

На правах рукописи

СИМОНЕНКО

Александр Валерьевич

**СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
МИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ УСТАНОВКИ CDF II ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ТЭВАТРОНЕ**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2018

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем имени В.П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: Глаголев Владимир Викторович,
доктор физико-математических наук,
Лаборатория ядерных проблем,
Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна

Официальные оппоненты: Джилкибаев Рашид Максудович,
доктор физико-математических наук,
Институт ядерных исследований РАН,
Москва, Троицк

Ростовцев Андрей Африканович,
доктор физико-математических наук, профессор
Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича
РАН,
Москва

Ведущая организация: Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
НИЦ «Курчатовский институт»,
Протвино

Защита диссертации состоится «__» _____ 201__ в __ часов на

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Г.А. Карамышева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

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 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 о существовании экзотического кварка четвертого поколения с зарядом $-4/3$ и массой ~ 170 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 долговременное (в течение 10 лет) изучение старения 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 + спектрсмещающее 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/ c^2 . 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 NFP'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», «Nuclear Instruments and Methods in Physics A», «Physical Review D», «ЭЧАЯ».

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели работы, перечислены полученные новые результаты, а также приведена структура диссертации.

В **первой главе** дается описание ускорительного комплекса Фермилаба, коллайдера Тэватрон и установки CDF.

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 Тэватрон. На нем сталкивались пучки протонов и антипротонов с энергией центра масс $\sqrt{S} = 1,96$ ТэВ в точках пересечения, на одной из которых расположена установка CDF (the **Collider Detector at Fermilab**). Для достижения энергии в 980 ГэВ, пучки протонов и антипротонов проходят через последовательность промежуточных ускорителей. Для протонов это: предускоритель Кокфорда– Уолтона (750 КэВ), линак (400 МэВ), бустер (8 ГэВ), главный инжектор (150 ГэВ) и наконец Тэватрон (980 ГэВ). Антипротоны рождаются в «антипротонном источнике» с энергией 8 ГэВ, которые затем накапливаются в рециркулярном кольце. 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. Тэватрон – крупнейший из ускорителей Фермилаба, протяженностью

около 6 километров. Типичная мгновенная светимость в период RUNII (2002-2011 гг.) $2 * 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$.

В эксперименте CDF участвовали более чем 500 ученых из ~60 институтов со всего мира [4]. 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. По окончании RUN I последовала серьезная модернизация детекторов установки CDF. Набор реальных физических данных (RUN II) стартовал в 2002 году и продлился вплоть до сентября 2011 года. В результате была выполнена обширная физическая программа, включающая: изучение свойств тяжелых кварков, изучение электро-слабых взаимодействий, поиск новых явлений за пределами СМ, тесты пертурбативной КХД, изучение физики *B*-мезонов, поиск бозонов Хиггса.

Установка CDF представляет собой детектор общего назначения (рис. 1), спроектированный для изучения физики в рамках Стандартной Модели и за ее пределами. Установка CDF имеет высокоточную систему регистрации треков заряженных частиц, калориметрическую систему высокой сегментации и систему регистрации и идентификации мюонов. Внутри соленоида с индукцией $L = 1,4$ Тл, непосредственно вокруг вакуумной трубы, где происходят столкновения протон-антипротонных пучков, установлен кремниевый вершинный детектор и центральная газовая трековая система, вместе они образуют единую трековую систему. За соленоидом расположена калориметрическая система, с её помощью определяют энергии и координаты электронов, фотонов и адронных струй. Калориметрическая система состоит из набора электромагнитных и адронных калориметров. Далее по периметру расположена мюонная система, которая состоит из сцинтилляционных счётчиков и мюонных дрейфовых камер.

В главе приводится краткое описание всех детектирующих систем, а также системы сбора данных и триггеров. В завершении главы описывается система триггерных запретов, имеющая непосредственное отношение к глобальной системе контроля установки CDF.

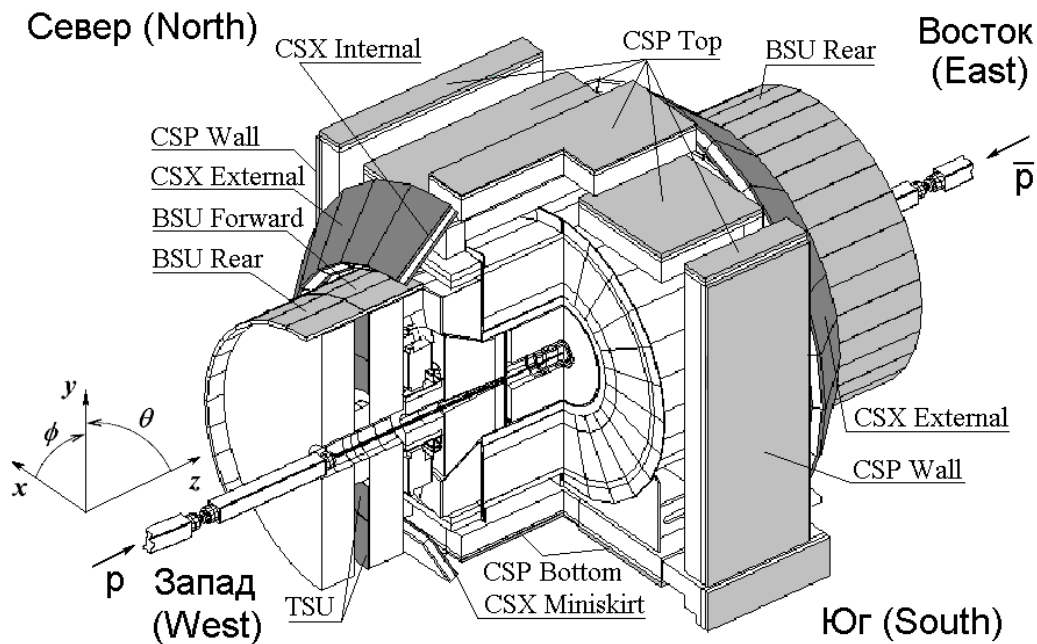


Рис. 1: Расположение сцинтилляционных счетчиков на модернизированной установке CDF II

Во **второй главе** описывается создание системы контроля (СК) сцинтилляционных счетчиков мюонной системы установки CDF II (2007- 2011 гг.) [1, 4].

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 (EMI 9814B) - *счетчиками старого типа*, а детекторы, использующие оптоволоконный съем света и миниатюрные ФЭУ (H5783) – *счетчиками нового типа*.

К мюонным детекторам старого типа относятся: CSP Wall (использующиеся с 1992 г.) – Central Scintillation uPgrade for the Wall, CSX (использующиеся с 1994 г.) – Central Scintillation eXtension и MSK – Miniskirt (использующиеся с 2000 г.) разновидность CSX, выделенных в самостоятельную группу (см. рис. 1). 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». Система контроля над счетчиками старого типа включает аппаратную часть и программное обеспечение. Используются источники высокого напряжения «Gamma Power Supply» (сокращенно «Gamma Vox», 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 блоков-распределителей «Pisa Vox» (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 497 счетчиков.

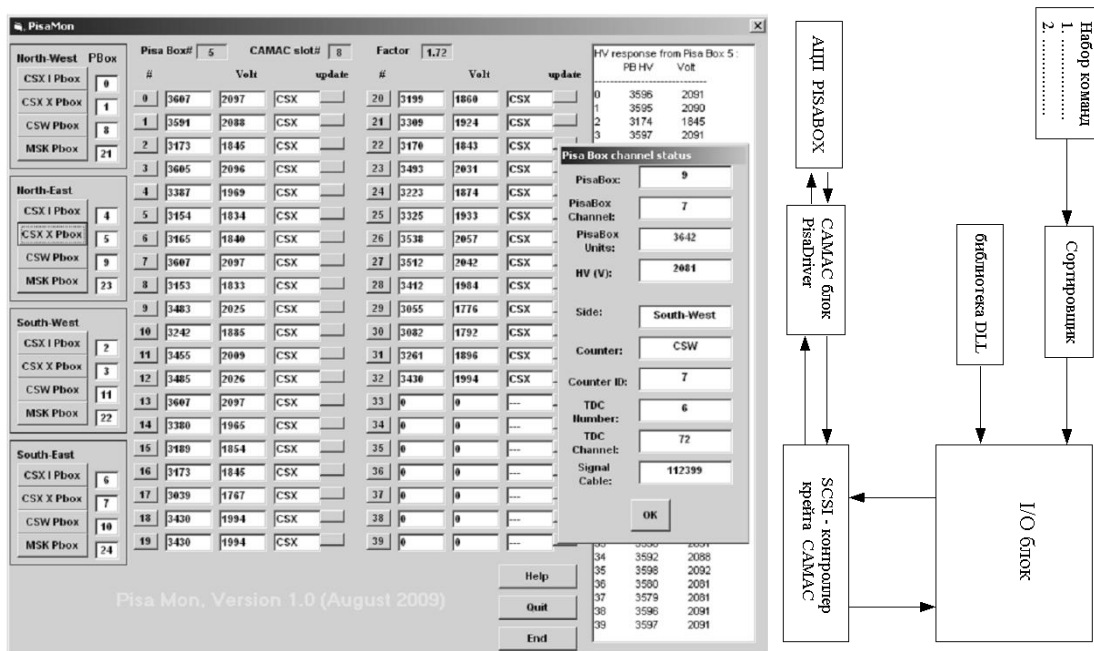


Рис. 2: Программа управления сцинтилляционными детекторами старого типа: интерфейс (слева) и блок-схема кода (справа)

Для дистанционного контроля и настройки высокого напряжения в каналах «Pisa Box» используется специальный интерфейс-коммутатор («Pisa Driver» производства CAEN) стандарта КАМАК, который посредством SCSI-контроллера «Jorway 73A» обеспечивает связь между компьютером и блоком-разветвителем «Pisa Box». Написана программа «Pisa Mon» (рис.2), которая позволяет считывать и изменять выходные напряжения на блоках-распределителях «Pisa Box», а также содержит базу данных по каждому каналу, необходимую при проведении обслуживающих работ [1, 4].

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. Здесь используются фотосенсоры H5783 (фирмы Hamamatsu, Япония) на основе миниатюрных фотоумножителей R5600 с диаметром фотокатода 10 мм. Система питания счетчиков нового поколения принципиально отличается от системы питания счетчиков старого поколения. Для управления фотосенсором, на торце счетчика установлен усилитель-формирователь-дискриминатор (PMT Amplifier and Discriminator, сокращенно PAD). 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 каналному специализированному приемнику-распределителю (Control and Concentrator Units, или CCU) через стандартный разъем RJ-45 с помощью кабелей CAT5. Всего задействовано 20 распределителей-приемников, к которым подключен 701 счетчик. Наличие 4 витых пар позволяет использовать один кабель как для контроля и настройки напряжения, так и для съема информации с канала. Для соединения CCU, расположенных в разных частях установки CDF, с компьютером используется 8 независимых последовательных COM-портов. Кабели, соединяющие блоки CCU с платой-разветвителем COM-портов, имеют гальваническую развязку (посредством применения оптической пары). Напряжение питания блоков CCU (+/- 5, 12 вольт)

постоянно отслеживается системой «Voltman». Для работы с блоками приемниками-распределителями ССУ была написана программа «CCU Monitor Joint Terminal» (рис.3).

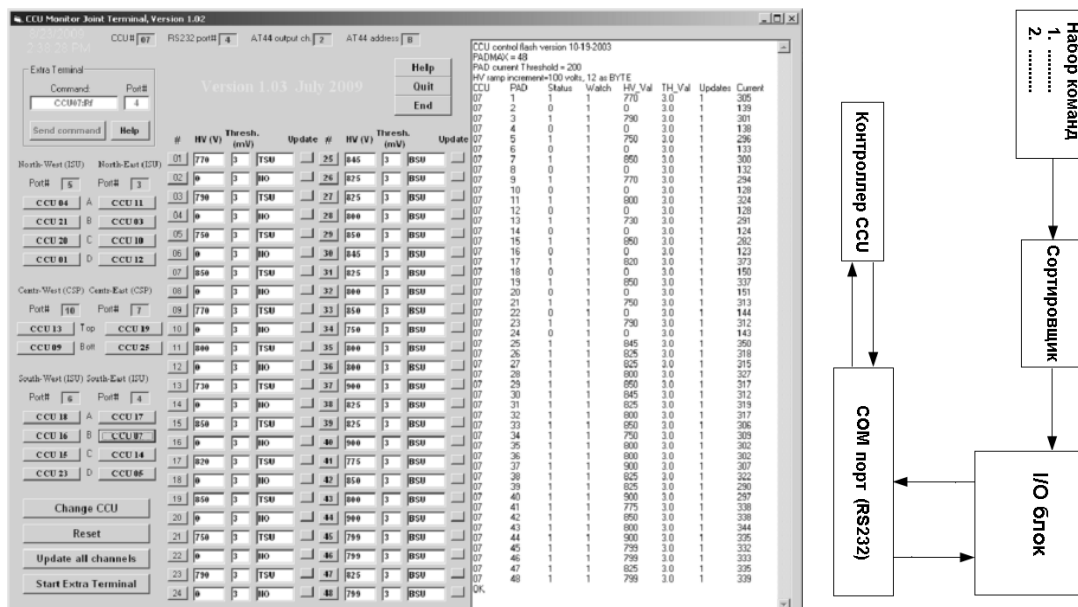


Рис. 3: Программа управления сцинтилляционными детекторами нового типа: интерфейс (слева) и блок-схема кода (справа)

Она, в частности, позволяет считывать значения высокого напряжения на ФЭУ и порог дискриминации выходного сигнала, менять эти значения в каждом канале или всего блока ССУ одновременно. Есть возможность перезагрузки контроллера ССУ без изменения остальных параметров блока, так называемый «soft reset». Необходимость его введения продиктована случаями неполного восстановления низких напряжений питания блоков ССУ из-за действия радиационного фона после цикла отключения-включения электрической сети [1, 4].

К дополнительным аппаратным средствам контроля и управления можно отнести систему «Voltman». Она является источником сигналов в системе триггерных запретов установки CDF II, в частности, отслеживает колебания установленного опорного напряжения источников высокого напряжения «Gamma Vox» и низковольтное питание (+5, +12 вольт) блоков ССУ. В случае выхода за

рамки допустимого интервала значений, на пульте оператора возникает сигнал тревоги. Мониторинг источников «Gamma Vox» является важной составляющей системы контроля мюонных детекторов старого поколения. Мониторинг блоков ССУ также очень важен, так как они – ключевое звено в цепочке СК счетчиков нового поколения. При этом время обнаружения неисправности блоков ССУ сократилось на три порядка, с 30-50 минут ранее до 1 секунды благодаря системе «Voltman».

Для получения достоверных экспериментальных данных, все системы должны функционировать 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 пакета 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 установлен iFIX, являются SCADA-узлами и объединены в единую сеть. Оператор на пульте управления установки CDF II получает всю необходимую информацию и может вовремя заметить изменения каких-либо параметров систем, приводящих к записи недостоверных экспериментальных данных.

Создан комплекс программ в среде iFIX 5.0 (рис.4) для мониторинга напряжения питания системы мюонных счетчиков CDF II и проведена интеграция с программами на пульте управления установкой [1, 4]. Программы постоянно запущены на экспертном терминале и предоставляют информацию о различных параметрах всех подсистем мюонного триггера:

- наличие высокого напряжения,
- счетчик тревог,
- количество доступных для дистанционного мониторинга счетчиков,

- включение в различные триггера,
- отклик системы на запросы главного сервера (т.н. «heart beat» статус),
- максимальные и минимальные отклонения величин напряжения питания от номинальных (табличных),
- контроль низковольтного питания ССУ (12, 5, -12, -5 Вольт),
- статус состояния блоков-распределителей «Pisa Box» (5 уровней) и «ССУ» (4 уровня),
- исключение из процесса мониторинга отдельных частей системы (процедура «Mask»)

С определенной периодичностью запускаются две подпрограммы чтения напряжения на счетчиках старого и нового типов (рис. 4б, 4в). Их задача считывать напряжения и по определенным алгоритмам сравнить с табличными значениями. Результаты сравнения записываются в файлы с расширением ‘.log’, которые содержат информацию по каждому ССУ или Pisa Box и статус высокого напряжения (в процентах) для всей совокупности счетчиков определенного типа. В подпрограмме контроля над счетчиками нового типа (рис.4г) реализована аппаратная функция дистанционного обесточивания счетчиков через отключение соответствующих блоков ССУ (т.н. «hard reset»). Она позволила сократить на 2 порядка время восстановления работы блоков управляющих напряжением на мюонных счетчиках в случае сбоев.

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» с добавлением звукового сопровождения. Появление сигналов тревог на этих панелях автоматически приостанавливает набор физических данных. Оператор на пульте управления предпринимает шаги по устранению неполадок или вызывает экспертов.

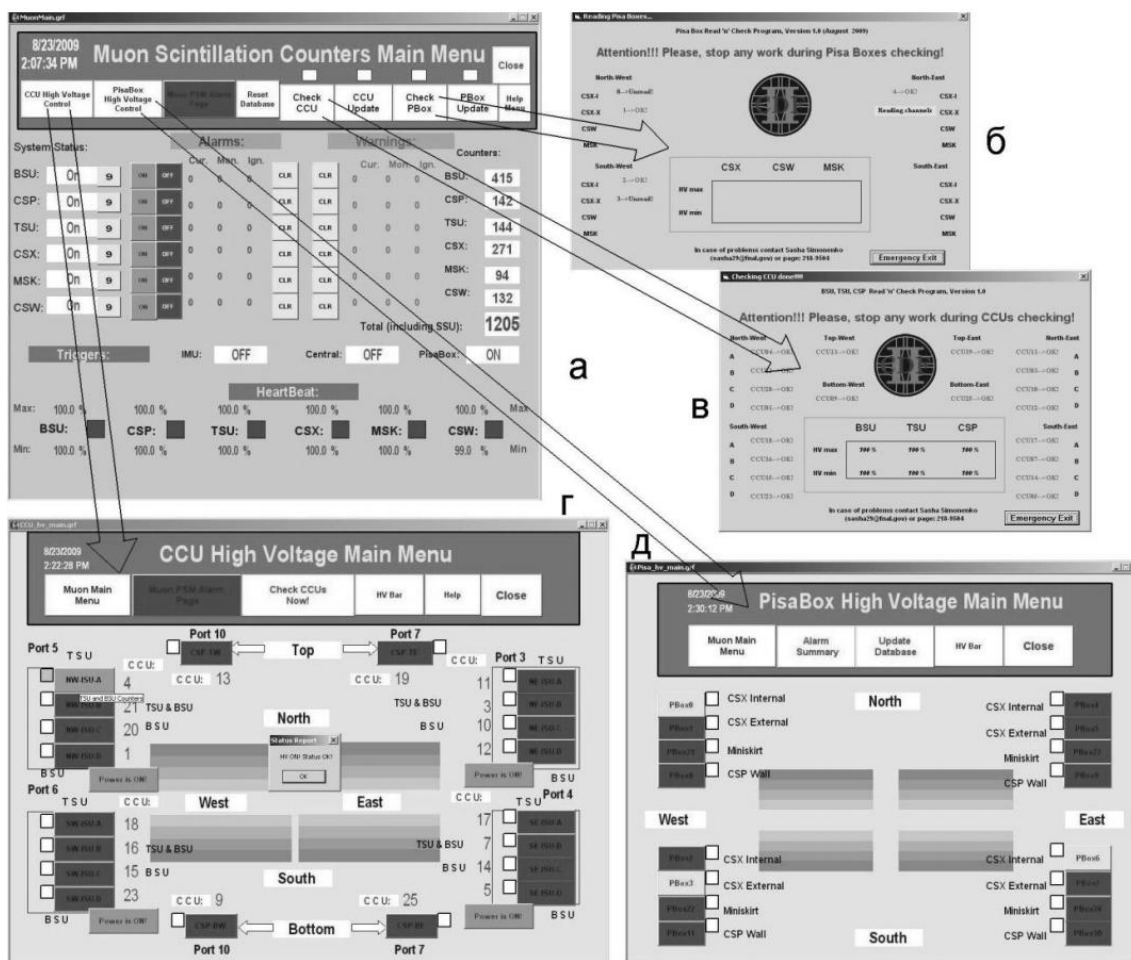


Рис. 4: Интерфейс программ созданных в среде iFIX 5.0 для мониторинга системы мюонных счетчиков CDF II

В результате проведенных работ:

- Создано программное обеспечение для контроля 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- Внедрена система «Voltman» для контроля выходных напряжений высоковольтных источников питания для счетчиков старого типа и низковольтных напряжений питания блоков CCU 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.

В третьей главе описывается методика и результаты исследования старения (уменьшения светосбора) сцинтилляторных счетчиков на протяжении длительного периода времени (до 10 лет по некоторым образцам) с учетом важности мюонного триггера в физической программе установки CDF [2].

Измерения светосбора проводились на стенде, собранном группой ОИЯИ в Фермилабе. Данный экспериментальный стенд настроен на работу со счетчиками старых и новых типов в двух режимах с различными триггерами. Первый режим использовался для получения спектра от космических мюонов. Второй – для калибровки спектрометрического канала. Калибровка проводилась короткими (~10 нс) световыми импульсами от синего светодиода. В спектре полученных

сигналов от ФЭУ определялся усредненный калибровочный параметр \bar{Q}_1 (пик соответствующий одному фотоэлектрону). В дальнейшем для определения световыхода в фотоэлектронах от спектра космических мюонов для конкретного образца мюонного счетчика применялась формула

$$N_{pe} = \frac{\bar{Q} - Q_0}{Q_1} K_{att}$$

где \bar{Q} – средняя амплитуда мюонного спектра, Q_0 - значение пьедестала, K_{att} – коэффициент ослабления (при использовании аттенюатора). Измерение светосбора сцинтилляционных детекторов в числе фотоэлектронов, позволяет определять эффективность детекторов, прогнозировать их долговременную стабильность и сравнивать параметры различных детекторов.

В выборке использовались счетчики из различных подсистем мюонного триггера. Это счетчики нового поколения CSP и BSU (2 и 17 штук соответственно), а также счетчики старого поколения – CSX (16 шт.) и модифицированные CSP Wall (23 шт.). Отличия данных счетчиков друг от друга, помимо размеров, заключались в основе пластика (полистирол (ПС) или поливинилтолуол (ПВТ)), способе светосбора (классический «рыбий хвост» или спектросмещающие волокна) и типе ФЭУ. Отметим, что счетчики CSP и CSP Wall имеют одинаковые размеры пластин, но различаются составом основы (ПС и ПВТ) и используемыми типами ФЭУ. Исследования проводились в периоды длительных остановок Тэватрона, когда исследуемые экземпляры можно было снять с установки CDF для проведения измерений.

Для каждого исследуемого счетчика строился график зависимости светосбора от времени и аппроксимировался экспоненциальной функцией

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

где t - год; τ – постоянная старения счетчика.

Для выборки счётчиков CSP Wall измерение светосбора за период (1999-2009 гг.) показано на рисунке 5. Результаты усредненного светосбора по всем выборкам сцинтилляционных счетчиков мюонного триггера установки CDF, представлены в Таблице 1.

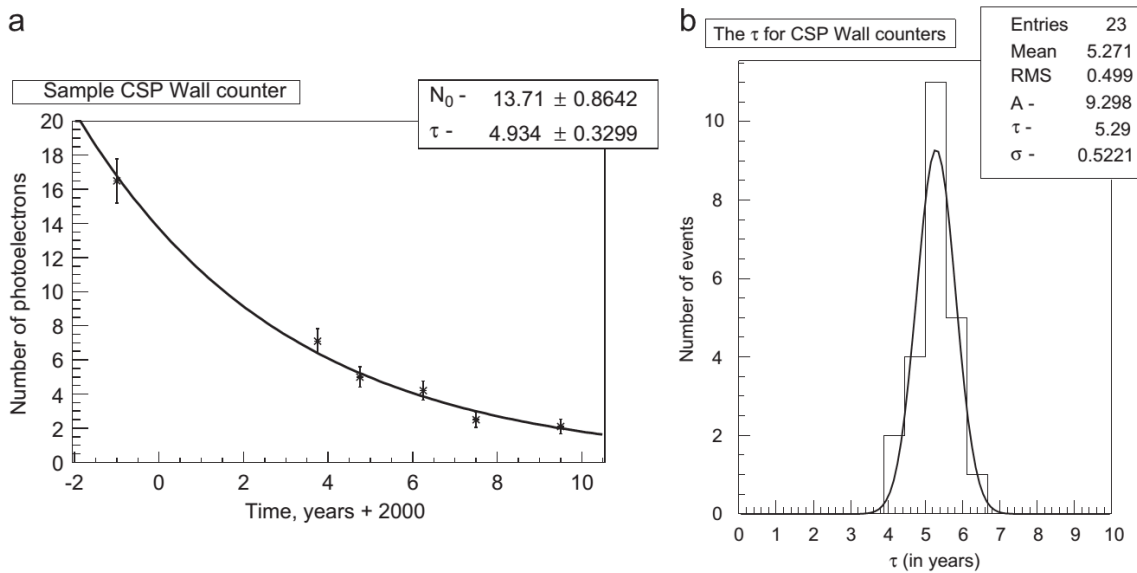


Рис. 5: Нахождение постоянной старения τ для (a) одного счетчика CSP Wall (b) всей выборки счетчиков CSP Wall

Таблица 1: Усредненный светосбор по годам

Год измерений	Усредненное кол-во ф.э. для выборки		
	BSU	CSX	CSP Wall
1999	----	----	14.4 ± 3.8
2000	32.9 ± 4.7	----	----
2003	24.7 ± 3.6	8.1 ± 2.4	5.9 ± 1.6
2004	23.0 ± 3.3	7.3 ± 2.2	4.5 ± 1.3
2006	20.9 ± 3.2	5.9 ± 1.7	3.8 ± 1.3
2007	18.9 ± 3.2	5.2 ± 1.4	2.6 ± 0.9
2009	17.6 ± 3.3	5.0 ± 1.0	2.3 ± 0.8

Итоговые результаты приведены в Таблице 2.

Таблица 2: Основные результаты изучения старения сцинтилляционных счетчиков мюонной системы установки CDF

тип счетчика	основа	метод светосбора	длина м	кол-во счетчиков	средний светосбор в 2009г. (ф.э.)	постоянная старения τ (лет)
BSU	ПС	волокно	1.6	17	17.6 ± 3.3	14.6 ± 2.6
CSX	ПВТ	световод	1.7	16	5.0 ± 1.0	10.0 ± 1.2
CSP Wall	ПВТ	комбин.	3.1	23	2.3 ± 0.8	5.3 ± 0.5
CSP	ПС	волокно	3.1	2	6.6 ± 0.9	10.7 ± 1.1

Были сделаны следующие оценки и прогнозы:

- Эффективность CSP счетчиков не будет опускаться ниже 95% до 2014 года (на тот момент предполагаемого срока завершения эксперимента);
- Эффективность BSU счетчиков будет не хуже 99,9% к 2014 году;
- Средняя эффективность выборки CSX счетчиков на 2009 год равна 95% (усредненный светосбор = 5 ф.э.). Эффективность опустится ниже 93% к 2014 году;
- Средняя эффективность выборки CSP Wall счетчиков на 2009 год равна 85% (усредненный светосбор = 2.3 ф.э.). Эффективность составит не более 70% к 2014 году.

Дополнительно, на двух образцах счетчиков CSP в течение 7 лет (2002-2009 гг.) измерялось значение технической длины ослабления света (technical attenuation length - TAL). Она определяется как длина на которой светосбор уменьшается в e раз [13]. Изучалась зависимость светосбора как функция расстояния от ФЭУ. Результаты аппроксимировались функцией

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

где N_x - сигнал при облучении на расстоянии x от ФЭУ; λ - искомая техническая длина ослабления. Как показали результаты измерений, за весь период наблюдений, величина TAL уменьшилась не более чем на 25%. Это относится ко всей системе «пластиковый сцинтиллятор (ПС) + спектросмещающее волокно (ССВ)». Чтобы определить как деградирует сама основа ПС, в нашем случае, это сцинтиллятор UPS 923A (полистирол с добавками РТР (2%) и смесителя спектра РОРОР (0,03%)), был измерен светосбор с минимального расстояния от ФЭУ, чтобы исключить влияние ССВ. Сравнивая полученные величины ежегодного падения светосбора для ПС (6,6%) и системы ПС+ССВ (8,9%), что соответствует $\tau = 14,6$ и 10,7 лет соответственно, получили соотношение вклада в деградацию системы «пластик/спектросмещающее волокно» ~ 3/1.

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- 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).
- 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» 3/1.
- 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.
- Оценена эффективность работы различных типов сцинтилляционных счетчиков в RUN II. Составлен их план замены.

В четвертой главе описывается процедура проверки гипотезы существования экзотического кварка с массой $\approx 170 \text{ ГэВ}/c^2$ и зарядом $-4/3$ [3].

Проведены измерения электрического заряда топ кварка с целью проверки гипотезы о существовании экзотического кварка четвертого поколения с зарядом $-4/3$ и массой $\approx 170 \text{ ГэВ}/c^2$ (модель Чанга) на статистике $5,6 \text{ фб}^{-1}$, набранной с 2002 по 2010 гг. [3]. Гипотеза о существовании экзотического кварка на CDF может быть подтверждена, если при распаде топ кварка будут обнаружены события, содержащие W -бозон и b -кварк, а при распаде антитоп кварка – W^+ -бозон и \bar{b} -кварк.

Для восстановления заряда топ кварка по продуктам его распада необходимо: определить заряд W -бозона, соотнести b -струю с W -бозоном и определить заряд b -струи. Для анализа были отобраны события лептон-струйной моды распада пары топ-антитоп. 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 [3], основанная на минимизации функционала χ^2 , который включает в себя фиксированные массы топ кварка и W -бозона: $m_t=172,5 \text{ ГэВ}/c^2$, $m_W=80,42 \text{ ГэВ}/c^2$. Этот функционал описывается уравнением

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

В этом уравнении первый член оценивает флуктуацию 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 топ кварков. Параметры σ_W и σ_t представляют собой ширину распада W -бозона ($2,12 \text{ ГэВ}/c^2$) и сумму квадратов теоретической ширины распада t -кварка

(1,5 ГэВ/c²) и экспериментальной ошибки для его массы (0,9 ГэВ/c²). Для анализа отбирались события, у которых минимальное значение χ^2 не превышает 9, за счет этого достигался компромисс между эффективностью отбора событий (53,2±0,1%) и вероятностью правильного присвоения W - b -струи (83,3±0,1%).

Заряды b -струй определялись с помощью специального алгоритма JetQ [3]. События, в которых заряд W -бозона был противоположен значению, полученному для заряда b -струи от распада топ кварка, классифицировались как SM подобные события (SM-событие). Если знаки зарядов W -бозона и b -струи от распада топ кварка совпадали, то такое событие классифицировалось как событие, соответствующее распаду экзотического кварка с зарядом $-4/3$ (XM-событие).

В качестве параметра, имеющего разную функцию плотности вероятности для гипотезы существования экзотического топ кварка (XM-гипотеза) и топ кварка из стандартной модели (SM-гипотеза) была выбрана доля SM-кандидатов f_+ . В случае верной SM-гипотезы $f_+=1$, в случае верной XM-гипотезы $f_+=0$. Из-за погрешностей правильного соотношения пар W - b -струи и расчета заряда струй точного достижения указанных значений не ожидалось, но в случае верной SM-гипотезы значение f_+ должно быть близким к 1.

Функция правдоподобия для оценки параметра f_+ - доли SM-событий, где $f_+=1$ (SM-гипотеза), $f_+=0$ (XM-гипотеза) имеет вид:

$$L = L_S \cdot L_{N_b} \cdot L_{N_s} \cdot L_{p_s} \cdot L_{p_b}$$

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}). Чтобы получить f_+ значение, соответствующее наблюдаемым (x^+ , x^-), где x^+ и x^- количество SM- и XM-подобных событий соответственно, 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 использовался MINUIT фит для каждого возможного значения f_+ из интервала $[-1,2]$.

Для тестирования на псевдоэкспериментах необходимо было смоделировать x^+ (x^-) значения. Псевдоэксперимент был повторен 1 млн.раз, в каждом случае было получено значение \hat{f}_+ , соответствующее минимуму функции правдоподобия. Соответствующие распределения показаны на рис.6 (справа), красным цветом указано распределение, соответствующее верной SM-гипотезе, черным – распределение, соответствующее верной ХМ-гипотезе.

В качестве основной H_0 была выбрана гипотеза, что наблюдаемый топ кварк является кварком из SM с зарядом $+2/3$ (SM-модель), в качестве альтернативной, H_1 – наблюдаемый топ 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 $p_{SM} = \int_{-\infty}^{f_+^{data}} f(X|H_0)dX$. Аналогично, вероятность получения значения статистики критерия наиболее близким к наблюдаемому при условии верной альтернативной гипотезы H_1 определяется выражением $p_{XM} = \int_{f_+^{data}}^{+\infty} f(X|H_1)dX$. 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 топ кварка с зарядом $-4/3$;
- 2) $p_{SM} > 1,3 \cdot 10^{-3}$, то нельзя исключить существование топ кварка из SM;
- 3) $p_{XM} < 5\%$ (1%), то существование экзотического топ кварка исключено с 95% (99%) уровнем достоверности.

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 -струи, из которых 416 пар были идентифицированы как SM-события, 358 пар как ХМ-события. Используя данные для SM- и ХМ-пар и соответствующих параметров, построена логарифмическая кривая правдоподобия, представленная на рис.6 (слева). Минимум распределения ($-2\ln L$) достигается при значении $\hat{f}_+ = 0,83$ (рис.6, справа, синяя стрелка), что соответствует $p_{XM} = 0,00014$. Соответственно, существование экзотического топ кварка исключено с 99% уровнем достоверности.

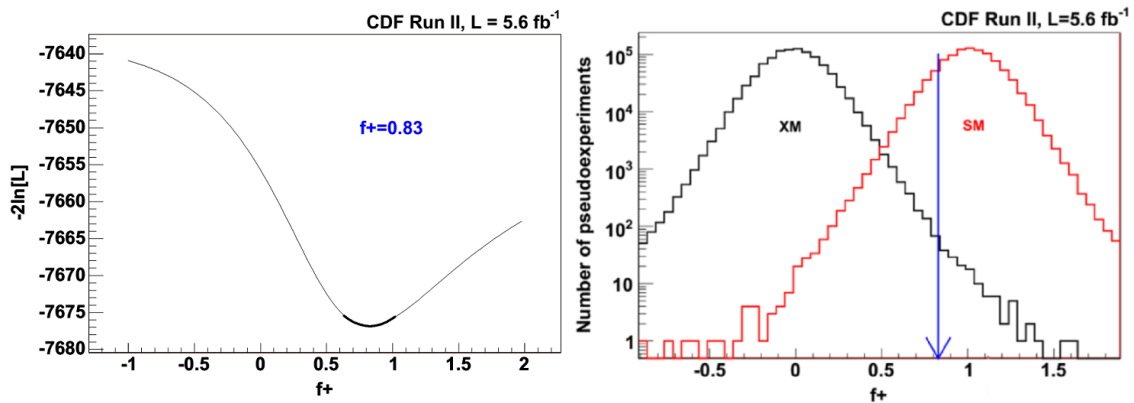


Рис. 6: (слева) распределение ($-2\ln L$) для данных CDF (справа) f_+ распределение для SM- и ХМ-гипотез, полученное из тестирования на псевдоэкспериментах

В **заключении** приводятся основные результаты работы:

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, всего более 1200 штук. 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-анти топ 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.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. 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. (2010) Т.7, №6(162). С. 686-698.
2. A. Artikov , D. Chokheli, G. Pauletta, A. Simonenko. The loss of light yield with time in the CDF II scintillation counters. Nucl. Instr. Meth. A. 672 P.46-51(2012).
3. 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 events at CDF. Physical Review D88, 032003 (2013).

Препринты:

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.