



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13-96-378

**МУЛЬТИ: МНОГОМОДУЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР
ЛЕГКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ $16 \div 230$ МэВ/А**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

1996

МУЛЬТИ: многомодульный спектрометр легких заряженных частиц в диапазоне энергий $16 \div 230$ МэВ/А

Описана многомодульная установка МУЛЬТИ, состоящая из пластик-ВГО-спектрометра, многопроволочной пропорциональной камеры и Si-телескопа. Установка может использоваться для корреляционных измерений легких заряженных частиц с небольшими относительными скоростями и для исследования многочастичного распада экзотических протонизбыточных ядер. Приведены первые экспериментальные результаты по испытанию фосфич-детекторов, полученные на ускорителе У-400М.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

Перевод авторов

Sobolev Yu.G. et al.

P13-96-378

MULTI: Multimodule Spectrometer of Light Charged Particles at the Energy Region of $16 \div 230$ MeV/A

A multimodule set-up MULTI consisting of plastic-BCGO-spectrometer multiwire proportional chamber and Si-telescope is described. It can be used for correlation measurements of flight charged particles with small relative velocities and for investigation of the multiparticle decay of exotic proton-rich nuclei. First experimental results of the phoswich-detectors testing-obtained at the U-400M cyclotron are shown.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Ю.Г.Соболев¹, М.П.Иванов¹, Р.Калпакчиева¹, И.В.Кузнецов¹, В.Ф.Кушнирук¹,
С.М.Лукьянов¹, Ю.Э.Пенионжкевич¹, В.И.Смирнов¹, Ю.Б.Тарасов¹,
А.С.Фомичев¹, Н.В.Хомутов¹, А.Куглер², Л.Михайлов², Р.А.Асатуриян³,
Р.А.Астабатьян³, Н.А.Демехина³, С.В.Лапушкин⁴, Н.О.Порошин⁴, А.В.Шишков⁴

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Институт ядерной физики Чешской академии наук, Ржжж, Республика Чехия

³Ереванский физический институт, Армения

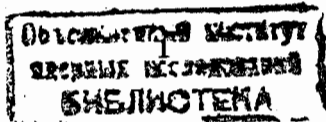
⁴Московский инженерно-физический институт

1. Введение

Многомодульные плотноупакованные спектрометры широко используются в современных ядерно-физических экспериментах при исследовании различных корреляций частиц. Так, например, измерения двухчастичных корреляционных функций легких заряженных частиц (ЛЗЧ) с небольшими относительными импульсами в ядро-ядерных столкновениях позволяют получить информацию о пространственно-временных характеристиках области генерации частиц /1/. Детектирование пар легких частиц, образующихся при распаде несвязанных состояний, позволяет изучать свойства ядер, испускающих эти частицы. Корреляционные измерения при многочастичном развале экзотических ядер с протонным гало представляют интерес для изучения структуры этих ядер /2/. В перечисленных и в некоторых других экспериментах важнейшей наблюдаемой величиной является относительный импульс частиц в выходном канале реакции /3/. Основными параметрами экспериментальной установки, определяющими точность измерения относительного импульса регистрируемой пары частиц, являются энергетическое и угловое разрешения и качество изотопной идентификации частиц в широком диапазоне энергий. В настоящей работе описана установка, удовлетворяющая высоким требованиям экспериментов по изучению малоугловых корреляций между заряженными частицами с энергиями до 230 МэВ на нуклон включительно.

2. Экспериментальная установка

Установка МУЛЬТИ (рис.1) состоит из 19-модульного пластик-BGO-фосфич-спектрометра, используемого в сочетании с многопроволочной пропорциональной камерой и полупроводниковым телескопом. Сцинтилляционный спектрометр был создан в рамках коллаборации Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (Дубна) с Институтом ядерной физики (Ржеж, Чехия). В коллаборации ЛЯР ОИЯИ с ЕрФИ (Ереван, Армения) и с МИФИ (Москва, Россия) были соответственно изготовлены многопроволочная пропорциональная камера и многодетекторный Si -телескоп.



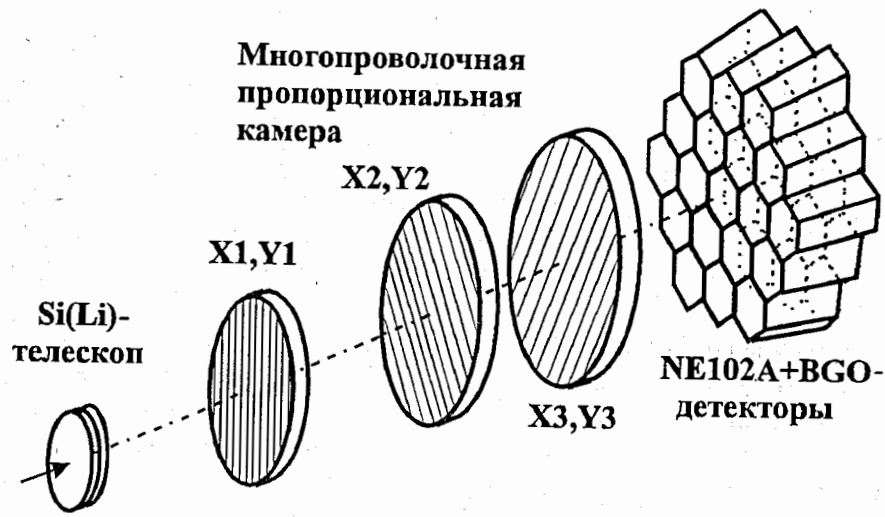


Рис. 1. Схематическое изображение установки МУЛЬТИ

2.1. Сцинтилляционный пластик-BGO-спектрометр

Спектрометр (рис.2) изготовлен из 19 идентичных фосфич-детекторов, состоящих из пластика типа NE102A толщиной 2 мм, BGO-кристаллов ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) толщиной 83 мм и фотоумножителей типа XR2972. Сцинтилляторы каждого детектора представляют собой усеченные шестигранные призмы высотой 85 мм. Вершина и основание призм имеют формы правильных шестигранников, вписанных в окружности диаметром 30 и 40 мм, соответственно. Сцинтилляторы спектрометра соединены между собой силиконовой смазкой, а BGO-кристаллы с фотоумножителями - специальным оптическим клеем, коэффициент преломления которого ($n = 1,8$) обеспечил оптимальное согласование с входным окном ФЭУ. Фронтальные и боковые стороны сцинтилляторов закрыты слоем алюминизированного майлара толщиной 50 мкм, что позволило достигнуть достаточно высокого коэффициента светосбора ($\cong 0,85$ по сравнению с MgO) наряду с компактностью всей сборки. В итоге зазор между боковыми гранями кристаллов для сборки из 19 детекторов составил $\leq 0,5$ мм, что соответствует неточности в определении угла $\Delta\theta \leq 0,1^\circ$ при расположении спектрометра на расстоянии 25 см от мишени.

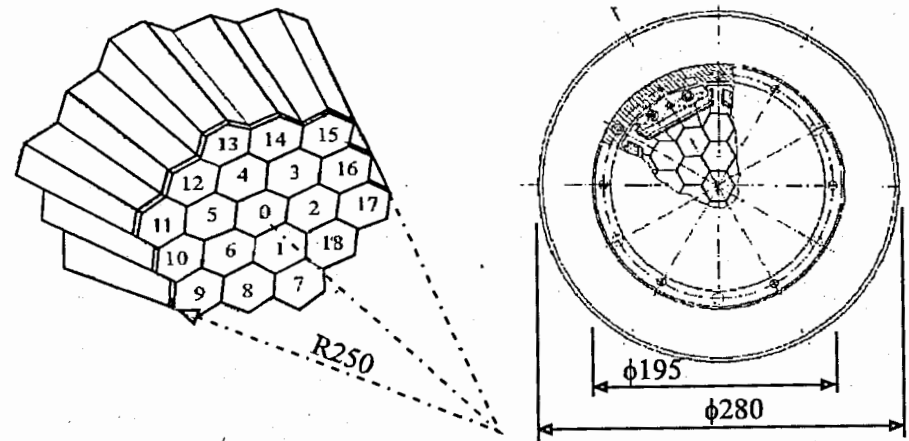


Рис. 2. Конструкция пластик-BGO-спектрометра

Это позволяет детектировать легкие заряженные частицы ($E \cong 70$ МэВ/А) с относительным импульсом порядка 0,3 МэВ/с. Толщина BGO-кристаллов выбрана из расчета полного поглощения легких заряженных частиц с энергией ≤ 230 МэВ/А. Коэффициент усиления фотоумножителей XR2972, линейный в широком динамическом диапазоне $1 \div 10^4$, позволяет регистрировать легкие заряженные частицы с $E < 1$ ГэВ/А. Типичное энергетическое разрешение детекторов спектрометра составляет 12% для гамма-квантов с $E_\gamma = 662$ кэВ от ^{137}Cs -источника, а временное разрешение - не хуже чем 1 нс. Вследствие быстрого действия пластиков и BGO-сцинтилляторов данные фосфич-детекторы выдерживают интегральную загрузку порядка 10^5 частиц в секунду. Основные характеристики детекторов приведены в таблице.

Идентификация частиц фосфич-детекторами основана на анализе формы суммарного сцинтилляционного импульса /4/, см. рис.3. В нашем случае интегрирование сигналов производилось в двух временных интервалах: $T_1 = 0; 50$ нс и $T_2 = 100; 600$ нс. Здесь первая цифра означает задержку относительно фронта нарастания сигнала, а вторая - длительность интервала интегрирования. Первый интервал соответствует быстрой компоненте суммарного сигнала, формируемой в основном импульсами от пластика, и тем самым содержит информацию об ионизационных потерях частиц в пластике.

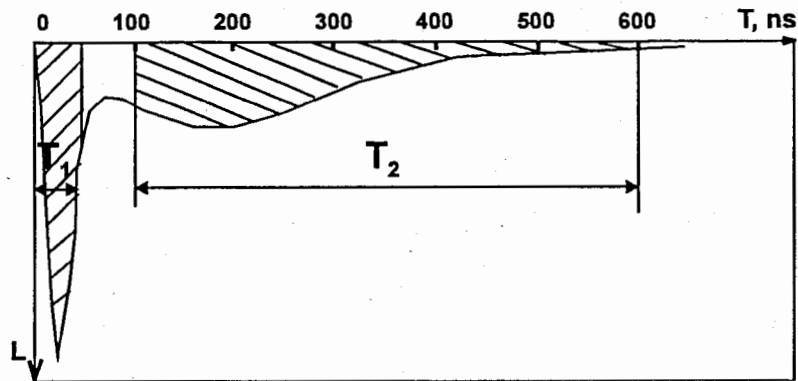


Рис. 3. Схема идентификации частиц фосфич-детектором

В интервале T_2 происходит интегрирование медленной компоненты от ВГО-считнителя, и в результате извлекается остаточная энергия частиц. Этим методом была получена надежная идентификация легких заряженных частиц по массе, заряду и энергии.

Таблица. Основные характеристики фосфич-детекторов годоскопа

NE102A (2 мм) + $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}(\text{Ce})$ (83 мм) + ФЭУ XP2972	19 шт.
E_{\min} регистрации протонов (прострел пластика), МэВ	16
E_{\max} регистрации протонов (прострел ВГО), МэВ	235
Энергетическое разрешение по γ -квантам ^{137}Cs , %	12
Энергетическое разрешение по протонам с $E_p=50$ МэВ, %	2
Временное разрешение Δt , нс	≤ 1
Диапазон измеряемых углов на расстоянии 25 см, град.	$0 \div 15.3$
Угол между центрами соседних модулей, град.	5.9
Телесный угол одного модуля, мср	9.4

2.2. Многопроволочная камера

Основное назначение камеры в установке МУЛЬТИ - обеспечение хорошего трехмерного позиционного разрешения легких заряженных частиц (не хуже чем 1 мм). Данное требование было выполнено благодаря специальной конструкции многопроволочной камеры в сочетании с системой быстрого считывания и оцифровки информации.

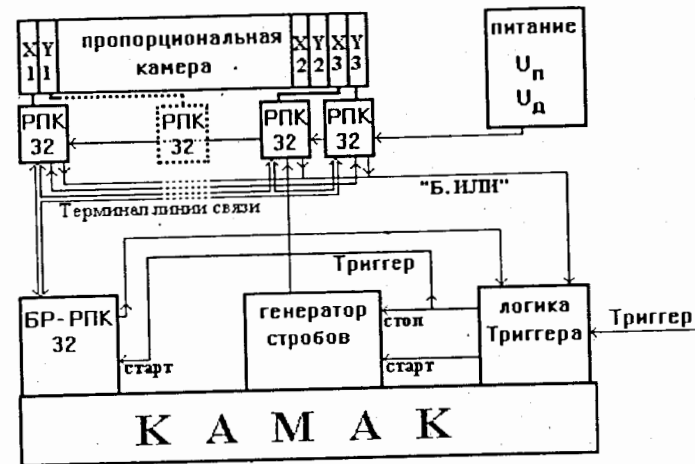


Рис. 4. Схема многопроволочной пропорциональной камеры

2.2.1. Характеристики камеры

Камера (рис.4) представляет собой систему многопроволочных координатно-чувствительных пропорциональных камер (МПК), состоящую из шести сигнальных плоскостей, разделенных газовым промежутком. Дополнительно к позиционному разрешению камера позволяет получить информацию об ионизационных потерях ЛЗЧ. Камера собрана в едином вакуумноплотном объеме цилиндрической формы с входными и выходными окнами диаметром 80 и 100 мм, толщиной 8 и 20 мкм соответственно. Длина камеры 440 мм. Сигнальные нити, изготовленные из позолоченной вольфрамовой проволоки толщиной 20 мкм, расположены с шагом 2 мм и формируют общее число каналов 256. Максимальный телесный угловой захват камеры равен 100 мср. Камера может работать при стационарном газовом наполнении без обновления газа в течение 15-20 часов. Рабочее давление газовой смеси $\text{Ar} + \text{CH}_4 + \text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$ может варьироваться в пределах $0,2 \div 2,0$ атм.

2.2.2. Система считывания информации

Система считывания информации с МПК организована на базе аналоговых блоков электроники (типа РПК-32), специально

разработанных в ОИЯИ /5/. На рис.4 схематично показана логика считывания информации, позволяющая использовать сигналы "быстрый ИЛИ" и формировать триггерный сигнал для всей установки МУЛЬТИ. В экспериментах по изучению двухчастичных корреляций камера может выполнять следующие функции:

- Выработка быстрого триггера для фосфич-спекрометра при условии срабатывания всех шести плоскостей МПК. Это позволяет сильно подавить фон от нейтронов и гамма-квантов, а также от заряженных частиц, не достигших сцинтилляторов. Для протонов с энергией $E_p \leq 100$ МэВ ($dE/dx \geq 10$ кэВ/см) эффективность регистрации МПК близка к 100% при давлении $P=0,4$ атм. Таким образом система МПК обеспечивает быстрый триггерный сигнал на прохождении ЛЗЧ в газовом объеме толщиной < 30 мг/см².
- Выработка триггера второго уровня для отбора двухчастичных событий. Это важное свойство камеры обеспечивается специальным расположением трех координатных плоскостей, которые развернуты друг относительно друга на 30°. Испытания на прохождении электронов от источника ⁹⁰Sr показали, что уже на уровне двух плоскостей достигается отбор двухчастичных событий на уровне 90%.
- Временные характеристики МПК ($\Delta t < 30$ нс) в сочетании с сигналами от высокой частоты ускорителя позволяют сформировать надежную стартовую отметку, необходимую для времяпролетных измерений ЛЗЧ.
- Измерение координат (x,y,z) ЛЗЧ, определение их траекторий и углового раствора между коррелированными частицами с точностью не хуже чем 0,1°.

2.3. Электроника и система набора данных установки МУЛЬТИ

2.3.1. Электроника установки

Принцип работы электронной схемы показан на рис.5. Сигналы с анодов фотоумножителей после буферных повторителей через 50-метровые кабели поступают на аналоговые разветвители, после которых сигналы независимо передаются в мажоритарную схему совпадений (MCS), на зарядово-цифровые преобразователи QDC (FERA-4300) и на входы "стоп" преобразователей "время-код" (TDC).

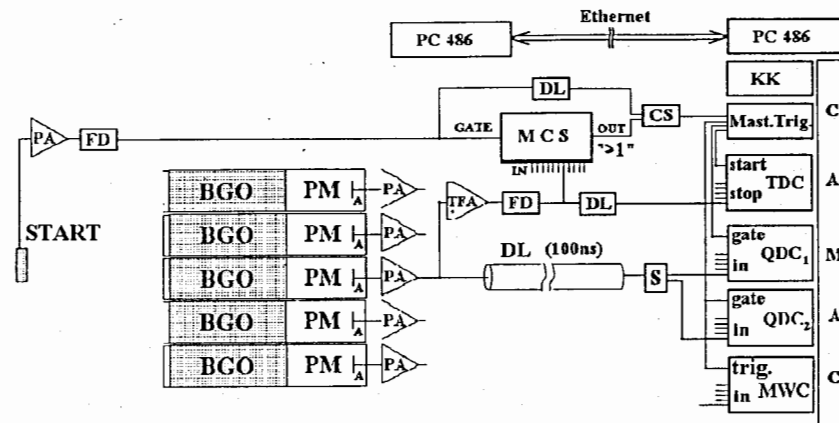


Рис. 5. Схема электроники установки МУЛЬТИ

Временные интервалы интегрирования для QDC, а также сигнал "общий старт" для преобразователей TDC вырабатываются блоком "Master Trigger" в том случае, если событие удовлетворяет условию триггера первого уровня и система сбора информации подготовлена для записи данного события. Триггер первого уровня реализован на мажоритарной схеме совпадений MCS, которая запускается сигналами от стартового детектора (Si-телескопа или МПК) и вырабатывает сигналы для запуска второй схемы совпадений (CS) при условии прихода импульсов от одного и более фосфич-детекторов в течение 50 нс. Таким образом сигналы второй схемы совпадений несут логическую нагрузку "сработало ≥ 1 фосфич-детекторов" и временную привязку к стартовому детектору.

2.3.2. Система набора данных

Набор и контроль экспериментальных данных осуществляется при помощи двух персональных компьютеров класса AT-486, один из которых подключен к крейту КАМАК. Программное обеспечение, специально разработанное для спектрометра, написано на языке Turbo Pascal и работает под управлением операционной системы MS-DOS или Windows-95. Программа обеспечивает:

- 1) считывание информации по шине КАМАК с записью на диск со скоростью до 0,2 Мбайт/с;

- 2) набор и быстрый просмотр как одномерных, так и двумерных спектров в процессе записи данных;
- 3) сжатие накопленной информации и запись ее в виде стандартных файлов в формате ZIP;
- 4) передачу информации по локальной сети типа Ethernet с использованием протокола IPX и запись данных на диск удаленного компьютера, а также возможность управления набором данных с удаленного компьютера через локальную сеть.

3. Результаты испытаний

Испытания установки (в варианте без МПК) проводились как с использованием первичного пучка тяжелых ионов ускорителя У-400М, так и на вторичном пучке радиоактивных ядер с целью проведения энергетической калибровки фосфич-детекторов и оптимизации метода идентификации ЛЗЧ.

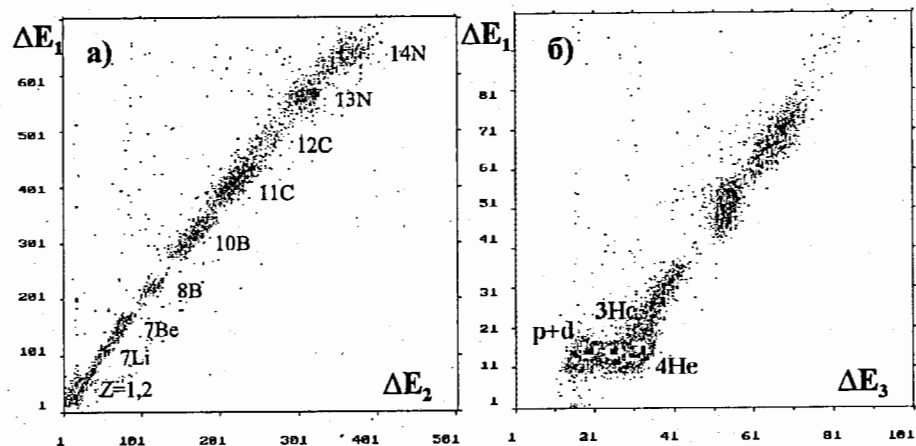


Рис. 6. Идентификация радиоактивных ядер из реакции $^{14}\text{N} + ^{181}\text{Ta}$ с помощью $\Delta E_1 - \Delta E_2$ (а) и $\Delta E_1 - \Delta E_3$ (б) телескопов

Для получения и транспортировки пучка радиоактивных ядер от изотопов водорода до изотопов азота использовался участок трассы ускорителя У-400М (канал вывода №4) на базе 35-градусных поворотных магнитов М2 и М3, подробнее см. работу /6/. Продукты

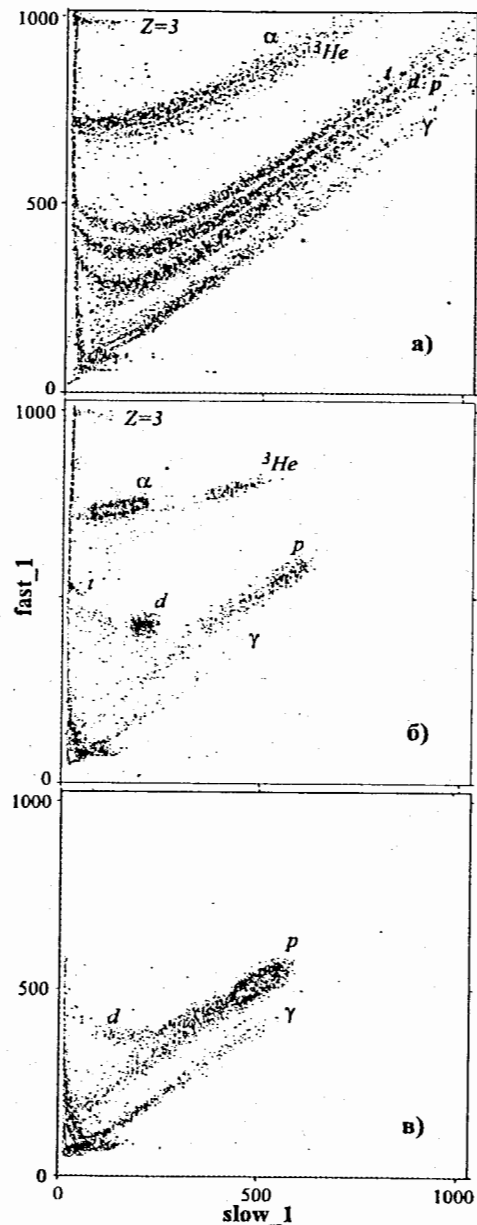


Рис. 7. Типичная идентификация легких заряженных частиц фосфич-детекторами для реакций $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$ (а) и $^{14}\text{N} + ^{181}\text{Ta}$ (б, в)

реакции фрагментации $^{14}\text{N}(51 \text{ МэВ/А}) + ^{181}\text{Ta}(840 \text{ мг/см}^2)$, сформированные как пучок радиоактивных ядер и идентифицированные с помощью полупроводниковых ($\Delta E_1 - \Delta E_2$)- и ($\Delta E_1 - \Delta E_3$)-телескопов, показаны на рис.6а,б. Фосфич-спектрометр располагался на расстоянии 50 см от сборки из трех Si(Au)-детекторов толщиной 180 мкм каждый. Перед телескопом была установлена диафрагма диаметром 10 мм, формирующая изображение пучка. Сцинтилляционный спектрометр позволял регистрировать заряженные частицы в диапазоне углов $0 \div 7.5^\circ$. Калибровка и качество идентификации частиц фосфич-детекторов осуществлялись двумя способами:

- 1) легкими заряженными частицами, вылетающими в реакции $^{14}\text{N}(51 \text{ МэВ/А}) + ^{27}\text{Al}$, когда первичный пучок бомбардировал толстую алюминиевую мишень, установленную на месте полупроводникового телескопа, см. рис.7а;
- 2) легкими заряженными частицами, сформированными как вторичный пучок при разных значениях магнитной жесткости канала, см. рис.7б,в. В этом случае однозначность идентификации ЛЗЧ дополнительно контролировалась полупроводниковым телескопом, как показано на рис.6б.

На рис.7 "fast" и "slow" соответствуют световыходам в интервалах T_1 и T_2 . Из этих данных были определены энергетические разрешения фосфич-детекторов и построены калибровочные кривые световыходов в зависимости от энергии частиц. Типичное энергетическое разрешение детекторов, полученное с учетом энергетических потерь в Si и в фольге выходного окна реакционной камеры (100 мкм майлар), составило 2,9% для протонов с энергией 30 МэВ.

Испытания показали, что выбранные интервалы интегрирования $T_1=0; 50 \text{ нс}$ и $T_2=100; 600 \text{ нс}$ позволяют получить надежную идентификацию ЛЗЧ фосфич-детекторами в широком энергетическом диапазоне $16 \div 140 \text{ МэВ/А}$. Нижняя граница диапазона определена пороговой энергией частиц, необходимой для прострела пластика толщиной 2 мм, а верхний предел обусловлен слабой зависимостью ионизационных потерь dE/dX в пластике при $E \geq 100 \text{ МэВ/А}$. В результате тестового эксперимента было установлено, что спектрометр позволяет проводить энергетические и угловые измерения легких заряженных частиц с массовой идентификацией до $Z=2$ включительно.

Заключение

Работа посвящена описанию основных характеристик новой многомодульной установки МУЛЬТИ и результатам первых испытаний установки на пучке ускорителя У-400М. Установлено, что фосфич-спектрометр обеспечивает необходимую изотопную идентификацию легких заряженных частиц и обладает достаточным энергетическим разрешением, чтобы проводить эксперименты по изучению малоугловых корреляций ЛЗЧ и исследованию редких мод распада протоноизбыточных радиоактивных ядер. Оснащение установки многопроводочной ионизационной камерой и многослойным полупроводниковым телескопом /7/ позволит проводить подобного рода эксперименты на качественно новом уровне.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность профессору Ю.Ц. Оганесяну за полезные советы и постоянный интерес к работе, коллективу ускорителя У-400М за предоставленное пучковое время.

Данная работа поддержана грантами РФФИ (проекты №95-02-05676-а, №96-02-17381-а, №95-02-05932) и целевым финансированием от Чешского комитета по коллаборации с ОИЯИ.

Литература

1. Boal D.H., Gelbke C.K., Jennings B.K., Rev.Mod.Phys. 62 (1990) 553
2. Negoita F. et al., Preprint GANIL P-9614, 1996
3. Merchiez F. et al., Nucl.Inst.and Meth. A275 (1989) 133
4. Fomichev A.S. et al., Nucl.Inst.and Meth. A344 (1994) 378
5. Акимова Г.Ф. и др., Препринт ОИЯИ, 13-84-308, Дубна, 1984
6. Fomichev A.S. et al., Proc.of the FOBOS Workshop 1994, Cracow, Poland (Ed.by W.Wagner) FZR-65, p.140
7. Амелин А.И. и др., ПТЭ №1 (1993) 69

Рукопись поступила в издательский отдел
15 октября 1996 года.