

ОБ УМЕНЬШЕНИИ СО ВРЕМЕНЕМ СВЕТОСБОРА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ МЮОННОГО ТРИГГЕРА УСТАНОВКИ CDF

А. М. Артиков¹, О. Е. Пухов, Д. Чохели²

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Дж. Паулетта

INFN и Университет Удины, Италия

Мюонная система спектрометра CDF играет важную роль в исследованиях процессов с тяжелыми кварками. Эффективное функционирование сцинтилляционных счетчиков, составляющих существенную часть мюонного триггера CDF, является необходимым условием при наборе экспериментальных данных.

Приведены результаты многолетних измерений количества света, собираемого с дальнего от фотоумножителя конца сцинтилляционной пластины, для различных типов счетчиков с целью прогнозирования срока их эффективной эксплуатации при проведении экспериментов.

The Muon System at CDF has an important role for investigation of processes with heavy quarks. Efficient functioning of the scintillation counters, considerably contributory to the CDF muon triggers, is a necessary condition for taking good data.

The results of the long-term measurements of the light yield collected at the far from photomultiplier end of the various types of scintillation counters are presented. The goal of this study is to estimate life length of effective operation for these counters in experiments.

PACS: 29.30.Aj, 29.40.Gx, 29.40.Mc, 29.90.+t

ВВЕДЕНИЕ

Регистрация мюонов является принципиально важной частью исследования большинства фундаментальных задач на тэватроне, включая изучение распадов c -, b -, t -кварков. Общим в исследовании процессов с тяжелыми кварками является присутствие в цепочке их распадов μ -мезонов (мюонов) [1].

Для обеспечения эффективной регистрации мюонов на CDF имеется мощный мюонный комплекс, состоящий из сцинтилляционных счетчиков и координатных детекторов, выполненных на основе дрейфовых камер (рис. 1). Максимальное время дрейфа для камер, расположенных в разных частях мюонной системы, варьируется от 800 нс до

¹ОИЯИ и ЯФЛ Самаркандского государственного университета, Узбекистан.

²ОИЯИ и ИФВЭИ Тбилисского государственного университета, Грузия.

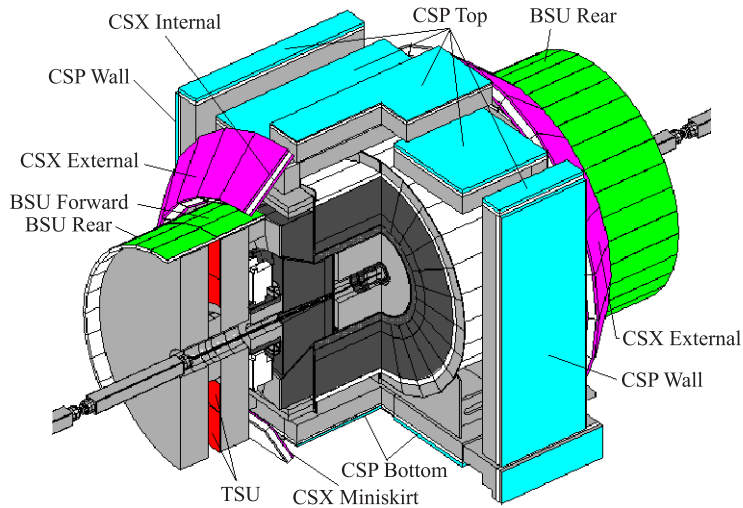


Рис. 1. Расположение сцинтилляционных счетчиков на установке CDF

1,4 мкс [1], что превышает время между двумя пересечениями протон-антипротонных пучков, составляющее 396 нс, и создает неопределенность во временной привязке событий. Сцинтилляционные счетчики, как более быстрый детектор, включенный в триггер, обеспечивают эффективное подавление фона и, фиксируя начало отсчета времени для поиска отклика в соответствующей дрейфовой камере, помогают однозначно выбрать искомое событие среди множества других, зарегистрированных дрейфовой камерой.

С учетом этого факта исследование старения (уменьшения со временем собираемого на фотокатод фотоумножителя света) сцинтилляционных счетчиков является актуальным ввиду возможности прогнозирования их долговременной эффективности.

Отметим, что целью данного исследования являлось определение ожидаемого срока эффективной работы действующих на CDF сцинтилляционных счетчиков мюонного комплекса, около 400 из которых используются с 1992–1994 гг.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ МЮОННЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ

Мюонные сцинтилляционные счетчики CDF совместно с дрейфовыми камерами этого мюонного комплекса расположены в самых удаленных от области столкновений пучков частях установки. Система мюонных сцинтилляционных счетчиков CDF покрывает по псевдобыстроте область $0 < |\eta| < 1,5$ и состоит из следующих основных подсистем (рис. 1) [1]:

- модернизированный центральный мюонный сцинтилляционный детектор (Central Muon Scintillator Upgrade: CSP, CSP Wall);
- расширение центрального мюонного сцинтилляционного детектора (Central Muon Scintillator Extension, CSX) и счетчики «Miniskirt» (MSK);
- сцинтилляционные счетчики передней мюонной системы: счетчики, облегающие

тороиды старого магнита CDF (Barrel Scintillator Upgrade, BSU), и счетчики, расположенные внутри этих тороидов (Toroid Scintillator Upgrade, TSU).

Система включает в себя счетчики разных типов: со съемом света плексигласовым световодом (так называемые «старые» счетчики), со съемом света спектросмещающими волокнами (так называемые счетчики нового поколения), а также использующие оба указанных способа съема света одновременно (так называемые «модернизированные»):

- CSP и CSP Wall — счетчики из прямоугольного сцинтиллятора размерами $320 \times 30 \times 2$ см, перекрывающие ($|\eta| \leq 0,6$; $\Delta\varphi = 360^\circ$) центральную часть CDF сверху, снизу, с севера и юга (Top, Bottom, North Wall, South Wall соответственно), всего 274 шт. Сцинтилляционные детекторы CSP, установленные на сторонах Top и Bottom, представляют собой счетчики нового поколения (рис. 2) со съемом света спектросмещающими волокнами, изготовленные в ОИЯИ [2, 3], а CSP Wall, установленные на North Wall и South Wall, — старые модернизированные [4] счетчики (рис. 3).

- Счетчики CSX [5], установленные на CDF, перекрывают область $0,6 \leq |\eta| \leq 1,0$ и $\Delta\varphi = 270^\circ$, имеют трапецидальную форму и размеры $180 \times 30/40 \times 2,5$ см (рис. 4). Это единственные счетчики на CDF, не претерпевшие модернизации со времени Run I. Счетчики MSK, которые перекрывают оставшиеся нижние $\Delta\varphi = 90^\circ$ по азимуту, также имеют трапецидальную форму (но разной длины), а свет собирается с обоих концов классическим плексигласовым световодом. Общее количество CSX- и MSK-счетчиков, задействованных в RUN II, — 367 (319 и 48 соответственно).

- Счетчики BSU, изготовленные в ОИЯИ [2, 3], расположены двумя кольцами (рис. 1) на тороидах ныне не используемого старого магнита на сторонах West и East и перекрывают азимутальный угол $\Delta\varphi = 255^\circ$ в области $1,0 \leq |\eta| \leq 1,25$ (forward) и $1,25 \leq |\eta| \leq 1,5$ (rear). Общее количество счетчиков на стороне West — 204 шт., East — 203 шт. Они представляют собой полный аналог новых CSP (рис. 2), но имеют сцинтиллятор меньшего размера: $167 \times 16 \times 1,5$ см.

- Счетчики TSU — это трапецидальные счетчики с размерами $65 \times 28,5/33 \times 1,5$ см, расположенные по кольцу (в восточной и западной части CDF) во внутренней части

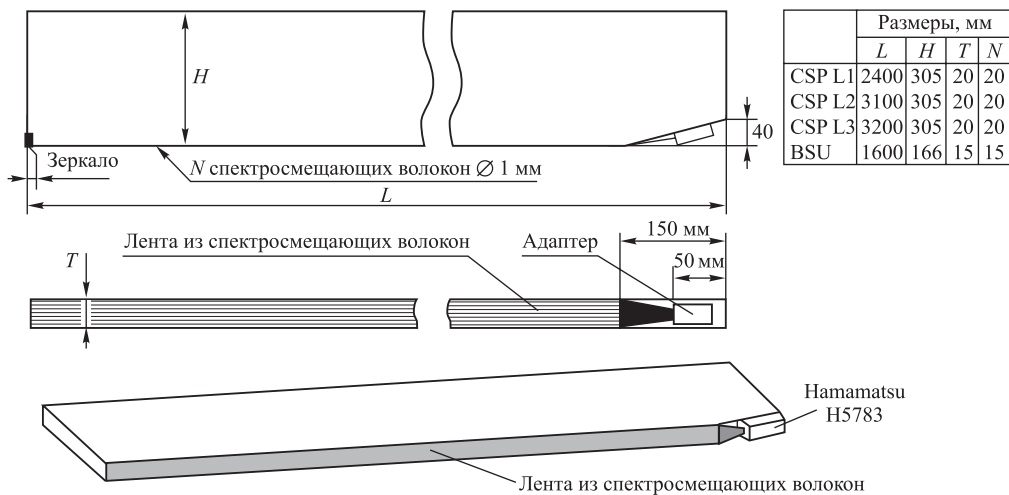


Рис. 2. Конструкция новых счетчиков CSP и BSU

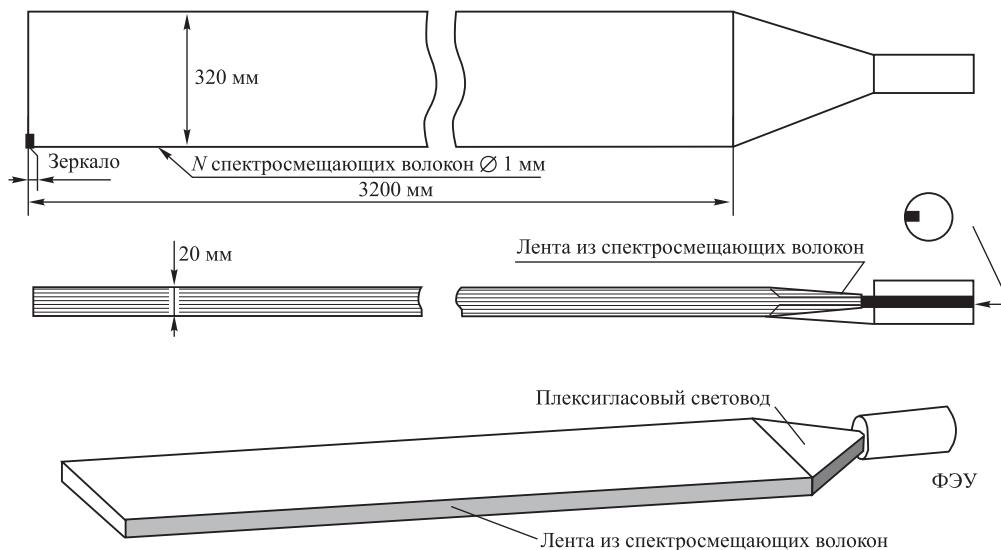


Рис. 3. Конструкция модернизированных счетчиков CSP Wall

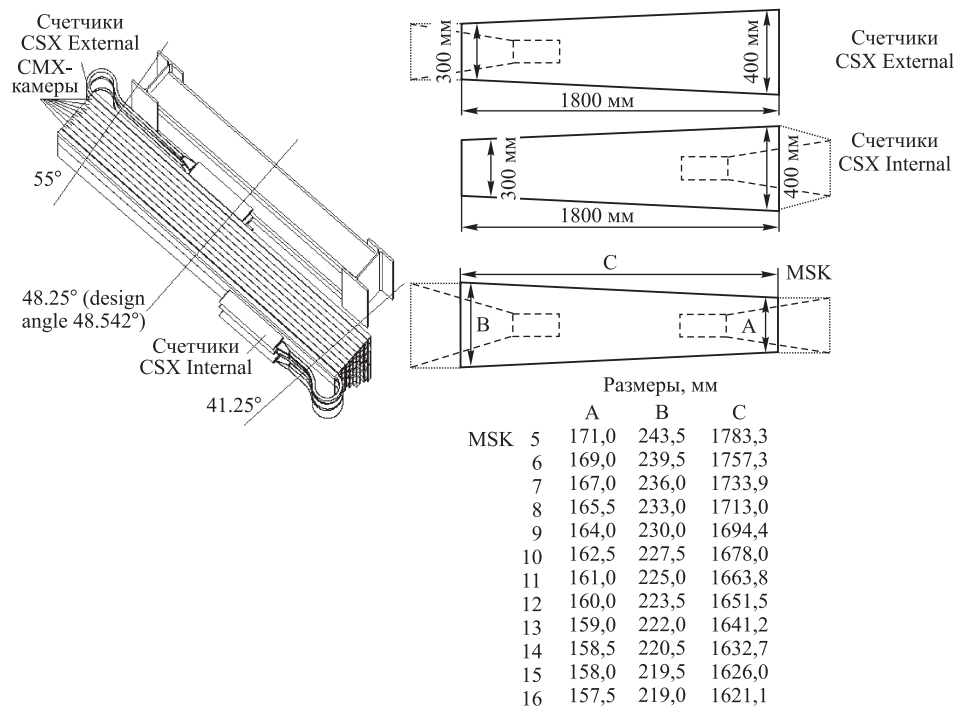


Рис. 4. Расположение счетчиков CSX относительно дрейфовых камер CMX и размеры счетчиков MSK и CSX Internal и CSX External

тороида старого магнита и перекрывающие азимутальный угол $\Delta\varphi = 360^\circ$ в области $1,25 \leq |\eta| \leq 1,5$, со съемом света спектросмещающими волокнами. Счетчики изготовлены в университете штата Мичиган, их общее количество — 144 шт.

Как видно, мюонная система CDF все еще включает значительное количество старых счетчиков, с измерения эффективностей которых и началось изучение нами проблемы старения сцинтилляционных детекторов.

2. ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОСБОРА МЕТОДОМ АБСОЛЮТНОЙ КАЛИБРОВКИ

Все проведенные нами измерения осуществлялись методом абсолютной калибровки спектрометрического канала, использующего фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), основная идея которого состоит в разложении спектра от ФЭУ и использовании некоторых извлеченных параметров для калибровочных целей [6]. Измерение светосбора сцинтилляционных детекторов в абсолютных единицах, то есть в числе фотоэлектронов, созданных на фотокатоде ФЭУ, является очень важным, так как позволяет не только определять эффективность детекторов, но и прогнозировать их долговременную стабильность, а также сравнивать параметры детекторов различных конструкций.

Измерения светосбора в 2002–2006 гг. проводились на собранном нами в Фермилаб стенде [7]. Установка работала в двух разных режимах. Первый режим применялся для калибровки спектрометрического канала, второй — для получения амплитудных спектров со счетчика от космических мюонов.

Для калибровки спектрометрического канала триггер вырабатывался импульсным генератором, запускающим быстрый синий светодиод МСН1А NSPB310А. Среднее количество фотонов, попадающих на фотокатод ФЭУ, регулировалось изменением амплитуды импульса, питающего светодиод. С помощью спектров от светодиода мы выявляли параметры спектрометрического канала и осуществляли контроль их временного дрейфа. Для этой цели калибровочные измерения проводились до и после каждого набора статистики на мюонах.

Физический триггер вырабатывался мюонным телескопом, состоящим из четырех сцинтилляционных счетчиков с размерами $8 \times 5 \times 1$ см, включенных в схему совпадений. Исследуемый счетчик располагался между ними так, чтобы триггерные счетчики

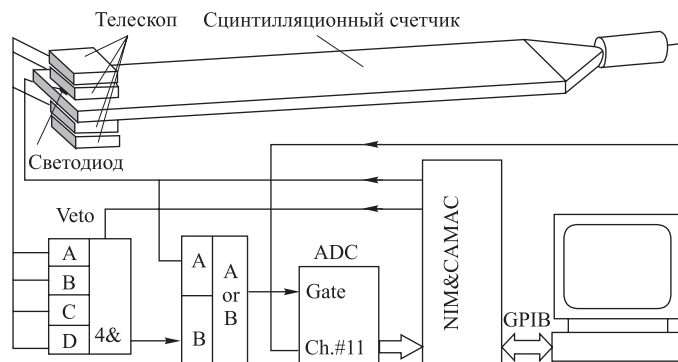


Рис. 5. Схема установки для измерения выхода света от сцинтилляционной вспышки, возникающей в счетчике при прохождении космических мюонов

оказались на максимальном удалении от ФЭУ (рис. 5). Для расширения динамического диапазона при измерениях спектров от космических мюонов использовался ослабитель импульсов. Из полученного спектра среднее значение сигналов от мюона, выраженное в количестве фотоэлектронов, находилось из выражения [8]:

$$N_{pe} = \frac{\langle Q \rangle - Q_0}{\langle Q_1 \rangle} K_{att}, \quad (1)$$

где $\langle Q \rangle$ — средняя амплитуда мюонного спектра; Q_0 — значение пьедестала; $\langle Q_1 \rangle$ — усредненный калибровочный параметр; K_{att} — коэффициент ослабления.

Использованные нами данные по светосборам счетчиков за период 1999–2000 гг. были получены нашими коллегами из FNAL и INFN [4, 9].

Таблица 1. Величины светосбора с дальнего от ФЭУ конца пластины, измеренные в разные годы, и оценки скорости старения для всех исследованных счетчиков

Счетчик	Светосбор N в фотоэлектронах							Относительное уменьшение световыхода ($N_{2003} - N_{2007} / N_{2003}$)	В год, %
	1999	2000	2002 (осень)	2003 (осень)	2004 (осень)	2006 (весна)	2007 (лето)		
CSP Wall (основа — поливинилтолуол)									
1	15,1			6,3	4,5	4,0	2,6	0,59	15,7
2	17,1			8,1	6,3	5,3	3,5	0,57	15,1
3	14,9			5,2	3,7	2,8	2,2	0,58	15,4
4	7,8			3,5	2,6	2,2	1,7	0,51	13,7
5	14,7			4,9	3,9	3,0	2,1	0,57	15,2
6	8,3			3,8	2,8	2,3	1,6	0,58	15,4
7	16,5			7,1	5,0	4,2	2,5	0,65	17,3
8	15,1			5,9	4,7	3,7	2,3	0,61	16,3
9	17,3			7,6	6,7	6,3	4,7	0,38	10,2
10	20,1			7,6	6,1	5,0	3,0	0,61	16,1
11	14,8			6,5	4,5	3,8	2,3	0,65	17,2
12	11,7			3,8	3,0	2,6	1,6	0,58	15,4
13	14,6			7,0	5,1	3,8	2,4	0,66	17,5
14	14,2			6,2	4,7	3,8	2,5	0,60	15,9
15	21			6,8	6,0	5,7	4,0	0,41	11,0
16	12,8			5,0	3,8	3,1	2,1	0,58	15,5
17	13,9			5,2	3,9	3,4	2,4	0,54	14,4
18	8,8			3,5	2,8	2,2	1,9	0,46	12,2
19	15,9			6,8	4,8	4,0	2,6	0,62	16,5
20	6,2			2,8	2,2	1,3	1,0	0,64	17,1
21	13,8			5,5	4,8	3,8	2,8	0,49	13,1
22	20,8			8,0	7,1	6,5	5,1	0,36	9,7
23	15,3			7,8	5,6	4,7	2,9	0,63	16,8
Сред. значение	14,4			5,9	4,5	3,8	2,6	0,56	14,9
CSX Internal (основа — поливинилтолуол)									
1				10,7	9,7	7,8	6,5	0,39	10,5
2				11,1	10,5	8,5	7,1	0,36	9,6

Окончание табл. 1

Счетчик	Светосбор N в фотоэлектронах							Относительное уменьшение световыхода ($N_{2003}-N_{2007}$)/ N_{2003}	В год, %
	1999	2000	2002 (осень)	2003 (осень)	2004 (осень)	2006 (весна)	2007 (лето)		
3				7,6	7,3	5,7	5,0	0,34	9,1
4				10,4	9,5	6,9	6,4	0,38	10,3
5				11,2	9,7	7,7	6,8	0,39	10,5
6				8,8	7,7	6,3	5,7	0,35	9,4
7				8,5	7,6	6,2	5,3	0,38	10,0
8				7,8	6,8	5,6	5,1	0,35	9,2
9				2,4	2,0	1,3	1,2	0,50	13,3
10				8,5	7,6	6,0	5,5	0,35	9,4
11				6,5	5,7	4,9	4,7	0,28	7,4
12				6,0	5,6	4,8	4,1	0,32	8,4
13				3,7	3,3	3,1	2,9	0,22	5,8
14				8,1	7,3	6,5	5,4	0,33	8,9
15				7,4	6,7	6,3	6,1	0,18	4,7
16				9,5	8,4	6,9	5,3	0,44	11,8
17				9,3	8,2	6,5	5,8	0,38	10,0
Сред. значение				8,1	7,3	5,9	5,2	0,35	9,3
BSU (основа — полистирол)									
1		35,0		27,3	25,5	23,3	22,3	0,18	4,9
2		27,6		21,0	19,2	18,4	16,9	0,20	5,2
3		36,8		26,4	24,6	22,4	20,2	0,23	6,3
4		35,2		26,3	24,5	22,3	19,8	0,25	6,6
5		38,0		28,5	26,0	24,6	22,1	0,22	6,0
6		33,5		26,1	24,6	20,3	19,4	0,26	6,8
7		34,0		26,5	24,7	23,7	20,2	0,24	6,3
8		24,0		18,1	16,7	16,0	14,5	0,20	5,3
9		20,0		15,1	14,2	12,8	10,3	0,32	8,5
10		37,0		28,5	26,5	24,5	22,6	0,21	5,5
11		30,3		22,7	20,8	19,2	16,2	0,29	7,6
12		34,5		26,5	24,3	23,3	20,3	0,23	6,2
13		37,0		25,1	23,1	17,0	16,7	0,33	8,9
14		34,2		25,9	23,5	22,2	21,6	0,17	4,4
15		36,2		26,8	25,5	23,7	22,0	0,18	4,8
16		33,6		24,9	23,0	20,5	18,2	0,27	7,2
17		32,0		—	23,8	20,7	17,6		
Сред. значение		32,9		24,7	23,0	20,9	18,9	0,24	6,3
CSP (основа — полистирол)									
1		18,8	15,4	14,0	12,5	9,7	8,4	0,40	10,7
2		12,5	10,6	8,9	8,3	7,0	6,4	0,28	7,5
Сред. значение		15,7	13,0	11,5	10,4	8,4	7,4	0,34	9,1

С применением методики, описанной выше, в течение ряда лет нами измерялся светосбор для счетчиков нового поколения CSP (2 шт.) и BSU (17 шт.), а также для модернизированных CSP Wall (23 шт.) и старых CSX (17 шт.) счетчиков. Измерения проводились во время длительных остановок тэватрона, так как большинство старых счетчиков снималось с установки CDF на это время для проведения исследований светосбора на стенде.

Результаты измерений для всех исследовавшихся счетчиков даны в табл. 1, в последней колонке которой приведена оценка скорости ежегодного уменьшения светосбора (скорость старения), полученная за период времени 2003–2007 гг. Из сравнения средней величины скорости старения с индивидуальными значениями внутри каждой группы счетчиков видно, что однотипные счетчики имеют близкие темпы старения. Расчеты показывают, что их вариации находятся в пределах $\pm 20\%$ от среднего значения. Этот экспериментальный факт согласуется с выводом работы [3], что естественное старение сцинтилляционного счетчика в основном определяется деструкцией полимерной основы. А относительно небольшие вариации скорости старения счетчиков объясняются неизбежными вариациями технологического процесса изготовления сцинтиллятора и детектора на его основе.

По вышеизложенным причинам в дальнейшей интерпретации полученных результатов использованы только средние значения для групп однотипных счетчиков.

Ввиду малого количества доступных для измерений счетчиков CSP для получения достоверных данных об их старении нами проведено дополнительно исследование поведения во времени технической длины ослабления¹ этих детекторов.

Следует также отметить, что исследование старения счетчиков TSU и MSK нами не проводилось по следующим причинам:

- Относительно большой светосбор (> 15 фотоэлектронов) и малые геометрические размеры счетчиков TSU дают основания полагать, что понижение эффективности счетчиков данного типа будет достаточно медленным процессом. Такую же аргументацию можно применить для счетчиков MSK, имевших средний светосбор более 80 фотоэлектронов в 2001 г. [11], съем света у которых происходит с обоих концов пластины (рис. 4).

- В конструкции счетчиков TSU изначально заложена возможность значительного повышения собираемого света путем приклеивания к торцу сцинтилляционной пластины спектросмещающих волокон, в настоящее время просто прижатых к нему диффузно-отражающей свет бумагой.

Особенности счетчиков, полученные результаты и их интерпретация приводятся ниже.

2.1. Модернизированные сцинтилляционные счетчики CSP Wall. В счетчиках CSP Wall, применяющихся на CDF с 1992 г., используется широкоизвестный NE 114² сцинтиллятор на поливинилтолуольной основе с размерами $320 \times 30 \times 2$ см. Классический съем света плексигласовым световодом, применявшийся изначально в этих счетчиках, был несколько видоизменен в 1999 г. в результате модернизации [4], которая заключалась в приклеивании к одной длинной узкой грани пластины ленты из спектросмещаю-

¹Техническая длина ослабления, называемая TAL, пластмассовой сцинтилляционной пластины определяется как длина, на которой световой сигнал уменьшается в e раз [3, 10]. В нашем случае вместо сцинтиллятора подразумевается система «сцинтиллятор + спектросмещающие волокна».

²Сцинтиллятор NE 114 был изготовлен фирмой «Nuclear Enterprises Ltd». Этот продукт эквивалентен BC 416, который в настоящее время изготавливается фирмой «Vicron Corp».

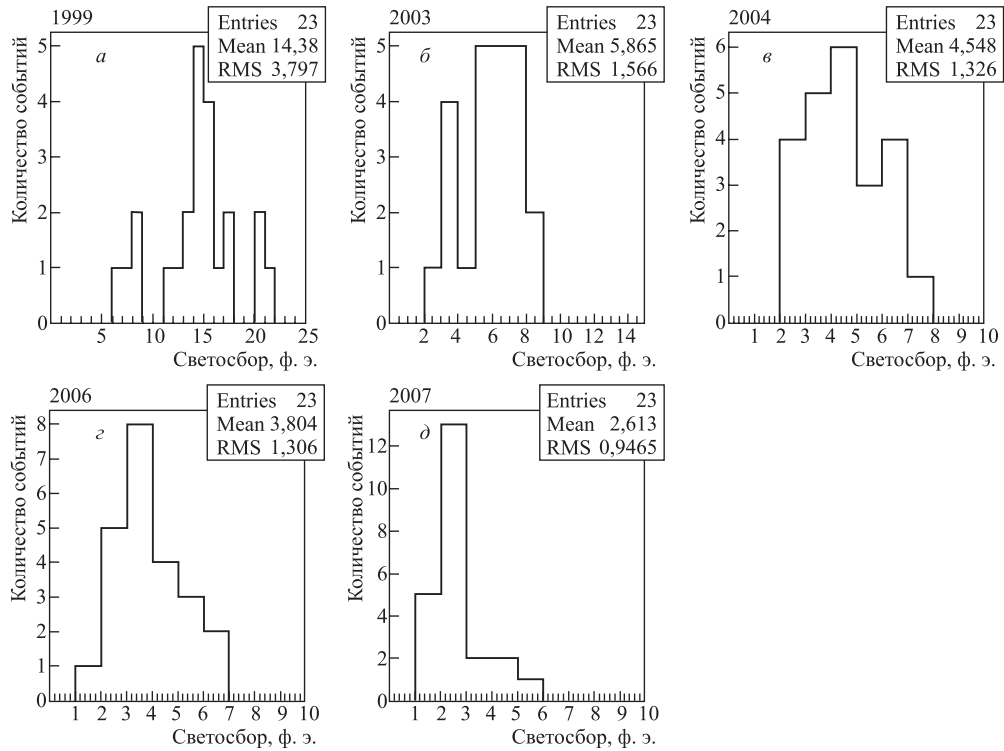


Рис. 6. Распределения значений светосбора 23 модернизированных счетчиков CSP Wall, полученные в разные годы

Таблица 2. Величины среднего значения светосбора с дальнего от ФЭУ конца пластины (для CSP даны значения и с ближнего конца) для исследуемых наборов счетчиков, измеренные в разные годы (колонки 2–7). Оценки скорости старения (колонки 8, 9)

Набор счетчиков	Средний светосбор N в фотоэлектронах							Наблюдаемое уменьшение световыхода $\frac{N_{2003} - N_{2007}}{N_{2003}}$	В Год, %
	1999	2000	2002 (осень)	2003 (осень)	2004 (осень)	2006 (весна)	2007 (лето)		
CSP Wall	14,4			5,9	4,6	3,8	2,6	0,56	14,9
CSX Internal				8,1	7,3	5,9	5,2	0,36	9,5
BSU		32,9		24,7	23	20,9	18,9	0,23	6,3
CSP		15,7	13	11,5	10,4	8,4	7,4	0,36	9,5
CSP (экстраполированное значение светосбора с ближайшего к ФЭУ конца ($x = 0$ см))			26	24,5	22,7	19,1	17,5	0,29	7,6

щих волокон (WLS). Концы волокон собирались в жгут и через канавку, прорезанную в световоде, подводились к фотокатоду ФЭУ (рис. 3). Таким образом, светосбор с дальнего конца пластины был увеличен почти в три раза, и его среднее значение в 1999 г. для 23 контрольных счетчиков составило $\sim 14,4$ фотоэлектрона (рис. 6) [4].

Наши измерения для этой же контрольной группы счетчиков в 2003, 2004, 2006 и 2007 гг. показали средний светосбор с дальнего конца пластины 5,9, 4,5, 3,8 и 2,6 фотоэлектронов соответственно (рис. 6, 9). Основные результаты даны в табл. 2.

Следует обратить внимание на то, что летом 2007 г. средняя эффективность регистрации (при пролете MIP-частицы через дальний от ФЭУ конец сцинтилляционной пластины) испытуемых 23 счетчиков была $\sim 88\%$ (2,6 фотоэлектрона). Мы предполагаем, что к концу 2009 г. она понизится до $\sim 82\%$ (~ 2 фотоэлектрона). То есть худшие из модернизированных счетчиков CSP Wall уже сейчас имеют невысокую эффективность регистрации мюонов, пролетевших в дальнем от ФЭУ конце пластины, и, по нашему мнению, подлежат скорейшей замене.

2.2. Счетчики CSX. В счетчиках CSX использован сцинтиллятор из той же поставки, что и для CSP Wall счетчиков, на поливинилтолуольной основе с размерами $180 \times 30/40 \times 2,5$ см (рис. 4). Большая толщина, меньшая длина и трапециевидная геометрия пластины обеспечивают больший светосбор с конца пластины, чем в случае счетчиков CSP Wall. Счетчики CSX используются на установке CDF с 1994 г. Они установлены на внутренней (Internal) и внешней (External) сторонах дрейфовых камер CMX (рис. 4) [9]. Средний светосбор со счетчиков CSX в 1999 г. составил 12 фотоэлектронов [9], и во время модернизации CDF, ввиду того, что их полный демонтаж

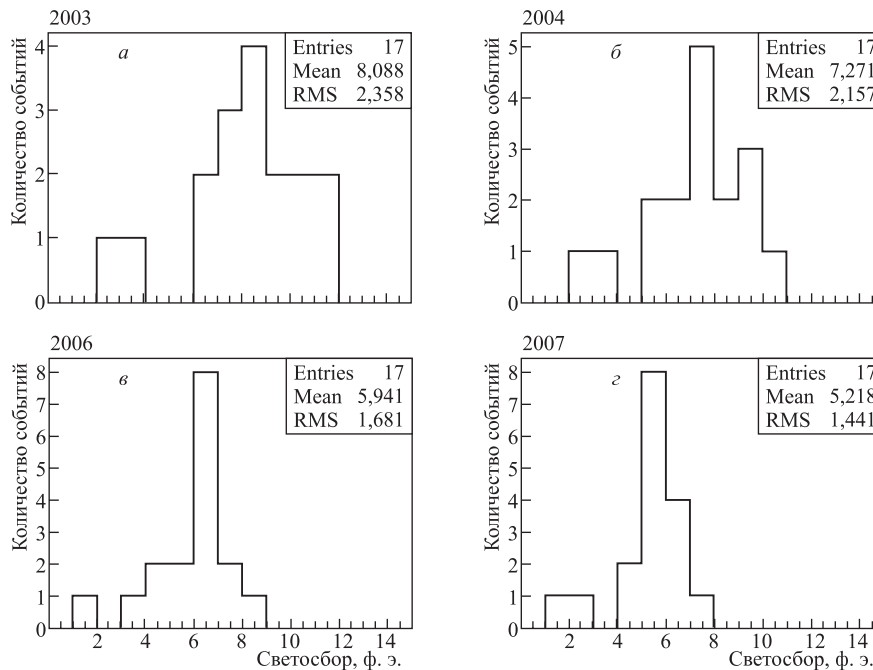


Рис. 7. Распределения значений светосбора 17 счетчиков CSX, полученные в разные годы

невозможен без полного демонтажа дрейфовых камер, было принято решение использовать счетчики CSX для набора данных в Run II без дополнительных усовершенствований, увеличивающих светосбор.

Сложность доступа к CSX External счетчикам была причиной того, почему мы провели исследования только для CSX Internal счетчиков. В счетчиках CSX Internal и External используется одинаковый трапециевидальной формы сцинтиллятор, но светосбор происходит с разных концов (рис. 4), и по этой причине счетчики CSX External имеют меньший светосбор, чем счетчики CSX Internal. Следовательно, мы не можем использовать полученный в 1999 г. средний светосбор 12 фотоэлектронов [9], так как тогда измерения охватывали как счетчики CSX Internal, так и счетчики CSX External.

Наши измерения светосбора для контрольной группы из 17 счетчиков CSX в 2003, 2004, 2006 и 2007 гг. показали средний светосбор с дальнего конца пластины 8,1, 7,3, 5,9 и 5,2 фотоэлектронов соответственно (рис. 7, 9). Основные результаты даны в табл. 2.

Следует отметить, что летом 2007 г. счетчики CSX еще имели достаточную среднюю эффективность регистрации мюонов около 95 % (5,2 фотоэлектрона). Расчеты показывают, что эти счетчики к концу 2009 г. будут иметь среднее значение светосбора (~ 4 фотоэлектрона) с конца пластины.

2.3. Счетчики BSU. Счетчики BSU установлены на CDF в 2000 г. Они изготовлены из сцинтилляционных пластин UPS 923A¹ с размерами $167 \times 16 \times 1,5$ см на основе полистирола с применением новой техники светосбора спектросмещающими волокнами (рис. 2).

Значительно более короткое по сравнению с длиной пластины расстояние, с которого собирается свет спектросмещающим оптоволоком, должно было, по нашему мнению, существенно снизить влияние на светосбор таких факторов, как ухудшение качества поверхности пластины и уменьшение ее прозрачности. То есть скорость старения (уменьшение со временем собираемого на фотокатоде ФЭУ света) для такого типа счетчиков должна быть меньше, чем для счетчиков с классическим съемом света плексигласовым световодом.

Наши измерения светосбора для контрольной группы из 17 счетчиков BSU в 2000, 2003 (светосбор измерен только для 16 счетчиков из данной контрольной группы), 2004, 2006 и 2007 гг. показали средний светосбор с дальнего конца пластины 32,9, 24,7, 23,0, 20,9 и 18,9 фотоэлектронов соответственно (рис. 8, 9). Основные результаты даны в табл. 2.

Среднее значение светосбора в 2007 г. — 18,9 фотоэлектрона и невысокий темп старения подтверждают, что счетчики BSU прослужат на установке CDF без заметного уменьшения эффективности регистрации мюонов до предполагаемой остановки набора экспериментальных данных — в конце 2009 г.

2.4. Новые счетчики CSP. Новые счетчики CSP установлены на CDF в 2000 г. Они, так же как счетчики BSU, изготовлены из сцинтилляционных пластин на основе полистирола с размерами $320 \times 30 \times 2$ см с применением новой техники светосбора спектросмещающими волокнами (рис. 2).

Большие размеры счетчиков CSP и крайне затрудненный доступ к ним, расположенным в высшей и самой нижней областях центральной части установки CDF, сделали

¹Ukrainian Plastic Scintillator 923A (UPS 923A) был изготовлен в Институте сцинтилляционных материалов, Харьков, Украина.

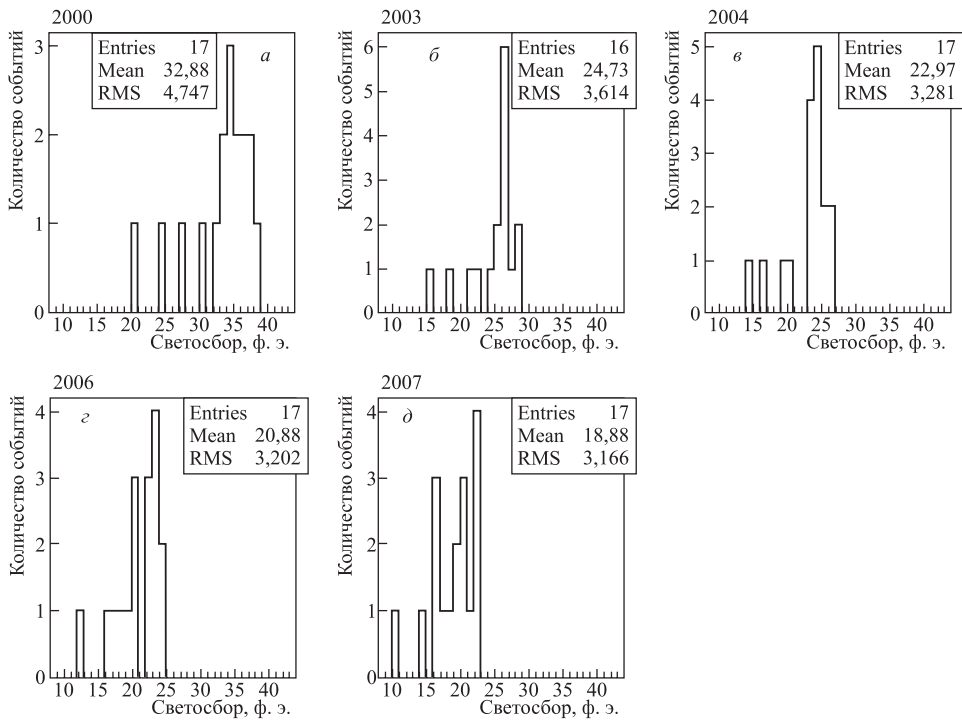


Рис. 8. Распределения значений светосбора 17 счетчиков BSU, полученные в разные годы

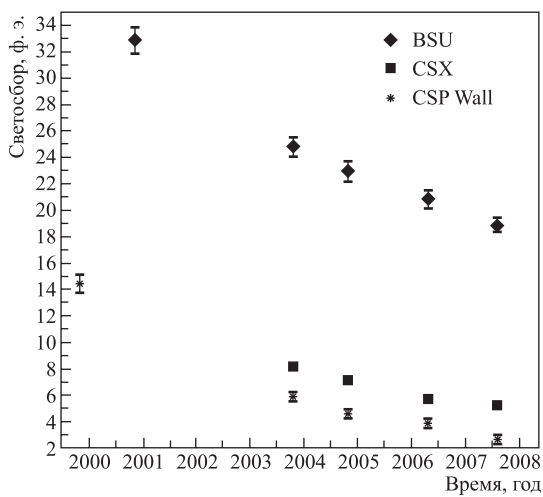


Рис. 9. Зависимость средних значений светосбора от времени для счетчиков CSP Wall, CSX и BSU

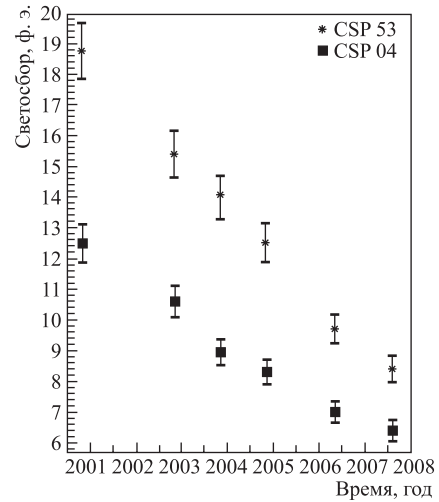


Рис. 10. Зависимость значений светосбора с дальнего конца пластины ($x = 310$ см) от времени для двух счетчиков CSP

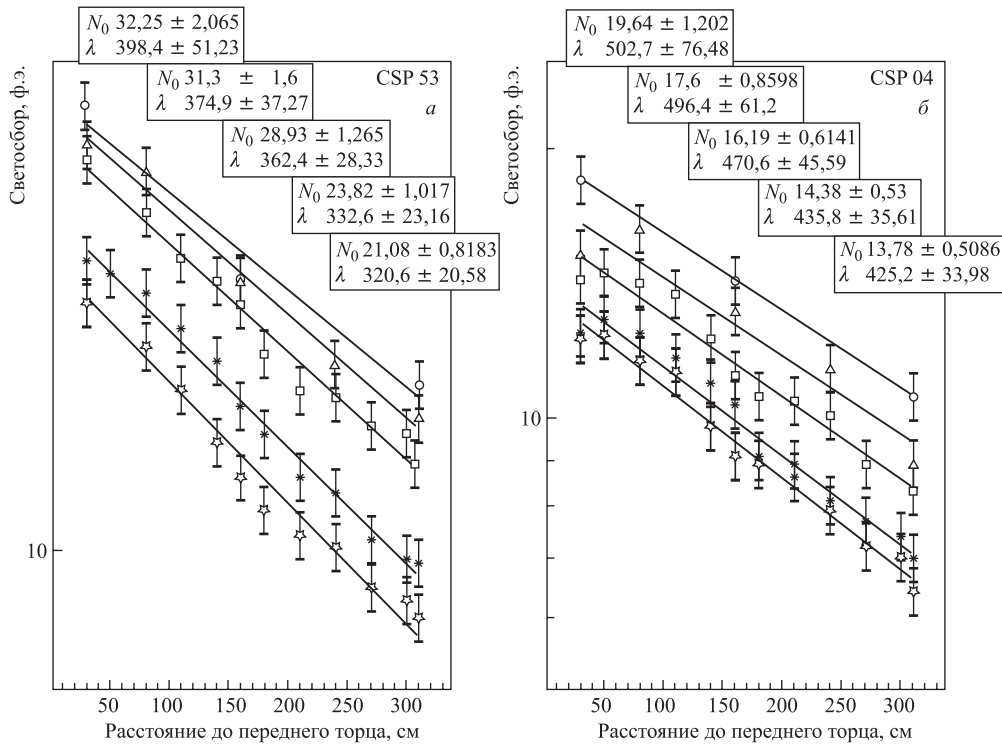


Рис. 11. Зависимость светосбора от расстояния до ФЭУ, измеренная в разные годы, для двух счетчиков CSP

невозможным проведение исследований на большом количестве этих детекторов, как это было в случаях со счетчиками CSP Wall, CSX и BSU. Для измерений мы использовали два тестовых (запасных) CSP-счетчика.

Средние величины светосбора с дальнего от ФЭУ конца пластины для этих двух счетчиков, измеренные в разные годы, приведены в табл.2. На рис.10 даны графики зависимости светосбора от времени для обоих счетчиков.

Для детального исследования старения этих двух счетчиков мы в 2002–2007 гг. провели также измерение зависимости светосбора от расстояния до ФЭУ (рис.11). Полученные результаты аппроксимированы экспоненциальной функцией [12]:

$$N_x = N_0 e^{-x/\lambda}, \quad (2)$$

где N_0 — светосбор с расстояния 0 см от ФЭУ счетчика; x — расстояние от ФЭУ счетчика; N_x — светосбор с расстояния x от ФЭУ счетчика; λ — TAL счетчика.

Полученные данные позволили нам определить техническую длину ослабления λ и ее изменение со временем (рис.11).

Рис.12 отражает слабое уменьшение величины TAL для счетчиков CSP со временем.

При сравнении прямых линий, характеризующих λ (рис.11), наблюдается небольшое изменение угла наклона. Это указывает на вклад старения оптоволоконной ленты в уменьшение собираемого света со временем.

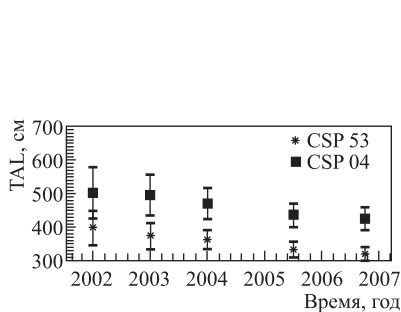


Рис. 12. Зависимость TAL от времени для двух счетчиков CSP

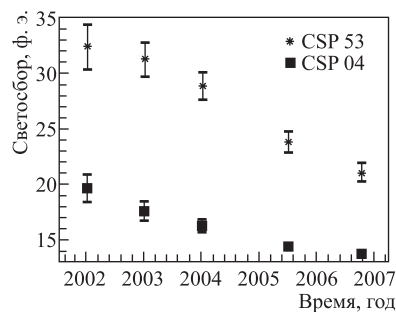


Рис. 13. Зависимость экстраполированных значений светосбора с ближайшего к ФЭУ конца пластины ($x = 0$ см) от времени для двух счетчиков CSP

В самом деле, наблюдаемое на рис. 10 уменьшение количества света, собранного с дальнего от ФЭУ конца пластины, с течением времени характеризует интегральное ухудшение свойств системы «сцинтилятор + оптоволокно», таких как ухудшение прозрачности и состояния поверхности пластины и оптоволокну со временем, ухудшение свойств переизлучающих и сцинтиллирующих добавок, а также полистирола и материала оптоволокну под воздействием радиации и т. д. Можно следующим образом отделить влияние старения оптоволокну от влияния старения пластика на уменьшение светосбора со временем.

Взяв расчетные значения светосбора в точке $x = 0$ из рис. 11, мы можем построить график, характеризующий только лишь старение пластика, так как сцинтиляционный свет в данном случае, пройдя по ширине пластика и переизлучившись в оптоволокну, проходит ничтожно малое расстояние по нему до ФЭУ (рис. 13). Обращаем внимание, что в случае, приведенном на рис. 10, учитывался светосбор с дальнего от ФЭУ конца пластины, то есть когда сцинтиляционный свет, пройдя по ширине пластика и переизлучившись в оптоволокну, проходил полную его длину до ФЭУ.

Сравнивая рис. 10 и 13, можно видеть, что влияние деградации свойств оптоволокну на уменьшение светосбора со временем гораздо слабее (см. табл. 2) влияния ухудшения свойств сцинтиляционной пластины.

ВЫВОДЫ

В 2000–2007 гг. нами проведены измерения светосбора различных типов счетчиков, используемых на установке CDF.

Установлено, что влияние старения пластика на уменьшение собираемого света со временем значительно превосходит влияние старения оптоволокну.

По этой причине наблюдаемое быстрое старение CSP Wall по сравнению со счетчиками CSP во многом объясняется более быстрым ухудшением из-за воздействия естественных причин и радиации прозрачности сцинтиляционной пластины на основе поливинилтолуола по сравнению с пластиной на основе полистирола [3, 10]. Применение

оптоволоконного съема света в счетчиках CSP Wall в известной мере позволило нивелировать эту разницу. Использование только лишь классического съема света для этих счетчиков привело бы к увеличению скорости старения до 30 % в год [4].

Расчеты показывают, что счетчики CSP Wall к концу 2009 г. достигнут очень низкого среднего уровня светосбора (~ 2 фотоэлектрона) с конца пластины.

Следует отметить, что уменьшение величины TAL со временем крайне мало для счетчиков (со съемом света спектросмещающими волокнами) CSP.

Если распространить полученные значения светосборов для тестовых счетчиков CSP на все счетчики CSP, то можно прогнозировать, что эти счетчики прослужат на установке CDF без существенного уменьшения эффективности регистрации мюонов до конца 2009 г.

Счетчики CSX имеют большую (в 1,7 раза) толщину сцинтилляционной пластины, чем счетчики BSU, при почти одинаковых длинах счетчиков (BSU — 167 см, CSX — 180 см) и трапециевидную форму, дающую дополнительные преимущества сбора света. Отметим, что, несмотря на это, скорость старения счетчиков CSX больше скорости старения счетчиков BSU (см. табл. 2). Это можно объяснить следующими факторами: разными полимерными основами сцинтилляционных пластин (поливинилтолуол — в случае со счетчиками CSX, полистирол — в случае BSU), а также разными способами съема света (плексигласовым световодом в счетчиках CSX и оптоволоконной лентой в счетчиках BSU).

Наши измерения светосбора для счетчиков CSX в 2007 г. дали величину 5,2 фотоэлектрона. Расчеты показывают, что эти счетчики к концу 2009 г. будут иметь средний уровень светосбора (~ 4 фотоэлектрона) с конца пластины, превышающий значение аналогичного параметра, достигнутого счетчиками CSP Wall в настоящее время.

Следует отметить, что счетчики BSU прослужат на установке CDF без заметного уменьшения эффективности регистрации мюонов до предполагаемого окончания набора статистики на CDF — в конце 2009 г.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Ю. А. Будагову¹, В. В. Глаголеву¹, Ф. В. Прокошину¹, И. Е. Чирикову-Зорину¹, Г. А. Члачидзе¹, Г. Вениер (G. Venier²) и С. Реиа (S. Reia²) за значительную помощь в проведении измерений и полезные дискуссии.

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. *Artikov A. et al.* New-Generation Large-Area Muon Scintillation Counters with Wavelength Shifter Fiber Readout for CDF II // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 3(132). С. 81–102.
4. *Cabrera S. et al.* Making the Most of Aging Scintillator // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 453. P. 245–248.

¹ОИЯИ, Дубна, Россия.

²INFN, Триест, Италия.

5. *Giromini P. et al.* The Central Muon Extension Scintillators (CSX). CDF Note 3989. 1996.
6. *Bellamy E.H. et al.* Absolute Calibration and Monitoring of a Spectrometric Channel Using a Photomultiplier // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 339. P. 468–476.
7. *Artikov A. et al.* On the Aging of the CSP and CSX Counters. CDF Note 7033. 2004.
8. *Chirikov-Zorin I. et al.* Method for Precise Analysis of the Metal Package Photomultiplier Single Photoelectron Spectra // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 456. P. 310–324.
9. *Fernandez J. et al.* Test of the Central Muon Extension Scintillators (CSX). CDF Note 5006. 1999.
10. *Artikov A. et al.* Properties of the Ukraine Polystyrene-Based Plastic Scintillator UPS 923A // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 555. P. 125–131.
11. *Artikov A. et al.* The «Miniskirt» Counter Array at CDF-II // Письма в ЭЧАЯ. 2002. Т. 5, № 5(114). С. 25–39.
12. *Bellamy E.H. et al.* Test of Long Scintillation Counters for Large Supercollider Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 343. P. 484–488.

Получено 16 октября 2007 г.