

На правах рукописи

ЧОХЕЛИ Давид

**СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ
УСТАНОВКИ CDF II В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
ПО ФИЗИКЕ ТЯЖЁЛЫХ КВАРКОВ НА
ТЕВАТРОНЕ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва 2008

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова
Объединённого института ядерных исследований (ЛЯП ОИЯИ).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор
Будагов Юлиан Арамович
(НЭОМАП ЛЯП ОИЯИ)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Савченко Олег Васильевич
(НЭОФ ЛЯП ОИЯИ, г. Дубна)
доктор физико-математических наук
Мерзон Габриель Израилевич
(Физический институт им П.Н. Лебедева
Российской академии наук
(ФИАН), г. Москва)

Ведущая организация:
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
МГУ им. М.В. Ломоносова
(НИИЯФ)

Защита состоится «29» октября 2008 г. в 17 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета Д 212.130.07 в Московском инженерно-
физическом институте (государственном университете) (МИФИ) по адресу:
115409, Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон 3248498.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.
Автореферат разослан «___» сентября 2008 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук
В.В. Дмитриенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В современной физике высоких энергий весьма важное место занимают эксперименты по физике тяжёлых кварков, проверке СМ, поиску новых частиц за пределами СМ и др. Проводимые с участием ОИЯИ исследования на Тэватроне ФНАЛ включают эксперименты такого рода. Их эффективность существенным образом повышена в последние годы, что стало возможным благодаря модернизации в 1996-2000 гг. одного из главных спектрометрических комплексов ФНАЛ – установки «Central Detector Facility» (CDF). Увеличение светимости Тэватрона и акцептанса установки CDF в RUN II (далее – CDF II) обеспечили накопление интегральной светимости, в несколько раз превышающей светимость, набранную в первом сеансе (1992-1995). Таким образом осуществлен переход к статистически обеспеченным экспериментам и, в частности, начато новое направление в физике высоких энергий – физика t -кварков.

Неизменной принципиальной составной частью современных спектрометрических комплексов для экспериментов по физике высоких энергий являются сцинтилляционные и газовые координатные детекторы, которые часто составляют единый комплекс, где быстродействующий сцинтилляционный детектор используется для однозначного выбора искомого события среди многих других, зарегистрированных трековыми детекторами. Примерами такого комплекса являются детекторы мюонного триггера CDF II, а также сцинтилляционный преконвертор и дрейфовая камера, составляющие единую систему вместе с электромагнитным калориметром и повышающие точность определения параметров ливня.

Диссертация отражает вклад автора в создание: мюонного комплекса установки CDF II, включая изготовление и исследование некоторых важных свойств сцинтилляционных счётчиков; аппаратно-программного комплекса для их оперативного контроля и мониторинга; нового 2600-канального сцинтилляционного преконвертора электромагнитного калориметра.

Цель работы:

- Создание системы сцинтилляционных детекторов мюонного триггера установки CDF II, включающего более 1140 сцинтилляционных

счётчиков разного типа и размера; создание аппаратно-программного комплекса для их оперативного контроля и мониторинга.

- Создание нового, сцинтилляционного, преконвертора электромагнитного калориметра с увеличенной на порядок сегментацией по псевдобыстроте для продолжения набора статистики при возросшей светимости Тэватрона.
- Проведение цикла исследований естественного старения сцинтилляционных счётчиков установки CDF II и прогнозирование их долговременной эффективности.
- Исследование и обоснование возможности использования нового мюонного триггера L1 в области $1.0 \leq |\eta| \leq 1.25$ путём включения в него сигналов с дополнительного слоя мюонных сцинтилляционных детекторов.

Научная новизна:

- Создание нового мюонного триггера установки CDF путём включения в его состав системы крупногабаритных сцинтилляционных счётчиков нового поколения со светосбором спектросмещающими волокнами. Ранее подобная методика в практике экспериментов по физике высоких энергий применялась только в калориметрии.
- Цикл исследований старения сцинтилляционных счётчиков с разной полимерной основой и разными способами съёма света в радиационных условиях. Для счётчиков нового поколения с оптоволоконным съёмом света впервые: определён вклад спектросмещающих волокон (20%) в старение; найдено, что величина технической длины ослабления¹ света слабо зависит от времени.
- Созданные нами детекторные комплексы обеспечили получение важных новых научных результатов по ряду фундаментальных проблем современной физики высоких энергий. В частности, среди результатов подобного класса, достигнутых с применением созданных детекторов мюонного комплекса CDF, одни из наиболее точных, по времени

¹ Техническая длина ослабления пластмассовой сцинтилляционной пластины определяется как длина, на которой световой сигнал уменьшается в e раз. В нашем случае вместо сцинтиллятора подразумевается система «сцинтиллятор+спектросмещающие волокна».

получения, измерений массы топ-кварка $M_{top}=173,5_{-3,6}^{+3,7}$ (stat.) ГэВ/c² и $M_{top}=170.1$ ГэВ/c² ± 6.0(stat.) ± 4.1(syst.) в т.н. модах “лептон+струи” и “дилептон” соответственно, наиболее точное измерение массы W-бозона $M_W=80413\pm 48$ (stat.) МэВ/c² и др.

Практическая ценность:

- В соответствии с программой повышения энергии и светимости Тэватрона в RUN II существенно модернизирована система сцинтилляционных счётчиков мюонного триггера установки CDF II во ФНАЛ: на 60% увеличен её аксептанс. Это достижение обусловлено созданием нами и включением в состав спектрометрического комплекса CDF II более 650 крупномасштабных сцинтилляционных счётчиков с общей площадью более 300 м², в том числе 608 счётчиков с оптоволоконным съёмом света (изготовленных в ОИЯИ); обеспечением системой управления и контроля более чем 1140 сцинтилляционных счётчиков установки CDF II.
- Для выполнения исследовательской программы CDF II при возросшей светимости Тэватрона (до 2×10^{32} см⁻²с⁻¹ и выше), в которой требуется идентификация электронов и фотонов, создан новый прибор – 2600-канальный годоскопический сцинтилляционный преконвертор с общей площадью более 40 м² с увеличенными на порядок быстродействием и сегментацией по псевдобыстроте в сравнении с ранее существовавшей системой, пригодной для использования при светимости менее 10^{32} см⁻²с⁻¹.
- Проведён цикл исследований и получены ранее отсутствовавшие сведения по старению сцинтилляционных счётчиков установки CDF II: в условиях реального эксперимента и интегрального учёта многих факторов, влияющих на деградацию сцинтилляционной пластины, установлено статистически достоверным способом, что сцинтилляционные счётчики на основе поливинилтолуола стареют в 2 раза быстрее, чем счётчики из полистирола аналогичной геометрии. На основании наших исследований коллаборация имеет мотивированную программу замены теряющих эффективность счётчиков, использующихся на установке CDF с 1992 г. Более того: показано, что изготовленные нами в ОИЯИ полистирольные счётчики нового

поколения могут быть использованы для набора статистики без заметного уменьшения эффективности до 2010 г в условиях Тэватрона.

- Предложен и экспериментально апробирован новый мюонный триггер 1-го уровня в области $1.0 < |\eta| < 1.25$, необходимость в котором возникла в связи с повышением светимости Тэватрона. Этим достигается существенное (более 10%) увеличение количества отбираемых событий с мюонами в качестве сигнатурной (триггерной) частицы.

Автор защищает:

1. Результаты завершённого комплекса разработок и исследований, выполненных с целью создания, внедрения и применения системы сцинтилляционных детекторов в мюонном комплексе и новом преконверторе CDF II в проводимых на Тэватроне ФНАЛ экспериментах по физике высоких энергий (измерению масс t -кварка и W -бозона, и др).
2. Результаты исследования долговременной эффективности мюонных сцинтилляционных счётчиков установки CDF II.
3. Результаты исследования нового мюонного триггера 1-го уровня в области $1.0 < |\eta| < 1.25$ в условиях повышенной светимости Тэватрона.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы докладывались на научно-методических семинарах Лаборатории Ядерных Проблем Объединенного Института Ядерных Исследований (ЛЯП ОИЯИ), регулярных совещаниях мюонной группы CDF, международном симпозиуме по ядерным исследованиям и конференции по медицинским приложениям в Риме (2004 г.): они опубликованы в виде журнальных статей и изданий ФНАЛ и ОИЯИ.

Присуждена первая премия ОИЯИ (2006) за цикл работ по сцинтилляционным детекторам мюонов установки CDF (№3147) и вторая премия ЭЧАЯ по итогам конкурса публикаций в журнале "Письма в ЭЧАЯ" за 2005 год.

В диссертации обобщены результаты работ, выполненных автором в 1999-2006 гг. в ЛЯП ОИЯИ и в Национальной Ускорительной Лаборатории им. Ферми (ФНАЛ).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, в котором приводятся основные результаты.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана важность и актуальность работы, сформулированы её цели, перечислены выносимые на защиту результаты, подчеркнуты их новизна и практическая ценность.

В первой главе приводится общее описание ускорительного комплекса Тэватрон и установки CDF, в создании ряда ключевых узлов которой автор принимал непосредственное участие. Дается программа основных физических исследований на данной установке в рамках RUN II.

Установка CDF является детектором общего назначения и спроектирована для изучения протон-антипротонных столкновений на ускорителе Тэватрон в Фермилабе.

Повышение полной энергии в системе центра масс сталкивающихся частиц с 1.8 ТэВ до 1.96 ТэВ, светимости с $2.5 \times 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ до $3 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (в RUN I и RUN II соответственно), а также дальнейшее усовершенствование детекторов и увеличение акцептанса установки CDF позволили резко увеличить набираемую статистику. В исследовательской программе на установке CDF II можно выделить следующие направления, относящиеся к числу особо значимых проблем современной физики высоких энергий:

- изучение свойств t -кварка, измерение массы t -кварка с высокой точностью;
- измерение массы W -бозона с высокой точностью;
- поиск частиц Хиггса и т.д.

Установка CDF (**рис. 1**) имеет высокоточную систему регистрации заряженных частиц, калориметрическую систему высокой гранулярности и систему детектирования и идентификации мюонов.

Непосредственно вокруг вакуумной камеры, где происходят столкновения протон-антипротонных пучков, размещён кремниевый вершинный детектор, позволяющий весьма точно реконструировать треки с целью поиска в триггерном режиме вторичных вершин от распада короткоживущих частиц с тяжёлыми кварками.

За кремниевым вершинным детектором расположена центральная газовая трековая система, которая позволяет восстанавливать траектории регистрируемых частиц. Она вместе с кремниевыми детекторами образует единую трековую систему.

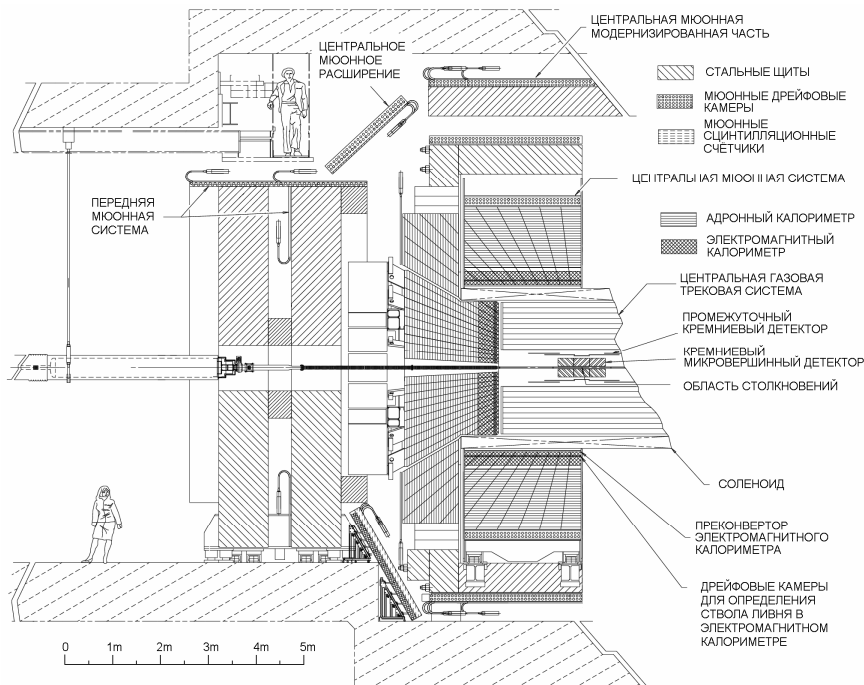


Рис. 1. Установка CDF в разрезе.

Единая трековая система установлена внутри сверхпроводящего соленоидального магнита размерами 1.5 м по радиусу и 4.8 м длиной, который создаёт поле величиной 1.4 Тесла (максимальная величина – 1.5 Тесла) параллельно пучку частиц в полезном объёме радиусом 1.4 м и длиной 3.5 м.

За соленоидом расположена калориметрическая система. С её помощью определяют энергии и координаты электронов, фотонов, адронов, а также струй. Калориметрическая система состоит из отдельных электромагнитных и адронных калориметров.

Мюонная система является принципиально важной частью установки CDF II и состоит из сцинтилляционных счётчиков и дрейфовых камер. Она условно делится на несколько основных частей. Центральная мюонная система состоит из дрейфовых камер, расположенных по окружности за центральными калориметрическими клиньями. Передняя мюонная система состоит из пар железных тороидов, прослоенных дрейфовыми камерами и сцинтилляционными счётчиками. Центральная мюонная модернизированная часть состоит из дрейфовых камер с расположенными за ними сцинтилляционными счётчиками большой длины. Так называемое «центральное мюонное расширение» добавлено для увеличения геометрической эффективности детектирования мюонов.

Система сбора данных установки CDF II способна принимать входящую информацию от детекторов с частотой до 1.7 МГц. Трёхуровневая система триггеров позволяет снизить конечную частоту записи на постоянный носитель до 50 Гц.

Специальное разработанное программное обеспечение осуществляет мониторинг и контроль детекторов установки в режиме реального времени при наборе данных на Тэватроне.

Во второй главе описывается система мюонных сцинтилляционных счётчиков установки CDF, а также организация сбора данных, управление параметрами, оперативный контроль и мониторинг сцинтилляционных счётчиков. Приводится ряд существенных физических результатов, достигнутых с участием мюонного триггера.

Мюонный комплекс (МК) играет принципиальную роль на установке CDF II. Сцинтилляционные счётчики и дрейфовые камеры МК используются при формировании триггеров и в “off-line” анализе при отборе и исследовании широкого круга протон-антипротонных взаимодействий, где, по условиям эксперимента, ожидается рождение мюона.

Мюонная система установки CDF II включает сцинтилляционные счётчики и дрейфовые камеры.

Мюонные сцинтилляционные счётчики покрывают область псевдобыстрот $0 < |\eta| < 1.5$ и сгруппированы в следующие основные подсистемы (**рис. 2**):

- Модернизированный Центральный Мюонный Сцинтилляционный Детектор –счётчики CSP² в интервале $0 \leq |\eta| \leq 0.6$;
- Расширение Центрального Мюонного Сцинтилляционного Детектора – счётчики CSX³ и счётчики CSX «miniskirt» (MSK) в интервале $0.6 \leq |\eta| \leq 1.0$;
- Сцинтилляционные счётчики Передней Мюонной Системы IMU⁴: счётчики BSU, облегающие тороиды, и счётчики TSU внутри тороидов в интервале $1.0 \leq |\eta| \leq 1.5$.

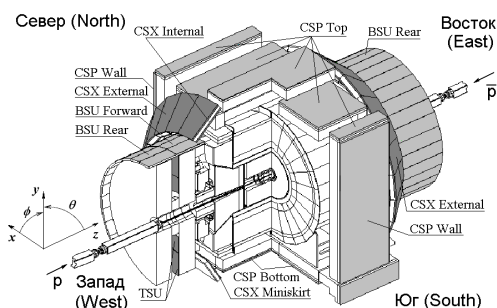


Рис. 2. Система мюонных сцинтилляционных счётчиков установки CDF II.

Общее количество мюонных сцинтилляционных счётчиков на CDF II превосходит 1140 штук. Используются счётчики разных типов со съёмом света: с помощью плексигласового световода (т. н. «старые» счётчики), с помощью спектросмещающих волокон (т. н. счётчики нового поколения) и совмещающие оба указанных способа (т. н. «модернизированные»). Мюонные сцинтилляционные счётчики CDF II разделяются на два вида по типу используемых фотоумножителей (ФЭУ): счётчики со съёмом света плексигласовым световодом и большим ФЭУ; счётчики со съёмом света спектросмещающими волокнами и фотосенсором на основе миниатюрных ФЭУ.

Счётчики со съёмом света при помощи плексигласового световода и ФЭУ с диаметром фотокатода 51 мм – EMI 9814B (производства Electron Tubes Inc., Великобритания) – это все счётчики CSX, MSK и CSP Wall.

Их питание осуществляется от высоковольтных источников⁵ через разветвители «Pisa Box»⁶.

² CSP – Central Scintillator upgrade.

³ CSX – Central Scintillator extension.

⁴ IMU – Intermediate Muon Upgrade, BSU – Barrel Scintillator Upgrade, TSU – Toroid Scintillator Upgrade.

В RUN II нами введена в состав CDF отсутствовавшая в RUN I система настройки и контроля разветвителя высокого напряжения «Pisa Box», позволившая сократить время настройки напряжения до нескольких секунд на канал, тем самым в десятки раз уменьшив время настройки и контроля высокого напряжения группы старых сцинтилляционных счётчиков в сравнении с ручным способом управления, практиковавшимся в RUN I. Для этого использован специальный интерфейс-коммутатор (т. н. «Pisa Driver» производства CAEN) стандарта KAMAK, который посредством SCSI-контролера Jorway Model 73A обеспечивал связь между компьютером и разветвителем (рис. 3, 4).

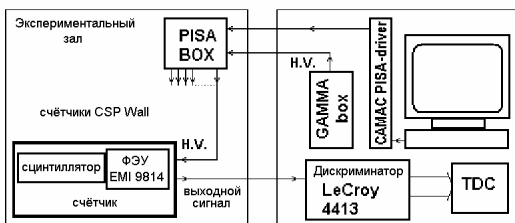


Рис. 3. Схема подачи высокого напряжения и система считывания для сцинтилляционных счётчиков CSP Wall с классическим ФЭУ.

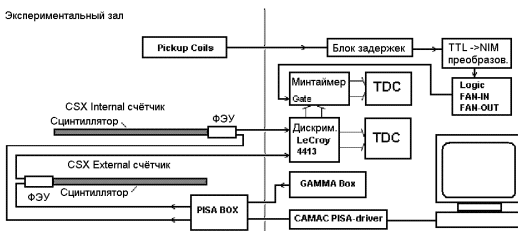


Рис. 4. Схема подключения счётчиков CSX и связанных с ними минтаймеров, задействованная на установке CDF II.

В созданных нами сцинтилляционных счётчиках нового поколения (CSP Top и Bottom, BSU, TSU⁷) светосбор производится спектросмещающими волокнами и фотосенсором H5783 на основе миниатюрного ФЭУ R5600 (фирмы Hamamatsu).

⁵ Gamma Power Supply обеспечивает до 3000 В выходного напряжения при силе тока до 75 мА (производство Gamma High Voltage Research Inc., США).

⁶ «Pisa Box» (производства CAEN, Италия) может одновременно снабжать высоким напряжением до 40 ФЭУ с максимальным выходным током до 2 мА/канал и с точностью фиксации значения выходного напряжения лучше 0.1%.

⁷ Счётчики TSU были изготовлены нашими коллегами в университете штата Мичиган (США).

Для управления фотосенсором H5783 прямо на счётчик установлен предусилитель-формирователь – PAD⁸ (рис. 5). Он позволяет управлять высоким напряжением на ФЭУ, а также усиливать и отбирать по регулируемому порогу информацию от ФЭУ. Далее для организации ранее отсутствовавшего централизованного управления и съёма информации каждый счётчик подключили к специализированному распределителю-приёмнику (CCU⁹), управление которым производится через стандартный СОМ–порт. Всего задействовано 20 таких распределителей-приёмников, которые обслуживают до 700 сцинтилляционных счётчиков.

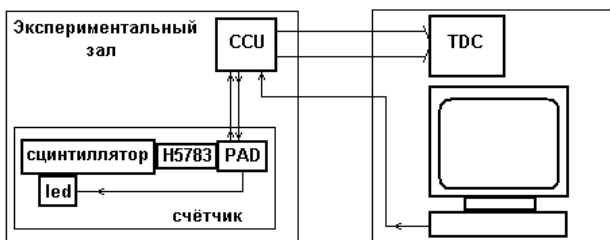


Рис. 5. Схема подачи высокого напряжения и система считывания для сцинтилляционных счётчиков со съёмом света при помощи спектросмещающих волокон и фотосенсоров на основе миниатюрных ФЭУ.

В числе существенных результатов выполненных при активном участии автора новых разработок, в данной главе указываются следующие:

- Программа «MuonMonitor», разработанная и созданная на основе программного пакета Visual C++ и Visual Basic от фирмы Microsoft, сделала возможным управление работой всех CCU и Pisa Vox устройств. Создана ранее отсутствовавшая электронная база данных по основным параметрам сцинтилляционных счётчиков (напряжение плато, пороговое напряжение дискриминации, расположение и индивидуальный номер и т.д.), обращаясь к которой, программа «MuonMonitor» может самостоятельно выставлять заданные высокие напряжения и уровни порогов на дискриминаторах.

⁸ PAD – PMT Amplifier and Discriminator.

⁹ CCU - Control and Concentrator Units. Используя CCU можно подавать напряжение на 48 PADов, одновременно принимая с них информацию в ЭСЛ-стандарте для дальнейшей её обработки и передачи на время-цифровой преобразователь (TDC).

- Созданная на основе программного обеспечения iFIX¹⁰ программа «MuonMain», ранее, до начала наших разработок, отсутствовавшая на CDF, интегрирована в глобальную систему контроля и в режиме реального времени контролирует заданные параметры мюонных сцинтилляционных счётчиков. Каждые 15 минут в течение 30 секунд происходит мониторинг высокого напряжения ≈ 1200 ФЭУ и порогов 551 предусилителя.
- Кроме вышеописанных программных решений применяется встроенная в глобальную систему контроля CDF система оперативного контроля состояния отдельных устройств: распределителей-приёмников CCU, источников высокого напряжения, раветвителей Pisa Vox, всех задействованных КАМАК крейтов, базисного компьютера контроля и управления.
- Разработанное программное обеспечение для контроля долговременной стабильности параметров счетчиков позволяет выявлять отдельные либо группу счётчиков с низкой эффективностью. **Рисунок 6** иллюстрирует эффективность счетчиков CSP Wall, полученную сравнением количества срабатываний счетчиков и треков, проведенных в соответствующих дрейфовых камерах SMP/CMU. В случае наблюдения низкой эффективности счетчиков определяются причины неисправностей и устраняются.

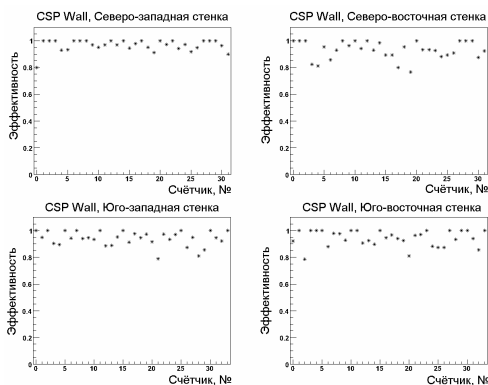


Рис. 6. Эффективности счётчиков CSP Wall.

Для оперативного контроля стабильной работы сцинтилляционных счетчиков мы используем постоянно (в течение сеанса набора данных) набираемые двумерные гистограммы, изображающие количество срабатываний счетчиков на запуски глобального триггера установки CDF. Как правило, изменение привычного (стабильного) образа

¹⁰ iFix – лицензионный пакет программ фирмы «Intellution»

гистограммы означает неисправность в счетчике или устройствах, связанных с ним.

Вышеописанные меры обеспечили поддержание стабильной эффективной работы сцинтилляционных счетчиков мюонной системы CDF II в длительных сеансах набора физических данных.

Созданный аппаратно-программный комплекс сбора данных, управления некоторыми параметрами, оперативного контроля и мониторингования более 1140 сцинтилляционных детекторов обеспечивает эффективное функционирование сцинтилляционных счётчиков мюонного триггера CDF II при наборе физических данных в проводимом ныне на Тэватроне сеансе RUN II и внес важную лепту в получение важных новых результатов принципиального научного значения по физике c , b , t – кварков, $B_S^0 - \bar{B}_S^0$ - смешиванию, проверке CM и т.д. В частности, среди результатов подобного класса, достигнутых с применением созданных детекторов мюонного комплекса CDF, одни из наиболее точных измерений массы топ-кварка $M_{top}=173,5_{-3,6}^{+3,7}$ (stat.) ГэВ/ c^2 и $M_{top}=170.1 \text{ ГэВ}/c^2 \pm 6.0(\text{stat.}) \pm 4.1(\text{syst.})$ в т.н. модах “лептон+струн” и “дилептон” соответственно, наиболее точное измерение массы W-бозона $M_W = 80413 \pm 48$ (stat.) МэВ/ c^2 и др. В получении этих результатов определяющую роль играла высокая эффективность регистрации электронов (до 96 %) и мюонов (до 90 %).

В третьей главе описывается принцип работы, технология сборки, а также исследование основных параметров более 600 изготовленных в ОИЯИ¹¹ сцинтилляционных счётчиков нового поколения – с техникой сбора света спектросмещающими волокнами на основе украинского сцинтиллятора UPS 923A, впервые примененных в коллайдерных экспериментах, и 60 изготовленных во ФНАЛ мюонных сцинтилляционных счётчиков с классическим методом сбора света плексигласовыми световодами на основе широко известного промышленного сцинтиллятора NE114. Внедрение в состав установки CDF этих счётчиков радикально, на 60%, увеличило акцептанс мюонного комплекса. Также приведены результаты наших исследований влияния процесса естественного старения

¹¹ Этот комплекс мер осуществлялся группой, руководимой И.Е. Чириковым-Зориным

на светосбор сцинтилляционных счётчиков, что сделало возможным прогнозирование долговременной эффективности их использования в условиях Тэватрона.

Оптоволоконный съём света (**рис. 7**) имеет важные преимущества в сравнении с классическим методом сбора света плексигласовыми световодами:

- меньшие потери света благодаря более короткому пути его распространения в объёме сцинтилляционной пластины;
- меньшая зависимость эффективности от деградации оптических свойств самой сцинтилляционной пластины – большой срок эксплуатации;
- уменьшение нечувствительной зоны – компактность детектора из-за использования миниатюрного ФЭУ.

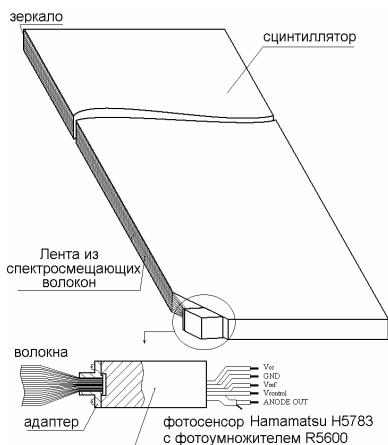


Рис. 7. Схематический вид сцинтилляционных счётчиков со съёмом света оптоволоконной лентой.

Сбор света в сцинтилляционных счётчиках нового поколения происходит следующим образом: часть голубого света, излученного сместителем спектра POPOP, достигая оптоволоконной ленты, поглощается добавкой Y11 (или K27) и изотропно переизлучается в более длинноволновую зеленую область. Использовались многооболочечные спектросмещающие волокна S-типа фирмы KURARAY и фирмы Pol.Ni.Tech, включающие добавки Y11 (250 ppm) и K27 (200 ppm) соответственно.

Переизлучённый свет распространяется по волокнам к ФЭУ и к противоположному от ФЭУ концу (**рис. 7**). Зеркало на дальнем торце волоконной ленты увеличивает на 60% светосбор. Типичная квантовая эффективность фотосенсора H5783 равна $\approx 12\%$ на длине волны излучения сместителя спектра Y11 или K27 (~ 500 нм).

Исследования созданных счётчиков по светосбору нами проводились в ОИЯИ и в Фермилаб на космических мюонах (рис. 8). На рисунке 9 показаны распределения светосбора в фотоэлектронах (ф.е.) для счётчиков BSU и CSP при прохождении космических мюонов через пластину в дальнем от ФЭУ конце счётчиков.



Рис. 8. Блок-схема аппаратуры для измерений светосбора с дальнего от ФЭУ конца счётчика.

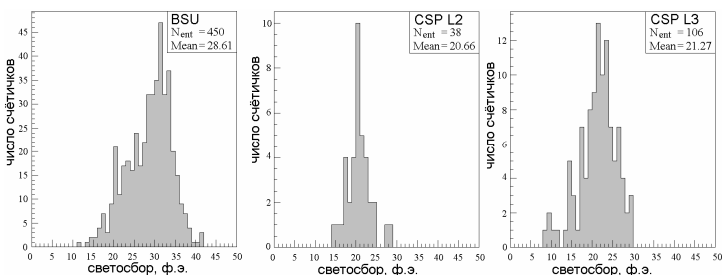


Рис. 9. Светосбор с дальнего от ФЭУ конца для сцинтилляционных счётчиков BSU, CSP L2 и CSP L3 типов, изготовленных в ОИЯИ.

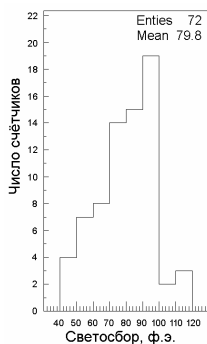


Рис. 10. Светосбор с центра сцинтилляционной пластины для счётчиков MSK.

Для увеличения аксептанса установки CDF II в области псевдобыстрот $0.6 < |\eta| < 1.0$ и азимутального угла $\Delta\varphi=90^\circ$ (от $\varphi_1=225^\circ$ до $\varphi_2=315^\circ$) мы создали, исследовали и включили в состав установки CDF 48 счётчиков MSK со съёмом света световодами с обоих концов (рис. 10).

Таким образом, сумма выполненных работ по созданию новых счётчиков обеспечила достижение существенного результата: аксептанс мюонной системы установки CDF увеличен на 60% (рис. 11).

Проведённое нами исследование процесса естественного старения, то есть измерение уменьшения светосбора сцинтилляционного счётчика со временем, сделало возможным прогнозировать долговременную эффективность их использования. Мюонная система установки CDF включает более 1140 сцинтилляционных счётчиков разного типа. Часть этих счётчиков осталась со времени RUN I, другая часть была создана специально в рамках модернизации установки CDF RUN II.

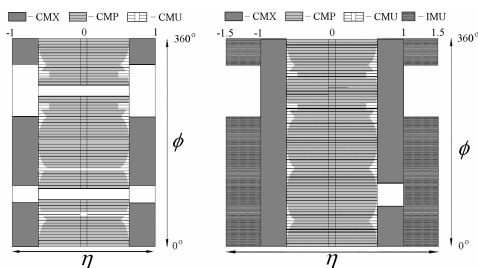


Рис. 11. Акцептанс мюонной системы CDF в Run I – слева и в Run II – справа.

Были выполнены систематические измерения параметров одного и того же набора счётчиков разного типа. Исследовано в общей сложности до 60 счётчиков (см. **Таблицу 1**). Счётчики CSP и BSU, изготовленные в Дубне, представляют собой счётчики нового поколения с оптоволоконным съёмом света, размерами $3200 \times 305 \times 20 \text{ мм}^3$ и $1638 \times 166 \times 15 \text{ мм}^3$ соответственно. Основа сцинтиллятора – полистирол (ПС). Счётчики CSP Wall – это так называемые “модернизированные” счётчики со смешанным способом сбора света, с размерами $3200 \times 320 \times 20 \text{ мм}^3$. Счётчики CSX имеют трапециидальную форму, с размерами $1800 \times (300, 400) \times 25 \text{ мм}^3$, съём света производится классическим способом – с помощью плексигласовых световодов. Основа сцинтиллятора для счётчиков CSP Wall и CSX – поливинилтолуол (ПВТ).

Тип счётчика	Основа	Кол-во	Постоянная старения τ (годы)
CSP Wall	ПВТ	23	4.7 ± 0.3
CSX	ПВТ	17	7.6 ± 1.3
BSU	ПС	17	12.4 ± 1.0
CSP	ПС	2	8.9 ± 0.9

Таблица 1. Основные результаты исследования естественного старения сцинтилляционных счётчиков установки CDF II.

Методом абсолютной калибровки¹² в течение нескольких лет периодически измеряется светосбор с дальнего от ФЭУ конца сцинтиляционной пластины. Далее экспериментальные данные аппроксимируются ординарной экспоненциальной функцией (рис. 12, Таблица 1).

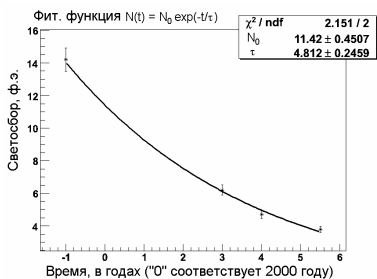


Рис. 12. Световыход с дальнего от ФЭУ конца для одного из счётчиков CSP Wall по годам.

Проведенный цикл исследований позволил получить ранее отсутствовавшие сведения по старению сцинтиляционных счётчиков установки CDF II в условиях реального эксперимента и интегрального учёта многих факторов, влияющих на деградацию сцинтиляционной пластины.

В том числе: а) статистически достоверно установлено, что скорость деградации поливинилтолуольного сцинтиллятора почти вдвое выше, чем у полистирольного сцинтиллятора аналогичной геометрии; б) для полистирольных сцинтиляционных счётчиков нового поколения в системе "сцинтиллятор + оптоволоконно" определяющим является старение пластика (вклад оптоволоконна в уменьшение светосбора с дальнего от ФЭУ конца не превышает 20%); в) техническая длина ослабления для сцинтиляционных счетчиков с оптоволоконным способом съёма света слабо зависит от времени. Центральный вывод наших исследований: определено, что счетчики, изготовленные в ОИЯИ, могут быть использованы для набора статистики без заметного уменьшения эффективности до 2010 года.

В четвёртой главе описывается разработка и создание нового многоканального преконвертора CPR2 электромагнитного калориметра на основе пластического сцинтиллятора, а также разработка и создание прототипов счётчиков для дополнительного слоя мюонных

¹² E. H. Bellamy et al., "Absolute Calibration and Monitoring of a Spectrometric Channel Using a Photomultiplier", — NIM A339 (1994) 468-476.

сцинтилляционных детекторов и исследование их влияния на повышение эффективности подавления фоновых событий в составе нового мюонного триггера.

Преоконвертор электромагнитного калориметра CPR2.

Повышение светимости Тэватрона привело к необходимости замены старого преоконвертора: так, уже с началом RUN II его использование стало проблематичным. Между тем преоконвертор играет весьма значительную роль в разделении частиц и точности измерения их кинематических параметров. Эти качества существенны во многих исследованиях по физике тяжелых кварков, распадов W , Z бозонов и т.д.

Основные причины, обусловившие замену старого преоконвертора, следующие:

- в RUN I старый преоконвертор базировался на относительно медленных проволочных газовых детекторах – пропорциональных камерах и работал при светимости до $1.0 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. С увеличением светимости до $2.0 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и выше такие детекторы работают с трудом или вообще перестают справляться со своей задачей;
- амплитуда импульса сильно уменьшилась из-за деградации сигнальной проволочки;
- необходимость увеличения быстродействия и улучшения энергетического разрешения электромагнитного калориметра требовала большей сегментации преоконвертора по псевдобыстроте η , которая в созданном детекторе выросла почти на порядок.



Рис. 13. Сцинтилляционная пластина (тайл).

В новом преоконверторе детектирующие элементы нами заменены: ими стали тайлы – сцинтилляционные пластины с размерами $125 \times 125 \times 20 \text{ мм}^3$ (рис. 13). Изготовлено, протестировано и отобрано более

3000 тайлов со стабильно высоким световыходом до 36 ф.э. на минимально ионизирующую частицу (МИЧ), а это, в свою очередь, обеспечило регистрацию не менее 12 ф.э./МИЧ (в среднем) после прохождения всего оптоволоконного тракта (до 5 м). Последняя величина превышает более чем

в два раза уровень 5ф.э./МИЧ, минимально необходимый для эффективной регистрации калориметром одиночной частицы¹³.

Нами решена главная задача: массовое и контролируемое по светосбору производство тайлов в Дубне и в Харькове. Изготовление канавки для оптоволокну было последним этапом перед сборкой модуля CPR2 в США.

Для обеспечения надлежащего качества тайлов необходимо было определение светосбора (от МИЧ) для тайла без канавки, соответствующего светосбору не менее 18 ф.э./МИЧ со спектросмещающего оптоволокну, установленного в Ω -образной канавке на поверхности тайла. Была проведена серия контрольных измерений для решения этой задачи.

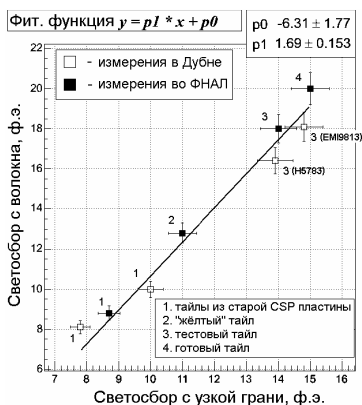


Рис. 14. Корреляция светосбора со спектросмещающего оптоволокну и с узкой грани тайла

тайлов из сцинтилляционных пластин разного качества (**рис. 14**).

Кроме этого, использовался радиоактивный источник $\text{Sr}^{90} + \text{Y}^{90}$, излучение которого коллимировалось в пучок диаметром 1 мм. Облучение производилось перпендикулярно большой поверхности тайла на фиксированных расстояниях от ФЭУ, приставленного к узкой грани пластины, и измерялся анодный ток. Этот метод традиционно используется в

Суть методики, применённой в ОИЯИ, такова. Вначале измерялся светосбор (в ф.э.) с проектируемым методом съёма света при помощи оптоволокну и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). На втором этапе ФЭУ был приставлен непосредственно к одному из узких торцов тайла и определялся светосбор (в ф.э.) с исследуемой пластины. Сравнение полученных величин определило опорный параметр для отбора тайлов. Для проведения исследований было изготовлено несколько прототипов

¹³ R. Blair, et al. "Proposal to replace the Central Preshower Detector and Central Crack Chambers with an integrated scintillator detector (CPR2)", — CDF Note 5519, July 18, 2001.

“Институте Монокристаллов”¹⁴ для определения параметров производимых сцинтилляционных пластин. Были проведены исследования для согласования оценок светосбора, измеренного с использованием радиоактивного источника и методом абсолютной калибровки, с целью выработки опорного параметра для контроля качества тайлов, производимых в Харькове (рис. 15).

Описанные выше методики контроля качества позволили нам в сжатые сроки изготовить более 3000 тайлов с высоким (до 36 ф.э.) светосбором.

Эффективность нового преконвертора CPR2 иллюстрируется ниже.

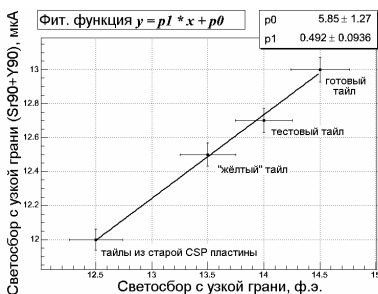


Рис. 15. Корреляция светосбора с узкой грани тайла, измеренного разными способами: методом абсолютной калибровки и с помощью радиоактивного источника, который был установлен в центре тайла.

На рисунке 16 (слева) показано распределение по выделенной в преконверторе энергии для кандидатов на мюоны от распадов W -бозонов, после введения поправок трактов усиления сигналов с тайлов. Для сравнения также показано распределение от частиц с треками с поперечной энергией p_t более 8 ГэВ , которые иногда образуются от взаимодействия продуктов протон-антипротонных столкновений с материалом перед детектором CPR2.

Кроме минимально ионизирующих частиц детектор CPR2 зарегистрировал также большое количество электронов от распадов W -бозонов. На рисунке 16 (справа) показано аналогичное предыдущему распределение для кандидатов на электроны от распадов W -бозонов в сравнении с распределением от частиц с треками с поперечной энергией p_t более 8 ГэВ , которые иногда образуются от взаимодействия продуктов протон-антипротонных столкновений с материалом перед детектором CPR2. Как и ожидалось, в случае возникновения ливня от электрона выделение

¹⁴ Институт сцинтилляционных материалов НКТ «Институт монокристаллов», г. Харьков, Украина.

энергии больше, чем в случае прохождения через преконвертор минимально ионизирующей частицы или случайных частиц.

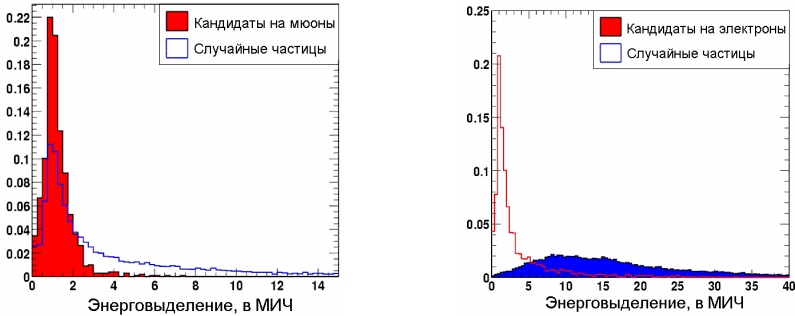


Рис. 16. Распределение по выделенной в преконверторе энергии (в единицах МИЧ) для кандидатов на мюоны от распадов W -бозонов и от случайных треков с поперечной энергией p_t более 8 ГэВ (левый рисунок). То же для кандидатов на электроны от распадов W -бозонов и от случайных частиц с поперечной энергией p_t более 8 ГэВ (правый рисунок).

Таким образом, сохранив достоинства старого преконвертора:

- 2-3 кратное увеличение подавления фона от заряженных пионов, что крайне важно при последующей идентификации электрона для B -jet мечения,
- возможность идентификации одиночных фотонов (на фоне мезонов) в области энергий больше 35 ГэВ ,
- улучшение энергетического разрешения струй, что очень существенно для поиска или экспериментального сужения вероятного интервала масс частиц Хиггса;

новый прековертор обладает принципиально новыми качествами:

- работает при светимости до $3.0 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и выше;
- имеет на порядок более высокую гранулярность по псевдобыстроте;
- имеет на порядок более высокое быстродействие, что очень важно в свете планируемого уменьшения интервала между сгустками с 396 до 132 нс.

Исследование эффективности нового мюонного триггера в области $1.0 \leq |\eta| \leq 1.25$.

Увеличение светимости Тэватрона до величины $2 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и связанное с этим ужесточение требований отбора полезных событий

привели к исключению из списка триггеров, обязательных на установке CDF II, мюонного триггера первого уровня (L1) в области $1.0 \leq |\eta| \leq 1.25$ (потери $\sim 10\%$). Нами предложен вариант восстановления данного триггера путём включения в него сигналов с дополнительного слоя мюонных сцинтилляционных детекторов (рис. 17).

Для оценки ожидаемого эффекта от включения счётчиков SSU в триггер мы обработали данные, отобранные глобальным общим триггером установки CDF на протяжении 3 месяцев сеансов набора с мая по июль 2005 года.

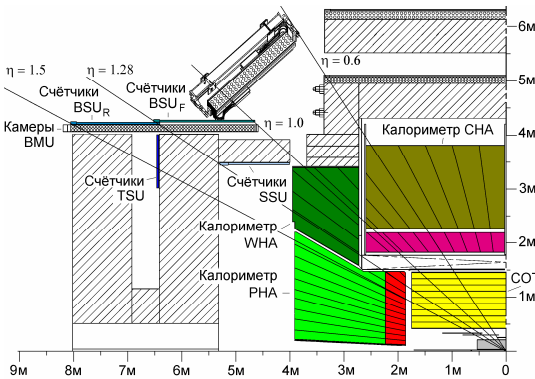


Рис. 17. Расположение детекторов мюонного триггера в области $1.0 \leq |\eta| \leq 1.5$, а также место предполагаемой установки нового слоя сцинтилляционных счётчиков SSU.

На рисунке 18 показаны распределение событий по счётчикам и времён прихода событий, отобранных предложенным триггером. Следует отметить резкое выделение пиков в области 160 нс от начала отсчёта – этот пик для счётчиков SSU приходится на ~ 157 нс (нижний левый рисунок) и для счётчиков BSU приходится на ~ 160 нс (нижний правый рисунок) от начала отсчёта и разница составляет около 3 нс (верхний правый рисунок). Если учесть, что время пролёта от счётчика SSU до счётчика BSU_F для заряжённой частицы, летящей из зоны протон-антипротонных столкновений, должно составлять ~ 3 нс, то можно полагать, что на этот пик приходятся именно мюоны, рождающиеся в искомым событиях в центре установки.

Для сравнения приведём распределение времён приходов событий для счётчиков BSU_F, соответствующих мюонам при исследовании распадов Z-бозонов (рис. 19)¹⁵. Среднее положение пика для счётчиков BSU_F ~ 159 нс,

¹⁵ C.M. Ginsburg et al. “CDF Intermediate Muon Trigger.” – CDF Note 7694. 2005.

то есть совпадает с положением пика на гистограммах при отборе событий предложенным нами триггером. Это подтверждает высокую эффективность нового триггера при отборе мюонов, рождённых в центре установки CDF.

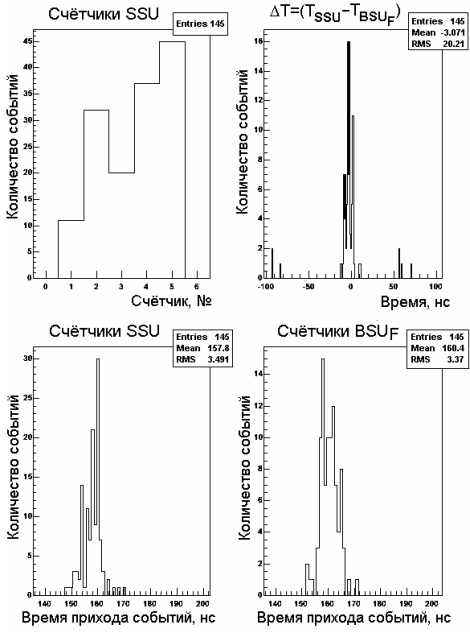


Рис. 18. Распределение событий по счётчикам, а также времён прихода этих событий и разности времён приходов для соответствующих пар счётчиков BSU и SSU при предложенном новом мюонном триггере в области $1.0 \leq |\eta| \leq 1.25$.

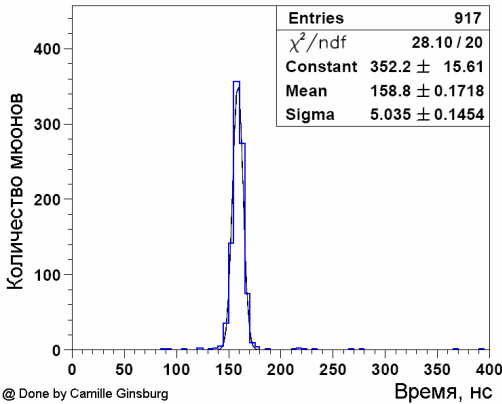


Рис. 19. BSUF счётчики: распределение по времени прихода событий, соответствующих мюонам при исследовании распада $Z \rightarrow 2\mu$.

Более того, проведённый анализ показал: а) идентичность предлагаемого мюонного триггера L1 в области $1.0 \leq |\eta| \leq 1.25$ ныне используемому

мюонному триггеру в области $1.25 \leq |\eta| \leq 1.5$; б) суммарная частота триггера L1 для области $1.0 \leq |\eta| \leq 1.5$ не превышает допустимого на CDF II уровня – 1 кГц.

Полученные нами данные подтвердили целесообразность предлагаемого решения: увеличение акцептанса мюонного триггера уровня L1 возможно путём установки дополнительного слоя сцинтилляционных счётчиков в области $1.0 \leq |\eta| \leq 1.25$.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. При активном участии автора реализован принципиальный раздел программы модернизации установки CDF: значительно, на 60%, увеличен акцептанс мюонного триггера. Это достижение обусловлено: а) созданием более 650 крупномасштабных сцинтилляционных счётчиков с общей площадью более 300 м^2 , в том числе 608 счётчиков со светосбором спектросмещающими волокнами; б) разработкой системы управления и контроля; в) включением нового комплекса в состав действующей аппаратуры установки CDF.
2. Для исполнения исследовательской программы CDF II при возросшей светимости Тэватрона ($2 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и выше), в которой требуется идентификация электронов и фотонов, создан новый прибор – 2600-канальный годоскопический преконвертор из сцинтилляционных пластин $125 \times 125 \times 20 \text{ мм}^2$ общей площадью более 40 м^2 . Быстродействие нового преконвертора и его сегментация по псевдобыстроте на порядок превосходили эти величины в ранее существовавшей системе, пригодной для использования при светимости менее $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.
3. Впервые установлено, что для сцинтилляционных счётчиков нового поколения на основе полистирола: а) старение системы "сцинтиллятор + оптоволокно" определяется деградацией пластика; б) техническая длина ослабления слабо зависит от времени. Данный результат достигнут благодаря исследованиям в 2000 – 2006 гг. параметров сцинтилляционных счётчиков, действующих на установке CDF, позволившим спрогнозировать эволюцию этих параметров и дать коллаборации программу замены теряющих эффективность счётчиков,

эксплуатируемых с 1992 года. Вместе с этим установлено: счетчики ОИЯИ сохранят высокую эффективность до конца сеанса RUN II.

4. Предложен и экспериментально апробирован мюонный триггер в передней ($1.0 < |η| < 1.25$) области CDF. Предыдущая версия этого триггера с февраля 2006 года была исключена из списка обязательных триггеров CDF II вследствие возросшей светимости Тэватрона. Показано, что размещение дополнительного слоя сцинтилляционных счётчиков в указанной области позволит коллаборации увеличить более чем на 10% количество отбираемых событий с мюонами в качестве сигнатурной частицы.
5. Обеспечено стабильное функционирование мюонной системы CDF II, включающей более 1140 сцинтилляционных счётчиков разных типов, и эффективное использование её в мюонном триггере. Это сделало возможным достижение важных новых результатов принципиального научного значения, – в частности, одних из наиболее точных, по времени получения, измерений массы топ-кварка $M_{top} = 173,5_{-3,6}^{+3,7}$ (stat.) ГэВ/ c^2 и $M_{top} = 170.1$ ГэВ/ $c^2 \pm 6.0$ (stat.) ± 4.1 (syst.) в так называемых модах “лептон+струи” и “дилептон” соответственно, наиболее точное измерение массы W-бозона $M_W = 80413 \pm 48$ (stat.) МэВ/ c^2 и др. В настоящее время поддерживаемый нами мюонный комплекс CDF II действует в продолжительном наборном сеансе RUN II на Тэватроне.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А. Артиков, ... Д. Чохели и др., “Подсистема счётчиков «miniskirt» установки CDF II” – Письма в ЭЧАЯ, № 5[114]-2002, ст. 25-39, 2002.
A. Artikov, ... D. Chokheli et al., “The ‘miniskirt’ counter array at CDF-II” – CDF Note: CDF/PUB/MUON/PUBLIC/6105, Sep 2002.
2. О. Пухов, ... Д. Чохели и др., “Автоматизация контроля системы мюонных сцинтилляторных счётчиков CDF II” – Письма в ЭЧАЯ, № 5[114]-2002, ст. 72-81, 2002.
O. Pukhov, ... D. Chokheli et al., “Automatization of the monitoring and control of the muon scintillation counters at CDF II” – CDF Note: CDF/PUB/MUON/PUBLIC/5949, May 2002.

3. А. Артиков, ... Д. **Чохели** и др., “*New generation large area muon scintillation counters with wavelength shifter fiber readout for CDF II*” – Письма в ЭЧАЯ, № 3[132]-2006, ст. 81-102, 2006.
4. Artikov, ... **D. Chokheli** et al., “*Design and construction of new central and forward muon counters for CDF II*”, — NIM A538 (2005) 358-371, 2005.
А. Artikov, ... **D. Chokheli** et al., “*Design and construction of new central and forward muon counters for CDF II*” – CDF Note: CDF/PUB/MUON/PUBLIC/6926, March 2004.
5. А. Artikov, ... **D. Chokheli** et al., “*Properties of the Ukraine polystyrene-based plastic scintillator UPS 923A*” – NIM A555 (2005) 125-131, 2005.
А. Артиков, ... Д. **Чохели** и др., “*Свойства украинского пластмассового сцинтиллятора на основе полистирола UPS 923A*” – Препринт ОИЯИ, Дубна, D13-2005-111, 2005.
6. А. Артиков, О. Пухов, Д. **Чохели** и Г. Члачидзе, “*Система мюонных сцинтилляционных счетчиков установки CDF*” – ЭЧАЯ, 2008, Т. 39, №. 3, С. 788-812.
А. М. Artikov, О. Е. Pukhov, G. A. Chlachidze and **D. Chokheli**, “*Scintillation Counters of the Muon System at CDF II*” – Physics of Particles and Nuclei, Vol. 39, No. 3, 2008, p. 410, http://www.maik.rssi.ru/abstract/physpart/8/physpart3_8p410abs.htm
7. А.Артиков, **D. Chokheli**, G. Pauletta and О. Pukhov, “*On the aging of the scintillation counters for RUN II Muon System at CDF*” – NIM A579 (2007) 1122-1134, 2007.
А.Артиков, ... **D.Chokheli** et al.. “*On the aging of the CSP and CSX counters*”, – CDF Note: CDF/PUB/MUON/PUBLIC/7033, May 2004.
8. А. Артиков, ... Д. **Чохели** и др., “*«PRESHOWER» – новый многоканальный детектор CDF. Часть 1. Сцинтилляционные пластины нового детектора: разработка, производство, контроль качества*” – Препринт ОИЯИ, Дубна, P13-2005-27, 2005.
9. М. Gallinaro, ..., **D.Chokheli** et al (CDF collaboration), “*A New Scintillator Tile/Fiber Preshower Detector for the CDF Central Calorimeter*” – Fermilab-CONF-04-325-E, Nov 2004. 5pp. Presented at 2004 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS / MIC), Rome, Italy.

10. A. Artikov, ..., **D. Chokheli** et al., “*CDF central preshower and crack detector upgrade*” – ANL-HEP-PR-07-09, arXiv.org>physics>arXiv:0706.3922v1, <http://arxiv.org/abs/0706.3922v1>, June 2007.
 А. Артиков, ... **Д. Чохели** и др., “*CDF central preshower and crack detector upgrade*” – Fermilab preprint, FERMILAB PUB-07-023-E, Feb 2007.
11. А. Артиков, К. Бромберг, **Д. Чохели** и Г. Члачидзе, “*О возможности модификации триггера 1 уровня мюонной системы установки CDF в условиях повышенной светимости Тэватрона*” – Письма в ЭЧАЯ, 2008, Т 5, № 2(144), С 171-188.
12. A. Abulencia, ... **D.Chokheli** et al (CDF collaboration). “*Measurement of the top quark mass with the dynamical likelihood method using lepton plus jets events with b-tags in ppbar collisions at $s^{1/2}=1,96$ TeV*”. - Phys. Rev. D73:092002,2006.
13. A. Abulencia, ... **D.Chokheli** 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.
14. A. Abulencia, ... **D.Chokheli** et al (CDF collaboration). “*Measurement of the top quark mass using template method on dilepton events in proton-antiproton collisions at $s^{1/2}=1,96$ TeV*”. – Phys.Rev.D73:112006, 2006.
15. T. Aaltonen, ... **D.Chokheli** et al (CDF collaboration). “*First Run II Measurement of the W Boson Mass*” – arXiv:0708.3642v1, <http://arxiv.org/abs/0708.3642>, August 2007.
 T. Aaltonen, ... **D.Chokheli** et al (CDF collaboration). “*First Run II Measurement of the W Boson Mass*” – Fermilab preprint, FERMILAB-PUB-07-444-E, Aug 2007