

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С 344.1 ж + С 344.1 с + С 344.1 ч
Б-648

1 - 7307

3737/2-73

В.К.Бирулев, А.С.Вовенко, Т.С.Григалашвили,
Б.Н.Гуськов, И.М.Иванченко, И.Н.Какурин,
В.Д.Кекелидзе, В.Г.Кривохижин, В.В.Кухтин,
М.Ф.Лихачев, А.Н.Морозов, И.А.Савин,
Ю.И.Саломатин, А.Е.Сеннер, В.Е.Симонов,
Л.В.Сильвестров, П.Т.Тодоров

ДЕТЕКТОР ЭЛЕКТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
С K^0 -МЕЗОНАМИ

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1 - 7307

В.К.Бирулев, А.С.Вовенко, Т.С.Григалашвили,
Б.Н.Гуськов, И.М.Иванченко, И.Н.Какурин,
В.Д.Кекелидзе, В.Г.Кривохижин, В.В.Кухтин,
М.Ф.Лихачев, А.Н.Морозов, И.А.Савин,
Ю.И.Саломатин, А.Е.Сеннер, В.Е.Симонов,
Л.В.Сильвестров, П.Т.Тодоров

ДЕТЕКТОР ЭЛЕКТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
С K^0 -МЕЗОНАМИ

Направлено в ПТЭ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

1. Введение

В течение 1970-1972 г.г. на серпуховском ускорителе был выполнен ряд экспериментов по изучению регенерации нейтральных каонов ^{1,2/}. Установка, с помощью которой выполнялись эти эксперименты, представляла собой бесфильмовый искровой спектрометр /рис. 1/, работавший на линии с ЭВМ ^{3/}.

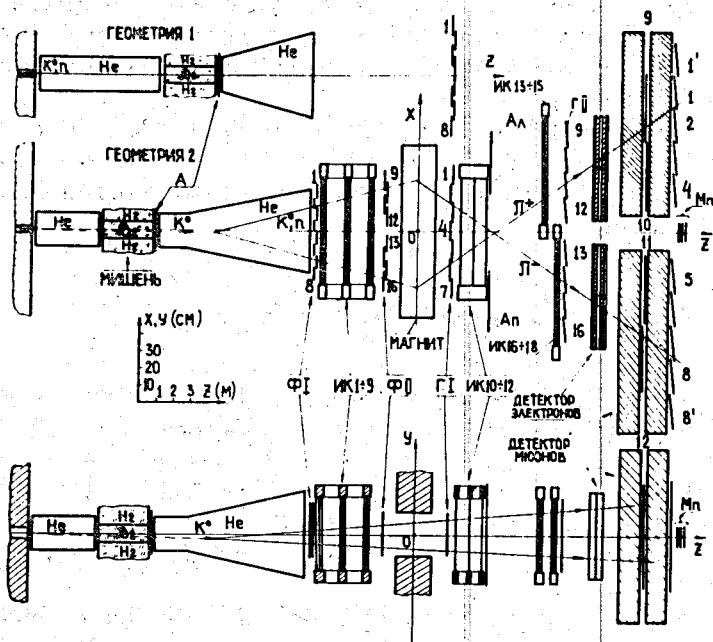


Рис. 1. Схема спектрометра-детектора распадов нейтральных каонов.

В состав спектрометра входил детектор электронов, предназначенный для выделения КЕЗ-событий из всех зарегистрированных установкой распадов: $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- / \text{КП2} /$, $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \mu^- \nu / \text{КМЗ} /$, $K_L^0 \rightarrow \pi^+ e^- \nu / \text{КЕЗ} /$, $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 / \text{КПЗ} /$. Детектор состоял из счетчиков полного поглощения типа "сэндвич", в которых развивались и регистрировались лавины, вызванные взаимодействием электронов и пионов в свинце. Вследствие различия механизмов взаимодействия этих частиц со свинцом в сцинтилляторах выделялось разное количество света. Свет регистрировался фотомножителями, спектр сигналов которых от электронов и пионов разделялся. Величина сигналов детектора, соответствующая каждому зарегистрированному установкой событию, записывалась на магнитные ленты /МЛ/ и использовалась для идентификации КЕЗ-распадов при обработке данных вне линии связи с ЭВМ.

Идентификация КЕЗ-распадов необходима при проведении регенерационных экспериментов ^{11/} для вычитания фона среди событий - кандидатов в КП2, а также для проведения самостоятельных исследований энергетической зависимости формфакторов, описывающих матричные элементы КЕЗ-распадов.

Ниже приводится описание детектора электронов, его настройки, калибровки на пучке электронов и характеристик, полученных с помощью вторичных частиц от распадов каонов.

2. Конструкция детекторов

В состав детектора входило 8 ливневых блоков. Каждый блок был собран из 10 пластин сцинтиллятора размером $55,6 \times 30 \times 1$ см³ /спирол + 2% р-терфенил + 0,02% РОРОР/ и 10 пластин свинца размером $55,6 \times 30 \times 0,5$ см³. Пластины сцинтиллятора и свинца чередовались. Полная толщина свинца в каждом блоке составляла 10 радиационных единиц.

Сцинтилляторы были отполированы по всей поверхности и защищались от механических повреждений алюминиевыми пластинами толщиной 1 мм. Индивидуального отбора сцинтилляторов по однородности и оптической

прозрачности не проводилось. Всего в детекторе имелось 80 пластин сцинтиллятора.

Ливневые блоки располагались в 2 ряда слева и справа от оси пучка /рис. 2а/. Каждая пара блоков, образующая логическую единицу, смонтирована в общем светонепроницаемом кожухе и в дальнейшем называется счетчиком /рис. 2б/.

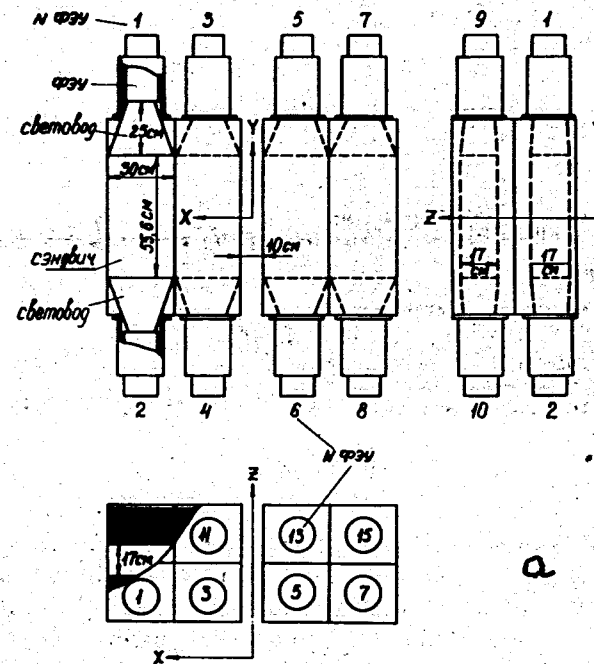


Рис. 2. Детектор электронов: а - расположение блоков детектора; б - внешний вид счетчика в период его сборки.

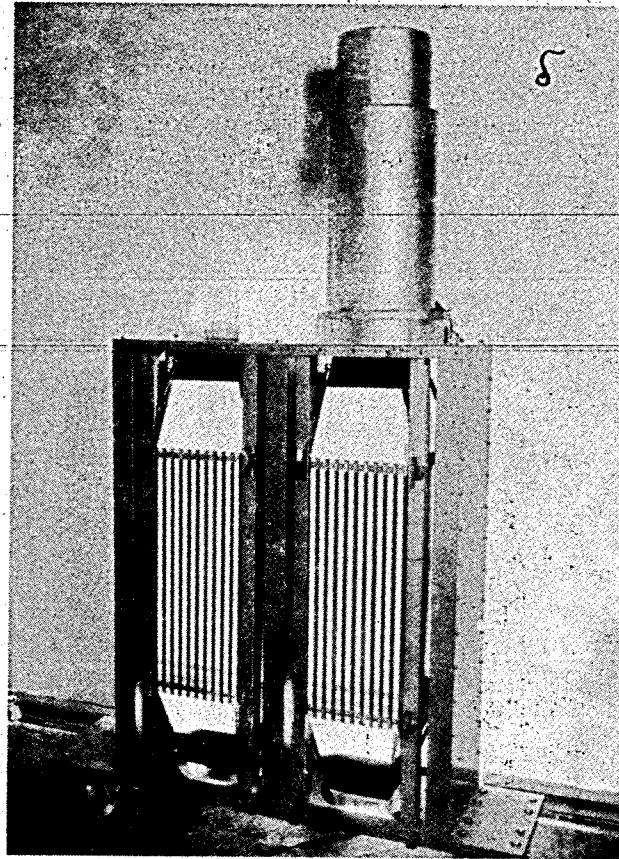


Рис. 26

Свет, создаваемый в сцинтилляторах каждого блока, собирался и передавался с помощью световодов на фотокатоды двух ФЭУ-65, расположенные сверху и снизу "сэндвича". Световоды из оргстекла имели форму усеченной пирамиды: высота 25 см и площадь около фотокатода $105 \times 105 \text{ мм}^2$ /диаметр фотокатода 150 мм/. Оптический контакт с обоих торцов световодов осуществлялся с помощью силиконовой смазки.

На поверхности световода со стороны сцинтилляторов устанавливался световой диод, позволяющий контролировать работу каждого фотоумножителя.

3. Электроника детектора

Блок-схема электроники

Электроника детектора состояла из 4-х идентичных схем, каждая из которых относилась к 2-м блокам в первом или во втором ряду обеих половин детектора /рис. 3/.

Суммарный заряд четырех ФЭУ этих двух блоков преобразовывался в цифровой код и передавался в ЭВМ. Суммирование сигналов производилось с помощью линейных ворот; импульс управления которыми вырабатывался системой сцинтилляционных счетчиков спектрометра ^{14,5/}, а также генератором, обеспечивающим контрольные вспышки световых диодов в паузах работы ускорителя.

Данные о контрольных отсчетах детектора накапливались и анализировались с помощью программы, организующей работу ЭВМ ^{16/}.

Для упрощения процедуры выравнивания усиления электронного тракта каждого ФЭУ в схеме использовались аттенюаторы. "Блоки переходов", приведенные на рис. 3, связаны с применением двух типов кабеля.

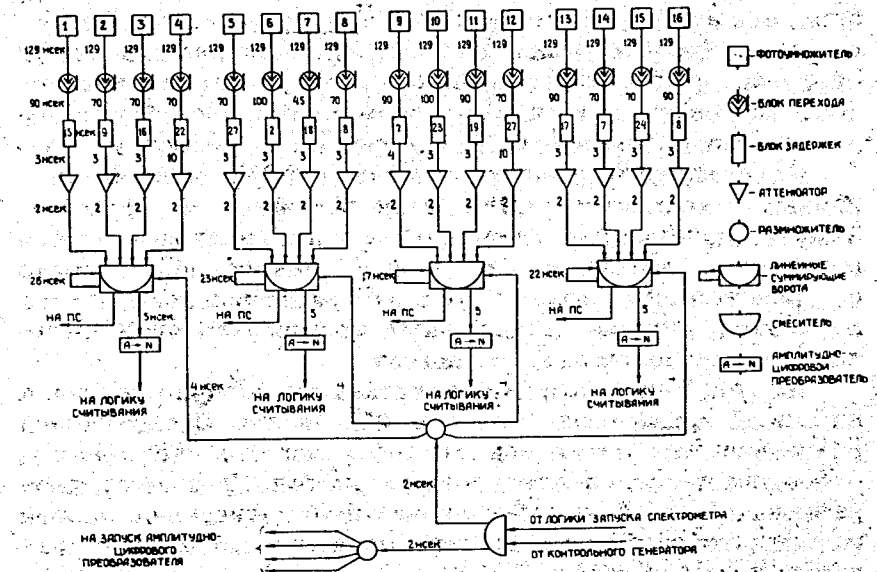


Рис. 3. Блок-схема электроники детектора.

Большая задержка в трактах каждого ФЭУ обусловлена электроникой запуска ^{/7/} и ее коммуникациями.

Кроме схем линейных ворот и амплитудно-цифровых преобразователей, все использованные блоки являлись стандартными и их параметры приведены в работах ^{/7,8/}.

Фотоумножители

В детекторе использовались фотоумножители ФЭУ-65 с интегральной чувствительностью фотокатода 30-75 мкА/лм.

Для защиты от магнитного поля фотоумножители экранировались несколькими слоями пермаллоя и монтировались в стальных кожухах.

Выбор режимов ФЭУ проводился с помощью электролюминесцентного диода, длительность световой вспышки которого составляла 10 нсек. Вспышка могла освещать как всю поверхность фотокатода, так и определенные ее части.

Для каждого ФЭУ подбирались напряжения на фокусирующих электродах и трех последних междинодных промежутках при фиксированном напряжении на всем делителе /рис. 4/. Напряжение на последних диодах подбиралось из соображений максимального усиления. Потенциалы на фокусирующей системе устанавливались таким образом, чтобы обеспечить время нарастания анодного тока не более 6 нсек и получить максимально возможную для каждого образца ФЭУ однородность по фотокатоду.

Напряжение источников питания ФЭУ, стабилизированных с точностью 0,05%, было выбрано ≈ 1500 В. Точное значение напряжения было установлено в процессе калибровки детектора на пучке электронов. В связи с работой счетчиков в условиях интенсивного пучка последние четыре междинодных промежутка ФЭУ питались от сильноточных источников.

На рис. 5 представлена зависимость величины сигнала на аноде одного из образцов ФЭУ и его амплитудного разрешения от интенсивности вспышки светового диода, освещавшего всю поверхность фотокатода. За амплитудное разрешение здесь и далее принимается отношение полной ширины амплитудного спектра на полувысоте к его значению в максимуме.

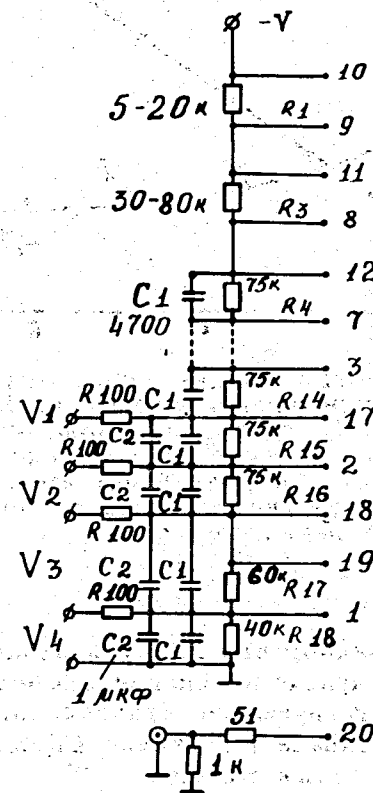


Рис. 4. Схема делителя ФЭУ-65.

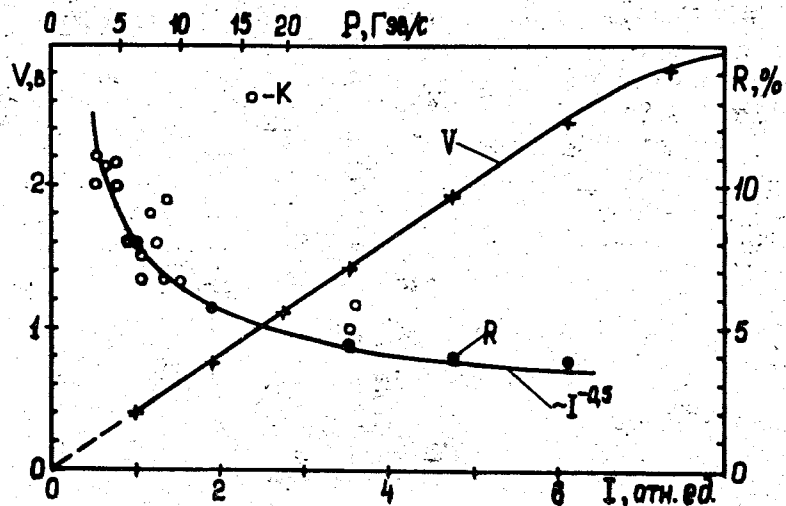


Рис. 5. Зависимость величины сигнала на аноде ФЭУ (V) и собственного амплитудного разрешения (R) от интенсивности вспышки (I) светового диода или от импульса электрона (P), вызвавшего в счетчике эквивалентную световую вспышку; K - значения амплитудного разрешения, соответствующие контрольным световым вспышкам каждого ФЭУ детектора.

Из рис. 5 видно, что имеется область, где сигнал ФЭУ линейно зависит от интенсивности вспышки. Величина сигнала, соответствующего границе линейной области, для всех ФЭУ оставалась постоянной в широком диапазоне напряжений на фотоумножителе.

Динамический диапазон ФЭУ, равный ~ 900 , определялся как отношение максимального сигнала, соответствующего линейной области, к сигналу от одиночной релятивистской частицы, прошедшей один сцинтиллятор счетчика.

Для иллюстрации использования линейного диапазона ФЭУ при работе детектора в эксперименте на рис. 5 сверху приведена шкала импульсов электронов, дававших на аноде ФЭУ при попадании в центр счетчика такой же по величине сигнал, как соответствующая вспышка электролюминесцентного диода.

При прохождении электрона в непосредственной близости от световода вследствие уменьшения поглощения света сигнал ФЭУ увеличивался в 1,25 раза по сравнению с сигналом от электрона в центре счетчика.

Импульс на аноде ФЭУ, вызванный электронами с энергией 5 ГэВ, имел следующие параметры: треугольная форма, передний фронт - 7 нсек, ширина на полувывоте 20 нсек.

Для световых вспышек, эквивалентных вспышкам от электрона с энергией 5-25 ГэВ, собственное амплитудное разрешение данного образца ФЭУ /рис. 5/ лежало в пределах 10-4%.

Различие в величинах амплитудного разрешения отдельных образцов ФЭУ показано на рис. 5, где приведены значения разрешений, найденные из спектров контрольной световой вспышки каждого ФЭУ. Видно, что амплитудные разрешения фотоумножителей различались между собой не более, чем в 1,4 раза.

Разброс в величине разрешения для разных ФЭУ определялся, в основном, различием в чувствительности фотокатода и различием равномерности чувствительности по площади фотокатода.

Для первого ряда блоков, в котором поглощалась основная доля энергии электрона, были отобраны ФЭУ с неоднородностью чувствительности фотокатода $\pm 10\%$; во 2-м ряду неоднородность для отдельных образцов ФЭУ доходила до $\pm 25\%$.

Линейные ворота

Линейные ворота были выполнены на основе схемы ЛВ100, характеристики которой приведены в^{18/}. В схему ворот было добавлено суммирование входных токов, которое осуществлялось на первом транзисторе. Время нарастания выходного сигнала так же, как и его задержка, составляли 5 нсек. Использовался быстрый выход схемы, линейно разветвленный на основной и контрольный сигналы с коэффициентом передачи соответственно 0,8 и 0,1. Длительность "ворот" была выбрана равной 40 нсек.

Амплитудно-цифровой преобразователь /кодировщик/

За основу блока кодировщика была взята схема, опубликованная в ^{9/}. На входе схемы был добавлен интегратор с постоянной разряда 10 мксек.

Число каналов кодировщика - 256; диапазон входных сигналов прямоугольной формы длительностью 20 нсек - /О-3,5/В; частота кодовой серии - 10 МГц.

Кодировщик имел нулевой отсчет /пьедестал/, соответствующий 20-ому каналу.

Линейность схемы в диапазоне 25-256 каналов не хуже 1% /отклонение от линейности не более 1 канала/.

Максимальное отклонение от линейности в первых пяти каналах не превышало 3 каналов.

Температурный дрейф пьедестала и отсчета на уровне 200 канала составляет менее 1 канала/ 10° С.

4. Настройка и калибровка детектора

Для нестройки и калибровки счетчиков детектора использовались вторичные электроны, образованные гамма-квантами нейтрального пучка. Электроны рождались в свинцовом конверторе толщиной 5 мм, установленном сразу за счетчиком антисовпадений А /рис. 1/, и регистрировались телескопом узких сцинтилляционных счетчиков, выделявших направление пучка электронов до и после магнита. Размеры счетчиков - $10 \times 100 \text{ мм}^2$.

Импульс электронов определялся величиной магнитного поля и X-координатой последнего счетчика телескопа и менялся от 1,5 до 15 Гэв/с. Импульсный разброс электронного пучка, зависящий, в основном, от геометрии телескопа, составлял $\pm 5,5\%$. Пучок электронов направлялся в центр каждого счетчика детектора.

При настройке детектора сигналы ФЭУ выравнивались по времени их прихода на схемы линейных ворот. Затем для каждого ФЭУ снимались амплитудные спектры, соответствующие одинаковым энергиям электронов.

Усиление ФЭУ первого ряда блоков детектора регулировалось таким образом, чтобы положение максимума

электронного пика соответствовало, одним и тем же каналам.

Из расчетных данных ^{10/} следовало, что отношение числа вторичных частиц ливня, образованного электроном с энергией 6 ГэВ, во втором и первом блоках счетчика равно 0,2. Поэтому положения максимумов соответствующих амплитудных спектров блоков каждого счетчика находились в таком же соотношении. Погрешность, с которой выравнивались усиления ФЭУ, составляла $\pm 6\%$.

После окончательной регулировки усиления при разных энергиях первичных электронов снимались амплитудные спектры, соответствующие суммарным сигналам двух ФЭУ каждого блока.

Так как в ходе экспериментов по регенерации величина сигналов каждого ряда блоков /отсчеты кодировщиков/ записывались на МЛ автономно, то зависимость энергия-амплитуда, измеренная на электронном пучке, могла быть проверена и скорректирована при последующей обработке с помощью электронов известной энергии из КЕЗ-распадов.

Следует заметить, что пользуясь зарегистрированными отсчетами детектора, вызванными электронами КЕЗ-распадов, можно, в принципе, на этапе обработки выполнить описанную выше процедуру выравнивания усиления ФЭУ и калибровки счетчиков.

Возможная неоднородность оптической прозрачности и энергетического выхода люминесценции сцинтиллятора могла приводить к зависимости отсчетов детектора от места прохождения частицы через счетчик. Для оценки этого эффекта исследовалась амплитуда сигнала каждого счетчика в зависимости от места прохождения через него релятивистского мюона. Рабочая площадь счетчика разбивалась на 15 квадратов размером $10 \times 10 \text{ см}^2$. Для каждого квадрата мюоны выделялись телескопом, в который входили счетчики годоскопических плоскостей установки, счетчики мюонного детектора /см. рис. 1/ и дополнительный счетчик размером $10 \times 10 \text{ см}^2$, расположенный непосредственно перед детектором электронов. Измерения амплитудных спектров для каждого квадрата проводились с дополнительным линейным усилителем ^{7/}. Проведенные измерения показали, что форма амплитудных спектров мюонов для всех участков площади имела

один и тот же вид /рис. 6/ и положение максимума спектра в пределах $\pm 10\%$ не зависело от места прохождения мюона через детектор.

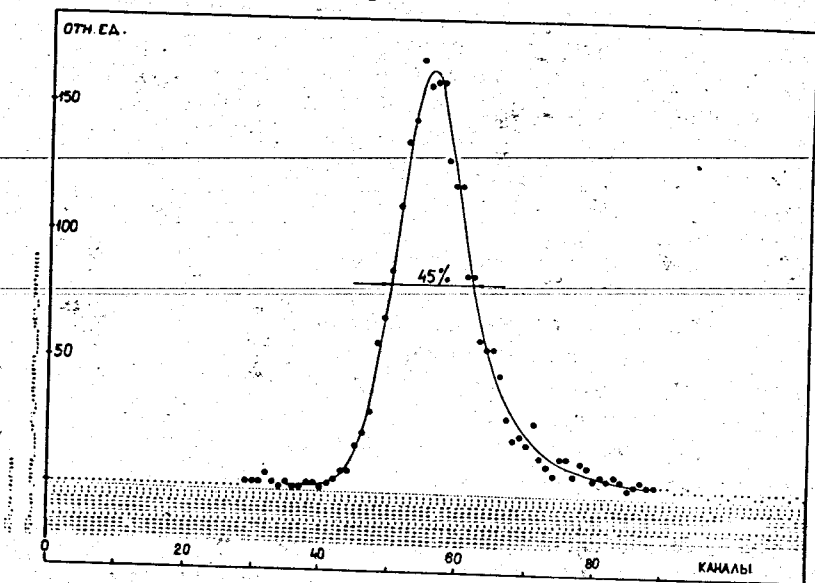


Рис. 6. Амплитудный спектр мюонов.

5. Результаты калибровки

Амплитудные спектры, полученные на электронном пучке для одного из счетчиков детектора, приведены на рис. 7.

Положения максимумов электронных пиков этих спектров в зависимости от импульса первичного электрона приведены на рис. 8.

Калибровочная кривая для второго блока определялась по разности положения суммарного спектра и спектра для первого блока.

Точки, соответствующие импульсам 7, 10, 13 и выше 15 ГэВ/с, получены с помощью электронов из КЕЗ-распадов.

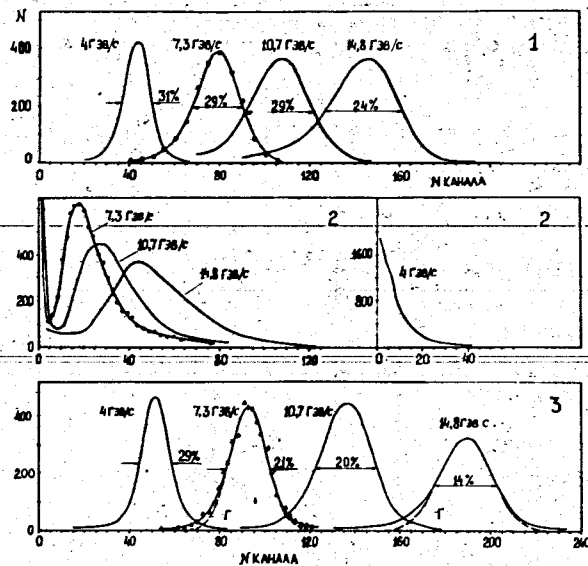


Рис. 7. Амплитудные спектры, полученные на электронном пучке: 1 - спектры для первого блока счетчика; 2 - для второго блока; 3 - суммарные спектры счетчика; Г - гауссовское распределение.

Из калибровочных характеристик видно, что линейная зависимость амплитуды от энергии электрона для первого блока нарушается при энергиях выше 10 ГэВ. Зависимость суммарной амплитуды счетчика от энергии электрона близка к линейной во всем диапазоне энергий электронов, регистрируемых установкой. По калибровочным кривым для первого и второго блоков можно оценить отношение энергии ливня, поглощенной в каждом из них.

Полученные данные в области энергий до 10 ГэВ хорошо согласуются с данными работы ^{11/}, в которой для похожего счетчика измерялось среднее число вторичных электронов лавины на различных глубинах.

Амплитудное разрешение детектора с поправками на разброс частиц по импульсу приведено на рис. 9, откуда видно, что разрешение счетчика с ростом импульса первичных электронов P меняется по закону, близкому к $P^{-0,5}$.

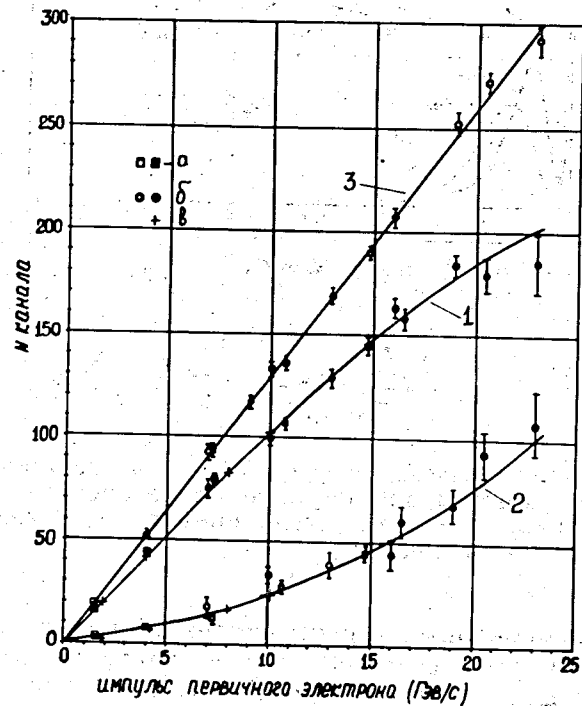


Рис. 8. Зависимость положения максимумов амплитудных спектров от величины импульса первичных электронов: 1 - первый ряд блоков детектора; 2 - второй ряд; 3 - весь детектор; а - измерения на электронном пучке; б - измерения с помощью электронов из КЕЗ-распадов; в - по данным работы [11]

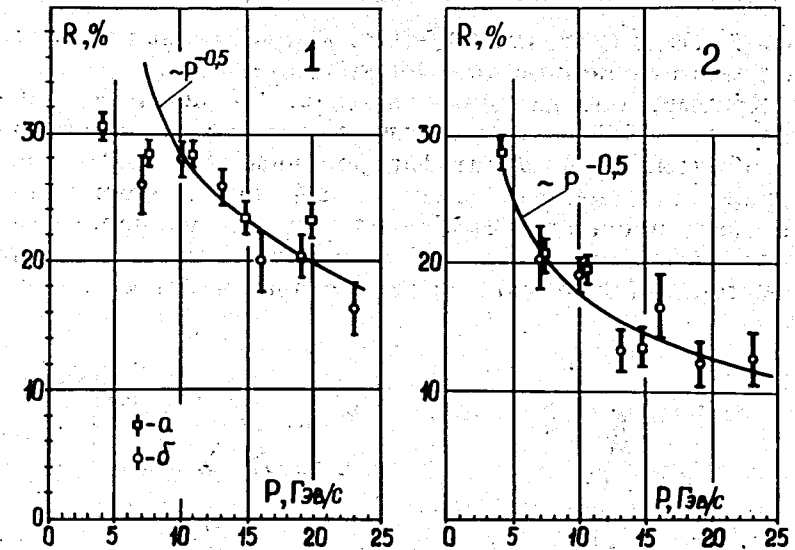


Рис. 9. Зависимость амплитудного разрешения (R) детектора от величины импульса первичного электрона (P): 1 - первый ряд блоков детектора; 2 - весь детектор; а - измерения на электронном пучке; б - измерения с помощью электронов из КЕЗ-распадов.

Для первых блоков отклонение от этой закономерности связано с выходом вторичных частиц электронно-фотонной лавины за пределы блоков.

6. Селективность детектора

Для каждого блока детектора при обработке экспериментальной информации, записанной на МЛ, были получены амплитудные спектры отдельно для мюонов, пионов и электронов, возникавших из трехчастичных распадов нейтральных каонов.

По форме этих спектров можно определить критерии для отбора КЕЗ-распадов среди всех остальных типов распадов каонов.

На рис. 10 приведены амплитудные спектры для одной половины детектора. Спектры построены для импульсных интервалов распадных частиц ± 1 ГэВ/с со средним значе-

нием 7, 10, 13, 16, 19 и 23 ГэВ/с и качественно иллюстрируют работу одного и двух блоков детектора.

Кривые, обозначенные на рис. 10 как $e+\pi$, представляют собой сумму амплитудного спектра электронов от событий, грубо идентифицированных как КЕЗ-распады /хорошо выраженный электронный пик в правой части спектра/, и спектра пионов из этих же распадов, когда соответствующий электрон попадал в другую половину детектора. Кроме того неэлектронная часть суммарного

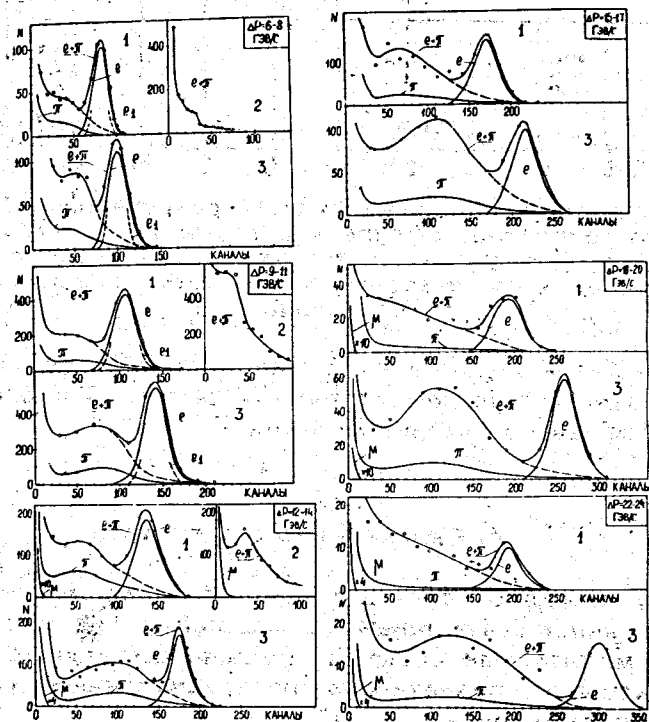


Рис. 10. Амплитудные спектры частиц для разных импульсных интервалов (ΔP): 1 - первый ряд блоков детектора; 2 - второй ряд; 3 - весь детектор; $e+\pi$ - сумма амплитудных спектров электронов и пионов; e , π , μ - спектры для электронов, пионов и мюонов соответственно, приведенные к одному и тому же числу падающих частиц; $e1$ - спектр электронов, поправленный на их импульсный разброс.

спектра была обусловлена примесями пионов от других мод распадов каонов, неправильно идентифицированных как КЕЗ.

Кривые e представляют собой амплитудные спектры электронов, полученные вычитанием пионного фона из суммарного спектра $e+\pi$. Форма электронных пиков хорошо описывается гауссовским распределением. Полученные амплитудные спектры электронов корректировались с учетом импульсного разброса частиц /кривые $e1$ /.

Приведенные на рис. 10 кривые π и μ представляют собой спектры пионов и мюонов, нормированные на число электронов.

Так как КЕЗ-распады являлись единственным источником электронов в экспериментах ^{1,2/}, то идентификация этих распадов заключалась в отборе событий, в которых одна из частиц известного импульса вызывала отсчеты детектора в области электронного пика.

С этой целью для всего диапазона импульсов вторичных частиц определялись граничные отсчеты как 1-го ряда блоков, так и всего детектора, соответствующие определенному минимуму амплитуды электронного пика.

Если в любой половине детектора, расположенной слева или справа от оси установки, отсчет превышал граничное значение, то соответствующее событие считалось КЕЗ-распадом.

Вероятность ложной идентификации КЕЗ-распадов, найденная по кривым π и $e1$ для разных импульсных интервалов, приведена на рис. 11.

Как видно из этого рисунка, вероятность идентифицировать пион как электрон по суммарным отсчетам обоих рядов детектора изменялась от 7 до 1% в интервале импульсов частиц 5-25 ГэВ/с.

Более грубая идентификация электронов могла быть сделана только по первому ряду блоков. Вследствие нелинейности калибровочной кривой первого ряда и энергетической зависимости амплитудного разрешения вероятность ложной идентификации вела себя указанным на рис. 11-1 образом. Лучшее отделение электронов по первому ряду блоков детектора в области импульсов около 7 ГэВ/с объясняется тем, что основная доля энергии электронов поглощалась уже в первом блоке счетчика. Взаимодействие же пионов во втором блоке увеличивало

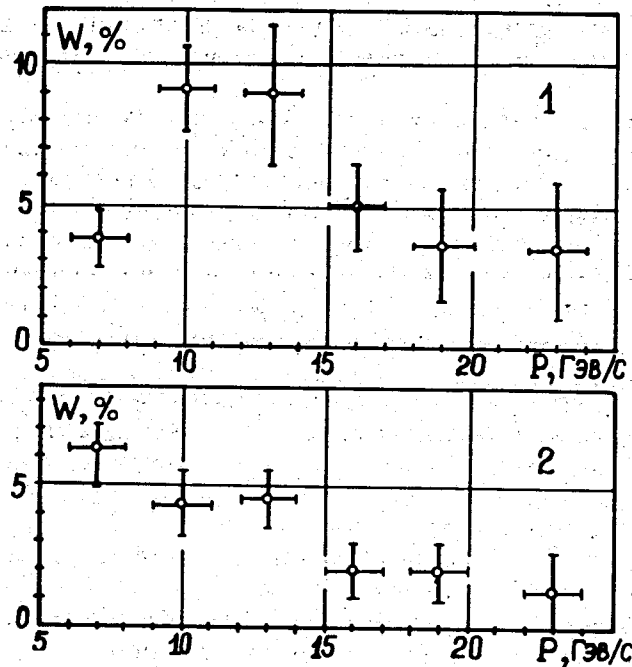


Рис. 11. Зависимость вероятности ложной идентификации электрона (W) от его импульса: 1 - для первого ряда блоков; 2 - для всего детектора.

в этом случае вероятность ложной идентификации КЕЗ-распадов.

В качестве примера использования детектора в экспериментах по регенерации 11 можно привести рис. 12а, б и 13а, б, где показаны угловые и массовые распределения событий, являющихся кандидатами в двухпионные распады. Чистые КП2-распады должны концентрироваться при малых

углах рассеяния θ и иметь инвариантную массу $M_{\text{ПП}}$, близкую к массе каона. Фон в этих распределениях образуют, в основном, трехчастичные распады КЕЗ и КМЗ, углы рассеяния которых и инвариантная масса попадают в интервал соответствующих величин, характерных для КП2-событий. Вычитание идентифицированных КЕЗ-событий, как видно из рисунков, существенно уменьшает фон.

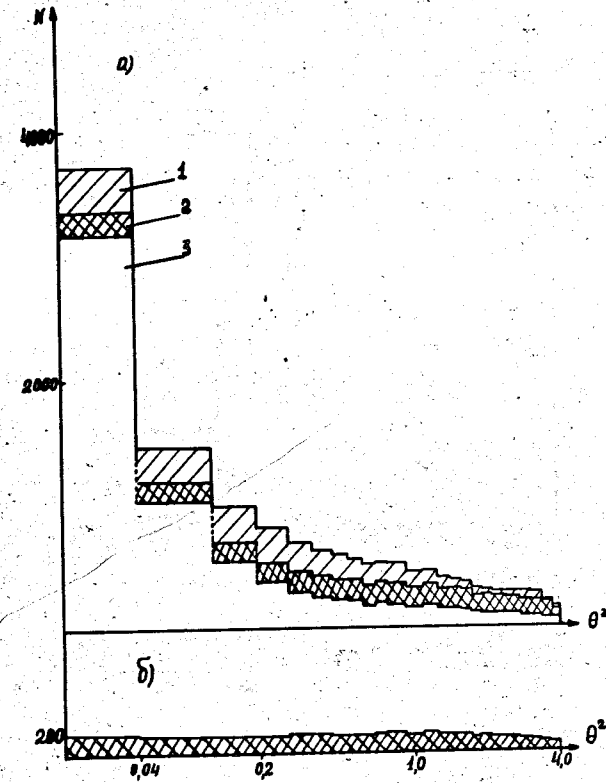


Рис. 12. Угловое распределение событий - кандидатов в КП2-распады: а-1 - все кандидаты, а-2 - то же после вычитания идентифицированных КМЗ-распадов, а-3 - то же после вычитания идентифицированных КМЗ-и КЕЗ-распадов; б - вычтенные идентифицированные КЕЗ-распады.

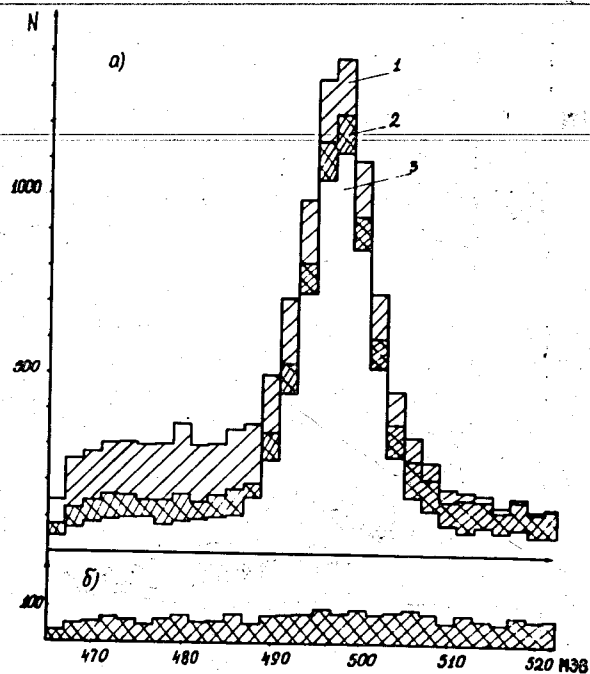


Рис. 13. Распределение по инвариантной массе событий - кандидатов в КП2-распады: а-1 - все кандидаты, а-2 - то же после вычитания идентифицированных КМЗ-распадов, а-3 - то же после вычитания идентифицированных КМЗ- и КЕЗ-распадов; б - вычитенные идентифицированные КЕЗ-распады.

7. Заключение

Приведенные результаты показывают, что детектор электронов данной конструкции обеспечил достаточно надежную идентификацию КЕЗ-распадов.

Вероятность ложной идентификации КЕЗ-распадов во всем диапазоне импульсов не превышала 5%. При дальнейшем анализе отобранных событий примесь других типов распадов могла быть сильно уменьшена.

В заключение авторы выражают благодарность С.В. Русакову и сотрудникам конструкторского бюро ФИАН СССР за участие в конструировании детектора, В.Баландину - за помощь в измерениях, Н.И.Чернышову и В.В.Степановой - за радиотехнический монтаж схем.

Литература

1. В.К.Бирулев, А.С.Вовенко и др. ЯФ, 15/1972/, 959.
2. В.К.Бирулев, А.С.Вовенко и др. Международный семинар по бинарным реакциям адронов при высоких энергиях, Дубна, 1971 г.
3. С.Г.Басиладзе и др. ОИЯИ, Р1-5361, Дубна, 1970.
4. В.К.Бирулев, А.С.Вовенко и др. ОИЯИ, 1-6660, Дубна, 1972.
5. В.К.Бирулев, А.С.Вовенко и др. ОИЯИ, 1-6665, Дубна, 1972.
6. И.М.Иванченко и др. Сообщение ОИЯИ, Б1-10-5502, Дубна, 1970.
7. С.Г.Басиладзе, В.К.Бирулев и др. ОИЯИ, 1-5910, Дубна, 1971.
8. В.А.Арефьев, С.Г.Басиладзе и др. ОИЯИ, 13-5447, Дубна, 1970.
9. Э.Г.Имаев и др. ОИЯИ, Р10-3332, Дубна, 1967.
10. U.Völkel. Desy, 65/6, Hamburg, 1965.
11. G.Backenstoss a.o. Nucl. Instr. and Meth. 21 (1963) 155.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 июля 1973 года.