

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.075:621.374.3

ТРИГГЕР НА ОСНОВЕ АКТИВНОЙ МИШЕНИ
УСТАНОВКИ МИС ИТЭФ

© 2012 г. В. Н. Ноздрачёв, Т. С. Брантова*, О. П. Гаврищук**, Е. Н. Гушин***, А. П. Зайцев,
Ю. Д. Карпиков****, В. И. Лисин, В. К. Семёнов****.*****

ГНЦ РФ “Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Аликханова”

Россия, 117218, Москва, ул. Б. Черемушкинская, 25

**Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН*

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

***Объединенный институт ядерных исследований*

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

****Институт ядерных исследований РАН*

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

*****ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”*

Россия, 142281, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1

Поступила в редакцию 06.12.2011 г.

Использование кремниевого фотодетектора SiPM позволило создать компактную мишень из 16 активных элементов с измерением ионизации в каждом элементе. Точность однократного измерения ионизации позволяет в 90% случаев различать одноканальные и трехканальные сигналы. Создан спецпроцессор ЛЭ-80 с табличным методом выработки триггерных решений для формирования триггерного сигнала, которое осуществляется на программируемых логических интегральных схемах фирмы Altera. Время выработки триггерного решения спецпроцессором не превышает 80 нс. Экспериментально показана на большом статистическом материале возможность выделения реакций с нейтральными странными частицами.

1. ВВЕДЕНИЕ

Энергия ускорительного комплекса У-70 Института физики высоких энергий оптимальна для изучения возможных гибридных резонансных состояний, распадающихся с участием нейтральных странных частиц. Для надежного определения природы и механизма рождения этих состояний необходимо наблюдать в одном эксперименте максимально возможный набор мод распада. Установка координатного детектора на дрейфовых трубках позволила увеличить производительность установки МИС ИТЭФ [1], расположенной на канале 2А ускорителя, что повлекло за собой необходимость модернизации ее триггерной части. Для увеличения эффективности исследования редких процессов решено было использовать активную мишень, которая должна работать в относительно сильном рассеянном магнитном поле, что затрудняет использование обычных фотомножителей. Использовались кремниевые фотодетекторы SiPM (Silicon Photomultiplier). Необходимо было создать электронные блоки для амплитудного анализа сигналов этой мишени для организации триггера.

2. АКТИВНАЯ МИШЕНЬ УСТАНОВКИ МИС ИТЭФ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SiPM

Активная мишень необходима для определения продольной координаты (вдоль оси пучка) точки взаимодействия первичной частицы с материалом ядерной мишени, уточнения топологии события в режиме off line и для выработки триггера на взаимодействие частиц с изменением множественности вторичных частиц в режиме on line. Мишень располагается в сильном рассеянном магнитном поле (>100 Гс) магнитного спектрометра установки, что затрудняет использование обычных фотомножителей в ее конструкции.

2.1. Принцип действия мишени и ее конструкция

Активная мишень собирается из 16 пластин, изготовленных из сцинтиллятора. Свет, возникающий в сцинтилляторах при прохождении через них первичной частицы, регистрируется фотодетекторами. Сигналы с фотодетекторов оцифровываются по физическому триггеру установки. Место взаимодействия первичной частицы (номер пластины сцинтиллятора) определяется по превышению сигнала с фотодетектора над определен-

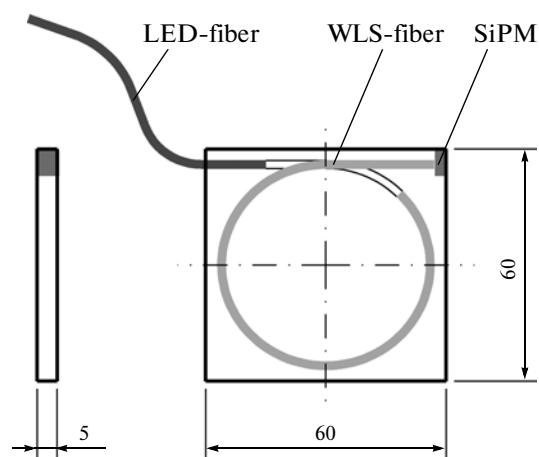


Рис. 1. Схема сцинтиляционного элемента активной мишени $60 \times 60 \times 5$ мм.

ным порогом. В качестве такого порога обычно выбирают 1–1.5–2 значения средней амплитуды сигнала от релятивистской частицы в сцинтиляторе (mir-сигнал). В качестве активного элемента мишени используется сцинтиляционный элемент ячеистого адронного калориметра, предполагается использование нескольких сотен тысяч элементов [2]. Элемент состоит из квадратной пластины сцинтилятора (размером $60 \times 60 \times 5$ мм) с переизлучающим оптическим волокном (WLS-fiber), уложенным в кольцевую канавку (рис. 1). Использовалось волокно фирмы Kuraray SCSF-78M.

К одному из торцов волокна (в объеме сцинтилятора) без оптического контакта пристыкован кремниевый фотодетектор (SiPM [3]) разме-

ром 1×1 мм. Для повышения эффективности светосбора напротив другого конца волокна расположен светоотражатель из алюминированного майлара. С такой же целью на больших гранях сцинтилятора установлены отражатели из алюминированного майлара, а узкие торцевые грани покрыты светоотражающим составом [4]. 16 описанных выше элементов набраны через 11 мм вставки из пенопласта (между пластинами) в одну сборку, которая помещена в пенопластовый цилиндр (рис. 2), размещаемый внутри охранного объема мишенной станции установки. Там же расположены два помещенных в экраны усилителя, сигнальные кабели, идущие от фотодетекторов, и волоконные световоды системы мониторинга.

2.2. Распадные счетчики

На расстоянии 400 мм по пучку (величина распадной базы) от последней пластины мишени установлены три распадных счетчика (рис. 3). В качестве распадных счетчиков использовались два штатных счетчика D_1 , D_2 (размером $200 \times 200 \times 10$ мм) нашей установки с длинными цилиндрическими световодами и один новый счетчик D_3 (дальний от мишени), расположенные в рассеянном магнитном поле. Конструкция D_3 была выбрана аналогичной счетчикам D_1 , D_2 . Размер сцинтилятора составлял $200 \times 200 \times 10$ мм, а диаметр окружности канавки для переизлучающего оптического волокна — 140 мм. В канавку (по ее глубине) вклеивались три витка волокна. Концы волокна выводились по касательной к окружности

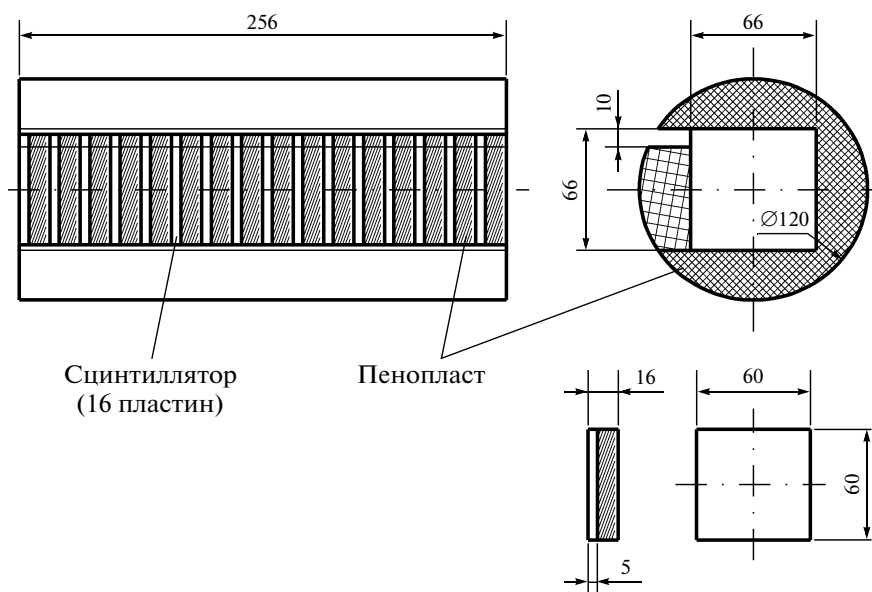


Рис. 2. Конструкция активной мишени.

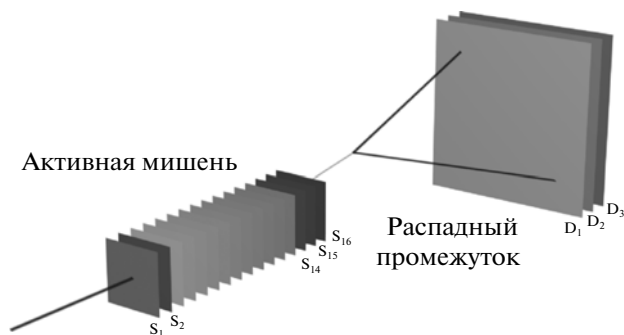


Рис. 3. Схема расположения активной мишени на пучке. S_1, S_2 – счетчики, выделяющие входную пучковую частицу; $S_{14}–S_{16}$ – вето-счетчики для выделения событий без заряженных частиц, вылетающих из мишени в направлении спектрометра; $D_1–D_3$ – распадные счетчики.

на параллельные грани сцинтиллятора. С помощью двух оптических разъемов к ним без оптического контакта пристыковывались два SiPM. Их суммарный сигнал составлял около 20 фотоэлектронов при регистрации космического мюона. После сборки счетчик D_3 оборачивался полимерной светоотражающей бумагой TYVEK и светоизолировался черной фотобумагой.

2.3. Тестирование элементов активной мишени по космическому излучению

Элементы мишени собирались в 4 группы по 4 штуки, каждая из которых тестировалась на космических лучах, выделяемых телескопом из двух счетчиков размером 4×4 см. Сигналы от всех 16 элементов мишени усиливались на штатных местах в усилителях и оцифровывались в аналогоцифровых преобразователях (АЦП). Шкала АЦП калибровалась в фотоэлектронах с помощью светодиода. Синий свет от одного ультрафиолетового светодиода волоконными световодами LED-fiber разводился на все элементы. Способ заведения светового сигнала в отдельный элемент показан на рис. 1. Эта система калибровки в дальнейшем использовалась для мониторинга мишени в процессе измерений на пучке частиц. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведены амплитудные спектры от светодиодов и от космических мюонов. Число фотоэлектронов в спектре от светодиода определялось по его относительной ширине в предположении о пуассоновском распределении. Питание кремниевых фотоумножителей осуществлялось рекомендованными значениями напряжений или с небольшими их вариациями (при необходимости). В результате проведенной калибровки шестнадцати элементов мишени сигналы от космических мюонов в среднем составляли 9.5 фотоэлектронов с разбросом около 20%.

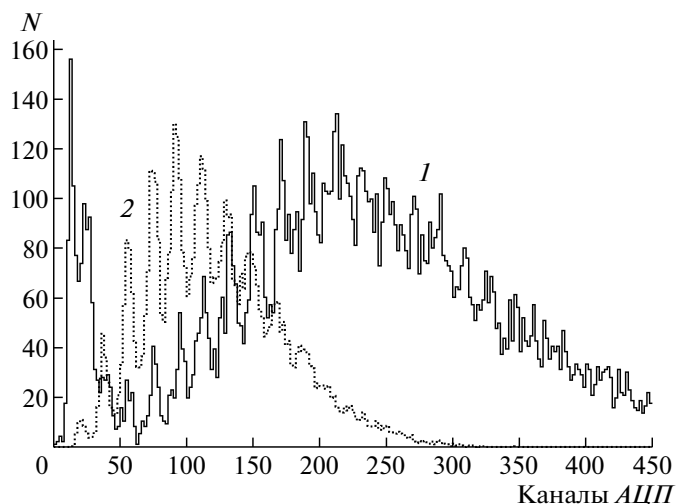


Рис. 4. Амплитудные спектры элемента активной мишени: 1 – спектр от релятивистских частиц однократной ионизации с широким максимумом в каналах АЦП около 200 и пиком около 20, соответствующим шумовым сигналам; 2 – спектр от светодиодов с широким максимумом около 100.

После установки активной мишени на штатное место в установке МИС ИТЭФ и при эксплуатации на пучке частиц выбранные режимы питания кремниевых фотоумножителей больше не изменялись.

2.4. Организация триггерной электроники активной мишени установки МИС ИТЭФ

Для организации триггера для 6-метрового спектрометра в ИФВЭ Ю.Д. Карпековым в стандарте МИСС (многоканальная информационная скоростная система) на основе модуля ЛЭ-76 [5] был разработан блок триггерного процессора ЛЭ-80 (рис. 5). Из 19 сигналов, описанных выше, в выработке триггера используются только 8, объединенные в три группы: 2 сигнала от первых двух счетчиков по пучку, 3 сигнала от счетчиков в конце мишени и 3 сигнала от счетчиков после распадного промежутка. В каждой из групп амплитуды сигналов используются для оценки числа частиц в данном месте установки.

Амплитуда каждого из 8 входных сигналов (рис. 6) оцифровывается 8-битным flash-АЦП. Два канала из 8 сразу же используются для выработки двух однобитных предварительных внутренних сигналов. Остальные 6 каналов объединяются в две группы по 3 канала, в каждой из которых сначала осуществляется программируемое преобразование 8 бит в 5 бит. Полученные 15 бит используются для адресации программируемой таблицы принятия решений MLT, на выходе которой формируется 8 независимых претриггерных сигнала.

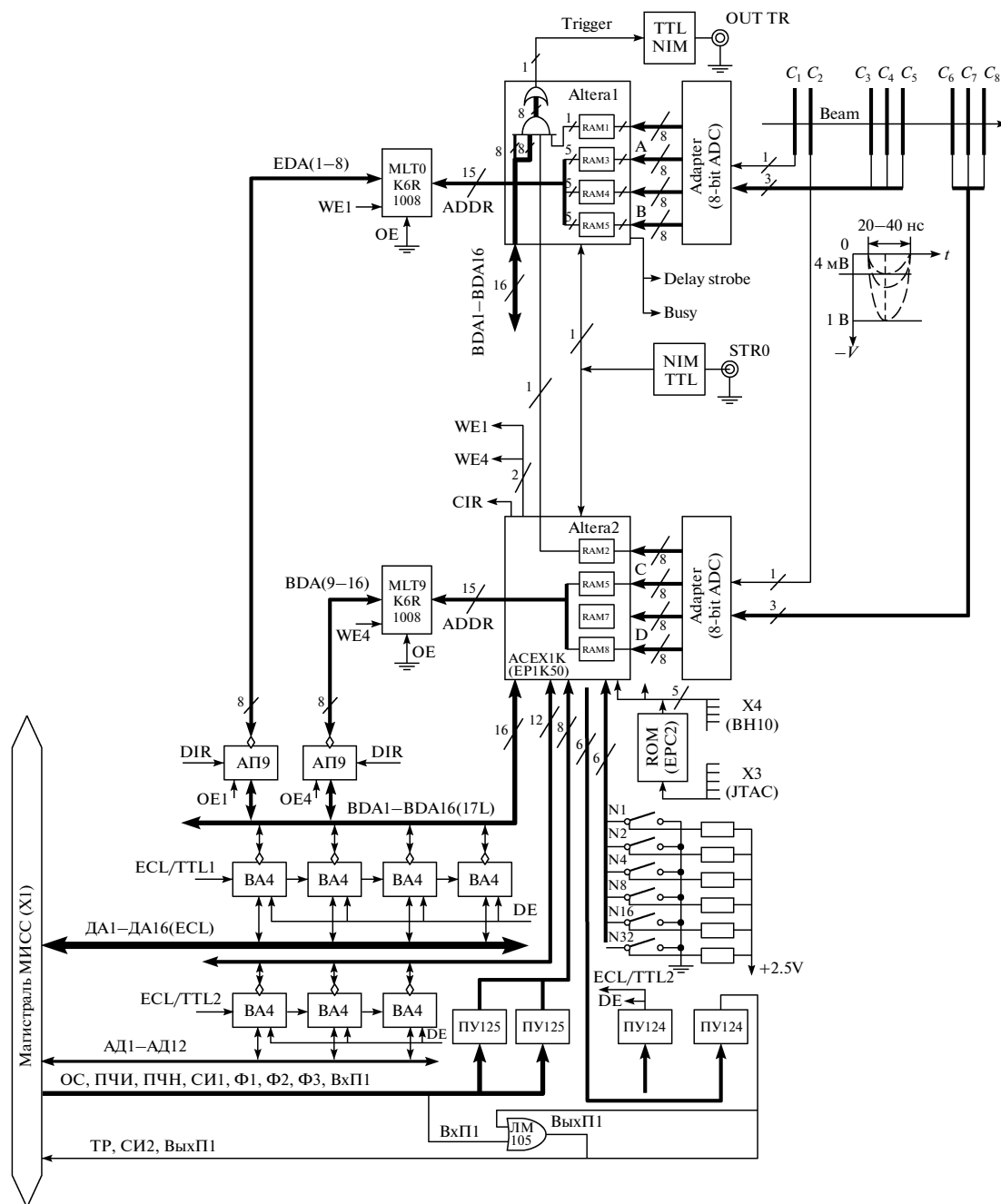


Рис. 5. Схема блока ЛЭ-80, разработанного в ИФВЭ для эксперимента СЕРП-Е-185 (<http://www.ihep.ru>). Блок предназначен для выработки в реальном времени триггера на основе амплитудного анализа 8 входных сигналов. Задержка выработки триггерного сигнала не более 80 нс. Блок выполнен в стандарте МИСС и может быть перепрограммирован в процессе эксперимента для выработки до 8 независимых триггерных условий, связывающих входные сигналы. Амплитуды входных сигналов и код триггера сохраняются в памяти блока и могут быть прочитаны по магистрали МИСС. Предусмотрена возможность программирования MLT через магистраль МИСС с помощью блоков ЛЭ-83 и адаптера PCI-Qbus.

лов. При совпадении сигналов из первых двух каналов и обеих претриггерных групп вырабатывается триггерный сигнал, 8-битный код которого сохраняется в регистре блока и может быть прочитан по магистрали МИСС в любое время после

триггера вместе с 8-битными амплитудами по всем 8 каналам.

Оцифровка сигналов остальных, не участвующих в триггере, счетчиков (рис. 7) проводилась во втором блоке ЛЭ-80. Анализ амплитуд в режиме

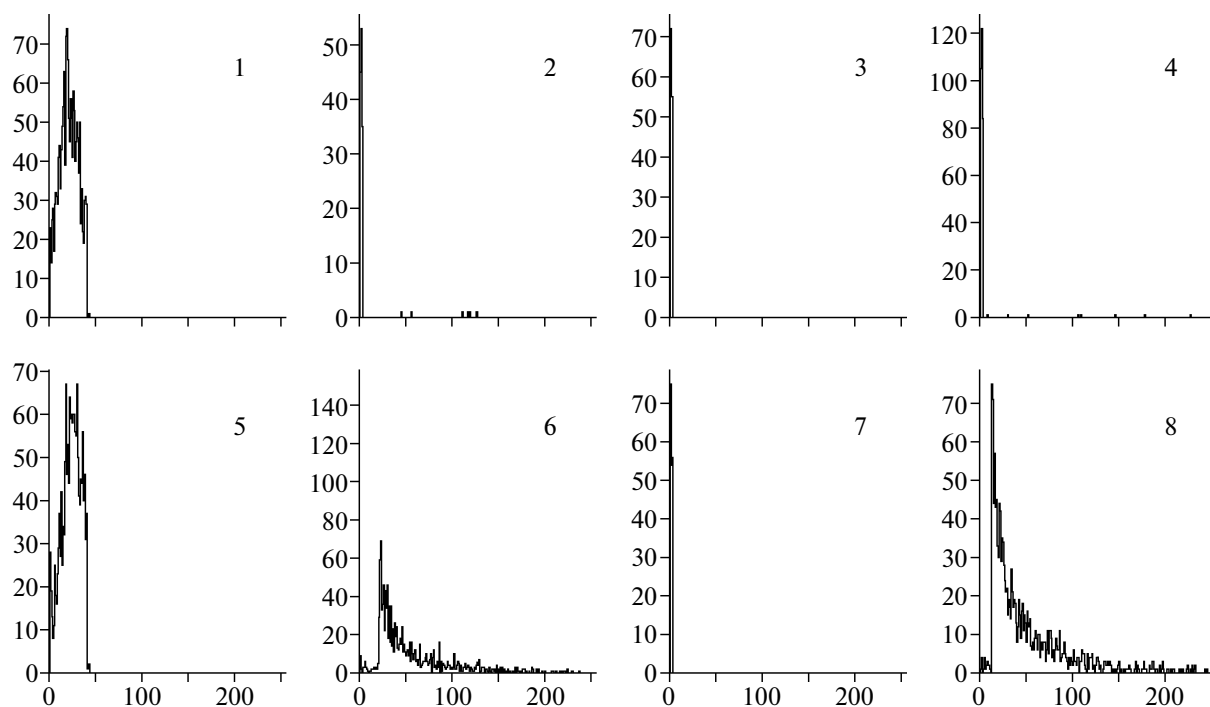


Рис. 6. Распределение оцифрованных 8-битным АЦП амплитуд входных сигналов триггерного блока ЛЭ-80, перепрограммированного для триггера с выделением распадов нейтральных странных частиц. Каналы 1 и 5 выделяют однократную ионизацию входящей пучковой частицы, в каналах 2–4 запрограммировано отсутствие заряженных частиц, в каналах 6 и 8 требуется амплитуда сигнала выше некоторого порога.

off line позволяет определить наиболее вероятную продольную координату первичной вершины взаимодействия. Для всех счетчиков до вершины значение амплитуды будет соответствовать однократной ионизации, а после – трехкратной. Номер счетчика, в котором была впервые зарегистрирована трехкратная ионизация, позволяет судить о положении вершины взаимодействия.

Эксперимент проводится на протонном или пионном пучке с интенсивностью $2-3 \cdot 10^6$ частиц/с. На пучке проводилась настройка всех элементов активной мишени и распадных счетчиков. Кратко (подробно выбор рабочих режимов будет описан в отдельной статье) основные этапы настроечной процедуры следующие:

- измерение зависимостей, аналогичных “кривым задержанных совпадений”;
- коррекция усиления в каждом канале регистрации в соответствии с диапазоном измеряемых амплитуд сигналов;
- калибровка каналов в числе фотоэлектронов (для последующего мониторинга во времени).

После этого набирались спектры, по которым выбирались области амплитуд сигналов, соответствующие триггерным условиям. Для каждой группы из трех счетчиков по этим областям определялось подмножество адресов в таблице принятия

решений (MLT на рис. 5) для записи кода триггерного условия. Каждый раз перед началом набора статистики эти таблицы заполнялись через магистраль МИСС. Триггер нулевого уровня вырабатывает строб-сигнал стандарта NIM для электронных схем активной мишени со средней частотой порядка 100 кГц. Информация об амплитудах сигналов первой группы используется для отбора событий с одной и только одной частицей на входе в мишень.

Сигналы второй группы должны соответствовать событиям, где на выходе мишени:

- 1) нет ни одной частицы;
- 2) есть только 2 частицы;
- 3) есть 3 и более частиц.

Сигналы третьей группы должны соответствовать событиям, где в трех пластинах, установленных за мишенью после распадной базы:

- 1) есть 2 и более частиц;
- 2) есть 4 и более частиц;
- 3) есть 5 и более частиц.

В случае одновременного выполнения первого условия для сигналов второй группы и первого условия для сигналов третьей группы должен вырабатываться сигнал нейтрального триггера. Триггер также должен вырабатываться при одновременном

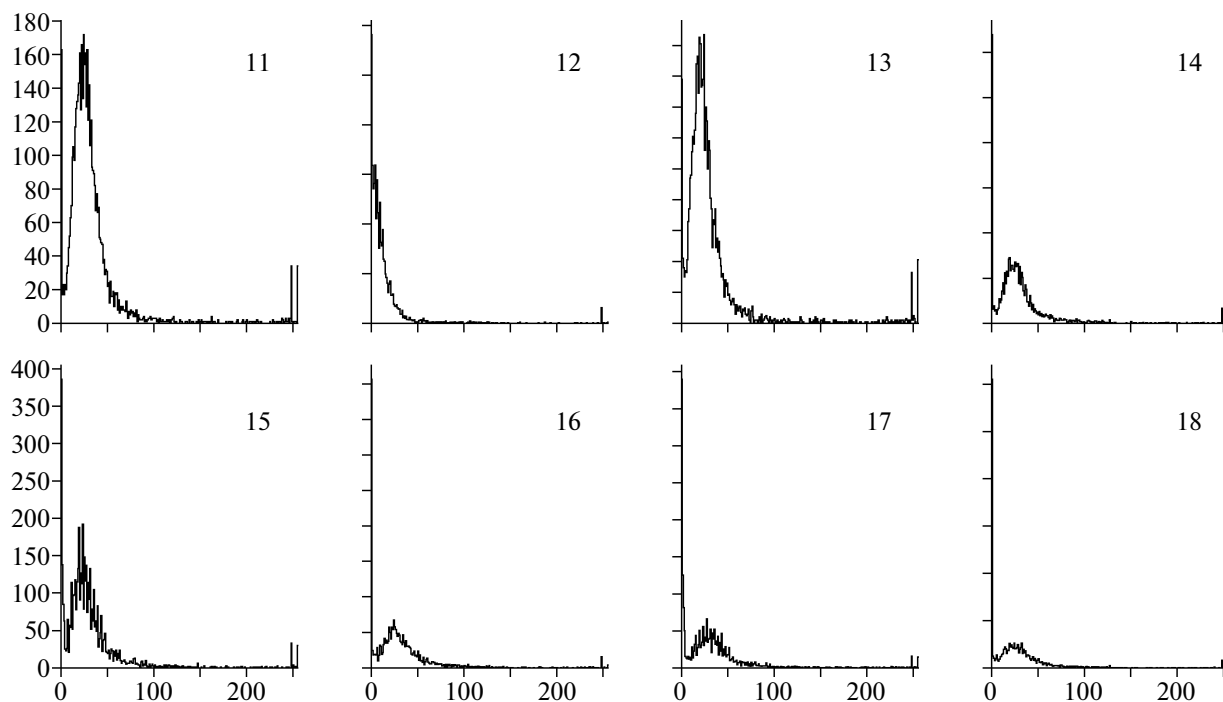


Рис. 7. Распределение оцифрованных амплитуд входных сигналов триггерного блока ЛЭ-80 без отбора событий. Эти сигналы в каналах 11–18 можно использовать для определения продольной координаты первичного взаимодействия в мишени.

выполнении вторых, третьих и т.д. условий для обеих групп (с изменением множественности). Всего возможно использовать не более 8 типов триггеров. Время выработки триггерного сигнала не превышает 80 нс.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ТРИГГЕРА

С 25 ноября по 5 декабря 2010 года на установке МИС ИТЭФ (канал 2А) был проведен сеанс с набором статистики для исследования реакции $\pi^- p \rightarrow K_s^- K_s^0 X^*$. Основной целью сеанса была проверка возможности проведения эксперимента по поиску узких резонансов в системе $K_s^- K_s^0$. На проведение эксперимента на установке МИС ИТЭФ были выделены 44 смены времени ускорителя, для работы были использованы 43 смены, из них 32 на набор статистики с включением магнита СП-130. За время набора статистики на мишень 24/3 канала 2А сбрасывалось от $3 \cdot 10^{11}$ до $7 \cdot 10^{11}$ протонов за цикл ускорителя. Всего за время работы в канал 2А было выведено около $4 \cdot 10^{10}$ π^- -мезонов с энергией 30 ГэВ. Это позволило отобрать с помощью триггера, использующего активную мишень, и записать для последующего анализа 8.4×10^6 событий. Амплитудный анализ сигналов с 16-ти элементов активной мишени позволял выделять события с одной заряженной частицей на входе в мишень, одновременным отсутствием за-

ряженных частиц на выходе из мишени и появлением двух или более частиц после распадного промежутка 40 см за мишенью. Пары треков различных знаков экстраполировались в район мишени. Точка, наиболее близкая к пересечению этих треков, считалась вершиной V_0 распада нейтральной частицы на две заряженные. Определялись кинематические параметры этих треков и сопоставлялись с 4 типами вершин — K_s^- -мезона, Λ , анти- Λ и пары e^+e^- от конверсии γ -кванта. На распределении в переменных α , p_{\perp} , не зависящих от масс заряженных частиц, на рис. 8 видны сигналы, соответствующие всем четырем типам V_0 . На рис. 9 представлено двухмерное распределение всех событий с двумя треками разного знака по эффективной массе пары $\pi^+\pi^-$ и продольной координате V_0 , характеризующее эффективность используемого триггера. Большая часть событий, соответствующая массе K_s^- -мезона, сосредоточена в распадном промежутке от -155 до -115 см. События с вершинами от -180 до -155 см соответствуют парам треков от звезд, рождающихся на веществе мишени, а в районе -120 см — на веществе распадных счетчиков.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование кремниевого фотодетектора SiPM позволило создать компактную мишень из

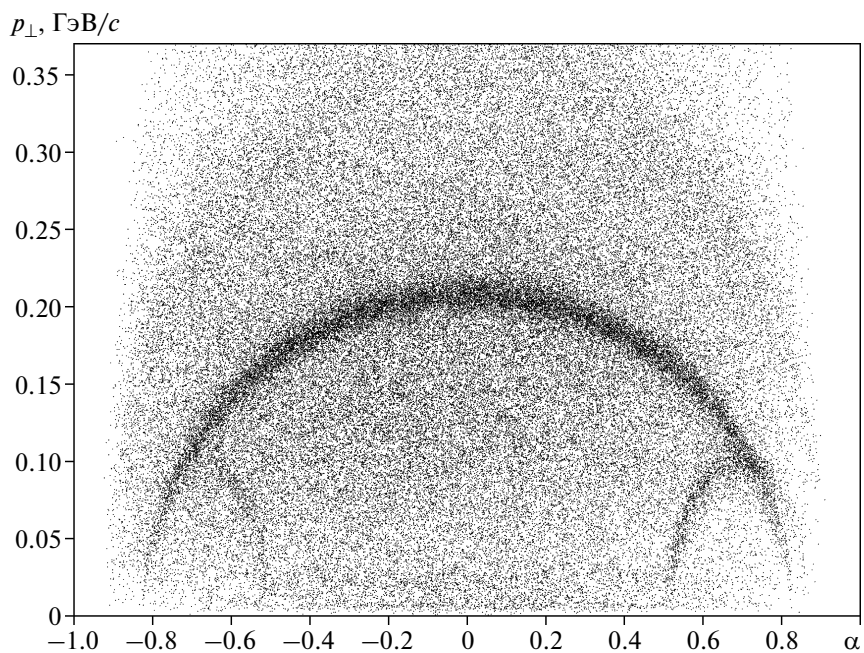


Рис. 8. Распределение событий по кинематическим переменным p_{\perp} , $\alpha = (p_+ - p_-)/(p_+ + p_-)$. Сигнал с максимальным поперечным импульсом 0.206 $\text{ГэВ}/c$ соответствует распадам K_S^0 -мезонов, в правой части рисунка – Λ -гиперонов, а в левой – анти- Λ .

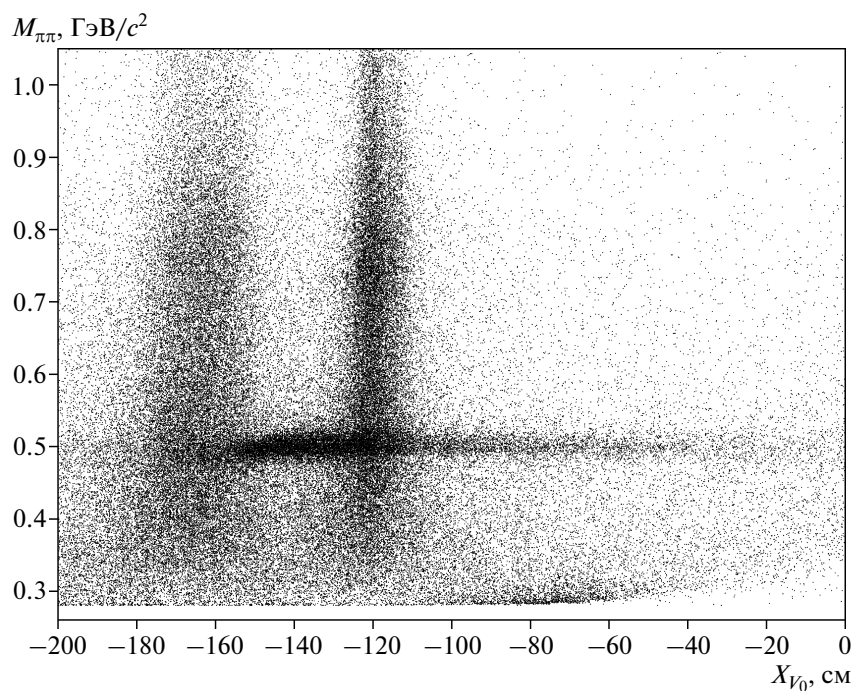


Рис. 9. Распределение всех событий с двумя треками разного знака по эффективной массе пары $\pi^+\pi^-$ и продольной координате V_0 . Большая часть событий, соответствующая массе K_S^0 -мезона, сосредоточена в распадном промежутке от -155 до -115 см .

16 активных элементов с измерением ионизации в каждом элементе. Точность однократного измерения ионизации позволяет в 90% случаев различать однотрековые и трехтрековые сигналы.

Одновременное измерение трех таких счетчиков позволяет использовать такую мишень в триггере для выделения событий с множественностью ≥ 3 . Остальные счетчики можно использовать для по-

следующего определения продольной координаты вершины взаимодействия. Мишень испытана в 50-ГэВ протонном и 30-ГэВ пионном пучках с интенсивностью до $2-3 \cdot 10^6$ частиц/с. Коэффициент подавления непроизводивших частиц пучка лучше 1000.

Работа была частично поддержана РФФИ (грант № 08-02-00501-а).

Авторы признательны руководству ГНЦ ИФВЭ за поддержку в проведении исследований, персоналу ускорительного подразделения и Отдела пучков за эффективную работу У-70 и канала 2А. Авторы благодарны М.В. Данилову и И.Г. Алексею за постоянное внимание к работе,

Ю.В. Катинову, В.Ю. Русинову, Е.Н. Тарковскому и В.А. Канцерову за помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nozdrachev V.N.* // Proceedings HADRON2001 (Труды IX международной конференции по адронной спектроскопии). Protvino, 2001. P. 155.
2. *Rusinov V.* // Nucl. Phys. B. 2006. V. 150. P. 253.
3. *Георгиевская Е.А., Клемин С.Н., Филатов Л.А. и др.* // Прикладная физика. 2003. № 2. С. 123.
4. *Дурум А.А., Кочетков В.И., Макеев В.В. и др.* Препринт ИФВЭ 99-6. Протвино, 1999.
5. *Иванова Н.С., Карпиков Ю.Д., Сенько В.А., Якимчук В.И.* // ПТЭ. 2008. № 3. С. 61.