

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СЧЕТЧИКИ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ CDF II

А. М. Артиков^{1,2}, *О. Е. Пухов*¹,
Г. А. Члачидзе^{1,3}, *Д. Чохели*^{1,4}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Самаркандский государственный университет, Самарканд, Узбекистан

³Национальная ускорительная лаборатория им. Э. Ферми, Батавия, США

⁴ИФВЭИ Тбилисского государственного университета, Тбилиси, Грузия

ВВЕДЕНИЕ	788
СИСТЕМА МЮОННЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ УСТАНОВКИ CDF II	789
СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ И КОНТРОЛЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКИ В МЮОННОМ «ON-LINE»-ТРИГГЕРЕ И «OFF-LINE»-АНАЛИЗЕ	795
ПРИМЕРЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С УЧАСТИЕМ В ОТБОРЕ СОБЫТИЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ МЮОННОГО ТРИГГЕРА CDF	802
ВЫВОДЫ	807
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	810
	811

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СЧЕТЧИКИ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ CDF II

А. М. Артиков^{1,2}, О. Е. Пухов¹,
Г. А. Члачидзе^{1,3}, Д. Чохели^{1,4}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Самаркандский государственный университет, Самарканд, Узбекистан

³Национальная ускорительная лаборатория им. Э. Ферми, Батавия, США

⁴ИФВЭИ Тбилисского государственного университета, Тбилиси, Грузия

Описана система сцинтилляционных счетчиков мюонного комплекса установки CDF II, действующей на тэватроне (FNAL, США). Информация с детекторов мюонного комплекса принципиально необходима при формировании триггеров первого и второго уровней и в «off-line»-анализе данных в исследованиях по физике тяжелых кварков, проверке СМ, поиску явлений за ее пределами и во многих других экспериментах, проводимых на CDF II при энергии $p\bar{p}$ -столкновений $\sqrt{s} = 1,96$ ТэВ.

The scintillation counters of the CDF II muon complex at the Fermilab Tevatron are described. Information from the muon complex detectors is of a principal necessity for the level 1 and 2 triggers formation and is widely used for the «off-line» data analysis to investigate the heavy quark physics, to check the SM predictions and search for the phenomena beyond the SM, and for many other $p\bar{p}$ -interactions study on the CDF II at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV.

PACS: 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

Мюонный комплекс (МК) играет принципиальную роль на установке CDF II в обширной программе исследований по физике c -, b -, t -кварков, проверке СМ и поиску явлений за ее пределами, а также изучения других процессов в $p\bar{p}$ -взаимодействиях на тэватроне при $\sqrt{s} = 1,96$ ТэВ.

Сцинтилляционные счетчики и дрейфовые камеры МК используются при формировании триггеров первого и второго уровней и в «off-line»-анализе при отборе и исследовании широкого круга $p\bar{p}$ -взаимодействий, где, по условиям эксперимента, ожидается рождение мюона.

Сцинтилляционные счетчики позволяют выбрать искомое событие среди зарегистрированных дрейфовыми камерами: время дрейфа ($\sim 1-1,5$ мкс) превышает время (396 нс) между пересечениями ступков $p\bar{p}$ -пучков тэватрона, что создает неопределенность во временной привязке событий [1].

В обзоре описывается система сцинтиляционных счетчиков МК CDF II, включая устройства подачи высокого напряжения, съема информации и мониторингирования параметров счетчиков и электроники. Необходимую стабильность при долговременном наборе данных обеспечивает специализированная программа оперативного управления и автоматизированного контроля параметров сцинтиляционных счетчиков, интегрированная в глобальную систему контроля установки CDF II.

В заключительной части в качестве иллюстрации приведен ряд значительных физических результатов, в достижении которых эффективно функционирующая мюонная система играла принципиальную или существенную роль.

1. СИСТЕМА МЮОННЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ УСТАНОВКИ CDF II

Мюонная система установки CDF II включает сцинтиляционные счетчики и дрейфовые камеры.

После модернизации (1996–2000 гг.) акцептанс мюонной системы увеличился более чем на 60 % (рис. 1).

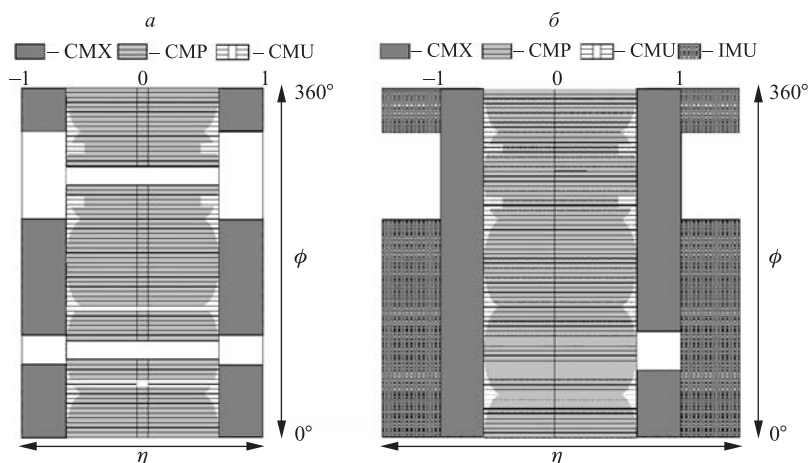


Рис. 1. Акцептанс мюонной системы CDF в Run I (а) и в Run II (б)

Мюонные сцинтиляционные счетчики покрывают область псевдобыстрот $0 < |\eta| < 1,5$ и сгруппированы в следующие основные подсистемы (рис. 2):

- модернизированный центральный мюонный сцинтиляционный детектор — счетчики CSP (Central Scintillator Upgrade) в интервале $0 \leq |\eta| \leq 0,6$;
- расширенный центральный мюонный сцинтиляционный детектор — счетчики CSX (Central Scintillator Extension) в интервале $0,6 \leq |\eta| \leq 1,0$;

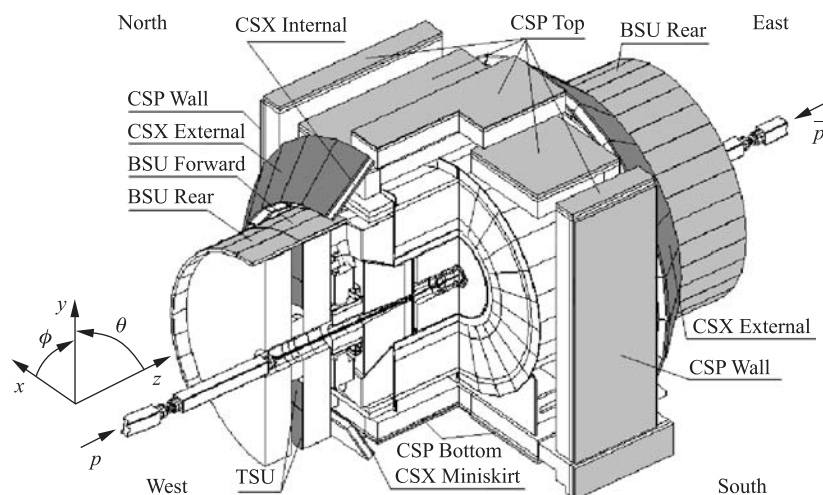


Рис. 2. Расположение сцинтилляционных счетчиков на модернизированной установке CDF II

- переднюю мюонную сцинтилляционную подсистему — счетчики BSU (Barrel Scintillator Upgrade), облегающие тороиды, и счетчики TSU (Toroid Scintillator Upgrade) внутри тороидов в интервале $1,0 \leq |\eta| \leq 1,5$.

Используются счетчики разных типов со съемом света с помощью плексигласового световода (так называемые старые счетчики), с помощью спектросмещающих волокон (счетчики нового поколения) и использующие оба указанных способа (модернизированные).

1.1. Группа счетчиков CSP в области $0 \leq |\eta| \leq 0,6$, $\Delta\varphi = 360^\circ$. Они расположены (рис. 2) непосредственно после дрейфовых камер CMP (Central Muon Upgrade) и на расстоянии $\approx 1,2$ м от находящихся ближе к центру CDF дрейфовых камер CMU (Central Muon), образуя систему идентификации мюонов. Счетчики CSP и камеры CMP установлены за стальным щитом толщиной 61 см, который практически полностью подавляет радиационный фон, исходящий из центра установки.

Задействованы 276 счетчиков CSP двух типов.

Первоначально в Run I использовались мюонные сцинтилляционные счетчики со съемом света с помощью плексигласового световода типа «рыбий хвост». Вследствие старения часть этих счетчиков заменена созданными в ОИЯИ сцинтилляционными счетчиками нового поколения; их принципиальная особенность — съем света с помощью ленты из спектросмещающих оптоволокон (производства «Kuraray», Япония, и «Pol. Hi. Tech.», Италия) [2].

144 таких счетчика расположены под и над установкой — CSP Bottom и CSP Top соответственно (рис. 2). Они изготовлены из прямоугольного полистирольного сцинтиллятора трех типоразмеров (рис. 3), что обусловлено наличием опор в нижней части установки CDF II и имело целью максимальное перекрытие доступной площади.

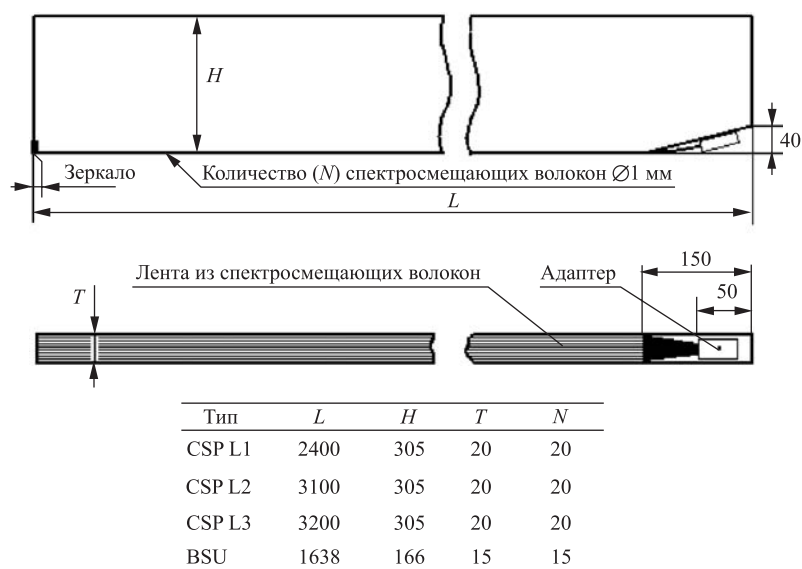


Рис. 3. Сцинтилляционные счетчики CSP и BSU нового поколения и их размеры (в мм)

132 счетчика CSP Wall, использовавшихся ранее в Run I, были модернизированы: к основному способу съема света с помощью световода добавился съем света спектросмещающими оптическими волокнами. Благодаря этому достигнуто более чем двукратное увеличение количества света, собираемого с дальнего от ФЭУ конца счетчика [3]. Модернизированные счетчики расположены на северной и южной боковой стороне CDF II (рис. 2); они изготовлены из прямоугольного сцинтиллятора на основе поливинилтолуола (рис. 4).

1.2. Группа счетчиков CSX в области $0,6 \leq |\eta| \leq 1,0$, $\Delta\varphi = 360^\circ$. Счетчики CSX расположены в два слоя, по обеим сторонам плоскости дрейфовых камер CMX (Central Muon Extension), а счетчики CSX «miniskirt» (MSK) — в один слой непосредственно перед дрейфовыми камерами, если смотреть от центра установки (рис. 2). Вместе они выглядят как усеченный конус,



Рис. 4. Модернизированные сцинтилляционные счетчики CSP Wall и их размеры (в мм)

расширяющийся к центру установки. Счетчики расположены на восточной и западной стороне CDF относительно плоскости с $\eta = 0$.

В Run II была значительно увеличена пассивная защита детекторов мюонной системы этой области путем добавления дополнительных стальных щитов к тороиду старого магнита CDF (рис. 5). Также уменьшена «щель» для вторичных частиц, летящих из области столкновений $p\bar{p}$ -пучков установки CDF II, с помощью замены устаревших газовых калориметров в передней области на современные калориметры на основе свинцово-сцинтилляторного сэндвича.

Счетчики CSX не претерпели модернизации со времени Run I и, как показали исследования [4, 5], могут эффективно использоваться в Run II, перекрывая область $0,6 \leq |\eta| \leq 1,0$, $\Delta\varphi = 270^\circ$ (интервал азимутального угла от

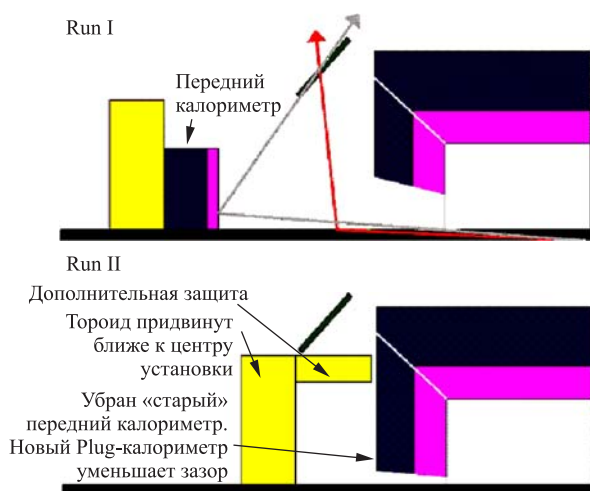


Рис. 5. Улучшение защиты мюонных детекторов от вторичных фоновых частиц в области псевдобыстрот $0,6 < |\eta| < 1,0$

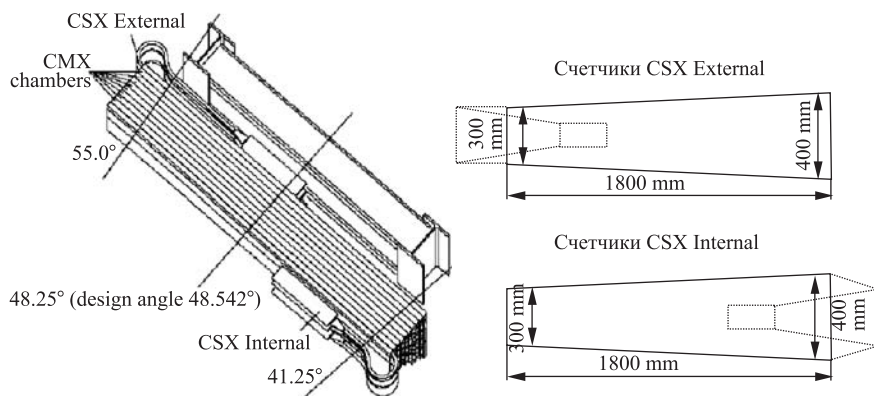


Рис. 6. Сцинтилляционные счетчики CSX

$\varphi_1 = -45^\circ$ до $\varphi_2 = 225^\circ$); они изготовлены из поливинилтолуольных сцинтилляционных пластин трапецидальной формы толщиной 25 мм (рис. 6).

Так называемые внутренние счетчики (CSX Internal) расположены на внутренней боковой поверхности усеченного конуса, ближней к центру установки CDF. Съем света производится с широкого (основания трапеции) торца пластины. Общее количество CSX Internal счетчиков — 134.

Так называемые наружные счетчики (CSX External) расположены на наружной боковой поверхности усеченного конуса, удаленной от центра установки CDF. Съем света производится с узкого (основания трапеции) торца пластины. Общее количество CSX External счетчиков — 136.

Счетчики MSK также имеют трапецидальную форму и перекрывают область $0,6 \leq |\eta| \leq 1,0$, $\Delta\varphi = 90^\circ$ (от $\varphi_1 = 225^\circ$ до $\varphi_2 = 315^\circ$) (рис. 7) [6]. Они имеют линейные размеры, меняющиеся в зависимости от азимутального угла φ из-за ограниченного пространства в месте их расположения на

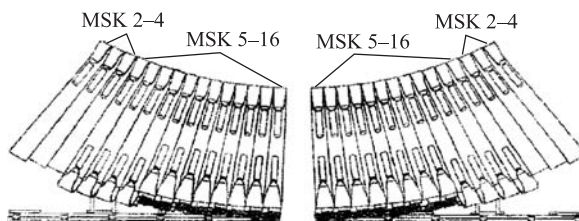


Рис. 7. Схема расположения счетчиков MSK на установке CDF II

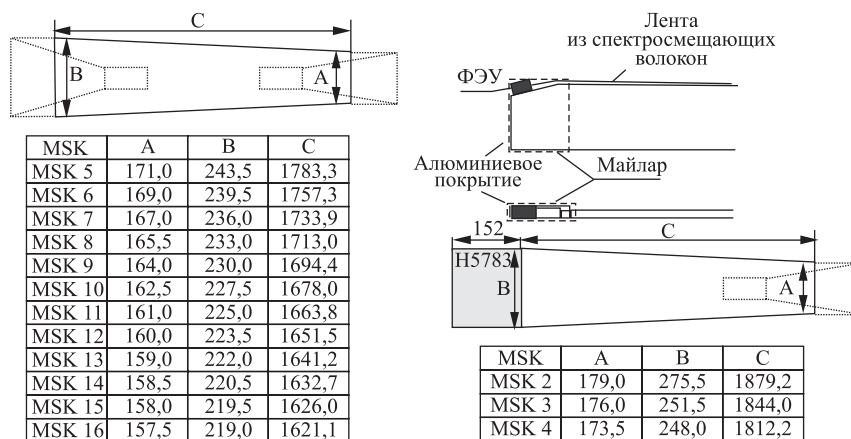


Рис. 8. Сцинтилляционные счетчики MSK и их размеры (в мм)

установке CDF II. По той же причине счетчики MSK установлены только в один слой на внутренней (ближней к центру установки CDF) боковой поверхности усеченного конуса. В отличие от счетчиков CSX, сбор света со счетчиков MSK происходит с обоих концов поливинилтолуольной сцинтилляционной пластины толщиной 15 мм (рис. 8). Общее количество счетчиков MSK на установке CDF II — 48 штук. 12 счетчиков с комбинированным съемом света (первые три счетчика с каждого края на рис. 7, см. также схему в правой части рис. 8) будут установлены на CDF II после подготовки соответствующих дрейфовых камер.

1.3. Счетчики в области $1,0 \leq |\eta| \leq 1,5$. При модернизации установки CDF в Run II добавлены счетчики так называемой системы IMU (Intermediate Muon Upgrade). Они расположены на тороидах ныне не используемого теплого магнита установки CDF (симметрично относительно плоскости $\eta = 0$, рис. 2) и покрывают область $1,0 \leq |\eta| \leq 1,5$, где задействованы мюонные сцинтилляционные счетчики двух видов — BSU и TSU. Первые расположены непосредственно на дрейфовых камерах BMU, а вторые — внутри тороида (рис. 2). Тороид, толщина стенок которого достигает 60 см, практически полностью подавляет радиационный фон, исходящий из области столкновений $p\bar{p}$ -пучков CDF II.

Всего в группе IMU задействован 551 сцинтилляционный счетчик обоих типов.

Счетчики BSU, изготовленные в ОИЯИ, расположены двумя кольцами на внешней стороне тороидов параллельно направлению $p\bar{p}$ -пучков (рис. 2); они покрывают интервал $\Delta\varphi = 270^\circ$ (от $\varphi_1 = -45^\circ$ до $\varphi_2 = 225^\circ$) и, соот-

ветственно, $1,0 < |\eta| < 1,25$ («forward», BSU_F) и $1,25 < |\eta| < 1,5$ («rear», BSU_R). Счетчики BSU — полный аналог CSP Top и CSP Bottom счетчиков нового поколения, но имеют полистирольный сцинтилятор меньшего размера (рис. 3) [2]. Общее количество счетчиков BSU на установке CDF равно 407.

Счетчики TSU расположены кольцом во внутренней части тороидов перпендикулярно направлению $p\bar{p}$ -пучков (рис. 2), перекрывая область $\Delta\varphi = 360^\circ$, $1,25 < |\eta| < 1,5$; они изготовлены из поливинилтолуольных сцинтилляционных пластин трапецевидальной формы толщиной 10 мм (рис. 9) [7]. Из-за сложности профиля внутренней поверхности тороида в месте расположения этих счетчиков применяются длинные и короткие TSU -счетчики.

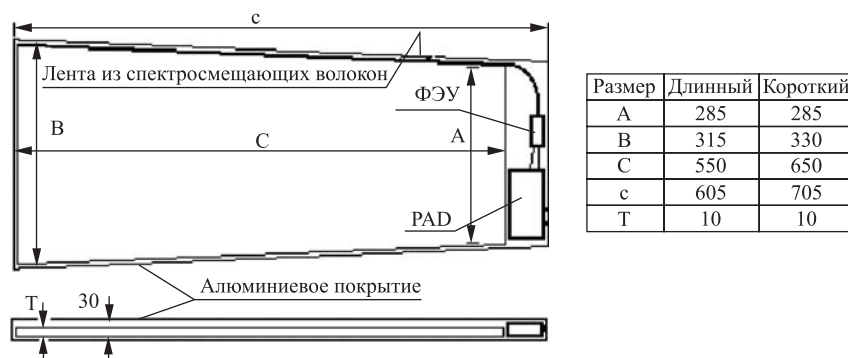


Рис. 9. Сцинтилляционные счетчики TSU и их размеры (в мм)

Счетчики TSU , разработанные в Университете штата Мичиган (США), также являются сцинтилляционными детекторами нового поколения со съемом света спектросмещающими волокнами и фотосенсором $H5783$ (производства «Hamamatsu Photonics», Япония) на основе миниатюрного ФЭУ $R5600$. В отличие от счетчиков ОИЯИ (CSP и BSU) спектросмещающие волокна в счетчиках TSU плотно приставлены к торцу сцинтилляционной пластины без приклеивания, т. е. существует возможность дальнейшего увеличения светосбора с помощью приклеивания волокон к пластине. Общее количество счетчиков TSU на CDF — 144.

2. СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ И КОНТРОЛЯ

Общее количество мюонных сцинтилляционных счетчиков на CDF II превосходит 1140 штук; поддержка и оперативный контроль этого комплекса обеспечены системой контроля и мониторинга [8] (см. п. 2.3).

Мюонные сцинтилляционные счетчики CDF II разделяются на два вида по типу используемых ФЭУ, который в первую очередь и определяет метод, применяемый для системы контроля.

2.1. Счетчики с классическим методом съема и большим ФЭУ. Это счетчики CSX, MSK и CSP Wall со съемом света при помощи плексигласового световода и ФЭУ с диаметром фотокатода 51 мм — EMI 9814B (производства «Electron Tubes Inc.», Великобритания).

Их питание осуществляется от высоковольтных источников* через распределители Pisa Vox**.

В Run I применялась ручная настройка и контроль высокого напряжения ФЭУ с помощью переносного пульта для Pisa Vox, причем одновременно можно было настроить всего один канал.

При сохранении прежней (Run I) схемы подачи высокого напряжения и съема информации в Run II была внедрена ранее отсутствовавшая система настройки и контроля высокого напряжения распределителя Pisa Vox. Для этого использован специальный интерфейс-коммутатор (Pisa Driver производства CAEN) стандарта КАМАК, который посредством SCSI-контроллера «Jogway Model 73A» обеспечивал связь между компьютером и распределителем (рис. 10, 11).

Новая методика [8] сократила время настройки напряжения до нескольких секунд на канал, тем самым в десятки раз уменьшив время настройки и контроля высокого напряжения группы старых сцинтилляционных счетчиков в сравнении с ручным способом управления. В настоящее время для настройки высокого напряжения всех 450 счетчиков данной категории требуется максимум один час.

На рис. 10 представлена схема подачи высокого напряжения и съема информации для группы старых счетчиков. Сигнал от счетчика подается на дискриминатор; используются два типа дискриминаторов — LeCroy 4413 и LeCroy 4416 с пороговым напряжением 15 мВ, каждый дискриминатор имеет 16 независимых каналов. Дискриминатор на выходе формирует стандартный ЭСЛ-сигнал длительностью 30 нс, подаваемый витой парой на вход времяцифрового преобразователя (ВЦП) [9] и далее на вход системы считывания и накопления данных.

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

**Pisa Vox (производства CAEN, Италия) может одновременно снабжать высоким напряжением до 40 ФЭУ с максимальным выходным током до 2 мА/канал. Максимальный диапазон изменения выходного напряжения в пределах 15–20 % от входного напряжения с точностью фиксации значения лучше 0,1 %. Управление распределителем происходит посредством серийного порта. Возможно объединение распределителей в единую сеть управления по серийному порту.

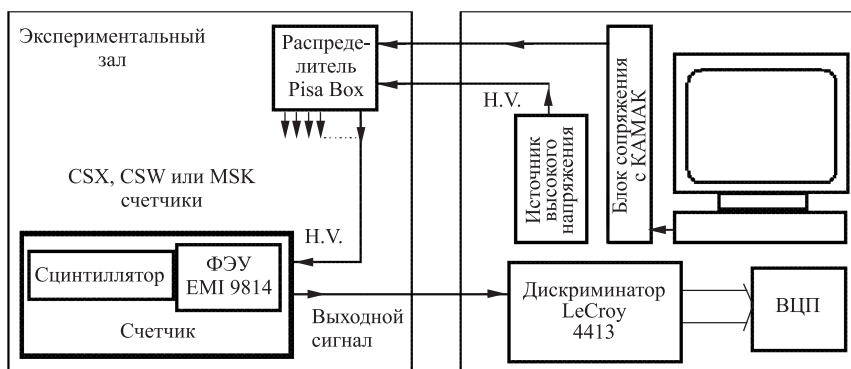


Рис. 10. Схема подачи высокого напряжения и считывания данных для сцинтилляционных счетчиков CSP Wall

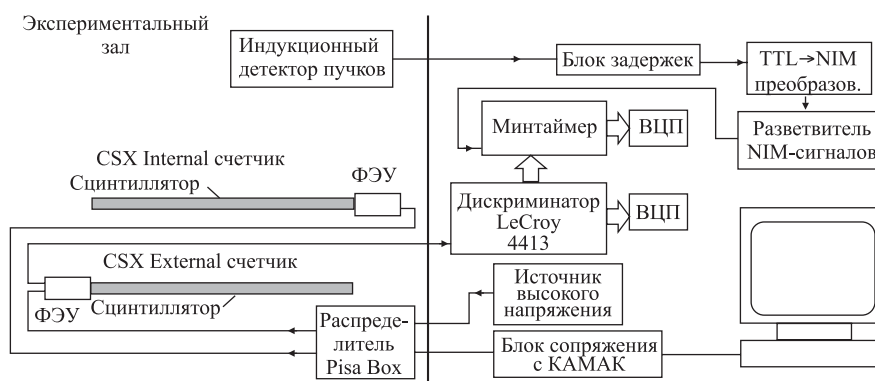


Рис. 11. Схема подачи высокого напряжения и считывания данных для сцинтилляционных счетчиков CSX и минтаймеров

Сигналы с перекрывающихся пар счетчиков CSX, а также с обоих концов счетчиков MSK после дискриминаторов поступают на так называемые минтаймеры, выходные сигналы с которых затем подаются на ВЦП (рис. 11). Минтаймер [4] — специальная схема совпадений сигналов с двух ФЭУ, запускаемая от момента входа в установку CDF II $p\bar{p}$ -сгустков. Он вырабатывает импульс с постоянной (равной времени прохождения света через полную длину пластины) задержкой, не зависящей от места попадания мюона в пластину сцинтиллятора, задавая, таким образом, время, после которого отсекаются фоновые события. Минтаймер предложен в Run I для отсека вторичных фоновых частиц, запаздывающих относительно летящих из зоны столк-

новений мюонов на 12–15 нс (рис. 5). В Run II минтаймер будет использоваться в триггере с повышением светимости тэватрона до $\geq 4 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Всего задействовано 8 источников высокого напряжения, 16 распределителей типа Pisa Box, 38 дискриминаторов (LeCroy 4413, LeCroy 4416) и 24 минтаймера.

2.2. Счетчики со съемом света при помощи спектросмещающих волокон и фотосенсоров на основе миниатюрных ФЭУ. Это сцинтилляционные счетчики нового поколения со светосбором с помощью спектросмещающих волокон и фотосенсором H5783 на основе миниатюрного ФЭУ R5600; таковы все счетчики BSU, TSU и CSP Top и CSP Bottom.

Питание и съем информации для этих счетчиков принципиально отличается от схем, рассмотренных в предыдущем пункте.

Для управления фотосенсором H5783 на счетчик установлен усилитель-формирователь (PMT Amplifier and Discriminator — PAD) (рис. 12) [10]. 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 специализированному распределителю-приемнику (Control and Concentrator Units — CCU)* [11].

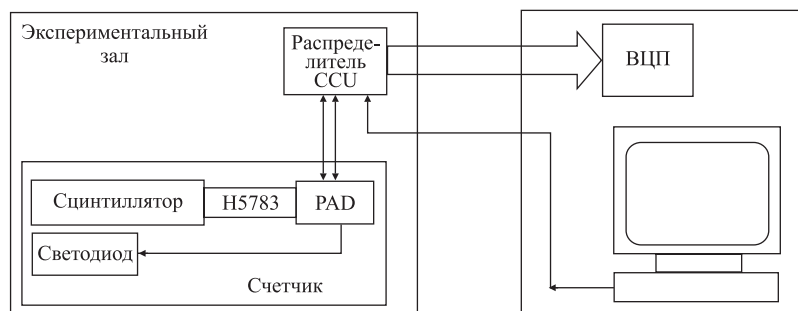


Рис. 12. Схема подачи высокого напряжения и считывания данных для сцинтилляционных счетчиков нового поколения

Каждый канал подключается к CCU через стандартный разъем RJ-45 с помощью кабелей CAT-5. Наличие четырех витых пар позволяет использовать один кабель одновременно как для контроля и настройки напряжения, так и для съема информации с канала, а также для контроля исправности

*Используя CCU, можно подавать напряжение на 48 PAD, одновременно принимая с них информацию в ЭСЛ-стандарте для передачи ее на ВЦП.

всего тракта путем подачи импульсов на синий светодиод, установленный на дальнем конце счетчика.

Информация от ССУ с помощью двух 50-контактных, содержащих по 25 витых пар плоских кабелей подается на ВЦП и далее на вход системы считывания и накопления данных.

Всего задействовано 20 распределителей-приемников ССУ, к которым подсоединены до 700 сцинтилляционных счетчиков. Для соединения ССУ, расположенных группами в разных частях CDF, с компьютером используются 8 независимых последовательных портов.

2.3. Система контроля сцинтилляционных счетчиков; интеграция в глобальную систему контроля установки CDF II. Для эффективного управления и контроля всей системы мюонных сцинтилляционных счетчиков разработана и внедрена программа MuonMonitor [8] на основе программного пакета Visual C и Visual Basic от фирмы «Microsoft».

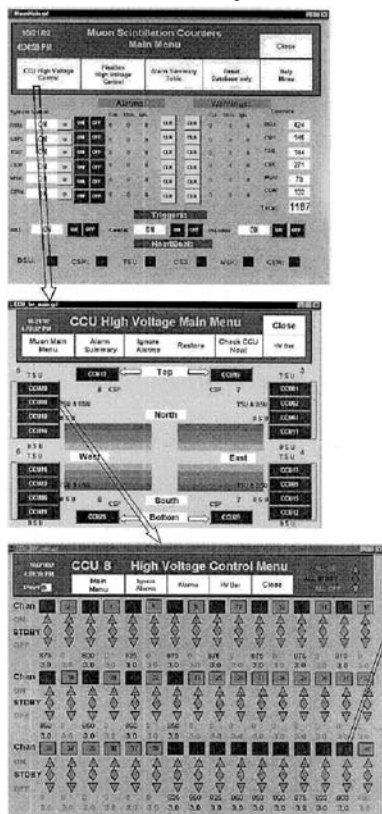
Программа MuonMonitor позволяет полностью управлять работой всех устройств ССУ и Pisa Box. Создана база данных по основным параметрам сцинтилляционных счетчиков (напряжение плато, пороговое напряжение дискриминации, расположение и индивидуальный номер и т.д.), обращаясь к которой пользователь программы MuonMonitor выставляет заданные высокие напряжения на ФЭУ и уровни порогов на PAD.

Дальнейшим логическим развитием системы контроля мюонных сцинтилляционных счетчиков была интеграция ее в глобальную систему контроля установки CDF II. Для непрерывного мониторинга параметров сцинтилляционных счетчиков используется программное обеспечение iFIX — лицензионный пакет программ фирмы «Intellution» (США). Созданная на основе данного пакета и интегрированная в глобальную систему контроля программа MuonMain со встроенными подпрограммами-утилитами позволяет в режиме реального времени контролировать заданные параметры мюонных сцинтилляционных счетчиков (рис. 13). Каждые 15 мин в течение 30 с происходит контроль высокого напряжения ~ 1200 ФЭУ и порогов примерно 700 PAD.

Кроме данных программных решений для оповещения о возможных неисправностях применяется встроенная в глобальную систему контроля CDF система оперативного контроля опорных напряжений отдельных устройств: источников высокого напряжения, распределителей, всех задействованных КАМАК-крейтов, базисного компьютера контроля и управления.

Информация о состоянии мюонной сцинтилляционной системы поступает на центральные мониторы контроля установки CDF II. В случае возникновения сбоев системы, выхода за пределы заданных параметров, аварийного отключения какого-нибудь устройства или канала вырабатывается сигнал предупреждения или тревоги, сопровождающийся соответствующим звуковым сигналом. При таких ситуациях дежурный смены предпринимает меры по устранению неполадок или вызывает экспертов.

Последовательность контроля за CCU



Последовательность контроля за Pisa Box

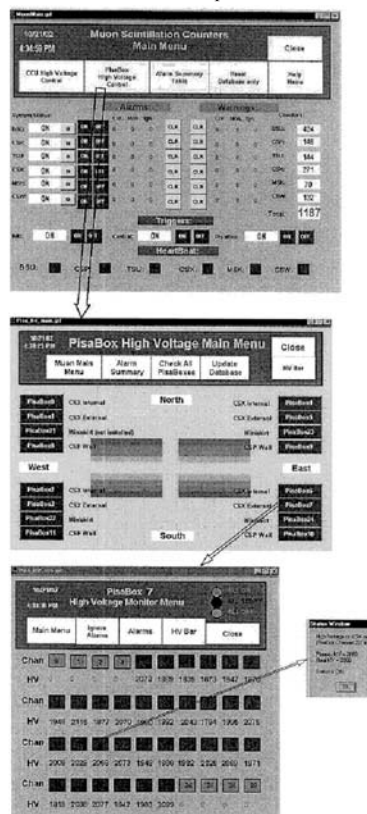


Рис. 13. Цепочка изображений программы MuonMain с экрана монитора [9]

Для оперативного контроля стабильной работы сцинтилляционных счетчиков также используются регулярно набираемые дежурным смены двумерные гистограммы, изображающие количество срабатываний счетчиков на запуски глобального триггера*. Как правило, изменение привычного (стабильного) образа гистограммы означает неисправность в счетчике или устройствах, связанных с ними.

*Глобальный триггер [1] установки CDF дает разрешение на запись событий при наличии совпадений триггеров первого, второго и третьего уровней по определенной таблице. При этом записывается информация от всех детекторов, вне зависимости от их причастности к выработке глобального триггера.

Для контроля долговременной стабильности счетчиков используются графики эффективностей, построенные на основе данных, накопленных за 2–3 месяца. Рис. 14 иллюстрирует эффективность счетчиков CSP Wall, полученную путем сравнения количества срабатываний счетчиков и треков, проведенных в соответствующих камерах СМР/СМУ.

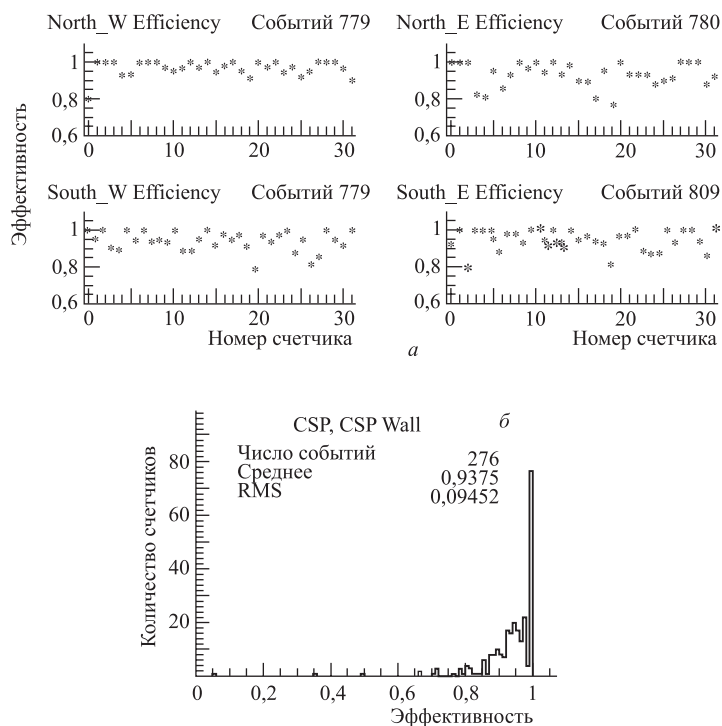


Рис. 14. Эффективность счетчиков CSP Wall (а) и распределение эффективности счетчиков CSP и CSP Wall (б)

Программа контроля и мониторинга мюонных сцинтилляционных счетчиков используется в описанных выше случаях (на первом этапе) для определения причин низкой эффективности или неисправности отдельных или групп счетчиков. Проверяется наличие высокого напряжения, потребляемые токи ФЭУ и поступающие с них сигналы, исправность отдельных каналов распределителей Pisa Vox, ССУ и электроники. На втором этапе при остановке тэватрона возможен поиск неисправных кабелей, ФЭУ, PAD и нарушений светоизоляции. В исключительных случаях счетчик снимается с установки CDF для исследования параметров на специальном стенде [12].

Вышеописанные меры поддерживают стабильную эффективную работу сцинтилляционных счетчиков мюонной системы CDF II в длительных сеансах набора физических данных.

3. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СЧЕТЧИКИ В МЮОННОМ «ON-LINE»-ТРИГГЕРЕ И «OFF-LINE»-АНАЛИЗЕ

Сцинтилляционные счетчики участвуют в формировании мюонных «on-line»-триггеров. Для иллюстрации в таблице приведена небольшая часть «on-line»-триггеров из общего набора триггеров, являвшихся до января 2006 г. на CDF II обязательными для отбора кандидатов на мюоны. Как видно, сцинтилляционные счетчики CSX, BSU и TSU широко задействованы в триггерах первого и второго уровней с требованием обязательного присутствия с них сигнала, подтверждающего отбор события с мюоном.

Группа сцинтилляционных счетчиков CSP не принимает участия в «on-line»-триггере. Они располагаются в относительно защищенной от радиации области, и включение их в «on-line»-триггер дает уменьшение фона на 10%. Из-за незначительности эффекта подавления фона было решено не перегружать «on-line»-триггер добавлением счетчиков CSP. Но применение информации от счетчиков CSP во многих случаях является обязательным во время обработки накопленных данных, в частности, при измерении массы топ-кварка.

Ниже детально изложен принцип формирования триггеров первого и второго уровней для всех подсистем мюонных сцинтилляционных счетчиков, затем кратко рассмотрено несколько экспериментов с целью иллюстрации роли сцинтилляционных счетчиков в триггере реального времени и «off-line»-анализе при отборе мюонов.

3.1. Мюонный триггер IMU, $1,0 \leq |\eta| \leq 1,5$. Триггер IMU первого уровня (L1) «геометрически» охватывает передние ($1,0 \leq |\eta| \leq 1,25$) и задние ($1,25 \leq |\eta| \leq 1,5$) мюонные детекторы, составляющие подсистему IMU (рис. 15).

В области $1,0 \leq |\eta| \leq 1,25$ мюонный триггер формируется при совпадении сигналов счетчиков BSU_F , дрейфовых камер BMU, экстраполятора XTRP и системы адронного тактирования (рис. 16).

XTRP «протягивает» выдаваемый быстрым триггером* трек в COT (Central Outer Tracker) до камер BMU (рис. 15).

*До января 2006 г. триггер XFT для области $1,0 \leq |\eta| \leq 1,2$ состоял из обязательного совпадения не менее трех, а для области $0 \leq |\eta| \leq 1$ — четырех суперслоев COT — центрального трекового детектора CDF II [1].

Примеры «on-line»-триггеров первого и второго уровня из общего набора использовавшихся триггеров

Номер строки	Полная формула триггера	Задействованные сцинтилляционные счетчики	Ссылка*
1	L1_BMU10_BSUR_TSUO_&_CLC <ul style="list-style-type: none"> • L2_CJET15_L1_BMU10_BSUR_TSUO <ul style="list-style-type: none"> ◦ L3_CENTRAL_JET_20 <ul style="list-style-type: none"> ■ MUON_CENTRAL_JET20_L1_BMU10_BSUR ■ MUON_BMU_1 	BSU _R и TSU 1,25 < η < 1,5	[20]
2	L1_BMU10_BSU_PT11 <ul style="list-style-type: none"> • L2_CJET15_L1_BMU10_BSU_PT11 <ul style="list-style-type: none"> ◦ L3_CENTRAL_JET_20 <ul style="list-style-type: none"> ■ MUON_CENTRAL_JET20_L1_BMU10_PT11 ■ MUON_BMU_1 • L2_RL2HZ_L1_BMU10_BSU_PT11 <ul style="list-style-type: none"> ◦ L3_BMU9 <ul style="list-style-type: none"> ■ MUON_BMU9_L1_BMU10_BSU_PT11 ■ MUON_BMU_1 	BSU _F 1,0 < η < 1,25	[18, 20]
3	L1_CMU1.5_PT1.5_&_CMX1.5_PT2_CSX <ul style="list-style-type: none"> • L2_CMU1.5_PT1.5_&_CMX1.5_PT2_DPHI120_OPPQ <ul style="list-style-type: none"> ◦ L3_JPSL_CMUCMX <ul style="list-style-type: none"> ■ JPSL_CMU1.5_CMX2 ■ JPSIMUMU_1 ◦ L3_LOWMASS_CMUCMX_SUMPT <ul style="list-style-type: none"> ■ RAREB_CMUCMX_SUMPT ■ B_RARE_1 ◦ L3_RAREB_CMUCMX_LXY <ul style="list-style-type: none"> ■ RAREB_CMUCMX_LXY ■ B_RARE_1 ◦ L2_CMU6_PT4_&_CMX1.5_PT4_CSX ◦ L3_DIMUON_CMU4_CMX4 <ul style="list-style-type: none"> ■ DIMUON_CMU4_CMX4 ■ SUSY_DILEPTON_2 	CSX и MSK 0,6 < η < 1,0	[21]
4	L1_CMX6_PT8_CSX <ul style="list-style-type: none"> • L2_AUTO_L1_CMX6_PT8_CSX <ul style="list-style-type: none"> ◦ L3_CMX8_TRACK5_ISO <ul style="list-style-type: none"> ■ TAU_CMX8_TRACK5_ISO ■ TAU_LEPTON_1 • L2_CMX6_PT15_JET10 <ul style="list-style-type: none"> ◦ L3_MUON_CMX18 <ul style="list-style-type: none"> ■ MUON_CMX18 ■ HIGH_PT_MUON_1 	CSX и MSK 0,6 < η < 1,0	[16–20]
5	Используются в «off-line»-анализе, подготавливаются к включению в «on-line»-триггер	CSP и CSP Wall 0 < η < 0,6	[16–21]

*Указаны ссылки на перечисленные в разд. 4 эксперименты, где сцинтилляционные счетчики участвовали в «on-line» или «off-line» отборе событий.

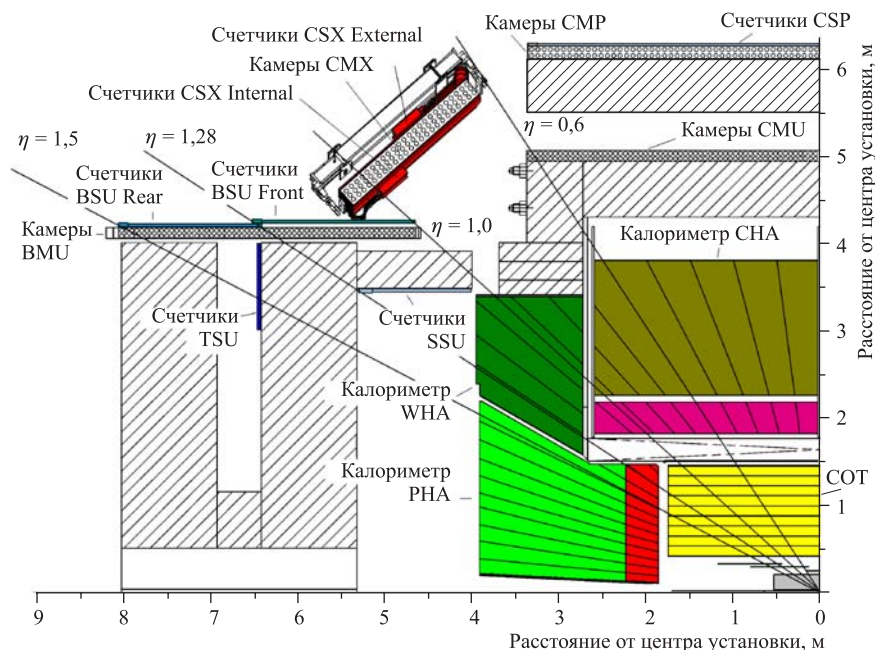


Рис. 15. Схема установки CDF II

Сигналы (информация с соответствующих по η башен адронного калориметра WHA, рис. 15) системы адронного тактирования* используются в триггере для временной привязки к мюонам из зоны столкновений.

В области $1,25 \leq |\eta| \leq 1,5$ мюонный триггер формируется при совпадении сигналов счетчиков BSU_R , TSU, дрейфовых камер BMU и системы адронного тактирования. Сигналы (информация с соответствующих по η башен адронного калориметра WHA и PHA, рис. 15) системы адронного тактирования используются в триггере для временной привязки к мюонам из зоны столкновений.

IMU триггер L1 выглядит следующим образом [13]:

- $L1_F = BSU_F \& BMU \& XTRP \& WHA$ (таблица, строка 2) — для передней части;
- $L1_R = BSU_R \& TSU \& BMU \& (WHA + PHA)$ (таблица, строка 1) — для задней части.

*Система адронного тактирования (Hadron Timing System) выдает информацию о временном интервале между моментом входа в установку CDF II $p\bar{p}$ -пучков и моментом пролета минимально ионизирующей частицы (MIP) через адронный калориметр (CHA, WHA и PHA) [1].

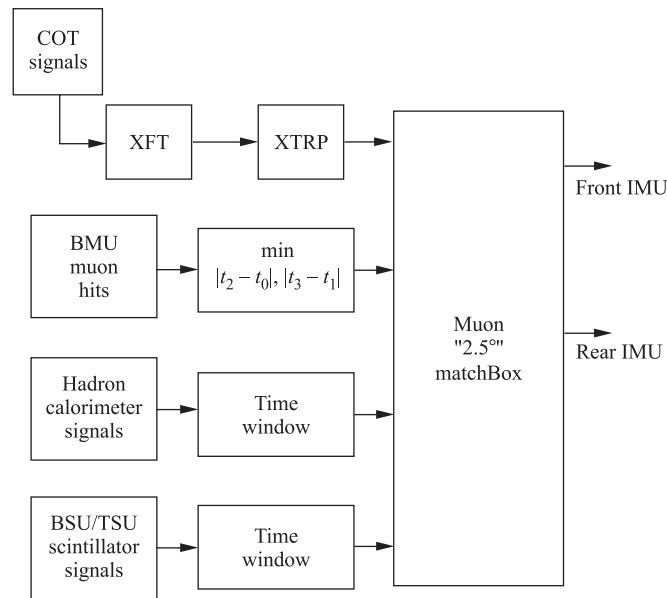


Рис. 16. Схема формирования IMU триггера L1 для отбора мюонов в области $1,0 \leq |\eta| \leq 1,5$ (необходимые пояснения в тексте) [1, 13]

Уровень триггера L1 не превышал 200 и 300 Гц для передней и задней частей системы IMU соответственно при начальной мгновенной светимости $1,2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (октябрь 2005 г. [14]).

В триггере второго уровня в зависимости от исследуемой задачи налагаются дополнительные требования. Например, в исследовании процессов с t -кварками IMU триггер L2 формируется из триггера L1 дополнительным требованием наличия в адронном калориметре струй с энергией $E_T > 15 \text{ ГэВ}$ в области $|\eta| < 1,1$ (таблица, строки 1 и 2, условие CJET15).

3.2. Мюонный триггер CMX, $0,6 \leq |\eta| \leq 1,0$. CMX триггер L1 формируется при совпадении сигналов пары счетчиков CSX или одного MSK, дрейфовых камер CMX и экстраполятора XTRP.

XTRP «протягивает» выдаваемый быстрым триггером XFT трек в COT до камер CMX (рис. 15). Требования совпадения четырех суперслоев COT (см. сноску на с.802) достаточно для поддержания необходимого уровня триггера без совпадения с сигналом от системы адронного тактирования.

CMX триггер L1 выглядит следующим образом:

- $L1 = (CSX_{\text{int}} + CSX_{\text{ext}}) \& \text{CMX} \& \text{XTRP}$ (таблица, строка 4).

Уровень CMX триггера L1 не превышал 100 Гц для начальной мгновенной светимости $1,2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (октябрь 2005 г. [14]).

На CDF II используются различные триггеры L2 для подсистемы CMX. Например, при отборе мюонов с большим поперечным импульсом и требованием наличия струи в центральной области CDF (таблица, строка 4, PT15 и JET10), используемых в исследовании многих процессов, CMX триггер L2 выглядит так:

- $L2 = (\text{CSX}_{\text{int}} + \text{CSX}_{\text{ext}}) \& \text{CMX} \& \text{XTRP} \& (E_T > 10 \text{ ГэВ при } |\eta_{\text{seed}}| < 1,1)$.

3.3. Мюонный триггер SMP/CMU, $0 \leq |\eta| \leq 0,6$. Мюонный триггер, подтверждающий обнаружение трека в центральной области CDF, создается при совпадении сигналов, сформированных совпадением импульсов с дрейфовых камер подсистем SMP и CMU по отдельности.

Дополнительно требуется совпадение с сигналом от экстраполятора XTRP, «протягивающего» выдаваемый быстрым триггером XFT трек в COT до камер CMU/SMP. Для триггера в этой области также не требуется совпадения с сигналом от системы адронного тактирования (см. предыдущий пункт).

L1 триггер для системы SMP/CMU выглядит следующим образом:

- $L1 = \text{SMP} \& \text{CMU} \& \text{XTRP}$.

В триггере второго уровня в зависимости от исследуемой задачи включаются дополнительные требования. Например, в исследовании процессов с t -кварками SMP/CMU триггер L2 формируется из триггера L1 дополнительным требованием наличия в адронном калориметре струй с энергией $E_T > 15 \text{ ГэВ}$ в области $|\eta| < 1,1$:

- $L2 = \text{SMP} \& \text{CMU} \& \text{XTRP} \& (E_T > 15 \text{ ГэВ при } |\eta_{\text{seed}}| < 1,1)$.

При начальной мгновенной светимости тэватрона $1,2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (октябрь 2005 г. [14]) использование разнесенных в пространстве двух систем дрейфовых камер позволило достигнуть желаемого уровня ($< 300 \text{ Гц}$) мюонного триггера L1 в области $0 \leq |\eta| \leq 0,6$. Добавление в «on-line»-триггер сцинтилляционных счетчиков CSP снижает частоту на 10%. Поэтому до повышения светимости тэватрона счетчики CSP не используются в формировании «on-line»-триггера.

Центральные сцинтилляционные счетчики CSP используются в «off-line»-анализе данных для подтверждения мюона в отобранных CMU/SMP триггером L1 событиях.

В настоящее время (май–сентябрь 2007 г.) подготавливается включение сцинтилляционных счетчиков CSP в «on-line»-триггер с условием уложиться в допустимый уровень триггера L1 ($\leq 1 \text{ кГц}$) при достижении мгновенной светимости тэватрона $3 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и выше.

4. ПРИМЕРЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С УЧАСТИЕМ В ОТБОРЕ СОБЫТИЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ МЮОННОГО ТРИГГЕРА CDF

В правой колонке таблицы приведены ссылки, указывающие, в каких экспериментах использовался соответствующий триггер.

4.1. Измерение массы t -кварка. Увеличение светимости тэватрона, возросший акцептанс установки CDF II и увеличение \sqrt{s} повысили выход событий с t -кварками в наборном сеансе Run II, начавшемся в 2002 г., что позволило перейти от изучения ограниченного числа событий к статистически обеспеченной физике t -кварков. При энергии $p\bar{p}$ -столкновений $\sqrt{s} = 1,96$ ТэВ t -кварки рождаются парами $t\bar{t}$, в основном через $q\bar{q}$ -аннигиляцию ($\approx 85\%$) или глюон-глюонное слияние ($\approx 15\%$) [1].

В Стандартной модели доминирующей модой распада t -кварка является $t \rightarrow Wb$. Топологии конечных состояний определяются распадами W :

- адронные распады обоих W -бозонов

$$t\bar{t} \rightarrow W^+bW^- \bar{b} \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}b\bar{b} \quad (\text{струи, } 44\%); \quad (1)$$

- адронный распад одного W -бозона и лептонный — другого

$$t\bar{t} \rightarrow W^+bW^- \bar{b} \rightarrow q\bar{q}l\nu_l b\bar{b} \quad (\text{лептон} + \text{струи, } 30\%); \quad (2)$$

- лептонные распады обоих W -бозонов

$$t\bar{t} \rightarrow W^+bW^- \bar{b} \rightarrow l\nu_l l\nu_l b\bar{b} \quad (\text{дилептон} + \text{струи, } 5\%), \quad (3)$$

где $l = e, \mu, \tau$.

Мода $W \rightarrow \tau\nu_\tau$ не исследуется из-за сложности идентификации τ -лептона. Чисто адронная мода наиболее вероятна, но характеризуется наличием большого фона в виде КХД-струй. Наиболее точные измерения массы t -кварка происходят в процессах (2) и (3). Все методы измерения массы t -кварка опираются на статистические сравнения экспериментальных распределений со смоделированными наборами, составленными из $t\bar{t}$ -событий и фоновых событий; последние определяются из Стандартной модели; любое расхождение в массах, измеренных в различных модах распада t -кварка, может указывать на наличие новых физических процессов.

На CDF до 2006 г. были измерены массы t -кварка в модах (2) и (3).

В топологии «лептон + струи» отбирается электронный или мюонный «кандидат» с $p_T > 20$ ГэВ в области $|\eta| < 1$, включающей сцинтилляционные счетчики CSP и CSX, и (по недостающей энергии) кандидат на нейтрино с потерянной энергией, превышающей 20 ГэВ. Эффективность триггера составляла 96% для электронов и 90% для мюонов и имела незначительную зависимость от p_T . Требовались также ≥ 4 струи с поперечной энергией $E_T > 15$ ГэВ (четвертая струя может иметь $E_T > 8$ ГэВ).

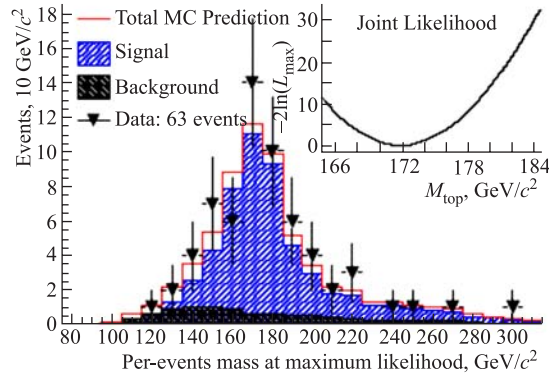


Рис. 17. Масса t -кварка и соответствующая функция правдоподобия (на вставке). Экспериментальные данные (точки) сравниваются с ожидаемым распределением (гистограмма), полученным моделированием ($M_{\text{top}} = 172,5$ ГэВ/ c^2) $t\bar{t}$ -распадов и фоновых событий [16]

Таким способом было отобрано 165 $t\bar{t}$ -событий для набранной светимости 318 pb^{-1} ; методы оценки фона подробно описаны в [15, 16].

Масса t -кварка в моде (2) «лептон+струи» для набранной светимости 318 pb^{-1} определялась двумя способами.

Первый способ [16] использует метод наибольшего правдоподобия в каждом отдельно взятом событии для определения массы t -кварка как функции основного матричного элемента продуктов $t\bar{t}$ -распадов. Перемножением функций правдоподобия от отдельных событий получается «объединенная» функция правдоподобия, определяющая массу t -кварка.

Второй способ, так называемый метод шаблонов, использует реконструированную эффективную массу m_t^{reco} и последующее сравнение распределения m_t^{reco} с «шаблонными» распределениями с примесью фона, полученными путем моделирования для набора масс t -кварка $M_{\text{top}} = 140\text{--}220$ ГэВ/ c^2 [17].

На рис. 17 показано распределение реконструированных эффективных масс при максимуме функции правдоподобия в первом методе. На основе 63 событий была измерена масса t -кварка $M_{\text{top}} = 173,2^{+2,6}_{-2,4}$ (стат.) $\pm 3,2$ (сист.) ГэВ/ c^2 [16].

Рис. 18 иллюстрирует результаты исследования массы t -кварка по методу шаблонов для разного числа струй, ассоциированных с b -кварком (b -tag). Во всех случаях видна согласованность гистограмм с фитированной кривой. Получен результат $M_{\text{top}} = 173,5^{+3,7}_{-3,6}$ (стат.) $\pm 1,3$ (сист.) ГэВ/ c^2 [17].

Топология «дилептон + струи» определяется двумя струями от b -кварков, двумя лептонами с большими поперечными импульсами и большой недостающей энергией (от двух нейтрино) от распадов W .

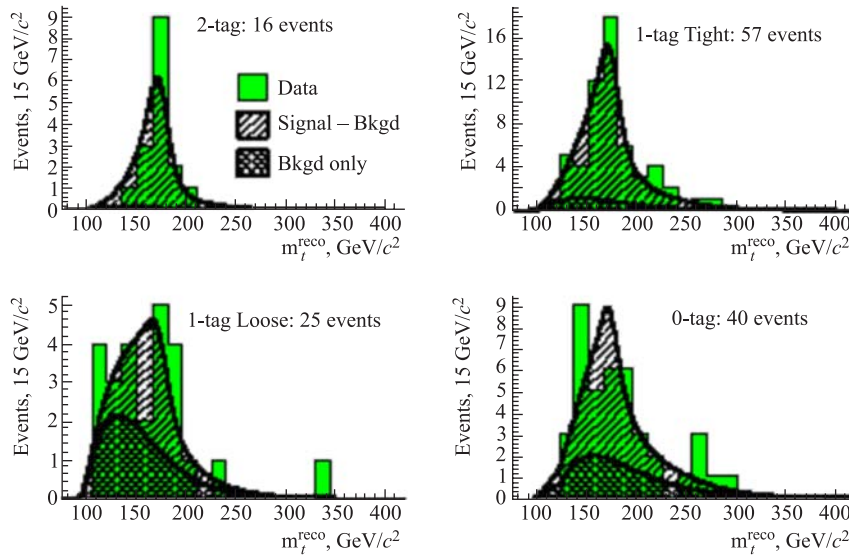


Рис. 18. Распределение масс m_t^{reco} в методе шаблонов; приведены также результаты комбинированного фита с использованием нормированных сигналов и фона [17]

Дилептонные данные набраны с помощью инклюзивных триггеров на электрон, попавший в центральный калориметр, с поперечной энергией $E_T > 18$ ГэВ или на мюон с поперечным импульсом $p_T > 18$ ГэВ/с в области $|\eta| < 1,1$, охватывающей сцинтилляционные счетчики CSP, CSX и BSU_F. Для электронов в передней области калориметра требуется $E_T > 20$ ГэВ. События должны обладать также недостающей поперечной энергией $E_T > 15$ ГэВ. С помощью инклюзивного лептонного триггера отобрано 33 кандидата в $t\bar{t}$ -события.

Методика восстановления массы t -кварка в дилептонной моде с помощью метода шаблонов [18] состоит из:

- восстановления массы t -кварка в каждом событии с применением дополнительных предположений об азимутальных углах нейтрино для проведения кинематической реконструкции события;
- построения шаблонов для сигнальных и фоновых смоделированных событий и параметризации этих шаблонов для получения функций плотности вероятности распределения масс t -кварков;
- фитирования функцией наибольшего правдоподобия набора масс от экспериментальных событий с привлечением функции плотности вероятности для получения итогового значения массы t -кварка.

В результате на установке CDF II определена масса t -кварка в дилептонном канале: $170,1 \pm 6,0$ (стат.) $\pm 4,1$ (сист.) ГэВ/ c^2 . Этот результат согласуется с массой t -кварка, полученной в канале «лептон + струи» на установке CDF II.

4.2. Другие эксперименты. Поиск аномальных событий с многолептонным выходом в $p\bar{p}$ -столкновениях при $\sqrt{s} = 1,96$ ТэВ [19]. Записывались события с требованием присутствия в триггере одного мюона с $p_T > 18$ ГэВ/ c в области $|\eta| < 1$ (таблица). Затем в «off-line»-анализе отбирались мюоны с $p_T > 20$ ГэВ/ c , $p_T > 8$ ГэВ/ c и $p_T > 5$ ГэВ/ c , димюонные события отбрасывались как фон. Обработаны данные, соответствующие накопленной светимости 346 пб $^{-1}$.

Поиск осуществлен отдельно для событий «3 лептона» и « ≥ 4 лептона». В обоих случаях количество событий согласуется с ожидаемыми фонами, предсказанными СМ. В рамках модели «супергравитация с нарушением R -четности» получены пределы на массу легчайшего нейтралино $M(\tilde{\chi}_1^0) > 110$ ГэВ/ c^2 и чарджино $M(\tilde{\chi}_1^\pm) > 203$ ГэВ/ c^2 на уровне достоверности 95 %.

Измерение сечения рождения $t\bar{t}$ -пары в $p\bar{p}$ -столкновениях при $\sqrt{s} = 1,96$ ТэВ [20]. Измерено сечение $\sigma_{t\bar{t}} = 7,5 \pm 2,1$ (стат.) $_{-2,2}^{+3,3}$ (сист.) $_{-0,4}^{+0,5}$ пб образования пары $t\bar{t}$ по данным с накопленной светимостью 311 пб $^{-1}$ в согласии с предсказанием СМ.

События отбирались с требованием « ≥ 6 струй» (адронная мода распада пары $t\bar{t}$). В данном случае все сцинтилляционные счетчики используются в «off-line»-анализе для отсеивания событий с зарегистрированным мюоном (лептонная мода распада пары $t\bar{t}$).

Измерение времени жизни Λ_b^0 по реакции распада $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0$ в $p\bar{p}$ -столкновениях при $\sqrt{s} = 1,96$ ТэВ [21]. Измерено время жизни Λ_b^0 -адрона в инклюзивном распаде $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0$ по данным с накопленной светимостью 1 фб $^{-1}$. С использованием полностью восстановленных распадов получено значение $\tau(\Lambda_b^0) = 1,593_{-0,078}^{+0,083}$ (стат.) $\pm 0,033$ (сист.) пс, по точности превосходящее опубликованное современное мировое среднее.

Мюоны отбирались в области $|\eta| \leq 0,6$ с использованием счетчиков CSP, в «off-line»-анализе с требованием $p_T > 1,4$ ГэВ/ c (таблица, строка 5), а в области $0,6 \leq |\eta| \leq 1$ триггером (с участием счетчиков CSX) на два мюона, $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ с условием $p_T > 2$ ГэВ/ c (таблица, строка 3).

ВЫВОДЫ

Мюонная система модернизированной установки CDF II насчитывает более 1140 сцинтилляционных счетчиков, более половины из которых — счет-

чики нового поколения со съемом света при помощи ленты из спектросмещающих оптоволокон.

Сбор данных, управление параметрами, оперативный контроль и мониторинг сцинтилляционных счетчиков обеспечиваются аппаратно-программным комплексом, который поддерживает необходимую эффективность мюонного комплекса CDF II при наборе физической информации в Run II на тэватроне FNAL.

Среди результатов, достигнутых с участием мюонного триггера, — весьма точные измерения масс t -кварка и W -бозона, наблюдение $B_S^0 - \bar{B}_S^0$ -осцилляций и другие данные.

Авторы благодарны Д. Беллеттини, Ю. А. Будагову, А. Н. Сисакяну и Д. Паулетте за поддержку, Г. Велеву, В. В. Глаголеву, А. А. Семенову и И. Е. Чирикову-Зорину за дискуссии и ценные советы при написании данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *The CDF II Collab.* The CDF II Detector Technical Design Report. Fermilab-Pub-96/390-E. 1996.
2. *Artikov A. et al.* Design and Construction of New Central and Forward Muon Counters for CDF II // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 538. P. 358–371.
3. *Cabrera S. et al.* Making the Most of Aging Scintillator // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 453. P. 245–248.
4. *Giromini P. et al.* The Central Muon Extension Scintillators (CSX). CDF Note 3898. 1996.
5. *Fernandez J. et al.* Test of the Central Muon Extension Scintillators (CSX). CDF Note 5006. 1999.
6. *Artikov A. et al.* The «Miniskirt» Counter Array at CDF II // Part. Nucl., Lett. 2002. V. 5. P. 25–39.
7. *Bellinger J. N. et al.* Intermediate Angle Muon Detectors for CDF II // Nucl. Instr. Meth. A (submitted).
8. *Pukhov O. et al.* Automatization of the Monitoring and Control of the Muon Scintillation Counters at CDF II // Part. Nucl., Lett. 2002. V. 5. P. 72–81.
9. *James E., Soderberg M.* Operation of Michigan TDC Boards at CDF. CDF Note 7164. 2004.
10. *Bromberg C.* Gain and Threshold Control of Scintillation Counters in the CDF Muon Upgrade for Run II // Intern. J. Mod. Phys. A. 2001. V. 16. 1C. P. 1143–1146.
11. *Bromberg C. et al.* A System to Control the Hamamatsu H5783 PMT Module and Condition Signals for TDC Readout. CDF Note 4990. 1999.
12. *Artikov A. et al.* On the Aging of the CSP and CSX Counters. CDF Note 7033. 2004.

13. *Ginsburg C. M. et al.* CDF Intermediate Muon Trigger. CDF Note 7694. 2005.
14. CDF online webpage: Run Summary for run 205991.
http://www-cdfonline.fnal.gov/java/cdfdb/servlet/Run_NUMBER=205991
15. *Acosta D. et al. (CDF Collab.)* // Phys. Rev. D. 2005. V. 71. P. 052003.
16. *Abulencia A. et al. (CDF Collab.)*. Measurement of the Top Quark Mass with the Dynamical Likelihood Method Using Lepton Plus Jets Events with b -Tags in $p\bar{p}$ Collisions at $s^{1/2} = 1.96$ TeV // Phys. Rev. D. 2006. V. 73. P. 092002.
17. *Abulencia A. et al. (CDF Collab.)*. Top Quark Mass Measurement Using the Template Method in the Lepton+Jets Channel at CDF II // Ibid. P. 032003.
18. *Abulencia A. et al. (CDF Collab.)*. Measurement of the Top Quark Mass Using Template Method on Dilepton Events in Proton–Antiproton Collisions at $s^{1/2} = 1.96$ TeV // Ibid. P. 112006.
19. *Abulencia A. et al. (CDF Collab.)*. Search for Anomalous Production of Multi-Lepton Events in $p\bar{p}$ Collision at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV. FERMILAB-PUB-06-482-E. 2007. 7 p.
20. *Abulencia A. et al. (CDF–Run II Collab.)*. Measurement of the $t\bar{t}$ Production Cross-Section in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV in the All-Hadronic Decay Mode // Phys. Rev. D. 2006. V. 74. P. 072005.
21. *Abulencia A. et al. (CDF Collab.)*. Measurement of the Λ_b^0 Lifetime in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0$ in Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 122001.