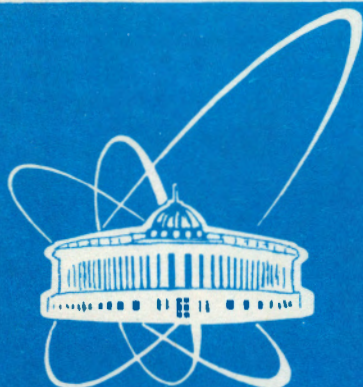


98-304



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-304

P13-98-304

Ю.А.Будагов, О.Е.Пухов, И.Е.Чириков-Зорин,
М.Инкагли¹, С.Леоне¹, А.Мензие¹, С.Токар²

БОЛЬШИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СЧЕТЧИКИ
СО СВЕТОВОДАМИ
ИЗ СПЕКТРОСМЕЩАЮЩИХ ВОЛОКОН

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

¹Национальный институт ядерной физики, Пиза, Италия

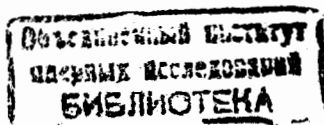
²Университет им. Коменского, Братислава, Словакия

1998

1. Введение

Большие пластмассовые сцинтилляционные счетчики широко использовались и планируются применяться в будущих экспериментах по физике частиц. Обычно в таких детекторах свет на фотокатод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) собирается с торца сцинтилляционной пластины посредством плексигласового световода типа "рыбий хвост" или световода, составленного из набора полос органического стекла. Такая стандартная конструкция сцинтилляционных счетчиков имеет существенные недостатки:

- свет вдоль сцинтилляционных пластин распространяется за счет многократного полного внутреннего отражения, поэтому для высокой многолетней эффективности счетчиков большой длины накладываются высокие требования к качеству полировки поверхности, прозрачности, световыходу, а также жесткие ограничения естественной и радиационной деградации этих параметров во времени; важно отметить, что даже незначительные ухудшения качества поверхности, прозрачности ведут к существенному уменьшению величины светового сигнала с дальнего конца протяженных счетчиков;
- для эффективного сбора света с торца сцинтилляционной пластины плексигласовым световодом необходим дорогостоящий ФЭУ с большой площадью фотокатода, так как эффективность светосбора определяется отношением площади фотокатода к площади торца сцинтилляционной пластины;
- плексигласовые световоды и большие ФЭУ занимают значительное пространство, что ведет к образованию нечувствительных зон, уменьшению геометрической эффективности и увеличению размеров экспериментальных установок;
- обычно в местах размещения сцинтилляционных счетчиков присутствует рассеянное магнитное поле, что влечет необходимость экранировки ФЭУ;



отметим, что большие ФЭУ очень чувствительны к магнитным полям, поэтому во многих случаях для удаления ФЭУ из магнитного поля нужно использовать длинные световоды сложной конфигурации.

В данной статье представлены конструкция и результаты первых исследований сцинтиляционных счетчиков нового поколения, которые почти лишены вышеперечисленных недостатков. В разработанных счетчиках светосбор осуществляется спектросмещающими волокнами, а регистрация света — новыми сверхминиатюрными ФЭУ.

Работа выполнена в рамках программы исследований и разработок, направленных на развитие триггерных мюонных систем установки CDF [1]. Созданы и испытаны прототипы мюонных сцинтиляционных счетчиков длиной 1,8 и 3 м для установки CDF II [2].

2. Конструкция и принцип работы счетчиков

Съем света со сцинтиляторов с помощью пластмассовых спектросмещающих волокон позволяет создавать наиболее компактные системы светосбора, и эта методика уже успешно используется в сцинтиляционных сэндвич-калориметрах [3,4,5]. Малое количество света, которое собирается с каждого сцинтиляционного слоя калориметра при прохождении частицы с минимальной ионизацией, не является критическим, так как сигнал с детектора образуется суммой с большого количества слоев. Аналогичную технологию мы применили для сбора света с больших сцинтиляционных пластин. Для исследований были изготовлены два протяженных счетчика прямоугольной формы с размерами $180 \times 17 \times 2 \text{ см}^3$ и $300 \times 30 \times 2 \text{ см}^3$.

Конструкция счетчика показана на рис. 1. Пластины изготовлены в Институте “Монокристалл” г. Харькова из сцинтиллятора UPS-923A на основе

полистирола с добавками *PTP* (2%) и *POPOP* (0,03%) [6]. Все поверхности сцинтиллятора полированы.

В одном углу пластин сделаны небольшие выемки для размещения сверхминиатюрного ФЭУ (рис. 1). Площадь выемок составляет всего несколько

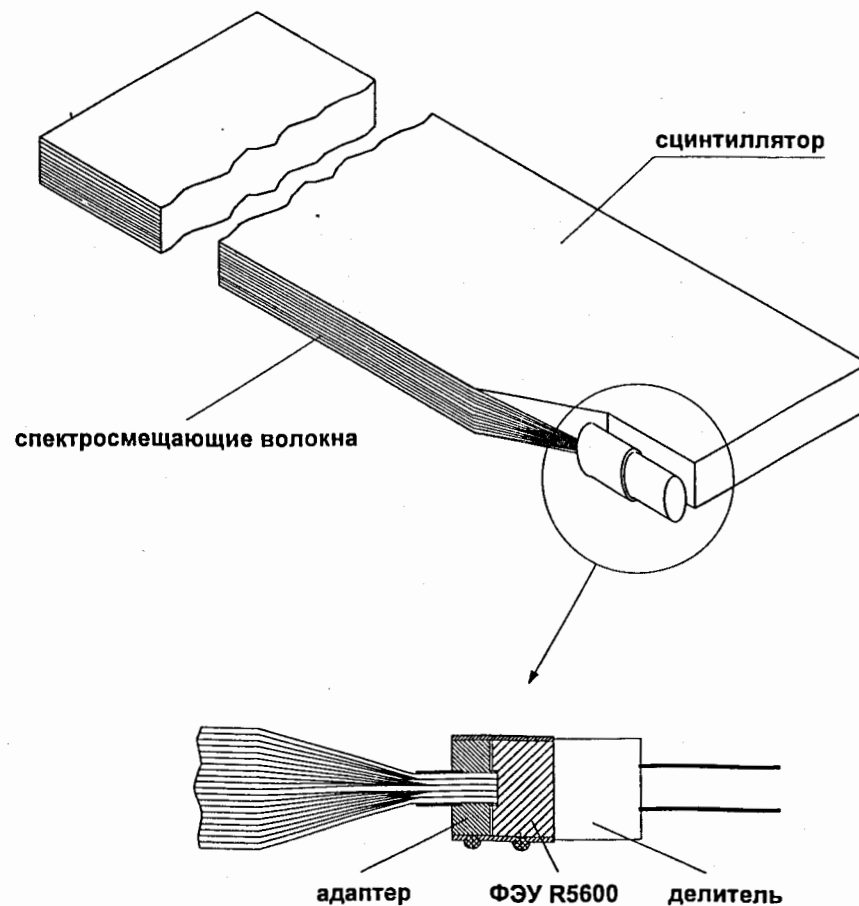


Рис. 1. Конструкция счетчиков со спектросмещающим волоконным световодом

десятых долей процента от полной площади счетчиков и поэтому наличие выемок несущественно изменяет геометрическую эффективность счетчиков. Для съема света вдоль узкой длинной стороны пластины были приклеены оптическим клеем

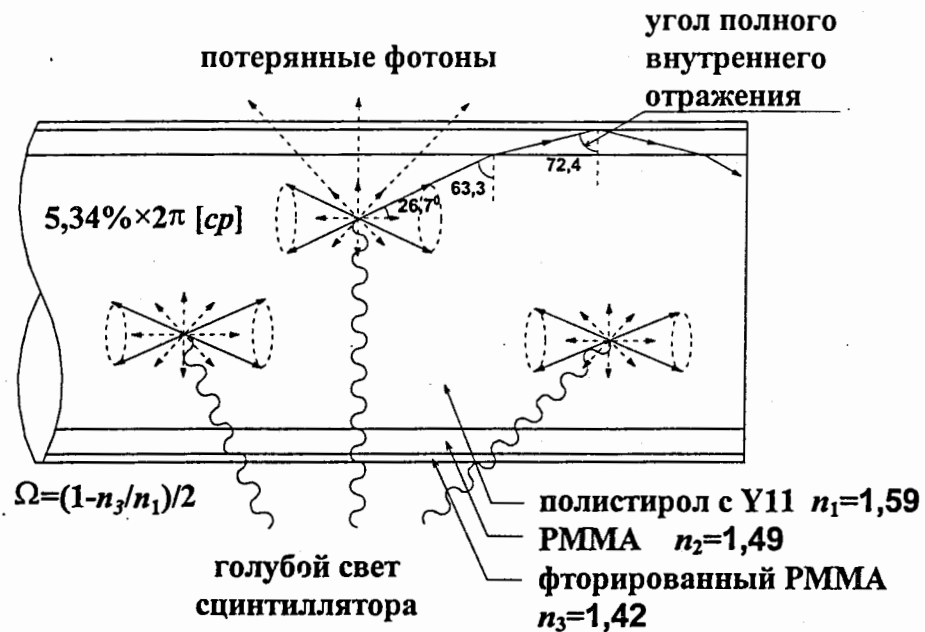


Рис. 2. Принцип светосбора с использованием спектросмещающего волокна

параллельно друг другу двадцать спектросмещающих волокон диаметром 1 мм, образующих ленту. У выемки волоконная лента формировалась в жгут и приклеивалась внутри адаптера цилиндрической формы. Торец адаптера фрезеровался для получения плоской поверхности, необходимой для оптического контакта с фотокатодом ФЭУ. Дальние от ФЭУ торцы волоконной ленты были зачернены в первых измерениях, а затем отшлифованы и сделаны плоскими. Для отражения света, распространяющегося в волокнах, к этим торцам приклеивалась оптическим клеем полоска алюминиевой фольги. Такая простая технология изготовления рефлектора дает коэффициент отражения $\approx 60\%$.

На всех торцах сцинтилляционной пластины были установлены полоски из алюминиевой фольги для отражения обратно выходящего из нее света. На внешней стороне ленты из спектросмещающих волокон была также приклеена оптическим клеем светоотражающая алюминиевая полоска для увеличения эффективности захвата света. Большие поверхности сцинтилляционной пластины

были обернуты алюминизированной бумагой, имеющей профиль поверхности, подобный апельсиновой корке. Такая поверхность не дает зеркального отражения и поэтому улучшает транспортировку вышедшего из сцинтиллятора света к светособирающей грани.

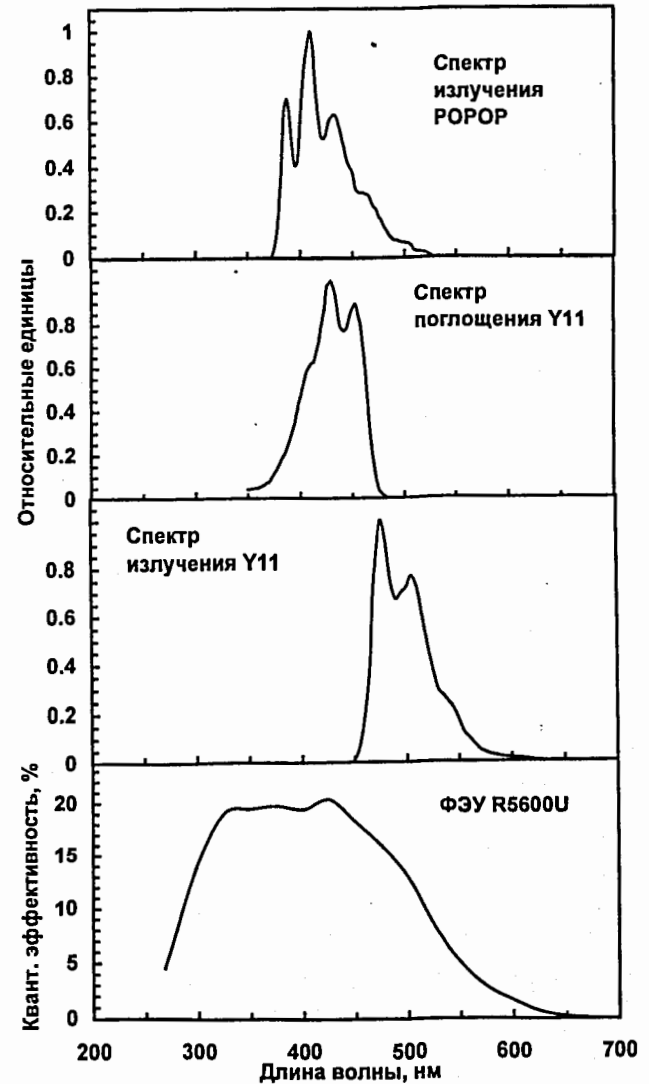


Рис. 3. Спектр излучения POPOP, спектры поглощения и излучения конвертора флюоресценции Y11 и квантовая эффективность ФЭУ R5600U

Для изготовления ленточного световода использовались многооболочечные спектросмещающие волокна S-типа Y11 (200 *ppm*), изготовленные фирмой "Kuragay" (Япония)*. Сердцевина волокон — из полистирола с добавкой 0,02% сместителя спектра Y11. Внутренняя оболочка состоит из полиметилметакрилата (PMMA), внешняя — из фторированного PMMA (рис.2). Эффективность захвата света таких волокон составляет 5,34%, в отличие от однооболочечных, эффективность которых 3,4%.

Часть голубого света сцинтиллятора, излученного сместителем спектра *POPOP*, достигшего волоконной ленты, поглощается добавкой Y11 и изотропно переизлучается в более длинноволновую зеленую область (рис. 3).

Благодаря полному внутреннему отражению часть света захватывается и распространяется по волокнам к ФЭУ и к противоположному концу. Зеркало на дальнем торце волоконной ленты изменяет направление распространения света и таким образом увеличивает сигнал (рис. 2).

В качестве фотодетектора применяется новый сверхминиатюрный ФЭУ R5600U диаметром 16 мм и длиной 11,5 мм, изготовленный фирмой "Hamamatsu" (Япония). Эффективный диаметр фотокатода — 8 мм. Типичная квантовая эффективность его на длине излучения шифтера Y11 (~500 нм) составляла ~13%.

3. Методика измерений

Исследование светосбора в счетчиках проводилось на космических мюонах. Блок-схема установки представлена на рис. 4. Спектры сигналов с ФЭУ

* Фирма "Kuragay" выпускает пластмассовые волокна двух типов — S-тип и HE S-тип, которые отличаются ориентацией полистирольных цепей. В волокнах S-типа цепи ориентированы хорошо и волокна гибкие, но показатель преломления не очень однороден, что уменьшает эффективность захвата света и ухудшает его транспортировку. В волокнах HE S-типа цепи слабо ориентированы и поэтому показатель преломления более однороден, но такие волокна хрупкие и легко ломаются при изгибе.

измерялись зарядово-цифровым преобразователем (ЗЦП) LeCroy ADC 2249A. Длительность ворот ЗЦП составляла ~80 нс. Сигналы с ФЭУ усиливались быстрым усилителем с целью получения одноэлектронных спектров, необходимых для калибровки спектрометрического канала. Ослабитель (ОСЛ) использовался для увеличения динамического диапазона при измерениях спектров от космических мюонов. Информация с ЗЦП считывалась персональным компьютером.

Установка работала в двух разных режимах. Первый (триггер 1) — для измерения амплитудных спектров со счетчика от космических мюонов, второй (триггер 2) — для калибровки спектрометрического канала. Триггер 1 вырабатывался мюонным телескопом, состоящим из двух небольших ($4 \times 7 \text{ см}^2$) сцинтилляционных счетчиков (S_1, S_2), включенных в схему совпадений (СС). Исследуемый счетчик располагался между ними. Передвигая телескоп вдоль счетчика, измеряли зависимость светосбора от расстояния до торца сцинтилляционной пластины. Триггер 2 вырабатывался импульсным генератором и применялся для измерения калибровочных спектров от светодиода. Использовался быстрый красный *AlGaAs* светодиод HLMP8100, изготовленный фирмой "Hewlett Packard". Среднее количество фотонов, попадающих на фотокатод ФЭУ, регулировалось изменением амплитуды импульса, питающего светодиод. Спектры от светодиода использовались для определения параметров спектрометрического канала и контроля их временного дрейфа. Для этой цели калибровочные измерения проводились перед и после каждого набора статистики на мюонах.

Спектрометрический канал был откалиброван в абсолютных единицах, т.е. в числе фотоэлектронов, созданных на фотокатоде ФЭУ. Таким образом получались спектры количества фотоэлектронов, образовавшихся в результате прохождения космического мюона через счетчик. Калибровка была проведена с использованием световых вспышек низкой интенсивности [7]. Знание

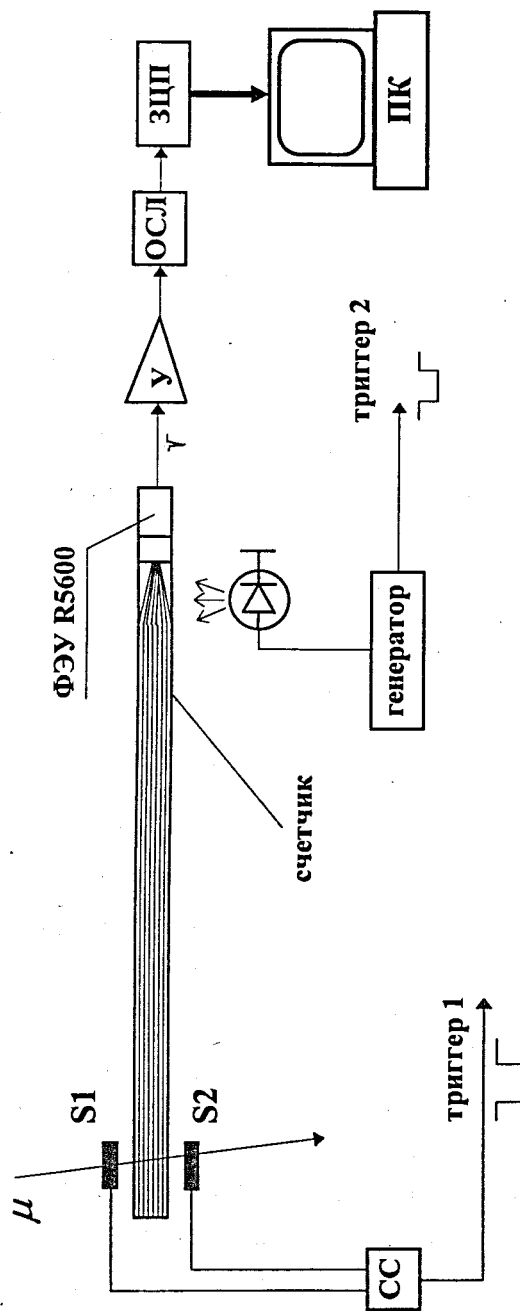


Рис. 4. Блок-схема измерительной установки

световыхода в абсолютных единицах — числе фотоэлектронов, образовавшихся на фотокатоде ФЭУ и собранных на первом диноде, — очень важно, т.к. позволяет не только определить эффективность детекторов, но и прогнозировать их долговременную стабильность, а также сравнивать параметры детекторов различных конструкций.

Основная идея метода калибровки заключается в развертывании спектров с малым количеством фотоэлектронов с помощью реалистической функции отклика ФЭУ. Подробности метода калибровки спектрометрического канала ФЭУ с традиционной структурой (ФЭУ с линейно фокусирующими динодами, коробочными динодами и др.) можно найти в нашей работе [7].

Новые сверхкомпактные ФЭУ R5600 имеют динодную систему, называемую “металлический каналный динод”. Одной из особенностей работы этих ФЭУ является наличие фотоэффекта не только на фотокатоде, но и на 1-м диноде. Имеются и другие особенности работы R5600, которые не позволяют непосредственно применить функцию отклика, полученную в работе [7].

Поэтому мы модифицировали функции отклика с учетом специфических особенностей структуры ФЭУ R5600. На рис. 5 показан типичный развернутый спектр от светодиода. Первый пик на спектре является результатом фотоэффекта на первом диноде из-за полупрозрачности фотокатода. Функция отклика имеет 8 нефеноменологических параметров. Шесть из них описывают часть спектра, соответствующую реальному световому сигналу:

- Q_0 — положение пьедестала;
- σ_0 — стандартное отклонение пьедестала;
- Q_1 — средний заряд на выходе ФЭУ, когда один фотоэлектрон собран на 1-м диноде;
- σ_1 — стандартное отклонение распределения заряда от одного фотоэлектрона;
- μ — количество фотоэлектронов, образованных на фотокатодe и собранных динодной системой;

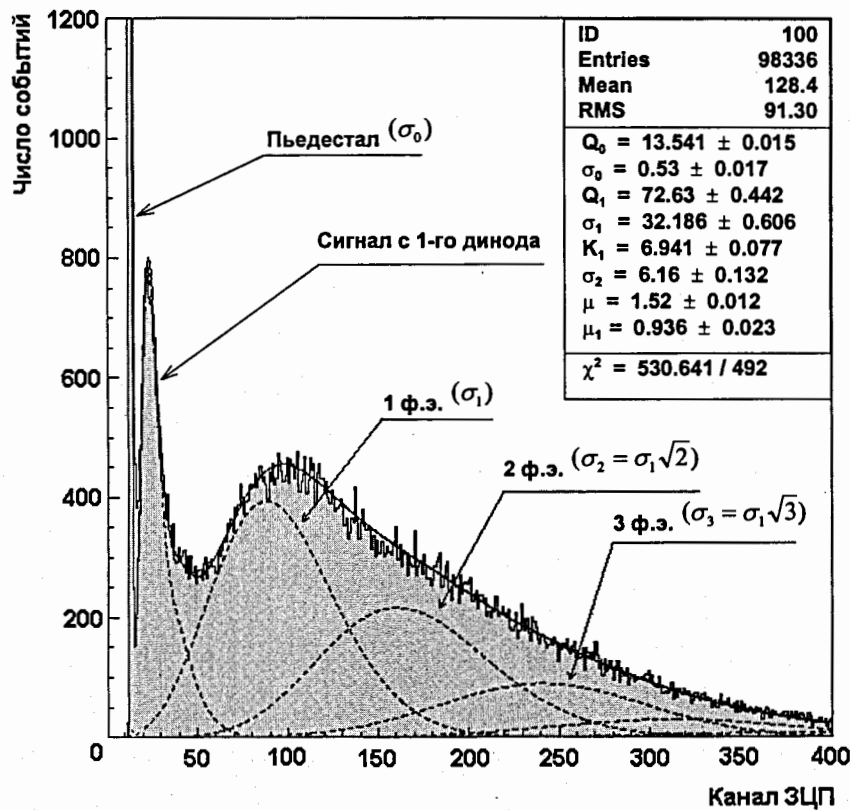


Рис. 5. Типичный зарядовый спектр от светодиода и его составляющие.

- μ_1 — количество фотоэлектронов, образованных на 1-м диноде;
- K_1 — коэффициент умножения на 1-м диноде.

Параметр Q_1 использовался для калибровки и мониторинга спектрометрического канала. Детальное описание метода калибровки будет опубликовано позднее.

4. Результаты

С помощью описанной выше установки измерялись зависимости светосбора в созданных счетчиках размерами $180 \times 17 \times 2 \text{ см}^3$ и $300 \times 30 \times 2 \text{ см}^3$ при прохождении космических мюонов — частиц с минимально ионизирующей способностью.

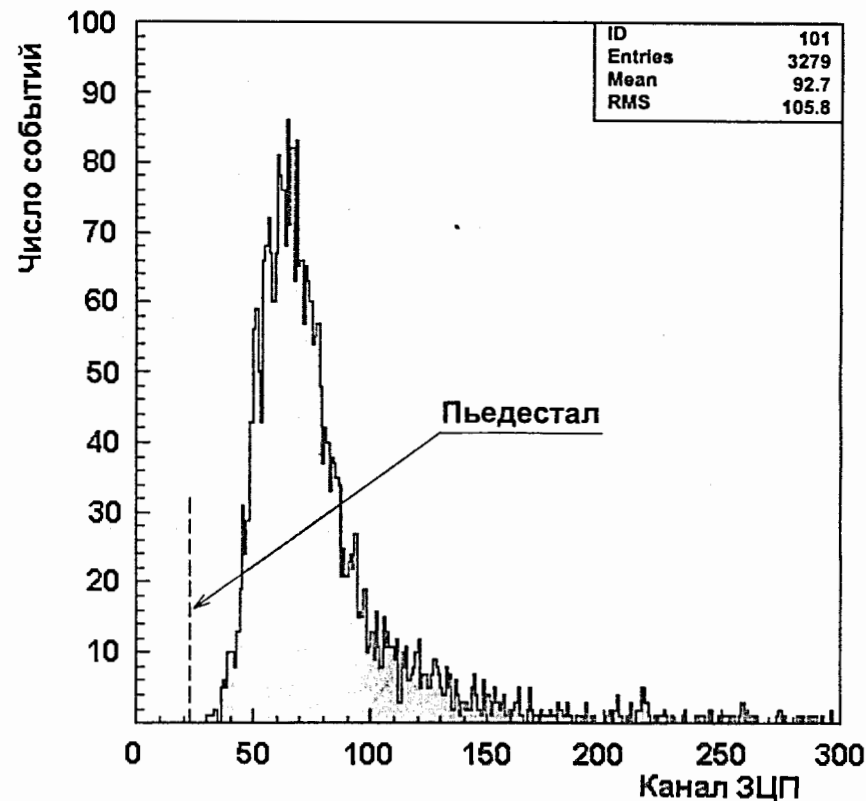


Рис. 6. Типичный спектр от космических мюонов

Типичный спектр от космических мюонов со счетчика длиной 180 см показан на рис. 6. Спектр измерен на расстоянии 170 см от переднего торца сцинтилляционной пластины. Штриховой линией показано положение пьедестала. Из этого спектра средний сигнал от мюона, выраженный в количестве фотоэлектронов, находился из выражения

$$N_{\mu} = \frac{\langle Q \rangle - Q_0}{\langle Q_1 \rangle},$$

где $\langle Q \rangle$ — средняя амплитуда мюонного спектра;

Q_0 — значение пьедестала;

$\langle Q_1 \rangle$ — усредненный калибровочный параметр.

На рис. 7 показана зависимость светосбора как функция расстояния до переднего торца счетчика длиной 180 см. Измерения проводились с

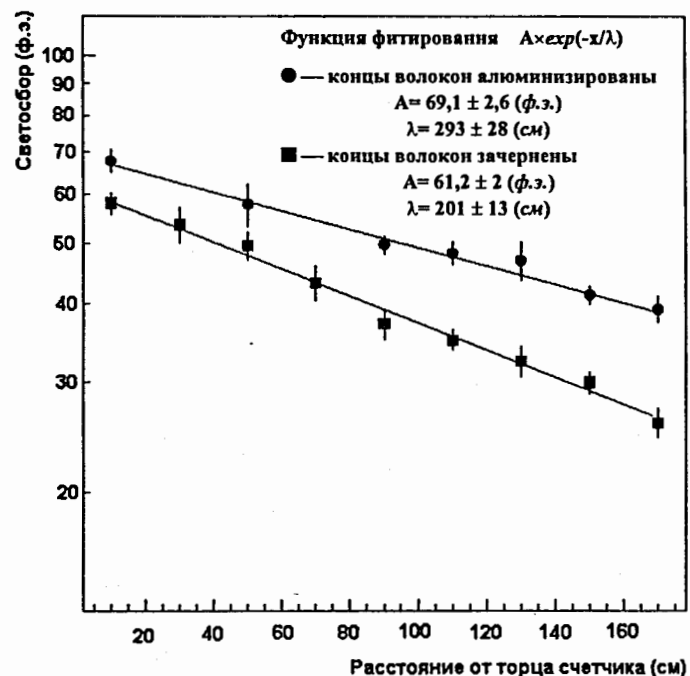


Рис. 7. Кривые затухания света в счетчике длиной 180 см

зачерненными и алюминизированными торцами волоконной ленты для оценки качества рефлектора, получаемого описанной выше простой технологией.

Экспериментальные данные аппроксимировались функцией $A \exp(-x/\lambda)$. Эффективная длина затухания составляет 201 см для зачерненных торцов волокон и 293 см, когда на дальних торцах волокон был приклеен кусочек алюминиевой фольги. Для данного счетчика коэффициент отражения света от торца составлял ~50%.

На рис. 8 показаны аналогичные зависимости для счетчика длиной 300 см. Эффективная длина затухания света составляет 268 см и 473 см для разных условий светосбора соответственно. Коэффициент отражения света от торца составил ~60%.

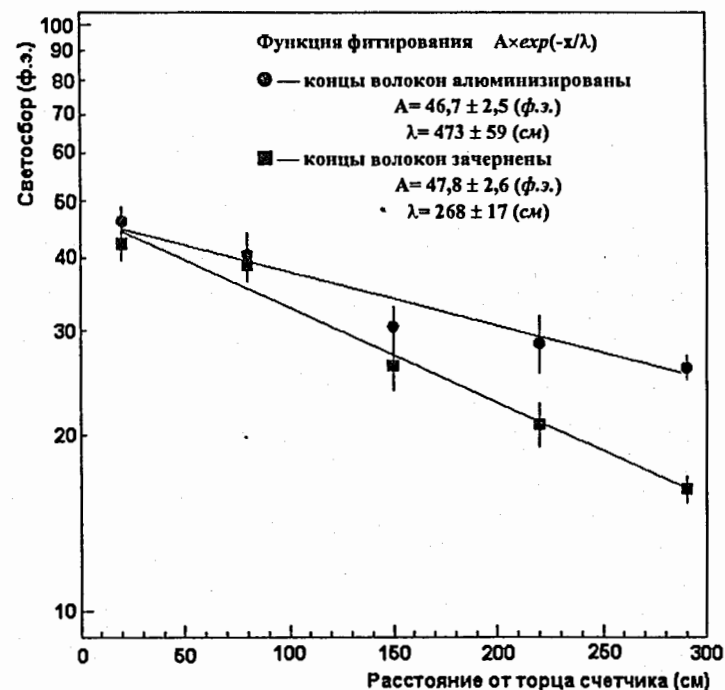


Рис. 8. Кривые затухания света в счетчике длиной 300 см

5. Заключение

Исследования показали, что разработанные большие счетчики со съемом света с помощью спектросмещающих волокон имеют хорошую однородность светосбора. Эффективная длина затухания в счетчике с размерами $180 \times 17 \times 2$ см³ составляет $\lambda \approx 290$ см, а в счетчике с размерами $300 \times 30 \times 2$ см³ — $\lambda \approx 470$ см. Светосбор с дальнего конца счетчика длиной 180 см от частицы с минимальной ионизацией составил ~37 фотоэлектронов, а для счетчика длиной 300 см — ~25 фотоэлектронов. Отметим, что для ~100% эффективности регистрации минимально ионизирующей частицы в полистирольных сцинтилляторах толщиной 2 см достаточно ~10 фотоэлектронов. Поэтому нет необходимости

применять двойной слой спектросмещающих волокон, что может дать примерно 20%-ное увеличение света, но значительно усложнит конструкцию счетчика.

Отметим также, что примененная простая технология изготовления рефлектора на удаленных торцах волокон дает удовлетворительный коэффициент отражения света $\approx 60\%$. Более сложные технологии изготовления зеркала на торцах волокон (например, напыление алюминия и др.) позволяют повысить коэффициент отражения до $80\%–90\%$, но увеличивают трудоемкость и стоимость детектора.

Созданные сцинтилляционные счетчики обладают значительными преимуществами по сравнению со стандартными конструкциями счетчиков со световодами типа “рыбий хвост”:

- простота конструкции (отсутствие сложных световодов и больших фотоумножителей);
- так как светосбор осуществляется с длинной грани сцинтилляционной пластины и свет распространяется в основном вдоль ее меньшей стороны, уменьшаются потери за счет многократного отражения и объемного поглощения в сцинтилляторе; все это ведет к уменьшению требований к качеству полировки поверхности, прозрачности и световыходу сцинтиллятора, а дополнительно к этому значительно ослабляется воздействие естественной и радиационной деградации этих параметров во времени на характеристики счетчиков;
- применение волоконных световодов-смесителей спектра и малогабаритных ФЭУ уменьшает площадь нечувствительных зон и делает детектор компактным;
- применение малогабаритных ФЭУ R5600, малочувствительных к воздействию внешних магнитных полей, позволяет использовать счетчики в магнитных полях без экранировки или с экранами простой конструкции.

Перечисленные достоинства созданных счетчиков делают настоящую разработку очень привлекательной и рекомендуемой к применению.

Литература

1. F. Abe et al., Nucl. Inst. Meth., A271 (1988) 387.
2. The CDF II Detector, Technical Design Report, Fermilab-pub-96/390-E, November 1996.
3. J. Freeman et al., The CDF Upgrade Calorimeter, in Proceedings of the Second International Conference on Calorimetry in High Energy Physics, ed. A. Ereditato, World Scientific, (1993).
4. F. Ariztizabal et al., Nucl. Inst. Meth., A349 (1994) 384.
5. Акимов Ю.К. — ЭЧАЯ, 1994, том 25, вып. 2, с. 496.
6. I. Bellami et al. et al., Nucl. Inst. Meth., A343 (1994) 484.
7. I. Bellami et al. et al., Nucl. Inst. Meth., A339 (1994) 468.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 октября 1998 года.