



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2007-6
ОНФ

В.А. Беззубов, И.А. Васильев, В.Н. Евдокимов, В.В. Липаев, А.А. Щукин
(ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия)

И.Н. Чурин

(Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия)

Д.С. Денисов, В.М. Подставков

(Фермилаб, Батавия, США)

КАЛИБРОВКА СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ТРИГГЕРНОГО ДЕТЕКТОРА ПЕРЕДНЕЙ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА D0 В ФЕРМИЛАБЕ

Направлено в ПТЭ

Протвино 2007

Аннотация

Беззубов В.А., Васильев И.А., Евдокимов В.Н. и др. Калибровка сцинтилляционного триггерного детектора передней мюонной системы эксперимента D0 в Фермилабе: Препринт ИФВЭ 2007–6. – Протвино, 2007. – 13 с., 14 рис., 1 табл., библиогр.: 5.

Изложена процедура светодиодной калибровки сцинтилляционного триггерного детектора передней мюонной системы установки D0 на ускорителе Теватрон (Фермилаб, Батавия, США). Отклонение за четыре года работы амплитуд сигналов, усредненных по 4214 счетчикам, не превысило 4% с сигмой распределения этих отклонений по всем счетчикам 10%. За этот же период сигналы остались стабильными во времени в пределах 0,23 нс с сигмой распределения отклонений 0,52 нс. Также изложена процедура калибровки детектора, основанная на измерении амплитудного отклика счетчиков на прохождение через них мюонов, образованных в результате протон-антипротонных столкновений на ускорителе Теватрон. Изменения абсолютной величины амплитудных откликов за четыре года работы не превышают $\begin{matrix} +3\% \\ -9\% \end{matrix}$.

Abstract

Bezzubov V.A., Vasilyev I.A., Evdokimov V.N. et al. Calibration of Scintillation Trigger Detector of the Forward Muon System for the D0 Experiment at Fermilab : IHEP Preprint 2007–6. – Protvino, 2007. – p. 13, figs. 14, tables 1, refs.: 5.

The LED calibration procedure of the forward muon trigger scintillation detector for the D0 experiment at Tevatron (Fermilab, Batavia, USA) is described. The signal amplitude variations averaged over 4214 counters do not exceed 4% with sigma of 10% over a period of 4 years. Calibrated timing is stable within 0.23 ns with sigma of 0.52 ns over the same period of time. The calibration based on measurement of counters amplitude response from muons produced in proton-antiproton collisions is presented as well. The amplitude variations over a period of 4 years do not exceed $\begin{matrix} +3\% \\ -9\% \end{matrix}$.

Введение

Точная временная информация со сцинтилляционных счетчиков важна для эффективной работы мюонных триггеров и измерений времени пролета частиц. Стабильный амплитудный отклик обеспечивает высокую эффективность регистрации мюонов и низкую чувствительность к шумам. Для мониторинга стабильности временных сигналов, коэффициентов усиления фотоумножителей и стабильности электроники была разработана светодиодная система калибровки сцинтилляционного триггерного детектора на 4214 каналов передней мюонной системы установки D0 в Фермилабе.

Калибровка сцинтилляционных счетчиков на мюонах, образовавшихся в результате протон-антипротонных столкновений в Теватроне в ходе сеанса эксперимента D0, начавшегося в 2001 г., важна для исследования стабильности работы счетчиков в целом, поскольку при этом проверяется не только стабильность работы фотоумножителей и электроники, но и сцинтиллятора и переизлучателей спектра.

1. Описание системы сцинтилляционных счетчиков эксперимента D0

Эксперимент D0 был предложен в 1983 г. для изучения протон-антипротонных столкновений с энергией в системе центра масс 1,8 ТэВ на ускорителе Теватрон в Фермилабе (Батавия, США). Мюонная система установки должна была обеспечивать эффективную регистрацию и идентификацию мюонов в широком диапазоне углов и импульсов и при этом иметь низкий фон. Стабильная и надежная многолетняя работа и радиационная стойкость в условиях высокой светимости также важны для мюонной системы. Эффективная работа установки в ходе первого сеанса (1992–1996 гг.) привела к открытию топ-кварка [1] и получению еще ряда важных результатов. По окончании строительства нового инжектора и связанных с этим модернизаций Теватрона ускоритель начал свою работу во втором сеансе в марте 2001 г.

Чтобы в наиболее полной мере реализовать новые возможности Теватрона, установка была значительно модернизирована. Схема модернизированной установки D0 показана на рис. 1. Северная половина установки обозначена на рис. 1 как “north”, а южная — как “south”. В системе координат установки D0 вдоль протонного пучка направлена ось Z, а

поперек пучка – ось X (горизонтально вправо от пучка) и ось Y (вертикально вверх). Начало системы координат расположено в середине центрального трекового детектора.

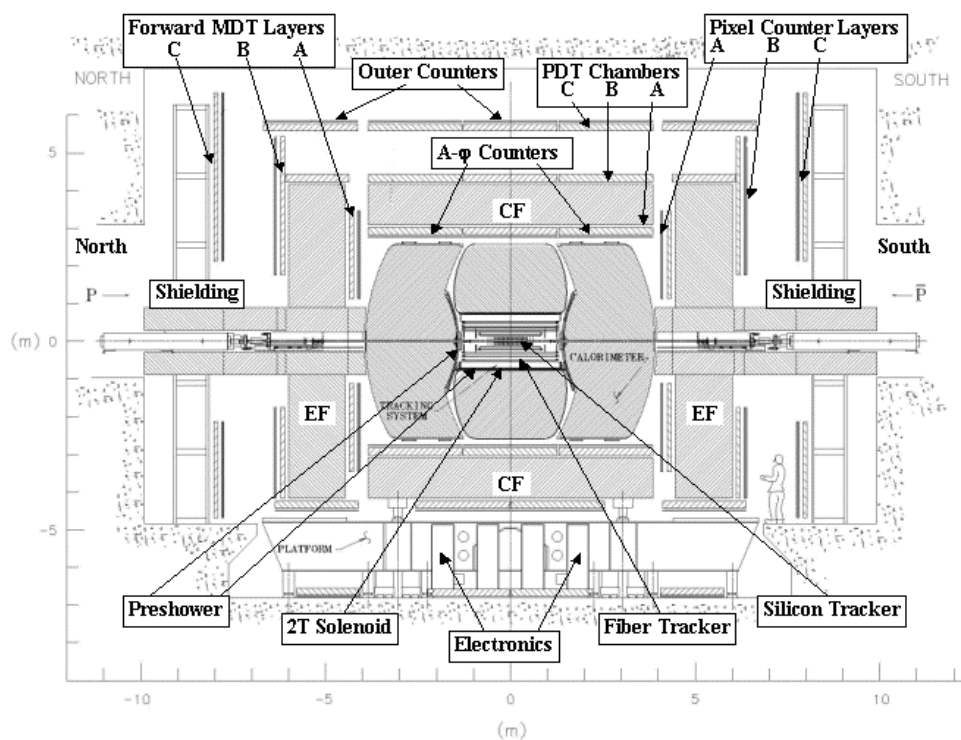


Рис. 1. Схема установки D0 во втором сеансе ускорителя Теватрон в Фермилабе. Вид сбоку.

Мюонную систему в первом сеансе можно условно разделить на две подсистемы: центральную и переднюю. Первая состояла из пропорциональных дрейфовых трубок (ПДТ) и трех больших железных тороидальных магнитов: центрального тороида, обозначенного как CF на рис. 1, и двух передних (EF — на рис. 1). Вторая подсистема состояла из нескольких плоскостей дрейфовых трубок и двух намагниченных до 2Т железных тороидов.

Ко второму сеансу ПДТ в области псевдобыстрот $1,0 < |\eta| < 2,0$ были заменены на новую трековую систему – мини-дрейфовые трубки (МДТ). Значительным усовершенствованием установки D0 было введение в нее нового триггерного детектора на основе сцинтилляционных счетчиков [2], [3]. 4214 счетчиков, собранных в ИФВЭ в 1998–1999 гг., были разделены на 48 октантов, образующих шесть слоев (по три слоя (А, В и С) в южной и северной половинах установки) по восемь октантов в каждом. Эти слои счетчиков обозначены как “Pixel Counter Layers” на рис. 1.

Схема А-слоя счетчиков представлена на рис. 2 (структура В- и С-слоев идентична). В каждом из октантов слоя находятся до 96 счетчиков, которые разделены на шесть групп (до 16 счетчиков в одной группе), каждая из которых подключена к своему высоковольтному источнику питания.

Схема одного сцинтилляционного счетчика представлена на рис. 3. На двух торцах сцинтиллятора Bicron 404А толщиной 12,7 мм располагаются полосы сместителя спектра Kumpin 30 толщиной 4,2 мм и шириной 12,7 мм. На краю двух смежных торцов сцинтиллятора эти полосы изогнуты на $43,9^\circ$ для передачи света в фотоумножитель ФЭУ-115М

диаметром 25 мм. Размеры счетчиков сильно варьируются в силу геометрии установки – счетчики с минимальными размерами ($9 \times 14 \text{ см}^2$) расположены ближе к центру А-слоя, а счетчики с максимальными размерами ($60 \times 110 \text{ см}^2$) – на периферии С-слоя, наиболее удаленного от центра установки [4]. Каждый счетчик подключен к своему каналу электронного модуля SFE (Scintillator Front-End board). Один модуль имеет 48 входов и, таким образом, обслуживает половину октанта. Помимо 96 рабочих модулей SFE были подключены два дополнительных, необходимых для проведения процедуры калибровки на светодиодах.

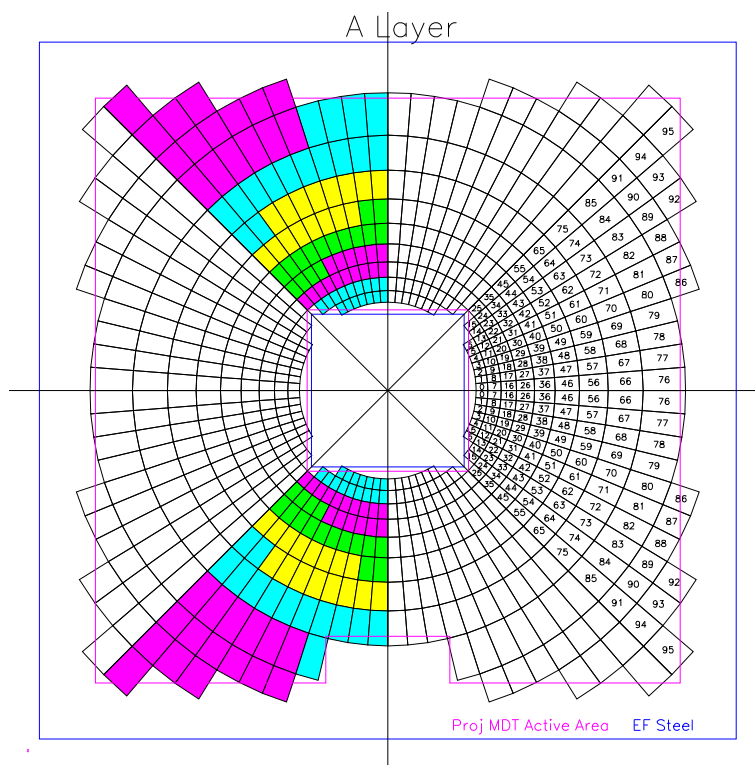


Рис. 2. Схема А-слоя системы сцинтилляционных счетчиков. Восемь октантов нумеруются с нулевого по седьмой по часовой стрелке, начиная с нижнего октанта левой верхней четверти слоя. Счетчики в октанте нумеруются с нулевого по 95-ый. Высоковольтные группы по 16 счетчиков обозначены разным цветом.

2. Процедура калибровки на светодиодах

Светодиодная система калибровки [5] освещает фотоумножители световыми импульсами, схожими по амплитуде и форме с импульсами сигналов от прохождения мюонов. Эта система состоит из 48 модулей, каждый из которых закреплен на плоскости соответствующего октанта сцинтилляционного детектора.

Схема одного модуля системы светодиодной калибровки представлена на рис. 4. Генератор светодиода, обозначенный на рисунке как LED Driver Board (LDB), формирует импульсы тока для запуска светодиода (LED Block). Используются синие светодиоды NSPB320BS фирмы Nichia America Corporation, поскольку их спектр излучения совпадает со спектром поглощения сместителей сцинтилляционных счетчиков.

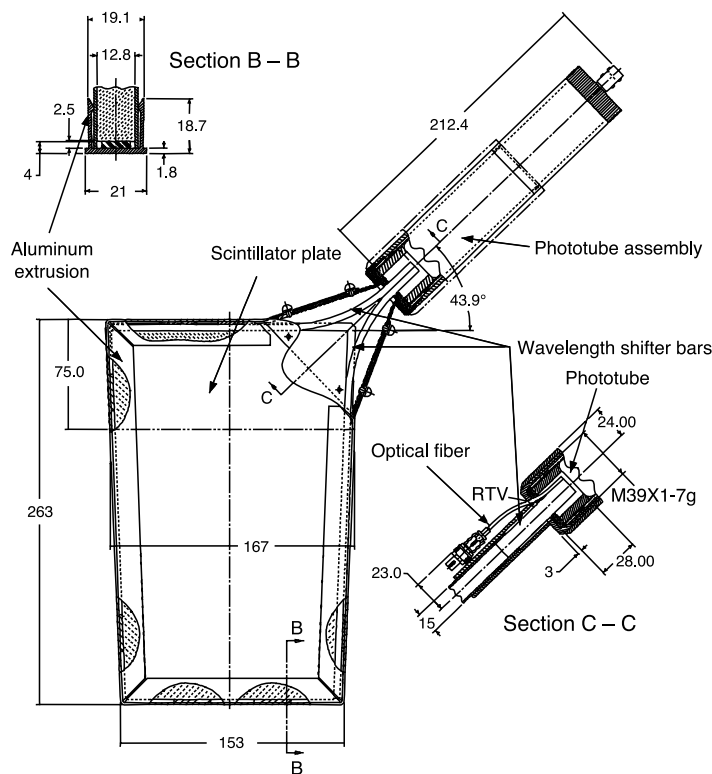


Рис. 3. Схема сцинтиляционного счетчика. Размеры даны в миллиметрах.

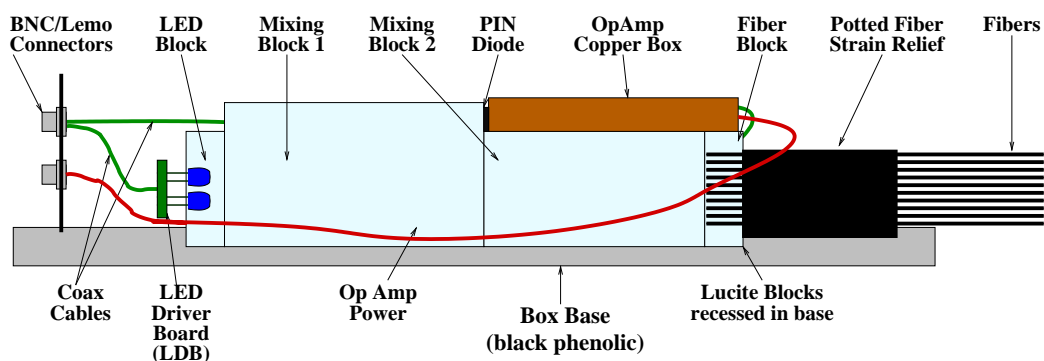


Рис. 4. Модуль системы светодиодной калибровки.

Для обеспечения однородности излучения световой импульс, сгенерированный светодиодом, проходит два модуля смешивания света (Mixing Block 1, 2 на рис. 4). За первым из этих модулей для мониторинга стабильности светодиода размещен кремниевый пин-диод Hamamatsu S6775. Второй модуль служит для дальнейшего смешивания света посредством полного внутреннего отражения. Пройдя модули смешивания, световые импульсы разделяются в фиберном модуле (Fiber Block на рис. 4) и далее по отдельным световым волокнам распространяются в каждый из 96 счетчиков данного октанта.

Светодиодная система успешно использовалась для тестирования счетчиков во время их сборки и продолжает использоваться для мониторинга работы счетчиков во время набора данных. Светодиодная калибровка проводится примерно раз в год для проверки стабильности работы счетчиков. Впервые эта процедура была проведена в мае 2001 г. Полученные тогда результаты стали реперными для всех последующих калибровок.

Процедура калибровки производится следующим образом. В отсутствие пучка в Теватроне высокое напряжение на счетчиках держится на уровне 50% от рабочего. Для калибровки крейт с электроникой считывания сцинтилляционных счетчиков передней мюонной системы переводится в локальный режим работы. Высокое напряжение поднимается до рабочего. Затем с помощью специальной программы в крейты с электроникой загружаются параметры, соответствующие значениям 2001 г., — задержки, маски и т.д. Потом для каждого октанта загружаются параметры светодиода генератора (амплитуда и задержка), после чего начинается процедура калибровки.

3. Результаты светодиодных калибровок за четыре года работы

Типичные результаты, получаемые во время светодиодной калибровки, представлены на рис. 5. Представленные распределения относятся к одному рабочему крейту SCE (South C East, юго-восточный C-слой), включающему в себя четыре октанта — SC0, SC1, SC6, SC7. На рис. 2 эти октанты составляют левую половину слоя.

На правом верхнем рисунке (рис. 5) показано распределение по сработавшим каналам, отражающее количество пришедших сигналов в каждом канале данного крейта. Каналы пронумерованы с нулевого по 384-ый. Первые 96 соответствуют нулевому октанту (SC0), следующие 96 — октанту SC1 и т.д. На этом рисунке видно, что за время калибровки светодиод в каждом канале включился около 13200 раз. Нулевые отсчеты (провалы на рисунке) соответствуют каналам с несуществующими или неработающими счетчиками.

На левом нижнем рисунке представлен профиль средних времен для всех 384 каналов. Среднее время сигналов с ФЭУ измеряется при каждом считывании и представляет собой время от сигнала “пересечения пучков” до момента достижения сигналом с ФЭУ уровня порога дискриминации (7 мВ).

Левый верхний рисунок показывает профиль средних амплитуд, причем для несуществующих или неработающих счетчиков записываются пьедестальные значения каналов SFE (типичные значения — 30–50 отсчетов АЦП). Амплитуда в одном событии из-за мультиплексорного измерения считывается только для одного из 16 счетчиков данной высоковольтной группы. При замене SFE блока пьедестальные значения всех соответствующих каналов меняются, поэтому они должны быть измерены вновь перед следующей калибровкой. Эти значения впоследствии вычитаются из измеренных амплитудных значений при обработке светодиодных данных.

Наконец, правый нижний рисунок представляет собой суммарное амплитудное распределение для всех 384 каналов данного крейта.

На рис. 6 представлены результаты светодиодной калибровки для одного счетчика, SC0-5: на левом рисунке — временное распределение сигналов от светодиода, на правом — амплитудное распределение.

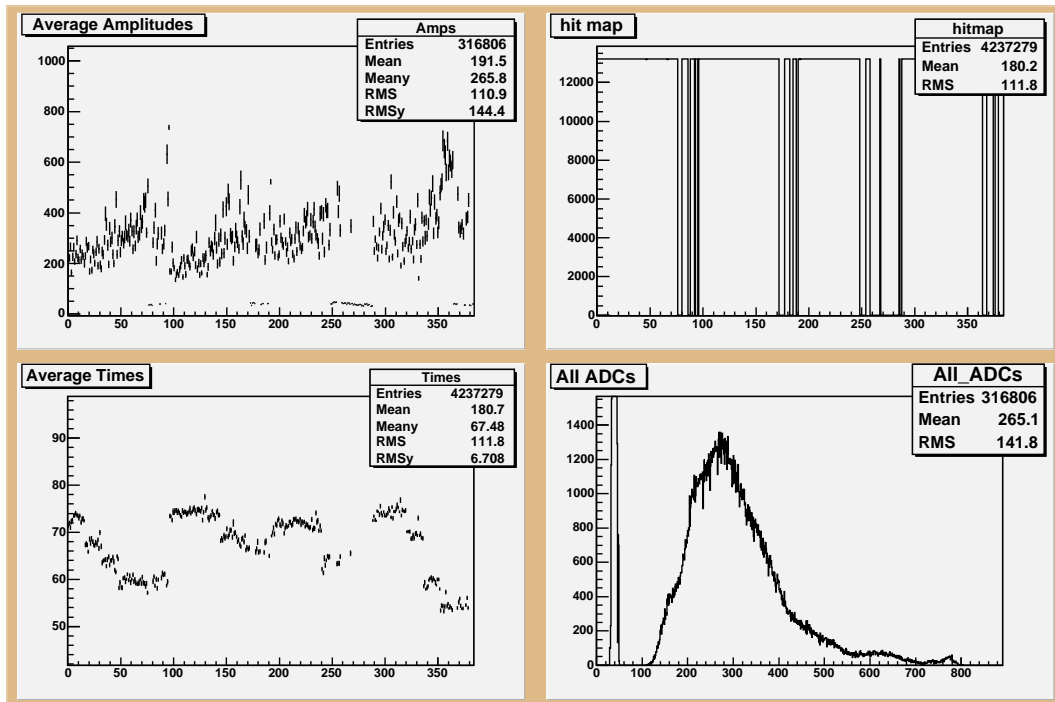


Рис. 5. Результаты светодиодной калибровки для крейта SCE. Слева сверху: профиль средних амплитуд (по оси X — номер канала крейта, по оси Y — среднее значение амплитуды в данном канале, в отсчетах АЦП). Справа сверху: распределение по сработавшим каналам (X — номер канала, Y — число срабатываний в данном канале). Слева внизу: профиль средних времен (X — номер канала, Y — среднее значение времени в данном канале, в нс). Справа внизу: суммарное распределение амплитуд для 384 каналов (X — отсчеты АЦП, Y — число отсчетов с данным значением амплитуды).

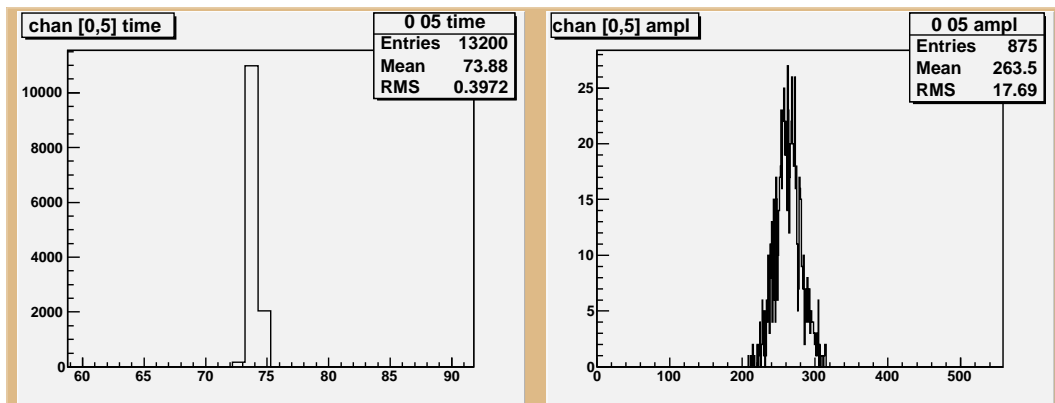


Рис. 6. Результаты светодиодной калибровки для счетчика SC0-5. Слева: временное распределение (по оси X — время в наносекундах, по оси Y — число считываний с данным значением времени). Справа: амплитудное распределение (X — отсчеты АЦП, Y — число считываний с данным значением амплитуды).

При обработке данных использовалась следующая процедура: для каждого канала пьедестальное значение вычиталось из амплитудного значения (то же самое предварительно было сделано для реперных данных 2001 г.), потом полученный результат делился на реперный. Затем полученное отношение нормировалось на отношение амплитуд пин-диода (с вычтенными пьедестальными значениями) для тех же наборов данных.

Результаты светодиодной калибровки для 2005 г. представлены на рис. 7.

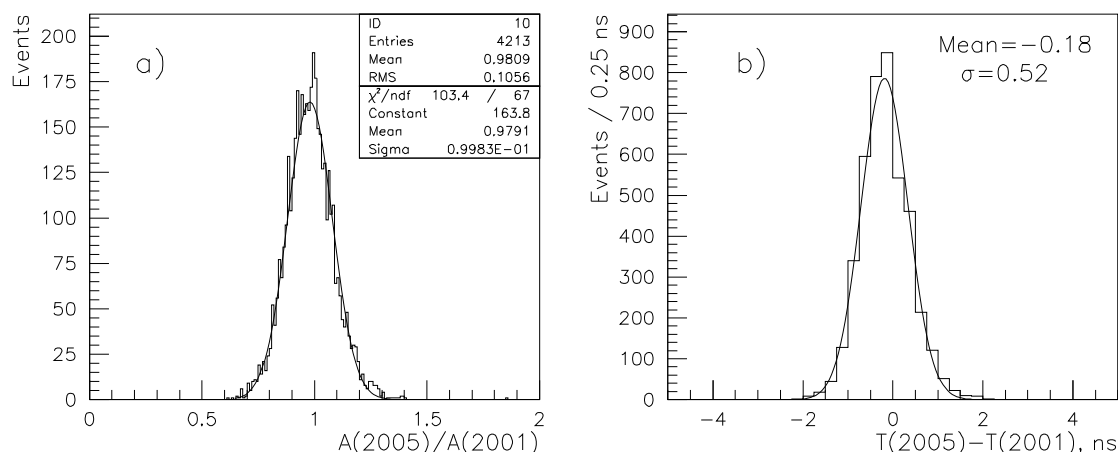


Рис. 7. Результаты калибровки 2005 г. (в сравнении с 2001 г.): (а) отношение амплитуд $A(2005)/A(2001)$; (б) разница времен $T(2005) - T(2001)$. Один счетчик (SB2-73) из 4214 на момент калибровки не работал.

На рис. 7а показано распределение амплитудных отношений для всех счетчиков, каждое из которых было получено описанной выше процедурой. Среднее значение амплитудного отношения 0,98 при сигме фита Гауссианом 0,10. Для оценки временной стабильности работы счетчиков среднее время сигнала с ФЭУ для каждого счетчика данных 2001 г. вычиталось из соответствующего значения для 2005 г. Среднее значение разности времен составило $-0,18$ нс с сигмой в $0,52$ нс (рис. 7б).

На рис. 8 и 9 представлены результаты светодиодной калибровки за четыре года: средние отношения амплитуд (рис. 8) и средние значения разницы времен (рис. 9). Первая точка на каждом графике соответствует реперному набору данных 2001 г.

Рис. 8 показывает, что среднее значение амплитудного отношения стабильно в пределах 4%, а сигма распределения отклонений по всем счетчикам за первые два года стабилизировалась на уровне 10%.

Рис. 9 демонстрирует хорошую стабильность сигналов во времени в пределах $0,23$ нс с сигмой распределения отклонений $0,52$ нс.

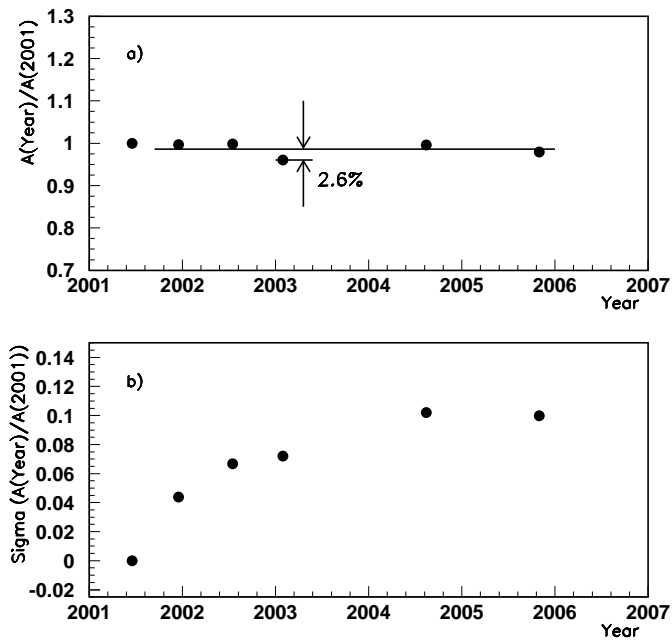


Рис. 8. Изменения параметров амплитудных распределений за четыре года. (а) Изменения средних отношений амплитуд. Статистические ошибки измерений меньше размера точек. При фитировании данных прямой максимальное отклонение составляет 2,6%. (б) Изменения сигм распределения отклонений. Первая точка на обоих рисунках — реперная.

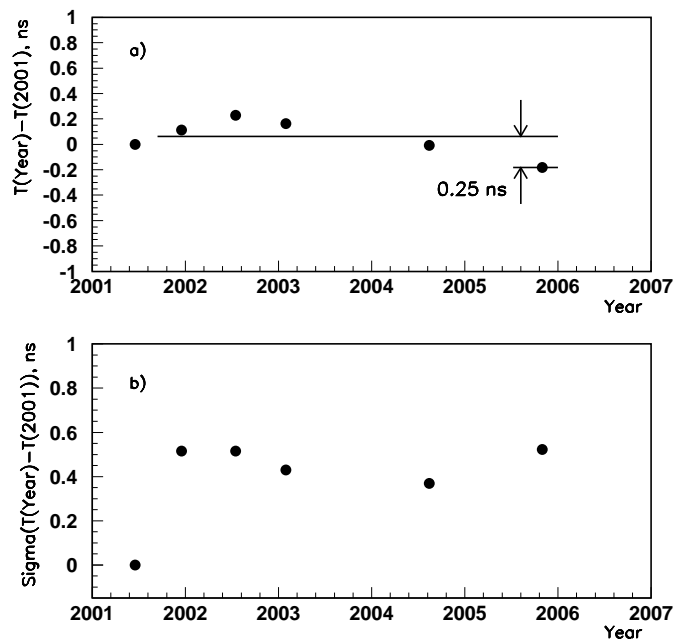


Рис. 9. Изменения параметров временных распределений за четыре года. (а) Изменения средних значений разницы времен. Статистические ошибки измерений меньше размера точек. При фитировании данных прямой максимальное отклонение составляет 0,25 нс. (б) Изменения сигм распределения отклонений. Первая точка на обоих рисунках — реперная.

4. Процедура калибровки на мюонах

Помимо светодиодной калибровки стабильность работы сцинтиляционного триггерного детектора проверялась посредством калибровки счетчиков на мюонах, образовавшихся в результате протон-антипротонных столкновений в ходе второго сеанса эксперимента D0.

Амплитуды сигналов со счетчиков при прохождении через них заряженных частиц измеряются в ходе набора статистики. Амплитудные распределения для всех 4704 каналов SFE (количество каналов электроники превышает число счетчиков, равное 4214) представлены в логарифмическом масштабе на рис. 10а и в линейном — на рис. 10б. Пик в районе 40 отсчетов АЦП соответствует пьедестальным значениям всех задействованных каналов электроники, а в районе 165 отсчетов АЦП наблюдается пик от минимально ионизирующих частиц (MIP). Так же, как и при светодиодной калибровке, в одном событии считывается амплитуда только для одного из 16 счетчиков данной высоковольтной группы. Для накопления статистики для каждого из 4214 счетчиков требуется большое время, что делает практически невозможным поканальную калибровку всех счетчиков. В связи с этим амплитудная калибровка производилась по октантам.

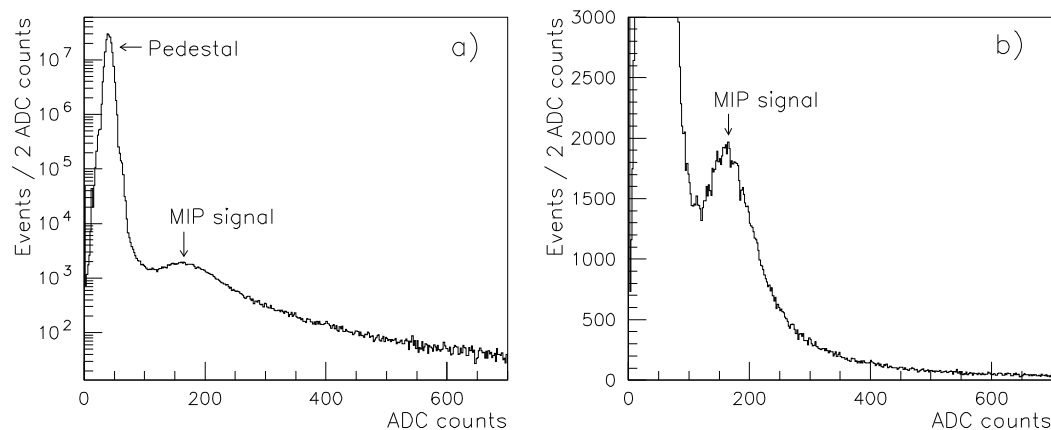


Рис. 10. Амплитудные распределения для всех 4704 каналов SFE (данные 2002 г.): (а) — в логарифмическом масштабе; (б) — в линейном масштабе.

Для выборки мюонных событий из данных была разработана процедура, использующая корреляцию срабатываний счетчиков в различных слоях мюонной системы. Обработывались только события, при которых были зарегистрированы срабатывания счетчиков в каждом из трех слоев (А, В, С) в южной половине установки D0 (она обозначена как “south” на рис. 1) или в северной (“north” на рис. 1) в соседних счетчиках октантов с одинаковыми номерами. Соседним для данного счетчика считался тот, который отличается от него на ± 1 по последней цифре порядкового номера и не более чем на ± 2 по номеру ряда, в котором он находится. Например, если сработал счетчик NC1-37 (1 — это номер октанта в северном (N) С-слое, 37 — порядковый номер счетчика), то проверялось, сработал ли какой-либо счетчик в октанте NB1 (первом октанте северного В-слоя) с одним из следующих порядковых номеров: 16–18; 26–28; 36–38; 46–48; 56–58 (см. рис. 2). Если такое произошло, аналогичным образом проверялось, сработал ли какой-либо счетчик в октанте NA1 (первом октанте северного А-слоя). Если да, тогда вся информация, каса-

ющаяся этих трех срабатываний (номер сработавшего счетчика, амплитуда, пьедестал и время срабатывания), использовалась в дальнейшей обработке.

5. Результаты калибровки на мюонах

Описанная процедура впервые была применена на практике в 2002 г. Было обработано более 600 тысяч событий, прошедших мюонный триггер установки D0. Распределение пьедесталов и амплитудное распределение для мюонов, выделенных по приведенной выше методике срабатывания, представлены на рис. 11. Несмотря на то, что критерии отбора по времени не применялись, амплитудное распределение показывает, что $\geq 98\%$ выделенных таким образом мюонов имеют амплитуды, соответствующие энергии минимально ионизирующей частицы.

Амплитудные распределения для одного из октантов (NCO) и одного из счетчиков (SB7-54) с наибольшей для 2002 г. статистикой представлены на рис. 12.

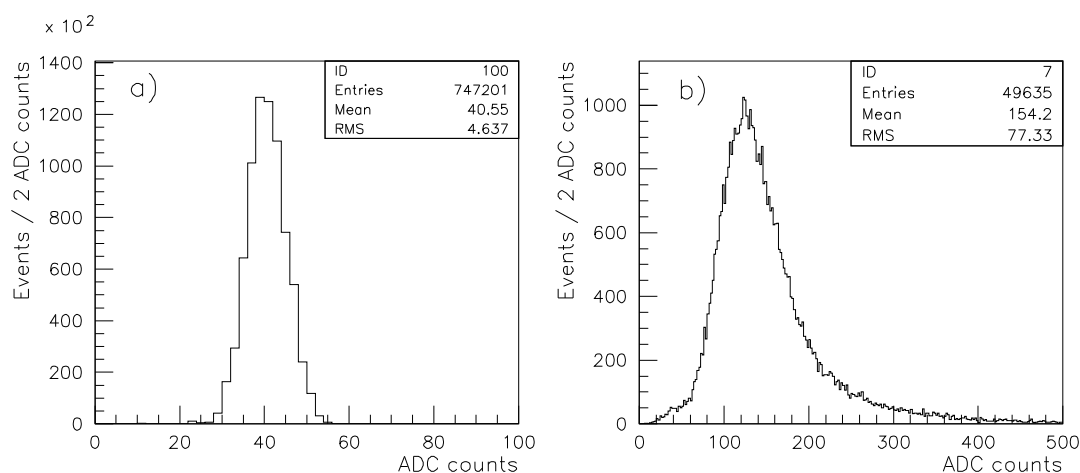


Рис. 11. Распределение пьедесталов — (а) и амплитудное распределение мюонов, выделенных по методике срабатывания, для всех 4214 счетчиков (данные 2002 г.) — (б).

Для проверки стабильности работы счетчиков та же процедура была проделана в 2006 г., когда программное обеспечение для обработки данных в режиме реального времени было значительно усовершенствовано, что дало возможность быстрее набирать статистику. В 2006 г. было обработано более 34,5 миллионов событий, прошедших все триггеры установки D0 (без отбора мюонных триггеров). Амплитудные распределения для октанта NCO и счетчика SB7-54 представлены на рис. 13 и находятся в хорошем соответствии с результатами 2002 г. (рис. 12). Суммарное распределение амплитуд для всех 4214 счетчиков показано на рис. 14а.

Из-за ограниченной статистики (напомним, что амплитуда в событии измеряется только в одном из 16 счетчиков высоковольтной группы) средние значения амплитудных откликов сравнивались по октантам. Результаты для всех 48 октантов представлены в табл. 1. Для каждого октанта среднее значение амплитуды, полученное в 2006 г., делилось на среднее значение 2002 г.

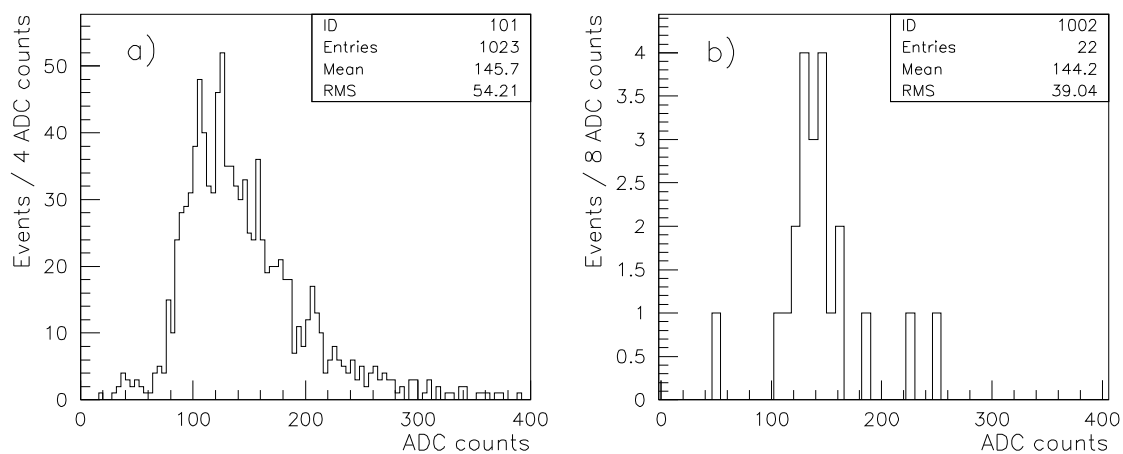


Рис. 12. Амплитудные распределения для октанта NC0 — (a) и счетчика SB7-54 — (b). Данные 2002 г. Выбранный счетчик имеет большую статистику, чем остальные.

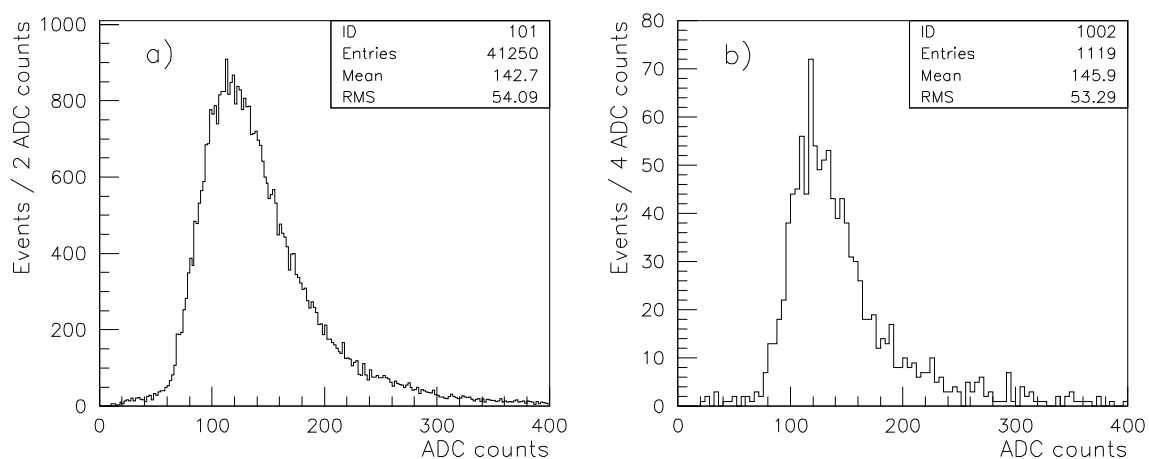


Рис. 13. Амплитудные распределения для октанта NC0 — (a) и счетчика SB7-54 — (b). Данные 2006 г.

Из табл. 1 и соответствующего ей рис. 14b следует, что среднее отношение амплитуд равно 0.99, а максимальное отклонение от единицы составляет 9%. Таким образом, заметных признаков старения счетчиков за четыре года работы обнаружено не было.

Таблица 1. Отношение средних значений амплитуд, полученных в 2006 г., к полученным в 2002 г. для всех 48 октантов. $RMS = 0,02$ для всех значений.

Октант	North A	North B	North C	South A	South B	South C
0	0.98	0.97	0.98	1.03	1.00	0.97
1	0.98	0.97	0.95	0.97	1.00	0.99
2	1.03	0.95	0.99	1.01	0.92	0.91
3	1.00	0.98	0.98	0.96	0.99	1.00
4	1.01	0.99	1.00	1.00	1.00	0.98
5	0.96	0.98	0.96	1.03	0.94	0.95
6	0.99	1.00	0.99	1.01	0.99	1.02
7	0.98	0.98	0.98	1.00	1.01	0.97

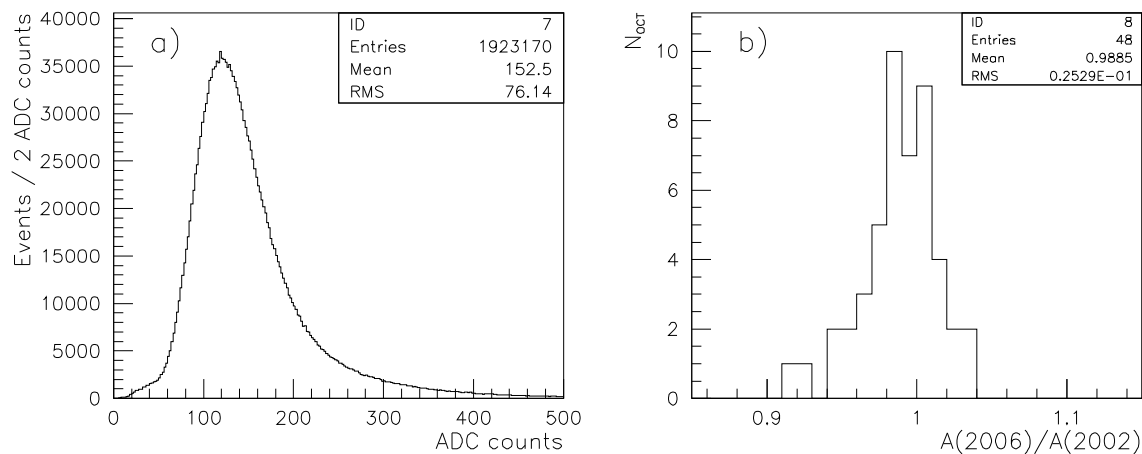


Рис. 14. Амплитудное распределение мюонов, выделенных по методике срабатывания, для всех 4214 счетчиков (данные 2006 г.) — (a). Распределение отношения средних значений амплитуд, полученных в 2006 г. ($A(2006)$), к амплитудам 2002 г. ($A(2002)$) для 48 октантов — (b). Данные из табл. 1. По оси Y — число октантов (N_{OCT}) с данным значением отношения $A(2006)/A(2002)$.

Заключение

Изложена процедура светодиодной калибровки скинтилляционного детектора передней мюонной системы установки D0 на ускорителе Теватрон (Фермилаб, Батавия, США), впервые примененная в 2001 г. Представлены результаты калибровки за 2001–2005 гг. Среднее отклонение за четыре года работы амплитуд сигналов, усредненное по 4214

счетчикам, не превышает 4% с сигмой распределения этих отклонений по всем счетчикам около 10%. За этот же период сигналы остались стабильными во времени в пределах 0,23 нс с сигмой распределения отклонений 0,52 нс.

Также изложена процедура амплитудной калибровки детектора, основанная на измерении отклика счетчиков на прохождение через них мюонов, образованных в протон-антипротонных столкновениях на ускорителе Теватрон. Такая калибровка важна для исследования комплексной стабильности работы счетчиков, поскольку при этом проверяются не только стабильность работы фотоумножителей и электроники, но и сцинтиллятора и переизлучателей спектра. Представлены результаты для калибровок 2002 г. и 2006 г. Изменения абсолютной величины амплитудных откликов не превышают $\begin{matrix} +3\% \\ -9\% \end{matrix}$. Таким образом, заметных признаков старения счетчиков за четыре года работы установки во втором сеансе обнаружено не было.

Проводимые регулярно в течение четырех лет работы во втором сеансе светодиодная калибровка и калибровка на мюонах по процедурам, изложенным в данной публикации, продемонстрировали стабильность работы сцинтилляционного триггерного детектора передней мюонной системы установки D0 по всем требуемым параметрам и тем самым обеспечили надежность всех физических результатов эксперимента D0, полученных с использованием этого детектора.

Список литературы

- [1] S. Abachi *et al.*, Phys. Rev. Lett., 74 (1995) 2632.
- [2] V. Abramov *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., A419 (1998) 660.
- [3] V.M. Abazov *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., A565 (2006) 463.
- [4] V.M. Abazov *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., A552 (2005) 372.
- [5] P. Hanlet *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A521 (2004) 343.

Рукопись поступила 26 марта 2007.

В.А. Беззубов, И.А. Васильев, В.Н. Евдокимов и др.
Калибровка сцинтилляционного триггерного детектора передней мюонной системы эксперимента D0 в Фермилабе.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **ИТ_РХ**.

Редактор Н.В.Ежела

Подписано к печати 30.03.2007. Формат 60 × 84/8.
Офсетная печать. Печ.л. 1,72. Уч.-изд.л. 1,45. Тираж 90. Заказ .
Индекс 3649. ЛР т020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

