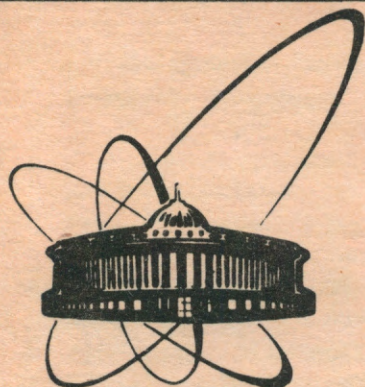


91-380



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-91-380

С. В. Афанасьев, В. А. Гладышев¹, А. Е. Зацеркляный²,
В. И. Колесников, А. И. Малахов, Е. А. Мониц³,
Н. А. Немашкало², В. Ф. Попов², А. Л. Проскураков¹

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР
С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ СЪЕМОМ СВЕТА

Направлено в журнал "Приборы и техника эксперимента"

¹Институт ядерных исследований АН СССР, Москва

²Харьковский физико-технический институт АН УССР

³Научно-техническое бюро "Полихром", Троицк

1991

1. Введение

Сцинтилляционные калориметры типа "сандвич" с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) в качестве светоприемника - стандартный прибор, используемый в различных экспериментах. Однако их применение в современных установках 4 π -геометрии ограничено большим магнитным полем в местах установки детекторов. Использование спектросмещающих нитей для сбора света в активных элементах калориметра позволяет обойти эти трудности^{1,2/}. Длина затухания переизлученного света для лучших типов волокон доходит до нескольких метров. Это дает возможность располагать ФЭУ в местах со значительным ослаблением магнитного поля.

2. Описание модулей

Как часть проводимых исследований для установки 4 π -геометрии "СФЕРА"^{3/}, создаваемой в ЛВЭ ОИЯИ, мы собрали и испытали три свинцово-сцинтилляционных модуля электромагнитного калориметра как прототип будущего детектора большой площади. Каждый модуль собран из 47 свинцовых и 47 сцинтилляционных пластин размером 2x70x70 мм и 5x70x70 мм соответственно (рис.1). Суммарная толщина сборки равна 17,3 радиационных длин. Этого достаточно для поглощения 98% энергии электромагнитного ливня, образующегося в объеме детектора от электрона с энергией 2 ГэВ. В качестве активных элементов нами был взят пластмассовый сцинтиллятор на основе полистирола с растворенными добавками (2% р-терфенила + 0,02% PPOP). Пластины были изготовлены методом литья под давлением^{4/}.

В пластинах равномерно по всей площади было просверлено 9 отверстий диаметром 2 мм. Сквозь эти отверстия мы пропустили спектросмещающие оптоволокна диаметром 1,5 мм. Оптоволокна были изготовлены в ИЯИ (Троицк). Материалом керны волокна является полистирол, содержащий люминофор, спектр поглощения которого хорошо согласуется со спектром излучения сцинтиллятора. В качестве оболочки использовался фторированный полиметилметакрилат, имеющий коэффициент преломления 1,4. Одним концом волокна сводились к фотокатоду ФЭУ, а перед противоположным концом ставилась пластина с алюминизированным покрытием. В качестве светоприемника был взят хорошо

зарекомендовавший себя в калориметрии^{5/} ФЭУ-84-3 с паспортным делителем. Весь модуль помещался в светозащитный кожух.

3. Схема эксперимента

Калориметрические модули исследовались на пучках частиц разного сорта синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ в широком диапазоне энергий. Измерения в области энергий от 500 МэВ до 1 ГэВ были выполнены на электронном пучке Харьковского физико-технического института.

Схема эксперимента представлена на рис.2. Пучок мониторировался сцинтилляционными счетчиками М1 и М2 с размером чувствительной области 50x50x5 мм. Отбор частиц нужного сорта осуществлялся с помощью газового порогового черенковского счетчика С1. Сцинтилляционный счетчик М3 площадью 10x10 мм располагался в непосредственной близости от торца исследуемого модуля и определял место попадания частиц в детектор. Модули были установлены на координатной платформе, позволявшей дистанционно перемещать их в поперечном направлении относительно оси пучка.

Совпадение сигналов М1-М3 и С1 служило триггером для запуска электроники. Для преобразования сигналов с исследуемых модулей нами использовался зарядо-цифровой преобразователь 83ЦП-393^{6/}. Информация считывалась через контроллер крейта КАМАК и записывалась в ПЭВМ "Правец-16" для последующей обработки.

4. Однородность и световыход

Чтобы изучить влияние расположения спектросмещающих нитей на параметры калориметрического модуля, мы сняли зависимость амплитуды выходного сигнала ФЭУ от места попадания частицы в модуль. Для этого мы воспользовались пучком π^- - мезонов с импульсом 2,25 ГэВ/с. Толщина активной зоны наших модулей для частиц такого сорта не слишком велика - 0,55 λ_1 (λ_1 - ядерная длина взаимодействия), и большинство π^- - мезонов проходит ее без взаимодействия. Чтобы выделить пролетные частицы, дополнительно за модулем был установлен мониторный счетчик М4 размером 30x30x5 мм на расстоянии 1 м от М3. Эти 2 счетчика выделяли в объеме модуля тестируемую область в виде усеченной пирамиды с размерами нижнего и верхнего оснований 16x16 мм и 10x10 мм соответственно.

Мы просканировали центральную часть калориметра площадью 50x50 мм. Результаты измерений приведены на рис.3. Для выбранной конфигурации расположения нитей характерно уменьшение регистрируемого света от середины к краю. Неоднородность светосбора в модуле достигает 25%. Как видно из результатов, равномерное распределение нитей по объему калориметра не является оптимальным. Чтобы сделать светосбор более однородным по площади, необходимо размещать спектросмещающие волокна ближе к краю. Покрытие

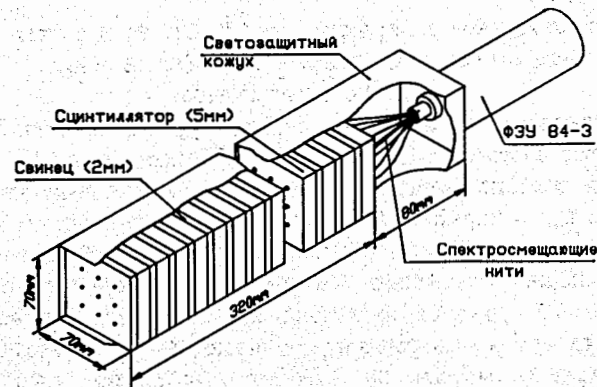


Рис.1. Схематический вид модуля электромагнитного калориметра.

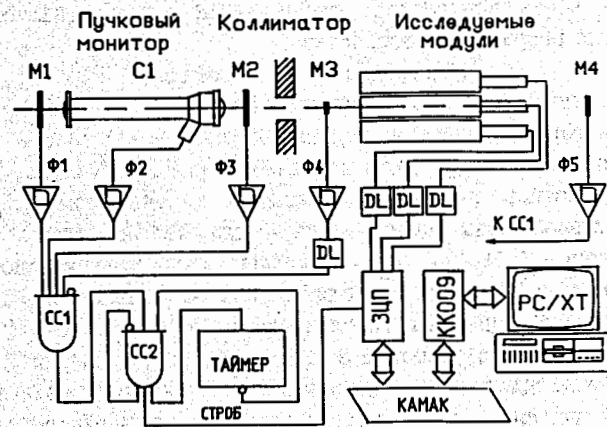


Рис.2. Блок-схема эксперимента.

сцинтилляторов алюминизированным майларом не улучшает параметры. Размеры мониторингового счетчика М3 не позволили нам более детально исследовать области детектора, непосредственно прилегающие к нитям.

Для оценки числа фотоэлектронов мы заменили в одном модуле ФЭУ-84-3 на ФЭУ-130, который был прокалиброван по одноэлектронному пику. Для π^- -мезонов, проходящих сквозь модуль, величина выходного импульса определяется в основном ионизационными потерями в сцинтилляторах. Мы воспользовались этим для определения среднего числа фотоэлектронов, образующихся в сцинтилляционной пластине от однозарядной частицы. Среднее значение амплитуды для частицы прошедшей в середине модуля получилось $33 \pm 0,4$ ф.э. В пересчете на одну пластину сцинтиллятора это составляет $0,7$ ф.э.

5. Энергетическое разрешение и линейность

Энергетическое разрешение калориметров было измерено на электронном пучке для центральной части модулей. Измерения при энергии 0,5, 0,7 и 1 ГэВ проведены на электронном ускорителе Харьковского физико-технического института, а для 1, 2,25 и 4,5 ГэВ на вторичном пучке синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ. Энергетическое разрешение модуля σ_e можно представить как сумму погрешностей, определяемых различными процессами:

$$\sigma_e^2 = \sigma_s^2 + \sigma_1^2 + \sigma_f^2, \quad (1)$$

σ - погрешность, возникающая из-за дискретной структуры калориметра. По данным работы [7] для свинцовых и сцинтилляционных пластин толщиной 2 и 5 мм соответственно $\sigma_s = 0,075$. Размеров единичного модуля для поглощения всего электромагнитного ливня недостаточно. Существенная часть вытекает через боковую поверхность. Эти потери дают свой вклад в суммарную погрешность - σ_1 . Расчеты мольеровского радиуса R_m для сборки из 2 мм свинцовых и 5 мм сцинтилляционных пластин дают величину $R_m = 6$ см. Для оценки величины погрешности σ_1 мы установили исследуемый модуль между двумя дополнительными. Учет амплитуд с этих модулей дал для $\sigma_1 = 0,062$.

Вклад фотоэлектронной статистики σ_f в общую сумму можно получить, зная σ_s , σ_1 и измерив σ_e . При таком подходе мы получили $\sigma_f = 0,09$. В пересчете на фотоэлектроны это будет $N_e = 130$ ф.э./ГэВ. Это значение хорошо согласуется с величиной $N_e = 128 \pm 1$ ф.э., полученной методом абсолютной калибровки. График зависимости энергетического разрешения σ/\sqrt{E} от энергии регистрируемых электронов с учетом боковых утечек представлен на рис.4. Данные аппроксимируются величиной:

$$\sigma/\sqrt{E} = (0,114 \pm 0,005) / \sqrt{E(\text{ГэВ})}. \quad (2)$$

Восстановленное амплитудное распределение для энергии регистрируемого электрона 2,25 ГэВ показано на рис.6.

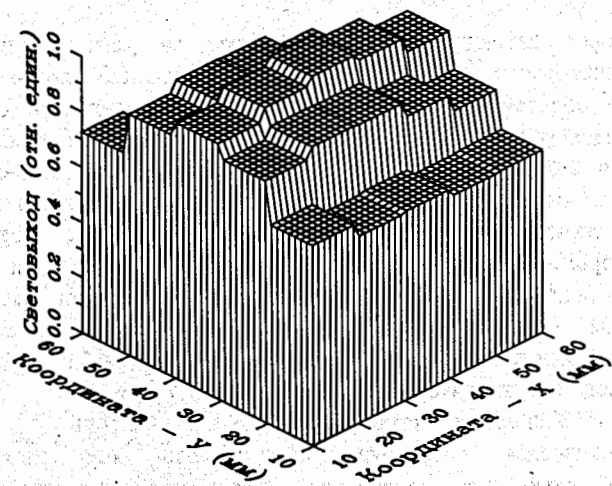


Рис.3. Светосбор по площади модуля.

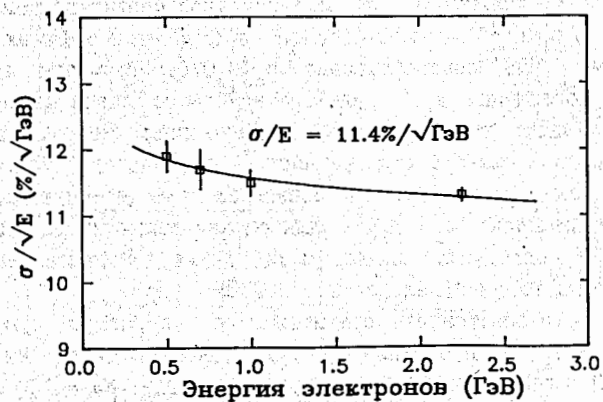


Рис.4. Энергетическое разрешение для электронов с импульсом 0.5, 0.7, 1 и 2.25 ГэВ/с.

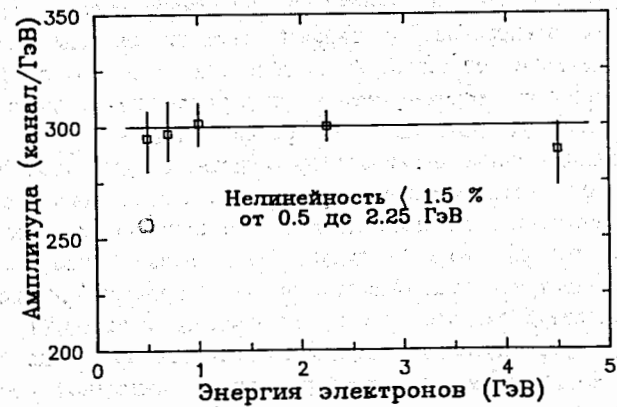


Рис.5. Среднее значение выходного сигнала, нормированного на энергию электронов.

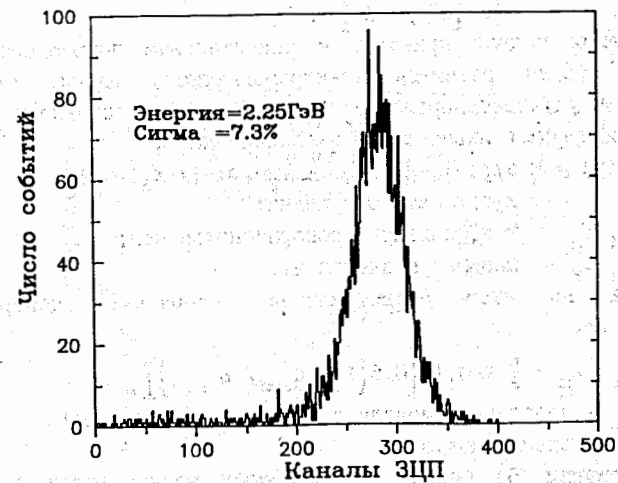


Рис.6. Амплитудное распределение в центре модуля К2.

На рис.5 мы привели зависимость выходного сигнала от энергии детектируемых электронов. В рабочей области энергий от 0,5 до 2,25 ГэВ отклонение от линейной зависимости не превышает 1,5%. При увеличении энергии характеристика ухудшается из-за недостаточной толщины модулей, что приводит к потере части ливня.

Однородность регистрации электромагнитного ливня калориметром в зависимости от места попадания частицы была исследована с помощью 2,25 ГэВ электронов. Мы просканировали с шагом 1 см вдоль линии, соединяющей центры трех модулей. Ось пучка была направлена параллельно спектросмещающим нитям. На рис.7 представлены результаты измерений амплитуд сигналов для каждого модуля и их сумма. В зонах состыковки модулей суммарный сигнал уменьшается на 19% по сравнению с центром. В основном потери определяются неплотной состыковкой модулей. Использование отдельных светозащитных экранов не позволило нам сделать зазор меньше 2 мм.

6. Координатное разрешение

Наиболее простой способ восстановления координаты центра ливня - метод центра тяжести. Используя координату центра каждого модуля x и амплитуду сигнала в нем A , можно легко определить ось ливня x_c :

$$x_c = \frac{\sum x_i A_i}{\sum A_i} \quad (3)$$

Однако такой подход приводит к значительным погрешностям из-за нелинейной формы развития электромагнитного ливня. Учет этой нелинейности улучшает параметры. Наилучшие результаты получаются при фитировании профиля ливня двумя экспонентами [8]:

$$E(x) = E_1 \exp(-|x-x_s|/\sigma_1) + E_2 \exp(-|x-x_s|/\sigma_2), \quad (4)$$

где x_s - координата оси ливня;
 E_1, E_2 - коэффициенты пропорциональности;
 σ_1, σ_2 - параметры экспонент.

Основываясь на этом представлении, координату центра ливня определяем как

$$x_c = x_m \pm \frac{b}{2} \mp \sigma_1 \ln \left[0.5 \left(1 + A_m / A_{m \pm 1} \right) \right], \quad (5)$$

где x_m - координата модуля с наибольшей амплитудой;
 b - ширина модуля.

Знак в выражении (5) зависит от того, какой модуль (слева или справа от центрального) берется в расчет.

Используя данные сканирования вдоль линии, соединяющей центры трех модулей, мы провели восстановление координат электромагнитного ливня. На рис.8 представлены результаты обработки. Средние значения координаты ливня, посчитанные по формуле (3), отмечены звездочками, по формуле (5) - квадратиками. Параллельными штриховыми линиями

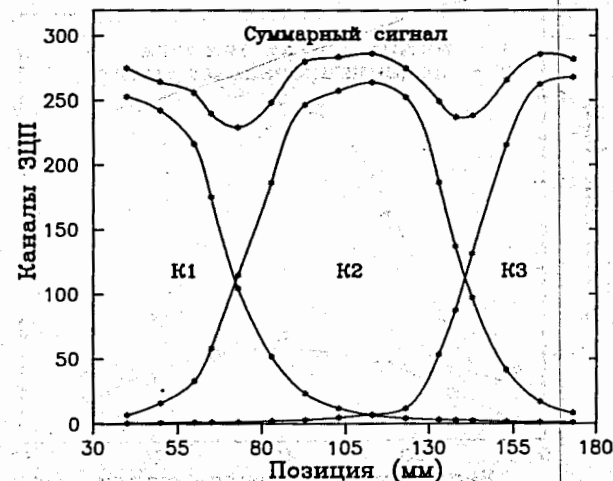


Рис.7. Амплитуда сигнала для каждого модуля и их сумма, полученные при сканировании электронами.

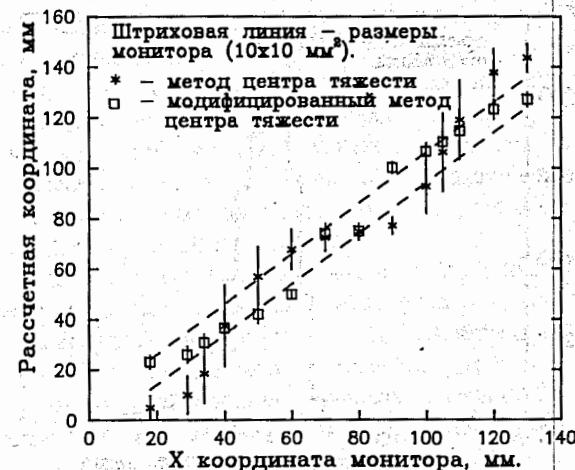


Рис.8. Рассчитанное значение координаты ливня для электронов с импульсом 2.25 ГэВ/с.

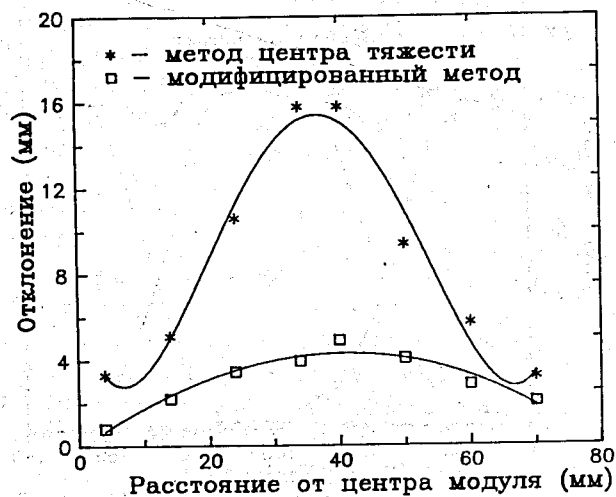


Рис.9. Систематическая ошибка измерений координаты ливня.

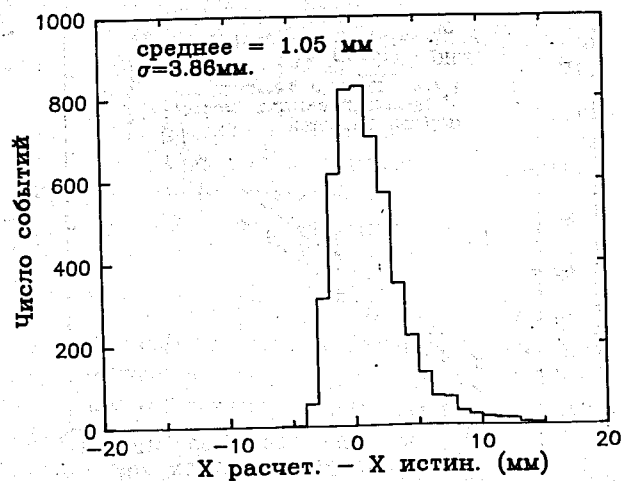


Рис.10. Распределение значений (X расчетное - X истинное) для X=70 мм.

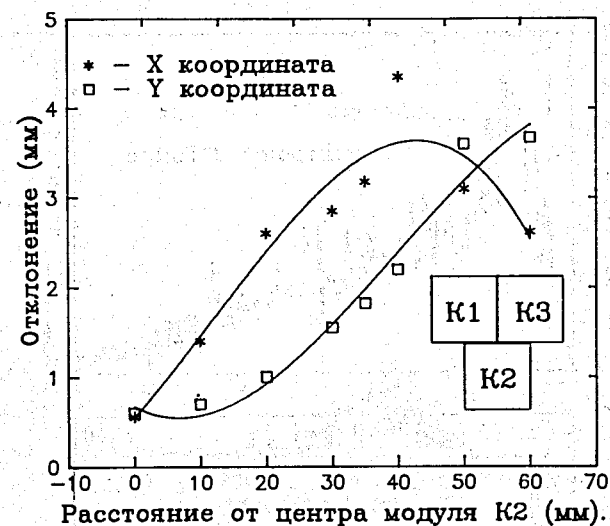


Рис.11. Систематическая ошибка измерений X и Y координат ливня.

отмечена захватываемая монитором область. Параметр σ_1 был получен при фитировании амплитудного распределения (рис.7) выражением (4); для нашей сборки $\sigma_1 = 14,5$ мм. Более детально на рис.9 показана зависимость систематического отклонения $\delta x = |x_c - x_s|$ от места попадания частицы относительно центра среднего модуля. Для координаты, восстановленной методом (5), максимальная величина систематического отклонения не превышает 4 мм, погрешность среднего значения невелика: $\sigma_c = 3,86$ мм (рис.10).

Чтобы понять, как меняются величины δx и σ_c в местах состыковки трех модулей, мы изменили геометрию опыта, сложив модули в пирамиду. Мы провели сканирование электронным пучком с энергией 2,25 ГэВ вдоль вертикальной линии от центра верхнего модуля. Полученная зависимость δx и δy от места сканирования показана на рис.11. Как и для предыдущего случая, по величине δx и δy не превышают 4 мм. Координатное распределение не отличается от рис.10.

7. Энерговывделение адронов в модуле

Энерговывделение адронов в калориметрическом модуле определяется двумя процессами. Непровзаимодействовавшие адроны теряют энергию только на ионизацию и возбуждение. Адроны, испытавшие сильное взаимодействие в веществе модуля, инициируют адронный ливень, энергия которого частично поглощается электромагнитным модулем. Эти

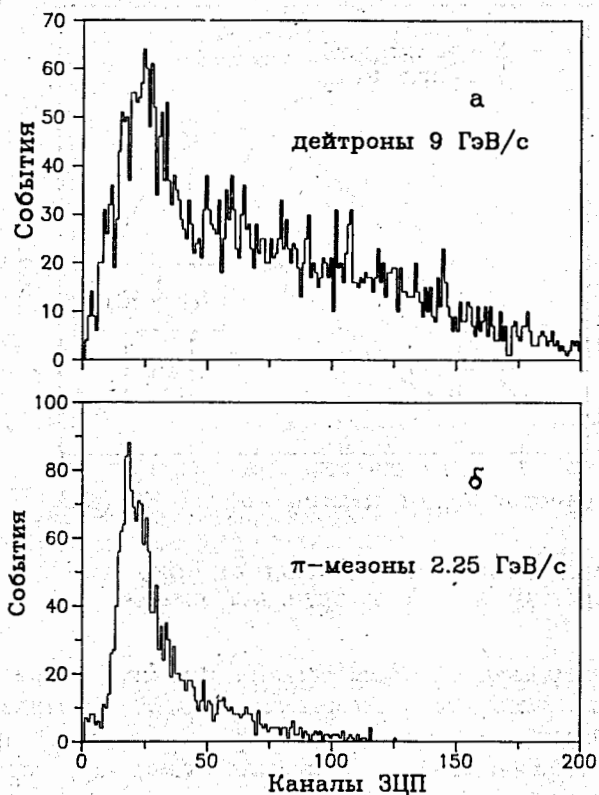


Рис.12. Энерговыведение дейтронов (а) и π -мезонов (б) в калориметрическом модуле.

процессы, легко можно разделить для частиц с импульсом > 2 ГэВ/с. На рис.12(а) представлено распределение регистрируемого сигнала для дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с. На фоне суммарного спектра выделяется пик, соответствующий прошедшим сквозь вещество без взаимодействия дейтроном. Эти потери близки по величине ионизационным потерям π -мезонов (рис.12,б). Разделение электронов от μ -мезонов и непроявившихся адронов можно осуществлять по двум критериям. Во-первых, по энерговыведению. Для мезонов и адронов с импульсом $p > 1$ ГэВ/с энергетические потери, как правило, меньше 0,5 ГэВ, а для электронов с тем же импульсом энерговыведение больше чем 0,5 ГэВ (рис.13). Вторым критерием является поперечный размер области энерговыведения. Электромагнитный ливень, инициируемый

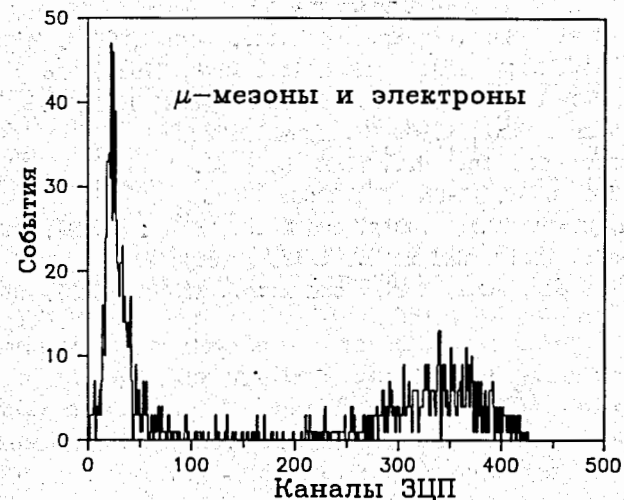


Рис.13. Суммарное амплитудное распределение μ -мезонов и электронов с импульсом 4.5 ГэВ/с.

электроном, занимает несколько модулей ($n > 3$). Для остальных частиц характерно наличие сигнала лишь в отдельных модулях ($n < 3$). Эти два способа вместе позволяют провести разделение электронов и мезонов на уровне около 400.

Для отделения электронов от адронов, образовавших в калориметре ливень, необходимо использовать метод, основанный на отсутствии корреляции между импульсом адрона и энергией, выделенной в калориметре^{9/}.

Выводы

Проведены исследования прототипа электромагнитного калориметра для установки "СФЕРА". Модули были собраны из свинцовых и сцинтилляционных пластин с волоконно-оптическим съемом света. Получено энергетическое разрешение для такой сборки $\sigma/E = 11,4\%/\sqrt{E(\text{ГэВ})}$. Координатное разрешение для центра модуля при восстановлении координаты с учетом формы ливня равно $\sigma_c = 3,86$ мм. Разделение по сорту частиц было получено на уровне 400.

В заключение мы выражаем благодарность Архипову В.В., Елишеву А.Ф., Резникову С.Г. за помощь, оказанную при проведении исследований.

Литература

1. H.Fessler et al., Nucl. Instr. and Meth., A240, (1985), 284.
2. B.Loehr et al., Nucl. Instr. and Meth., A254, (1987), 26.
3. А.Н.Абдурахимов и др. ОИЯИ, PI,2-89-434, Дубна, 1989, с.8.
4. А.Н.Алеев и др., ОИЯИ, PI-89-434, Дубна, 1989.
5. Р.Н.Краснокутский и др., ПТЭ, 1986, 5, с.35.
6. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ, I3-80-857, Дубна, 1980.
7. J.Del Peso, E.Ros, Nucl. Instr. and Meth., A276, (1989), 456.
8. L.Bugge, Nucl. Instr. and Meth., A242, (1986), 228.
9. A.Drescher et al., Nucl. Instr. and Meth., A237, (1985), 464.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 августа 1991 года.

Афанасьев С.В. и др.

P13-91-380

Электромагнитный калориметр
с волоконно-оптическим съемом света

Проведены исследования прототипа электромагнитного калориметра со спектросмещающими волокнами для съема света. Калориметрические модули представляли собой сэндвич из свинцовых и сцинтилляционных пластин. Волокна были пропущены сквозь просверленные перпендикулярно пластинам отверстия. Калориметр исследовался на пучках адронов, мюонов и электронов в диапазоне энергий от 0,5 до 4,5 ГэВ. Среднее энергетическое разрешение для электронов получено на уровне $11,4\%/\sqrt{E}$. Используя два различных метода, мы провели восстановление координаты центра электромагнитного ливня. Для лучшего алгоритма было получено координатное разрешение, равное 3,9 мм. Дополнительно нами были исследованы световыход, однородность светосбора и π - e разделение для этого калориметра.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.
Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1991

Перевод авторов

Afanasiev S.V. et al.

P13-91-380

An Electromagnetic Calorimeter with
Wavelength Shifting Fiber Readout

We have investigated response of an electromagnetic calorimeter using wavelength shifting fibers for the readout. The calorimeter has been built as a sandwich of lead and scintillator plates. The fibers have been inserted into holes perpendicular to the plates. This calorimeter has been exposed to electrons, hadrons and muons in the energy range between 0.5 and 4.5 GeV, obtaining an average energy resolution of $11.4\%/\sqrt{E}$ for electrons. We have applied two algorithms for reconstruction the central position of an electromagnetic shower. The better algorithm has given a spatial resolution of 3.9 mm. We have studied also light yield, uniformity of response and π - e separation.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1991