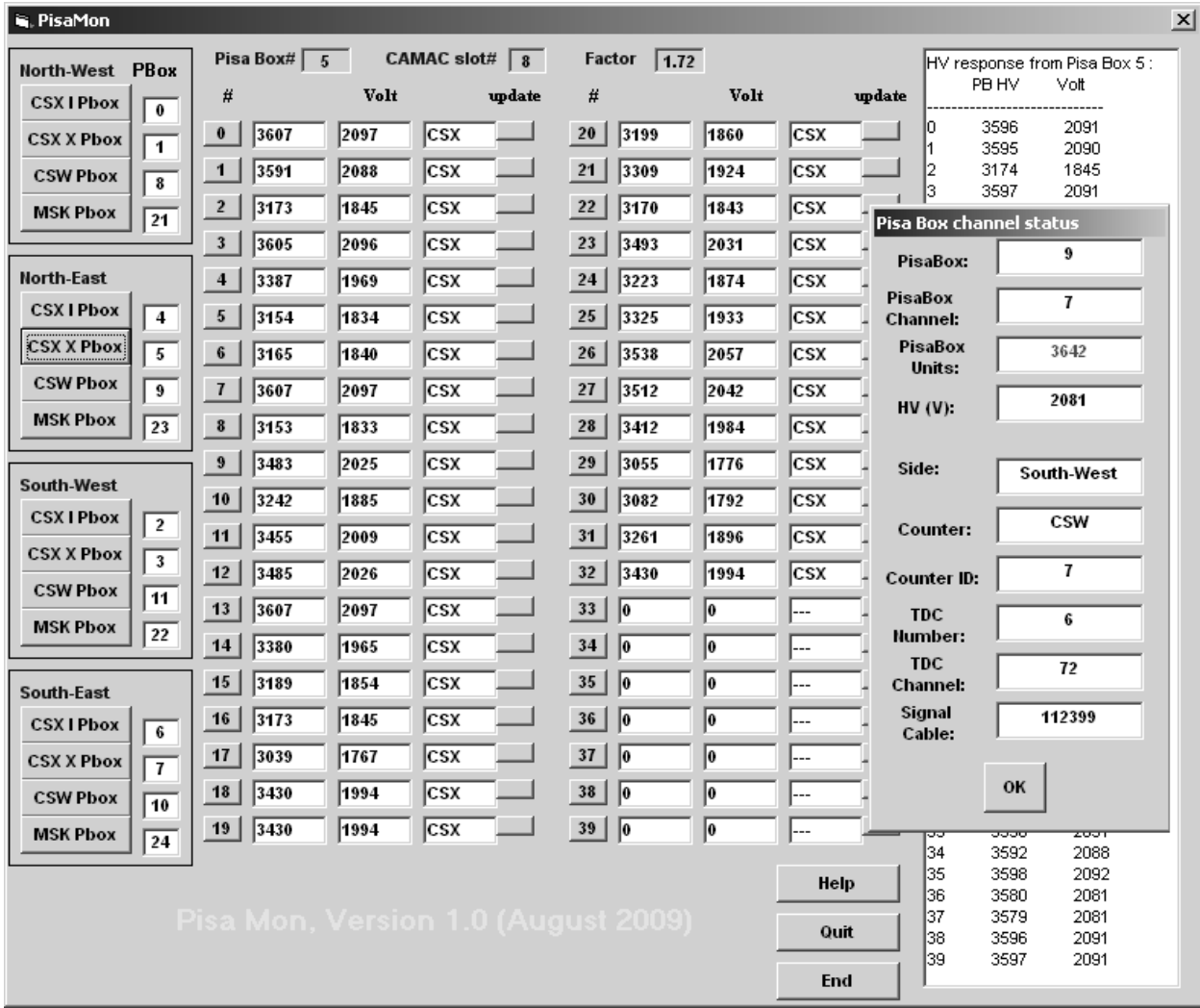


Рис. 16: Интерфейс программы управления сцинтилляционными детекторами старого типа

Программа написана на языке Visual Basic, а основные управляющие процедуры созданы с помощью языка C++. Эти процедуры позволяют транслировать информацию с интерфейс-коммутаторов «Pisa Driver» на ЭВМ. Управление «Pisa Box» распределителями является достаточно медленным процессом. Это связано с конструктивными особенностями изменения напряжения в отдельных каналах «Pisa Box» распределителя. Для этого используются многооборотные переменные резисторы, которые

управляются специальными миниатюрными электрическими моторами. Поэтому время, необходимое для изменения напряжения для одного счетчика, может варьироваться от нескольких секунд до минуты. В старой версии программы была реализована возможность считывания напряжения только отдельных каналов «Pisa Vox» распределителя. В новую версию добавлена возможность считывать напряжения со всего «Pisa Vox» блока. Из-за накопившихся замечаний полностью изменена структура кода, появился более дружелюбный интерфейс. Фактически программа была создана заново, поэтому версия программы обозначена как 1.0 [25, 28]. Интерфейс программы контроля и управления блоками-разветвителями «Pisa Vox» представлен на рисунке 16.

Несколько слов о работе программы. При ее запуске вначале происходит считывание конфигурационных файлов, заполнение базы данных по всем старым счетчикам. При нажатии одной из 16 кнопок в левой части лицевой панели, в средней части панели появляются опорные значения напряжения в условных единицах (1 и 4 столбцы) и переведенные в вольты (2 и 5 столбцы). Третий и шестой столбец указывает на тип счетчика, который питается данным каналом «Pisa Vox» распределителя. Эти значения берутся из базы данных, они соответствуют оптимальным значениям напряжений питания каждого сцинтилляционного счетчика. В это время происходит считывание реальных напряжений данного «Pisa Vox» распределителя. Время считывания всего распределителя занимает порядка двух минут. С помощью двух столбцов кнопок с обозначением «#» можно считать напряжение только в данном отдельном канале, при этом также появляется отдельная панель «Pisa Vox channel status», где содержится полезная информация по данному каналу, необходимая при проведении обслуживающих работ. Со временем из-за различных факторов (изменение сопротивлений делителей ФЭУ, напряжений блоков «ГАММА ВОХ», характеристик ФЭУ, а также человеческий фактор – случайно кто-то перестроил канал) напряжения в

каналах «Pisa Box» уходит от заданных значений. После того как «Pisa Box» распределитель прочитан, и мы видим отклонение значений напряжений в некоторых каналах, нажимая кнопки «Update», выставляем либо табличные значения, либо иные, вводя соответствующие значения напряжений во 2 или 5 столбцы в центре программной панели. Данная версия программы является функционально и методологически полностью завершенной и получила хорошие отзывы от коллег-физиков работающих с мюонными сцинтилляционными счетчиками. В итоге, данная программа использовалась до самого конца эксперимента CDF II без изменений.

2.3 Система контроля и мониторинга сцинтилляционных детекторов нового типа

К мюонным детекторам нового типа относятся: CSP – Central Scintillation uPgrade, BSU – Barrel Scintillation Upgrade, TSU – Toroid Scintillation Upgrade. Как видно из названия, данная совокупность детекторов появилась на CDF после большой модернизации, которая проходила с 1996 по 2000 годы [26]. Здесь используются фотосенсоры H5783 (фирмы Hamamatsu, Япония) на основе миниатюрных фотоумножителей R5600 с диаметром фотокатода 10 мм.

2.3.1 Аппаратная составляющая

Схема компоновки элементов образующих систему контроля представлена на рисунке 17. Система питания счетчиков нового типа принципиально отличается от системы питания счетчиков старого поколения. Для управления фотосенсором на торце счетчика установлен усилитель-формирователь-дискриминатор (PMT Amplifier and Discriminator, сокращенно PAD) [27]. PAD позволяет управлять высоким напряжением на ФЭУ, усиливать и отбирать по регулируемому порогу сигналы от ФЭУ. Для организации централизованного управления и съема информации, каждый

PAD подключается к 48 канальному специализированному приемнику-распределителю (Control and Concentrator Units, или CCU) через стандартный разъем RJ-45 с помощью кабелей CAT5. Наличие 4 витых пар позволяет использовать один кабель как для контроля и настройки напряжения, так и для съема информации с канала. Всего задействовано 20 распределителей-приемников, к которым подключено порядка 700 счетчиков.

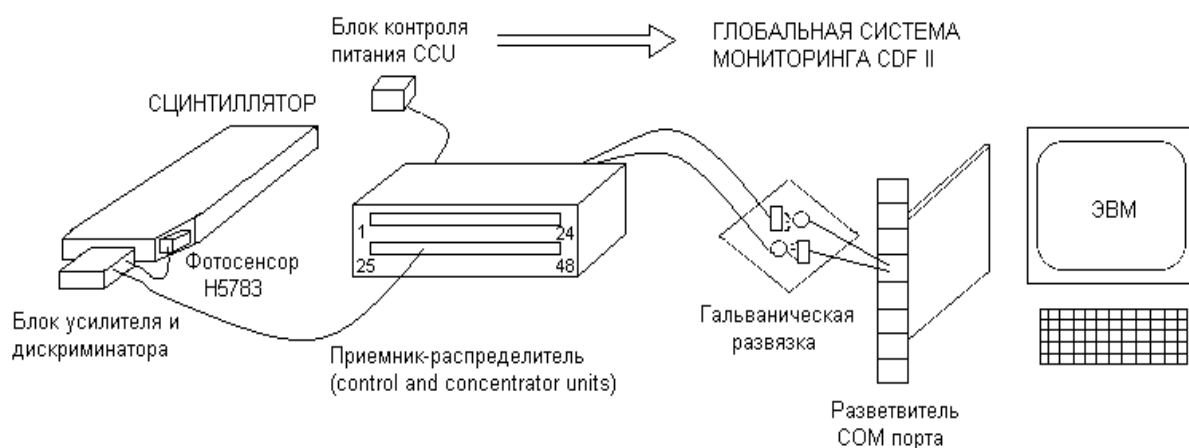


Рис. 17: Компоновка элементов системы контроля для сцинтилляционных детекторов нового типа

Для соединения CCU, расположенных в разных частях установки CDF, с компьютером используется 8 независимых последовательных (COM) портов (multi-port serial adapter, фирма Comtrol Corporation). Кабели, соединяющие блоки CCU с платой-разветвителем COM портов, имеют гальваническую развязку (посредством применения оптической пары). Напряжение питания блоков CCU ($\pm 5, 12$ вольт) постоянно отслеживается системой Voltman (см. ниже).

2.3.2 Программное обеспечение

Одним из важнейших этапов разработки системы контроля явилось создание нового программного обеспечения. Со времени появления автоматизации контроля системы мюонных счетчиков [21] был накоплен

большой опыт её эксплуатации, появились замечания и предложения по улучшению. Внедрялись новые элементы в цепочку системы контроля (hard, soft reset). Важным моментом стало значительное увеличение светимости Тэватрона за последние годы и, как следствие, повышение требований к системам контроля установки CDF. Все перечисленное, в итоге, создало критические предпосылки и потребность в создании программы с большой функциональностью и стабильностью работы.

В итоге была написана программа, получившая название «CCU Monitor Joint Terminal» [25, 28]. Интерфейс программы представлен на рисунке 18.

Несколько слов о том, как программа работает. Нажатием одной из двадцати кнопок «CCUxx», посылается запрос на соответствующий CCU, который выдает следующую информацию в большом окне справа: номер CCU, номер канала (он же номер PAD), состояние (подключен PAD (1) или нет (0)), доступность канала для просмотра (1 или 0), напряжение в канале, порог дискриминирования в канале, индикатор доступности канала для чтения (цифра «1» говорит об отсутствии проблем при чтении канала, большая цифра сигнализирует о произошедшем ранее временном сбое при чтении PAD, ввиду большой загрузки фотоумножителя) и, наконец, величины тока потребления PAD в условных единицах (величина ≤ 200 говорит о неработающем PAD, величина ≥ 350 указывает на большую загрузку фотоумножителя). В это же самое время в таблице в центре панели отражаются величины напряжения ФЭУ, порога дискриминации сигнала и типа счетчика из конфигурационного файла, соответствующего текущему блоку CCU. Плюс к этому можно изменять значения напряжения и порога в канале, просто вводя их в окошках и нажимая затем кнопку «Update».

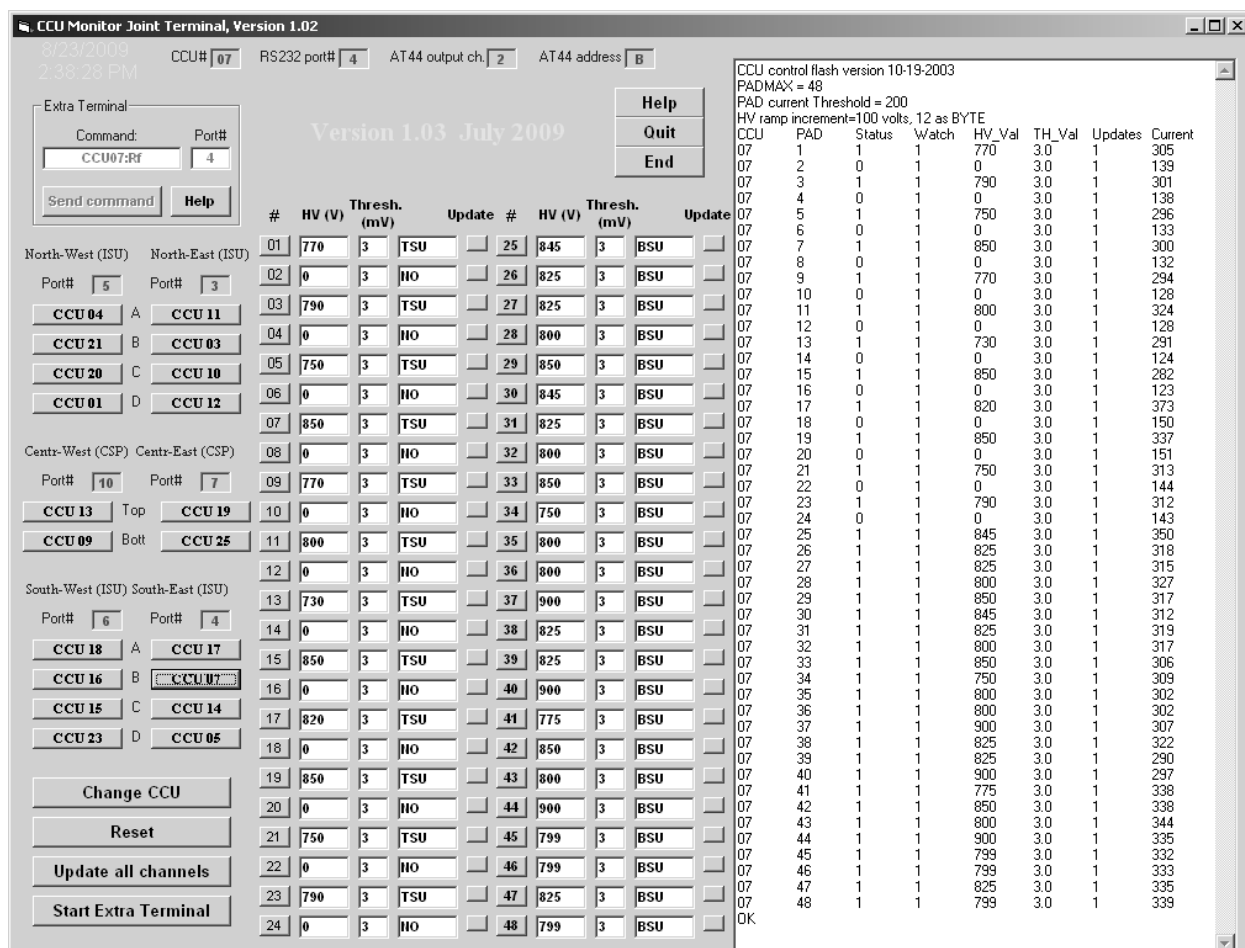


Рис. 18: Интерфейс программы управления сцинтилляционными детекторами

НОВОГО ТИПА

Как видно из рисунка, кнопки «CCUxx» сгруппированы по геометрическому признаку. Надписи поверх каждой группы, к примеру, «North-West-(ISU)», говорят о реальном местонахождении блоков на установке CDF, а именно в северо-восточном углу установки. Индекс «ISU» говорит о сопряжении данного CCU со счетчиками TSU и BSU, индекс «CSP», соответственно, со счетчиками CSP.

Дадим описание группы кнопок в левом нижнем углу:

1. «Change CCU» - выводит дополнительную панель, где можно поменять номера CCU. Данная процедура проводится после замены CCU на установке.

2. «Reset» - реализует процедуру перезагрузки процессора CCU с сохранением напряжения питания всех электронных схем.

3. «Update all channel» - посылает команду CCU выставить напряжения и пороги в каждом канале в соответствии со значениями в таблице в центре панели.

4. «Start Extra Terminal» - активирует область в левом верхнем углу панели, где предоставляется возможность набирать разнообразные дополнительные команды вручную (это особенно полезно для людей работающих с данной системой).

На рисунке 19 представлена блок-схема программного кода. Рассмотрим по порядку:

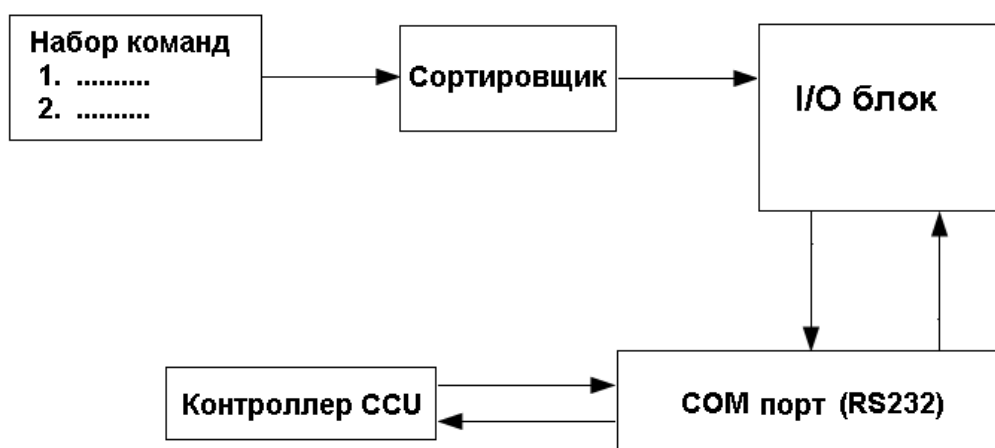


Рис. 19: Блок-схема кода программы «CCU Monitor Joint Terminal»

а) Блок набора команд – включает в себя весь спектр команд, которые понимает СК. Наиболее важными среди них являются:

- команды опрашивания CCU о напряжениях, порогах и другой информации;

- команды управления параметрами ССУ, изменения величины напряжения и порога в каналах ССУ;

- команда «soft reset», перезагружает только процессор ССУ, не отключая питание всего остального контроллера.

б) Блок сортировщик – единая подпрограмма, которая принимает команду, определяет, к какому типу она относится, прикрепляет дополнительные атрибуты и отправляет в I/O блок.

в) I/O блок – эта подпрограмма управляет работой СОМ порта, посылает данные на контроллер ССУ и получает информацию с него. По сравнению с предыдущей версией программы, была изменена процедура чтения контроллера ССУ. Так на практике, ввиду увеличения радиационного фона в местах расположения блоков ССУ, а также значительного повышения загрузки РАД, довольно часто стали возникать ситуации некорректного отображения информации от ССУ в большом окне панели «ССУ Monitor Joint Terminal»: изменение последовательностей строк, потеря части данных, появление неопределяемых символов. Старая версия программы использовала процедуру запросов к СОМ порту типа: «читать данные пока не встретишь слово ОК». В современных условиях, такой прием приводит порой к ошибочному отображению текущих данных о напряжениях, так как метка «ОК» не всегда стоит в конце списка данных. Новая процедура – это однократный запрос к СОМ порту и чтение данных после временной задержки, подобранной эмпирическим путем. Далее полученная таблица данных проходит проверку на корректное отображение информации.

Таким образом, I/O блок посылает запросы на контроллер ССУ через СОМ порт и получает информацию от контроллера ССУ через СОМ порт. Интервал временной задержки между ними зависит от конкретной команды и определяется блоком сортировщика.

2.4 Дополнительные аппаратные средства контроля

К дополнительным аппаратным средствам контроля и управления можно отнести систему «Voltman». Она является разновидностью источников быстрых сигналов в системе триггерных запретов установки CDF II [20]. Система отслеживает колебания установленного опорного напряжения источников высокого напряжения «Gamma Box». В случае выхода за рамки допустимого интервала значений, на пульте оператора возникает сигнал тревоги. Мониторинг источников «Gamma Box» является важной составляющей системы контроля мюонных детекторов старого поколения. Система «Voltman» также отслеживает напряжения питания блоков CCU (+5, +12 вольт). Данная возможность также очень важна, так как отслеживает корректную работу CCU – ключевое звено в цепочке СК счетчиков нового поколения. При этом время обнаружения неисправности блоков CCU сократилось на три порядка, с 30-50 минут ранее до 1 секунды благодаря системе «Voltman». В 2003 году была добавлена аппаратная возможность дистанционного отключения питания блока CCU («hard reset») как эффективного способа восстановления связи между CCU и компьютером. В 2007 году была добавлена аппаратная возможность перезагрузки процессора блока CCU («soft reset»). Необходимость введения «soft reset» была продиктована возникавшими на практике случаями неполного восстановления низких напряжений питания блоков CCU из-за действия радиационного фона после цикла отключения-включения электрической сети.

Важность введения таких аппаратных возможностей как «hard reset» и «soft reset» и интегрирование их в программную оболочку системы контроля нового поколения трудно переоценить. Ранее единственным способом, при потере связи между CCU и компьютером или в случае неполного восстановления напряжений питания CCU, было ожидание разрешения допуска на установку для проведения перезапуска CCU вручную. Ожидание

могло длиться несколько часов. При этом стоит напомнить, что один ССУ питает высоким напряжением 48 счетчиков, которые составляют почти 7% от общего количества счетчиков нового поколения, задействованных на установке. Сейчас процедура восстановления работы блоков с использованием этих возможностей занимает 3-5 минут, где основная часть времени тратится на уведомление операторов на пульте управления установки CDF II остановить текущий набор данных и возобновить его после проведения экспертами мюонной системы необходимых манипуляций.

2.5 Интеграция системы мониторинга сцинтилляционных детекторов мюонного триггера в глобальную среду мониторинга установки CDF II

Для получения достоверных экспериментальных данных, необходимо быть уверенными в том, что все системы функционируют в заданном режиме. Для непрерывного контроля всех систем установки CDF II используется глобальная среда мониторинга (Main Control System - MCS) на основе SCADA системы iFIX – лицензионного пакет программ от GE Fanuc. Под термином SCADA понимают инструментальную среду для разработки программного обеспечения систем управления технологическими процессами в реальном времени. Пакет включает в себя мощный графический интерфейс, встроенный интерпретатор Visual Basic, базу данных. Все локальные компьютеры обслуживающие различные системы CDF II, на которых инсталлирован iFIX, являются SCADA-узлами и объединены в единую сеть. Оператор на пульте управления установки CDF II (CDF control room), получает всю необходимую информацию и может вовремя заметить изменения каких-либо параметров систем, приводящих к записи недостоверных экспериментальных данных. Программы мониторинга, написанные в среде iFIX, должны быть постоянно запущены на

локальных машинах, обслуживающих определенные подсистемы установки. Это делает невозможным какие либо изменения софта во время работы Тэватрона. Изменения программного кода происходят во время долгосрочных остановок Тэватрона (shutdown). Так в 2009 году, среда iFIX была обновлена до 5 версии. Как правило, подобные модернизации не проходят незаметно и сопровождаются изменениями баз данных и глобальных переменных.

Создание комплекса программ в среде iFIX для мониторинга сцинтилляционных детекторов мюонного триггера была приурочена к установке новейшей версии iFIX 5.0, а также с учетом новых возможностей возникших в связи с введением дополнительных аппаратных средств контроля и управления [25, 28].

Алгоритм работы следующий (рис. 20): нам необходимо осуществлять непрерывный контроль высокого напряжения для всех счетчиков мюонной системы. Существует несколько ситуаций, когда отдельному счетчику присваивается определенный статус. Для счетчиков старого поколения существует пять вариантов состояния (счетчик отсутствует, устройство не может быть прочитано, изменение напряжения менее 3%, изменение напряжения от 3% до 10%, скачек напряжения более 10%), для нового поколения – четыре (счетчик отсутствует, устройство не может быть прочитано, изменение напряжения отсутствует, изменение напряжения присутствует). Каждый вариант статуса формирует определенный сигнал тревоги, который проявляет себя посредством звуковых и визуальных (изменение цвета) сигналов на пульте управления и контроля установки CDF II.

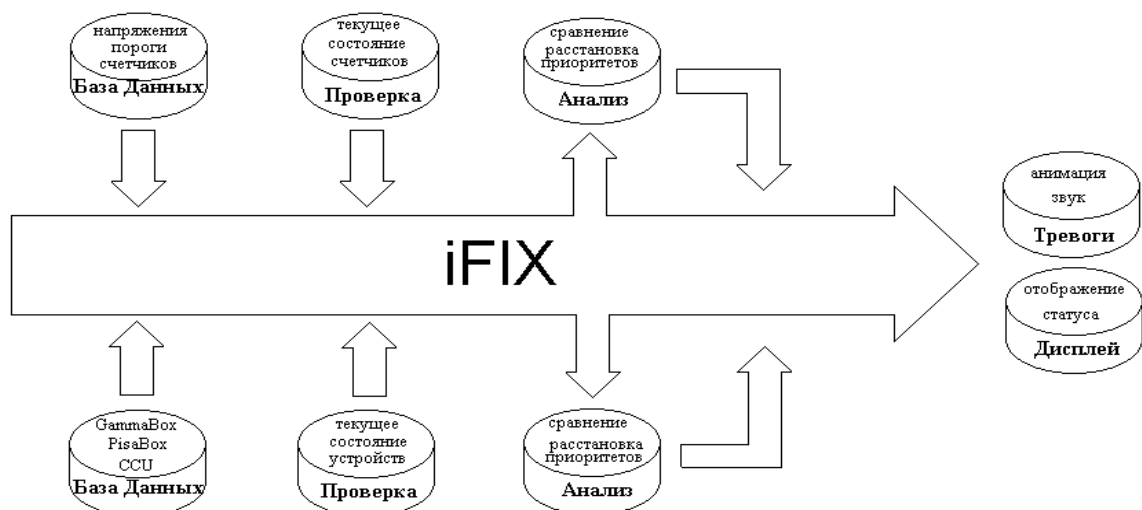


Рис. 20: Блок-схема системы контроля состояния мюонных счетчиков в рамках глобальной среды мониторинга CDF II

Интерфейсы программ контроля напряжений для системы мюонных сцинтилляционных детекторов CDF II, написанных в среде iFIX, представлены на рисунке 21. Главная панель (рис.21а) которая постоянно отображается на локальной ЭВМ – «Muon Main». Она отражает текущую общую информацию обо всей системе мюонных счетчиков: состояние детекторов (как описано выше), счетчик тревог, полное количество детекторов включенных в систему мониторинга, включение в различные триггера, «HeartBeat» статус («сердцебиение» - отклик системы на запросы главного сервера), максимальные и минимальные отклонения величин напряжения питания от номинальных (табличных). Кнопки «CCU High Voltage Control» и «Pisa Box High Voltage Control» вызывают одноименные подпрограммы (рис.21г и 21д). Кнопка «Muon PSM Alarm Page» вызывает подпрограмму контроля напряжений питания CCU (12, 5, -12, -5 Вольт). Кнопка «Reset Data base» перезагружает базу данных, если это необходимо. Программа «MuonMain» с определенной периодичностью запускает две

программы чтения напряжения на счетчиках старого и нового поколения соответственно: PBoxCheck.exe (рис.21б) и CCUCheck.exe (рис.21в).

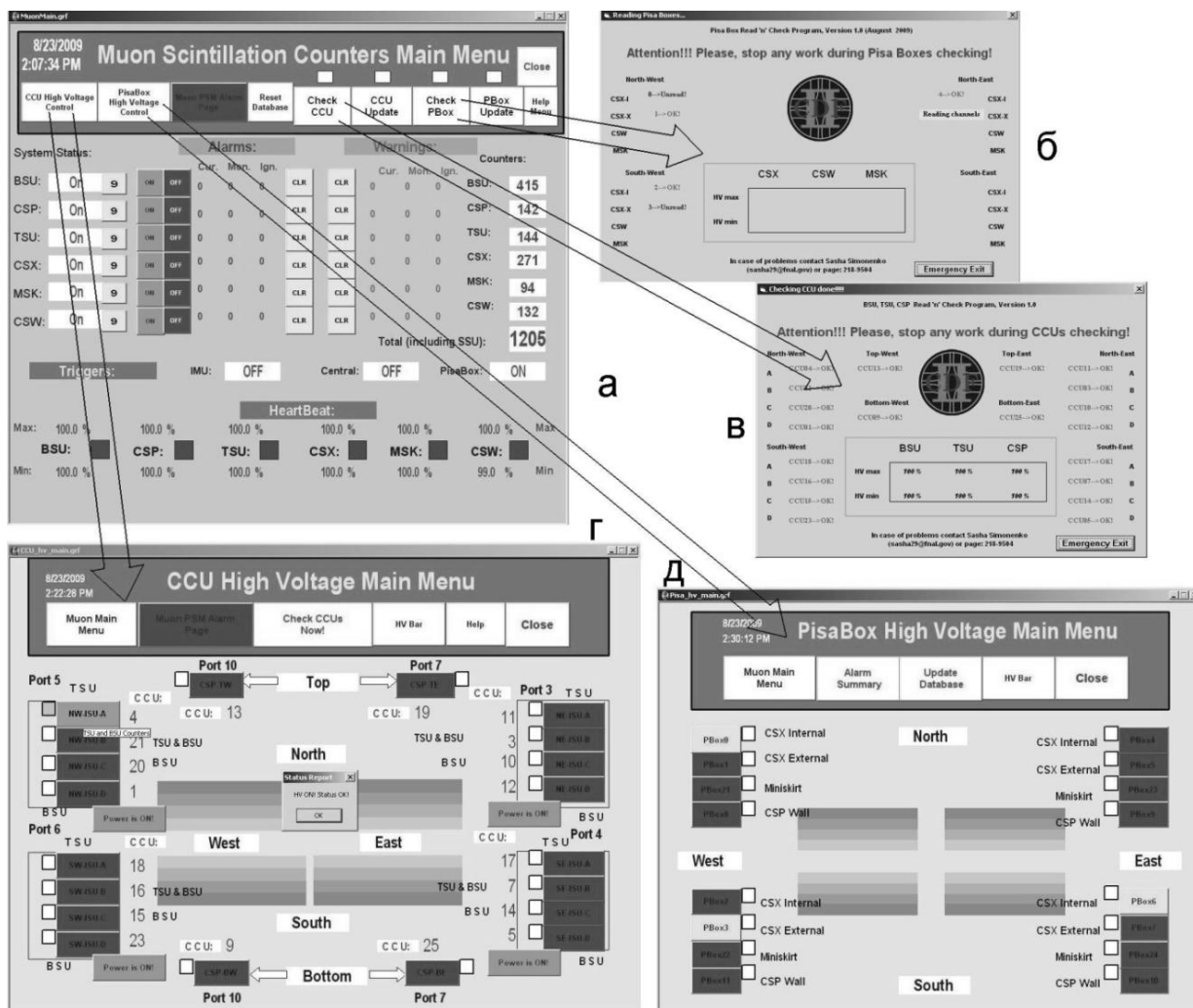


Рис. 21: Интерфейс программ созданных в среде iFIX 5.0 для мониторинга напряжения питания системы мюонных счетчиков CDF II

Их задача считать напряжения и по определенным алгоритмам сравнить с табличными значениями. Результаты сравнения записываются в файлы с расширением «.log», которые содержат информацию по каждому CCU или Pisa Vox и статус высокого напряжения (в процентах) для всей совокупности счетчиков определенного типа.

На эксперименте CDF принято следующее правило определения этого статуса: из всей совокупности обнаруженных отклонений напряжений от

номинальных определяется минимальное и максимальное значение в процентах. Далее программа «MuonMain» считывает обновленные «.log» файлы и изменяет статусы систем в базе данных iFIX. Программы чтения можно запускать вручную используя кнопки «Check CCU» и «Check PBox» соответственно. Кнопки «CCU Update» и «PBox Update» обновляют базу данных iFIX, используя последние результаты проверки напряжений на счетчиках. Функции чтения, проверки и обновления данных можно отключить с помощью соответствующих кнопок расположенных над ними, при этом цвет обеих кнопок при отключении функции становится желтым. Подпрограммы «CCU High Voltage Control Menu» и «Pisa Box High Voltage Control Menu» содержат информацию непосредственно о блоках CCU и Pisa Box. Каждая кнопка на их панелях соответствует конкретному CCU или Pisa Box и может быть окрашена в один из четырех цветов: зеленый (статус «OK»), серый (статус «Mask»), желтый (статус «Warning») и красный (статус «Alarm»). Белые квадраты расположенные рядом с каждой кнопкой позволяют «маскировать» CCU или PisaBox. После этого данному блоку присваивается статус «Mask». Он означает, что данное устройство не участвует в мониторинге и дает возможность установке CDF продолжить запись экспериментальных данных. Иногда, под влиянием различных факторов CCU и Pisa Box перестают читаться программами мониторинга. При этом напряжение на соответствующих мюонных счетчиках соответствует норме, что подтверждается отсутствием изменений в графиках эффективности регистрации мюонов. Эти графики весьма чувствительны к изменению напряжения на фотоумножителях счетчиков, что служит дополнительным индикатором состояния высокого напряжения. По сравнению с ранней версией панели (рис.21г) появились кнопки «Power is ON/OFF!», обеспечивающие дистанционное обесточивание BSU и TSU счетчиков, посредством отключения соответствующих блоков CCU. Каждый сервер, представляющий определенную систему детекторов на CDF II, включен в единую сеть. В итоге, в циклическом режиме осуществляется

проверка, анализ, расстановка приоритетов и обновляется статус глобальных переменных. При обнаружении проблем, возникает сигнал тревоги, который одновременно появляется на экспертном терминале и пульте управления установкой где отражается на графических панелях «GLOBAL ALARMS» и «HIGH VOLTAGE SUMMARY» (рис. 22). Появление сигналов тревог на этих панелях автоматически приостанавливает набор физических данных.

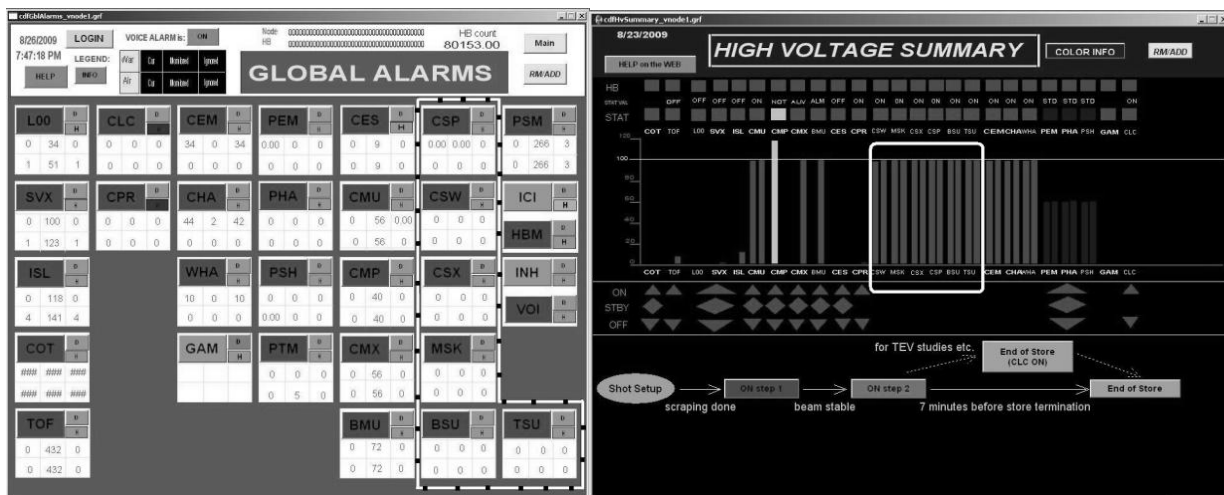


Рис. 22: Графические панели в среде iFIX, используемые в комнате контроля установки CDF, для мониторинга напряжения питания различных детекторных систем (черно-белым и белым обведена система мюонных счетчиков)

Как видно из рисунка 22, наши системы, обозначенные как «CSP», «CSW», «CSX», «MSK», «BSU», «TSU» занимают значительную долю от всех детектирующих систем установки CDF. Зеленый цвет прямоугольников и столбиков означает, что напряжение питания у наших систем в пределах нормы. Если возникает отклонение, то меняется цвет и высота столбиков (желтый – небольшое отклонение, красный – большое отклонение) и все это сопровождается звуковым оповещением. Оператор на пульте управления предпринимает шаги по устранению неполадок или вызывает экспертов.

2.6 Выводы

В заключении приведем основные выводы данной главы:

- 1) Создано программное обеспечение для контроля за параметрами всей совокупности сцинтилляционных счетчиков мюонной системы. Программы дифференцированы в зависимости от типа используемых счетчиков. Данная совокупность программ позволяет считывать и менять значения напряжений питания ФЭУ и величины порогов дискриминации фоновых сигналов.
- 2) Созданы программы в среде iFIX 5.0 для интеграции статуса состояния мюонных счетчиков в глобальную среду мониторинга установки CDF II и предоставления дистанционного управления блоками высокого напряжения и передачи данных. В результате был реализован непрерывный контроль за мюонной системой операторами смен CDF II.
- 3) Внедрены новые аппаратные возможности: перезагрузка чип-контроллеров блоков CCU (т.н. «soft reset») и дистанционное обесточивание счетчиков BSU и TSU через отключение соответствующих блоков CCU (т.н. «hard reset»). Они позволили сократить на 2 порядка время восстановления работы блоков управляющих напряжением на мюонных счетчиках в случае сбоев.
- 4) Создана процедура проверки коммуникативной связи между главным и мюонным серверами в рамках Глобальной Системы Контроля (т.н. «heart beat»). Данная процедура позволяет своевременно разделить поступающие с установки CDF данные на «достоверные» (до потери коммуникативной связи) и «требующие внимания» ввиду отсутствия контроля параметров мюонной системы на тот момент времени.

- 5) Внедрена система «Voltman» для контроля выходных напряжений высоковольтных источников питания для счетчиков старого типа и низковольтных напряжений питания блоков ССУ обслуживающих счетчики нового типа. Она является источником сигналов в системе триггерных запретов и позволяет получать практически мгновенные уведомления о случившихся сбоях в системе питания мюонных счетчиков.

ГЛАВА 3

Исследование старения сцинтилляционных счетчиков установки CDF в RUN II (1999-2009 гг.)

Детектирование мюонов – принципиальная важная часть большинства физических задач на Тэватроне, включая изучение распадов c, b, t -кварков [15].

Установка CDF обладает развитой системой детекторов для эффективной регистрации мюонов. Они состоят из сцинтилляционных счетчиков и дрейфовых камер. Максимальное время дрейфа в камерах варьируется в интервале от 800 нс до 1,4 мкс [22]. Это существенно больше, чем время между протон-антипротонными взаимодействиями (396 нс) и, соответственно, вносит неопределенность в корреляции между исходящими из центра установки треками и актом взаимодействия. Сцинтилляционные счетчики обеспечивают временную отметку для восстановления треков в дрейфовых камерах.

С учетом важности мюонного триггера в физической программе установки CDF, было решено провести исследование старения сцинтилляционных счетчиков (т.е. уменьшение светосбора на фотокатодах ФЭУ с течением времени). Данное исследование имеет важное значение для создания долгосрочного прогноза их эффективности. В диссертации представлены результаты за весь период измерений с 1999 по 2009 гг. [29]

3.1. Особенности измерений

Измерения светосбора проводились в 2002 – 2009 годах на стенде, собранном группой ОИЯИ в Фермилабе. Данный экспериментальный стенд настроен на работу со счетчиками различных типов (рис. 23, 24) в двух режимах с различными триггерами. Первый режим использовался для

получения спектра космических мюонов. Второй – для калибровки спектрометрического канала.



Рис. 23: Схематическое представление стенда для измерения параметров сцинтилляционных счетчиков старого типа

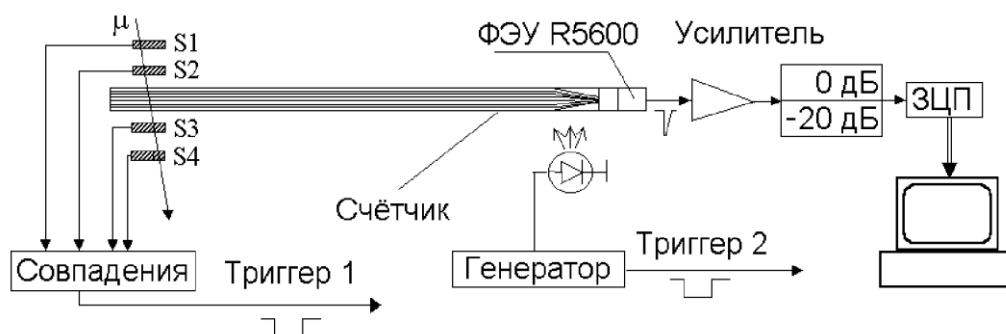


Рис. 24: Схематическое представление стенда для измерения параметров сцинтилляционных счетчиков нового типа

Триггер от пролета космического мюона формировался совпадением сигналов четырех сцинтилляционных счетчиков $15 \times 15 \times 2 \text{ см}^2$, расположенных попарно над и под исследуемым образцом и смещенных в

сторону максимального удаления от ФЭУ. Подробная схема с указанием всех используемых электронных блоков представлена на рисунке 25.

Рис. 25: Схема стенда для измерения характеристик счетчиков

В режиме калибровки спектрометрического канала используется быстрый синий светодиод NSPB310A фирмы NICHIA, который управляется блоком-генератором CAEN LedDriver C529. Он позволяет формировать длительность и яркость светодиодной вспышки. Типичная ширина импульса, в нашем случае, составляет ~ 10 нс. Калибровочные измерения проводились до и после каждого набора статистики на мюонах.

Смысл данного метода калибровки состоит в получении спектров с малым количеством фотоэлектронов с помощью реалистической функции отклика ФЭУ. Метод калибровки спектрометрического канала ФЭУ с традиционной структурой (ФЭУ с линейно фокусирующими динодами, коробочными динодами и др.) подробно рассмотрен в работах [30, 31].

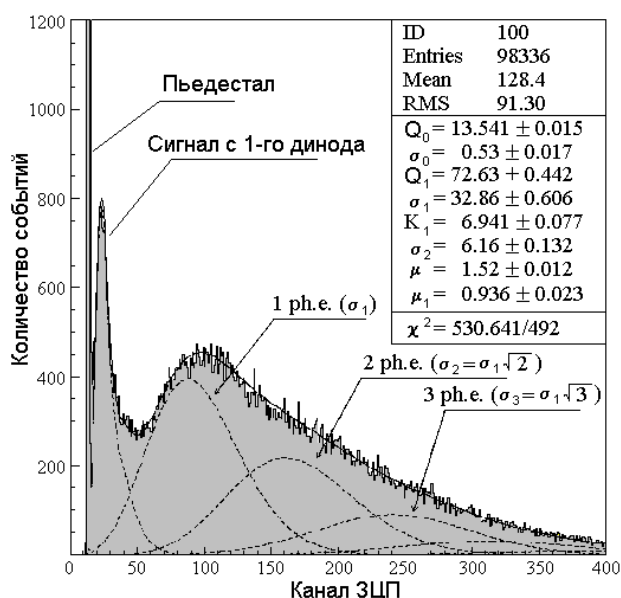


Рис. 26: Типичный зарядовый спектр от светодиода для ФЭУ R5600

Используемый в фотосенсоре H5783 ФЭУ R5600 имеет динодную систему, т.н. «металлический каналный динод». Одной из особенностей работы этих ФЭУ является наличие фотоэффекта на фотокатоде и первом диноде. Кроме того, имеются и другие особенности работы ФЭУ R5600, которые не позволяют непосредственно применить функцию отклика, полученную в работе [31]. Учитывая специфические особенности структуры ФЭУ R5600, функция отклика была модифицирована. На рисунке 26, для

данного ФЭУ, представлен типичный спектр от светодиода при среднем количестве 1.5 фотоэлектрона (ф.э.). Первый пик на спектре является результатом фотоэффекта на первом диноде из-за полупрозрачности фотокатода. Функция отклика имеет 8 нефеноменологических параметров:

Q_0, σ_0 – положение пьедестала и его стандартное отклонение;

Q_1, σ_1 – средний заряд на выходе ФЭУ при испускании фотокатодом одного фотоэлектрона, и его стандартное отклонение;

K_1 – коэффициент умножения на первом диноде;

σ_2 – стандартное отклонение распределения выходного заряда, когда сигнал инициируется от одного фотоэлектрона на первом диноде;

μ – количество фотоэлектронов, образованных на фотокатод и собранных динодной системой;

μ_1 – количество фотоэлектронов, образованных на первом диноде.

Параметр Q_1 используется при калибровке спектрометрического канала. Подробно данный метод калибровки описан в работе [32].

Для обеспечения достаточной точности ($\sim 2\text{-}3\%$) измерение светосбора в каждой точке занимает порядка двух часов. При этом регистрируется примерно 1500-2000 космических мюонов. До и после каждого измерения проводилась калибровка спектрометрического канала и калибровочный коэффициент Q_1 определялся как среднее от двух значений [33].

Типичный спектр космических мюонов с дальнего от ФЭУ конца счётчика CSP представлен на рисунке 27.

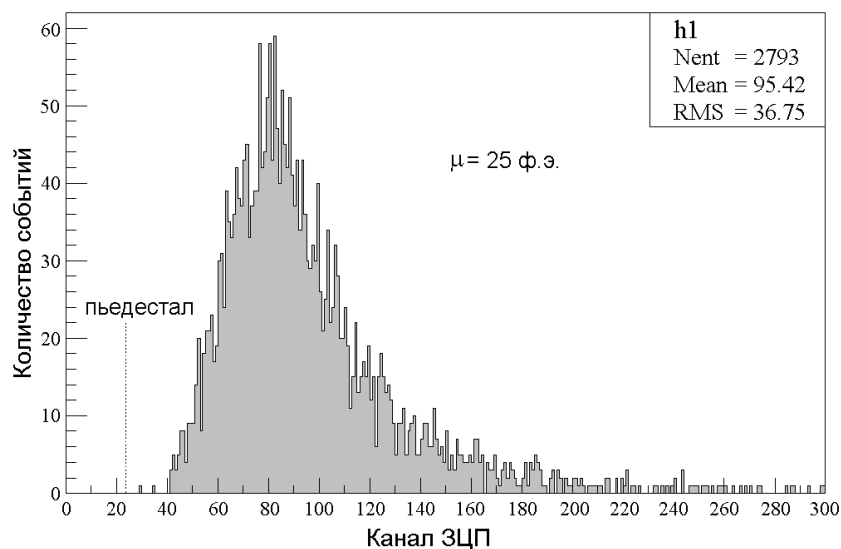


Рис. 27: Типичный спектр от космических мюонов

Штриховой линией обозначен пьедастал. Количество фотоэлектронов находится из выражения

$$N_{pe} = \frac{\bar{Q} - Q_0}{\bar{Q}_1} K_{att} \quad (4)$$

где $\bar{Q}$ – средняя амплитуда мюонного спектра, Q_0 - значение пьедастала, $\bar{Q}_1$ – усредненный калибровочный параметр, K_{att} – коэффициент ослабления.

Измерение светосбора сцинтилляционных детекторов в количестве фотоэлектронов, испущенных катодом фотоэлектронного умножителя, носит важный смысл, так как дает возможность определять не только эффективность мюонных счетчиков, но и делать прогноз их долговременной стабильности, а также проводить сравнение параметров детекторов различных конструкций.

3.2 Состав выборки исследуемых сцинтилляционных счетчиков. Методика вычисления постоянной старения сцинтилляционных счетчиков

На протяжении десяти лет (1999-2009 гг.) проводились периодические измерения световых выходов с дальнего от ФЭУ конца сцинтилляционных пластин методом описанным выше. Тестировались образцы счетчиков нового типа CSP и BSU (2 и 17 штук соответственно), а также счетчики старого типа – модифицированные CSP Wall (23 шт.) и CSX (16 шт.). Эти исследования проводились в периоды длительных остановок Тэватрона, когда исследуемые экземпляры можно было снять с установки CDF для проведения измерений.

Для каждого исследуемого счетчика строится график зависимости светосбора от времени, который затем аппроксимируется экспоненциальной функцией

$$N_t = N_0 e^{-(t/\tau)} \quad (5)$$

где t - год; τ – постоянная старения счетчика.

3.2.1 Счетчики верхней и нижней центральной части установки

Эти детекторы относятся к новому типу по способу съема света. Они были смонтированы на установке CDF в 2000 году и расположены, как следует из названия, на верхнем и нижнем ярусе. В качестве основы использовались $320 \times 30 \times 2$ см³ бруски (тайлы) полистирола UPS 923A (производства Института Сцинтилляционных Материалов, г. Харьков, Украина). В качестве световода использовалась полоса из спектросмещающих волокон [22, 26].

Большой размер CSP счетчиков и сложность в доступе к ним сверху и снизу установки CDF, сделало невозможным снять образцы для испытаний, в отличие от CSP Wall, CSX и BSU счетчиков. В нашем случае использовались

два запасных CSP счетчика, расположенных на вершине CDF и не подключенных к установке. Графики зависимости световыхода с дальнего конца образца от времени, для обоих счетчиков, показаны на рисунке 28. Аппроксимация выполнена с использованием выражения (5).

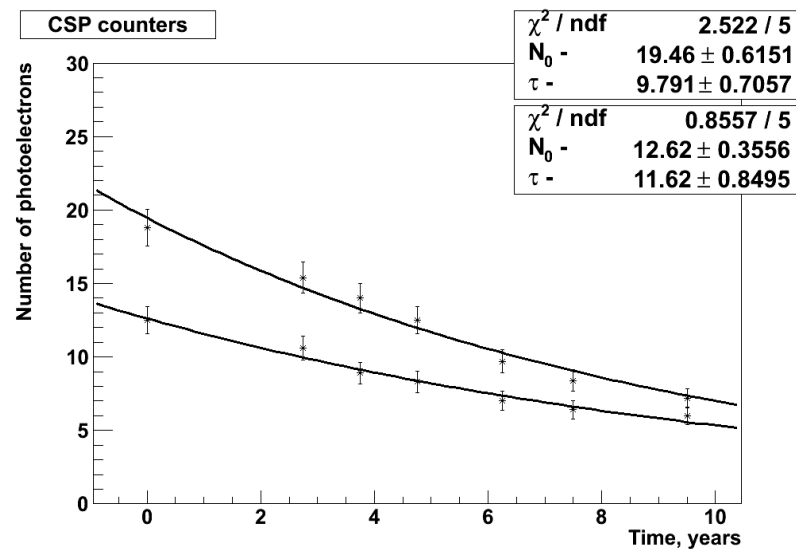


Рис. 28: Временная зависимость световыхода сцинтилляторной пластины с дальнего конца от ФЭУ на расстоянии 310 см, измеренная для двух тестовых CSP счетчиков.

Экспериментальные точки фитировались экспоненциальной функцией

Таким образом, полученная усредненная постоянная старения $\tau = 10,7 \pm 1,1$ лет позволяет утверждать, что эффективность CSP счетчиков не будет опускаться ниже 95% до 2014 года (на тот момент предполагаемого срока завершения эксперимента CDF).

Заметим, что CSP счетчики задействованные на установке CDF имели более высокий светосбор чем исследуемые образцы, так как в качестве запасных были оставлены счетчики с наихудшим светосбором. Исходя из этого, условие не ниже 95% эффективности регистрации мюонов применимо ко всем подобным счетчикам.

3.2.2 Счетчики вокруг магнитных тороидов

Счетчики BSU были смонтированы на детектор CDF в 2000 году. Они имеют схожую с CSP Top и Bottom конструкцию и состав [22 , 26]. В основе также лежит сцинтиллятор из полистирола и лента из спектросмещающих волокон для сбора и передачи света на фотоприемник. Различие только в размерах, для BSU они составляют $163 \times 16 \times 1,5 \text{ см}^3$.

Значения усредненного светосбора с дальнего от ФЭУ конца сцинтилляционной пластины для 17 образцов выборки, соответствующие различным годам когда проводились измерения, представлены в таблице 5.

Таблица 5: Усредненное количество фотоэлектронов для счетчиков BSU, с дальнего от ФЭУ конца (160 см)

Год (сезон) проведения измерений	Усредненное количество фотоэлектронов
2000	32.9 ± 4.7
2003 (Осень)	24.7 ± 3.6
2004 (Осень)	23.0 ± 3.3
2006 (Весна)	20.9 ± 3.2
2007 (Лето)	18.9 ± 3.2
2009 (Лето)	17.6 ± 3.3

Зависимость светосбора от времени, с дальнего от ФЭУ конца, для одного счетчика BSU, входящего в выборку, показана на рисунке 29. Постоянная старения получена фитированием экспонентой. График распределения постоянных старения всех 17 образцов BSU счетчиков представлен на рисунке 30.

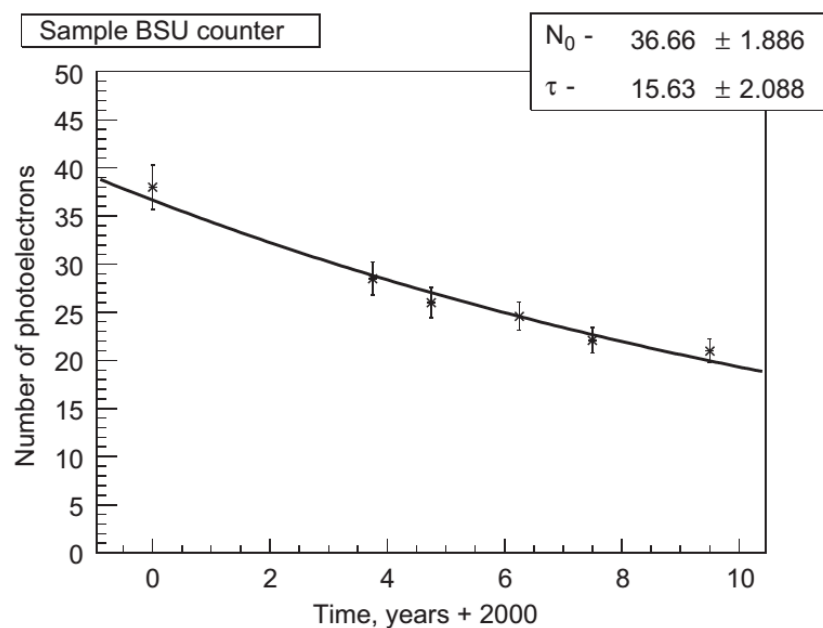


Рис. 29: Зависимость световыхода от года проведения измерений для одного счетчика BSU из выборки (с дальнего от ФЭУ конца)

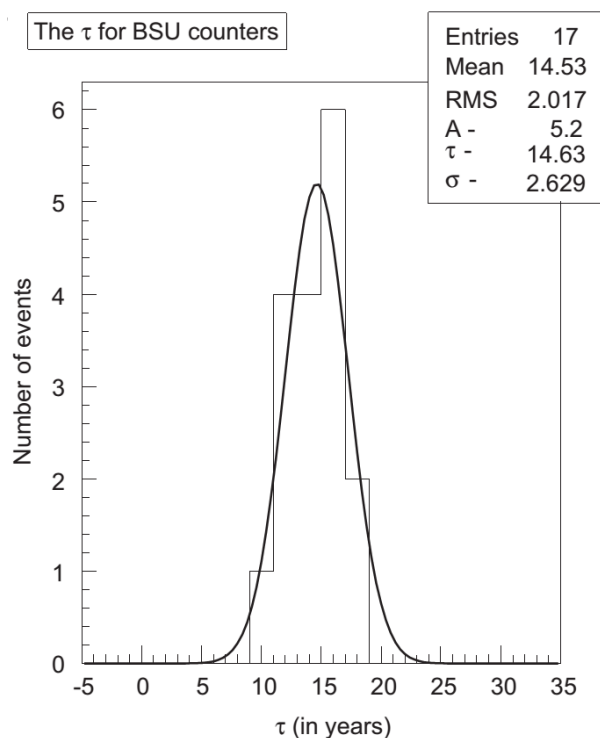


Рис. 30: Распределение констант старения для выборки BSU счетчиков, отфитированное Гауссом

Усредненный светосбор, измеренный в 2009 году, равный 17,6 фотоэлектронов и постоянная старения $\tau = 14,6$ лет, позволяет предсказать

величину ожидаемого светосбора на уровне 13 фотоэлектронов к концу 2014 года. Таким образом, до окончания предполагаемого срока эксперимента в 2014 году, эффективность регистрации мюонов счетчиками BSU оставалась бы на уровне 99,9%.

3.2.3 Дополнительные счетчики центральной части установки

Счетчики CSX относятся к детекторам старого типа с классическим съемом света с помощью плексигласового световода типа «рыбий хвост». Сцинтилляционная пластина, на основе поливинилтолуола NE 114, выполнена в форме трапеции с размерами 180 x 27/45 x 2,5 см³. Начали использоваться на установке CDF с 1994 года [22, 23, 24].

По месту расположения счетчики CSX делятся на внутренние и внешние. Сложности с доступом к внешним счетчикам послужили причиной их отсутствия в тестовых измерениях. Следует также учесть, что светосбор с внутренних счетчиков CSX больше чем с внешних, т.к. для внутренних счетчиков свет собирается с широкой грани, а для внешних, напротив, с узкой грани.

В итоге, получены усредненные значения световыхода с дальних от ФЭУ концов 16 образцов сцинтилляционных пластин в 2003, 2004, 2006, 2007 и 2009 годах. Результаты суммированы в таблице 6.

Таблица 6: Усредненное количество фотоэлектронов для внутренних счетчиков CSX, с дальнего от ФЭУ конца (170 см)

Год (сезон) проведения измерений	Усредненное количество фотоэлектронов
2003 (Осень)	8.1 ± 2.4
2004 (Осень)	7.3 ± 2.2
2006 (Весна)	5.9 ± 1.7
2007 (Лето)	5.2 ± 1.4
2009 (Лето)	5.0 ± 1.0

Зависимость светосбора, с дальнего от ФЭУ конца пластины, от года измерений для одного из выборки внутреннего счетчика CSX показана на рисунке 31.

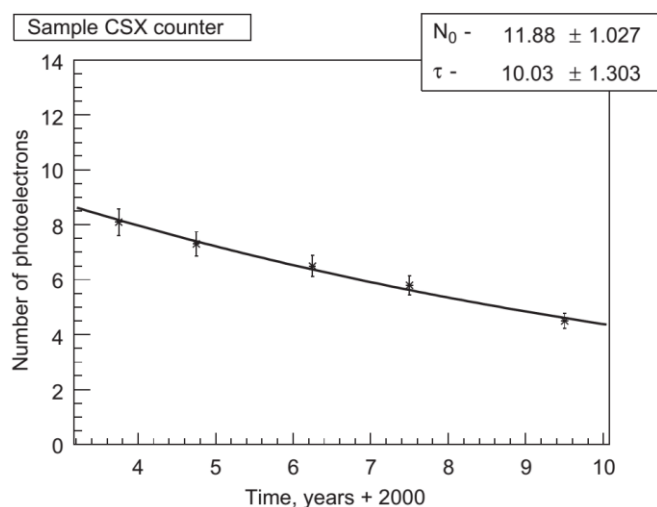


Рис. 31: Зависимость световыхода от года проведения измерений для внутреннего счетчика CSX из выборки (с дальнего от ФЭУ конца)

Постоянная старения получена фитированием экспонентой. График распределения постоянных старения всех 16 образцов внутренних CSX счетчиков представлен на рисунке 32.

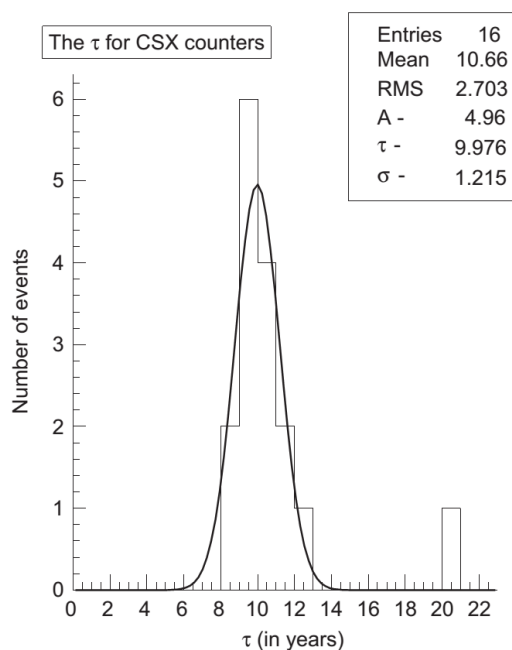


Рис. 32: Распределение постоянных старения для всей выборки внутренних CSX счетчиков, отфитированное Гауссом

Усредненный светосбор, равный 5 фотоэлектронам с дальнего от ФЭУ конца сцинтилляционной пластины, измеренный в 2009 году, соответствует эффективности регистрации мюонов равной 95%. Вычисленная постоянная старения $\tau = 10,0$ годам позволяет предсказать средний светосбор, равный 3 фотоэлектронам к концу 2014 года, что соответствует эффективности регистрации мюонов менее чем 93%.

3.2.4 Обновленные счетчики центральной части установки

Счетчики CSP Wall появились на установке CDF в 1992 году. Они состояли из того же типа сцинтиллятора, на основе поливинилтолуола, что и CSX, но имели прямоугольную форму с размерами $320 \times 30 \times 2 \text{ см}^3$ [22]. Классический съем света с помощью плексигласового световода типа «рыбий хвост» существовал вплоть до 1999 года, когда была осуществлена модернизация этих счетчиков. Суть модернизации сводилась к наклейке полосы из спектросмещающих волокон на один из длинных торцов сцинтилляционной пластины. Полоса идет по торцу световода, и в конце, через цилиндрическую часть, где был выточен паз, состыковывается с фотокатодом ФЭУ. Выполнено это было с целью повышения светосбора для компенсации эффектов преждевременного старения. Таким образом, светосбор с дальнего от ФЭУ конца сцинтилляционной пластины удалось повысить более чем в 3 раза. Усредненное число фотоэлектронов полученных в 1999 году для выборки из 23 счетчиков составляло $\sim 14,4$ [34]. Впоследствии был измерен усредненный светосбор с дальнего от ФЭУ конца 23 образцов сцинтилляционных пластин в 2003, 2004, 2006, 2007 и 2009 годах. Результаты приведены в таблице 7.

Таблица 7: Усредненное количество фотоэлектронов, с дальнего от ФЭУ конца
сцинтилляционной пластины (310 см), для счетчиков CSP Wall

Год (сезон) проведения измерений	Усредненное количество фотоэлектронов
1999	14.4 ± 3.8
2003 (Осень)	5.9 ± 1.6
2004 (Осень)	4.5 ± 1.3
2006 (Весна)	3.8 ± 1.3
2007 (Лето)	2.6 ± 0.9
2009 (Лето)	2.3 ± 0.8

Зависимость световыхода от года измерений, с дальнего от ФЭУ конца пластины, для одного счетчика CSP Wall, показана на рисунке 33. Постоянная старения получена фитированием экспериментальных данных функцией из выражения (5). График распределения постоянных старения всех 23 образцов CSP Wall счетчиков представлен на рисунке 34.

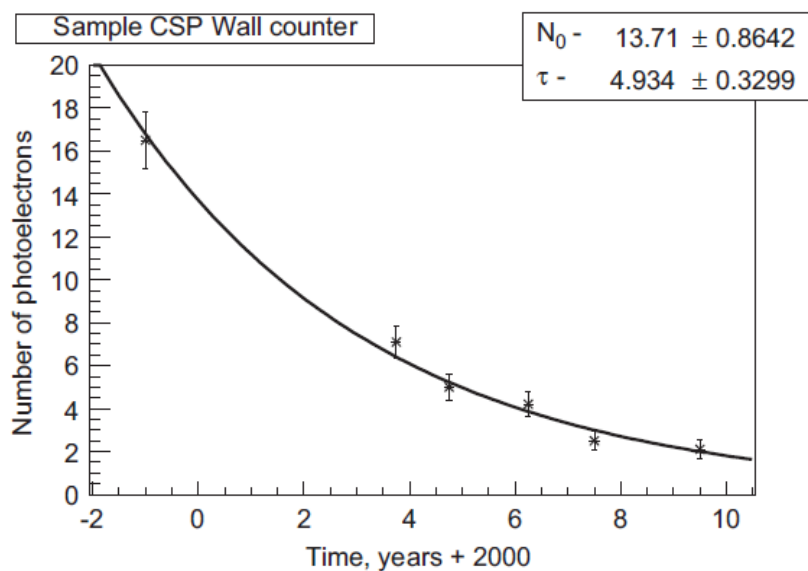


Рис. 33: Зависимость световыхода от года проведения измерений для счетчика CSP Wall (с дальнего от ФЭУ конца)

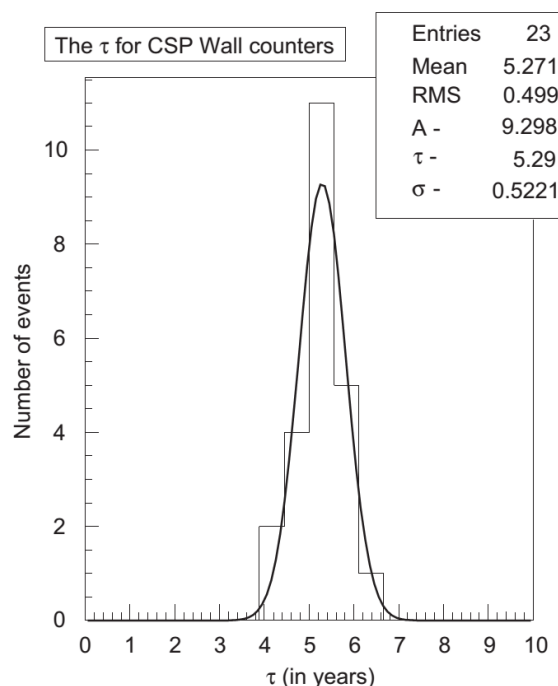


Рис. 34: Распределение постоянных старения для всей выборки CSP Wall счетчиков, отфитированное Гауссом

Важно отметить, что в 2009 году средняя эффективность регистрации мюонов для тестируемой выборки из 23 счетчиков CSP Wall была менее чем 85% (2,3 ф.э.). Беря в расчет, что среднее значение постоянной старения $\tau = 5,3$ года, величина светосбора к концу 2014 года составит не более 1,0 фотоэлектрона. Это соответствует менее чем 70% эффективности регистрации.

3.3 Изучение зависимости технической длины ослабления света от времени для счетчиков нового типа центральной части установки

Техническая длина ослабления света (technical attenuation length - TAL) в счетчиках CSP нового типа была исследована для лучшего понимания процесса старения в детекторах мюонной системы установки CDF. Техническая длина ослабления света (TAL) пластикового

сцинтилляционного детектора определяется как длина на которой светосбор уменьшается в e раз. В нашем случае, вместо сцинтиллятора рассматривается система «пластиковый сцинтиллятор + спектросмещающее волокно».

Изучалась зависимость светосбора как функция расстояния от ФЭУ. Затем результаты аппроксимировались следующей функцией [29]:

$$N_x = N_0 e^{-(x/\lambda)} \quad (6)$$

где N_0 - сигнал при облучении на расстоянии $x = 0$ от ФЭУ; N_x - сигнал при облучении на расстоянии x от ФЭУ; x – расстояние вдоль счетчика отсчитываемое от фотокатода ФЭУ; λ - искомая техническая длина ослабления.

Графики зависимости светосбора от расстояния до ФЭУ для измерений выполненных в 2002, 2003, 2004, 2006, 2007 и 2009 годах в отношении счетчиков CSP нового типа представлены на рисунке 35.

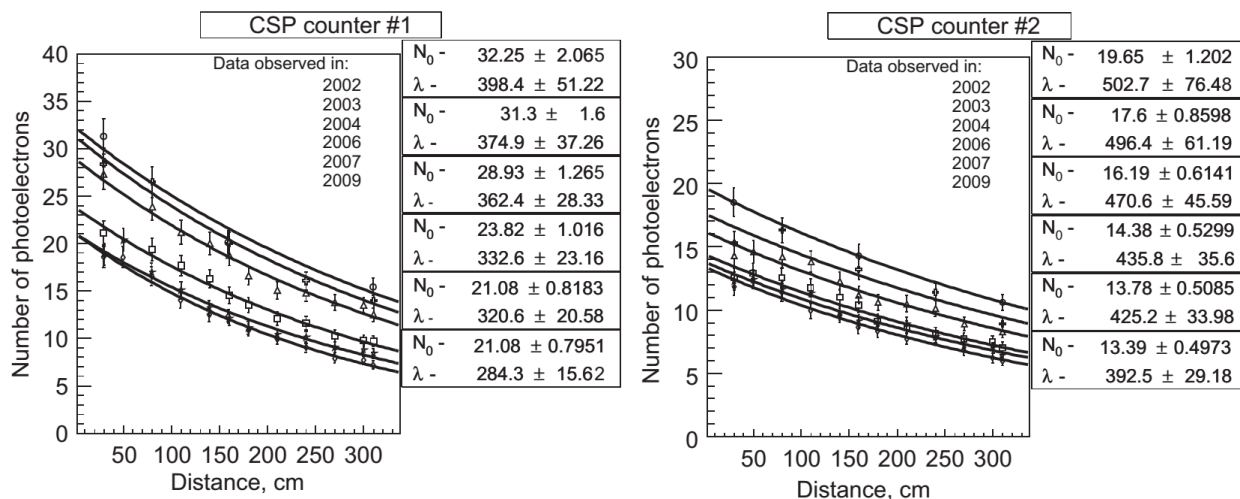


Рис. 35: Светосбор как функция расстояния от фотокатода ФЭУ для двух счетчиков CSP, участвовавших в тестировании. Экспериментальные точки фитировались функцией из выражения (6). Различные кривые соответствуют разным годам проведения измерений

Полученные параметры позволяют определить техническую длину ослабления λ данных счетчиков и изучить ее поведение как функцию

времени (рис. 36). Небольшое изменение λ с течением времени указывает на вклад старения спектросмещающего волокна (WLS).

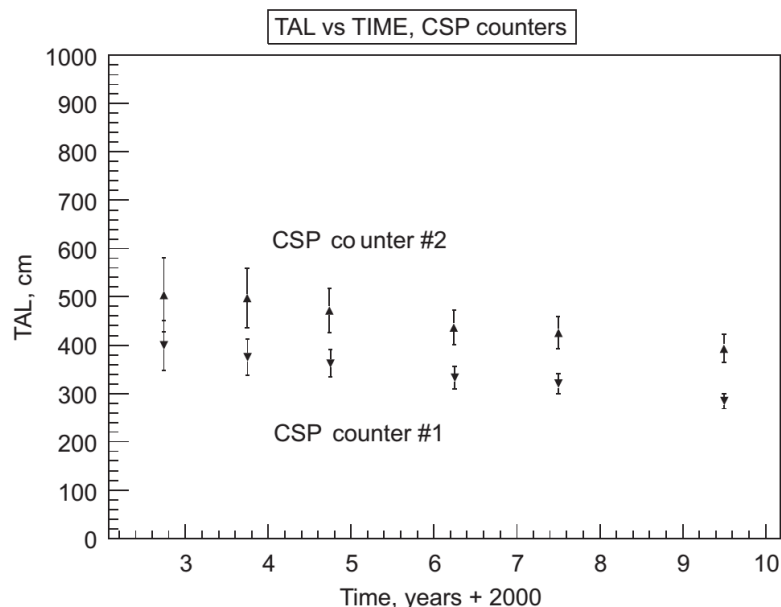


Рис. 36: Зависимость TAL от времени для двух счетчиков CSP, участвовавших в тестировании

Параметр τ , вычисленный исходя из количества света полученного с дальнего от ФЭУ конца сцинтилляционной пластины, и который используется для описания общего ухудшения свойств системы «пластиковый сцинтиллятор + спектросмещающее волокно» со временем, зависит от множества факторов, таких как:

- уменьшение объемной прозрачности сцинтиллятора;
- ухудшение свойств спектросмещающего волокна;
- ухудшение качества поверхности сцинтилляционной пластины;
- ухудшение свойств присадок, таких как РТР, РОРОР и др.;
- деградация полимерной основы сцинтиллятора и спектросмещающего волокна.

Эти факторы возникают под воздействием естественного старения, излучения и других причин. Можно различить эффекты ухудшения свойств волокон и свойств сцинтилляционных пластин на уменьшение светового

выхода со временем, как описано ниже. Следует обратить внимание на тот факт, что во всех случаях ранее описанных в этом разделе, сцинтилляционный свет с дальнего конца счетчика проходил расстояние равное ширине пластины до спектросмещающей ленты и затем, переизлученный в волокне, попадал на фотокатод ФЭУ, пройдя всю длину волокна. Взяв значения параметра N_0 представленных на рисунке 35 и применив к ним выражение (5) мы получим постоянную старения τ , которая зависит от факторов связанных исключительно со сцинтилляционной пластиной, без влияния WLS (рис. 37). В этом случае, усредненная для двух счетчиков $\tau_0 = 14,6$ лет, позволяет оценить старение сцинтилляционной пластины на уровне 6,6 % ежегодно. Старение системы «сцинтиллятор + спектросмещающее волокно» уменьшает светосбор на 8,9% ежегодно ($\tau = 10,7$ лет).

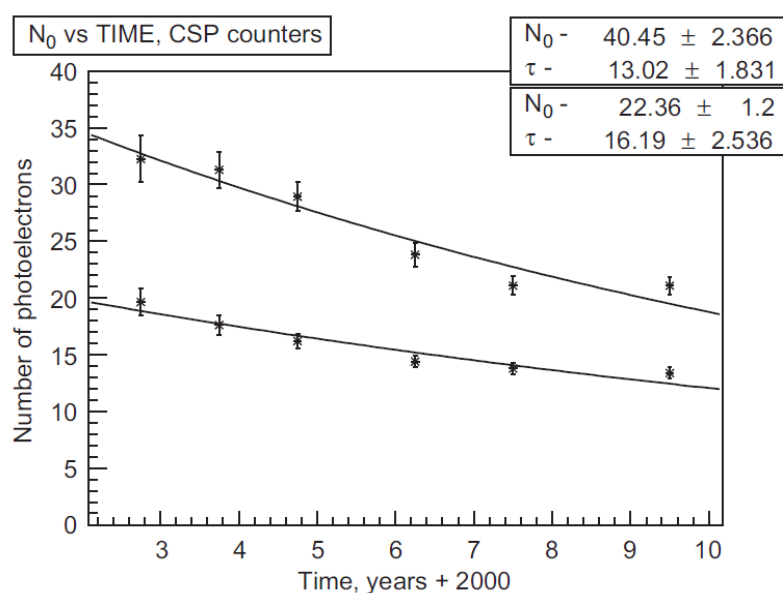


Рис. 37: Зависимость светосбора как функция времени на расстоянии $x = 0$ от фотокатода ФЭУ для двух счетчиков CSP участвовавших в тестировании. Данные фитировались функцией из выражения (5)

Таким образом, деградация спектросмещающего волокна уменьшает светосбор только на 2,3% и это значение в 3 раза меньше чем влияние

оказываемое старением сцинтилляционной пластины. Этот факт – один из серьезных аргументов в пользу использования техники съема света с помощью спектросмещающих волокон для больших сцинтилляционных счетчиков.

Следует также отметить, что деградация сцинтилляционной пластины объясняет более быстрое старение счетчиков CSP Wall на основе поливинилтолуола (ПВТ) в сравнении со счетчиками CSP нового типа на основе полистирола (ПС), не смотря на то, что в обоих случаях используется техника съема света с помощью спектросмещающих волокон.

Резюмируя вышесказанное, результаты длительного периода (1999-2009 гг.) измерений светосбора выборки, состоящей из различных типов сцинтилляционных счетчиков мюонного триггера установки CDF, представлены в таблице 8.

Таблица 8: Основные результаты изучения старения сцинтилляционных счетчиков мюонной системы установки CDF

тип счетчика	основа	метод светосбора	длина, м	кол-во счетчиков	средний светосбор за 2009 г., ф.э.	постоянная старения (по результатам до 2009 г.), год	уменьшение светосбора, % в год
BSU	ПС	волокно	1.6	17	17.6 ± 3.3	14.6 ± 2.6	6.4
CSX	ПВТ	световод	1.7	16	5.0 ± 1.0	10.0 ± 1.2	9.3
CSP Wall	ПВТ	комбин.	3.1	23	2.3 ± 0.8	5.3 ± 0.5	17.2
CSP	ПС	волокно	3.1	2	6.6 ± 0.9	10.7 ± 1.1	8.9
CSP	ПС	волокно	x=0	2	17.2 ± 3.1	14.6 ± 3.1	6.6

Измерения светосбора постоянной выборки сцинтилляционных счетчиков на протяжении длительного периода времени (1999-2009 гг.) позволило оценить долгосрочную эффективность регистрации мюонов мюонным триггером установки CDF. Сделан вывод, что счетчики BSU и CSP

прослужат до предполагаемого окончания набора статистики на CDF без заметного уменьшения эффективности регистрации мюонов; счетчики CSX к концу сеанса RUN II выйдут в зону критического (ниже 95%) уменьшения эффективности; счетчики CSP Wall уже в 2009 показали сильное снижение (ниже 90%) эффективности, но их замена не представлялась возможной до окончания сеанса RUN II.

3.4 Выводы

- 1) Впервые, на основе 10-летних измерений, показано, что у сцинтилляционных счетчиков на основе полистирола ухудшение светосбора происходит в 2 раза медленнее по сравнению со счетчиками на основе поливинилтолуола ($\tau = 10,7$ и $\tau = 5,3$ лет соответственно).
- 2) Показано, что для сцинтилляционных счетчиков на основе полистирола, использующих оптоволоконный способ съема света, старение системы "сцинтиллятор + спектросмещающее волокно" определяется в большей степени деградацией сцинтилляционной пластины, а не волокном. Соотношение вклада в деградацию системы «пластик/спектросмещающее волокно» равно 3/1.
- 3) Впервые, на основе 7-летних наблюдений, показано, что техническая длина ослабления света (TAL) для системы «сцинтиллятор + спектросмещающее волокно» уменьшается не более 25% за этот период.
- 4) Оценена эффективность работы различных типов сцинтилляционных счетчиков в RUN II. Составлен план их замены.

ГЛАВА 4

Измерение заряда ТОП-кварка

В отличие от массы, другие свойства t -кварка предсказываются СМ с довольно высокой точностью. Время жизни t -кварка много меньше, чем время, необходимое для адронизации, поэтому его свойства могут быть исследованы непосредственно и с меньшими погрешностями, чем свойства других кварков, характеристики которых определяются через изучение их связанных состояний. Таким образом, изучение свойств t -кварка дает возможность провести прецизионные тесты новой физики за пределами СМ. С помощью одной из моделей новой физики, модели Чанга, было предложено альтернативное объяснение результатов экспериментальных данных CDF Run I [35]. Было выдвинуто предположение, что открытый на CDF t -кварк с массой $\approx 170 \text{ ГэВ}/c^2$ является не кварком из СМ, а экзотическим тяжелым кварком дублета $(Q_1, Q_4)_R$, где Q_4 обладает зарядом $-4/3$ и распадается по каналу bW^- , а Q_1 смешивается с правой компонентой b -кварка и обладает зарядом $-1/3$. Согласно этой теории t -кварк из СМ должен обладать зарядом $+2/3$ и массой около $274 \text{ ГэВ}/c^2$. При поисках кварков четвертого поколения на данных CDF RUN I был определен нижний предел на массу t' -кварка, $360 \text{ ГэВ}/c^2$ [36], однако вопрос о заряде t -кварка, остался до конца не выясненным.

На CDF были проведены измерения электрического заряда t -кварка с целью проверки гипотезы о существовании экзотического кварка четвертого поколения с зарядом $-4/3$ и массой $\approx 170 \text{ ГэВ}/c^2$ на полной статистике [28, 38]. Гипотеза о существовании экзотического кварка на CDF может быть подтверждена, если при распаде t -кварка будут обнаружены события, содержащие W^- -бозон и b -кварк, а при распаде $\bar{t}$ -кварка – W^+ -бозон и $\bar{b}$ -кварк.

Для восстановления заряда t -кварка по продуктам его распада было необходимо: определить заряд W -бозона, соотнести b -струю с W -бозоном и определить заряд b -струи. Для анализа были отобраны события распада $t\bar{t}$ -пары, содержащие адроны от распада одного W -бозона и электрон или мюон с соответствующим антинейтрино от распада другого W -бозона. На первом шаге анализа определялся заряд одного W -бозона по заряду лептона для лептонной ветви распада. Заряд другого W -бозона для адронной ветви распада принимался противоположным по знаку. Для соотнесения между W -бозонами и b -струями использовалась процедура так называемого кинематического фита, разработанная коллаборацией CDF [40]. Заряды b -струй определялись с помощью специального алгоритма JetQ [41, 42]. События, в которых заряд W -бозона был противоположен значению, полученному для заряда b -струи от распада t -кварка, классифицировались как SM подобные события (SM-событие). Если знаки зарядов W -бозона и b -струи от распада t -кварка совпадали, то такое событие классифицировалось как событие, соответствующее распаду экзотического кварка с зарядом $-4/3$ (XM-событие).

4.1 Критерии отбора событий

Триггерной сигнатурой для лептон-струйной моды распада $t\bar{t}$ -пары служит большая недостающая поперечная энергия в событии, а также лептон с большим поперечным импульсом. Отобранные для анализа события должны были удовлетворять следующим критериям.

События с двумя и более лептонами идентифицировались как события дилептонной моды распада $t\bar{t}$ -пары и отбрасывались. События с одним лептоном подразделялись на 3 группы. Две из них содержали события, содержащие электрон или мюон, которые были отобраны центральным электронным (SEM18) или центральным мюонным (SMUP18, SMX18) триггерами, в третью группу входили события, содержащие мюоны, отобранные off-line.

При первичном отборе (триггер L_1) для электронов от события-кандидата требовалось наличие трека с поперечным импульсом $p_T > 8$ ГэВ/с, который указывал на отдельную башню центрального электромагнитного калориметра (СЕМ) с поперечным энерговыделением $E_T > 8$ ГэВ. Триггером L_2 отбирались события, в которых поперечное энерговыделение в кластере вокруг выделенной башни превышало $E_T > 16$ ГэВ. На третьем уровне триггера L_3 отбирались события, имеющие треки с поперечным импульсом $p_T > 9$ ГэВ/с, указывающие на центральный э.м. калориметр с поперечным энерговыделением $E_T > 18$ ГэВ. Также для событий с электроном было необходимо, чтобы для электрона-кандидата количество поглощенной энергии в адронном калориметре было существенно меньше энергии, поглощенной в электромагнитном калориметре. Был введен «критерий обособленности»: поперечная энергия, измеренная в конусе $R = 0,4$, где $R = \sqrt{\Delta\phi^2 + \Delta\eta^2}$, образованном вокруг лептона за вычетом энергии данного электрона, должна составлять менее 10%, чем энергия от электрона-кандидата.

Все данные для событий с мюонами были подразделены на две подгруппы в зависимости от того, в какой именно мюонной дрейфовой камере были обнаружены трековые сегменты. Было необходимо, чтобы сегменты треков были или одновременно в центральной мюонной дрейфовой камере (CMU) и в ее модернизированной части (CMP) – так называемый CMUP-мюон, отобранный триггером CMUP18; или в центральной мюонной дрейфовой камере (CMX) – так называемый CMX-мюон, отобранный триггером CMX18.

При отборе триггером L_1 в случае CMUP-мюона требовалось наличие трека в центральной газовой трековой камере (COT) с поперечным импульсом $p_T > 4$ ГэВ/с, который соответствует трековому сегменту с поперечным импульсом $p_T > 6$ ГэВ/с в CMU и CMP-камерах. В случае CMX-мюона требовалось наличие трека в COT-камере с поперечным импульсом $p_T > 8$ ГэВ/с, который соответствует трековому сегменту в CMX-камере с

поперечным импульсом $p_T > 6$ ГэВ/с. Триггером L_2 автоматически принимались события, прошедшие отбор триггером L_1 . При отборе триггером L_3 требовалось наличие в событии-кандидате трека с поперечным импульсом $p_T > 18$ ГэВ/с. В случае SMUP-мюона расстояние между восстановленными трековыми сегментами в COT- и CMU-камерах в поперечной плоскости должно быть не более 10 см, а между восстановленными трековыми сегментами в COT- и CMP-камерах не более 20 см. В случае CMX-мюона расстояние между трековыми сегментами в COT- и CMX-камерах должно быть менее 10 см.

Чтобы увеличить мюонный аксептанс в анализ были добавлены мюонные off-line события. Триггером L_1 отбирались события с недостающей поперечной энергией $E_T > 25$ ГэВ, на уровне триггера L_2 добавлялось требование присутствия в событии по крайней мере двух струй с энергией $E_T > 10$ ГэВ, триггером L_3 ужесточалось требование к недостающей поперечной энергии – $E_T > 35$ ГэВ. Если при этом присутствовал сегмент трека в районе, не охваченным лептонным триггером CMX камеры, или сегмент трека только в CMU и CMP камерах, либо изолированный трек, не опознанный мюонным детектором, то мюонное событие-кандидат добавлялось в анализ. Кроме того вводились дополнительные критерии отбора: расширенное мюонное событие должно было содержать 2 струи с энергией $E_T > 25$ ГэВ, одна из которых должна была быть в интервале псевдобыстроты $|\eta| < 0,9$, а также отделена от другой конусом $\Delta R > 1,0$. За счет введения в анализ мюонных off-line событий мюонный аксептанс был увеличен приблизительно на 20%.

Кроме указанных выше требованиям к лептонам, событие должно содержать по крайней мере 4 струи, три из которых с энергией $E_T > 20$ ГэВ в интервале псевдобыстроты $|\eta| < 2,0$, четвертая струя с энергией $E_T > 12$ ГэВ в интервале псевдобыстроты $|\eta| < 2,4$. Реконструкция струй проводилась с помощью специального алгоритма в конусе $\Delta R = 0,4$.

Из-за наличия в процессе нейтрино появляется дисбаланс энергии в поперечной плоскости, недостаток поперечной энергии определяется проекцией энергетических вкладов всех башен калориметра на поперечную плоскость. Требуемое значение недостающей поперечной энергии должно было быть $E_T > 20$ ГэВ после поправок при восстановлении импульса мюонов и уточнения энергий струй в калориметре.

Наборы данных, удовлетворяющие перечисленным выше требованиям, назывались LJ-данными. Для улучшения отношения сигнал-фон необходимо было идентифицировать события с двумя и более b -струями, для чего был введен критерий наличия в событии по крайней мере двух струй, содержащих вторичные вершины от образовавшегося внутри струи при адронизации b -кварка B -мезона и последующего его распада. Алгоритм отбора по вторичной вершине [43] настроен так, что эффективность идентификации b -струи составляла $\sim 50\%$, вероятность принять струю от легких кварков как b -струю составила 2% .

Все требования к отбору событий были получены с помощью моделирования методом Монте Карло, которое использовалось в большинстве исследований на CDF. Для генерации события и партонных ливней применялась программа PYTHIA версии 6.216 [44], при этом значение массы t -кварка принималось $m_t = 172,5$ ГэВ/ c^2 . Наборы событий, сгенерированные для других значений массы t -кварка, использовались для изучения зависимости измерений от этого параметра. Наборы событий распада $t\bar{t}$ -пары, сгенерированные программой-генератором HERWIG версии 6.510 [45], использовались для определения возможной систематической ошибки, связанной с выбором генератора. Большинство фоновых событий были смоделированы программой PYTHIA, кроме фона от процесса W +струи, смоделированного с помощью программы ALPGEN версии 2.10 [46]. Моделирование функций партонного распределения проводилось с помощью программы STEQ5L [47]. Процессы взаимодействия частиц с

детектором – с помощью программы GEANT [48], для моделирования развития ливней использовалась программа GFLASH [49].

4.2 Реконструкция $t\bar{t}$ события

Каждое событие содержит лептон, несколько кандидатов на b -струи и струи от легких кварков. Чтобы присвоить четыре струи в событии с наибольшими поперечными импульсами четырем кваркам от распада $t\bar{t}$ -пары, и связать лептон с b -струей от лептонного распада W -бозона, образующегося при распаде t -кварка, используется процедура кинематического фита массы t -кварка, основанная на полной реконструкции топологии события. Предполагается, что b -струи происходят от распада $t\bar{t}$ -пары, остальные струи – от распадов W -бозонов и от глюонов.

Процедура кинематического фита основана на минимизации функционала χ^2 , который включает в себя фиксированные массы t -кварка и W -бозона: $m_t=172,5$ ГэВ/с², $m_W=80,42$ ГэВ/с². Этот функционал описывается уравнением

$$\chi^2 = \sum_{i=l,4}^{jet} \frac{(\hat{p}_T^i - p_T^i)^2}{\sigma_i^2} + \sum_{j=x,y} \frac{(\hat{p}_j^{UE} - p_j^{UE})^2}{\sigma_j^2} + \frac{(m_{jj} - m_W)^2}{\sigma_W^2} + \frac{(m_{lv} - m_W)^2}{\sigma_W^2} + \frac{(m_{bjj} - m_t)^2}{\sigma_t^2} + \frac{(m_{blv} - m_t)^2}{\sigma_t^2} \quad (7)$$

В этом уравнении первый член учитывает погрешность в определении поперечных импульсов для четырех струй и лептона, второй – выполняет ту же функцию для внекластерной энергии, которая представляет собой энерговыделение в калориметре, не отнесенное к четырем ведущим струям и лептону. Последние четыре члена уравнения отвечают за реконструкцию инвариантных масс W -бозонов и t -кварков. Параметр σ_W представляют собой ширину распада W -бозона (2.12 ГэВ/с²), а σ_t – сумму квадратов теоретической ширины распада t -кварка (1,5 ГэВ/с²) и экспериментальной ошибки для определения его массы (0,9 ГэВ/с²). События-кандидаты могут содержать 2, 3 или 4 струи, идентифицированные как b -струи алгоритмом

вторичной вершины (SecVtx-алгоритмом), поэтому присутствуют соответственно 2, 6 или 12 возможных присвоений b -струй W -бозонам. Для каждого присвоения W - b -струя рассчитывались два значения функционала χ^2 для учета неопределенности в направлении продольного импульса нейтрино.

Как было определено моделированием Монте Карло распада $t\bar{t}$ -пары, при выборе комбинации с минимальным χ^2 вероятность правильного присвоения W - b -струя (в дальнейшем – чистота присвоения, p_{pair}) составляет 76%. При введении ограничения на минимальное значение χ^2 чистоту присвоения можно повысить, но при этом эффективность отбора событий снижается. Оптимальное присвоение можно определить через максимальное значение параметра εD^2 , полученного из смоделированного набора данных распада $t\bar{t}$ -пары, где ε – эффективность отбора событий, а $D \equiv 2p_{pair} - 1$. В дальнейший анализ отбирались события, у которых минимальное значение $\chi^2 < 9$, за счет этого эффективность отбора событий составила $53,2 \pm 0,1\%$, а чистота присвоения $p_{pair} = 83,3 \pm 0,1\%$ (приведены только статистические погрешности).

4.3 Определение заряда b -струи

Для того, чтобы определить заряд струи от b -кварков использовался алгоритм JetQ. Для анализа отбирались события, имеющие треки в кремниевом вершинном детекторе, с прицельным параметром меньше, чем 0,15 см от первичной вершины и поперечным импульсом больше, чем 1,5 ГэВ/с в конусе $\Delta R < 0,4$ вокруг оси b -струи. При этом в конусе должны присутствовать по крайней мере два таких трека. Заряд от треков суммировался с учетом весов, которые зависят от компоненты импульса вдоль оси струи:

$$JetQ = \frac{\sum (\vec{p}_{track} \cdot \vec{p}_{jet})^{0,5} Q_{track}}{\sum (\vec{p}_{track} \cdot \vec{p}_{jet})^{0,5}}, \quad (8)$$

где $\vec{p}_{jet}(\vec{p}_{track})$ – вектор импульса струи (трека) и Q_{track} – заряд частицы, связанной с этим треком.

Требования к трекам и значение показателя степени были выбраны в результате оптимизации алгоритма JetQ на смоделированных данных распада $t\bar{t}$ -пары. Если значение параметра JetQ было положительным, то струя приписывалась $\bar{b}$ -кварку, при отрицательном значении – b -кварку. С помощью Монте Карло моделирования выяснилось, что алгоритм имеет эффективность отбора $97,9 \pm 0,1\%$ при вероятности определения правильного заряда b -струи (чистоте JetQ-алгоритма) $60,8 \pm 0,1\%$.

4.4 Фоновые процессы

В дальнейшем описании под понятием «сигнал» или «сигнальное событие» понимаются как события от распада $t\bar{t}$ -пары в рамках СМ, так и события с экзотическими кварками с массой $172,5 \text{ ГэВ}/c^2$, для которых применялось Монте Карло моделирование. Основной вклад в фоновые процессы дают процессы с W -бозоном и несколькими струями. Такие события попадали в «сигнальный» набор, если две струи были b -струями ($W+HF$), либо, когда струи из легких кварков ошибочно опознавались как b -струи (mistag).

В фоновые процессы также входят многоструйные события, в которых одна струя ошибочно опознавалась как лептон, а две другие были b -струями, либо те, которые неправильно идентифицировались как b -струи (QCD fake); события с одиночным рождением t -кварка (single top) и двухбозонные события (diboson). Из-за требования идентификации по крайней мере двух струй как b -струи, уровень фона был относительно небольшой и составлял $\approx 15\%$. Для оценки вклада фоновых процессов использовался такой же метод как при измерении сечения рождения пары $t\bar{t}$ -кварков в лептон-струйном канале, изложенный в [50]. Результаты приведены в таблице 9: эффективность χ^2 и JetQ-алгоритма для различных фоновых процессов показана в 3 и 4 столбцах, при этом количество кварков-кандидатов (столбец 5) увеличено вдвое, т.к. каждое отобранное событие содержит две пары W - b струя (SM- или ХМ-кандидат).

Таблица 9: Ожидаемое количество кварков-кандидатов для различных фоновых процессов

Процесс	N_{bef}	Эффективность применения χ^2	Эффективность JetQ-отбора	N_{aft}
W+HF	66±22	0,152±0,004	0,970±0,003	19,5±6,4
QCD fake	18±14	0,17±0,08	0,88±0,12	5,4±4,8
Diboson	4,7±0,7	0,22±0,02	0,97±0,01	2,0±0,4
Mistag	9,7±2,6	0,15±0,02	0,96±0,02	2,8±0,8
Single top	10,6±1,3	0,23±0,004	0,972±0,003	4,4±0,5
N_{bgd}	109±26	не опр.	не опр.	34±8
N_{sgn}	670±110	0,532 $^{+0,001}_{-0,005}$ (стат.) (сист.)	0,979 $^{+0,0}_{-0,002}$ (стат.) (сист.)	700±120

N_{bef} - количество событий до применения критериев,

N_{aft} – количество кварков-кандидатов после применения критериев,

N_{bgd} – полное число фоновых событий,

N_{sgn} – полное число сигнальных событий

В наборах данных для фоновых процессов необходимо было выяснить наличие корреляции между зарядами лептона и соответствующей b -струи. Эта корреляция определялась как чистота фона $p_b = \frac{N_+}{N_+ + N_-}$, где N_+ – количество W^+b ($W^-\bar{b}$) пар, т.е. SM-кандидатов, а N_- – количество Wb ($W^+\bar{b}$) пар, т.е. ХМ-кандидатов. Если корреляции нет ($N_+ = N_-$), то чистота фона равна 0,5, т.е. фон симметричный. В случае одиночного рождения t -кварка или многоструйных событий можно предполагать асимметрию фона. Как показали расчеты, для всех фоновых процессов связь между зарядом первичного лептона и $JetQ$ значением соответствующей b -струи была около 50%.

4.5 Систематические погрешности

Источниками систематических погрешностей служат погрешности при моделировании геометрического и кинематического аксептансов, эффективности определения вторичных вершин, погрешности шкалы энергии струи, погрешности в оценке фона и светимости. При Монте Карло моделировании геометрического и кинематического аксептансов учитываются эффекты от функций распределения партонов (PDF), глюонного излучения начального и конечного состояний и от шкалы энергий струй (JES).

Погрешность, связанная с функцией распределения партонов, определялась через изменение независимых собственных состояний векторов STEQ6M [51] PDF набора. Параметры, связанные с глюонным излучением в начальном и конечном состояниях, изменялись в пределах $\pm 1\sigma$, соответствующая погрешность рассчитывалась через сравнение результатов с исходными. Аналогично определялась погрешность шкалы энергии струи: ее калибровочные коэффициенты изменялись в пределах $\pm 1\sigma$, после чего энергия струи корректировалась согласно этой новой шкале. Систематическая погрешность оценивалась как половина разности между исходной энергией струи и энергией скорректированной, согласно новой шкале, струи. Еще один источник погрешностей – выбор генератора, в частности модели адронизации, для оценки этой погрешности сравнивались генераторы PYTHIA и HERWIG.

Значения, полученные в результате оценки указанных систематических погрешностей приведены в таблице 10. Полная погрешность рассчитывается как сумма квадратов отдельных погрешностей от разных источников.

Таблица 10: Расчетные значения систематических погрешностей

Источники систематических ошибок	Эффективность χ^2 отбора (%)	Эффективность JetQ-алгоритма (%)	Чистота соотнесения W - b струя (%)	Чистота JetQ (%)
Шкала энергии струи (JES)	0,2	0,004	0,1	0,1
Глюонное излучение в начальном и конечном состояниях	0,5	0,1	0,2	0,2
Генератор Монте Карло	0,2	0,1	0,1	0,7
Масса t -кварка	0,4	0,2	0,9	0,5
PDF	0,7	0,002	0,1	0,02
Итого	1,0	0,3	1,0	0,6

4.6 Определение чистоты сигнала

Расчет чистоты сигнала p_s сложнее, чем расчет чистоты фона, т.к. в случае сигнальных событий необходимо определить чистоту правильного соотнесения пар W - b струя p_{pair} и чистоту определения заряда струй p_{JQ} . Надо было также учесть, что выборка может содержать события с легкими кварками, ошибочно опознанными как b -струи (f_{nb}). Далее необходимо ввести коэффициент SF_{nb} , который приводит в соответствие уровень ошибочного b -мечения между Монте Карло моделированием и измерениями. Этот коэффициент определяется таким же способом, как и при измерениях сечения процесса рождения $t\bar{t}$ -пар [50].

Полная чистота сигнала определяется как комбинация чистоты правильного соотнесения продуктов распада и чистоты JetQ-алгоритма следующим образом:

$$p_s = f_{nb}SF_{nb}p_{nb} + (1 - f_{nb}SF_{nb})[p_{Wb}p_{JQ}SF_{JQ} + (1 - p_{Wb})(1 - p_{JQ}SF_{JQ})] \quad (9)$$

где p_{nb} – вероятность, что сигнальное событие с неправильно определенной b -струей будет правильно расценено как SM- или ХМ-событие, p_{wb} – чистота соотнесения для W и b -струи, а p_{JQ} – чистота определения заряда струи. Эти три чистоты были получены из смоделированных событий. Величина SF_{JQ} – корректировочный коэффициент для приведения в соответствие результатов Монте Карло моделирования для JetQ-алгоритма к данным CDF. В таблице 11 показаны значения указанных выше величин с учетом систематических погрешностей. Окончательные исходные данные для последующего статистического анализа, который будет описан ниже, приведены в таблице 12.

Таблица 11: Данные для определения чистоты сигнала

Параметр	Значение
f_{nb}	$0,079 \pm 0,001$
SF_{nb}	$1,01 \pm 0,03$
p_{nb}	$0,50 \pm 0,01$
p_{wb}	$0,833 \pm 0,001(\text{стат.}) \pm 0,008(\text{сист.})$
p_{JQ}	$0,608 \pm 0,001(\text{стат.}) \pm 0,003(\text{сист.})$
SF_{JQ}	$0,99 \pm 0,01(\text{стат.}) \pm 0,03(\text{сист.})$

Таблица 12: Оценка числа событий-кандидатов N_s , событий для фоновых процессов N_b , для чистоты сигнала p_s и фона p_b с соответствующими погрешностями

Параметр	Значение
N_s	700 ± 120
N_b	34 ± 8
p_s	$0,562 \pm 0,004(\text{стат.}) \pm 0,011(\text{сист.})$
p_b	$0,50 \pm 0,01$

4.7 Статистическая обработка

Сначала необходимо определиться с параметром, который имеет разную функцию плотности вероятности для гипотезы существования экзотического t -кварка (ХМ-гипотеза) и t -кварка из стандартной модели (SM-

гипотеза). В качестве такого параметра была выбрана доля SM-событий f_+ : $f_+ = \frac{N_+}{N_+ + N_-}$. В случае верной SM-гипотезы $f_+ = 1$, в случае верной ХМ-гипотезы $f_+ = 0$. Из-за погрешностей правильного соотнесения пар W - b -струи и расчета заряда струй точного достижения указанных значений не ожидается, но в случае верной SM-гипотезы значение f_+ должно быть близким к 1.

Метод максимального правдоподобия

Основным методом оценки параметров по данным выборки является метод максимального правдоподобия. Основу метода составляет функция правдоподобия, выражающая плотность вероятности совместного появления результатов выборки. Согласно методу максимального правдоподобия, в качестве оценки неизвестного параметра принимается такое значение, которое максимизирует функцию правдоподобия.

Вероятностная модель зависит от k интересующих нас параметров $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k)$ и от дополнительных l фоновых параметров $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_l)$. Если определить функцию плотности вероятности $f(x|\pi, \theta)$, то для выборки из независимых наблюдений $X = (X_1, \dots, X_n)$ функция правдоподобия будет иметь вид [52]

$$L(\pi, \theta|X) = \prod_{i=1}^n f(X_i|\pi, \theta). \quad (10)$$

Для построения доверительного интервала необходимо определить основную H_0 и альтернативную H_1 гипотезы: $H_0: \pi = \pi_0$, $H_1: \pi \neq \pi_0$. Критерием проверки гипотезы служит величина

$$\lambda(\pi_0|X) = \frac{\max\{L(\pi_0, \theta|X); \theta\}}{\max\{L(\pi, \theta|X); \pi, \theta\}}, \quad (11)$$

где максимум знаменателя берется по полному параметрическому пространству, а максимум числителя – только по подпространству $\pi = \pi_0$. Т.к. параметр λ является функцией π_0 и данных выборки, то он не зависит от фоновых параметров θ . Из мат.статистики известно, что распределение $(-2\log \lambda)$ близко к распределению χ^2 с k степенями свободы (k – количество интересующих нас параметров).

При анализе заряда t -кварка используется один интересующий нас параметр $\pi=f_+$ и четыре дополнительных параметра: N_s – количество сигнальных событий-кандидатов, N_b – количество фоновых событий, p_s – ожидаемая чистота сигнала, определяемая (9), p_b – ожидаемая чистота фона. Таким образом, функция правдоподобия содержит 5 членов:

$$L = L_s \cdot L_{N_b} \cdot L_{N_s} \cdot L_{p_s} \cdot L_{p_b}, \quad (12)$$

где L_s – распределение Пуассона для сигнальной части, следующие 4 члена – распределения Гаусса с соответствующими погрешностями для ожидаемых числа сигнальных (L_{N_s}) и фоновых (L_{N_b}) событий, чистоты сигнала (L_{p_s}) и фона (L_{p_b}).

Сомножители уравнения (12) определяются следующим образом. Распределение для сигнальной части описывается уравнением

$$L_s(x^+, x^-) = \frac{\langle N_+ \rangle^{x^+} e^{-\langle N_+ \rangle}}{x^+!} \cdot \frac{\langle N_- \rangle^{x^-} e^{-\langle N_- \rangle}}{x^-!}, \quad (13)$$

где x^+ и x^- количество SM- и ХМ-подобных событий соответственно; $\langle N_+ \rangle$, $\langle N_- \rangle$ – ожидаемые средние значения распределения Пуассона для N_+ и N_- , определяемые выражениями:

$$\langle N_+ \rangle = p_s N_s f_+ + (1 - p_s) N_s (1 - f_+) + p_b N_b \quad (14)$$

$$\langle N_- \rangle = (1 - p_s) N_s f_+ + p_s N_s (1 - f_+) + (1 - p_b) N_b \quad (15)$$

Распределение для ожидаемых фоновых событий определяется как

$$L_{N_b}(y_b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{N_b}} e^{-\frac{(y_b - N_b)^2}{2\sigma_{N_b}^2}}, \quad (16)$$

где N_b и σ_{N_b} – количество фоновых событий и соответствующая погрешность.

Распределение для сигнальных событий определяется уравнением

$$L_{N_s}(y_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{N_s}} e^{-\frac{(y_s - N_s)^2}{2\sigma_{N_s}^2}}, \quad (17)$$

где N_s и σ_{N_s} – количество сигнальных событий и соответствующая погрешность.

Аналогично определяются последние два сомножителя в (12). Член, отвечающий за чистоту сигнала, определяется выражением

$$L_{p_s}(z_{p_s}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{p_s}} e^{-\frac{(z_{p_s}-p_s)^2}{2\sigma_{p_s}^2}}, \quad (18)$$

где p_s и σ_{p_s} – чистота сигнала и ее погрешность, распределение для чистоты фона определяется как

$$L_{p_b}(z_{p_b}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{p_b}} e^{-\frac{(z_{p_b}-p_b)^2}{2\sigma_{p_b}^2}}, \quad (19)$$

где p_b и σ_{p_b} – чистота фона и ее погрешность соответственно. В уравнениях (16-19) $y_b, y_s, z_{p_s}, z_{p_b}$ – соответствующие переменные функции правдоподобия.

Чтобы получить f_+ значение, соответствующее наблюдаемым (x^+, x^-) , необходимо решить систему уравнений правдоподобия, получаемую приравниванием нулю частных производных от функции правдоподобия по каждой переменной. Полученная система нелинейных уравнений аналитически не разрешима, поэтому для процедуры минимизации распределения $(-2\log \lambda)$, где $\lambda = \frac{L(H=SM)}{L(H=XM)}$, использовался MINUIT фит для каждого возможного значения f_+ из интервала $[-1,2]$.

Для тестирования на псевдоэкспериментах необходимо было смоделировать x^+ (x^-) значения. Они выбирались случайным образом согласно распределению Пуассона вокруг среднего $\langle N_+ \rangle$ ($\langle N_- \rangle$). Сами значения для $\langle N_+ \rangle$ и $\langle N_- \rangle$ рассчитывались согласно (14, 15) при фиксированном f_+ . Остальные переменные разыгрывались согласно распределениям Гаусса случайным образом вокруг соответствующих средних. Псевдоэксперимент был повторен 1 млн.раз, в каждом случае было получено значение $\hat{f}_+$, соответствующее минимуму функции правдоподобия.

Проверка статистической гипотезы

Чтобы принять или отвергнуть основную гипотезу H_0 , необходимо ввести статистику критерия X , а также определиться с критической областью для X (областью отклонения нулевой гипотезы). При этом могут быть допущены ошибки двух родов. Ошибка I рода состоит в отвержении верной

основной гипотезы H_0 , ошибка II рода состоит в том, что отвергается альтернативная гипотеза H_1 , которая на самом деле верна. Вероятность ошибки I рода (уровень значимости критерия) определяется как

$$\alpha = \int_{-\infty}^{X_{cut}} f(X|H_0)dX, \quad (20)$$

где $f(X|H_0)$ – распределение, рассчитанное для псевдоэкспериментов в предположении верной СМ-гипотезы, X_{cut} – значение статистики критерия, которое отделяет критическую область от области принятия основной гипотезы. Вероятность ошибки II рода описывается уравнением

$$\beta = \int_{X_{cut}}^{+\infty} f(X|H_1)dX, \quad (21)$$

где $f(X|H_1)$ – распределение, рассчитанное для псевдоэкспериментов в предположении верной ХМ-гипотезы. При этом величину $1-\beta$ (вероятность недопущения ошибки II рода) называют мощностью критерия.

В качестве основной была выбрана гипотеза, что наблюдаемый t -кварк является кварком из СМ с зарядом $+2/3$ (СМ-модель), в качестве альтернативной – наблюдаемый t -кварк является экзотическим с зарядом $-4/3$ (ХМ-модель). В качестве статистики критерия была выбрана величина f_+ , при этом вероятность получения значения этого критерия наиболее близким к наблюдаемому в экспериментальных данных при условии верной основной гипотезы H_0 равна

$$p_{SM} = \int_{-\infty}^{f_+^{data}} f(X|H_0)dX. \quad (22)$$

Эта величина близка по определению к вероятности ошибок I рода (47), но в качестве верхнего предела интегрирования используется измеренная величина f_+ , а не заранее выбранная. Аналогично, вероятность получения значения статистики критерия наиболее близким к наблюдаемому при условии верной альтернативной гипотезы H_1 определяется выражением

$$p_{XM} = \int_{f_+^{data}}^{+\infty} f(X|H_1)dX. \quad (23)$$

При сравнении p_{SM} и p_{XM} с уровнем значимости критерия α , гипотеза отвергается, если $p_{SM(XM)} < \alpha$, в противном случае гипотеза принимается, при этом $1-\alpha$ принимается за уровень достоверности.

При анализе были использованы две величины для уровня значимости критерия, для основной гипотезы α_0 , для альтернативной α_1 : $\alpha_0 = 2,87 \cdot 10^7 / 1,3 \cdot 10^{-3}$ (статистическая значимость $5/3\sigma$) и $\alpha_1 = 0,05$. Таким образом, если при анализе выяснится, что

- 1) $p_{SM} < 1,3 \cdot 10^{-3}$ ($2,87 \cdot 10^{-7}$), то на уровне значимости 3 (5) σ будет подтверждено существование экзотического t -кварка с зарядом $-4/3$;
- 2) $p_{SM} > 1,3 \cdot 10^{-3}$, то нельзя исключить существование t -кварка из СМ;
- 3) $p_{XM} < 0,05$ (0,01), то существование экзотического t -кварка исключено с 95 (99) % уровнем достоверности.

Принимая во внимание все перечисленное, можно сформулировать 4 возможных вывода в зависимости от результатов анализа:

1. XM-модель отклоняется и в то же время SM-модель не отклоняется.
2. SM-модель отклоняется на уровне значимости 3σ или 5σ и в то же время XM-модель не отклоняется (наблюдается новая физика за пределами СМ).
3. Не отклоняется ни SM-, ни XM-модель (в мат.статистике – область непринятия решения).
4. Отклоняются обе модели.

4.9 Результаты измерения заряда t -кварка

Для анализа использовались данные CDF, набранные с марта 2002 г. по февраль 2010 г., набранная статистика составила $5,6 \text{ фб}^{-1}$. Всего наблюдалось 815 событий в лептон-струйной моде, после применения критерия $\chi^2 < 9$ при соотнесении W -бозона с b -струей, а также критериев отбора при определении заряда b -струи, для анализа осталось 774 пары W - b струя, из которых 416 пар были идентифицированы как SM-события, 358 пар как XM-события. Количество SM- (XM-) событий рассчитывалось из условия, что полный

заряд пары лептон- b -струя должен быть отрицательным (положительным) (рис. 38). Полный заряд определяется уравнением

$$Q_{comb} = Q(W) \cdot Q(b_{jet}), \quad (24)$$

где $Q(W)$ – заряд W -бозона (лептона), $Q(b_{jet})$ – заряд соответствующей b -струи.

Используя данные для упомянутых SM- и ХМ-пар и значения четырех параметров (табл. 12), была рассчитана логарифмическая кривая правдоподобия, представленная на рис. 39. На рисунке 40 показаны f_+ распределение для SM- и ХМ-гипотез, полученное из тестирования на псевдоэкспериментах, стрелкой указано наблюдаемое значение f_+ .

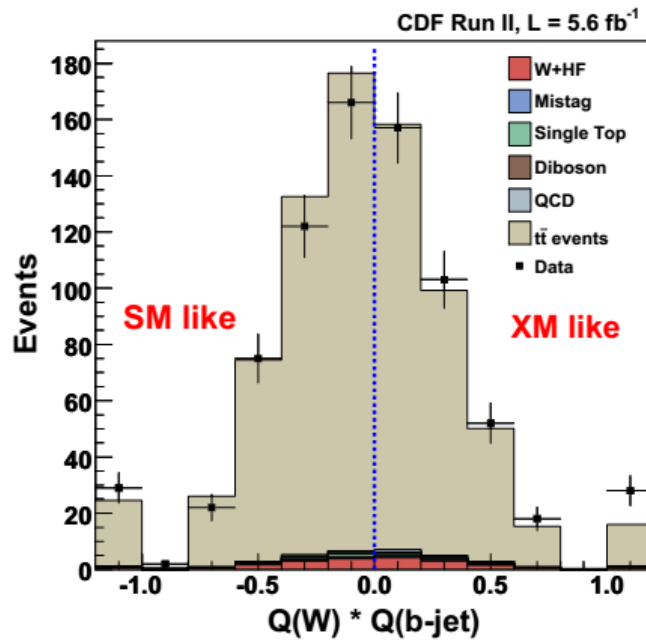


Рис. 38: Полный заряд для W - b пар (заряд W -бозона, умноженный на JetQ значение) в лептон-струйном моде для ожидаемых сигнальных и фоновых событий и данных CDF.

Слева от нуля – SM-события, справа – ХМ-события

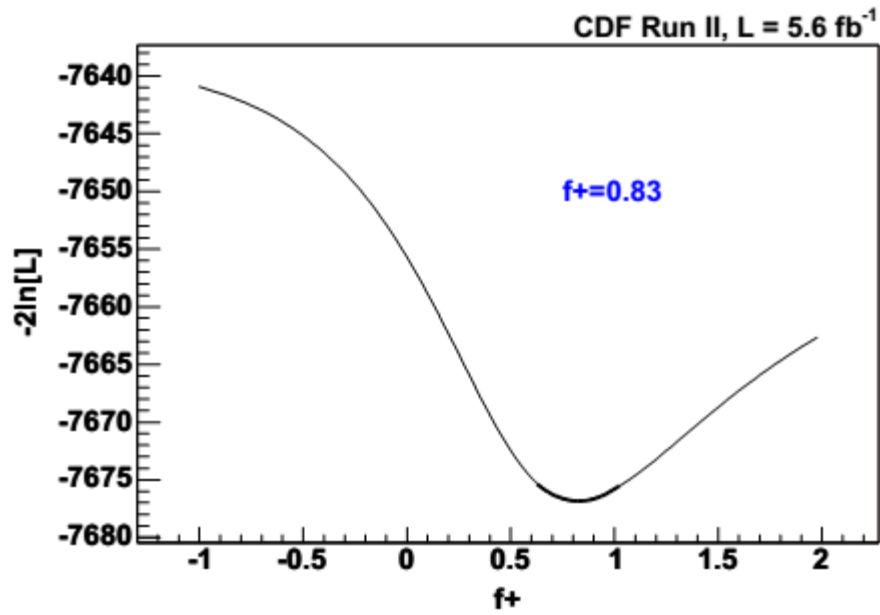


Рис. 39: Распределение $(-2\ln L)$ для данных CDF

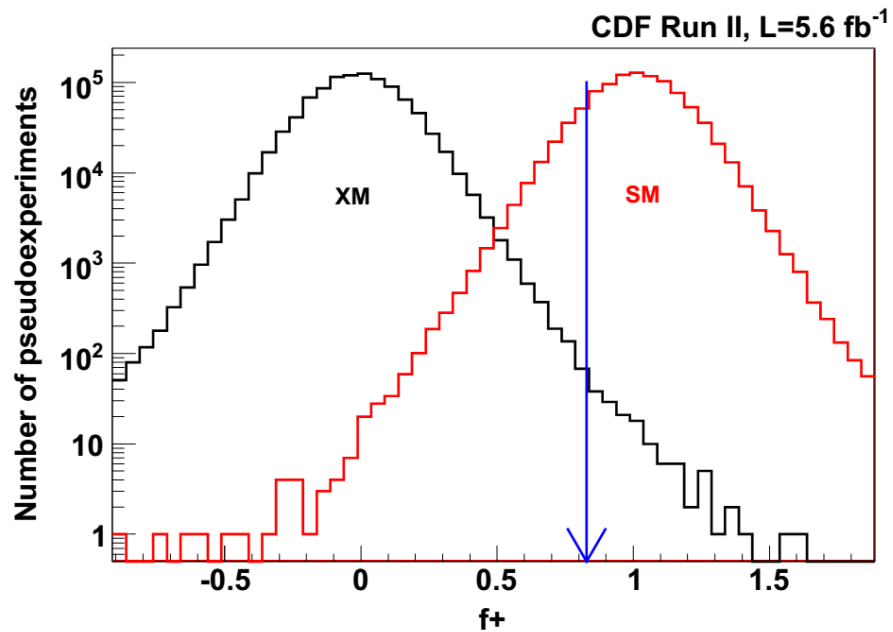


Рис. 40: f_+ распределение для SM- и XM-гипотез, полученное из тестирования на псевдоэкспериментах, стрелкой указано наблюдаемое значение f_+

Минимум распределения достигается при значении $f_+=0,83$, что соответствует $p_{SM}=0,134$ и $p_{XM}=1,4 \cdot 10^{-4}$ (согласно рис. 40). Следовательно, судя по значению p_{SM} , нельзя исключить существование t -кварка из СМ, а по значению p_{XM} существование экзотического t -кварка исключено с 99% уровнем достоверности.

4.10 Выводы

- 1) Проведена статистическая проверка гипотез в анализе данных CDF II по измерению заряда топ-кварка на выборке событий кандидатов $t\bar{t}$ -пары в лептон-струйной моде распада $t\bar{t}$ -пары.
- 2) Измерен заряд t-кварка на статистике $5,6 \text{ фб}^{-1}$. Гипотеза о существовании экзотического кварка четвертого поколения с зарядом $-4/3$ и массой $\approx 170 \text{ ГэВ}/c^2$ отвергнута с 99% уровнем достоверности. Основываясь на методе максимального правдоподобия проверки статистических гипотез можно сказать, заряд t-кварка строго соответствует данным СМ.

Заключение

Основные результаты и выводы

1. Разработана и создана уникальная аппаратно-программная система управления параметрами (высокое напряжение, пороги дискриминации фоновых сигналов) для всей совокупности сцинтилляционных счетчиков мюонной системы установки CDF II, включая старые и новые типы детекторов. Система эффективно отработала во время набора данных с 2009 г. до остановки Тэватрона в 2011 г. и позволила записать одни из самых важных наборов триггеров с мюоном с большим поперечным импульсом.
2. Разработана и внедрена принципиально новая система контроля параметров сцинтилляционных счетчиков установки CDF II на основе пакета iFIX 5.0. Данное программное обеспечение позволило интегрировать статус состояния мюонных счетчиков в глобальную среду мониторинга установки CDF II и предоставить дистанционное управление блоками высокого напряжения и передачи данных. В результате был реализован непрерывный оперативный контроль за мюонной системой CDF II.
3. Впервые, на основе 10-летних измерений, показано, что у сцинтилляционных счетчиков на основе полистирола уменьшение светосбора происходит в 2 раза медленнее по сравнению со счетчиками на основе поливинилтолуола ($\tau = 10,7$ и $\tau = 5,3$ лет соответственно). Сделан вывод и доведена до сведения коллаборации необходимость замены счетчиков на основе поливинилтолуола.
4. Проведена статистическая проверка гипотез в анализе данных CDF II по измерению заряда топ кварка на выборке событий кандидатов пары топ-антитоп в моде «лептон + струи».

5. При участии автора измерен заряд топ кварка на статистике $5,6 \text{ фб}^{-1}$.
Гипотеза о существовании экзотического кварка четвертого поколения с зарядом $-4/3$ и массой $170 \text{ ГэВ}/c^2$ отвергнута на 99 % уровне достоверности.

Литература

- [1] Fermilab 50 Years of Discovery. Tevatron. [online], [Last modified: 08/05/2014] Available on the internet:
<http://www.fnal.gov/pub/tevatron/tevatron-accelerator.html>
- [2] ABE, F. *et al.* CDF collaboration. Observation of top quark production in $p\bar{p}$ collisions. Physical Review Letters, vol. 74, no. 14, p.2626-2631 (1995)
- [3] ABACHI, S. *et al.* D0 collaboration. Observation of the Top Quark. Physical Review Letters, vol. 74, no. 14, p. 2632-2637 (1995)
- [4] The CDF Collaboration. Final combination of the CDF results on top-quark mass. CDF Conference Note 11080 (2014) URL <http://www-cdf.fnal.gov>
- [5] AALTONEN, A. *et al.* CDF Collaboration. Exclusion of exotic top-like quarks with $-4/3$ electric charge using jet-charge tagging in single-lepton $t\bar{t}$ events at CDF. Physical Review D88, 032003 (2013)
- [6] AALTONEN, T. *et al.* CDF Collaboration. Precise measurement of the W-boson mass with the Collider Detector at Fermilab. Physical Review D 89, 072003 (2014)
- [7] AALTONEN, A. *et al.* CDF Collaboration. Search for New Dielectron Resonances and Randall-Sundrum Gravitons at CDF, CDF Note 10405 (2011)
- [8] AALTONEN, A. *et al.* CDF Collaboration. Search for stop decaying into charm + neutralino in the MET+jets sample, CDF Note 9834 (2009)
- [9] AALTONEN, A. *et al.* CDF Collaboration. Search for the Production of Narrow $t\bar{b}$ Resonances in 1.9 fb^{-1} of $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96\text{ TeV}$. Physical Review Letters, vol. 103, no. 4, p 7 (2009)
- [10] AALTONEN, A. *et al.* CDF Collaboration. Search for high mass resonances decaying to muon pairs. CDF Note 10165 (2010)

- [11] AALTONEN, A. *et al.* CDF Collaboration. Search for heavy bottom-like quarks decaying to an electron or muon and jets in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV. Physical Review Letters. Vol. 106, no. 14, p 7 (2011)
- [12] AALTONEN, A. *et al.* CDF Collaboration. Search for top quark pairs with invisible particles, CDF Conference Note 10374 (2011)
- [13] A. Abulencia *et al.* CDF Collaboration. Observation of B_s - B_s^* Oscillations. Physical Review Letters 97 242003 (2006)
- [14] AALTONEN, T. *et al.* CDF Collaboration. Combination of Tevatron Searches for the Standard Model Higgs Boson in the WW Decay Mode. Physical Review Letters. Vol. 104, 061802 (2010)
- [15] The CDF II collaboration. The CDF-II Detector Technical Design Report. FERMILAB-PUB-96-390-E (1996)
- [16] SILL, A. *et al.* CDF Collaboration. CDF Run II silicon tracking projects. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. Vol. 447 (2000)
- [17] AFFOLDER, T. *et al.* CDF Collaboration. COT Central Outer Tracker. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. Vol. 518, no. 1-2, p. 117-120 (2004)
- [18] ALBROW, M. G. *et al.* CDF Collaboration. The CDF plug upgrade electromagnetic calorimeter: test beam results. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. Vol. 480, p. 524-546 (2002)
- [19] DOWNING, R. *et al.* CDF Collaboration. Track Extrapolation and Distribution for the CDF-II Trigger System. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. Vol. 570, p. 36-50 (2007)
- [20] J. Lewis. Trigger Inhibits in Run 2. CDF Note 5621 (2001)

- [21] Пухов О. и др. Автоматизация контроля системы мюонных
сцинтилляционных счетчиков CDF II. Письма в ЭЧАЯ, №5[114] (2002)
Particles and Nuclei Letters, №5[114] (2002)
- [22] Артиков А., Пухов О., Члачидзе Г., Чохели Д. Сцинтилляционные
счетчики мюонной системы установки CDF II. Физика элементарных
частиц и атомного ядра. Т. 39. Вып. 3 (2008)
- [23] Giromini, P. *et al.* The Central Muon Extension Scintillators (CSX).
CDF Note 3898 (1996)
- [24] Artikov A. *et al.* The “Miniskirt” Counter Array at CDF II. Particles and
Nuclear Letters, V.5.P. 25-397 (2002)
- [25] А.В. Симоненко, А.М. Артиков, В.В. Глаголев, Ф.В. Прокошин, Д.
Чохели. Модернизированная система контроля сцинтилляционных
счетчиков мюонного триггера установки CDF II. Письма в ЭЧАЯ. Т.7,
№6(162). С. 686-698 (2010)
- [26] Artikov A. *et al.* Design and Construction of New Central and Forward Muon
Counters for CDF II. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research
Section A 538 P.358-371 (2005)
- [27] Bromberg C. Gain and Threshold Control of Scintillation Counters in the
CDF Muon Upgrade for Run II. Intern. J. Mod. Phys. A. V. 16. 1C. P. 1143-
1146 (2001)
- [28] А.Артиков, П.Бартош, Ю.А.Будагов, В.В.Глаголев, Ф.В.Прокошин,
А.В.Симоненко, И.А.Суслов, И.В.Титкова, С.Токар, Д.Чохели. Участие
ОИЯИ в эксперименте CDF в Фермилаб. Препринт ОИЯИ Р1-2017-76,
принято в журнал ЭЧАЯ (2017)

- [29] A. Artikov , D. Chokheli, G. Pauletta, A. Simonenko. The loss of light yield with time in the CDF II scintillation counters. Nuclear Instruments and Methods A. 672 P.46-51 (2012)
- [30] S. Tokar *et al.*, “Single Photoelectron spectra analysis for the metal dynode photomultiplier”, Acta Phys. Univ. Comeniana, vol. 40, p. 114 (1999)
- [31] E. H. Bellamy *et al.*, “Absolute Calibration and Monitoring of a Spectrometric Channel Using a Photomultiplier”, — NIM A339, 468-476 (1994)
- [32] I. Chirikov-Zorin, I. Fedorko, A. Menzione, M. Pikna, I. Sykora, S. Tokar. Method for precise analysis of the metal package photomultiplier single photoelectron spectra. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A, V 456, Issue 3, p. 310-324 (2001)
- [33] E.H. Bellamy, G. Bellettini, J. Budagov, F. Cervelli, I. Chirikov-Zorin, V. Kovtun, M. Incagli, D. Lucchesi, C. Pagliarone, O. Pukhov, V. Seminozhenko, V. Senchishin, S. Tokar, N. Verezub, I. Zaljubovsky, F. Zetti. Test of long scintillation counters for supercollider detectors. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A, V 343, p.484-488, (1994)
- [34] S Cabrera, D Cauz, D Dreossi, K Ebina, M Iori, M Incagli, G Introzzi, A Menzione, G Pauletta, T Ogawa, A Penzo, L Santi, G Velev, I Vila, K Yoritaet, Making the most of aging scintillator. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A 453, 245-248 (2000)
- [35] D. Chang, W. F. Chang, and E. Ma. Alternative interpretation of the Fermilab Tevatron top events. Phys. Rev. D59, 091503 (1999)
- [36] T. Aatonen *et al.* CDF Collaboration. Search for top quark pairs with invisible particles. CDF Conference Note 10374 (2011)

- [37] T. Aaltonen *et al.* CDF Collaboration. Search for heavy bottom-like quarks decaying to an electron or muon and jets in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV. Phys.Rev.Lett. 106, 14, 7 (2011)
- [38] T. Aaltonen,..., A. Simonenko, *et al.* CDF Collaboration. Exclusion of exotic top-like quarks with $-4/3$ electric charge using jet-charge tagging in single-lepton $t\bar{t}$ events at CDF. Phys.Rev D88, 032003 (2013)
- [39] D.Acosta *et al.* CDF Collaboration. Exclusion of an Exotic Top Quark with $-4/3$ Electric Charge Using Soft Lepton Tagging. Phys.Rev.Lett. 105, 101801 (2010)
- [40] A. Abulencia *et al.* CDF Collaboration. Top quark mass measurement using the template method in the lepton+jets channel at CDF II. Phys. Rev. D73, 032003 (2006)
- [41] R. D. Field and R. P. Feynman. A parametrization of the properties of quark jets. Nucl. Phys. B136, 1 (1978)
- [42] R. Barate et al. ALEPH Collaboration. Determination of A_{FB}^b using jet charge measurements in Z decays. Phys. Lett. B426, 217 (1998)
- [43] D. Acosta *et al.* CDF Collaboration. Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in $\sqrt{s}$ collisions at $\sqrt{s}=1.96$ TeV using lepton+jets events with secondary vertex b-tagging. Phys. Rev. D71, 052003 (2005)
- [44] T. Sjostrand *et al.* High-energy-physics event generation with Pythia 6.1 Comput. Phys. Commun. 135, 238 (2001)
- [45] G. Corcella *et al.* HERWIG 6: an event generator for hadron emission reactions with interfering gluons (including supersymmetric processes). J. High Energy Phys. 01, 010 (2001)

- [46] M.L.Mangano, F.Piccinini, A.D.Polosa, M.Moretti, R.Pittau. ALPGEN, a generator for hard multiparton processes in hadronic collisions. J. High Energy Phys. 07, 001(2003)
- [47] H. L. Lai *et al.* Global QCD Analysis of Parton Structure of the Nucleon: CTEQ5 Parton Distributions. Eur. Phys. J. C12, 375 (2000)
- [48] R. Brun, F. Carminati, CERN Programming Library Long Write up Report No. W5013 (1993)
- [49] G. Grindhammer, M. Rudowicz, S. Peters. The Fast Simulation of Electromagnetic and Hadronic Showers. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A290, 469 (1990)
- [50] A. Abulencia *et al.* CDF Collaboration. Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s}=1.96$ TeV. Phys. Rev. Lett. 97, 082004 (2006)
- [51] J.Pumplin, D.R.Stump, J.Huston, H.L.Lai, P.Nadolsky, W.K.Tung. New Generation of Parton Distributions with Uncertainties from Global QCD Analysis. J. High Energy Phys. 07, 012 (2002)
- [52] W.A. Rolke, A.M. Lopez, J. Conrad. Limits and confidence intervals in the presence of nuisance parameters. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A551, 493 (1990)
- [53] The Collider Detector at Fermilab. [online], [Last updated: 07/17/2015] Available on the internet: <https://www-cdf.fnal.gov>