

## МНОГОСЛОЙНЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНОВ

В. А. Краснов, Л. В. Карнюшина, С. Н. Кузнецов, А. Б. Курепин,  
А. Н. Ливанов<sup>1</sup>, А. В. Пиляр

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Описана конструкция и приводятся характеристики 14-слойного сцинтилляционного спектрометра для регистрации заряженных мезонов. Приводятся результаты тестовых испытаний и калибровки спектрометра на частицах космического излучения и с использованием пучков частиц при энергиях до 1 ГэВ. Спектрометр выполнен на основе плоских сцинтилляционных пластин со спектроперезлучающими оптоволоконками.

The design and characteristics of the 14-layer scintillation spectrometer for the charged mesons registration are given. The results of the spectrometer testing using a space radiation and beam particles are given at energies up to 1 GeV. The spectrometer is constructed on the flat scintillation plates glued with light irradiating optical fibers.

PACS: 29.40.Mc; 34.50.Bw

### ВВЕДЕНИЕ

В течение последнего времени в ЛФВЭ ОИЯИ проводится эксперимент на внутренней мишени нуклотрона ЛФВЭ по изучению резонансного образования заряженных пионов протонами и дейтронами на атомных ядрах в области энергий пучка порядка 350 МэВ/нуклон.

Исследования узкой резонансно-подобной структуры при энергии около 350 МэВ производились и раньше [1, 2], однако во всех отмеченных выше экспериментах изменение энергии налетающих протонов с шагом около 5 МэВ достигалось или с помощью абсорбера, или при сложной перестройке режима работы ускорителя, что существенно влияло на чистоту эксперимента. Поэтому ни один из проводимых ранее экспериментов не давал четкого ответа о наличии резонансно-подобной структуры. В данном исследовании впервые использованы уникальные возможности ускорителя нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ при работе на внутреннем пучке, что позволило изменять энергию в исследуемой области с шагом 1–2 МэВ за время порядка 30 мин.

---

<sup>1</sup>E-mail: livanov@ihe.jinr.ru

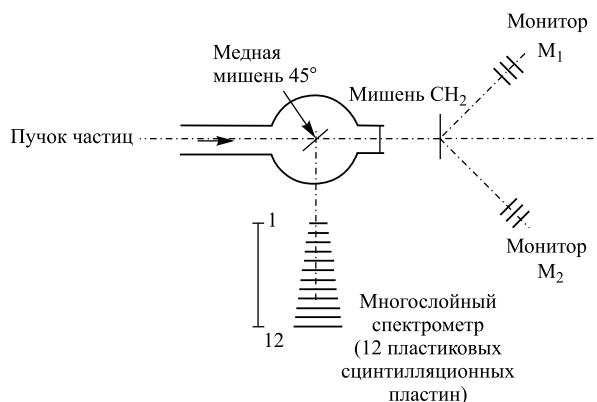


Рис. 1. Экспериментальная установка для изучения образования пионов на ускорителе САТУРН

Для проведения этих исследований был создан многослойный сцинтиляционный спектрометр заряженных частиц для идентификации типа частиц и измерения их энергии. Впервые многослойный пробегный спектрометр заряженных пионов был применен в эксперименте на ускорителе САТУРН, Франция (рис. 1). Спектрометр состоял из 12 пластин пластмассового сцинтиллятора. Свет с каждой пластины передавался на входное окно фотоумножителя посредством световода из оргстекла. В состав установки входили также вакуумная камера рассеяния с установленной внутри медной мишенью, расположенная на выведенном пучке протонов синхроциклотрона, вспомогательная мишень из полиэтилена и система мониторинговых счетчиков.

## 1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для эксперимента по изучению образования пионов на внутренней мишени нуклотрона ЛФВЭ был также выбран принцип создания спектрометра в виде многослойного набора пластмассовых сцинтиляционных пластин из пластмассового сцинтиллятора. Схема экспериментальной установки и ее расположение на кольце ускорителя представлены на рис. 2.

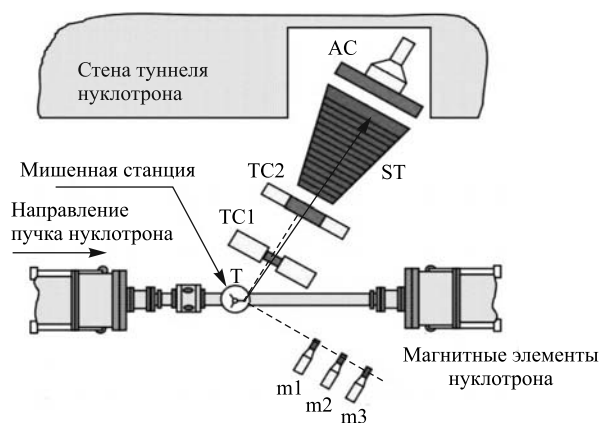


Рис. 2. Схема экспериментальной установки и ее расположение на кольце ускорителя

При проведении эксперимента используется система динамических внутренних мишеней, расположенная на прямолинейном участке кольца ускорителя внутри сферического вакуумного кожуха мишенной станции [3]. Ввод мишени в пучковую область ионпровода производится при помощи шагового двигателя с управлением от ЭВМ, при этом возможна работа с шестью различными мишенями без разгерметизации участка ионпровода. Для относительного контроля интенсивности во время работы используется телескоп из трех мониторных счетчиков  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ , установленный вблизи мишенной станции и выполненный на основе пластмассовых сцинтилляционных пластин размером  $30 \times 30 \times 5$  мм.

**1.1.** Сам спектрометр ST состоит из 14 слоев сцинтилляционных счетчиков толщиной от 20 до 40 мм, т. е. реализуется спектрометр  $\Delta E_i - E$ -типа. Одновременно измеряется время пролета вылетающей частицы на базе 1200 мм при помощи детекторов TC1 и TC2 с временным разрешением около 200 пс. Расстояние от исследуемой мишени до стартового детектора 300 мм. Времяпролетные детекторы выполнены из пластин стандартного полистиролового сцинтиллятора размером  $50 \times 50 \times 5$  мм (TC1) и  $160 \times 160 \times 20$  мм (TC2). Для компенсации временного сдвига из-за конечного времени пролета фотонов сцинтилляции до окна ФЭУ при прохождении частицы по площади пластины в счетчике TC1 используются два фотоумножителя типа XP2020, расположенные на противоположных торцах пластины, сигналы с анодов которых суммируются. В счетчике TC2 используются четыре фотоумножителя ФЭУ-87, установленные на углах и направленные на центр пластины, сигналы с которых усредняются по времени и амплитуде и анализируются для работы в  $\Delta T$ - и  $\Delta E$ -режимах. Основные характеристики спектрометра представлены в таблице.

Параметры сцинтилляционного телескопа

Число пластин	14
Размер пластин, мм	160–270
Толщина пластин, мм	20–40
Материал	Пластмассовый сцинтиллятор, оптоволокно
Неоднородность светосбора по площади пластины, %	< 5
Энергетический диапазон регистрируемых частиц, МэВ	
$\pi^\pm$	40–150
$K^+$	80–280
$p$	70–320
$d$	150–600
Разрешение по времени пролета, пс	$\cong 200 (\sigma)$

Площади детекторов спектрометра ST изменяются от  $160 \times 160$  мм в начале до  $270 \times 270$  мм в конце спектрометра. В каждом детекторе измеряются ионизационные потери регистрируемой частицы при торможении в веществе, т. е. определяется ход кри-

вой Брэгга. При этом расчеты, проведенные с помощью программы GEANT3.21, позволяют утверждать, что точность порядка 3 % в определении энергии частицы может быть получена при измерении энерговыделения в каждом детекторе с точностью около 12 % (FWHM). Для этого разрешение должно зависеть только от статистики образования фотонов в веществе и фотоэлектронов во входной камере ФЭУ, без заметного влияния места прохождения частицы через пластину на амплитуду сигнала. Поэтому была выбрана технология изготовления детекторов на основе клееных сборок сцинтилляционных пластин и оптоволокон со спектросмещающими добавками (стирилпиразолин), что обеспечивает однородный светосбор с пластин, особенно для пластин большой площади ( $270 \times 270$  мм), не хуже 95 %, дает возможность разместить ФЭУ максимально близко к детектору и позволяет создавать световоды по единой технологии для детекторов разных размеров. Волокна вклеиваются в один слой, параллельно друг другу кремнийорганическим клеем между двумя пластинами из сцинтиллятора на основе полистирола с добавкой р-терфенила и РОРОР с толщиной каждой пластины 10 либо 20 мм. За пределами пластины волокна собираются в пучок, вклеиваются во втулку для крепления на входном окне ФЭУ, торцы их обрезаются и полируются. Снаружи детектор покрыт слоем диффузного отражателя света (MgO) с коэффициентом отражения более 99 %. Каждый счетчик просматривается двумя ФЭУ-84-3. Оптоволокна диаметром 0,8 мм изготовлены из полистирола ( $n = 1,59$ ) и покрыты оболочкой из фторированного полиметилметакрилата ( $n = 1,39$ ) толщиной 10 мкм. КERN волокна содержит люминофор, спектр поглощения которого имеет максимум на длине волны 450 нм и хорошо совпадает со спектром высвечивания сцинтиллятора. Спектр излучения люминофора имеет максимум при длине волны 530 нм и согласуется со спектральной чувствительностью ФЭУ-84-3. Длина затухания переизлученного света в применяемом оптоволокне составляет порядка 1,5 м. Фото и графическое изображение одной из пластин представлены на рис. 3.

Общий вид конструкции спектрометра приводится на рис. 4. Сцинтилляционные пластины в рамках из дюралюминия крепятся на несущей раме из стального уголка.

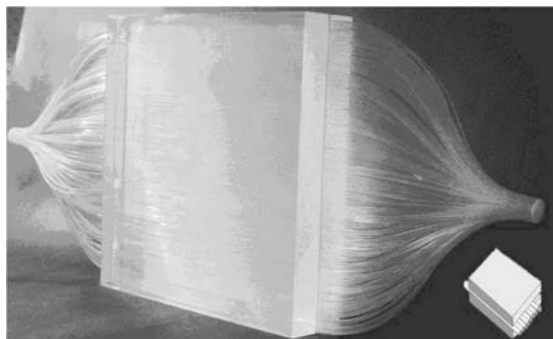


Рис. 3. Фото и графическое изображение структуры одной из пластин спектрометра

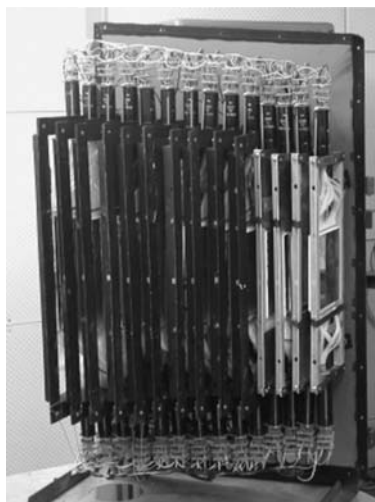


Рис. 4. Внутренняя структура спектрометра

Фотоумножители типа ФЭУ-84-3 притянуты к полированной сборке торцов оптоволокон при помощи пружин. Несущая стальная рама устанавливается внутри светоизолирующего алюминиевого кожуха с входным и выходными окнами, закрытыми тонкой светоизолирующей пленкой (на рисунке не показан).

1.2. Проведем сравнение параметров стандартного сцинтиллятора и пластин с оптоволоконками. Измерение параметров пластин спектрометра по однородности сигнала по площади пластины осуществлялось на канале 7В вторичных частиц ускорительного комплекса ЛФВЭ путем перестройки режимов элементов магнитного канала на разные значения импульсов частиц. Отделение пионов от протонов проводилось при помощи времяпролетной системы. В результате получено значение энергетического разрешения каждой пластины не хуже 10%. Измерения однородности светосбора по площади пластины в разных точках проводились на том же канале при помощи двух детекторов для выделения области пучка размером  $40 \times 40$  мм. Результаты представлены на рис. 5, а. Видно, что полученное значение однородности светосбора не хуже 95%, в то время как в детекторе стандартной конструкции со световодом из оргстекла (рис. 5, б) амплитуды сигналов в разных точках площади отличаются до 40%.

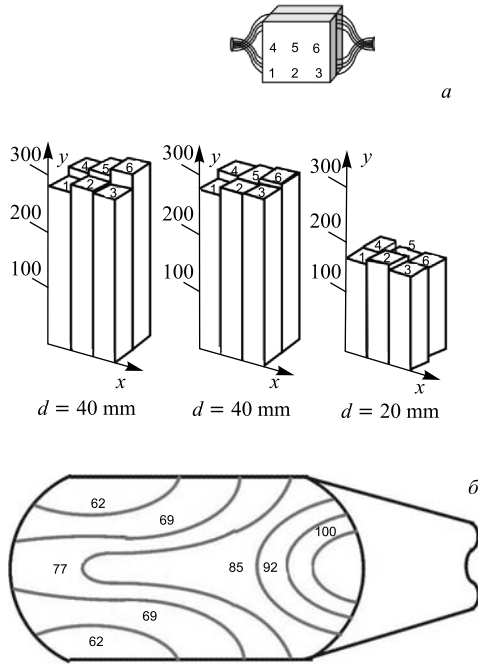


Рис. 5. Параметры однородности сигнала по площади детектора: а) для разработанного типа детектора; б) для сцинтилляционного детектора стандартного типа [3]

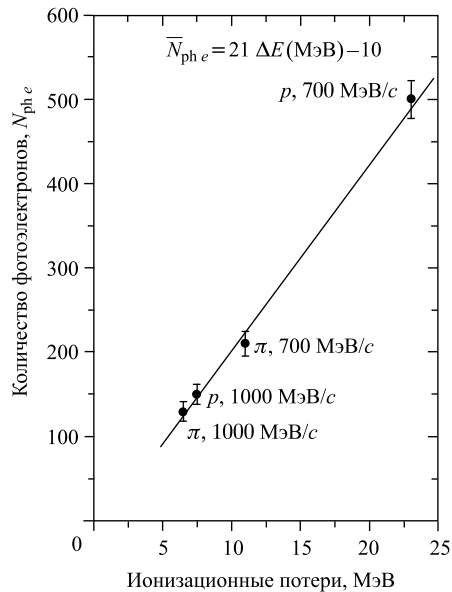


Рис. 6. Количество фотоэлектронов на аноде ФЭУ в зависимости от энергии, оставленной в пластине детектора при прохождении заряженной частицы

1.3. Световыход (число фотоэлектронов на фотокатод ФЭУ) был измерен также на канале 7В ускорительного комплекса ЛФВЭ путем перенастройки магнитных элементов

канала на величину импульса 700 и 1000 МэВ/с и положительный знак заряда частиц. При этом разделении частиц (пионов и протонов) по массе проводилось при помощи порогового черенковского детектора на основе радиатора из оргстекла.

Результаты измерений представлены на рис. 6. Количество фотоэлектронов определялось путем сравнения формы измеренного распределения амплитуд сигналов на аноде ФЭУ с формой распределения Пуассона при различных средних значениях. Полученная эмпирическая формула  $\bar{N}_{phe} = 21\Delta E (\text{МэВ}) - 10$  использовалась в дальнейшем при вычислении эффективности детектора и моделировании его отклика при помощи программы GEANT3.

**1.4.** Аналоговые сигналы с детекторов установки, размещенной в туннеле нуклотрона, посредством кабельных линий связи длиной около 20 м передаются к стойкам измерительной аппаратуры, размещенным в экспериментальном зале. Электроника сбора и обработки информации выполнена в стандарте КАМАК и состоит из модулей обработки аналоговых сигналов, поступающих с детекторов (формирователи, сумматоры, линии задержки и др.) и блоков преобразования информации в цифровую форму (заряд-цифровые и время-цифровые преобразователи, счетчики импульсов).

Архитектурно система сбора данных является двухуровневой системой с распределенным интеллектом, при этом на нижнем уровне находится контроллер крейта ССРС, осуществляющий сбор информации с установки и управление ею, а на верхнем — персональная ЭВМ типа РС, которая используется для приема информации от контроллера крейта, записи ее на жесткий диск, графического отображения на экране и передачи в компьютерную сеть ЛВЭ. Связь между контроллером и ЭВМ оператора осуществляется через линию Ethernet.

Контроллер крейта ССРС4, разработанный в ЛВЭ ОИЯИ, архитектурно представляет собой обычный системный блок РС с добавлением платы сопряжения ISA–САМАС, размещенный в стандартном модуле КАМАК шириной 3М. Передача данных, контрольной и статусной информации осуществляется посредством портовых операций РС.

Текст рабочих программ написан на языке Borland C++ с использованием библиотеки OWL. Во время работы программ выполняются следующие функции:

- проверка состояния контроллера крейта, загрузка в него программы КАМАК;
- выбор параметров модулей КАМАК, временных интервалов и параметров работы и визуального контроля;
- прием, запись на диск, предварительная обработка и графическое отображение информации от контроллера;
- отображение результатов в режиме off-line;
- обмен данными с другими ЭВМ.

## **2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПЕКТРОМЕТРА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

Расчеты эффективности спектрометра при регистрации заряженных частиц различных типов осуществлялись при помощи программы GEANT3. При этом проводилось моделирование процесса ионизационного торможения частицы при последовательном прохождении частицы через сцинтилляционные пластины детектора в зависимости от

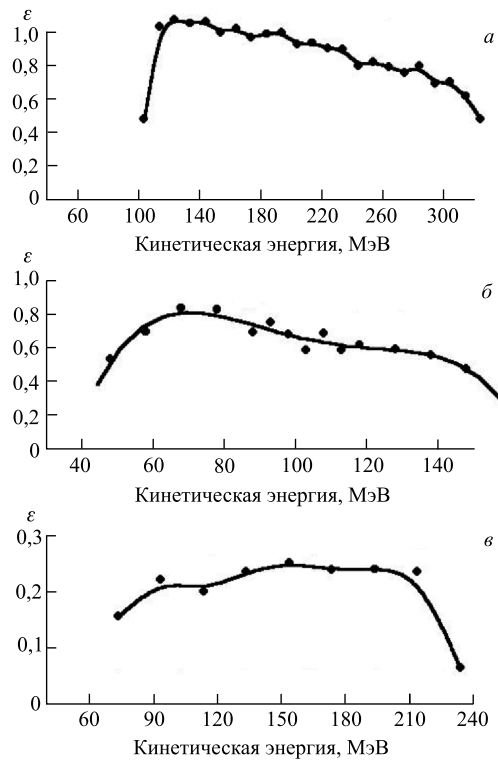


Рис. 7. Эффективность спектрометра при регистрации заряженных протонов (а), пионов (б), каонов (в) в зависимости от типа и энергии частиц

энергии (моделировалась кривая Брегга). Отдельно рассчитывались процессы чисто кулоновского типа, а также вторичные процессы при торможении частиц: неупругое рассеяние, распадные процессы. Полученные результаты представлены на рис. 7. На рисунке видно, что максимальная эффективность регистрации составляет величину от 90 % для протонов при энергии 100 МэВ до 20 % для  $K$ -мезонов. Эффективность регистрации для положительных пионов составляет в среднем 50 % в энергетическом диапазоне от 40 до 140 МэВ.

### 3. ТЕСТИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ НА ВНУТРЕННЕМ ПУЧКЕ НУКЛОТРОНА

Проверка работоспособности установки в реальных условиях на пучке ускорителя и определение ее параметров проводились на внутреннем пучке нуклотрона и медной мишени. Пример двумерного спектра, полученного в результате off-line обработки одного из наборов экспериментальных данных для вылетающих из мишени под углом  $75^\circ$  относительно оси пучка вторичных заряженных частиц, представлен на рис. 8. Измерения проводились на пучке дейтронов с кинетической энергией 350 МэВ/нуклон. На двумерном плоте в координатах время пролета, нс, – кинетическая энергия частицы, МэВ, ясно различаются три области, соответствующие пионной, протонной и дейтронной ветвям.

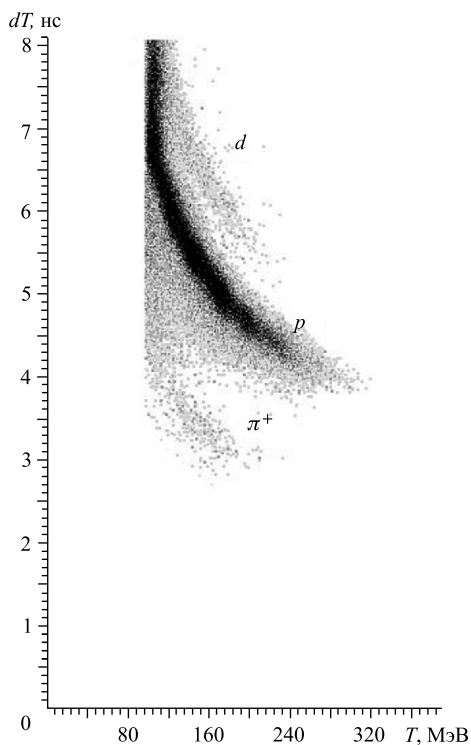


Рис. 8. Двумерный спектр время пролета – кинетическая энергия частицы, полученный при работе на пучке дейтронов при угле регистрации  $75^\circ$

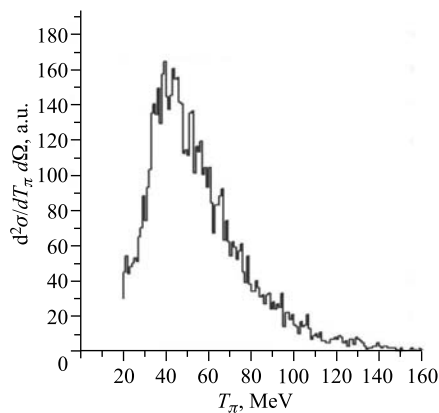


Рис. 9. Спектр кинетических энергий заряженных  $\pi$ -мезонов при угле регистрации  $75^\circ$  и энергии пучка протонов 350 МэВ

Калибровка шкалы по времени пролета проводилась на частицах космических лучей при развороте установки в вертикальное положение путем набора статистики различной (от 0,1 до 2,0 м) времяпролетной базой. Калибровочные коэффициенты для преобразования код–энергия сигналов с пластин спектрометра определялись методом выделения событий квазиупругого рассеяния частиц пучка на полиэтиленовой мишени. Одномерный спектр энергий частиц в «пионной» области, полученный при дальнейшей обработке суммированием числа частиц равных энергий (число частиц в «бине» по оси энергий), представлен на рис. 9.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПУЧКА ЧАСТИЦ УСКОРИТЕЛЯ

Поскольку ожидаемая величина эффекта — около нескольких процентов при ширине резонанса 2–4 МэВ, необходимо также точное знание (калибровка) энергии пучка ускорителя.

Для калибровки пучка ускорителя по энергии была создана система детекторов для измерения энергии частицы методом упругого  $pp$ -рассеяния. Схема измерений приво-



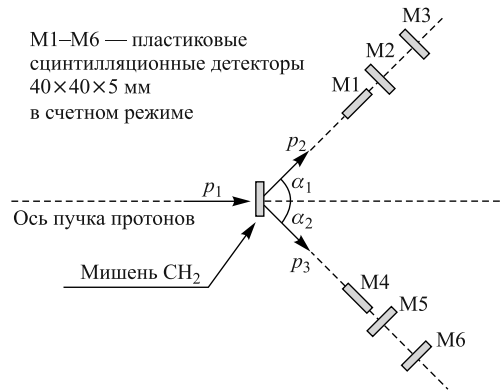


Рис. 10. Схема расположения детекторов для измерения средней энергии пучка частиц ускорителя

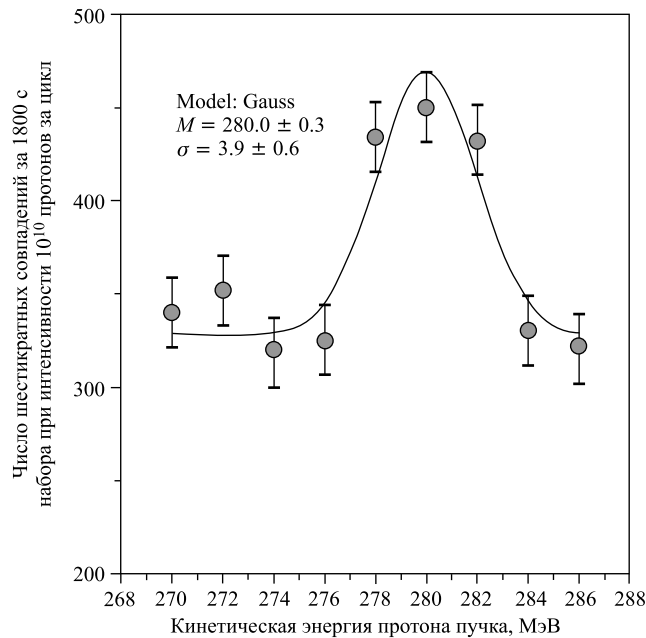


Рис. 11. Результаты измерений средней энергии пучка нуклотрона при установленном значении 280 МэВ

дится на рис. 10. Сцинтилляционные детекторы M1–M6 работают в счетном режиме и настроены на регистрацию шестикратных совпадений.

Углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  выбираются исходя из кинематики упругого  $pp$ -рассеяния. Результаты представлены на рис. 11. Геометрия детектора настроена на регистрацию событий упругого  $pp$ -рассеяния при энергии пучка 280 МэВ. При измерениях проводился набор статистики числа шестикратных совпадений за заданное время (в нашем случае 15 мин) при изменении энергии пучка протонов последовательно от 270 до 288 МэВ с шагом 2 МэВ. Из рисунка видно, что результат аппроксимации измеренного распределения количества

совпадений по энергии распределением Гаусса совпадает по положению максимума с ожидаемым значением с точностью 0,3 МэВ. Отсюда можно сделать вывод, что параметры нуклотрона позволяют проведение прецизионных измерений ожидаемого эффекта с шагом по энергии около 1 МэВ и точностью установки энергии не хуже 0,5 МэВ.

## ВЫВОДЫ

Описана конструкция и приводятся характеристики 14-слойного сцинтилляционного спектрометра для регистрации и измерения заряженных  $\pi$ - и  $K$ -мезонов в экспериментах на внутренней мишени нуклотрона. Спектрометр выполнен на основе плоских сцинтилляционных пластин с переизлучающими оптоволоконками. Описаны результаты тестовых испытаний и калибровки спектрометра на частицах космического излучения и с использованием пучков частиц при энергиях до 1 ГэВ.

Таким образом, можно ожидать, что характеристики и работоспособность сцинтилляционного спектрометра в случае его применения на внутреннем пучке частиц и внутренней мишени нуклотрона ЛФВЭ позволят получить ожидаемые физические результаты.

Авторы признательны сотрудникам ЛФВЭ ОИЯИ (Дубна): С. В. Афанасьеву, А. И. Малахову, А. Ф. Елишеву и ИЯИ РАН (Москва): А. И. Берлеву, Е. А. Моничу, В. А. Гладышеву, М. Б. Голубевой, О. Н. Гончаренко, В. С. Попову, А. Л. Проскурякову, В. И. Разину, Т. П. Филипповой, Е. Н. Матвеевой за помощь в работе и полезные обсуждения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krasnov V. et al.* // Phys. Lett. B. 1982. V. 108. P. 11.
2. *Julien J. et al.* // Phys. Lett. B. 1984. V. 142. P. 11.
3. *Malakhov A. I. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 440. P. 320–329.
4. *Livanov A. N. et al.* // ПМР А. 2007. V. 22, No. 2. P. 604–607.
5. *Карпечев Е. В. и др.* Препринт ИЯИ РАН № 1154/2005. М., 2005.
6. *Gladyshev V. A. et al.* // Rapid Commun. 1991. No. 2(48)-91.
7. *Vlasov A. V. et al.* // ИТЕР-54. 1985.
8. *Krasnov V. A. et al.* // XXXIII Intern. Conf. on High Energy Physics (ICHEP'06), JINR, MSU, 2006. P. 988–991.

Получено 12 января 2012 г.