

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

**УДК 539.1.074**

**На правах рукописи**

**Васильев Игорь Александрович**

**ТРИГГЕРНЫЙ ДЕТЕКТОР ПЕРЕДНЕЙ МЮОННОЙ  
СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА D0**

**01.04.23 — физика высоких энергий**

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Научный руководитель  
внс, кандидат физ.-мат. наук  
Евдокимов В. Н.**

**Протвино 2008**

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Эксперимент D0</b>	<b>8</b>
1.1 Научные цели эксперимента D0.....	8
1.2 Схема установки D0 во втором сеансе на Тэватроне .....	9
1.3 Мюонная система установки D0.....	12
<b>2 Система триггерных мюонных сцинтилляционных счетчиков передней мюонной системы</b>	<b>17</b>
2.1 Требования к сцинтилляционным счетчикам.....	17
2.2 Конструкция одного счетчика.....	17
2.3 Сцинтиллятор, сместители спектра, ФЭУ.....	21
2.4 Отбор ФЭУ и счетчиков по высоковольтным группам.....	27
2.5 Тестирование собранных октантов.....	30
<b>3 Мониторирование и калибровки системы триггерных сцинтилляционных счетчиков во время второго сеанса</b>	<b>34</b>
3.1 Калибровка высоковольтных источников питания.....	34
3.2 Светодиодная калибровка.....	38
3.2.1 Система светодиодной калибровки.....	38
3.2.2 Процедура калибровки на светодиодах.....	40
3.2.3 Результаты светодиодных калибровок за 7 лет работы....	40
3.3 Калибровка на ускорительных мюонах.....	45
3.3.1 Процедура калибровки.....	45
3.3.2 Результаты исследования стабильности работы счетчиков.....	47
3.3.3 Временные распределения сигналов со счетчиков.....	52
3.3.4 Изучение корреляций между дрейфом системы синхронизации D0 и значениями T0 сцинтилляционных	

счетчиков.....	55
3.4 Мониторирование работы передней мюонной системы с использованием образования одиночных мюонов	59
<b>4 Мюонная триггерная система эксперимента D0       во втором сеансе</b>	<b>64</b>
<b>5 Открытие странного каскадного бариона <math>\Xi_b^-</math> (dsb) при       использовании системы триггерных сцинтилляционных       счетчиков</b>	<b>69</b>
<b>Заключение</b>	<b>72</b>
<b>Литература</b>	<b>75</b>

## Введение

Протон-антипротонный коллайдер Тэватрон на энергию  $\sim 2$  ТэВ в системе центра масс лаборатории им. Ферми (Фермилаб) в США по настоящее время остается крупнейшим ускорителем в мире. Одной из основных установок, работающих на Тэватроне, является установка D0 [1,2]. Главными задачами экспериментов на этой установке являются проверка предсказаний Стандартной модели и поиск новых частиц и явлений за ее пределами.

Ко второму сеансу работы Тэватрона, который начался в марте 2001 г., установка D0 была существенно модернизирована [3], что было связано со значительным повышением светимости коллайдера. В частности, были созданы новые детекторы в мюонной системе для регистрации и идентификации мюонов. Мюонная система должна была осуществлять эффективную выработку триггера и идентификацию мюонов в большом телесном угле в широком диапазоне импульсов и при низком фоне. К важнейшему из новых детекторов мюонной системы относится разработанная и созданная в ИФВЭ система из 4214 триггерных сцинтилляционных счетчиков. Система расположена симметрично относительно точки взаимодействия протонного и антипротонного пучков, по три слоя счетчиков с каждой из двух сторон. Общая площадь детектора составляет  $\sim 450$  м<sup>2</sup>. Результатом введения в установку этой большой системы явилось значительное увеличение эффективности выработки триггера передней мюонной системы [4] установки D0 во втором сеансе благодаря новым сцинтилляционным счетчикам с хорошим временным разрешением и тонкой сегментацией. Система этих счетчиков использовалась для триггера на мюоны, образованные в результате протон-антипротонных взаимодействий в коллайдере Тэватрон, а также для предоставления информации по

времени прохождения этих мюонов через детектор, что крайне важно для реконструкции траекторий мюонов с использованием мюонных трековых камер. Тонкая сегментация и хорошее временное разрешение этих счетчиков позволили значительно подавить фон от космических мюонов, а также от мюонов, образованных за пределами временного интервала для данного конкретного события.

**Целью диссертационной работы** является разработка и создание системы из 4214 триггерных сцинтилляционных счетчиков, исследование их характеристик и анализ контроля стабильности их работы во время проведения экспериментов для получения физических результатов.

**Автор защищает:**

- создание в ГНЦ ИФВЭ при активном участии диссертанта триггерного детектора на основе 4214 сцинтилляционных счетчиков с полной площадью сцинтиллятора  $\sim 450 \text{ м}^2$ .
- разработку методики калибровки системы сцинтилляционных счетчиков на ускорительных мюонах, полученных в результате протон-антипротонных столкновений на Тэватроне.
- методы анализа данных и результаты калибровки на светодиодах и на ускорительных мюонах.

Надежная работа в течение более семи лет системы 4214 сцинтилляционных счетчиков мюонного спектрометра в триггере эксперимента D0 для регистрации редких физических процессов с мюонами в конечном состоянии, в частности, позволила впервые обнаружить странный каскадный барион  $\Xi_b^-$  (dsb) — первую частицу, состоящую из валентных кварков всех трех известных поколений.

**Актуальность работы**

Интегральная светимость за первый сеанс на Тэватроне Фермилаба в 1992—1996 гг. для эксперимента D0 составила  $120 \text{ пб}^{-1}$ . Затем Тэватрон

был остановлен на пять лет. Были выдвинуты требования кардинально модернизировать установку D0 с тем, чтобы она отвечала принципиально новым условиям набора данных во втором сеансе, начало которого было запланировано на 2001 год. В частности, ожидалось увеличение светимости более чем на порядок. Установка должна была выдерживать светимость до  $3 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ . Энергию столкновений протонов с антипротонами в системе центра масс планировалось увеличить с 1.8 ТэВ до 1.96 ТэВ, а время между «банчами» (сгустками) частиц в ускорителе сократить с 3.5 мксек до 396 нсек. С учетом этих значительных улучшений параметров Тэватрона к концу 2009 года интегральная светимость эксперимента должна была достичь 4–8 фб<sup>-1</sup>. Одной из важнейших задач модернизации установки D0 была разработка и создание системы из 4214 сцинтилляционных счетчиков с высоким временным разрешением и тонкой сегментацией для формирования мюонного триггера и идентификации мюонов.

### **Научная новизна**

Созданная система сцинтилляционных счетчиков является одной из крупнейших в мире, в коллайдерных экспериментах она применяется впервые. Разработанные во время производства и эксплуатации сцинтилляционных счетчиков методы измерения их характеристик и контроля стабильности системы являются во многом оригинальными. Использование триггерной системы счетчиков в эксперименте D0 позволило получить целый ряд новых физических результатов, среди которых наиболее важными являются наблюдение осцилляций Bs-мезонов [5] и открытие странного каскадного  $\Xi_b^-$  бариона [6].

### **Практическая ценность**

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы при создании больших систем сцинтилляционных

счетчиков как в нашей стране (ОИЯИ, ИЯИ РАН, ИЯФ РАН, НИИЯФ МГУ, ФИ РАН), так и за рубежом (ЦЕРН, Фермилаб).

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

**В первой главе** диссертации изложены научные цели эксперимента D0, представлена схема установки текущего (второго) сеанса, а также описаны мюонные детекторы установки.

**Вторая глава** посвящена системе триггерных сцинтилляционных счетчиков для передней мюонной системы. В ней описана конструкция счетчика, изложены процедуры отбора и исследования параметров отдельных элементов счетчиков, рассмотрена конструкция детектора и методика его тестирования с использованием космических мюонов.

**В третьей главе** описаны методы мониторинга и калибровок сцинтилляционных счетчиков от светодиодов и на ускорительных мюонах, необходимые для контроля стабильности их характеристик. Описаны также методика и результаты исследования стабильности работы передней мюонной системы с использованием одиночных мюонов.

**В четвертой главе** описано, как созданная система сцинтилляционных счетчиков использовалась по своему главному назначению, а именно, для триггирования взаимодействий протонов с антипротонами с образованием мюонов.

**В пятой главе** приведен один из важнейших физических результатов эксперимента D0, для получения которого существенно использовалась информация с системы сцинтилляционных счетчиков, а именно, открытие странного каскадного  $\Xi_b^-$  бариона.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Диссертация основана на результатах исследований, выполненных автором и его коллегами в 1998—2008 гг.

### **Апробация работы и публикации**

Результаты, полученные в диссертации, неоднократно докладывались автором на совещаниях и семинарах сотрудничества эксперимента D0 и научных конференциях в Фермилабе. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в российских и зарубежных журналах. Основные результаты диссертации содержатся в работах [3,6,21,30].

Апробация диссертации прошла в ГНЦ ИФВЭ 8 сентября 2008 г.



# 1. Эксперимент D0

## 1.1. Научные цели эксперимента D0

Эксперимент D0 был предложен в 1983 году для изучения протон-антипротонных столкновений с энергией в системе центра масс 1.8 ТэВ на коллайдере Тэватрон в Фермилабе. Целью эксперимента была проверка предсказаний Стандартной модели (СМ) и поиск новых частиц и явлений за ее пределами — изучение состояний с высокими массами и процессов с большим поперечным импульсом. Эффективная работа установки в ходе первого сеанса (1992—1996 гг.) привела к получению ряда важнейших результатов. Среди них — открытие топ-кварка [7], измерение его массы [8, 9], прецизионное измерение массы  $W$  бозона [10, 11], изучение процессов образования струй [12], установление более строгих ограничений на сечения образования и массы суперсимметричных частиц [13, 14], лептокварков [15, 16] и других частиц [17], существование которых предсказывается различными расширениями СМ.

Научная программа второго сеанса включает в себя следующие направления:

- продолжение изучения образования  $t$ -кварка, в том числе одиночного;
- изучение инклюзивного рождения адронных струй;
- измерение сечения образования прямых фотонов;
- исследования нарушения  $CP$ -инвариантности;
- изучение образования и распадов частиц с  $b$ -кварками, поиск новых состояний;
- изучение рождения  $W$  и  $Z$  бозонов, используя лептонные и полулептонные каналы распада;
- поиск хиггсовского бозона, ответственного в СМ за образование масс элементарных частиц;

- поиски составных состояний лептонов и кварков;
- поиски скалярных лептокварков второго и третьего поколения, тяжелых  $Z'$  бозонов в двухмюонном и двухэлектронном каналах распада, суперсимметричных частиц (чарджино, нейтралино, с-кварки), долгоживущих частиц, распадающихся на  $Z$  бозоны, заряженных массивных стабильных частиц.

Наиболее значительными результатами второго сеанса являются наблюдение осцилляций  $B_s$ -мезонов и открытие каскадного  $\Xi_b^-$  бариона.

## 1.2. Схема установки D0 во втором сеансе на Тэватроне

В ходе первого сеанса Тэватрон работал с 6 банчами протонов и антипротонов, с 3500 наносекундным интервалом между пересечениями банчей и энергией 1.8 ТэВ в системе центра масс. Пик светимости обычно составлял  $1-2 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ . Интегральная светимость за первый сеанс составила  $\sim 120 \text{ пб}^{-1}$ .

После запуска нового инжектора и модернизации Тэватрона [18] коллайдер начал свою работу во втором сеансе в марте 2001 года с 36 банчами протонов и антипротонов, интервалом между банчами в 396 наносекунд и при энергии в системе центра масс 1.96 ТэВ. Светимость возросла более чем на порядок — до  $2-3 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ . Ожидается, что Тэватрон будет работать по крайней мере до конца 2009 г. В этом случае интегральная светимость может достичь величины  $\sim 5-8 \text{ фб}^{-1}$ .

Чтобы в полной мере использовать новые возможности Тэватрона, установка D0 была значительно модернизирована. Схема модернизированной установки D0 показана на рис. 1.1. Северная половина установки обозначена на рис. 1.1 как “north”, а южная как “south”. Установка состоит из трех основных составляющих: центральные трековые детекторы, электромагнитный и адронный

калориметры и мюонный спектрометр. Центральная трековая система ко второму сеансу была заменена полностью. Эффективная работа трековых детекторов в центральной системе крайне важна для изучения свойств топ-кварка, электрослабых взаимодействий, В-физики, а также для поиска новых частиц, включая бозон Хиггса. Новая система включает в себя кремниевый микростриповый трековый детектор SMT (Silicon Tracker на рис. 1.1) и сцинтилляционный волоконный трековый детектор CFT (Fiber Tracker) [19, 20], расположенные внутри сверхпроводящего соленоида с магнитным полем 2Т. Наличие магнитного поля позволяет измерять с хорошей точностью (см. рис. 1.2) импульсы заряженных частиц и отношение энергии к импульсу ( $E/p$ ), что важно для идентификации электронов и калибровки калориметра, а также открывает новые возможности для идентификации тау-лептона и адронной спектроскопии. Два центральных трековых детектора SMT и CFT способны локализовать вершину взаимодействия с разрешением около 35 мкм вдоль оси пучка. Детектор SMT позволяет также идентифицировать короткоживущие частицы по вторичным вершинам. Для улучшения идентификации электронов между соленоидальным магнитом и центральным калориметром добавлен детектор начала электромагнитного ливня («preshower»).

Калориметры [2] используются для измерения энергии и идентификации электронов, фотонов и адронных струй, а также для идентификации мюонов и измерения недостающей поперечной энергии. Относительное разрешение по поперечной энергии  $E_t$  для струй в центральном калориметре в зависимости от поперечной энергии представлено на рис. 1.3.

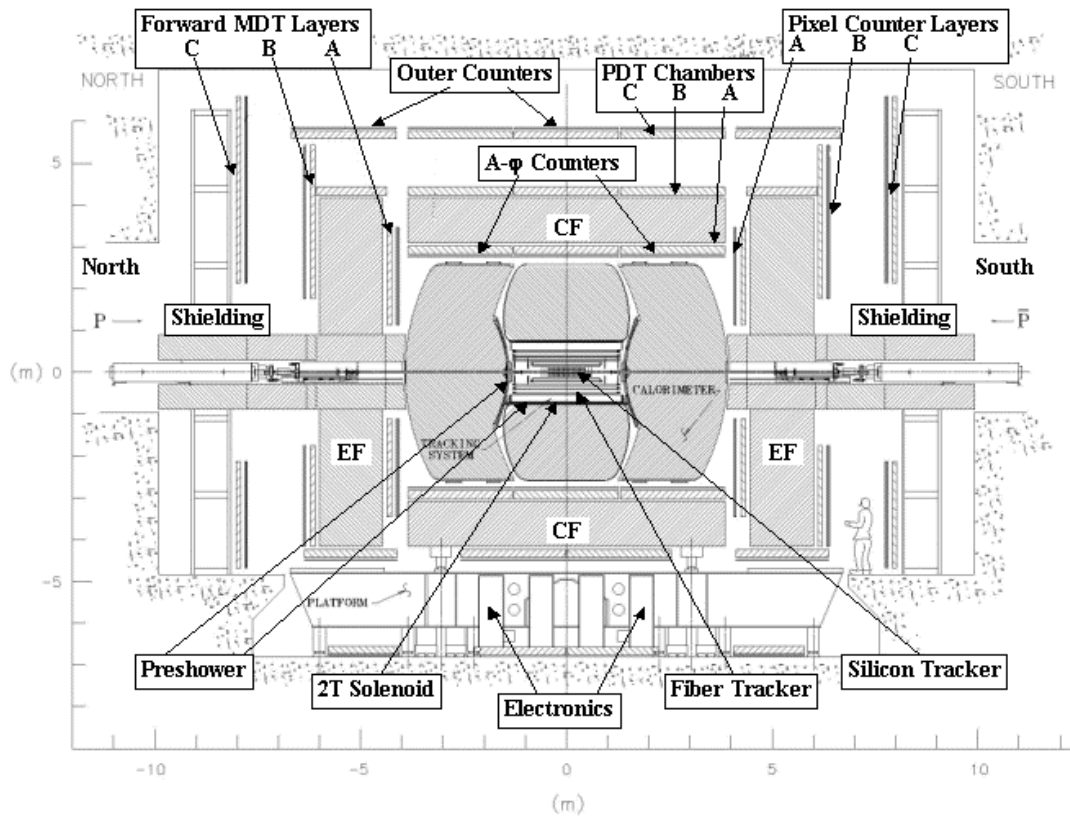


Рис. 1.1. Схема установки D0 во втором сенсе ускорителя Тэватрон в Фермилабе. Вид сбоку.

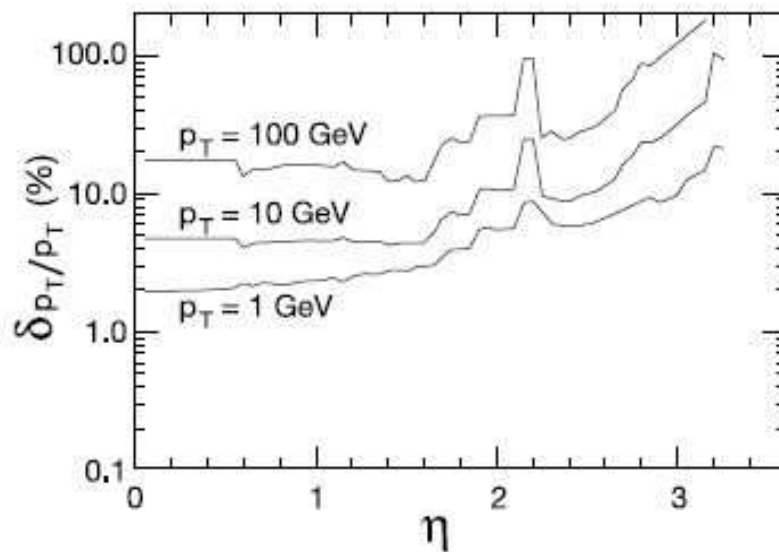


Рис. 1.2. Относительное разрешение по поперечному импульсу центральной трековой системы в зависимости от псевдобыстроты для треков с поперечным импульсом  $p_T = 1, 10$  и  $100$  ГэВ/с.

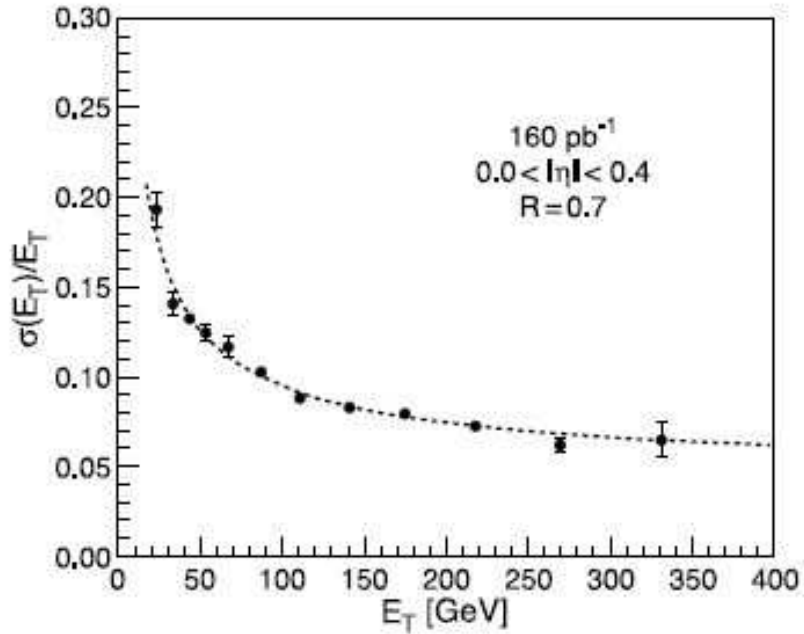


Рис. 1.3. Измеренное относительное разрешение по поперечной энергии для струй в центральном калориметре в зависимости от поперечной энергии. Пунктирной линией обозначен фит по данным.

В передней мюонной системе пропорциональные дрейфовые трубки были заменены мини-дрейфовыми трубками для работы при более высокой светимости. Для выработки мюонного триггера установка была оснащена системой сцинтилляционных счетчиков.

Существенное сокращение ко второму сеансу временного интервала между пересечениями банчей потребовало усовершенствования электроники считывания. Вся электроника мюонной системы и большая часть электроники центрального калориметра были заменены. Триггерная система была значительно усовершенствована и доведена до трех уровней, что обеспечивает эффективную работу при более высокой светимости коллайдера.

### 1.3. Мюонная система установки D0

Мюонная система является одной из основных в установке [21]. Это связано с тем обстоятельством, что большинство частиц, изучение

которых представляет особый интерес (W, Z, частицы с t- и b-кварками и др.) идентифицируется по лептонным и полулептонным каналам распада.

Мюонная система установки должна обеспечивать эффективную регистрацию и идентификацию мюонов в широком диапазоне углов и импульсов и при этом иметь низкий уровень фона. Стабильная и надежная многолетняя работа и радиационная стойкость в условиях высокой светимости также исключительно важны для мюонной системы. Основными компонентами мюонной системы модернизированной установки D0 являются трековые детекторы (пропорциональные дрейфовые трубки (PDT) в центральной части и мини-дрейфовые трубки (MDT) – в передней) (см. рис. 1.4) и триггерные сцинтилляционные счетчики (см. рис 1.5) .

Три слоя центральных дрейфовых камер PDT [22] находятся внутри (слой А) и снаружи (слои В и С) центрального тороидального магнита и перекрывают область по псевдобыстроте  $|\eta| \leq 1$ . Около 55% центрального телесного угла перекрыто тремя слоями камер и 90% первыми двумя. Дрейфовые камеры сделаны из прямоугольных экструдированных алюминиевых трубок. Типичные размеры камер  $2.8 \bullet 5.6 \text{ м}^2$ . Камеры вне тороида состоят из трех плоскостей трубок, а слой А из четырех (за исключением нижней камеры, в которой три плоскости). Поперечный размер квадратного сечения трубки 10.1 см. Одна плоскость камер состоит из 24 таких трубок. Всего же в камере 72 или 96 трубок в зависимости от количества плоскостей. Вдоль анодной проволоки, расположенной по центру длинной трубки сверху и снизу проволоки размещены «верньеровские» катодные ячейки («пэды») для значительного улучшения продольного координатного разрешения трубок вдоль проволоки.

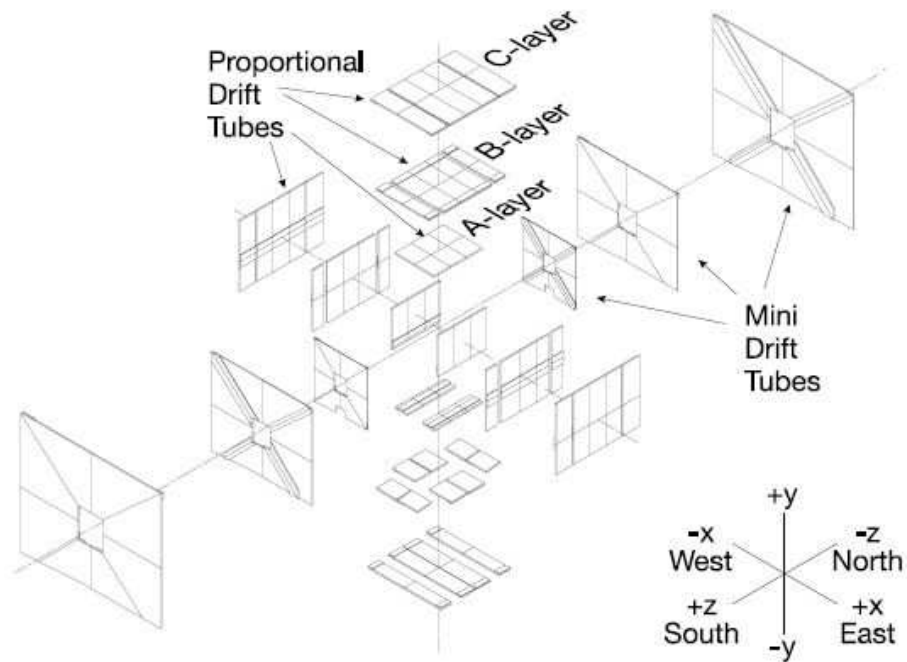


Рис.1.4 Трековые детекторы мюонной системы во втором сеансе.

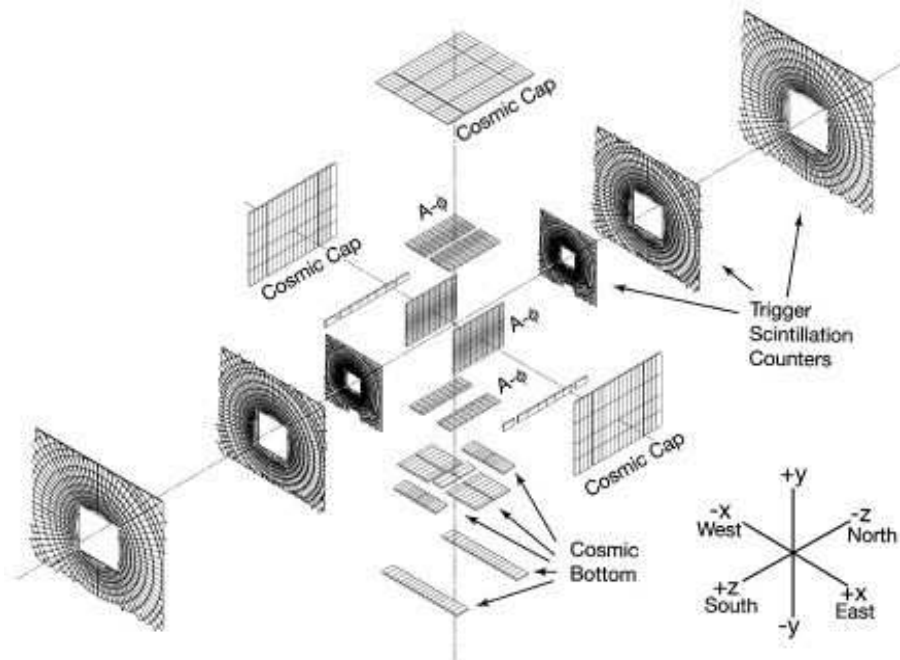


Рис. 1.5 Триггерные сцинтилляционные счетчики во втором сеансе.

Поперечное пространственное разрешение PDT составляет  $\sigma \approx 1\text{мм}$  при скорости дрейфа электронов  $\sim 10\text{ см/мкс}$  и максимальном времени

дрейфа 500 нс. В PDT используется следующий газовый состав: 84% аргона, 8% метана и 8%  $\text{CF}_4$ . Рабочие напряжения составили 4.7 кВ для проволок и 2.3 кВ для пэдов. Продольное (вдоль дрейфовых трубок) разрешение зависит от места попадания заряженной частицы в трубку и при использовании профиля наведенного заряда на катодных ячейках составляет 5 мм. Однако, только камеры слоя А были полностью укомплектованы электроникой для считывания информации с пэдов, в то время как в слоях В и С электроника была только для 10% катодных ячеек.

Сцинтилляционные счетчики центральной мюонной системы перед началом второго сеанса были протестированы с помощью космических мюонов. Средний сигнал от прохождения мюона составил 50–60 фотоэлектронов. Сравнение амплитудных сигналов, полученных с краев счетчиков и с центра, продемонстрировало однородность с точностью  $\pm 7\%$ . Временное разрешение счетчиков составило около 2 нс.

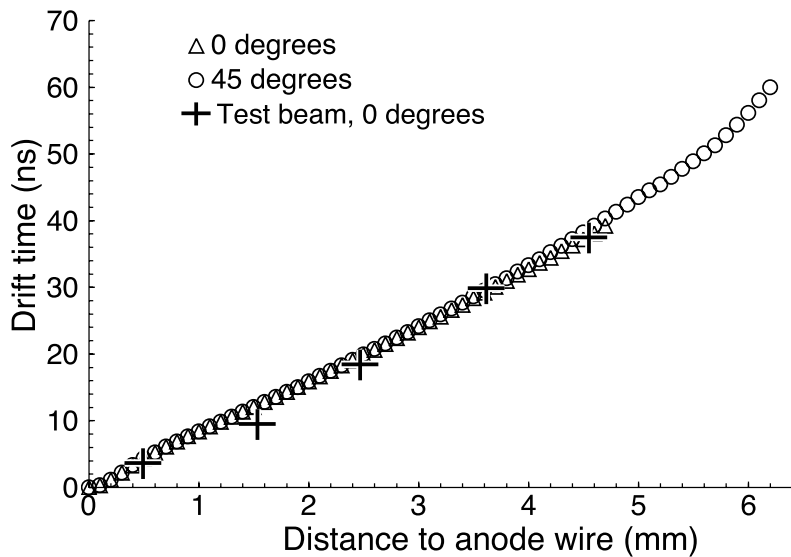


Рис. 1.6. Пространственно-временные характеристики для мини-дрейфовой трубки.

Пространственное разрешение трекового детектора передней мюонной системы (MDT), измеренное на тестовом пучке, составляет



около 350 мкм, но оцифровка в электронике с шагом в 18.8 нс приводит к разрешению  $\sigma \sim 0.7$  мм. Максимальное время дрейфа электронов для треков, перпендикулярных плоскости детектора, составляет 40 нс. Для треков, идущих под углом  $45^\circ$ , эта величина возрастает до 60 нс (см. рис. 1.6). В MDT используется газовая смесь  $\text{CF}_4\text{—CH}_4$  (90%–10%). Импульсное разрешение переднего мюонного спектрометра ограничено в основном многократным рассеянием в стали тороида. Оно составляет около 20% для мюонов с  $p \approx 40$  ГэВ/с. По этой причине импульс мюона, в основном, измеряется центральной трековой системой, расположенной до тороида. Передняя мюонная система улучшает импульсное разрешение для высокоэнергетичных мюонов и особенно важна для треков, которые не проходят все слои центрального волоконного трекового детектора CFT.

Значительным усовершенствованием установки D0 было введение в переднюю мюонную систему (область псевдобыстрот  $1 < |\eta| < 2$ ) нового триггерного мюонного детектора на основе 4214 сцинтилляционных счетчиков, изготовленных в 1998–1999 гг. в ГНЦ ИФВЭ. Описание созданного детектора, методов его калибровки и мониторинга и применения для получения физических результатов и является основным содержанием следующих глав диссертации.

## **2. Система триггерных мюонных сцинтилляционных счетчиков передней мюонной системы**

### **2.1. Требования к сцинтилляционным счетчикам**

Сцинтилляционные счетчики передней мюонной системы должны были удовлетворять следующим требованиям:

- обладать высокой радиационной стойкостью при длительной работе в условиях большой светимости, доходящей до нескольких единиц на  $10^{32}$  см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup>;
- обеспечивать близкую к 100% эффективность регистрации минимально-ионизирующей частицы (МИР);
- иметь хорошую однородность амплитуды снимаемого сигнала по всей площади счетчиков для подавления фоновых частиц;
- иметь временное разрешение не хуже нескольких наносекунд;
- обеспечивать надежную и стабильную работу в течение как минимум десяти лет;
- быть простыми в изготовлении и умеренными по стоимости (из-за ограниченных сроков производства).

### **2.2. Конструкция одного счетчика**

В итоговую рабочую конфигурацию передней мюонной системы вошли 4214 сцинтилляционных счетчиков. Они были размещены в 48 октантах, 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. 1.1. В каждом из октантов находятся до 96 счетчиков, которые разделены на шесть групп (до 16 счетчиков в одной группе), каждая из которых подключена к своему высоковольтному источнику питания. Деление слоя

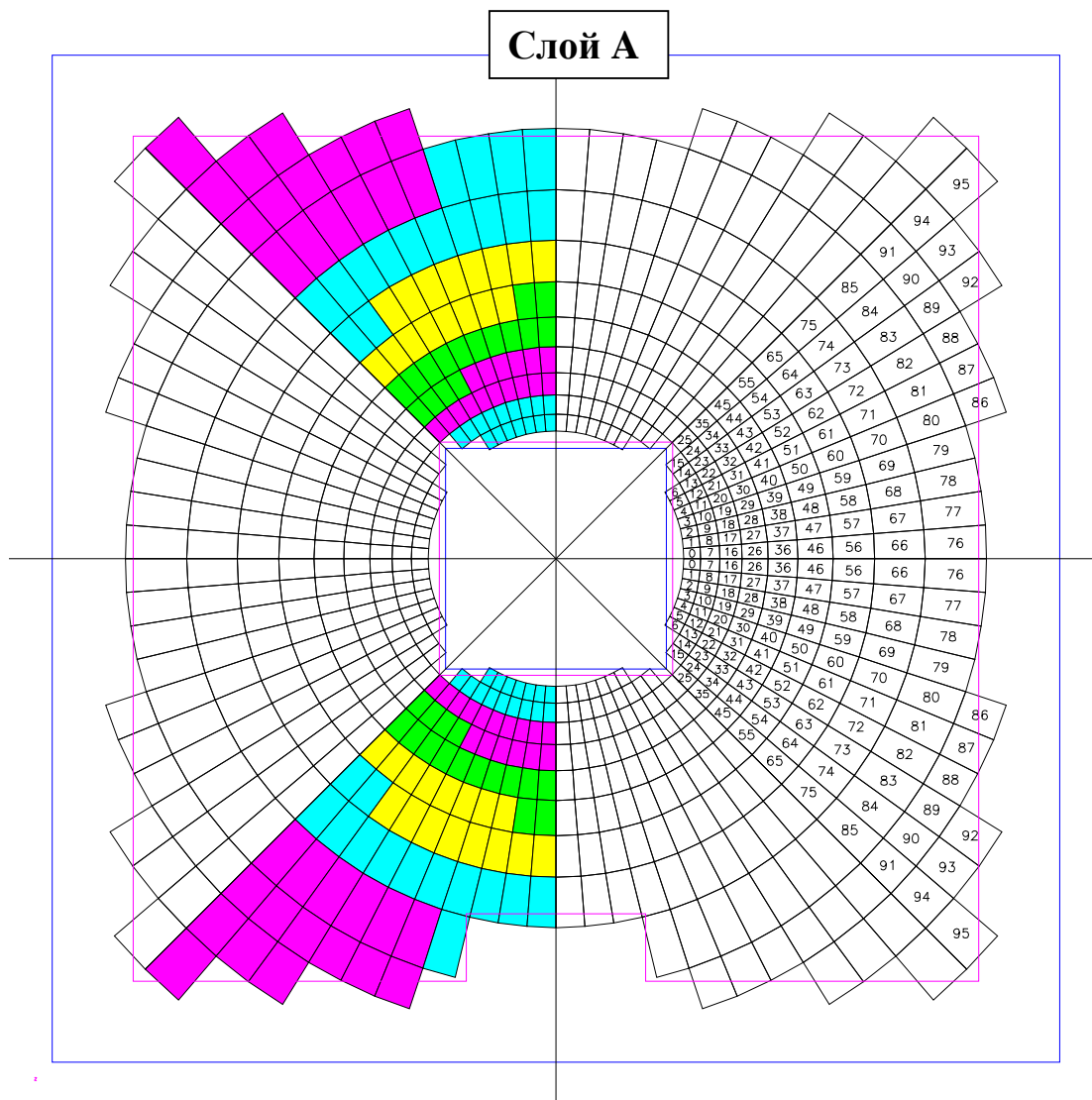


Рис. 2.1. Схема слоя А системы сцинтиляционных счетчиков. Восемь октантов нумеруются с нулевого по седьмой по часовой стрелке, начиная с нижнего октанта левой верхней четверти слоя. Высоковольтные группы октантов обозначены разным цветом.

счетчиков на октанты и октанта на группы представлено на рис. 2.1 на примере слоя А. На рис. 2.2 представлена фотография слоя С.

Конструкция одного сцинтиляционного счетчика [23] представлена на рис. 2.3. В счетчиках используется сцинтиллятор Bicron 404А [24] толщиной 12.7 мм. Передача сцинтиляционного света на фотоумножитель ФЭУ-115М [25] осуществляется при помощи двух



Рис.2.2. Фотография слоя С триггерных сцинтилляционных счетчиков передней мюонной системы.

полос из сместителя спектра Kumagin 30 толщиной 4.2 мм и шириной 12.7 мм, расположенных на соседних гранях сцинтиллятора. Вблизи пересечения граней сцинтиллятора полосы из сместителя спектра изогнуты на угол  $43.9^\circ$ , как показано на рисунке. В силу геометрии установки размеры счетчиков сильно варьируются – от  $9 \cdot 14 \text{ см}^2$  до  $60 \cdot 110 \text{ см}^2$ . Фотоумножитель защищен от влияния рассеяния магнитных полей экранами из пермаллоя и мягкой стали. Для калибровки и проверки ФЭУ используются сигналы от светодиодов, которые подаются через оптическое волокно со специальным разъемом (рис. 2.3, секция С-С).

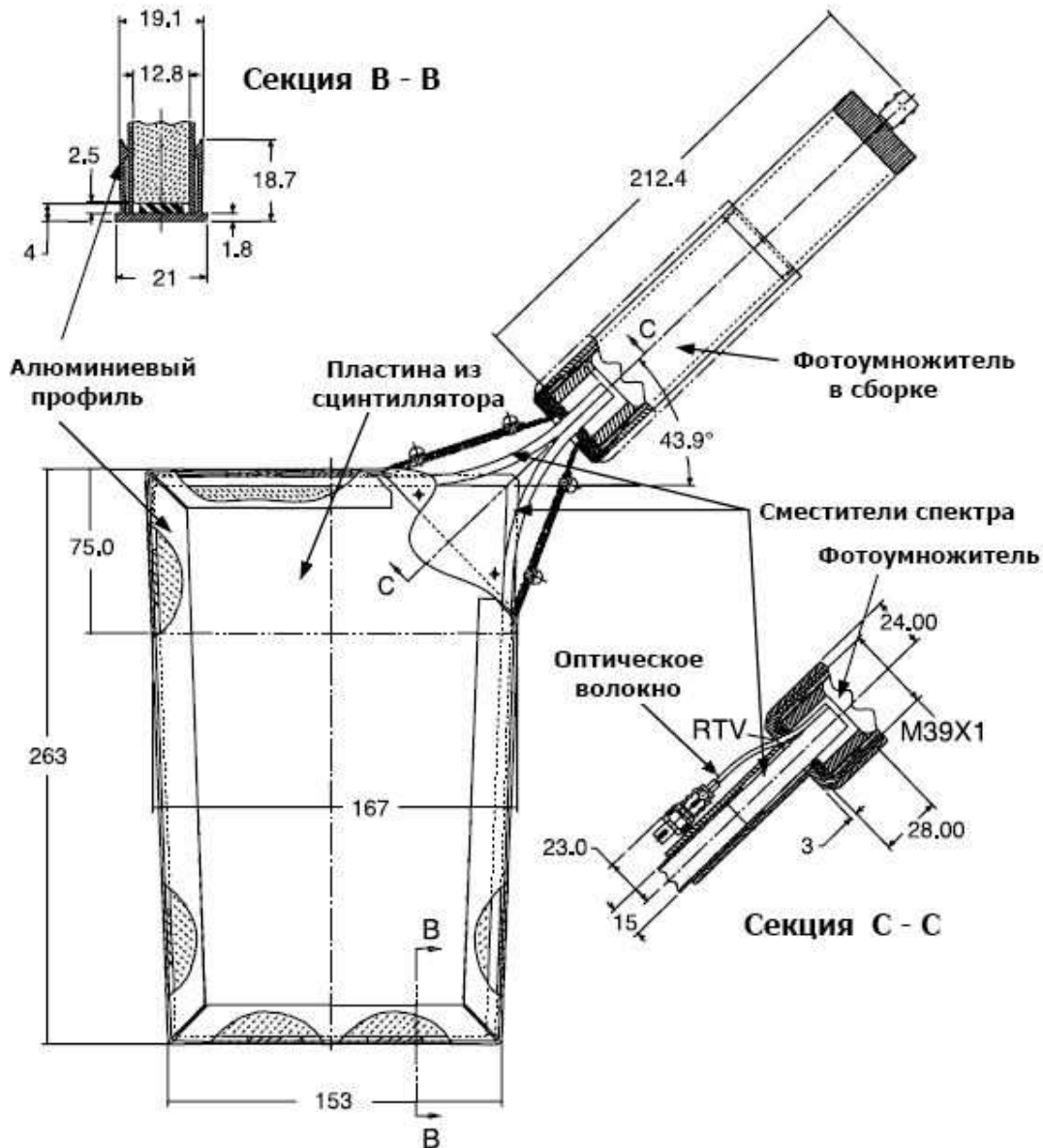


Рис. 2.3 Схема сцинтилляционного счетчика. Размеры даны в мм.

Схема крепежа счетчиков изображена на рис. 2.4. На плоской раме счетчики установлены под наклоном и поддерживаются алюминиевыми крепежными скобами таким образом, что между ними нет зазора. Все четыре края счетчика перекрываются краями соседних счетчиков. Такой дизайн упрощает процедуру сбора счетчиков в октанты и обеспечивает легкий доступ к фотоумножителям и делителям. Точность расположения

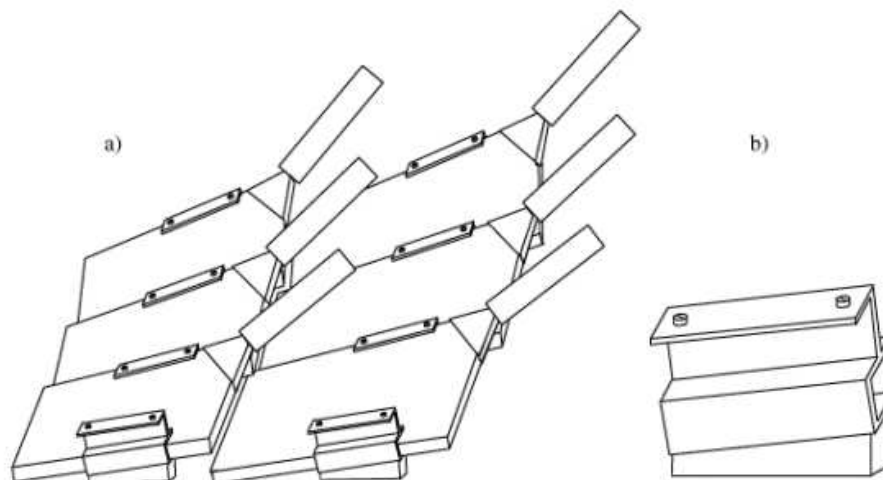


Рис. 2.4. Схема крепежа счетчиков: а) расположение счетчиков при сборке в октанте, б) алюминиевая крепежная скоба.

собранного октанта составляет 3 мм, а местоположение слоя из восьми октантов определяется оптическими методами с точностью 1 мм. В случае необходимости проведения ремонтных работ в недоступных местах (большинство счетчиков слоя В) полностью собранные слои А и В счетчиков отодвигались и затем возвращались в исходное положение с точностью 1 мм. Около 15 счетчиков (из 4214) вышли из строя в первые три года работы установки во втором сеансе. Все они были успешно починены. Впоследствии число неработающих счетчиков снизилось до 1–2 в год ( $\leq 0.05\%$ ). Основной причиной, как правило, является разъединение или поломка сигнального кабеля, реже – поломка делителя, еще реже – ФЭУ. Типичная длительность открытия/закрытия слоя счетчиков с последующей фиксацией его местоположения оптическими методами — один день.

### 2.3. Сцинтиллятор, сместители спектра, ФЭУ

Для получения высокой эффективности, однородности и хорошего временного разрешения при разумной стоимости производства были изучены несколько методов светосбора. Из измерений был сделан вывод,

что для данной геометрии и при данных размерах счетчиков полосы из сместителя спектра (WLS) дают лучшую эффективность светосбора и конструктивно проще, чем, например, волоконные [23]. Поэтому в подавляющем большинстве счетчиков для светосбора использовались полосы [26] из сместителя спектра Kumarin 30, пик поглощения которого соответствовал пику излучения сцинтиллятора Bicron 404А, выбранного в качестве рабочего варианта вследствие его хорошей однородности, высокого световыхода и малого времени высвечивания. Лишь примерно в 1% счетчиков, в которых из-за конструктивных ограничений требовалось иное расположение ФЭУ, для светосбора использовались оптические волокна с WLS. Основные характеристики сцинтиллятора Bicron 404А и сместителя спектра Kumarin 30 представлены в табл.2.1, основные характеристики фотоумножителя ФЭУ-115М приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.1. Основные характеристики сцинтиллятора Bicron 404А и сместителя спектра Kumarin 30.

Материал	Время высвечивания, нс	Пик эмиссии, нм	Длина поглощения, м
Bicron 404А	2.0	408	1.7
Kumarin 30	2.7	460	1.4

Таблица 2.2. Основные характеристики ФЭУ-115М.

Диаметр фотокатода, мм	20
Квантовая эффективность при 500 нм, %	$15^{+5}_{-2.5}$
Неоднородность отклика фотокатода, %	<10
Рабочее напряжение, кВ	$1.8 \pm 0.2$
Коэффициент усиления при рабочем напряжении	$2 \cdot 10^6$

Перед сборкой счетчиков 3301 полоса из сместителя спектра длиной 124 см каждая была отполирована и затем протестирована с помощью светодиода на стенде, схема которого представлена на рисунке 2.5.

Сместители спектра (WLS), фотоумножитель (PMT) и светодиод (LED) были помещены в светонепроницаемый бокс. Пропорциональный относительно световыходу анодный ток измерялся по падению напряжения на анодном сопротивлении ФЭУ в 12 точках вдоль длины WLS полосы — на расстояниях в 10, 20, 30, ... 120 см от фотокатода. В ходе измерений использовался один и тот же экземпляр ФЭУ.

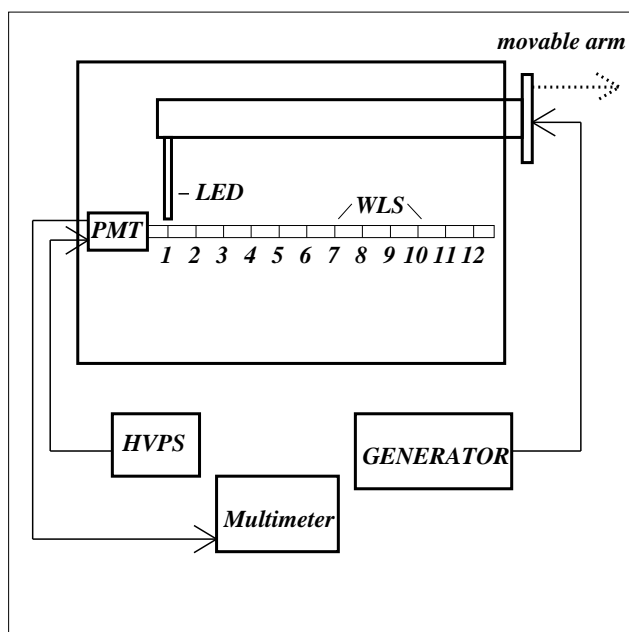


Рис. 2.5. Схема стенда для проверки сместителей спектра. LED – светодиод, PMT – фотоумножитель, WLS – полоса из сместителя спектра, HVPS – высоковольтный источник питания, GENERATOR – генератор светодиода, Multimeter – мультиметр.

Основными характеристиками сместителя спектра являются световыход  $I$  и длина поглощения  $\lambda$  - расстояние, на котором световой поток уменьшается в  $e$  раз. Длина поглощения зависит от внутренней структуры и чистоты материала сместителя спектра и качества полировки.



Зависимость среднего значения световыхода от расстояния до ФЭУ для 3301 полосы из сместителя спектра представлена на рисунке 2.6. Распределения полос по световыходу для каждой из этих 12 точек имеют схожий вид. Одно из них, для первой точки (на расстоянии 10 см от ФЭУ), показано на рисунке 2.7а. На рисунке 2.7б представлено распределение длины поглощения для всех WLS. Среднее значение составило ~97 см. Из рис. 2.7 следует, что полный разброс значений полос WLS по световыходу и длине поглощения составляет около трех. В связи с этим встает вопрос о выборе полос для счетчиков разного размера. Прежде всего, полосы со световыходом в первой точке  $I < 125$  мВ или длиной поглощения  $\lambda < 60$  см считались бракованными и не использовались в счетчиках. При этих ограничениях, как видно из рис. 2.7, число используемых полос изменяется незначительно. Далее основным правилом было следующее: чем больше размер счетчика, тем больше должны быть световыход и длина поглощения полосы, которая в нем используется, чтобы обеспечить приемлемые величину и равномерность сигнала по площади больших счетчиков. Фактически, для многих счетчиков выполнялось условие  $\lambda > 2L$ , где  $L$  – длина полосы.

После того, как счетчики были собраны, они были проверены на светодиодах и с помощью радиоактивного источника. Затем счетчики с минимальными величинами выходного сигнала были проверены на космических мюонах с целью определения для них числа фотоэлектронов, образующихся при регистрации минимально-ионизирующей частицы (MIP). Тест показал, что число фотоэлектронов от MIP  $> 70$ . Это обеспечивает высокую эффективность регистрации мюонов ( $> 0.99$ ).

Аналогичным описанному ранее методом было проведено изучение световыхода образца сцинтиллятора Vicron 404A, облучаемого радиоактивным источником  $\text{Sr}^{90}$  и светодиодом. В обоих случаях

использовался один и тот же сместитель спектра. Для сравнения результатов они были отнормированы на значения, полученные в первой точке – на расстоянии 10 см от ФЭУ. Рисунок 2.8 показывает, что измерения с помощью источника  $\text{Sr}^{90}$  и светодиода хорошо согласуются друг с другом.

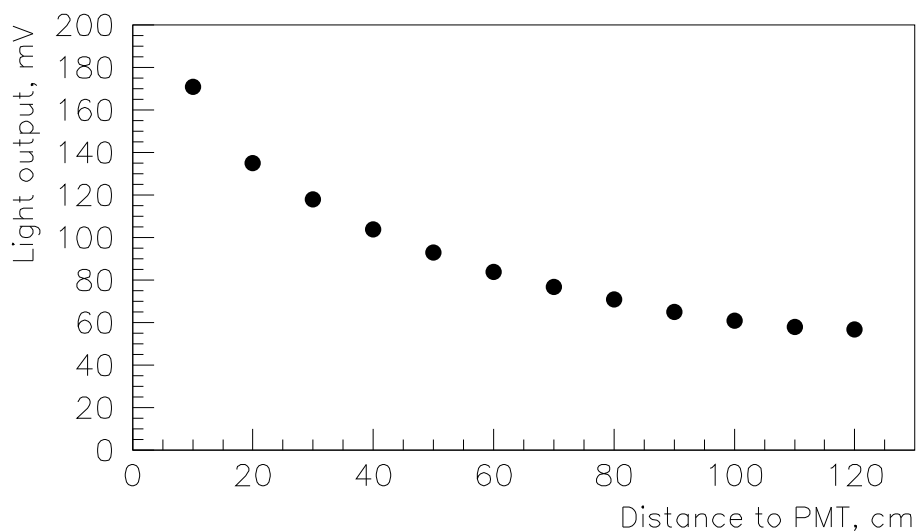


Рис. 2.6. Зависимость световыхода от расстояния до ФЭУ. Статистические ошибки измерений меньше размера точек.

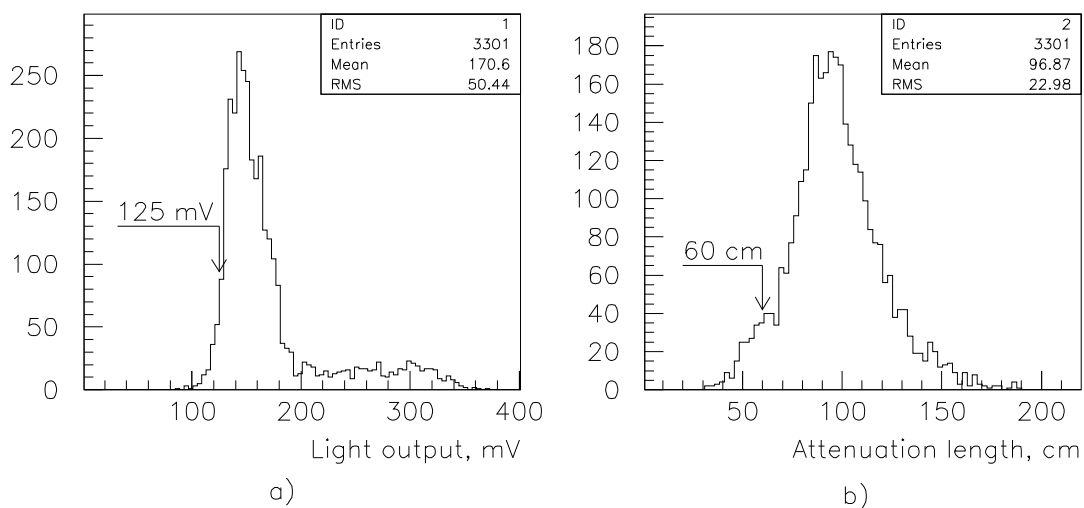


Рис.2.7. а) Распределение величины световыхода для первой точки (на расстоянии 10 см от ФЭУ). б) Распределение длины поглощения.

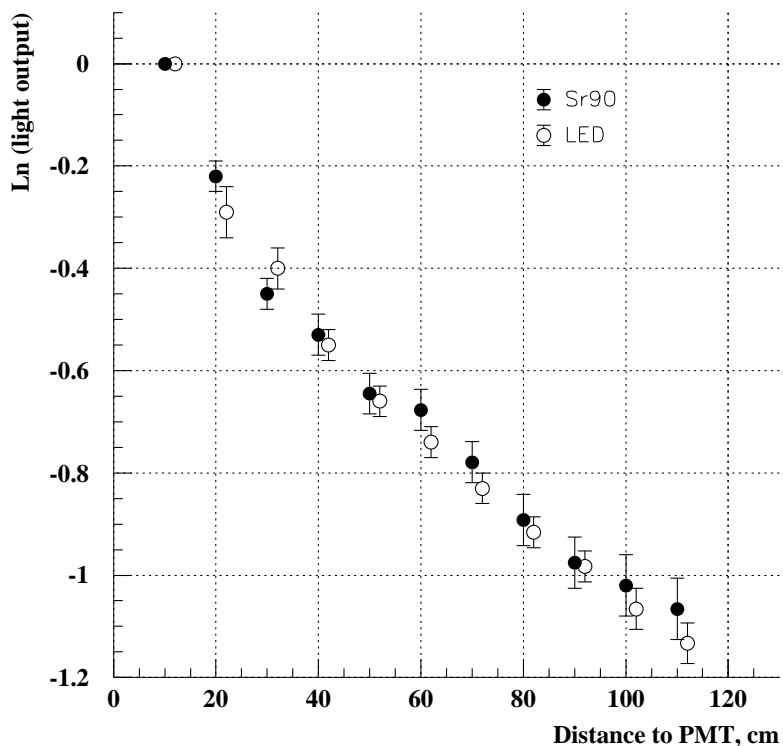


Рис. 2.8. Сравнение зависимостей световыхода от расстояния до ФЭУ, полученных с помощью источника (Sr90) и светодиода (LED).

Заранее на тестовом пучке 125 ГэВ/с в Фермилабе были проведены исследования с прототипом счетчика [27]. На рис. 2.9 представлены зависимости эффективности регистрации и временного разрешения счетчиков от высокого напряжения для счетчиков трех размеров: “больших” –  $60 \cdot 106 \text{ см}^2$ , “типичных” –  $24 \cdot 34 \text{ см}^2$  и “маленьких” –  $17 \cdot 24 \text{ см}^2$ . Порог регистрации для этих счетчиков был установлен на уровне 10 мВ. Измеренные эффективности и временные разрешения показывают, что максимальная эффективность регистрации превосходит 99.9%, а временное разрешение в зависимости от размера счетчика варьируется от 0.5 до 1 нс.

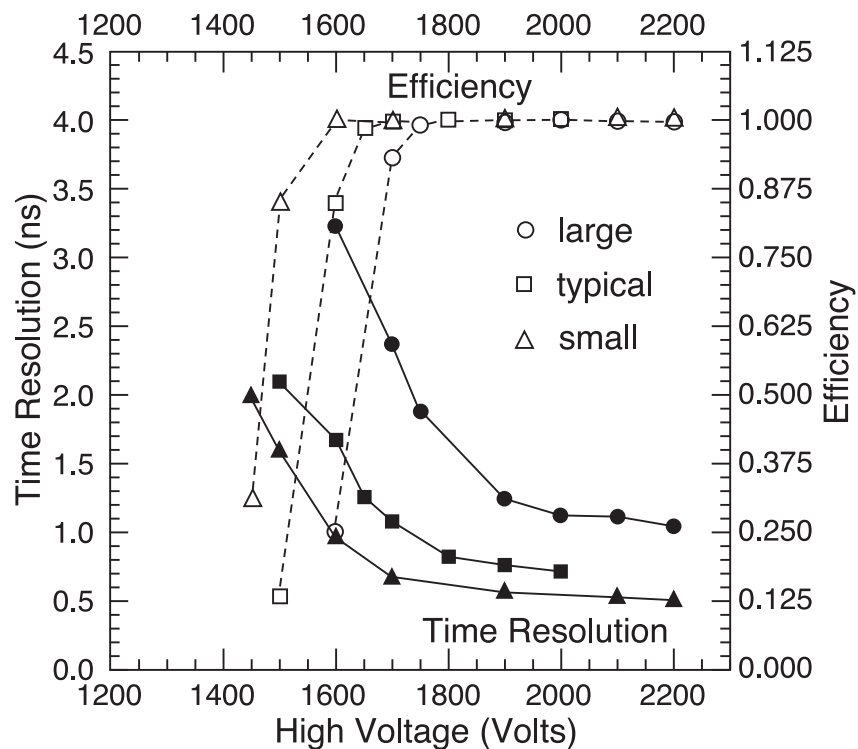


Рис. 2.9. Зависимости временного разрешения и эффективности регистрации сцинтилляционных счетчиков различного размера от высокого напряжения.

#### 2.4. Отбор ФЭУ и счетчиков по высоковольтным группам

Для всех имевшихся в распоряжении фотоумножителей с помощью светодиода было измерено рабочее значение высокого напряжения (напряжение, при котором сигнал в осциллографе, определявшийся визуально, был равен 30 мВ). Результаты измерений представлены на рисунке 2.10.

Для каждой высоковольтной группы выбирались счетчики по возможности с близкими значениями сигналов и к ним подбирались фотоумножители с близкими значениями высокого напряжения. Для больших по размеру счетчиков с учетом оставшихся в наличии ФЭУ выбирались фотоумножители с большими значениями спектральной чувствительности, коэффициента усиления, эффективности фотокатода и с большими значениями высокого напряжения, чтобы обеспечить

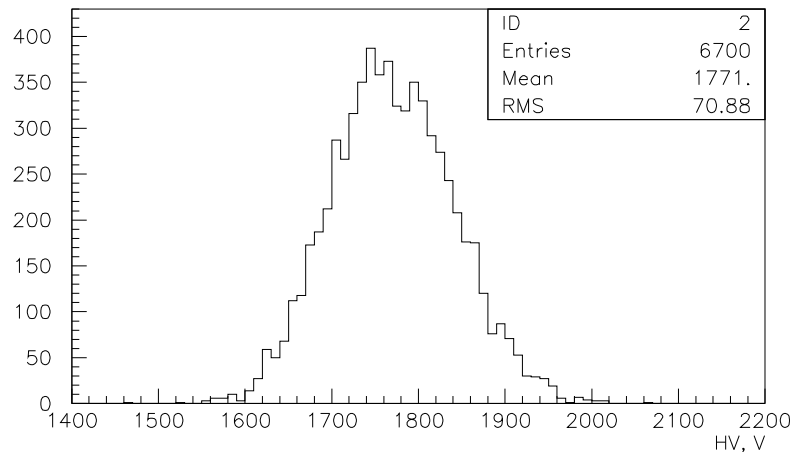


Рис. 2.10. Распределение рабочих значений высокого напряжения для всех проверенных ФЭУ.

оптимальную эффективность регистрации и временное разрешение (см. рис. 2.9 и 2.10). Собранные счетчики после перевозки во ФНАЛ были протестированы с помощью радиоактивного источника  $Sr^{90}$  на установке, схема которой изображена на рисунке 2.11. Среднее для всех счетчиков данной группы значение величины высокого напряжения, при котором сигнал в осциллографе составлял 30 мВ, становилось рабочим значением величины высокого напряжения для данной группы.

На практике могло понадобиться изменить рабочее значение высокого напряжения для какой-нибудь высоковольтной группы счетчиков. В связи с этим возникает вопрос, как будут вести себя коэффициенты усиления ФЭУ при изменении высокого напряжения. Относительные изменения коэффициентов усиления ФЭУ должны быть минимальными.

Для проверки работы счетчиков при разных значениях высокого напряжения были проведены специальные измерения. Для «тренировки» ФЭУ и измерения дрейфа коэффициента усиления фотоумножителя в течение семи дней держались при включенном высоковольтном напряжении и облучались светодиодом с частотой 50 кГц. Во время самих измерений светодиоды использовались в качестве источника

света, а сигнал с ФЭУ определялся визуально с помощью осциллографа. Точность таких измерений составляет ~10%. Для каждой группы коэффициенты усиления ФЭУ измерялись в высоковольтном диапазоне 1275 – 1925 В с шагом в 100 В. Значения коэффициентов усиления при разных значениях высокого напряжения для каждого счетчика были отнормированы на значения сигналов при рабочем значении высокого напряжения для данной группы счетчиков. По результатам измерений коэффициентов усиления для отдельных счетчиков были определены их

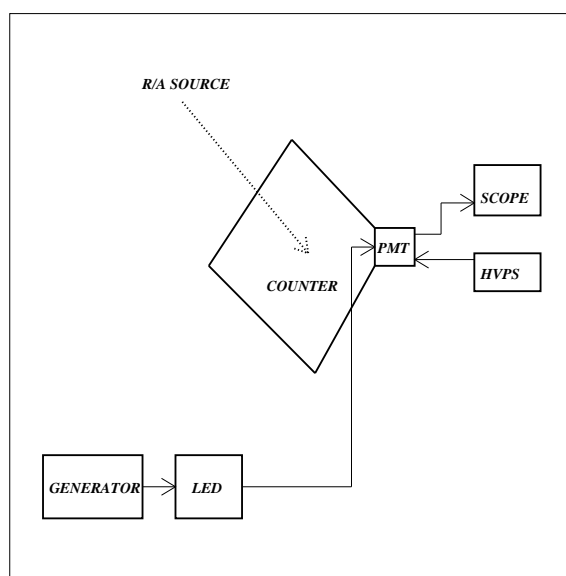


Рис. 2.11. Схема установки для проверки сцинтилляционных счетчиков. COUNTER – сцинтилляционный счетчик, LED – светодиод, PMT – фотоумножитель, HVPS – высоковольтный источник питания, GENERATOR – генератор светодиода, SCOPE – осциллограф, R/A SOURCE – радиоактивный источник.

средние значения для высоковольтных групп фотоумножителей. Эти значения представлены на рисунке 2.12. Измерения были проведены для трех из шести групп октанта NA3, который был собран первым: для группы с минимальным (первая), максимальным (пятая) и средним (третья) значениями рабочего напряжения. Ошибки на рисунке 2.12 выражены в процентах и представляют собой разницу между максимальным (минимальным) и средним значениями коэффициента

усиления для группы фотоумножителей при выбранном значении высокого напряжения. Результаты показывают, что в диапазоне 1400 – 1900 В коэффициенты усиления фотоумножителей внутри группы отличаются от среднего значения не более, чем на 12%.

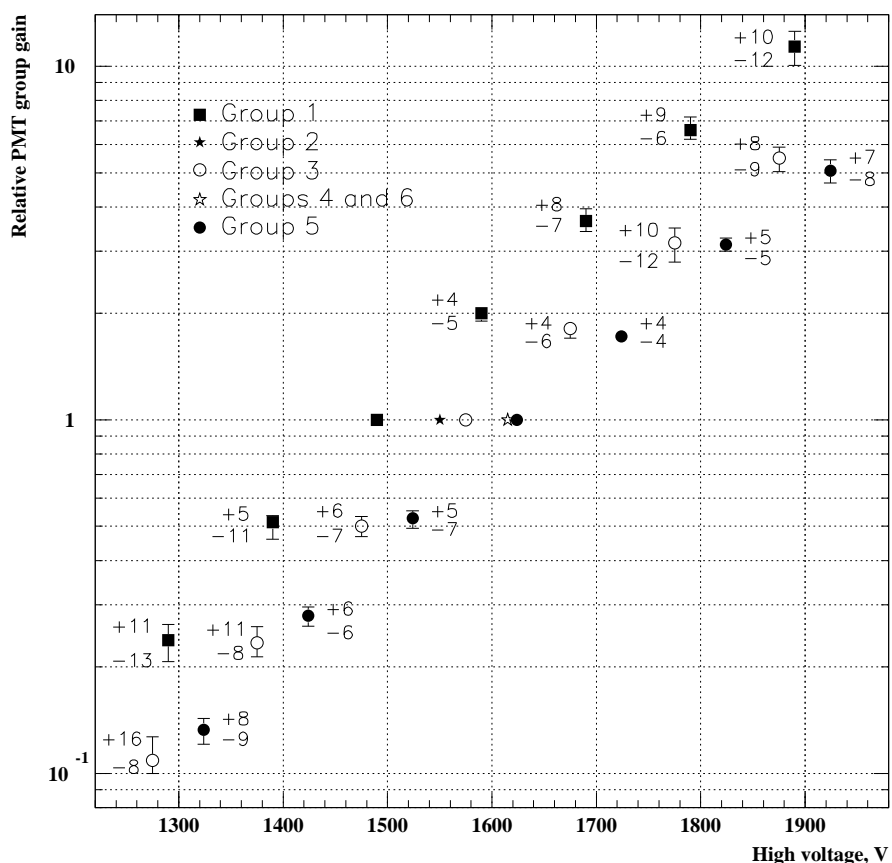


Рис. 2.12 Зависимость коэффициента усиления высоковольтных групп ФЭУ от высокого напряжения. Ошибки выражены в процентах.

## 2.5. Тестирование собранных октантов

Процедура испытания сцинтиляционных счетчиков в ИФВЭ включала в себя измерения световых выходов счетчиков с помощью радиоактивного источника. Несколько счетчиков каждого размера были протестированы на космических мюонах, чтобы установить соответствие между результатами измерений источником и числом фотоэлектронов. Число фотоэлектронов, регистрируемых счетчиками, меняется от 240 для

самых маленьких счетчиков слоя А до 70 для самых больших счетчиков слоя С. Неоднородность светосбора составляет  $\pm 10\%$ .

Каждый собранный в Фермилабе октант помимо тестирования на светодиодах и с помощью радиоактивного источника  $\text{Sr}^{90}$  тестировался также и на космических мюонах. Для каждой высоковольтной группы устанавливалось рабочее значение высокого напряжения, триггер в электронных модулях SFE (Scintillator Front-End Board) ставился в положение “OR”, а порог дискриминации устанавливался от 5 мВ до 50 мВ, что давало возможность распознавать неработающие и шумящие каналы. Результаты таких тестов на примере октанта SA6 для значения порога 30 мВ представлены на рис. 2.13, 2.14 и 2.15. Неработающие каналы, возникающие вследствие неполадок с самими счетчиками, электроникой SFE или соединительными кабелями, легко определялись по провалам на картинке, шумящие – по несоразмерно большому числу срабатываний в каналах, чем в соседних с ними. Путем варьирования величины порога дискриминации во время тестирования разных октантов определялось рабочее значение этого порога для набора данных от ускорителя, которое в итоге составило 7 мВ.

Левая верхняя картинка на рис. 2.13 показывает средние значения пьедесталов для каждого из счетчиков, пронумерованных от 0 до 95, и их RMS, которое увеличивается с увеличением размера счетчиков (сами же размеры счетчиков увеличиваются примерно пропорционально порядковому номеру). Такие большие значения RMS для каждого счетчика обусловлены наличием редких ( $\sim 1\%$ ) срабатываний от космических мюонов с амплитудами, значительно превышающими значения пьедесталов. Счетчики с номерами 76-78 не были установлены в этом октанте в силу его геометрического положения.



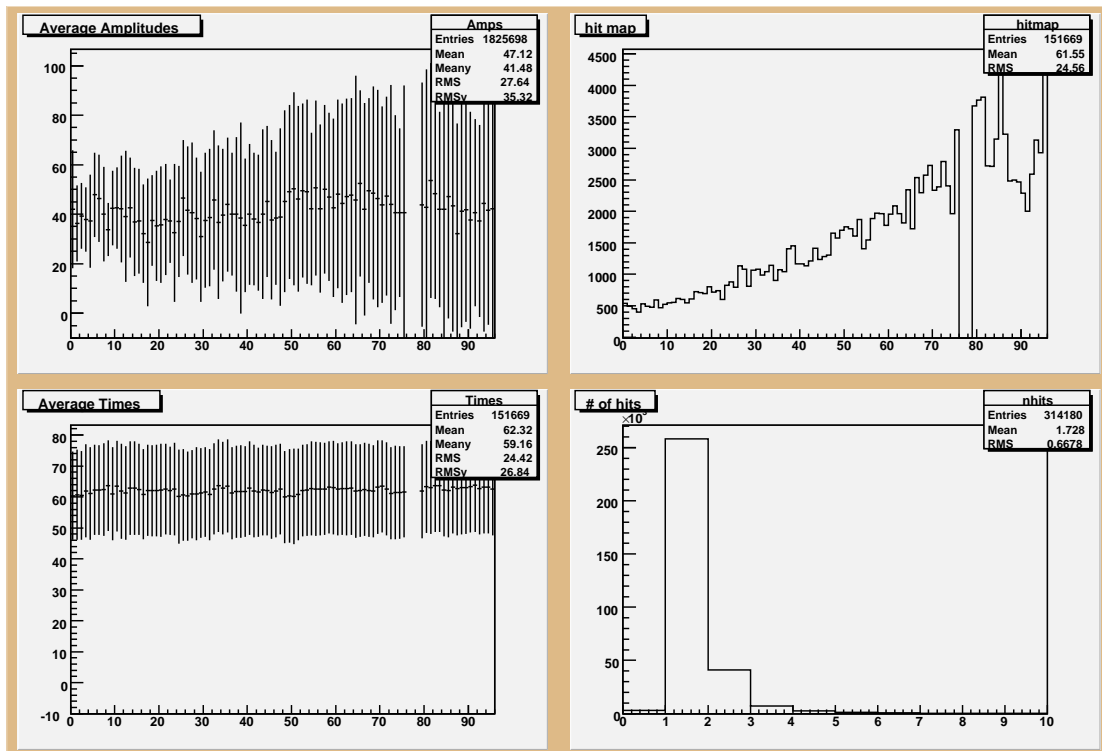


Рис. 2.13. Результаты тестирования октанта SA6 на космических мюонах. Слева сверху – средние значения пьедесталов, включая редкие (~1%) срабатывания от космических мюонов. По оси X – номер счетчика. Слева внизу – средние времена регистрации мюонов, справа сверху – карта срабатываний, справа внизу – распределение числа срабатываний. Порог дискриминации равен 30 мВ. Счетчики с номерами 76, 77, 78 не установлены вследствие геометрического положения октанта.

На левом нижнем рисунке показаны средние времена регистрации мюонов счетчиками относительно сигнала запуска триггера. На правом верхнем рисунке представлена карта срабатываний счетчиков, демонстрирующая увеличение числа срабатываний счетчиков по мере увеличения их геометрических размеров. Наконец, правый нижний рисунок показывает распределение числа срабатываний счетчиков, подтверждая преобладание одномюонных событий.

На рис. 2.14 и 2.15 представлены временные и пьедестальные распределения для счетчика с самыми большими размерами в октанте (SA6-95) и суммарные распределения для всех счетчиков этого октанта.

Левые рисунки наглядно демонстрируют диапазон временных ворот во время этих тестов – порядка 50 нс.

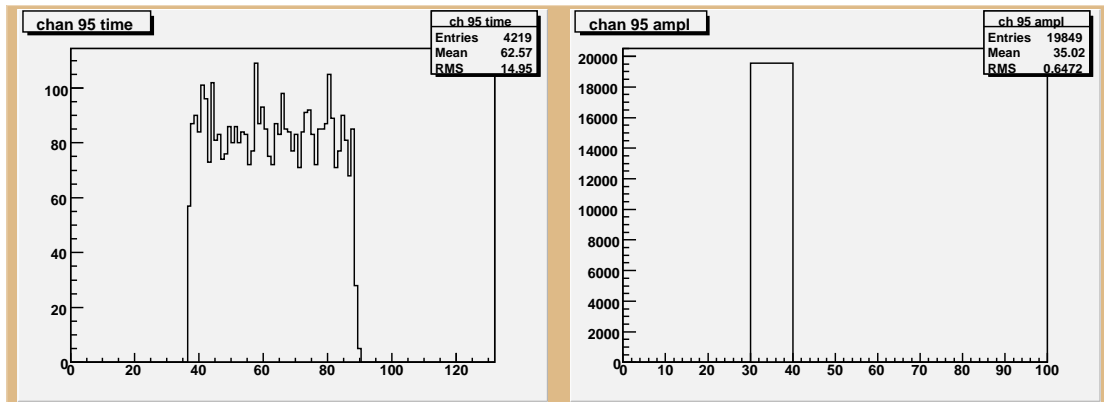


Рис. 2.14. Результаты тестирования счетчика SA6-95 на космических мюонах. Слева – временное распределение, справа – пьедестальное.

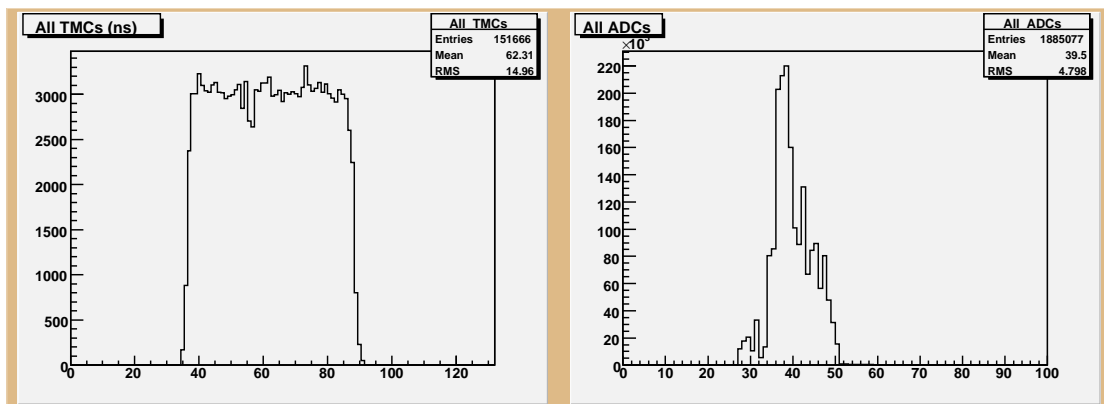


Рис. 2.15. Результаты тестирования октанта SA6 на космических мюонах. Слева – суммарное временное распределение для всех 93 счетчиков, справа – пьедестальное.

### 3. Мониторирование и калибровки системы триггерных сцинтилляционных счетчиков во время второго сеанса

#### 3.1. Калибровка высоковольтных источников питания

Высоковольтная система эксперимента D0 основана на VME модулях [28]. Для работы со сцинтилляционными триггерными счетчиками передней мюонной системы используются восьмиканальные источники питания VME 4877PS с максимальным током 3.2 мА. Чтобы минимизировать число используемых источников питания, 16 фотоумножителей со схожими значениями рабочего высокого напряжения подключены к одному источнику. Таким образом, всего задействовано 6 VME крейтов с 288 источниками питания. Типичное значение тока через делитель счетчика составляет 145 мкА при напряжении 2.0 кВ.

Как уже упоминалось, 48 октантов сцинтилляционных счетчиков (до 96 счетчиков в каждом) образуют триггерный детектор передней мюонной системы установки D0. Внутри октанта счетчики разбиты на 6 групп (до 16 счетчиков в каждой), каждая из которых подключена к отдельному высоковольтному источнику питания. Для каждого счетчика группы определено значение его рабочего напряжения как напряжение, при котором сигнал от  $\text{Sr}^{90}$  составляет 30 мВ по осциллографу. Счетчики отбирались в группы с тем расчетом, чтобы значение рабочего напряжения отдельного счетчика отличалось от среднего значения для группы не более чем на 25 В.

Мониторирование высокого напряжения осуществляется с помощью специальной программы. Дисплей высокого напряжения изображен на рис. 3.1. Эта программа позволяет следить за рабочими значениями токов  $I_{READ}$ , выраженными в микроамперах, и напряжений  $V_{READ}$ , выраженными в вольтах, для каждой высоковольтной группы.

Сопротивление одного делителя  $R_{BASE}$  можно рассчитать следующим

$$\text{образом: } R_{BASE} = V_{BASE} / I_{BASE} = V_{READ} / (I_{READ} / N) = (V_{READ} * N) / I_{READ} ,$$

где N - число счетчиков в данной высоковольтной группе (от 1 до 16).

Для всех групп счетчиков эта величина должна соответствовать реальному сопротивлению делителя. Типичное значение  $R_{BASE}$  равно 13.7 МΩ.

MUC MDT								MUC Pixel A North								MUC Pixel B North								MUC Pixel C North								MUC Pixel A South								MUC Pixel B South								MUC Pixel C South																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Channel	U_Trip	L_Max	U_Max	U_Set	U_Read	L_Read	State	Channel	U_Trip	L_Max	U_Max	U_Set	U_Read	L_Read	State	Channel	U_Trip	L_Max	U_Max	U_Set	U_Read	L_Read	State	Channel	U_Trip	L_Max	U_Max	U_Set	U_Read	L_Read	State	Channel	U_Trip	L_Max	U_Max	U_Set	U_Read	L_Read	State																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
PAN01	-1699	2500	-1600	-1600	-1599.2	1858.7	Locked	PAN02	-1696	2500	-1590	-1590	-1589.4	1855.5	Locked	PAN03	-1699	2500	-1600	-1600	-1599.4	1873.7	Locked	PAN04	-1696	2500	-1600	-1600	-1599.7	1865.1	Locked	PAN05	-1699	2500	-1590	-1590	-1589.4	1858.4	Locked	PAN06	-1697	2500	-1580	-1580	-1579.7	1848.2	Locked	PAN07	-1701	2500	-1600	-1600	-1599.8	1874.9	Locked	PAN08	-1698	2500	-1630	-1630	-1629.1	1911.0	Locked	PAN09	-1695	2500	-1640	-1640	-1639.6	1919.3	Locked	PAN10	-1771	2500	-1650	-1650	-1649.9	1928.1	Locked	PAN11	-1787	2500	-1720	-1720	-1720.3	2007.5	Locked	PAN12	-1793	2500	-1700	-1700	-1699.5	1990.0	Locked	PAN13	-1693	2500	-1620	-1620	-1620.1	1894.0	Locked	PAN14	-1692	2500	-1610	-1610	-1609.7	1881.0	Locked	PAN15	-1691	2500	-1610	-1610	-1609.5	1879.2	Locked	PAN16	-1692	2500	-1620	-1620	-1620.5	1892.2	Locked	PAN17	-1694	2500	-1640	-1640	-1639.6	1915.4	Locked	PAN18	-1693	2500	-1630	-1630	-1630.2	1904.6	Locked	PAN19	-1591	2500	-1490	-1490	-1489.7	1731.4	Locked	PAN20	-1689	2500	-1550	-1550	-1549.9	1800.1	Locked	PAN21	-1694	2500	-1580	-1580	-1579.7	1832.4	Locked	PAN22	-1695	2500	-1620	-1620	-1619.7	1882.5	Locked	PAN23	-1694	2500	-1620	-1620	-1619.1	1880.7	Locked	PAN24	-1696	2500	-1620	-1620	-1619.5	1879.7	Locked	PAN25	-1700	2500	-1600	-1600	-1598.8	1872.8	Locked	PAN26	-1703	2500	-1590	-1590	-1590.1	1861.2	Locked	PAN27	-1703	2500	-1630	-1630	-1630.1	1906.1	Locked	PAN28	-1757	2500	-1650	-1650	-1649.1	1928.6	Locked	PAN29	-1782	2500	-1670	-1670	-1669.2	1951.9	Locked	PAN30	-1798	2500	-1680	-1680	-1679.9	1959.9	Locked	PAN31	-1706	2500	-1580	-1580	-1579.8	1842.2	Locked	PAN32	-1703	2500	-1590	-1590	-1590.0	1854.9	Locked	PAN33	-1702	2500	-1600	-1600	-1600.4	1867.2	Locked	PAN34	-1702	2500	-1590	-1590	-1590.0	1852.3	Locked	PAN35	-1702	2500	-1590	-1590	-1589.4	1505.6	Locked	PAN36	-1703	2500	-1600	-1600	-1600.1	1868.7	Locked	PAN37	-1701	2500	-1620	-1620	-1620.0	1894.4	Locked	PAN38	-1700	2500	-1630	-1630	-1630.0	1901.3	Locked	PAN39	-1702	2500	-1630	-1630	-1631.1	1905.6	Locked	PAN40	-1710	2500	-1640	-1640	-1640.3	1913.2	Locked	PAN41	-1778	2500	-1660	-1660	-1659.5	1572.4	Locked	PAN42	-1776	2500	-1660	-1660	-1659.3	1937.6	Locked	PAN43	-1694	2500	-1610	-1610	-1610.5	1880.8	Locked	PAN44	-1701	2500	-1630	-1630	-1629.6	1899.5	Locked	PAN45	-1699	2500	-1610	-1610	-1609.9	1877.0	Locked	PAN46	-1701	2500	-1620	-1620	-1619.3	1886.2	Locked	PAN47	-1778	2500	-1660	-1660	-1659.3	1933.7	Locked	PAN48	-1774	2500	-1650	-1650	-1649.7	1924.0	Locked

Рис. 3.1. Дисплей высокого напряжения.

Например, для высоковольтной группы 2 октанта NA5, содержащей 16 счетчиков (PAN33 на рис. 3.1), получаем по этой формуле:  $R_{BASE} (PAN33) = (1600.1 \text{ V} * 16) / 1867.3 \text{ A} = 13.71 \text{ M}\Omega$ . Для группы 4

октанта NA5, содержащей 13 счетчиков (PAN35 на рис.3.1), получаем:  
 $R_{BASE} (PAN35) = (1589.3 \text{ V} * 13) / 1505.6 \text{ A} = 13.72 \text{ M}\Omega$ . С помощью специальной программы, отслеживающей эти значения, легко диагностируются все отклонения от рабочих значений и неполадки в высоковольтной системе. В случае возникновения серьезных неполадок высоковольтный источник питания заменяется.

На рис. 3.2 изображен так называемый SRC монитор, необходимый для наблюдения за состоянием и устранения неполадок с рабочими крейтами (корзинами) сцинтилляционных счетчиков центральной и передней мюонных систем, находящимися непосредственно в зале эксперимента D0. Он позволяет контролировать значения напряжений низковольтных источников питания, температурные значения и логические ошибки состояния электроники. Один рабочий крейт обслуживает 4 октанта. Таким образом, 48 октантов счетчиков передней мюонной системы обслуживаются двенадцатью корзинами, названными по своему географическому положению. Например, рабочий крейт NABET (North AB East Top) — это северо-восточный верхний AB крейт, содержащий октанты NA0, NA1, NB0 и NB1. В случае возникновения проблем с корзиной, ее можно дистанционно перегрузить или выключить/включить с помощью этого монитора.

Для контроля работы высоковольтной системы периодически (примерно раз в год) проводится калибровка высоковольтных источников питания посредством сравнения величины напряжения, считываемого по дисплею (см. рис. 3.1), с величиной, измеренной цифровым вольтметром с использованием калибровочного делителя 1:1000. В случае обнаружения отклонения, большего, чем 30 В (а такое случается примерно раз в два-три года), источник заменяется. Результаты, полученные в октябре 2005 года, изображены на рис. 3.3.

Crate Status		SFE Status								
SRC Name	+5 Volts	-5 Volts	+12 Volts	-12 Volts	Crate Temp	SRC Temp	Status	Power		
Central East- CMESC- G5 0K3b										
CEB	4.95	-4.88	11.90	-11.93	28.16	28.16	Normal	On	Clear	Reset
CE5	4.99	-4.92	11.71	-11.83	25.92	22.40	Normal	On	Clear	Reset
CET	4.99	-4.96	11.81	-12.03	26.56	21.44	Normal	On	Clear	Reset
Central West- CMW5C- G5 0K37										
CWB	4.95	-4.92	12.00	-11.83	26.24	24.32	Normal	On	Clear	Reset
CW5	4.99	-5.00	11.90	-12.03	32.00	25.60	Normal	On	Clear	Reset
CWT	5.03	-4.92	11.90	-11.93	25.60	24.00	Normal	On	Clear	Reset
Forward North- FMN5- G5 0K33										
NABET	4.95	-5.04	12.00	-11.93	28.16	22.40	Normal	On	Clear	Reset
NABWT	4.95	-4.92	11.81	-11.93	30.40	24.64	Normal	On	Clear	Reset
NABWB	4.95	-4.92	12.00	-11.93	25.60	23.04	Normal	On	Clear	Reset
NABEB	4.95	-5.08	11.81	-11.93	28.16	28.16	Normal	On	Clear	Reset
NCE	4.95	-5.00	12.10	-11.93	25.60	22.72	Normal	On	Clear	Reset
NCW	4.99	-5.04	11.81	-12.03	24.32	20.80	Normal	On	Clear	Reset
Forward South- FM55- G5 0K32										
SABET	4.95	-5.08	12.10	-12.22	25.60	22.08	Normal	On	Clear	Reset
SABWT	4.99	-4.96	11.90	-11.83	25.60	23.04	Normal	On	Clear	Reset
SABWB	4.99	-5.04	11.90	-11.93	28.48	22.40	Normal	On	Clear	Reset
SABEB	4.99	-4.96	11.90	-11.93	30.40	25.60	Normal	On	Clear	Reset
SCE	5.07	-5.00	12.00	-12.03	24.00	22.72	Normal	On	Clear	Reset
SCW	4.91	-4.96	11.81	-11.93	22.08	21.12	Normal	On	Clear	Reset

Status:

Рис. 3.2. SRC монитор.

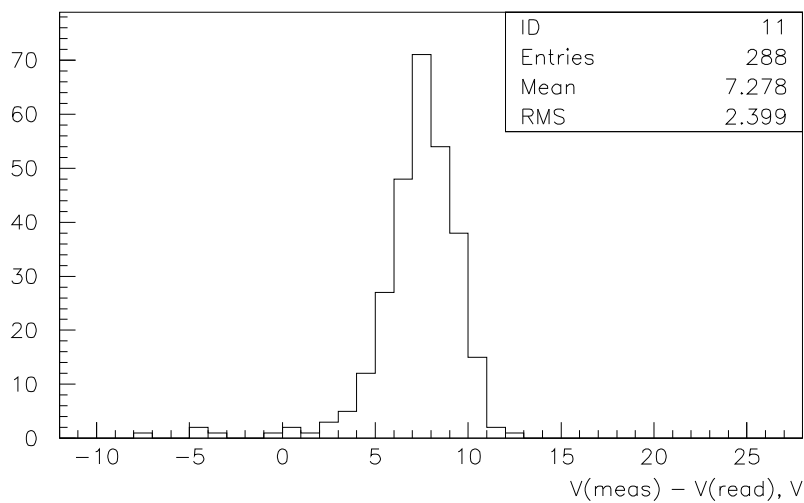


Рис. 3.3. Результаты калибровки высоковольтных источников питания за 2005 год.

## **3.2. Светодиодная калибровка**

### **3.2.1. Система светодиодной калибровки**

Точная информация о времени появления сигналов со сцинтилляционных счетчиков важна для эффективной работы мюонных триггеров, измерений времени пролета частиц и эффективного подавления фонов, вызванных, в основном, наличием «гало» протонного и антипротонного пучков. 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 [29]. Светодиоды освещают фотоумножители световыми импульсами, схожими по амплитуде и форме с импульсами сигналов от прохождения мюонов. Система состоит из 48 модулей, каждый из которых закреплен на плоскости соответствующего октанта сцинтилляционного детектора.

Каждый счетчик подключен к своему каналу электронного модуля SFE, в котором происходит оцифровка сигналов с ФЭУ. Один модуль имеет 48 входов и, таким образом, обслуживает половину октанта. Помимо 96-ти рабочих модулей SFE к рабочей корзине были подключены два дополнительных, необходимых для проведения процедуры калибровки на светодиодах.

Схема одного модуля системы светодиодной калибровки представлена на рис. 3.4. Генератор светодиода формирует импульсы тока для запуска светодиода. Используются синие светодиоды NSPB320BS фирмы Nichia America Corporation, поскольку их спектр излучения близок к спектрам поглощения сместителей сцинтилляционных счетчиков и фотокатода ФЭУ. Для обеспечения однородности излучения световой импульс,



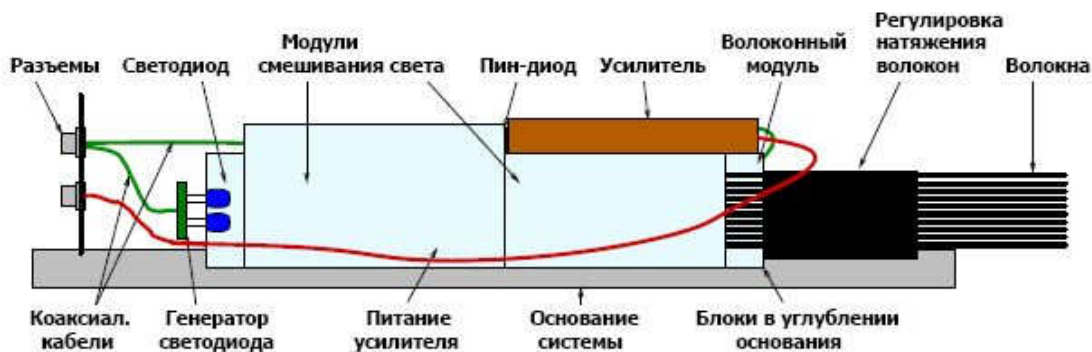


Рис. 3.4. Схема модуля системы светодиодной калибровки.

сгенерированный светодиодом, проходит два модуля смешивания света. 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 волоконном модуле и далее по отдельным световым волокнам распространяются в каждый из 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. Ввиду того, что мониторинг стабильности амплитуд и времен более точно осуществляется на ускорительных мюонах, образующихся в результате протон-антипротонных столкновений (об этом речь пойдет в параграфе 3.3), светодиодная система используется, в основном, для тестирования электроники и самих счетчиков во время ремонта счетчиков или замены блоков электроники. Тем не менее примерно раз в год проводится полная светодиодная калибровка всех счетчиков для проверки стабильности их работы [30]. Впервые эта процедура была проведена в мае 2001 года.



Полученные тогда результаты стали реперными для всех последующих калибровок.

### **3.2.2. Процедура калибровки на светодиодах**

Светодиодная калибровка производится следующим образом. В отсутствие пучка в Тэватроне 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 значения. Затем с помощью специальной программы в крейты с электроникой загружаются параметры, соответствующие значениям 2001 года, – задержки, маски и т.д. Потом для каждого октанта загружаются параметры светодиодного генератора (амплитуда и задержка), после чего начинается процедура калибровки.

### **3.2.3. Результаты светодиодных калибровок за семь лет работы**

Типичная картина, наблюдаемая при проведении светодиодной калибровки, представлена на рис. 3.5. Эти распределения относятся к одному рабочему крейту SCE (South C East, юго-восточный слой C), включающему в себя четыре октанта – SC0, SC1, SC6, SC7.

На правом верхнем рисунке показано распределение по сработавшим каналам, отражающее количество пришедших сигналов в каждом канале данного крейта. Каналы пронумерованы с нулевого по 384-ый. Первые 96 соответствуют 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 (рис. 3.5) 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). Такой разброс значений «сырых» времен связан, в основном, с различием в длине сигнальных кабелей. Эти различия, а также разные значения времен пролетов частиц, устраняются при работе на Тэватроне введением сдвигающих констант  $T_0$  (см. раздел 3.3.4).

Левый верхний рисунок показывает профиль средних амплитуд, причем для несуществующих или неработающих счетчиков записываются пьедестальные значения каналов SFE (типичные значения составляют 30–50 отсчетов АЦП). Амплитуда в одном событии из-за мультиплексорного измерения считывается только для одного из 16 счетчиков данной высоковольтной группы. При замене блока SFE 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, на правом нижнем рисунке показано суммарное амплитудное распределение для всех 384 каналов данного крейта.

На рис. 3.6 представлены результаты светодиодной калибровки для одного счетчика, SC0-5: на левом рисунке – временное распределение сигналов от светодиода, на правом – амплитудное распределение.

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 года), потом полученный результат делился на реперный.

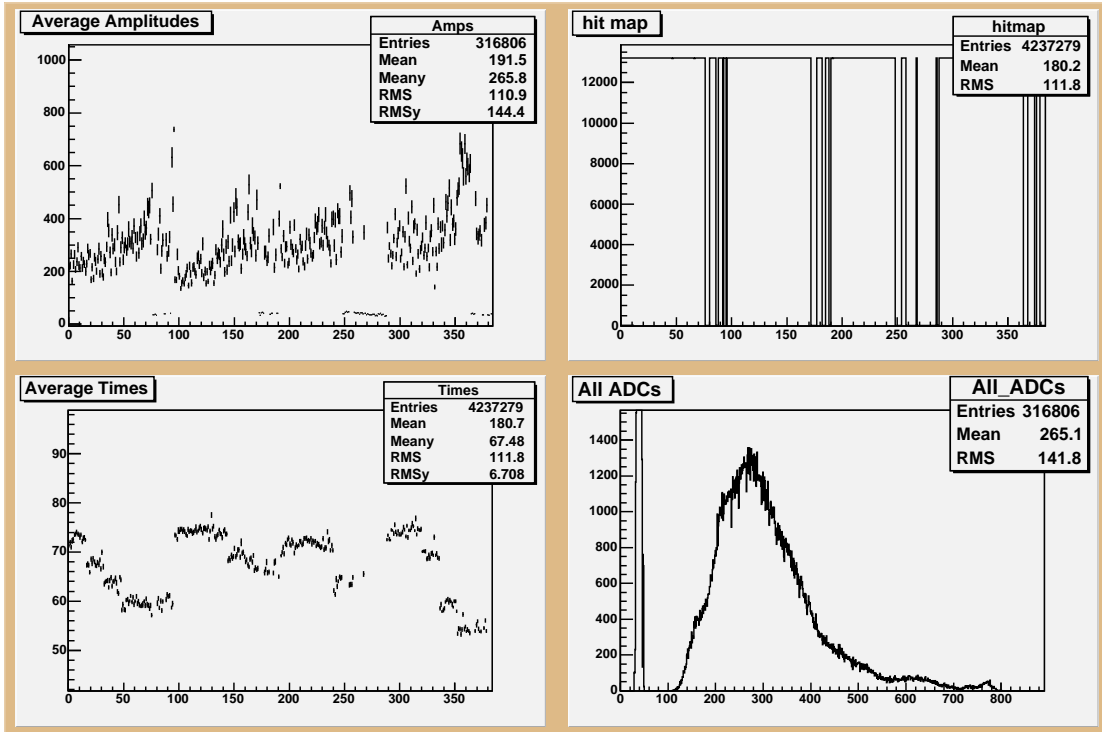


Рис. 3.5. Результаты светодиодной калибровки для крейта SCE. Слева сверху: профиль средних амплитуд (по оси X – номер канала крейта, по оси Y – среднее значение амплитуды в данном канале, в отсчетах АЦП), справа сверху: распределение по сработавшим каналам (X – номер канала, Y – число срабатываний в 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).

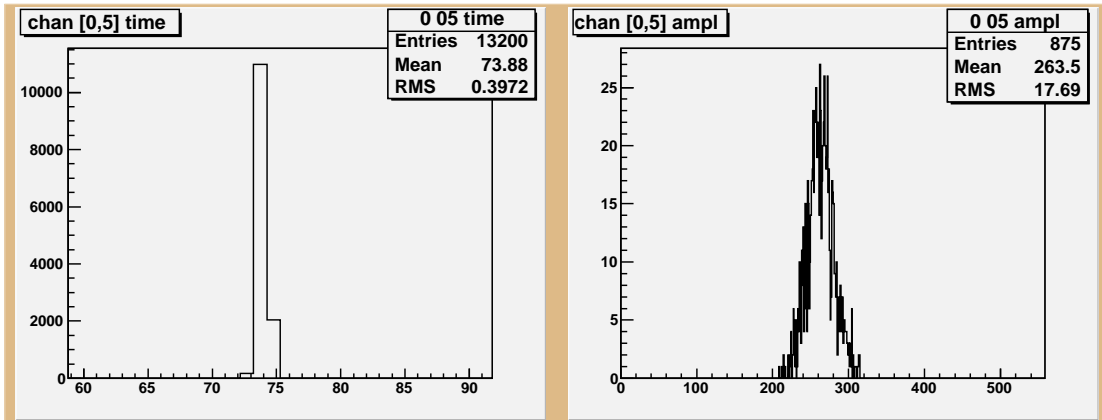


Рис. 3.6. Результаты светодиодной калибровки для счетчика SC0-5. Слева: временное распределение (по оси X – время в нс, по оси Y – число считываний с данным значением времени), справа: амплитудное распределение (X – отсчеты АЦП, Y – число считываний с данным значением амплитуды).

Затем полученное отношение нормировалось на отношение амплитуд пин-диода (с вычтенными пьедестальными значениями) для тех же наборов данных.

Результаты светодиодной калибровки, полученные в 2008 г., представлены на рис. 3.7. На рис. 3.7а показано распределение амплитудных отношений для всех счетчиков, каждое из которых было получено описанной выше процедурой. Среднее значение амплитудного отношения составило 0.94 при  $\sigma$  фита Гауссианом 0.12. Для оценки временной стабильности работы счетчиков среднее время сигнала с ФЭУ для каждого счетчика данных 2001 года вычиталось из соответствующего значения для 2008 года. Среднее значение разности времен составило  $-0.075$  нс с  $\sigma$  распределения отклонений 0.55 нс (рис. 3.7б).

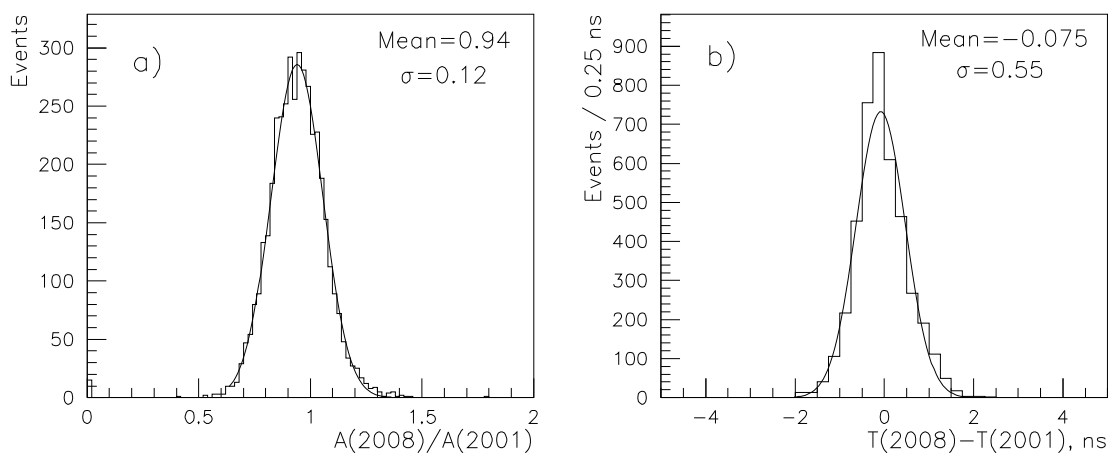


Рис. 3.7. Результаты калибровки 2008 г. (в сравнении с 2001 г.): а) отношение амплитуд  $A(2008)/A(2001)$ , б) разность времен  $T(2008) - T(2001)$ .

На рис. 3.8 и 3.9 представлены результаты светодиодной калибровки за семь лет: средние отношения амплитуд (рис. 3.8) и средние значения разности времен (рис. 3.9), а также максимальные отклонения от фита прямой линией. Первая точка на каждом графике соответствует реперному набору данных 2001 года. Рис. 3.8 показывает, что среднее значение амплитудного отношения стабильно в пределах 4.2% с

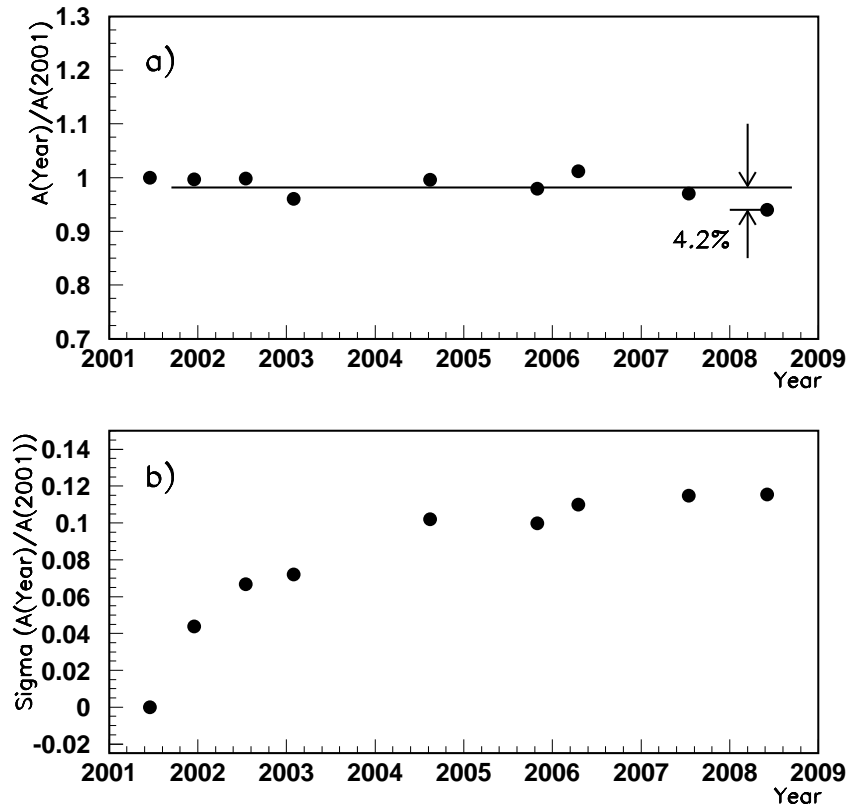


Рис. 3.8. Изменения параметров амплитудных распределений за семь лет. а) Изменения средних отношений амплитуд. Статистические ошибки измерений меньше размера точек. При фитировании данных прямой максимальное отклонение составляет 4.2%. б) Изменения  $\sigma$  распределения отклонений. Первая точка на обоих рисунках – реперная.

максимальной  $\sigma$  по всем счетчикам 11.6%. Рис. 3.9 демонстрирует хорошую стабильность сигналов во времени в пределах 0.23 нс с максимальной  $\sigma=0.62$  нс. Эта величина (0.23 нс) отражает, в основном, стабильность процедуры калибровки. Реальная стабильность счетчиков при работе на Тэватроне составляет около 0.1 нс. Она оказалась даже значительно лучше, чем стабильность сигнала от ускорителя, задающего момент пересечений пучков и начало отсчета времени для детекторов. Изменение  $\sigma$  распределения отклонений (рис. 3.9b) характеризует, в основном, стабильность задержки срабатывания светодиода.

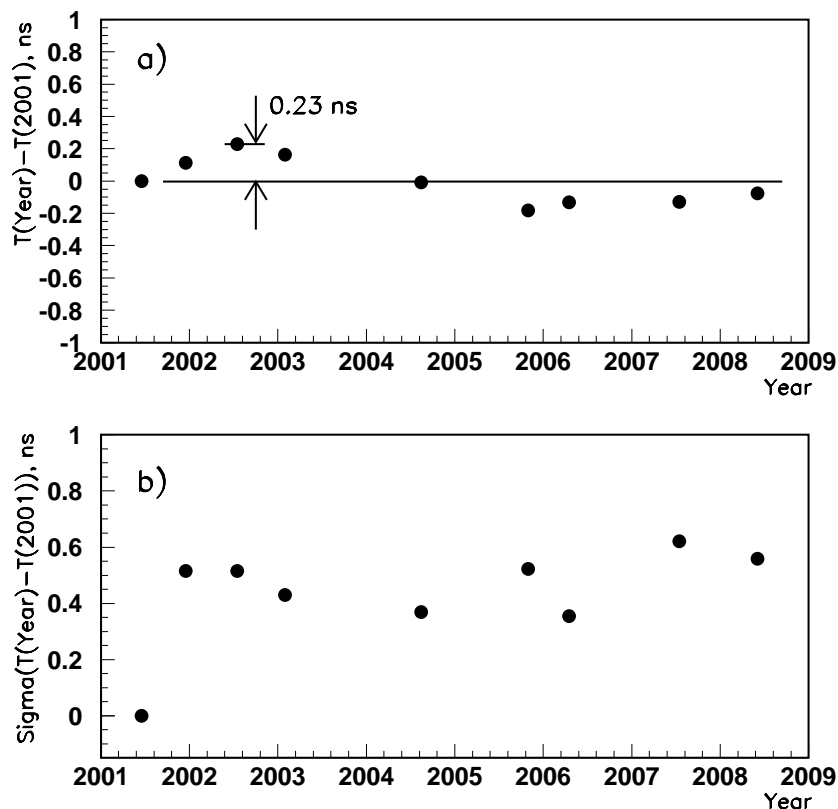


Рис. 3.9. Изменения параметров временных распределений за семь лет. а) Изменения средних значений разности времен. Статистические ошибки измерений меньше размера точек. При фитировании данных прямой максимальное отклонение составляет 0.23 нс. б) Изменения  $\sigma$  распределения отклонений. Первая точка на обоих рисунках – реперная.

### 3.3. Калибровка на ускорительных мюонах

#### 3.3.1. Процедура калибровки

В этом разделе будет описана процедура и представлены результаты калибровки сцинтилляционных счетчиков на мюонах, образовавшихся в результате протон-антипротонных столкновений в ходе второго сеанса эксперимента D0. В отличие от калибровки на светодиодах при этом проверяются не только стабильность работы фотоумножителей и электроники, но и сцинтиллятора и переизлучателей спектра, то есть полностью имитируются рабочие сигналы со сцинтилляционных счетчиков, возникающие при прохождении через них заряженных

частиц. К тому же этот тип калибровки позволяет отслеживать старение сцинтиллятора.

Амплитуды сигналов со счетчиков при прохождении через них заряженных частиц измеряются в ходе набора статистики, причем следить за ними можно в режиме реального времени с помощью специального пакета *muo-examine*. Амплитудные распределения для всех 4704 каналов SFE (количество каналов электроники превышает число счетчиков, равное 4214) представлены в логарифмическом масштабе на рис. 3.10а и в линейном на рис. 3.10б. Пик в районе 40

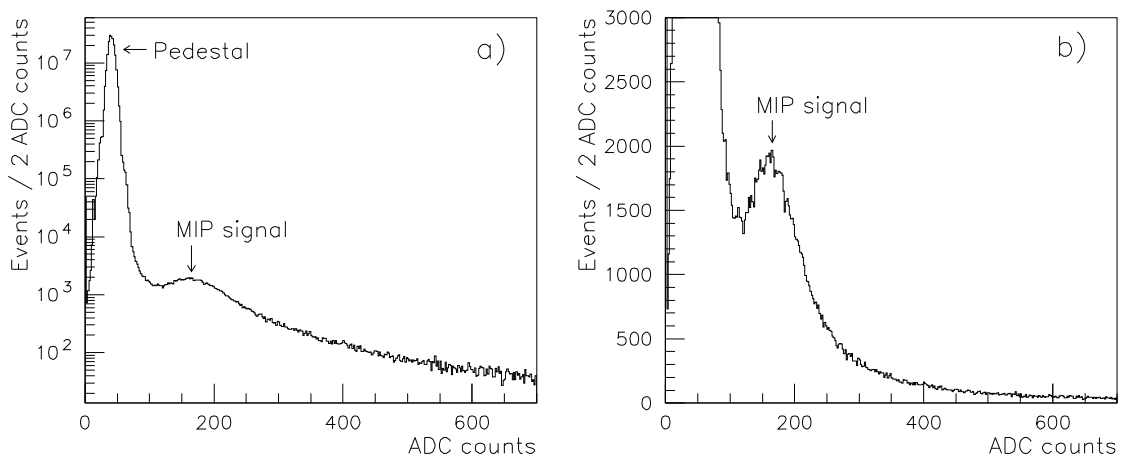


Рис.3.10. Амплитудные распределения для всех 4704-х каналов SFE (данные 2002 г.): а) в логарифмическом масштабе, б) в линейном масштабе.

отсчетов АЦП соответствует пьедестальным значениям всех задействованных каналов электроники, а в районе 165 отсчетов АЦП наблюдается пик от минимально-ионизирующих частиц (МІР). Так же, как и при калибровке на светодиодах, в одном событии считывается амплитуда только для одного из 16 счетчиков данной высоковольтной группы. Для накопления статистики для каждого из 4214 счетчиков требуется очень большое время, что делает практически невозможным поканальную калибровку всех счетчиков. В связи с этим амплитудная калибровка производилась по октантам.

Для выборки мюонных событий из данных была разработана процедура, использующая корреляцию срабатываний счетчиков в различных слоях передней мюонной системы. Обрабатывались только события, при которых были зарегистрированы срабатывания счетчиков в каждом из трех слоев (А, В и С) в южной половине установки D0 (она обозначена как "south" на рис.1.1) или в северной ("north" на рис.1.1) в соседних счетчиках октантов с одинаковыми номерами. Соседним для данного счетчика считался тот, который отличается от него не более чем на  $\pm 1$  по последней цифре порядкового номера и не более чем на  $\pm 2$  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. 2.1). Если такое произошло, аналогичным образом проверялось, сработал ли какой-либо счетчик в октанте NA1 (первом октанте северного А-слоя) из числа соседних по отношению к сработавшему в октанте NB1. Если да, тогда вся информация, касающаяся этих трех срабатываний (номер сработавшего счетчика, амплитуда, пьедестал и время срабатывания), использовалась в дальнейшей обработке.

### **3.3.2. Результаты исследования стабильности работы счетчиков**

Описанная процедура впервые была применена на практике в 2002 г. Было обработано более 635 000 событий, прошедших мюонный триггер установки D0. Распределение амплитуд от пьедесталов и амплитудное распределение сигналов от мюонов, выделенных по приведенной выше методике срабатывания, для всех 4214 счетчиков представлены на рис. 3.11. Несмотря на то, что критерии отбора по времени не применялись, амплитудное распределение (рис. 3.11b) показывает, что  $\geq 98\%$



выделенных таким образом мюонов имеют амплитуды, соответствующие энергии минимально-ионизирующей частицы. Рис. 3.11b также демонстрирует однородность сигнальных амплитуд и подтверждает разумность выбора порога дискриминации для набора статистики во втором сеансе на уровне 7 мВ, что соответствует 25 каналам АЦП.

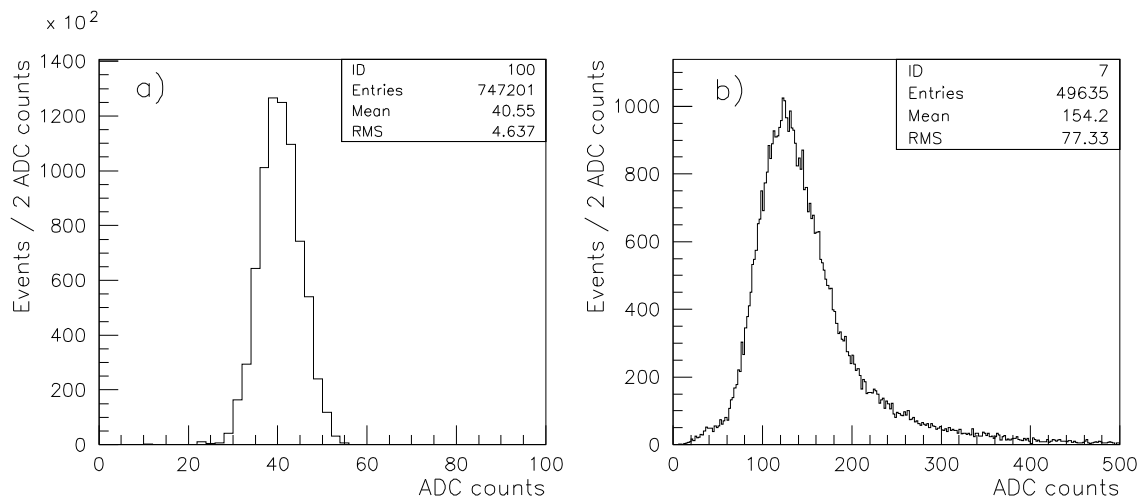


Рис. 3.11 а) Распределение амплитуд от пьедесталов и б) амплитудное распределение сигналов от мюонов, выделенных по методике срабатывания, для всех 4214 счетчиков (данные 2002 г.).

Амплитудные распределения для одного из октантов (NCO) и одного из счетчиков (SB7-54) с наибольшей для 2002 г. статистикой представлены на рис. 3.12.

Для проверки стабильности работы счетчиков та же процедура проводилась ежегодно, начиная с 2004 г. В 2006 г. программное обеспечение для обработки данных в режиме реального времени было значительно усовершенствовано, что дало возможность быстрее набирать статистику. Амплитудные распределения для октанта NCO и счетчика SB7-54, полученные в 2006 г., представлены на рис. 3.13 и находятся в хорошем соответствии с результатами 2002 г. (рис. 3.12). Последний раз калибровка была проведена в июне 2008 года. Было обработано ~1.4 миллиона событий, прошедших все триггеры установки

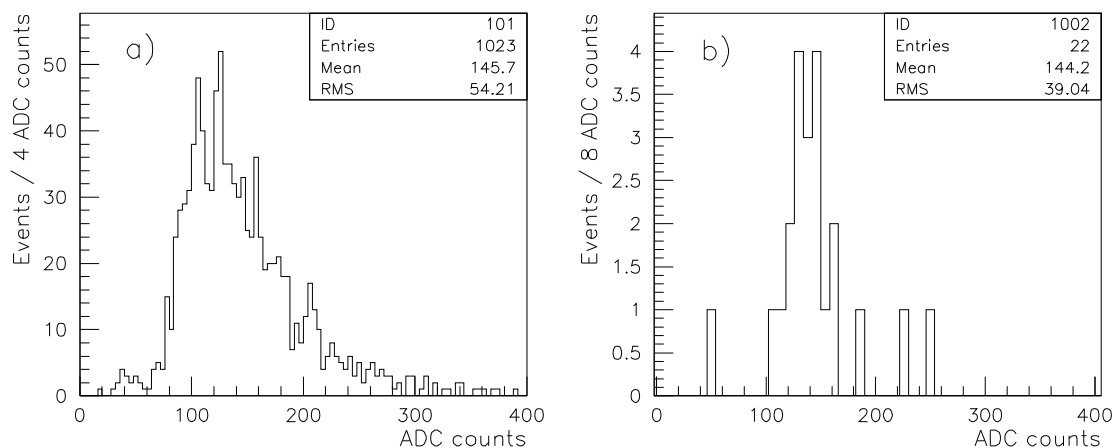


Рис. 3.12. Амплитудные распределения для а) октанта NC0 и б) счетчика SB7-54. Данные 2002 г. Выбранный счетчик имеет большую статистику, чем остальные.

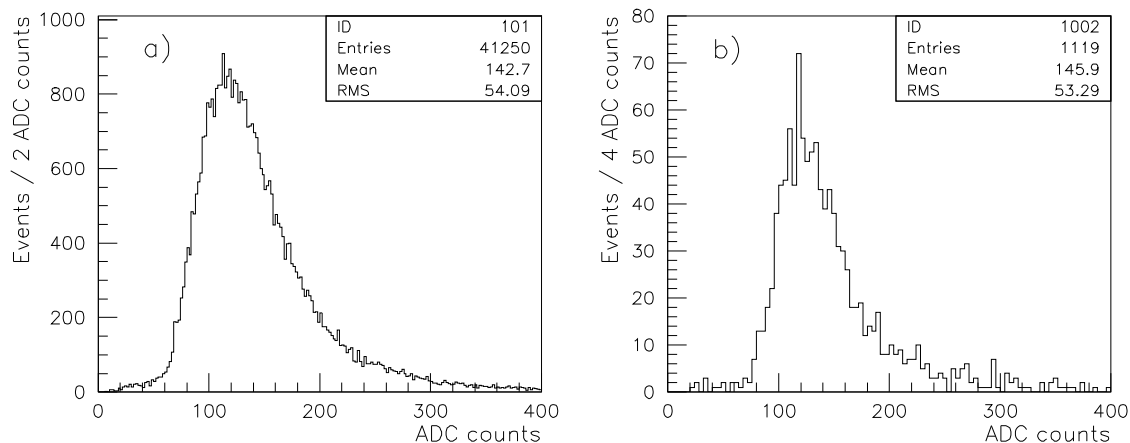


Рис. 3.13. Амплитудные распределения для а) октанта NC0 и б) счетчика SB7-54. Данные 2006 г.

D0. Суммарное распределение амплитуд для всех 4214 счетчиков показано на рис. 3.14. Из-за ограниченной статистики средние значения амплитудных откликов сравнивались по октантам. Результаты для всех 48 октантов представлены в таблице 3.1. Для каждого октанта среднее значение амплитуды, полученное в 2008 г., делилось на среднее значение 2002 г. Из табл. 3.1 и соответствующего ей рис. 3.15d следует, что среднее отношение амплитуд равно 0.957. Для октантов слоя А это отношение составляет 0.976, для слоя В оно равно 0.949, для слоя С оно составляет 0.945 (см. рис. 3.15). Возможно, это различие объясняется

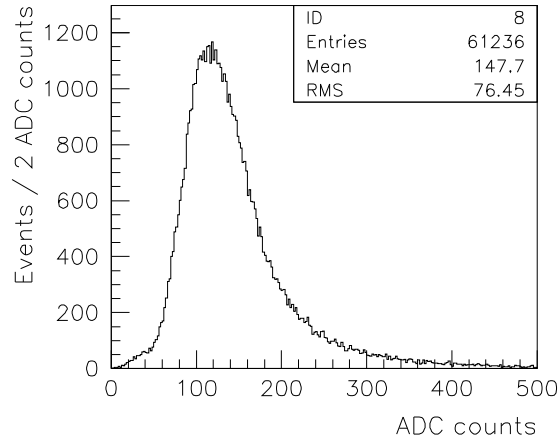


Рис. 3.14. Амплитудные распределения мюонов, выделенных по методике срабатывания, для всех 4214 счетчиков (данные 2008 г.)

Таблица 3.1. Отношение средних значений амплитуд, полученных в 2008 г., к полученным в 2002 г. для всех 48 октантов. RMS = 0.02 для всех значений.

Октант	Север А	Север В	Север С	Юг А	Юг В	Юг С
0	0.96	0.95	0.93	1.01	0.97	0.95
1	0.96	0.93	0.91	0.94	0.97	0.95
2	1.02	0.90	0.94	1.00	0.88	0.89
3	0.97	0.94	0.94	0.92	0.97	0.97
4	0.99	0.98	0.95	0.98	0.97	0.95
5	0.94	0.95	0.92	1.03	0.92	0.95
6	0.95	0.97	0.96	0.98	0.95	1.01
7	0.97	0.96	0.94	0.99	0.97	0.95

меньшим размером счетчиков слоя А по сравнению со счетчиками слоев В и С.

Изменение отношения амплитуд за 5.5 лет, формула фита прямой линией и параметры фита представлены на рис. 3.16. Как видно из рисунка, старение всей системы счетчиков в комплексе составляет не более 1.5% за год ( $P2 = -0.0144$  на рис. 3.16), что обеспечивает ее долгосрочную работу.

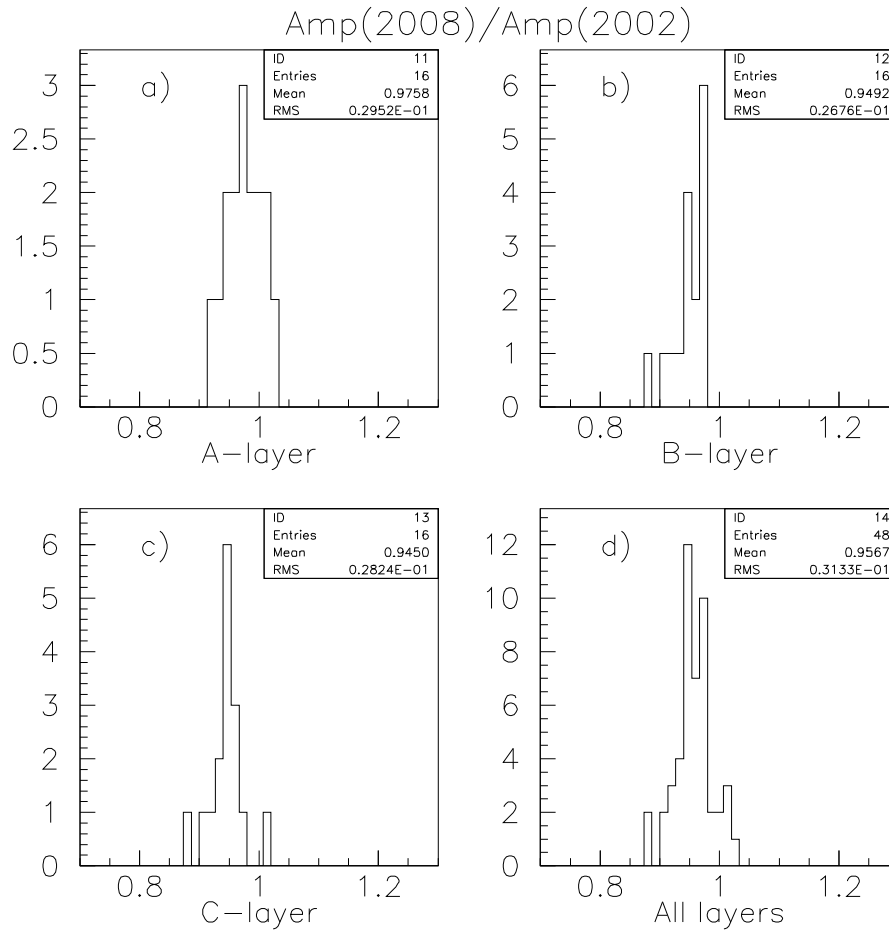


Рис. 3.15. Распределение отношения  $\text{Amp}(2008)/\text{Amp}(2002)$  для октантов а) слоя А; б) слоя В; в) слоя С и д) всех 48 октантов счетчиков. Данные из табл. 3.1. По оси Y – число октантов с данным значением отношения. Одна высоковольтная группа (группа 3 в октанте NB5) исключена из анализа, так как до января 2003 года высокое напряжение для этой группы было понижено на 100 В относительно номинала.

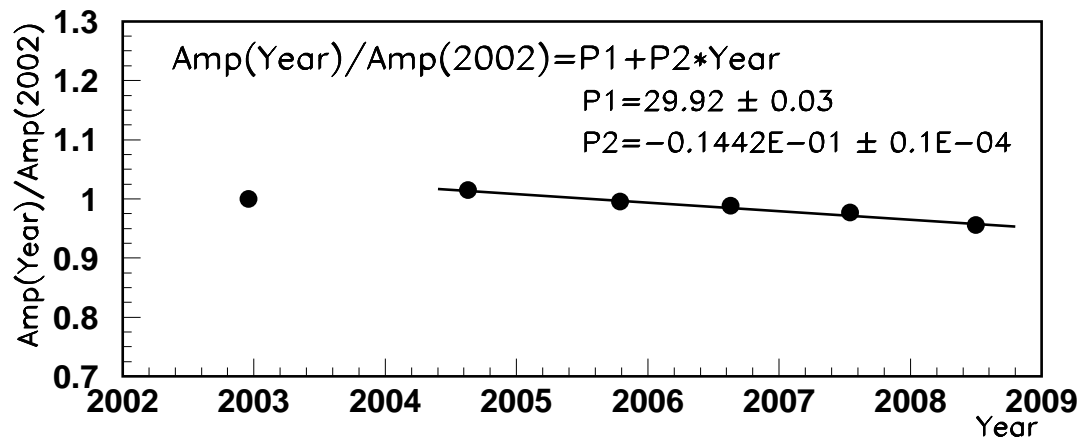


Рис. 3.16. Изменение отношения амплитуд за 5.5 лет. P1 и P2 – параметры фита прямой линией.

Стоит отметить, что при разработке метода калибровки системы сцинтилляционных счетчиков на ускорительных мюонах автор использовал свой опыт, накопленный им в его предыдущей работе в 1997—1998 гг. по калибровке калориметра БАРС, где он разработал и освоил метод калибровки останавливающимися мюонами [31].

### **3.3.3. Временные распределения сигналов со счетчиков**

Временные распределения сигналов со сцинтилляционных счетчиков для протон-антипротонных столкновений представлены на рис. 3.17. Временное распределение событий, прошедших триггер “minimum bias” (триггер на наличие хотя бы одного взаимодействия в данном пересечении банчей) имеет широкий пик, идущий от 0 до  $\sim 70$  нс (рис. 3.17a), в основном из-за фоновых частиц, которые попадают в счетчики позже мюонов. Информация о событиях, произошедших в границах фиксированных временных ворот, пересылается на мюонный триггер первого уровня L1. Распределение для таких событий представлено на рис. 3.17b, на котором уже виден четкий мюонный пик в районе 0 нс с небольшим количеством фона. Временное распределение для мюонов, выделенных по методике срабатывания (см. раздел 3.3.1.), представлено на рис. 3.17c. Эта методика позволяет практически полностью избавиться от фоновых частиц и получить пик с временным разрешением  $\sigma_T = 2.2\text{--}2.4$  нс. Результаты, представленные на рис. 3.17, демонстрируют высокую эффективность работы триггерных сцинтилляционных счетчиков передней мюонной системы эксперимента D0. Около 50% событий, прошедших мюонный триггер первого уровня, дают мюон, реконструированный в режиме off-line. Дополнительная режекция от триггера второго уровня дает возможность записывать данные передней мюонной системы на ленты с чистотой 80% и

эффективностью 90%, обусловленной, в основном, геометрической эффективностью МДТ.

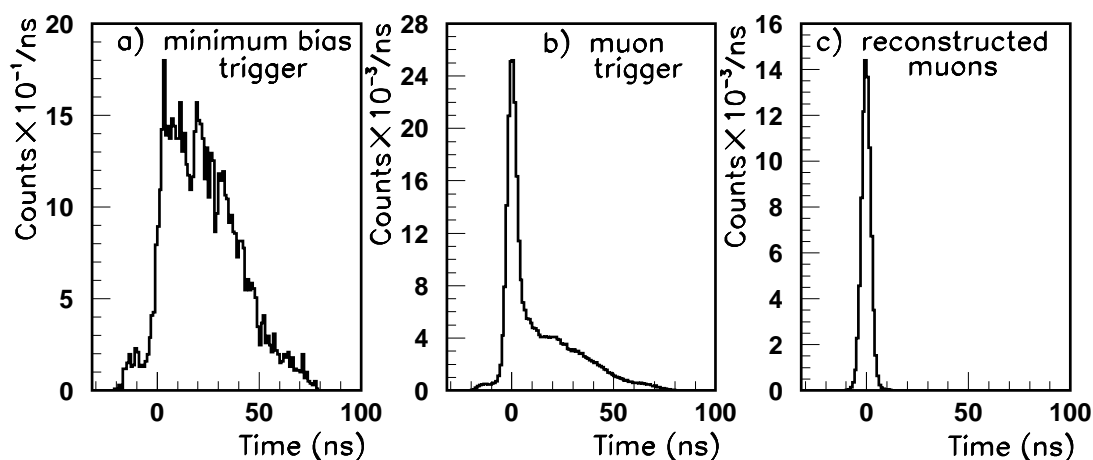


Рис. 3.17. Временные распределения сигналов от ускорительных мюонов со всех 4214 счетчиков для а) триггера “minimum bias”; б) мюонного триггера первого уровня L1; в) мюонов, выделенных по методике срабатывания.

На рис. 3.18 представлены временные распределения для всех зарегистрированных частиц (слева) и временные распределения для мюонов, выделенных по методике срабатывания (справа), для октантов NA3 (a, b); NB3 (c, d); NC3 (e, f). На рисунках 3.18a и 3.18c наглядно видна разница в размерах временных ворот, которые для слоя А составляют 84—88 нс, а для слоя В 54—58 нс. Эта разница обусловлена разницей в длине кабелей до октантов слоев А и В, находящихся в одной рабочей корзине. В слое А, расположенном ближе к центру установки, наряду с мюонами регистрируется большое число фоновых частиц, поэтому мюонный пик не так отчетлив, как в слоях В и С, расположенных после железной защиты. Выделенные по методике срабатывания события отфитированы суммой Гауссиана и полинома первой степени для учета фона (см. рис. 3.18b, d, f). Эти рисунки наглядно демонстрируют, что все регистрируемые мюоны попадают в триггерные ворота, рабочее значение которых при наборе данных было равно 30 нс. Параметр фита P2 показывает расположение мюонного

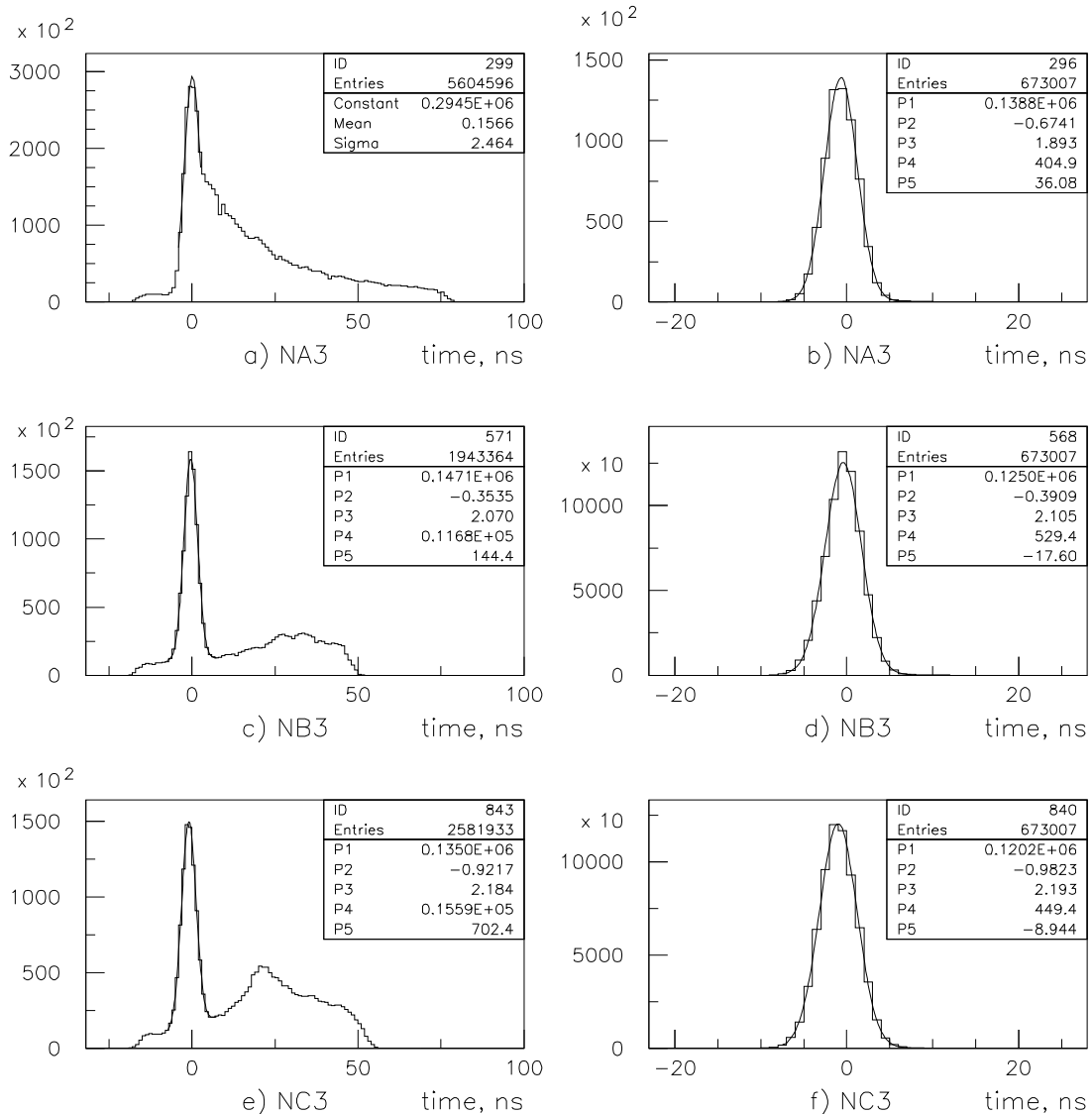


Рис. 3.18. «Сырые» (слева) и восстановленные по методике срабатывания (справа) временные распределения для октантов NA3 (a, b); NB3 (c, d); NC3 (e, f).

пика, P3 –  $\sigma$  фита. Видно, что  $\sigma$  увеличивается при переходе от слоя А к слою С, т.е. по мере увеличения размера счетчиков и расстояния от центра взаимодействий. Среднее значение расположения мюонного пика составляет  $-0.7$  нс и обусловлено тем, что набор статистики шел в августе — самом жарком месяце, поэтому T0 находились в максимальном отклонении от 0 (см. раздел 3.3.4.).

На рис. 3.19 показана зависимость положения временного пика для зарегистрированных мюонов от величины высокого напряжения. При

напряжении в 100% пик находится в нуле, а при уменьшении значения напряжения он смещается в сторону бóльших времен, что связано с увеличением времени пролета электронов в ФЭУ.

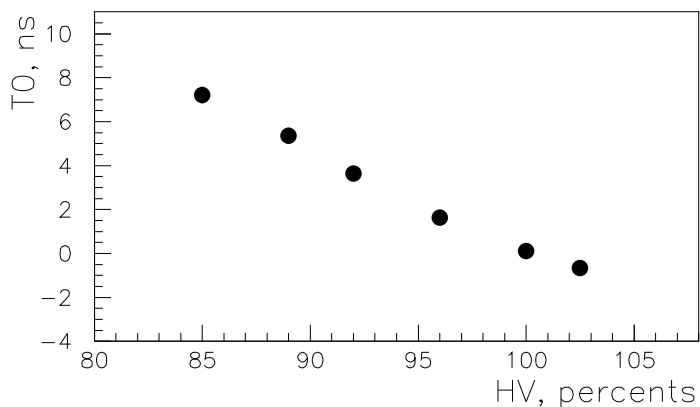


Рис. 3.19. Зависимость расположения временного пика для мюонов от высокого напряжения. Статистические ошибки измерений меньше размера точек.

### 3.3.4. Изучение корреляций между дрейфом системы синхронизации D0 и значениями T0 сцинтилляционных счетчиков

Высокая стабильность временных характеристик сцинтилляционных счетчиков передней мюонной системы позволяет использовать средние значения их временных распределений для мониторинга стабильности системы синхронизации D0 в пределах 1.2–1.4 нс и для компенсации сезонных изменений сигналов в длинном волокне, используемом для передачи временного сигнала.

Время, измеряемое при регистрации мюона в сцинтилляционном счетчике, зависит от времени пролета мюона от точки образования до счетчика, длины сигнальных кабелей, установленных параметров электроники и системы синхронизации D0. Для удобства наблюдения за стабильностью работы счетчиков было введено понятие T0, которое учитывает все вышеперечисленные факторы. T0 – это время, выраженное в нс, которое надо вычесть из реально измеренного во время набора статистики, чтобы мюонный пик располагался в 0 нс при



определенных значениях временных ворот. Эти значения  $T_0$ , хранящиеся в электронике рабочих корзин, расположенных в зоне столкновений эксперимента D0, вычитаются из данных в режиме реального времени (on-line). Для сцинтилляционных счетчиков передней мюонной системы величины  $T_0$  определены для счетчиков каждой высоковольтной группы (длина сигнальных кабелей счетчиков одной группы одинакова). Точный подбор длины кабелей и тщательный отбор ФЭУ по величине рабочего напряжения для счетчиков одной группы обеспечили точность определения изначальной величины  $T_0$  для счетчиков одной группы в пределах 1 нс. Так как набор данных с детектора D0 идет в течение несколько лет, небольшой дрейф в каком-либо из элементов системы измерения времени приводит к дрейфу величины  $T_0$ , т.е. к изменению расположения временного мюонного пика относительно 0 нс.

Рис. 3.18 наглядно демонстрирует, что «сырые» временные распределения для событий, прошедших мюонный триггер первого уровня L1, для слоев В и С дают достаточно точное значение расположения временного пика (рис. 3.18с и 3.18е). Применение методики срабатывания с целью очистки от фона практически не изменяет этих значений (рис. 3.18d и 3.18f). Для слоя А ситуация иная – большое количество фоновых событий не дает возможности точно определить местоположение временного пика по рис. 3.18а. Поэтому для изучения дрейфа мюонного временного пика в первое время использовались «сырые» данные от слоев В и С. Изменение расположения мюонного временного пика для слоев В и С за год при отсутствии корректировки  $T_0$  и системы синхронизации D0 изображено на рис. 3.20. Такое изменение может быть объяснено сезонными изменениями температуры. Есть зимний и летний периоды, когда температура некоторое время остается практически постоянной и  $T_0$  при

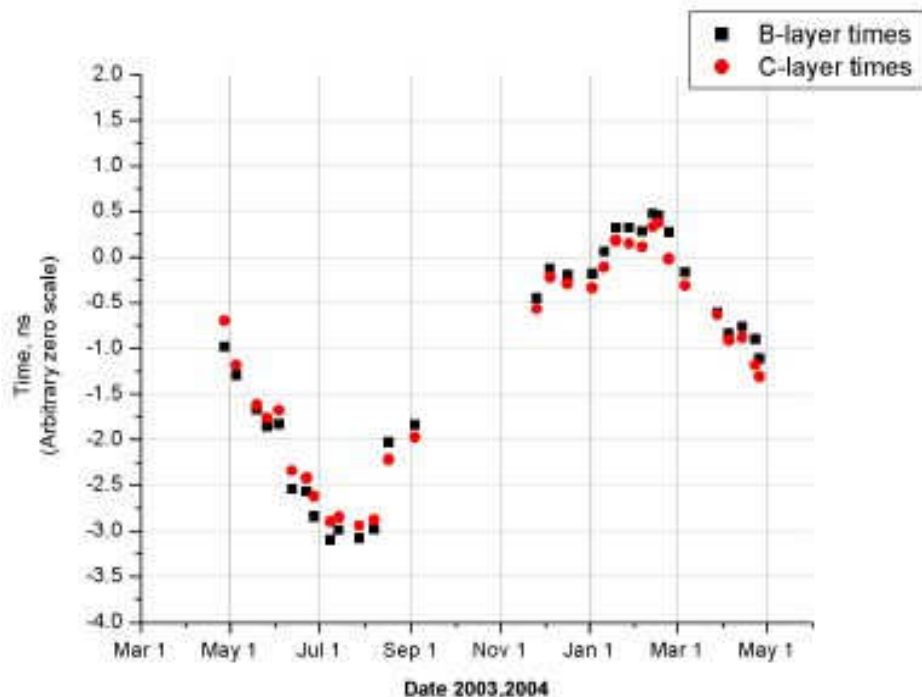


Рис. 3.20. Изменение расположения мюонного временного пика за год при отсутствии корректировки T0 и системы синхронизации D0.

этом практически не меняется. Весной же и осенью при относительно резком изменении температуры так же резко меняется и T0. Сигнал системы синхронизации D0 передается по волокну длиной ~ 2 км и расположенному на глубине ~ 60 см под землей, поэтому он может быть чувствителен к изменению температуры воздуха. Рис. 3.20 показывает, что если бы корректировка по T0 и системе синхронизации D0 не производилась, то дрейф T0 в течение года составил бы ~ 3.6 нс.

Существуют два варианта корректировки значений T0. В течение первых 2—3 лет такое изменение компенсировалось периодической загрузкой новых значений T0, определенных по рис. 3.17b, 3.17d и 3.17f для каждой из 288 групп, в рабочие корзины для всех счетчиков. В дальнейшем же, после того как было обнаружено, что основной и подавляющий вклад в дрейф T0 дает дрейф системы синхронизации D0 из-за сезонных изменений температуры в тоннеле Тэватрона и

связанного с этим изменения скорости прохождения сигнала в кабеле синхронизации, стал использоваться другой вариант — корректировка дрейфа системы синхронизации D0 на 1 нс четыре раза в год, основываясь на текущем положении мюонного временного пика сигналов со сцинтилляционных счетчиков. Этот вариант гораздо перспективней, так как он реализуется путем простого подсоединения (или изъятия) кабеля определенной длины к системе синхронизации D0. К тому же этот метод корректирует время не только для системы сцинтилляционных счетчиков передней мюонной системы, но и для всего детектора D0. Предложенный график временной корректировки

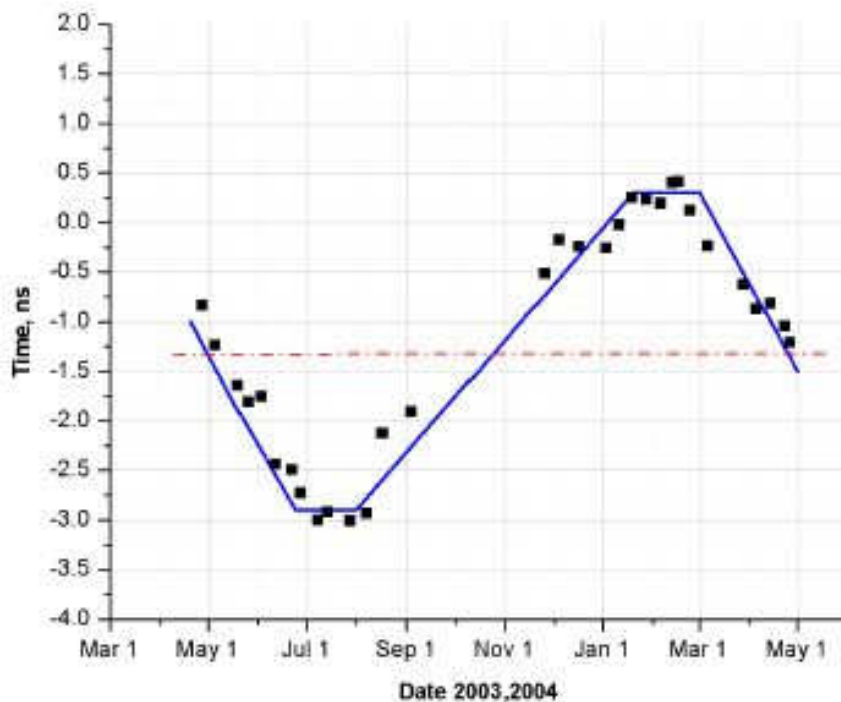


Рис. 3.21. Аппроксимация дрейфа мюонного временного пика. Шкала нормирована на величину положения временного пика, полученную 24 апреля 2004 года.

минимизирует дрейф  $T_0$  в течение года и количество таких корректировок. Кривая на рис. 3.20 может быть примерно аппроксимирована пятью прямыми линиями, как показано на рис. 3.21. 28 апреля 2004 года была произведена корректировка системы синхронизации D0, чтобы сместить нулевой уровень из  $-1.3$  нс в  $0$  нс.

После этого картина приобрела вид, изображенный на рис. 3.22. Удобно делать четыре корректировки в год: в апреле и мае текущего года в одну сторону на 1 нс и в октябре и ноябре в обратную тоже на 1 нс. Эта процедура, применяемая уже на протяжении четырех лет, дает возможность фиксировать значения  $T_0$  в течение года в пределах 1.2–1.4 нс (от  $-0.6...0.7$  нс до  $+0.6...0.7$  нс).

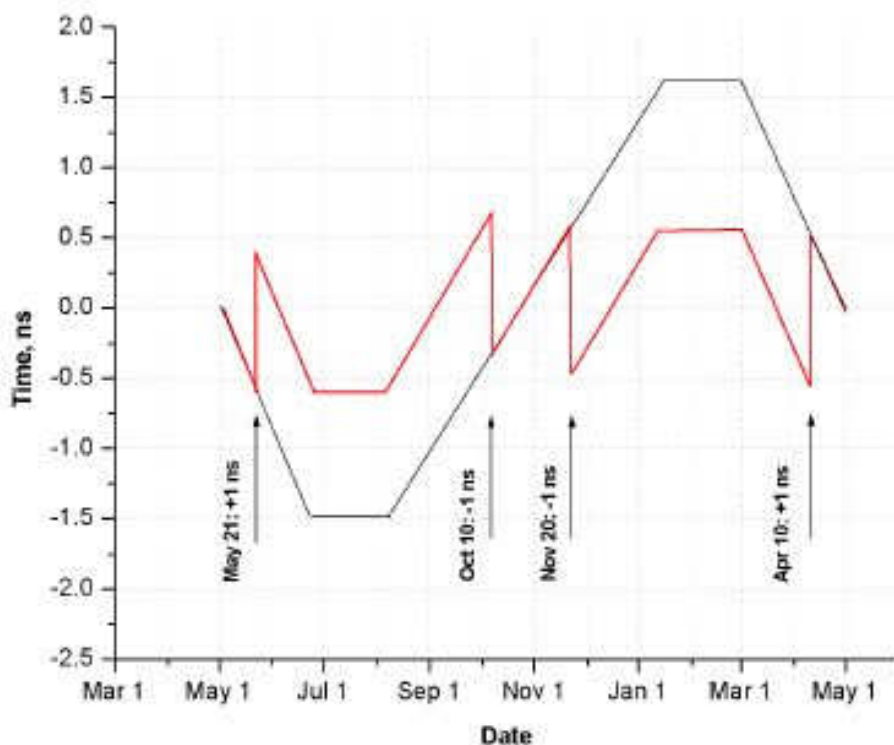


Рис. 3.22. График сезонной корректировки системы синхронизации D0.

### 3.4. Мониторирование работы передней мюонной системы с использованием образования одиночных мюонов

Для мониторинга стабильности работы всей передней мюонной системы, состоящей из сцинтилляционных триггерных счетчиков и мини-дрейфовых трубок МДТ, в комплексе с работой мюонных триггеров и программы реконструкции используется процедура, основанная на измерении выходов одиночных мюонов. Каждые 1–2 месяца происходит набор  $\sim 100$ – $150$  тысяч событий, прошедших

мюонный триггер первого уровня “mu1ptxatlx”, который позволяет регистрировать одиночный мюон, используя информацию как с триггерных счетчиков, так и с МДТ. Эти события далее обрабатываются с использованием программы реконструкции последней рабочей версии. После этого на реконструированные события накладываются следующие условия отбора:

- 1) выбираются только события в передней области мюонной системы (без центральной);
- 2) зарегистрированы как минимум два срабатывания в МДТ в слое А и минимум четыре в слоях В и С;
- 3) зарегистрировано как минимум одно срабатывание в счетчиках в слое А и минимум два в слоях В и С;
- 4)  $\chi^2 > 0$  для локального мюонного фита;
- 5) заряд частицы  $= \pm 1$ ;
- 6) поперечный импульс мюона  $P_t^{local} > 1.5$  ГэВ/с.

Эти критерии отбора были выработаны на основе визуального сканирования реальных событий. Эффективность таких условий была определена на уровне  $92 \pm 1\%$  с присутствием фоновых событий в количестве менее, чем 2%. Типичное распределение по поперечному импульсу мюонов в передней мюонной системе, которые прошли мюонный триггер “mu1ptxatlx” и для которых выполнены условия 1–5), представлено на рис. 3.23. Вертикальная черта при  $P_t^{local} = 1.5$  ГэВ показывает применение условия 6).

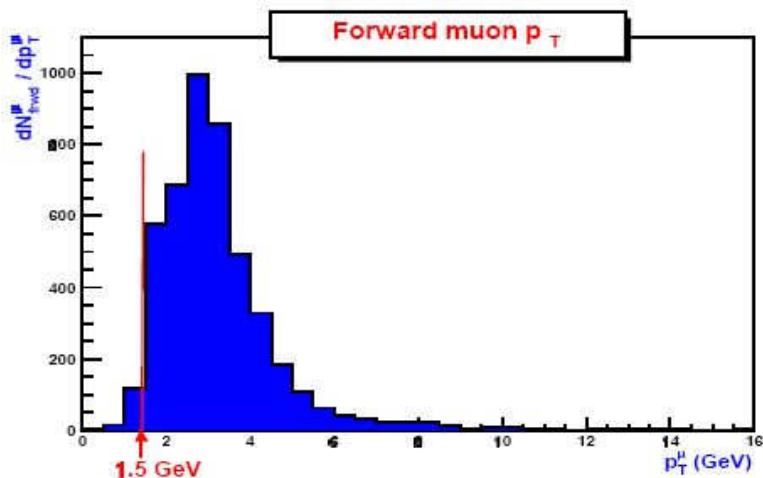


Рис. 3.23. Распределение по поперечному импульсу  $P_t^{\text{local}}$  для мюонов передней мюонной системы.

В конечном итоге количество реконструированных мюонов, прошедших требования 1–6), делится на величину интегральной светимости за время набора данных. Таким образом, определяется величина мюонного выхода  $\text{Yield} = N_{\mu}^{\text{forw}} / \text{Lum}$ . В идеальном случае эта величина должна быть постоянной.

Результаты, полученные за последние два года, в течение которых использовался усовершенствованный метод расчета светимости, представлены на рис. 3.24, а нормированные выходы — на рис. 3.25. Следует отметить, что в предыдущие годы было обнаружено, что измерения светимости проводились не совсем корректно при больших ее значениях. Измерения выходов мюонов в зависимости от светимости и контроль за их стабильностью позволили, совместно с другими данными, обнаружить и устранить неточности в измерениях светимости.

Результаты, представленные на рис. 3.24 и 3.25 демонстрируют стабильную работу передней мюонной системы за последние два года в пределах 1%. На таком же уровне (1%) работа системы стабильна в зависимости от светимости (см. рис. 3.26) для диапазона светимости  $(0.5\text{--}2.5) \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ .

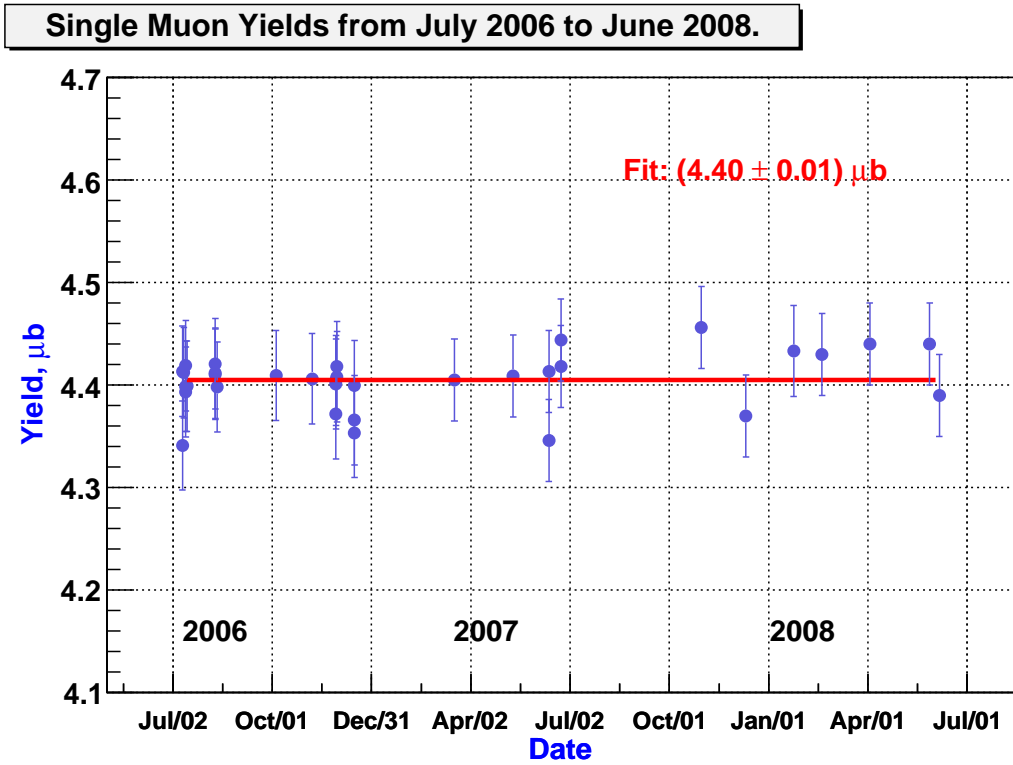


Рис. 3.24. Результаты определения выходов мюонов за 2006-2008 гг.

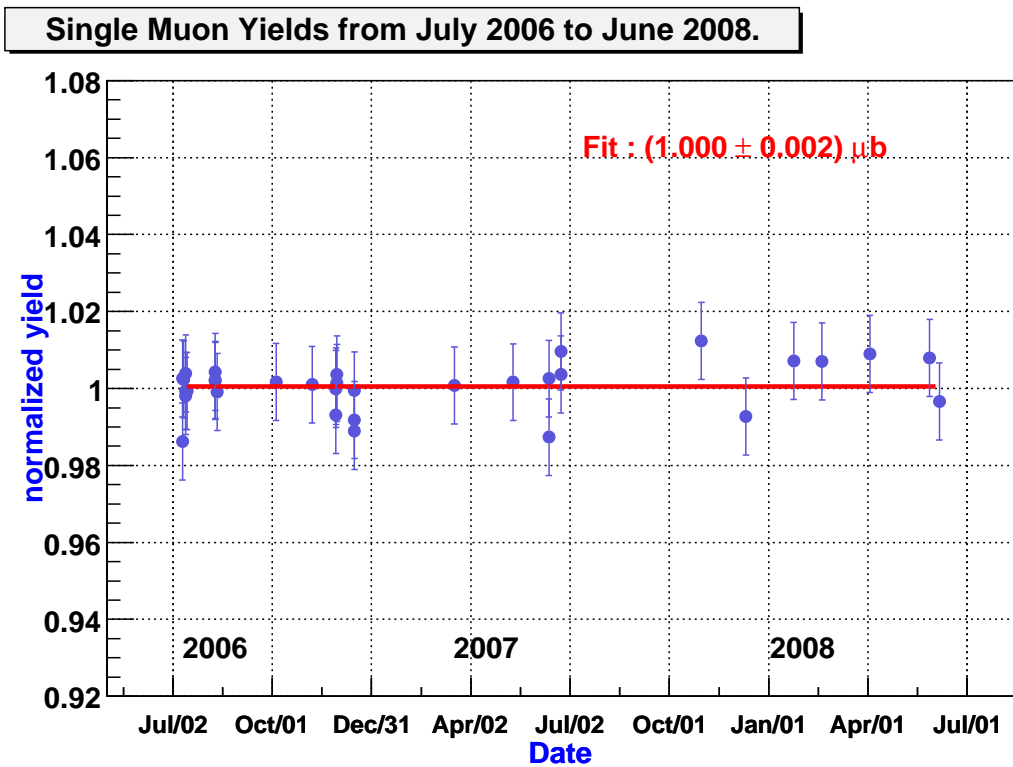


Рис. 3.25. Нормированные выходы мюонов за 2006-2008 гг.

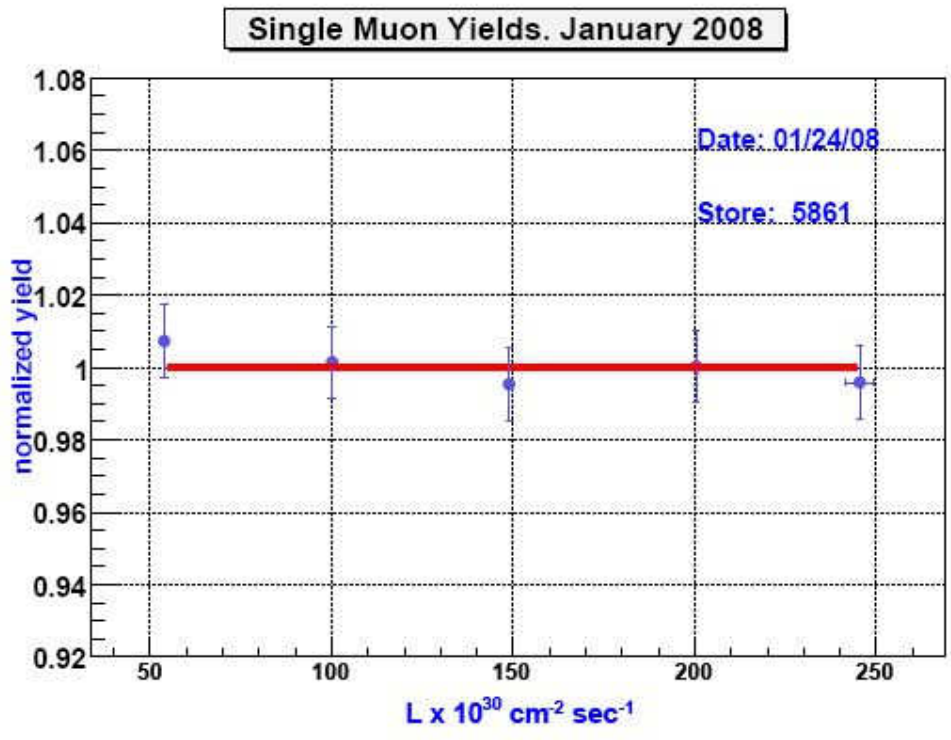


Рис. 3.26. Зависимость выходов мюонов от светимости, измеренная в январе 2008 г.



#### **4. Мюонная триггерная система эксперимента D0 во втором сеансе**

Ожидавшееся после модификации Тэватрона увеличение светимости и числа протон-антипротонных взаимодействий в единицу времени, а также существенное уменьшение временного интервала между «банчами» в Тэватроне потребовали значительного улучшения триггерной системы эксперимента D0 с тем, чтобы в новых жестких условиях эффективно отбирать триггером интересующие физические процессы и при этом значительно подавлять фоновые реакции. Новая триггерная система для второго сеанса на Тэватроне состоит из трех уровней. На каждом последующем уровне анализируется меньшее количество событий, чем на предыдущем, но при этом проводится более сложный и детальный анализ. Результатом работы чисто электронного триггера первого уровня (L1) является поток данных с частотой 2 кГц. На втором уровне (L2) электроника с уже встроенными микропроцессорами, связанными с определенными детекторами установки D0, передает информацию в глобальный процессор, где положительное решение триггера вырабатывается как с учетом отдельных объектов, так и их корреляций. Триггер L2 уменьшает поток данных для дальнейшего анализа вдвое, до уровня 1 кГц. События, получившие положительное решение после триггеров L1 и L2, передаются на ферму микропроцессоров, где происходит уже гораздо более тонкий и сложный анализ данных, который вырабатывает положительное решение триггера третьего уровня (L3). При этом поток событий уменьшается до 50 Гц. Эти события записываются на архивные носители для последующего физического анализа данных off-line. В этой главе рассмотрен алгоритм трехуровневого триггера мюонной системы и сделан акцент на работу новой разработанной и созданной при активном

участии диссертанта системы сцинтилляционных счетчиков в этом мюонном триггере эксперимента D0.

Триггер первого уровня каждой подсистемы проверяет каждое регистрируемое событие на наличие характерного для этой подсистемы свойства. Так, например, триггер L1Cal в калориметре определяет суммарное поперечное энерговыделение в калориметре и делает вывод, превышает оно пороговое значение или нет. Центральный трековый триггер L1CTT и мюонный триггер L1Muon распознают треки и пропускают те события, в которых превышен установленный порог по поперечному импульсу. Все события, ожидающие решения триггера L1, находятся в «pipeline» и, таким образом, дают минимальный вклад в мертвое время электроники выработки триггера.

Основная триггерная инфраструктура D0 (D0 Trigger Framework или TFW), которая является источником временных сигналов и сигналов контроля для всего эксперимента, собирает оцифрованную информацию с триггеров L1 каждой подсистемы и принимает решение на общем триггерном уровне L1, следует ли далее изучать данное событие. TFW посылает вето-сигналы, которые могут блокировать выработку триггера, а также осуществляет шкалирование («prescaling») тех типов триггеров, которые вырабатываются с большой частотой и могут «забивать» более редкие процессы.

Все рабочие корзины с электроникой, находящиеся в зоне столкновений эксперимента D0, синхронизованы с частотой ускорителя (53.1047 МГц) [32]. «Банчи» коллайдерного пучка разделены на 21 период частоты (396 нс). Семь периодов частоты (132 нс) используются как единица времени TFW. Всего с начала промежутка без частиц, используемого для синхронизации, есть 159 таких интервалов вокруг одной орбиты ускорителя. Седьмое пересечение после начала промежутка без частиц содержит первый «банч» с частицами.

Установленная задержка между столкновением пучков и приходом триггерного сигнала первого уровня от системы L1 на TWF составляет 25 интервалов по 132 нс (см. рис. 4.1).

Триггер первого уровня L1Muon идентифицирует мюоны, используя информацию с мюонных проволочных камер, мюонных сцинтилляционных счетчиков и треки из L1CTT. Электроника рассчитана на регистрацию и анализ в одном пересечении протонного и антипротонного «банчей» до 60000 каналов детекторов мюонной системы и до 480 треков из L1CTT. Данные с первичной «над-детекторной» электроники (с корзин, находящихся в зоне столкновений) передаются по быстрым оптическим волоконным кабелям с частотой

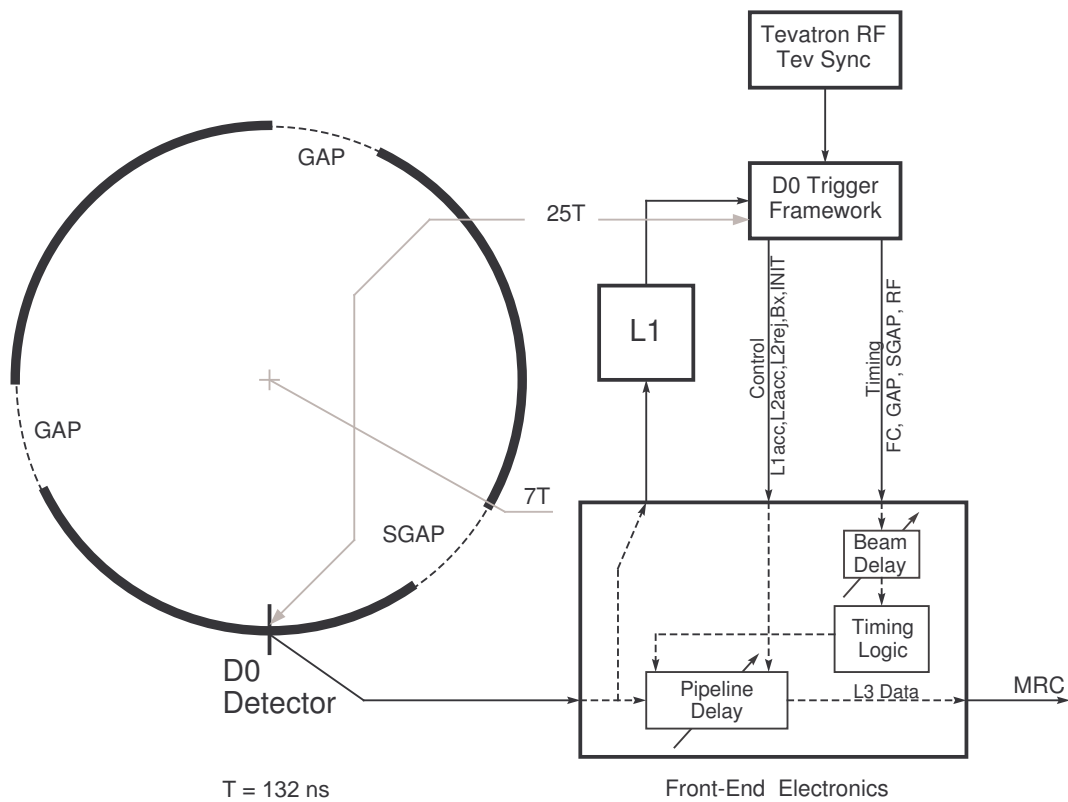


Рис. 4.1. Временная структура эксперимента D0. Круг отображает кольцо ускорителя Тэватрон, заполненное «банчами» частиц (сплошная линия) и свободные от частиц промежутки, используемые для синхронизации (пунктирные линии).

1 Гбит/сек. Полное время на выработку триггера первого уровня L1Muon составляет 3.3 мксек и определяется, в основном, центральными пропорциональными дрейфовыми трубками и треками из L1СТГ.

Триггер второго уровня L2Muon использует калибровку и более точную временную информацию для улучшения качества кандидатов в мюоны. Он получает информацию с выхода триггера первого уровня L1Muon и данные со 150-ти «над-детекторных» модулей электроники с пропорциональных дрейфовых трубок, мини-дрейфовых трубок и сцинтилляционных счетчиков. Для кандидатов в мюоны определяются значение поперечного импульса  $p_T$  соответствующего трека, его псевдобыстрота  $\eta$  и азимутальный угол  $\phi$ , а также критерий качества описания трека и временная информация.

Триггер третьего уровня L3 проводит дополнительный критический анализ событий, поступивших после положительного решения триггера второго уровня L2, для записи разумного числа событий на архивные носители и для обогащения этой информации событиями с интересующими физическими процессами. Как уже упоминалось, с выхода триггера L2 на триггер L3 поступает поток данных с частотой 1 кГц, а триггер L3 ужимает его до 50 Гц. Триггер L3 может тратить до 235 мсек на событие для распаковки информации, реконструкции и анализа. Решение триггера L3 основано на анализе физических объектов и их связях между собой (таких, например, как инвариантная масса двух объектов). Информация с проволочных детекторов и сцинтилляционных счетчиков мюонной системы используется для реконструкции мюонных треков внутри и за пределами тороидального магнита. Формируется трех-импульс кандидата в мюоны. Триггер L3 улучшает качество проведенного предыдущим триггером L2 отделения мюона из данного конкретного анализируемого события от мюона из другого временного

интервала. Для этого используется информация с системы сцинтилляционных счетчиков.

Трехуровневая триггерная система мюонных детекторов установки D0 с заметным использованием информации с созданной системы сцинтилляционных счетчиков успешно и надежно отработала в течение более семи лет второго сеанса на Тэватроне и дала возможность провести уникальные физические исследования. Об одном таком важном исследовании будет рассказано в следующей главе диссертации.

## 5. Открытие странного каскадного бариона $\Xi_b^-$ ( $dsb$ ) при использовании системы триггерных сцинтилляционных счетчиков

Работа мюонного детектора эксперимента D0 во втором сеансе показывает, что цели, поставленные перед усовершенствованной установкой, были достигнуты [33-35]. Распределение инвариантной массы мюонной пары, соответствующее интегральной светимости  $0.20 \text{ фб}^{-1}$ , представленное на рис. 5.1, демонстрирует отличные возможности по триггированию и идентификации мюонов при помощи мюонного

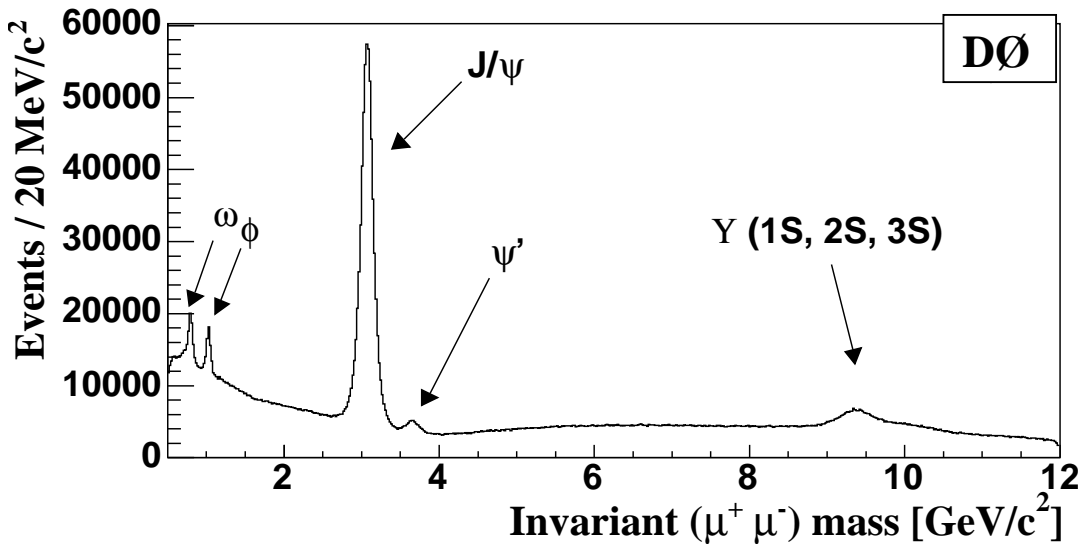


Рис. 5.1. Распределение инвариантной массы мюонной пары, соответствующее интегральной светимости  $0.20 \text{ фб}^{-1}$ .

детектора, что привело, в частности, к открытию каскадного  $\Xi_b^-$  ( $dsb$ ) бариона – первой частицы, состоящей из валентных кварков всех трех известных поколений.

Кварковая модель адронов [36] предсказывает существование барионов, содержащих  $b$  кварк с иерархической структурой, подобной структуре очарованных барионов. Несмотря на значительный прогресс за последнее десятилетие в изучении адронов, содержащих  $b$  кварк, удалось обнаружить только один такой барион, а именно  $\Lambda_b$  ( $udb$ ).

Странный каскадный барион  $\Xi_b^-$  (dsb) состоит из валентных кварков всех трех известных поколений и распадается, как ожидается, через слабое взаимодействие. Теоретические вычисления в рамках эффективной теории тяжелых кварков [37] и нерелятивистской КХД [38] предсказывают массу  $\Xi_b^-$  бариона в диапазоне 5.7-5.8 ГэВ [39].

Эксперименты в ЦЕРН на  $e^+e^-$  коллайдере LEP доложили о косвенном наблюдении  $\Xi_b^-$  бариона, основанном на превышении в струях событий с каскадным барионом и лептоном одного знака заряда,  $\Xi^-$  и  $\Gamma^-$  [40]. Объясняя это превышение рождением с последующим полу-инклюзивным распадом  $\Xi_b^- \rightarrow \Xi^- \Gamma^- \nu_e X$ , было определено среднее время жизни  $\Xi_b^-$  равное  $1.42^{+0.28}_{-0.24}$  пикосекунд [41]. В 2007 г. эксперимент D0 доложил о первом прямом наблюдении странного каскадного бариона  $\Xi_b^-$  в полностью реконструированной эксклюзивной моде распада. Был обнаружен распад  $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Xi^-$ , где  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  и  $\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$ , а  $\Lambda \rightarrow p \pi^-$  (см. рис. 5.2). Физический анализ данных основан на статистике, набранной на установке D0 в 2002-2006 гг. при энергии протон-антипротонного взаимодействия в системе центра масс 1.96 ТэВ с интегральной светимостью  $1.3 \text{ фб}^{-1}$ . Наиболее важными детекторами для регистрации странного каскадного бариона являлись центральная трековая система и мюонный спектрометр. Наряду с дрейфовыми трубками мюонного спектрометра три слоя триггерных сцинтилляционных счетчиков, описанных подробно в данной диссертации, сыграли решающую роль в обнаружении  $\Xi_b^-$  бариона. Именно система сцинтилляционных счетчиков мюонного спектрометра вырабатывала триггер на два мюона, где «золотая» мода распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  образовывала ансамбль очень редких событий типа  $B \rightarrow J/\psi X$ , при анализе которых и был обнаружен странный каскадный барион  $\Xi_b^-$ .

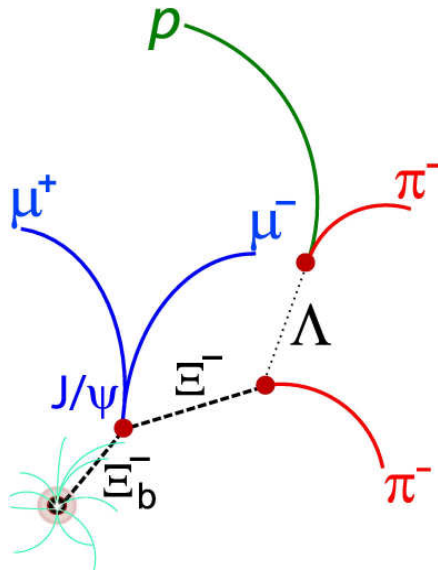


Рис. 5.2. Схема распада бариона  $\Xi_b^-$ .  $\Lambda$  и  $\Xi^-$  барионы имеют длину распада порядка см, а  $\Xi_b^-$  барион – порядка мм.

В этих событиях сначала реконструировалась частица  $J/\psi$  в режиме распада на  $\mu^+\mu^-$ . Затем в событиях с найденным  $J/\psi$  искался  $\Lambda$ -гиперон по его распаду на протон и  $\pi^-$  и, наконец,  $\Xi^-$  в его распаде на найденный  $\Lambda$ -гиперон и  $\pi^-$ . После необходимых коррекций разрешения установки по массе строилась инвариантная масса  $J/\psi$  и  $\Xi^-$ . В результате было найдено  $15.2 \pm 4.4$  (стат.ошибка)  $^{+1.9}_{-0.4}$  (сист. ошибка) кандидатов в  $\Xi_b^-$  с массой  $5.774 \pm 0.011$  (стат.ошибка)  $\pm 0.015$  (сист. ошибка) ГэВ. Уровень достоверности наблюдаемого сигнала составил  $5.5 \sigma$ , что эквивалентно вероятности  $3.3 \cdot 10^{-8}$  того, что этот сигнал можно рассматривать как флуктуацию фона в спектре инвариантных масс чармония  $J/\psi$  и обычного каскадного бариона  $\Xi^-$ . Физический анализ данных подробно описан в работе [6].



## Заключение

Диссертационная работа посвящена созданию триггерного детектора передней мюонной системы на основе сцинтилляционных счетчиков для эксперимента D0 на ускорителе Тэватрон (Фермилаб, Батавия, США). Эта система из 4214 сцинтилляционных счетчиков была разработана и полностью создана в ГНЦ ИФВЭ в 1998—1999 гг. при значительном вкладе диссертанта, перевезена в Фермилаб и введена в состав установки D0 ко второму сеансу Тэватрона, начавшемуся в 2001 году. Детектор такого масштаба впервые используется в коллайдерных экспериментах. Процедура разработки системы, выбора компонент, структура минимального модуля и результаты стендовых испытаний октантов описаны в диссертации.

Ожидавшееся во втором сеансе увеличение светимости более чем на порядок и числа протон-антипротонных взаимодействий в единицу времени, а также существенное уменьшение временного интервала между «банчами» в Тэватроне потребовали значительного улучшения триггерной системы эксперимента D0 с тем, чтобы в новых жестких условиях эффективно отбирать триггером интересующие физические процессы и при этом значительно подавлять фоновые реакции. Система из триггерных сцинтилляционных счетчиков, успешно отработавшая в течение более семи лет в составе трехуровневого триггера эксперимента D0, полностью удовлетворила новым требованиям эксперимента. Разброс временных сигналов детектора со всех счетчиков составил не более 2.5 нс.

Высокая стабильность временных характеристик созданного детектора позволяет отслеживать и компенсировать температурные изменения импульса синхронизации от Тэватрона, задающего начало отсчета времени для всех детекторов D0.

В диссертации изложена процедура светодиодной калибровки сцинтилляционного детектора, впервые примененная в 2001 г., и представлены результаты калибровок за 2001—2008 гг. Среднее отклонение за семь лет работы амплитуд сигналов, усредненное по 4214 счетчикам, не превышает 4.2% с  $\sigma$  распределения этих отклонений по всем счетчикам около 12%. За этот же период сигналы остались стабильными во времени в пределах 0.2 нс с  $\sigma$  распределения отклонений 0.6 нс.

Также изложена разработанная при активном участии автора методика калибровки детектора, основанная на измерении отклика счетчиков на прохождение через них мюонов, образованных в протон-антипротонных столкновениях на ускорителе Тэватрон. 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 калибровок за 2002—2008 гг. Старение всей системы счетчиков составляет не более 1.5% в год, что обеспечивает ее долгосрочную работу. Проводимые регулярно в течение семи лет во втором сеансе такие работы как калибровка на светодиодах и калибровка на мюонах по процедурам, изложенным в данной диссертации, продемонстрировали стабильность работы сцинтилляционного триггерного детектора передней мюонной системы установки D0 по всем требуемым параметрам. Тем самым была обеспечена надежность всех физических результатов эксперимента D0, полученных с использованием этого детектора.

В диссертации также представлены результаты мониторинга стабильности всей передней мюонной системы эксперимента D0 с использованием выходов одиночных мюонов. Система стабильна в

пределах 1% во времени и в диапазоне светимости  $(0.5\text{--}2.5) \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ .

Также в работе описан один из важнейших физических результатов, полученных в значительной мере благодаря надежной работе системы триггерных счетчиков — прямое наблюдение странного каскадного бариона  $\Xi_b^-$  (dsb) с массой  $\sim 5.77$  ГэВ — первой частицы, состоящей из валентных кварков всех трех известных поколений.

В заключение автор считает своим приятным долгом поблагодарить научного руководителя диссертации кандидата физико-математических наук Валерия Николаевича Евдокимова за большой идейный вклад в работу, которая здесь представлена, поддержку и внимательное руководство.

Автор также весьма признателен В.А. Беззубову, И.Н. Белякову, П.И. Галуху, С.Н. Гуржиеву, Д.С. Денисову, Б.Н. Дыбину, С. А. Звягинцеву, А.В. Козелову, В.В. Константинову, В.М. Кораблеву, С.А. Куликову, В.В. Липаеву, В.М. Подставкову, А.В. Попову, А.Н. Ромаданову, Д.А. Стояновой, А.В. Ферапонтову, И.Н. Чурину, И.В. Швабовичу, А.А. Щукину за активное участие в исследованиях по теме диссертации и за их вклад в получение и анализ экспериментальных данных.

Особую благодарность автор выражает члену-корреспонденту РАН Сергею Петровичу Денисову за постановку задачи и постоянное и доброжелательное внимание к исследованиям, которые легли в основу диссертации.

Автор благодарен руководству ГНЦ ИФВЭ за поддержку нашего участия в экспериментальной программе D0, в рамках которой выполнена настоящая диссертация, а также сотрудникам ускорительных и технических подразделений ФНАЛ, четкая работа которых сделала возможным проведение эксперимента D0.

## Литература

1. C. Brown, et al, Nucl. Instr. And Methods, A 279 (1989) 331.
2. S. Abachi, et al., Nucl. Instr. and Methods A 338 (1994) 185.
3. V.M. Abazov, et al., Nucl. Instr. and Methods. A565 (2006) 463.
4. V. Abramov, et al., Nucl. Instr. and Meth. A419 (1998) 660.
5. V.M. Abazov, et al., Phys. Rev. Lett. {97}, 021802 (2006).
6. V.M. Abazov, et al., Phys. Rev. Lett. {99}, 052001 (2007).
7. S. Abachi, et al., Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 2632.
8. S. Abachi, et al., Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 1197.
9. B. Abbott, et al., Phys. Rev D 60 (1998) 052001.
10. S. Abachi, et al., Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 3309.
11. V.M. Abazov, et al., Phys. Rev D 66 (2002) 012001.
12. B. Abbott, et al., Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 2451.
13. S. Abachi, et al., Phys. Rev. D 57 (1998) 589.
14. V.M. Abazov, et al., Phys. Rev. D 66 (2002) 112001.
15. B. Abbott, et al, Phys. Rev. Lett 79 (1997) 4321.
16. V.M. Abazov, et al., Phys. Rev. Lett. 8 (2002) 191801.
17. [www-d0.fnal.gov/www\\_buffer/pub/publications.html](http://www-d0.fnal.gov/www_buffer/pub/publications.html).
18. V. Shiltsev, Status of Tevatron Collider Run II and Novel Technologies for Luminosity Upgrades. Proc. 2004 European Particle Accelerator Conference, Lucern, Switzerland, Vol. 1, 2004, p. 239.
19. R. Ruchti, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 46 (1996) 281.
20. A. Bross, et al., Proceedings of the SCIFI 97 Conference, p.221, South Bend, Indiana, November, 1997.
21. V.M. Abazov, et al., Nucl. Instr. and Methods A552 (2005) 372.
22. T. Marshall, Nucl. Instr. and Methods A 515 (2003) 50.

23. V. Evdokimov “Light Collection from Scintillation Counters using WLS Fibers and Bars”, Proceedings of the SCIFI 97 Conference, p.300, South Bend, Indiana, 1997.
24. Bicron Corporation, 12345 Kinsman Rd, Newbury, OH 44065-9677.
25. МЭЛЗ, 105023 Москва, ул. Электrozаводская, 23.
26. S. Belikov et al., “Physical Characteristics of the SOFZ-105 Polymethyl Methacrylate Secondary Emitter”, Instruments and Experimental Technique, 36 (1993), p. 390.
27. V. Bezzubov et al., “Fast Scintillation Counters with WLS Bars”, Proceedings of the SCIFI 97 Conference, p.300, South Bend, Indiana, 1997.
28. S.-C. Ahn, et al., IEEE Nucl. Sci. Symposium, Vol. 2 (1991) 984.
29. P. Hanlet et al., Nucl. Instr. and Meth. A521 (2004) 343.
30. В.А. Беззубов, И.А. Васильев, В.Н. Евдокимов и др., «Калибровка сцинтилляционного триггерного детектора передней мюонной системы эксперимента D0», Приборы и Техника Эксперимента №1 (2008), стр. 40.
31. С.В. Беликов, И.А. Васильев, С.Н. Гуржиев, В.В. Липаев «Калибровка калориметра БАРС останавливающимися мюонами», Приборы и Техника Эксперимента №2 (1999) стр. 37.
32. B. Baldin, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-42 (4) (1995) 736.
33. V.M. Abazov, et al., Phys. Rev. Lett. {93} (2004) 141801.
34. V.M. Abazov, et al., Phys. Rev. Lett. {93} (2004) 162002.
35. V.M. Abazov, et al., hep-ex/0409043; Fermilab-Pub-04/225-E (2004).
36. W.-M. Yao, et al., J. Phys. G **33**, 1 (2006).
37. N. Isgur and M. B. Wise, Phys. Rev. Lett. **66**, 1130 (1991).
38. G. T. Bodwin, E. Braaten, G. P. Lepage, Phys. Rev. D **51**, 1125 (1995); **55**, E5853 (1997).
39. E. Jenkins, Phys. Rev. D **55**, R10 (1997); **54**, 4515 (1996);  
N. Mathur, R. Lewis, and R. M. Woloshyn, Phys. Rev. D **66**, 014502 (2002).

40. J. Abdallah, et al., (DELPHI Collaboration), Eur. Phys. J. **C44**, 299 (2005);  
D. Buskulic, et al., (ALEPH Collaboration), Phys. Lett. B **384**, 449 (1996).
41. E. Barberio, et al., (Heavy Flavor Averaging Group Collaboration),  
arXiv:0704.3575.