

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-256

P13-95-256

С.П.Авдеев, А.С.Зубкевич, В.А.Карнаухов, В.Карч\*,  
В.Д.Кузнецов, Л.А.Петров, В.К.Родионов, О.В.Бочкарев\*\*,  
Е.А.Кузьмин\*\*, Л.В.Чулков\*\*, Г.Б.Яньков\*\*

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЯДЕРНОЙ МУЛЬТИФРАГМЕНТАЦИИ ФАЗА

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

---

\*Институт ядерной физики им. Х.Ниеводничанского, Краков  
\*\*РНЦ «Курчатовский институт», Москва

1995

## Введение

В последнее время исследование процесса множественной эмиссии фрагментов промежуточной массы (ФПМ:  $3 \leq Z \leq 15$ ) вызывает значительный интерес как теоретиков, так и экспериментаторов.

Высоковозбужденная ядерная система, образующаяся при столкновении релятивистских частиц с ядром-мишенью, распадается преимущественно в результате мультифрагментации за очень короткие времена.

Для экспериментального изучения сложных динамических процессов эмиссии ФПМ необходимо создание таких установок, которые позволяют получать полную информацию об основных характеристиках испускаемых частиц. Реальная картина взаимодействия может быть восстановлена только на основании многопараметрических измерений на установках с геометрией, близкой к 4л.

В настоящее время в научных центрах действует около дюжины 4л-установок различной сложности, использующих, главным образом, пучки тяжелых ионов [1].

В этой статье мы описываем модернизированную 4л-установку ФАЗА, предназначенную для систематического изучения ядерной мультифрагментации мишени под действием релятивистских легких частиц (от протонов до ядер углерода), ускоряемых на синхрофазотроне (в ближайшем будущем на нуклотроне) ОИЯИ.

Описание первого варианта установки ФАЗА было приведено в публикации [2]. На установке получены новые интересные результаты по механизму "тепловой мультифрагментации" [3-4], существенно дополняющие данные из тяжелоионных столкновений.

## Конструкция и геометрия установки ФАЗА

Общий вид установки ФАЗА показан на рис.1. Механическую основу конструкции составляет металлический каркас диаметром около 1 м в виде додекаэдра, имеющего 12 граней для крепления десяти фланцев с детекторами и двух фланцев для размещения всей конструкции на оси пучка. Детекторы располагаются и на этих двух фланцах, за исключением центральных их частей, где проходит пучок через входную и выходную трубы. Входная труба имеет длину около 5 м для уменьшения рассеяния падающего пучка заряженных частиц на воздухе. Вся камера, включая входную и выходную трубы, находится под вакуумом  $\approx 5 \times 10^{-4}$  торр, обеспеченным турбомолекулярным насосом ТМН-500. Предусмотрена возможность поворота установки вокруг линии пучка для удобства монтажа.

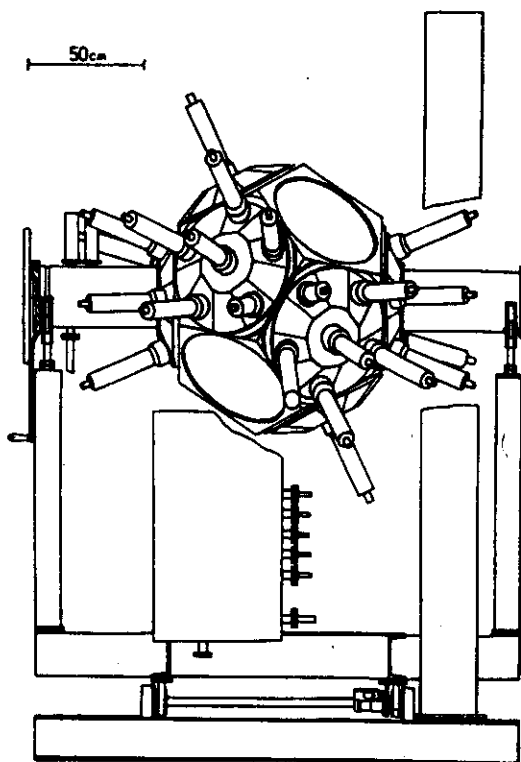


Рис.1. Общий вид установки ФАЗА

Каждый из монтируемых на фланцы детекторных модулей содержит шесть счетчиков, входной и выходной фланцы - по пять счетчиков. Таким образом, всего установка имеет 69 счетчиков (одно из мест занято под мишенное устройство).

Снятие и установка укомплектованных детекторных модулей ввиду значительного их веса (свыше 50 кг в первоначальном варианте) осуществляются с помощью специально сконструированной "механической руки", размещенной на общей с установкой ФАЗА платформе.

Большая часть телесного угла установки ( $\approx 3,6\pi$ ) охватывается детектором множественности фрагментов (ДМФ), который скомпонован из 64 сцинтилляционных счетчиков с пленочными CsI(Tl) [5], имеющих одинаковый телесный угол. Назначение ДМФ - регистрировать фрагменты с  $Z \geq 2$ , определять их множественность и направление вылета из мишени.

Установка включает в себя также пять телескопов-спектрометров (ТС) фрагментов. Их суммарный телесный угол составляет около  $2,4 \times 10^{-2} \pi$ . В состав ТС входят плоский многонитяной пропорциональный счетчик ( $\Delta E_1$ ), ионизационная камера с сеткой ( $\Delta E_2$ ) и поверхностно-барьерный полупроводниковый детектор (Е). ТС позволяет идентифицировать фрагменты по  $Z$  и определять их энергию. Каждый ТС служит триггером всей измерительной системы.

Все счетчики ДМФ взаимозаменяемы и могут располагаться в любой из 69 позиций для детекторов, в том числе и в местах размещения ТС.

Мишень из золота (фольга размером 60 x 60 мм и толщиной 1-2 мг/см<sup>2</sup>) располагается в центре вакуумной камеры под углом 45° относительно падающего пучка. Расстояние от ее центра до сцинтилляционных счетчиков равно 29 см. Мишень укреплена на четырех тонких (25 и 8 мкм) вольфрамовых нитях, которые, в свою очередь, натянуты на специальный U-образный держатель из плексигласа, причем две нити меньшей толщины использованы в центральной части мишени. Мишень может дистанционно выводиться из пучка без нарушения вакуума. Предусмотрено также введение в центр вакуумной камеры  $\alpha$ -источника из <sup>241</sup>Am для энергетической калибровки детекторов.

Источник нанесен электролизом на шарик из нержавеющей стали  $\varnothing 10$  мм.

### Телескопы-спектрометры

Телескопы-спектрометры предназначены для идентификации частиц  $\Delta E$ -Е-методом и состоят из трех частей: пропорционального счетчика, ионизационной камеры и полупроводникового детектора. Конструкция ТС представляет собой сплюснутый цилиндр, сделанный из нержавеющей стали толщиной 1,5 мм, с внешними поперечными размерами 135 x 90 мм и длиной около 300 мм. На рис.2 схематически изображено внутреннее устройство ТС, в нижней части которого располагается Si(Au)-детектор (Е) диаметром 60 мм. Общий рабочий объем ТС заполнен метаном при давлении 50 торр.

Первый газовый промежуток (10 мм) занимает многонитяной пропорциональный счетчик ( $\Delta E_1$ ), обе плоскости которого (63 x 50 мм) изготовлены из пленки медицинского коллодия ( $\approx 50$  мкг/см<sup>2</sup>), запыленной тонким слоем золота ( $\approx 50$  мкг/см<sup>2</sup>). Между пленками располагаются поочередно пять анодных и четыре катодных нитей из золоченого вольфрама диаметром 20 мкм. Катодные проволоки и обе поверхности счетчика заземлены. Напряжение анода 800 В.

Основной газовый объем предназначен для ионизационной камеры с сеткой. Камера, в свою очередь, разделена на две равноценные части, чтобы сократить время дрейфа электронов. Для этого в середине ТС параллельно более

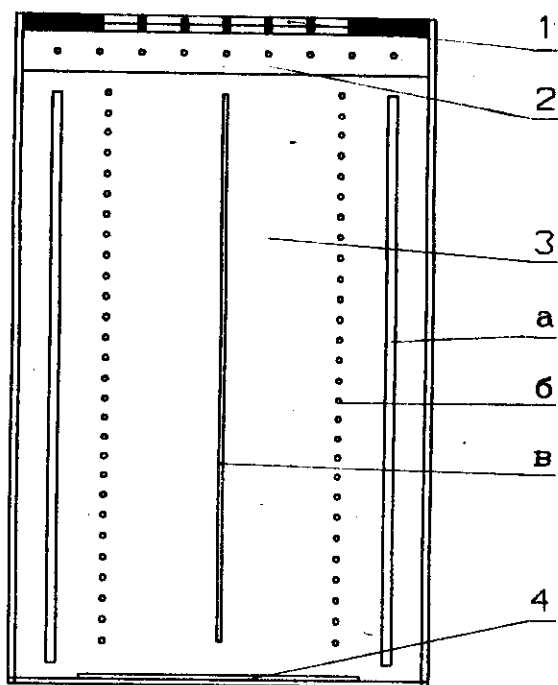


Рис.2. Схематическое устройство телескопа-спектрометра:  
 1 - входное окно с двумя опорными сетками  
 2 - многонитяной пропорциональный счетчик  
 3 - ионизационная камера: а) анод; б) сетка; с) катод

длинной стороне располагается общий для обеих частей камеры заземленный катод в виде пластины толщиной 1 мм и шириной 128 мм, а плоские аноды из полированной латуни толщиной 2 мм и шириной 74 мм размещены по обе стороны от катода в 35 мм от него у внутренней стенки камеры. Вблизи анодов, на расстоянии 9 мм от них, находится сетка. Она представляет собой натянутые поперек анодных пластин с шагом 3 мм нити из бериллиевой бронзы толщиной 100 мкм.

Длина ионизационной камеры (вдоль трека частиц) 95 мм. Анод и сетка находятся под напряжением 800 и 200 В соответственно. Остаточная энергия ( $E$ ) частиц регистрируется полупроводниковым поверхностно-барьерным детектором из кремния р-типа толщиной 1 мм, изготовленным в НПО "Радиевый институт" (С.-Петербург). Рабочий диаметр детектора 50 мм. Чувствительный слой детекторов равен 0,5 мм. Этого достаточно для полной остановки вылетающих из мишени фрагментов с  $Z > 3$ , однако высокоэнергичные  $\alpha$ -частицы и ядра лития не полностью теряют свою энергию, частично простреливая детектор.

Входное окно телескопа-спектрометра сделано из майларовой пленки толщиной 1,2 мкм, которая крепится между двумя опорными сетками из латуни

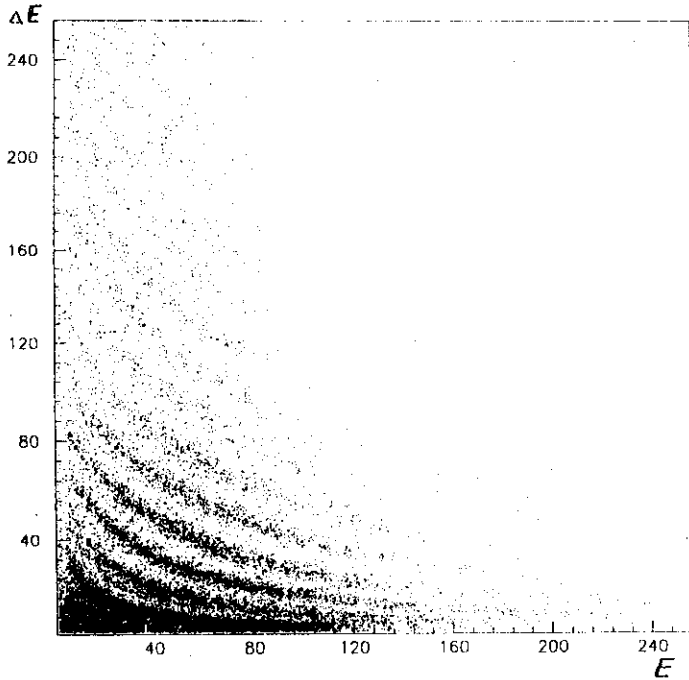


Рис.3а. Двумерный спектр  $\Delta E$ - $E$ , измеренный телескопом для реакции  $p(8 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$

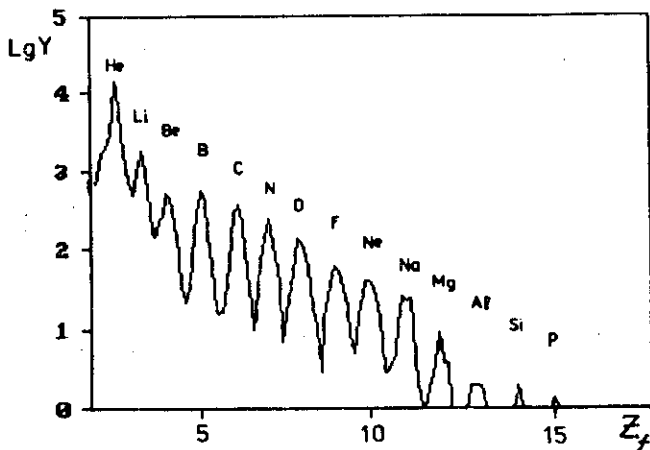


Рис.3б. Проекция на ось  $\Delta E$  после линейаризации двумерного спектра

толщиной 1,5 мм, каждая с отверстиями диаметром 4 мм. Прозрачность такой сетки составляет 68 %.

Импульс  $\Delta E$  брался с ионизационной камеры ( $\Delta E_2$ ), но запись событий ве-

лась лишь при появлении  $\Delta E_1$ - и  $E$ - сигналов. Таким образом, чтение записанных событий осуществлялось при наличии тройных ( $\Delta E_1$  - $\Delta E_2$  - $E$ ) совпадений. Введение тройных совпадений было необходимо для уменьшения фона, связанного с попаданием ореола пучка на стенки телескопа. На рис.3 представлен двумерный спектр  $\Delta E$ - $E$  фрагментов, полученный с помощью ТС, на пучке ядер углерода с энергией 3,6 ГэВ/нуклон. Четко видны локусы частиц с зарядами вплоть до  $Z=17$  (Cl). Разрешение по  $Z$ , таким образом, не хуже 6%. Из-за порога дискриминатора на рис.3 можно видеть лишь мягкую часть протонного спектра (зачерненная область).

Телескопы-спектрометры располагаются под пятью различными углами ( $24, 68, 87, -112$  и  $-156^\circ$ ) относительно линии пучка. Знак "-" означает, что данные ТС находятся по другую сторону от пучка. Телесные углы трех ТС равны  $1,24 \times 10^{-2}$  ср каждый. Два других ТС, расположенных ближе к оси пучка ( $24$  и  $156^\circ$ ), отодвинуты от мишени дополнительно на 100 мм, чтобы предотвратить касание их частицами пучка. Значение телесного угла для этих ТС -  $7,28 \times 10^{-3}$  ср.

#### Сцинтилляционные счетчики

Каждый из 64 счетчиков ДМФ состоит из тонкослойных ( $20-25 \text{ мг/см}^2$ ) сцинтилляторов CsI(Tl) большой площади ( $\approx 150 \text{ см}^2$ ), нанесенных по специальной технологии [5] на плексигласовые подложки толщиной 2 мм. Десять таких счетчиков имеют форму правильных пятиугольников, остальные - шестиугольники (рис.4). Поверхность сцинтилляторов покрыта тонкой пленкой (1,5 мкм) из алюминизированного майлара для предотвращения взаимной засветки счетчиков и увеличения амплитуды за счет улучшения сбора света. Световая вспышка от попадания в сцинтиллятор частиц транспортиру-

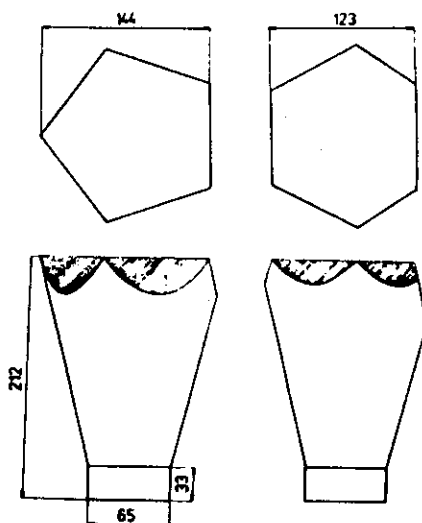


Рис.4. Формы сцинтилляторов CsI(Tl) и световодов

ется далее с помощью световодов на фотоумножители типа ФЭУ-110. Световоды состоят из двух частей (рис.4). Коническая их часть сделана из Al толщиной 2 мм. Широкая входная часть конуса ограничена таким образом, чтобы прикрепленные к конусу пластины из тонкой нержавеющей стали составляли форму шестиугольника или пятиугольника, соответствующую размерам сцинтилляторов. Эти пластины на краях имеют небольшие продолжения для механического закрепления сцинтилляторов на световодах. Вся поверхность световодов покрыта изнутри MgO для улучшения отражающих свойств.

Цилиндрическая часть световодов, непосредственно примыкающая к конической, выполнена, как и ранее, из полированного плексигласа. Эта часть обеспечивает оптический контакт с ФЭУ через светофильтр типа ЖС-18. Светофильтры служили для подавления черенковского излучения в желтой части видимого спектра, вблизи наиболее чувствительной области для фотокатода ФЭУ-110.

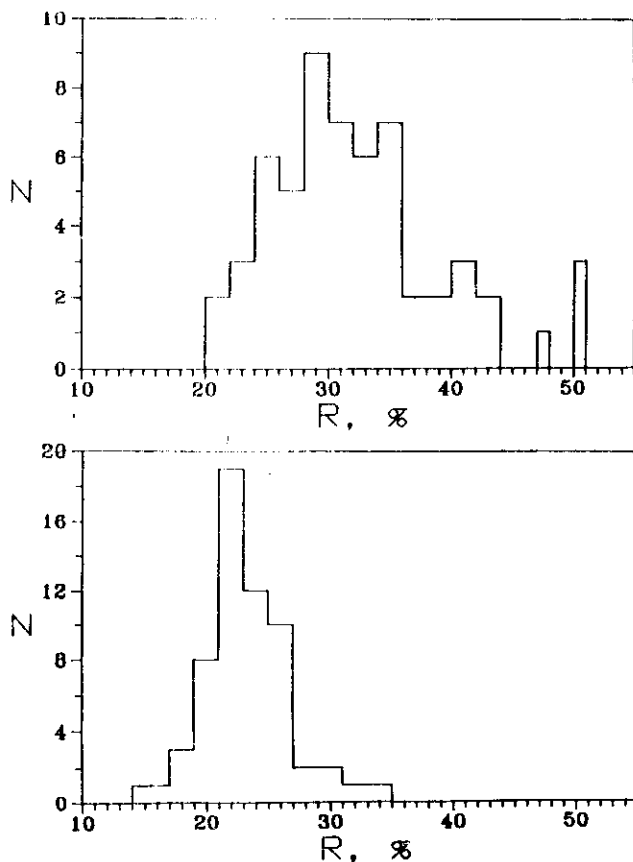


Рис.5. Распределения сцинтилляторов по амплитудному разрешению для  $\alpha$ -частиц из  $^{241}\text{Am}$ . Вверху - для сплошных световодов, внизу - для комбинированных световодов новой конструкции



На этих цилиндрических частях световода осуществлялось вакуумное уплотнение на корпус камеры. Для улучшения оптического контакта с обеих сторон светофильтры смазывались силиконовым маслом марки Baysilon M-1 000 000.

Комбинированные световоды новой конструкции в отличие от ранее использовавшихся сплошных плексигласовых [2] в меньшей степени являются источниками черенковского излучения. Кроме того, как показали измерения с  $\alpha$ -источником, сцинтилляторы с этими модифицированными световодами дают лучшее разрешение по сравнению со старым вариантом в среднем в 1,4 раза (от 32 до 23%), разброс величин разрешения для разных счетчиков относительно их среднего значения также значительно уменьшился (в 2,3 раза) (рис.5), улучшилась форма амплитудного спектра от  $\alpha$ -источника (пик стал более симметричным). Это результат существенного уменьшения зависимости амплитудного сигнала от места вспышки, благодаря использованию диффузного отражения в световодах.

Сборка из шести состыкованных друг с другом световодов со сцинтилляторами, один из которых (центральный) имеет пятиугольную форму, образовывала детекторный модуль. На рис.6 показан вариант одного из 12-ти таких модулей, когда в центре вместо сцинтилляционного детектора располагался ТС.

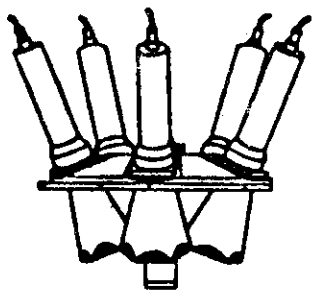


Рис.6. Один из 12-ти детекторных модулей установки ФАЗА

Выполненные на циклотроне РНЦ "Курчатовский институт" измерения световых выходов пленочных сцинтилляторов под действием пучков  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$  и  $^{14}\text{N}$  показали [5], что они подчиняются формуле Биркса, полуэмпирически выведенной на основе более ранних измерений с толстым кристаллом  $\text{CsI(Tl)}$  [6]. Таким образом, полученная нами зависимость световых выходов от  $Z$  и  $E$  частицы такая же, как и для хорошо исследованных монокристаллов  $\text{CsI(Tl)}$ . Это позволило, в свою очередь, рассчитать эффективность используемых поликристаллических тонкослойных сцинтилляторов для разных  $Z$  в зависимости от энергии частиц, что необходимо для восстановления истинного распределения фрагментов по множественности.

На рис.7 показана расчетная зависимость эффективности регистрации сцинтиллятором толщиной 20 мг/см<sup>2</sup> частиц с  $Z=1-8$  при амплитудном пороге, равном удвоенному значению амплитуды импульсов от  $\alpha$ -источника  $^{241}\text{Am}$ . В расчетах использована полуэмпирическая формула для спектров частиц, образующихся в процессе мультифрагментации Au-мишени, бомбардируемой  $\alpha$ -частицами [7]. Так как для  $Z \geq 5$  эффективность практически линейно пада-

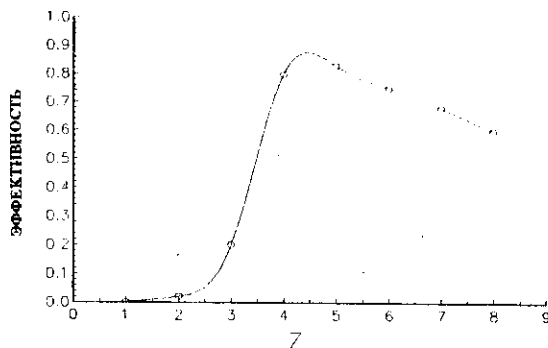


Рис.7. Расчетная зависимость эффективности регистрации фрагментов с зарядом Z сцинтиллятором толщиной 20 мг/см

ет с ростом Z, то для более тяжелых фрагментов применялись экстраполированные значения.

Важной характеристикой процесса мультифрагментации является распределение фрагментов по множественности.

С помощью ДМФ можно измерить так называемую ассоциативную множественность ФПМ, т.е. число одновременно зарегистрированных в событии срабатывающих сцинтилляционных счетчиков при обязательном попадании одного из фрагментов в ТС. Чтобы перейти от ассоциативной множественности к реальному распределению по множественности в событии, надо знать функцию отклика  $W(M_A, M)$ , которая дает вероятность регистрации  $M_A$  фрагментов, когда в детекторе было образовано  $M$  фрагментов. Для установки ФАЗА функция отклика имеет следующий вид:

$$W(M_A, M) = \frac{(M-1)!}{M_A!(M-1-M_A)} \epsilon P^{M_A} (1-P)^{M-1-M_A}$$

где  $P=N/72$ , N - число ФЭУ,  $\epsilon$  - средняя эффективность регистрации фрагмента одним ФЭУ.

Распределение по ассоциативной множественности  $W(M_A)$  получается из исходного  $W(M)$  путем суммирования с функцией отклика по всем фрагментам  $M$ :

$$W(M_A) = \sum_{M=M_A+1}^{\infty} W(M) W(M_A, M) M \quad (1)$$

Точный переход от распределения по ассоциативной множественности к распределению по множественности в событии математически очень сложен. Поэтому делается предположение о форме исходного распределения, и его правдоподобность проверяется путем сравнения экспериментальных данных с функцией, полученной по формуле (1). В результате этой процедуры получаются параметры "истинного" распределения по множественности в событии.

В связи с тем, что бомбардирующие мишень частицы сопровождаются протяженным гало быстрых вторичных частиц, предпринимаются усилия по отделению в ДМФ нужных событий от фоновых. Фоновые события связаны, в основном, со случайными совпадениями триггерных импульсов с черенковским излучением от взаимодействия релятивистских частиц с материалом сцинтилляторов, световодов и ФЭУ. Для уменьшения фона используется метод двойного стробирования импульсов. Триггерный сигнал вырабатывает главный строб длительностью 50 нс для интегрирования импульса ФЭУ в районе его максимума, а также второй строб, приходящий на 800 нс раньше первого и обеспечивающий интегрирование в области нарастания этого же импульса. На двумерном графике, изображающем амплитудное распределение импульсов от сцинтилляторов, проинтегрированных двумя способами (рис. 8), отчетливо видно разделение истинных событий и фоновых, полученное для обоих типов световодов (сплошных и комбинированных) при бомбардировке Au пучком  $\alpha$ -частиц с энергией 3,6 ГэВ/нуклон и интенсивностью  $5 \times 10^8$  частиц на сброс. Истинные события группируются около прямой линии, наклон которой определяется скоростью нарастания импульса CsI(Tl). Фоновые (случайные) события локализуются, в основном, выше истинных. Это связано с тем, что задний фронт импульсов существенно длиннее, чем передний, и чаще всего оба строба оказываются именно на нем. Такому случаю отвечает как раз меньшее отношение первого сигнала ко второму.

Количество случайных совпадений, оставшихся в "окне" истинных событий, невелико (3-10 %) и зависит от позиции конкретного счетчика. Для оценки величины этого фона применялась процедура поворота рассмотренного выше двумерного распределения таким образом, чтобы дорожка истинных событий стала перпендикулярной оси абсцисс. Проектируя далее на эту ось все события, получим четко выраженный пик, расположенный на пьедестале фоновых случайных совпадений, вклад которых теперь легко можно учесть. Фон случайных совпадений при использовании сплошных световодов был значительно выше соответствующего фона для комбинированных световодов новой конструкции. Так, например, для детектора, иллюстрирующего метод двойного стробирования (рис. 8), вклад фона составлял 15.2 и 1.2 % для разных типов световодов.

При усреднении данных по 56 счетчикам ДМФ (остальные 8, расположенные в непосредственной близости от оси пучка и имеющие значительно более высокий уровень фона, из анализа были исключены) получены следующие значения для величины фона: 10.4% - для сплошных световодов и 1.7% - для комбинированных. Следует заметить, что прямого сравнения этих величин делать нельзя ввиду использования различных реакций:  $C(3.6 \text{ ГэВ/н}) + Au$  - для сплошных световодов и  $p(8 \text{ ГэВ/н}) + Au$  - для комбинированных световодов.

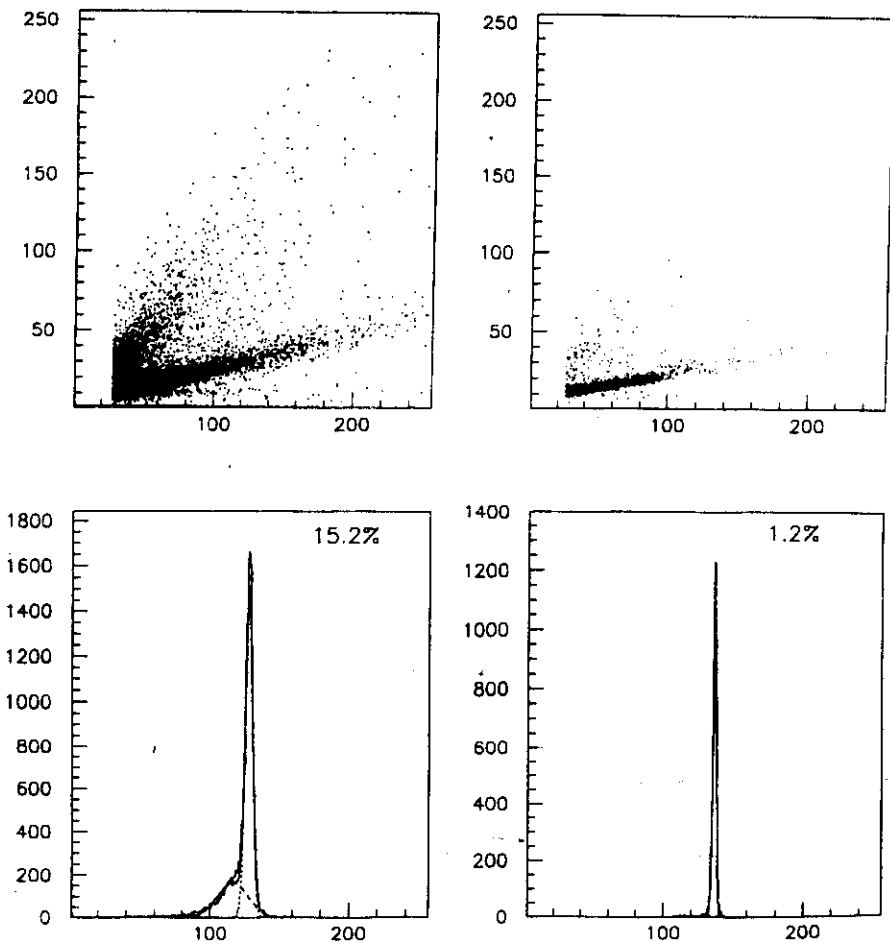


Рис. 8. Двумерные спектры амплитуд от одного из сцинтилляторов , полученные при различном стробировании , двух типов световодов. Вверху слева - для реакции  $C(3.6 \text{ ГэВ/н}) + Au$  (сплошной световод), вверху справа - для реакции  $p(8 \text{ ГэВ}) + Au$  (комбинированный световод). Внизу - соответствующие проекции двумерных спектров на ось X после их поворота (см. текст). Цифры указывают вклад фона

Однако при учете соответствующих сечений образования черенковских частиц можно оценить эффективность модифицированного световода по сравнению со старым вариантом. Если предположить, что весь наблюдаемый фон связан со случайными совпадениями, то использование световодов новой конструкции снижает этот фон в 10 раз.

## Сбор и анализ информации

Электронное оборудование и программное обеспечение установки ФАЗА описаны в [8]. Современная схема претерпела незначительные изменения. В основном, в той части, которая связана с заменой использовавшихся ранее времяпролетных телескопов на ТС новой конструкции и отсутствием в модифицированной установке большой позиционно-чувствительной лавинной камеры. Сбор и накопление экспериментальных данных, так же как и опрос систем КАМАК, производится с помощью мощной ПЭВМ типа AT486DX2-66 фирмы ZEOS (в настоящее время Pentium-90), работающей в on-line режиме. Оперативная память этой ПЭВМ - 64 Мбайт, два жестких диска имеют емкость по 1 Гбайт каждый. Данная ПЭВМ используется также для off-line обработки данных.

Каждое событие состоит из 178 байт информации об амплитудах в ТС и ДМФ и ряде признаков. В крейтах КАМАК имеется два буфера для предварительной записи информации с кодировщиков, рассчитанные на прием 46 событий каждый. За один "сброс" ускорителя (300 мс с периодом 10 с) можно записать и прочитать до 10 таких буферов, что соответствует 460 событиям. За один экспериментальный сеанс (около 100 часов работы ускорителя) обычно накапливается до 1 Гбайт информации.

Впоследствии информация с ПЭВМ обычно переписывается на магнитные ленты с помощью EXABYTE-8200. Основная машина позволяет также оперативно производить контрольное наблюдение за всеми одномерными спектрами, как со сцинтилляционных детекторов ДМФ, так и со счетчиков, составляющих ТС (ионизационные камеры и полупроводниковые детекторы).

Другая ПЭВМ типа AT486, соединенная с первой через кабель локальной сети, как правило, настроена на обработку больших массивов, а именно на получение любого двумерного спектра (как на рис. 3 и 8) по мере набора информации на диске основной ПЭВМ. Например, вывод на экран дисплея двумерных картинок от ТС ( $\Delta E-E$ ) с разрешением 256 x 256 точек может осуществляться одновременно со стандартной разверткой и в режиме "лупы", что удобно при контроле за качеством получаемых данных о триггерах установок. При необходимости вторая ПЭВМ может быть переключена для off-line обработки.

Инициализация блоков КАМАК (установка порогов дискриминаторов, задержек, усилений, ширины стробов и др., а также высокого напряжения для питания ФЭУ) производится с помощью еще одной ПЭВМ.

Авторы благодарят Ю.Т.Выдаю за изготовление пленочных сцинтилляторов  $\text{CsI(Tl)}$  большой площади, Е.А.Ганзу за предоставление полупроводниковых детекторов, С.И.Мерзлякова за разработку специализированного блока высоковольтного питания КП208, И.Н.Чурина за создание контроллера КП-012, В.А.Олькина за помощь при проведении модернизации установки ФАЗА.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 93-02-3755), Международным научным фондом (грант RFK000) и Европейским фондом INTAS (грант 94-2249).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Proc.Int.Conf. on New Physics with Advanced Techniques, Ierapetra, Greece, eds. F.A.Beck, S.Kossionides and C.A.Kalfas. World Scientific, Singapore, 1991.
2. Avdeyev S.P., Karnaukhov V.A., Kuznetsov W.D. et al.// Nucl.Instr.Meth. 1993. V.A332. P.149.
3. Lips V., Barth R., Oeschler H. et al. // Phys.Rev.Lett. 1994. V.72. P.1604.
4. Lips V., Barth R., Oeschler H. et al. // Phys.Lett. 1994. V.B338. P.141.
5. Авдеев С.П., Карнаухов В.А., Карч В. и др. // ПТЭ. 1993. Т.3. С.74.
6. Quinton A.R., Anderson C.E. and Knox W.J. // Phys.Rev. 1959. V.113. P.886.
7. Milkau U. // Dissertation, Universitat Frankfurt, GSI Report 91-34. 1991.
8. Авдеев С.П., Карнаухов В.А., Кузнецов В.Д. и др. // ПТЭ. 1993. Т. 3. С.104.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 июня 1995 года.