



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

97-65
На правах рукописи

Мельников Евгений Александрович

**ОПТИМИЗАЦИЯ, РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА
УСТАНОВКИ PHEPIX**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 1997

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук В.И. Кочетков.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.И. Рыкалин,
доктор физико-математических наук А.И. Голутвин.

Ведущая организация – Институт теоретической и экспериментальной физики
(г. Москва).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 1997 г. в
_____ часов на заседании диссертационного Совета при ИФВЭ по адресу:
142284, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 1997 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1997

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В течение последних лет большой интерес вызывает задача образования нового состояния материи — кварк-глюонной плазмы — и изучения ее свойств. В настоящее время специально для решения этой задачи в Брукхэйвенской национальной лаборатории (BNL, USA) осуществляется строительство ускорителя-коллайдера тяжелых ионов RHIC. Новый коллайдер будет способен ускорять тяжелые ионы различных элементов (вплоть до золота) с энергией $E=100$ ГэВ/нуклон и светимостью $L = 2 \times 10^{26}$ см⁻¹ сек⁻¹. Запуск ускорителя RHIC планируется осуществить в апреле 1999 года.

Одной из крупных экспериментальных установок на RHIC является детектор PHENIX. Задача установки PHENIX состоит в изучении свойств кварк-глюонной плазмы во всем диапазоне ее возможных проявлений на RHIC. Хорошая идентификация электронов, фотонов и мюонов, определение их импульсов и координат во всем диапазоне энергий, свойственном для центральных соударений на RHIC — характерные особенности установки PHENIX.

Одним из основных детекторов установки PHENIX является электромагнитный калориметр, задачи которого состоят в идентификации электронов и фотонов, измерении их энергии и координаты, обеспечении триггера на события, когда электроны и фотоны рождаются с высоким поперечным импульсом.

Цель диссертационной работы состояла в оптимизации, создании и исследовании электромагнитного свинцово-сцинтилляционного калориметра типа “шашлык” для эксперимента PHENIX.

На защиту представляются:

1. Результаты изучения характеристик фотодетекторов калориметра, специально разработанных для эксперимента PHENIX фотоумножителей ФЭУ-115М, впервые используемых в крупных физических установках.

2. Результаты исследований по определению оптимального состава сцинтилляционных добавок для полистирольных пластин калориметра, измерения физических характеристик сцинтилляционных пластин, изучения влияния параметров пластин на характеристики калориметра.
3. Результаты исследований по определению оптимального спектросмещающего волокна для калориметра.
4. Результаты исследований физических характеристик калориметра на пучке частиц ускорителя, космических частицах и с помощью радиоактивного источника.
5. Разработанная методика калибровки калориметра на космических мюонах с использованием лазерной системы мониторинга и результаты калибровки калориметра.

Научная новизна и практическая ценность диссертационной работы состоят в следующем:

- Создан электромагнитный свинцово-сцинтилляционный калориметр типа "шашлык" с характеристиками, отвечающими лучшим мировым стандартам в этом классе детекторов.
- Специально для калориметра PNENIX был разработан фотоумножитель ФЭУ-115М, являющийся модернизацией известного фотоумножителя ФЭУ-115 и отличающийся увеличенным пределом линейности по выходному импульсному анодному току и повышенной квантовой эффективностью фотокатода в зеленой области спектра. Характеристики ФЭУ-115М позволяют найти широкое применение этих фотоумножителей при создании сцинтилляционных детекторов.
- Проведены комплексное исследование и оптимизация основных составных частей калориметра — фотодетекторов, сцинтилляционных пластин и спектросмещающих волокон.
- Созданы измерительные стенды и разработана комплексная методика контроля качества производства сцинтилляционных пластин и модулей калориметра, что позволило создать детектор с высокой однородностью световыходов.
- Создана методика калибровки калориметра вне пучка на космических мюонах с использованием лазерной системы мониторинга, позволяющая обеспечить набор экспериментальных данных, начиная с момента запуска ускорителя.

Апробация результатов и публикации

Диссертация написана на основе работ, выполненных в Отделе нейтринной физики ИФВЭ с 1993 по 1997 гг. при разработке и создании электромагнитного свинцово-сцинтилляционного калориметра установки PNENIX. Работы, составляющие основное содержание диссертации [1÷4], опубликованы в виде препринтов

ИФВЭ, статей в журналах "IEEE Transactions On Nuclear Science", "Приборы и техника эксперимента" и их переводных дубликатах, изданных на английском языке издательством *Plenum Publishing Corporation*. Результаты работ докладывались на международных рабочих совещаниях по проекту PHENIX (Протвино, 1993 г., БНЛ, 1994, 1996 гг., Владимир, 1995 г.) и сессии *American Physical Society* (Вашингтон, 1997 г.).

Объем и структура диссертации

Работа изложена на 97 страницах, состоит из введения, четырёх глав и заключения, содержит 50 рисунков, 9 таблиц и список цитируемой литературы из 55 наименований.

Содержание работы

В первой главе сформулированы цели эксперимента PHENIX, кратко описаны детекторы установки, представлены их основные задачи и характеристики. Подробно описана конструкция электромагнитного свинцово-сцинтилляционного калориметра, представлены схемы лазерной системы мониторинга и системы регистрации сигналов с калориметра.

Установка PHENIX представляет собой трёхплечевой спектрометр (рис.1).

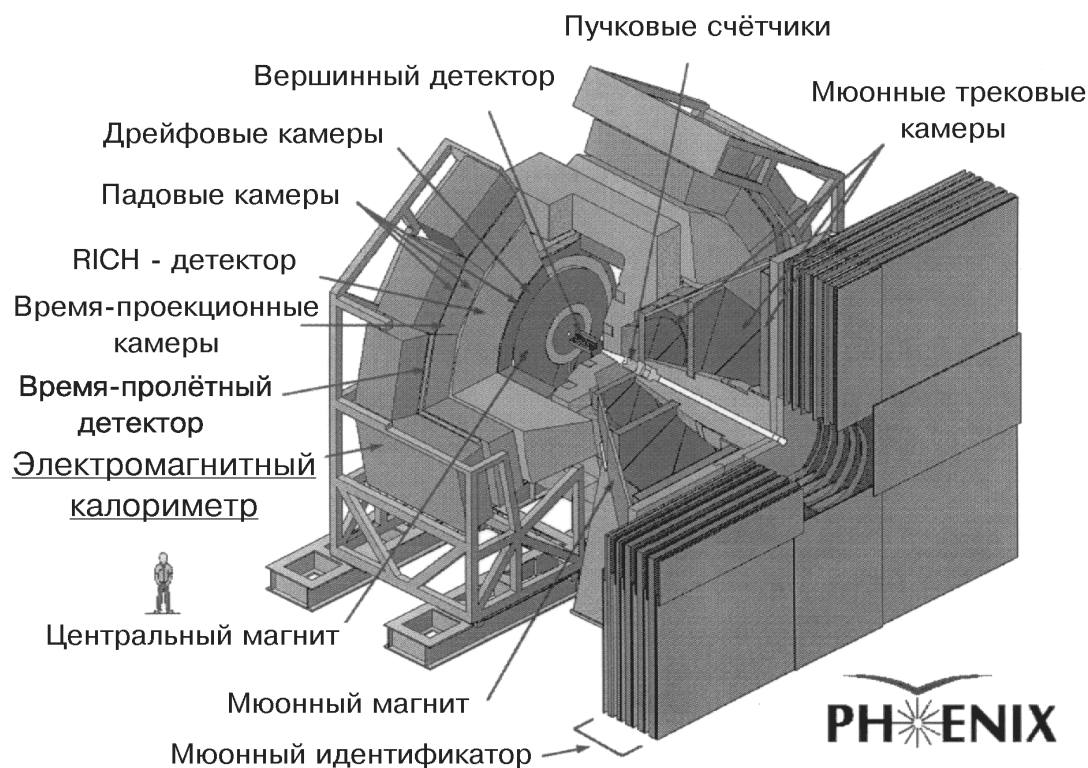


Рис. 1. Общий вид установки PHENIX.

Два центральных плеча спектрометра расположены симметрично относительно центрального магнита установки с аксиально направленным полем. Каждое из центральных плечей установки перекрывает диапазон по псевдобыстроте $\Delta\eta = \pm 0,35$ (или по полярному углу $\theta = (90 \pm 20)^\circ$) и по азимутальному углу $\Delta\phi = 90^\circ$. Центральные плечи установлены с промежутком $\Delta\phi = 45^\circ$ в верхней части детектора. Центральная часть спектрометра предназначена для регистрации электронов, фотонов и заряженных адронов. Третье плечо спектрометра расположено в диапазонах: полярного угла $10^\circ \leq \theta \leq 35^\circ$ и азимутального угла $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$. Эта часть спектрометра служит для регистрации мюонов и содержит детекторы для измерений треков заряженных частиц. Радиально направленное поле мюонного магнита используется для измерения импульсов заряженных частиц.

Электромагнитный калориметр установки PHENIX состоит из двух частей: сэмплинг-калориметра PbSc типа “шашлык” с последовательно расположенными слоями свинец-сцинтиллятор и волоконным съёмом света, и калориметра PbGl из свинцового стекла. Общая площадь, перекрываемая калориметром, составляет $\approx 60 \text{ м}^2$, из них 75% площади занимает PbSc-калориметр. Калориметр расположен в двух центральных плечах установки на расстоянии ≈ 500 см от оси пучка, перекрывает диапазон по псевдобыстроте $\Delta\eta = \pm 0,35$ (или по полярному углу $\theta = (90 \pm 20)^\circ$) и по азимутальному углу $\Delta\phi = 2 \times 90^\circ$ ($\Delta\phi(\text{PbSc}) = 1,5 \times 90^\circ$; $\Delta\phi(\text{PbGl}) = 45^\circ$). Обе части калориметра имеют сравнимые энергетическое и временное разрешения, хотя башни PbGl-калориметра имеют лучшую сегментацию $4 \times 4 \text{ см}^2$, чем башни PbSc-калориметра — $5,5 \times 5,5 \text{ см}^2$. PbSc- и PbGl-калориметры являются основными детекторами установки для идентификации электронов и фотонов по E-p соответствию для электронов, по форме ливня и временным характеристикам для электронов и фотонов.

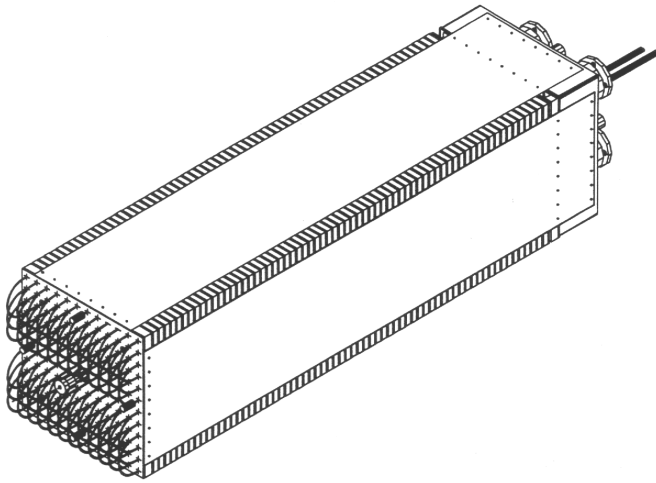


Рис. 2. Общий вид модуля электромагнитного PbSc-калориметра типа “шашлык” установки PHENIX.

Конструктивной единицей PbSc-калориметра является модуль, общий вид которого показан на рис.2. Поперечные размеры модуля $110 \times 110 \text{ мм}^2$, глубина модуля 18 радиационных длин X_0 . Модуль состоит из четырёх идентичных, оптически независимых башен с поперечными размерами $55,2 \times 55,2 \text{ мм}^2$. Каждая башня состоит из 66 последовательных слоёв 4-мм сцинтилляционных пластин, пластин из белой светоотражающей бумаги TYVEK и 1,5-мм свинцовых пластин.

Сцинтилляционные пластины имеют состав добавок 2,5%РТ+0,01%РОРОР и изготавливаются из гранулированного полистирола методом литья под давлением. Оптическая независимость башен осуществляется светоотражающим слоем алюминия, напыленным в вакууме на боковые поверхности сцинтилляционных пластин. По всей глубине каждой башни имеются 36 сквозных отверстий диаметром около 1,5 мм, в которые заведены спектросмещающие волокна ВCF-99(29А) диаметром 1,0 мм. Расстояние между центрами соседних волокон около 9 мм. С передней стороны калориметра волокна изгибаются, образуя петлю, с обратной стороны каждой башни формируется пучок волокон, который полируется и состыковывается с фотокатодом фотоприёмника. В качестве фотоприёмника для калориметра используется фотоумножитель ФЭУ-115М, который имеет 12-диодный каскад усиления и сдвинутый по чувствительности в зелёную область мультищелочной фотокатод с рабочим диаметром 25 мм. Прочность конструкции модулей PbSc-калориметра осуществляется лентами из нержавеющей стали толщиной 0,12 мм, которые привариваются к металлическим крышкам конструктива модулей на каждую из четырёх боковых сторон.

Система мониторинга калориметра основана на использовании ультрафиолетового света лазера для возбуждения сцинтилляционных пластин и получения отклика детектора. Использование лазерной системы мониторинга калориметра определила следующие конструкционные особенности модуля:

- Один из углов сцинтилляционных пластин, направленный к центру модуля, отсечен (отсеченная часть — равнобедренный треугольник с катетами по 2 мм). При нанесении алюминия на боковые поверхности сцинтилляционных пластин этот угол защищается от напыления и остаётся прозрачным для проникновения лазерного света внутрь пластины.
- В образованный промежуток в центре модуля вставлен ПММА-стержень диаметром 2 мм с диффузионной поверхностью, распределяющий через ненапыленные углы пластин ультрафиолетовый свет от лазера между башнями модуля.

Свет лазера с длиной волны 355 нм через транспортные кварцевые волокна и систему оптических распределителей света (сплиттеров) поступает на каждый модуль, что позволяет откалибровать калориметр вне пучка с помощью космических мюонов, а также контролировать дрейф фотоумножителей и эффекты старения сцинтиллятора и спектросмещающих волокон в процессе эксплуатации детектора. Для нормировки на величину лазерного сигнала используются реперные фотодиоды, установленные для каждого сплиттера.

Сборочной единицей PbSc-калориметра является супермодуль, состоящий из матрицы 6×6 модулей (144 башни). PbSc-калориметр состоит из 6 идентичных секторов, каждый из которых содержит по 18 супермодулей (6 супермодулей по горизонтали и 3 супермодуля по вертикали). Общее число каналов PbSc-калориметра 15552, вес активной части детектора около 70 тонн. Суммарное количество спектросмещающего волокна, используемого для PbSc-калориметра, составляет ≈ 300 км.

Схема регистрации сигналов с калориметра следующая: высокое напряжение питания ФЭУ подается на группы из 48 каналов, образованных каждыми двумя соседними вертикальными колоннами модулей внутри супермодуля. Одинаковая для всех фотоумножителей внутри группы величина высокого напряжения подбирается индивидуально для каждой группы. Сигналы с каждой башни супермодуля поступают на VGA-усилители с переменным коэффициентом усиления $K \leq 3$, расположенные на 144-канальной карте регистрирующей электроники. VGA-усилители используются для окончательной балансировки калориметра после подбора ФЭУ к башням детектора. Карта осуществляет обработку амплитудной и временной информации с супермодуля и формирует сигналы для выработки триггера.

Во второй главе представлены результаты работ по оптимизации калориметра: изучения характеристик фотодетекторов калориметра - фотоумножителей ФЭУ-115М на специально созданном автоматизированном стенде, выбора состава сцинтиллятора и конструкции сцинтилляционных пластин, изучения физических характеристик пластин и влияния разброса световых выходов пластин на энергетическое разрешение калориметра, выбора спектросмещающего волокна, изучения физических характеристик волокон и зависимости светосбора от конструктивных характеристик модуля.

Для измерения характеристик ФЭУ-115М был создан универсальный автоматизированный стенд, на котором были изучены основные параметры фотоумножителей — зависимость усиления от значения высокого напряжения питания ФЭУ, линейность отклика, неоднородность и квантовая эффективность фотокатода [?]. Зависимость усиления для измеренных фотоумножителей от напряжения питания параметризовалась функцией $A = C \times (V/V_0)^k$ при $V_0 = 1$ кВ. Среднее значение параметра K для ФЭУ-115М составило $K = 9,7 \pm 0,4$. Распределение по пределу линейности выходного импульсного тока для ФЭУ-115М, при котором отклонение от линейности выходного сигнала составляет 2%, не является гауссовым и имеет длинный “хвост” в области больших токов. Максимум распределения соответствует амплитуде тока 80 мА, а среднее значение — 92 мА. Нелинейность отдельных образцов ФЭУ-115М составляет <2% вплоть до значений тока 200 мА.

Измерение геометрической неоднородности чувствительности фотокатода ФЭУ-115М проводилось методом сканирования центральной области входного окна размером 10×10 мм² световым пятном диаметром 1 мм. Сканирование осуществлялось с шагом 1 мм в двух взаимноперпендикулярных направлениях. В качестве меры неоднородности фотокатода использовалось отношение σ/A , где A — среднее значение отклика фотоумножителя по точкам сканирования, σ — среднеквадратичное отклонение. Среднее значение неоднородности фотокатода для измеренных ФЭУ составило $\sigma/A = (3,4 \pm 2,0)\%$.

Измерение квантовой эффективности ФЭУ-115М осуществлялось методом сравнения отклика измеряемого фотоумножителя с откликом калибровочного ФЭУ, спектральная квантовая чувствительность фотокатода которого была известна. Среднее значение квантовой эффективности для партии из 8800 штук ФЭУ-115М

при длине волны света $\lambda=500$ нм составило 14,8% (рис.3а), а среднее значение интегральной квантовой эффективности в диапазоне спектра высвечивания волокна ВСФ-99(29А) для партии из 1500 штук ФЭУ-115М составило 13,6% (рис.3б).

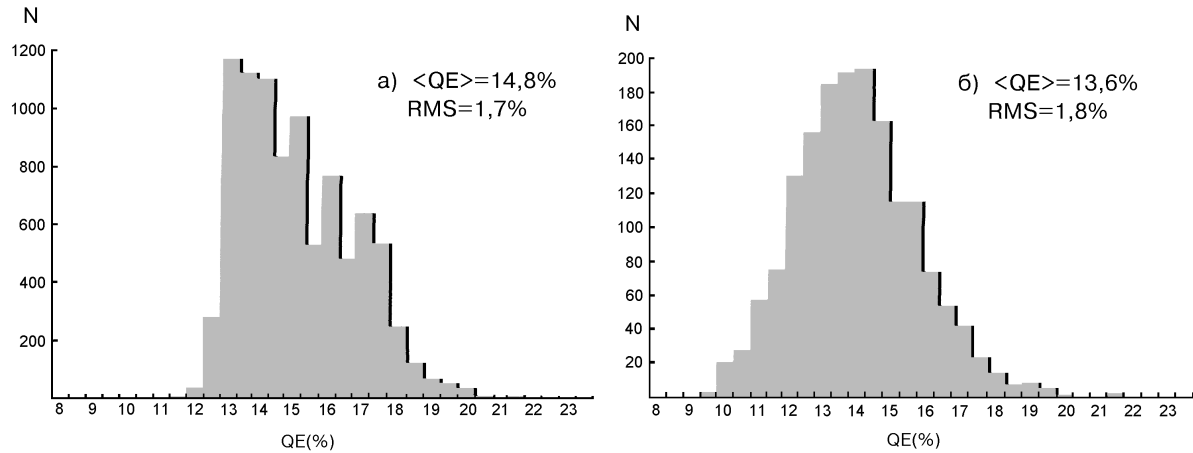


Рис. 3. Квантовая эффективность ФЭУ-115М: а) при длине волны света 500 нм; б) для спектра излучения волокна ВСФ - 99(29А).

Для изготовления сцинтилляционных полистирольных пластин электромагнитного калориметра была выбрана технология литья под давлением. С целью поиска наилучшего согласования спектров излучения и поглощения сцинтилляционных добавок пластины и волокна ВСФ-99(29А) и увеличения, таким образом, световыхода модуля калориметра были измерены спектры поглощения и излучения различных первичных (РТ, РРО, ВО) и вторичных (РОРОР, ВФ-203) сцинтилляционных добавок. Измерения физических характеристик (световыход и длина затухания) сцинтилляционных пластин проводились на специально созданном стенде с помощью радиоактивного источника. Среднее значение световыхода пластин с различным содержанием сцинтилляционных добавок определялось относительно реперной пластины по выборке из 10÷20 штук. На основании проведенных измерений был определен состав сцинтилляционных добавок для серийных пластин калориметра - 2,5%РТ+0,01%РОРОР [?].

Исследование зависимости светосбора между сцинтилляционной пластиной и спектрсмещающими волокнами для различных вариантов поверхности пластин — полированная поверхность, металлизированная поверхность, матовая поверхность и поверхность, обёрнутая светоотражающей бумагой, — показало, что лучший результат для эффективности светосбора можно получить, если верхняя и нижняя плоскости пластины полированы, а боковые — металлизированы. Измерения показали, что коэффициент отражения от металлизированной поверхности для серийно изготовленных пластин $K=0,78$, а среднее отношение световыхода I пластин с металлизированными боковыми поверхностями к световыходу I_0 пластин с полированными боковыми поверхностями (рис.4) составило $\langle I/I_0 \rangle = 1,55 \pm 0,03$.

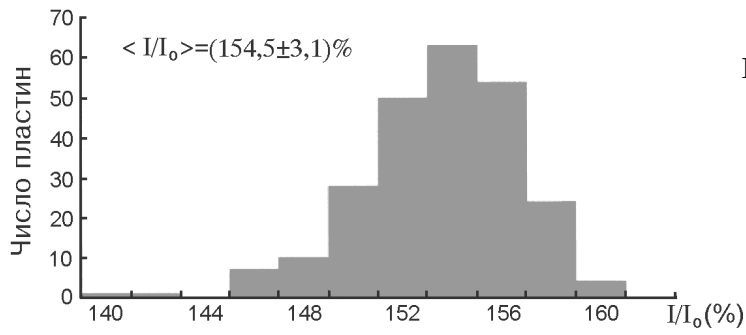


Рис. 4. Отношение I/I_0 световыхода пластин с металлизированными боковыми поверхностями I к световыходу пластин с полированными боковыми поверхностями I_0 .

Влияние разброса световыхода пластин σ_{tile} на энергетическое разрешение калориметра было рассчитано методом Монте-Карло. Зависимости параметров Δa , Δb (Δa и Δb — добавочные члены к саплинг-члену a и постоянному члену b энергетического разрешения калориметра, возникающие из-за разброса в световыходе пластин) от σ_{tile} , полученные без калибровки и с учётом калибровки модулей на мюонах и электронах, показаны на рис.5. Разброс световыхода пластин влияет главным образом на постоянный член b . Для обеспечения вклада от вариаций световыхода пластин $\Delta b < 0,5\%$ нужно, чтобы $\sigma_{\text{tile}} < 4\%$ в случае отсутствия калибровки. С учётом мюонной калибровки требования на разброс световыхода пластин становятся менее жёсткими: $\sigma_{\text{tile}} < 6 \div 7\%$.

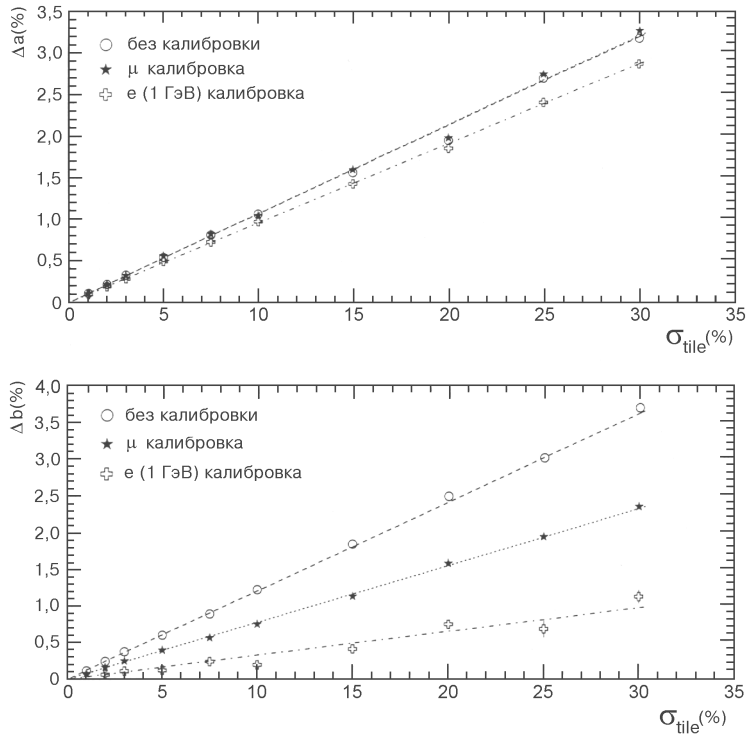


Рис. 5. Зависимость вкладов в саплинг-член Δa и постоянный член Δb от вариаций световыхода пластин σ_{tile} .

Неоднородности светосбора вдоль поверхности пластины могут влиять на разрешение калориметра. Измерения вариаций светосбора для пластин как с полированными, так и с металлизированными боковыми поверхностями были проведены с помощью радиоактивного источника. Результаты измерений вариаций светосбора вдоль линии, проходящей через центр пластин, представлены на рис.6 совместно с расчётными значениями эффективности светосбора, для которых в соответствии с проведёнными измерениями была использована величина коэффициента отражения от металлизированной поверхности $K=0,78$. Наблюдается хорошее соответствие между экспериментальными данными и результатами вычислений. Видно, что относительные вариации светосбора для пластин с металлизированными боковыми гранями меньше, чем для пластин с полированной поверхностью. Таким образом, металлизация боковых граней пластин позволяет не только увеличить светосбор, но и уменьшить его неоднородность.

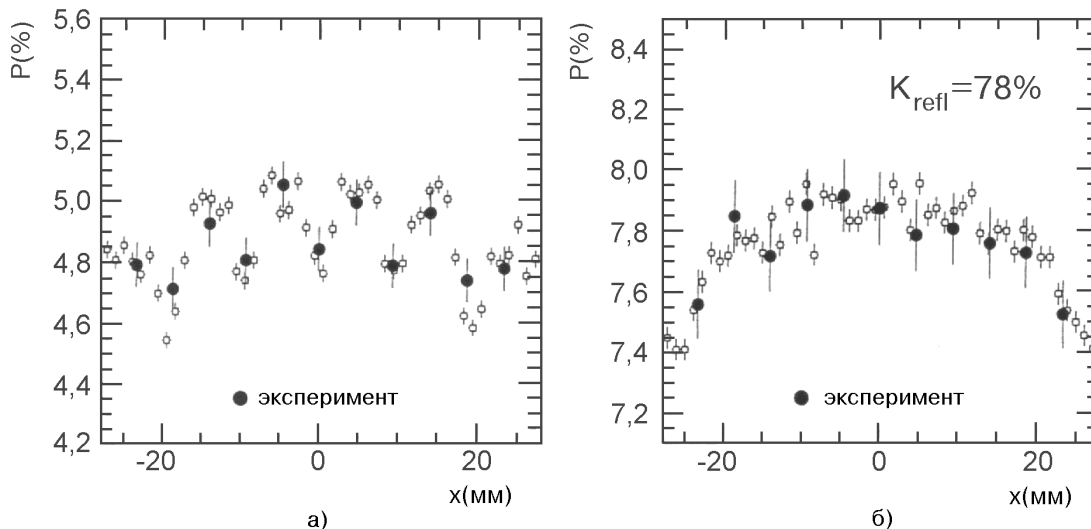


Рис. 6. Экспериментальные и расчётные величины эффективности светосбора P для пластин: а) с полированными боковыми гранями; б) с металлизированными боковыми гранями.

Возможность использования волокна в калориметре обусловлена требуемыми энергетическим и временным разрешениями, и конструкцией модуля. Волокно должно обладать наибольшим световыходом при оптимальном согласовании спектров излучения сцинтиллятора и поглощения волокна, наибольшей длиной затухания света в волокне и наименьшим временем высвечивания, быть достаточно гибким, чтобы образовать петлю с диаметром ≈ 27 мм. С целью выбора оптимального волокна для калориметра были изучены характеристики около 20 образцов волокон отечественного производства с различными переизлучающими добавками и материалами сердцевины — полистирола и полиметилметакрилата, а также широко известных волокон BCF-92, BCF-99(29A), BCF-99(29B) фирмы Vicron. На основании проведенных измерений спектров поглощения и излучения, длин затухания и световыхода волокон, а также времени высвечивания пары спектрсмещающее

волокно — полистирольный сцинтиллятор для использования в калориметре было выбрано волокно ВСF-99(29А) диаметром 1,0 мм [?].

Для определения окончательных конструктивных параметров модуля калориметра были исследованы зависимости светосбора между сцинтилляционной пластиной и спектросмещающими волокнами от числа волокон, диаметров волокон и отверстий в сцинтилляционной пластине, а также изучены характеристики кросс-токов между соседними башнями. Установлено, что зависимость эффективности светосбора P от числа волокон N_{fiber} , проходящих через пластину, имеет вид $P \sim \sqrt{N_{\text{fiber}}}$, зависимость светосбора от диаметра волокон d_{fiber} является линейной: $P \sim d_{\text{fiber}}$. Эффективность светосбора линейно уменьшается с ростом диаметра отверстий d_{hole} в пластине при постоянном диаметре волокна d_{fiber} , однако из-за малости коэффициента наклона зависимость светосбора от диаметра отверстий в пластине не оказывает существенного влияния на изменение величины эффективности светосбора.

Влияние особенностей конструкции, обусловленных лазерной системой мониторинга (отсечённые и неметаллизированные углы пластин, направленные к центру модуля), на характеристики модуля следующее:

- уменьшение эффективности светосбора около отсечённых углов;
- оптический кросс-ток между пластинами, когда свет, возникший в одной пластине, проникает в пластины из соседних башен.

Результаты вычислений эффективности светосбора вдоль всей поверхности пластины показали, что уменьшение эффективности светосбора относительно центра пластины, обусловленное отсечённым углом пластин, достаточно мало и становится $>1\%$ только на расстояниях $< 5\div 6$ мм от отсечённого угла. На расстоянии ≈ 2 мм от отсечённого угла уменьшение эффективности светосбора относительно центра пластины составляет $\approx 7\div 8\%$.

Величина оптических кросс-токов между соседними пластинами в модуле была определена расчётным путём, а также при измерениях с использованием радиоактивного источника. В качестве параметра, характеризующего величину кросс-тока между пластинами, было рассмотрено отношение P/P_0 , где P_0 — эффективность светосбора в центре одной из пластин (№1); P — эффективность светосбора в соседних пластинах при прохождении частицы через пластину №1. Результаты вычислений величин кросс-токов для диагональной пластины по отношению к пластине №1 представлены на рис.7а, а для смежных пластин по отношению к пластине №1 — на рис.7б. Наличие в центре модуля ПММА-стержня, распространяющего лазерный свет, увеличивает кросс-ток между диагональными пластинами и уменьшает его для смежных пластин. Уровень оптического кросс-тока между пластинами в модуле калориметра выше для диагональных пластин, чем для смежных. Величина кросс-тока на расстоянии 3 мм от центра модуля составляет $\approx 7\div 8\%$ для диагональных пластин и $\approx 2\%$ для смежных пластин, резко уменьшается с расстоянием от центра модуля и выходит на плато $\approx 0,3\%$ для диагональных пластин и $\approx 0,1\%$ для смежных пластин.

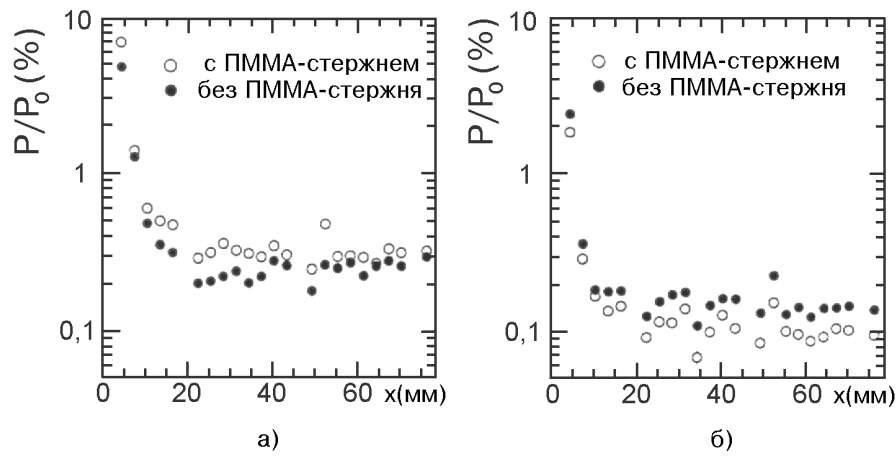


Рис. 7. Зависимость величины оптических кросс-токов от координаты сцинтилляционной вспышки: а) для диагональных пластин; б) для смежных пластин.

В третьей главе приведены результаты исследования характеристик калориметра: измерения световых модулей на космических частицах, изучения продольной неоднородности с помощью радиоактивного источника, измерения энергетического и временного разрешений, поперечной неоднородности и линейности калориметра на пучке частиц ускорителя, а также результаты набора статистики π^0 - и η^0 -мезонов.

Измерения световых модулей калориметра были проведены на космических мюонах, проходящих вдоль и поперёк модуля. Измерения проводились на серийно изготовленном супермодуле, использованном в дальнейшем для тестовых испытаний на пучке. Типичное для модуля амплитудное распределение сигналов от проходящих вдоль башни космических частиц показано на рис.8. Среднее по супермодулю значение световых модулей при прохождении минимально ионизирующей частицы вдоль (поперёк) башни, приведённое к 100%-ой квантовой эффективности фотокатода фотоумножителя, 5000 (1000) фотоэлектронов.

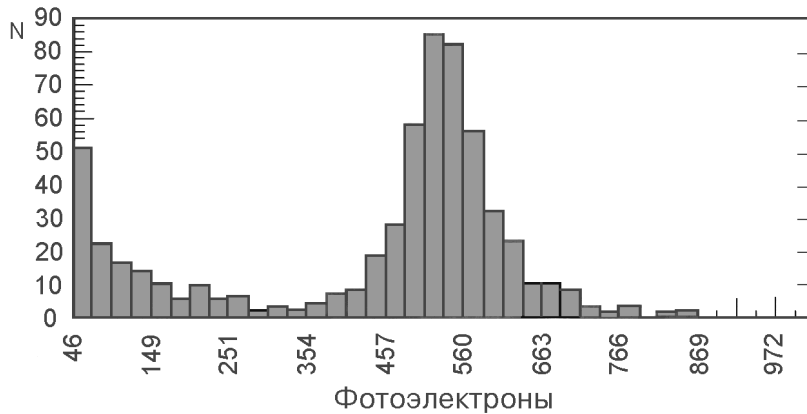


Рис. 8. Амплитудное распределение сигналов от проходящих вдоль башни калориметра космических частиц.

Ограниченная длина затухания света в волокне может привести к нелинейности энергетического отклика и ухудшению энергетического разрешения калориметра. Длина затухания света в модуле калориметра была измерена с помощью коллимированного радиоактивного источника Sr^{90} , располагавшегося поочерёдно на боковой грани каждой пластины модуля. Величины длин затухания близки для всех измеренных модулей и находятся в диапазоне $L=90\div 100$ см. Проведённые методом Монте–Карло расчёты показали, что для калориметра PHENIX с длиной $18 X_0$ эффекты, приводящие к нелинейности энергетического отклика, — ограниченная длина затухания света в волокнах и утечки ливневых частиц при высокой энергии падающих электронов — частично компенсируют друг друга и уровень нелинейности энергетического отклика $<1\%$ при $L\geq 70$ см.

Зависимости параметров энергетического разрешения калориметра — саплинг-члена a и постоянного члена b — от длины затухания света L представлены на рис.9 для калориметра с длиной $18 X_0$ и, для сравнения, с длиной $27 X_0$.

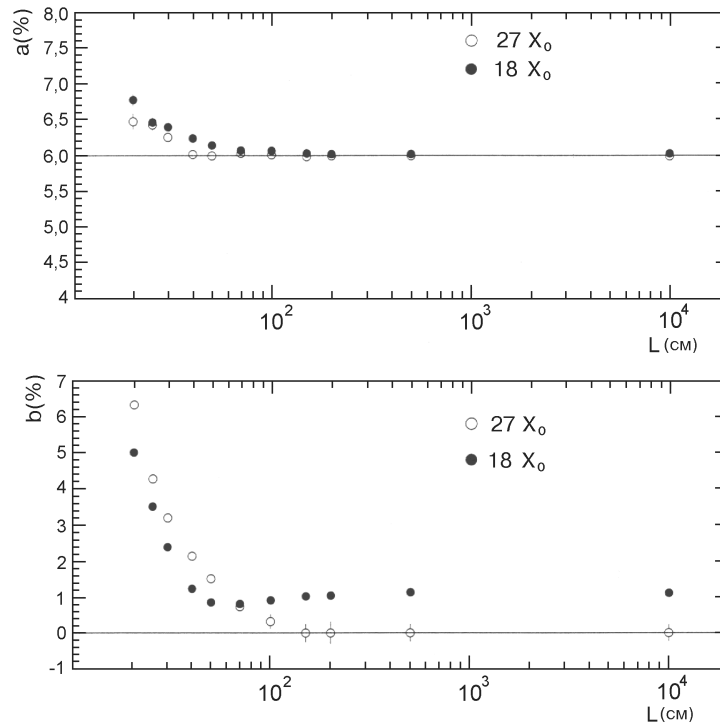


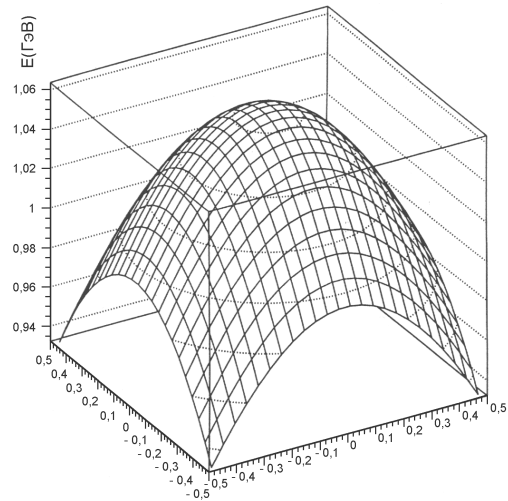
Рис. 9. Зависимость саплинг-члена a и постоянного члена b энергетического разрешения калориметров с глубиной $18 X_0$ и $27 X_0$ от длины затухания света L в модуле.

Видно, что при $L\geq 50$ см саплинг-член a одинаков для обоих длин калориметров, тогда как постоянный член b выше для калориметра с полной длиной $18 X_0$. Влияние ограниченной длины затухания волокон на саплинг-член a и постоянный член b незначительно при $L\geq 70$ см. Продольные утечки ливневых частиц определяют ненулевую величину постоянного члена b для калориметра с полной длиной $18 X_0$.

Изучение характеристик калориметра было проведено на пучке ускорителя AGS(BNL) в течение нескольких сеансов в 1995÷1996 гг. [?]. Один из серийно изготовленных супермодулей, установленный на подвижной платформе, позволяющей осуществлять сканирование башен калориметра в вертикальном и горизонтальном направлениях, был экспонирован в пучке частиц в диапазоне импульсов $0,3 \leq p \leq 7$ ГэВ/с. Первоначальная калибровка супермодуля была проведена на космических мюонах, проходящих поперечно супермодулю. Наиболее вероятное энерговыделение в башне от поперечных мюонов составляет 42 МэВ. Окончательная калибровка каналов супермодуля была проведена при сканировании супермодуля пучком электронов с энергией 1 ГэВ. Калибровочные коэффициенты, полученные из распределения мюонных пиков, с точностью $\leq 5\%$ совпали с коэффициентами, полученными при калибровке супермодуля на электронах.

Энергия частицы, проваимодействовавшей в калориметре, находилась из суммы откликов каналов в кластере, состоящем из 5×5 башен, сигналы в которых превышали порог шумов электроники 5 МэВ. Центр кластера определялся координатой точки входа частиц в калориметр. Временные характеристики калориметра находились из данных для канала кластера с максимальным откликом. Временное разрешение калориметра для электромагнитных ливней при низких значениях выделенной энергии $E < 0,2$ ГэВ определяется статистикой фотоэлектронов N ($\sigma_t \sim 1/\sqrt{N}$) и выходит на плато $\sigma_t = 100$ пс при $E \geq 0,3$ ГэВ.

Рис. 10. Карта поперечной неоднородности отклика калориметра для электрона с энергией 1 ГэВ. Точка (0;0) соответствует центру башни, точки $(\pm 0,5; \pm 0,5)$ соответствуют углам башни.



Измерение поперечной неоднородности отклика калориметра было проведено при сканировании поверхности супермодуля пучком электронов с энергией 1 ГэВ. Карта поперечной неоднородности отклика калориметра представлена на рис.10. Различие отклика калориметра при прохождении электронов в центре башни и на краю башни достигает $\approx 10\%$. При измерениях поперечной неоднородности было определено пространственное разрешение калориметра:

$$\sigma(\text{см}) = 0,7/\sqrt{E(\text{ГэВ})}.$$

Экспозиция супермодуля в пучке электронов в диапазоне импульсов $0,3 \leq p \leq 7$ ГэВ/с позволила определить зависимость энергетического разрешения калориметра от энергии (рис.11):

$$\sigma(E)/E(\%) = 1,4 \oplus 7,8/\sqrt{E}(\text{ГэВ}).$$

Нелинейность отклика калориметра в диапазоне импульсов $0,3 \leq p \leq 7$ ГэВ/с с учётом поправок на поперечную и продольную неоднородности калориметра, gate-эффекта фотоумножителей, а также точного определения импульсов частиц с помощью время-пролётной системы из сцинтилляционных счётчиков составила $\approx 1\%$.

Для набора статистики π^0 - и η^0 - мезонов перед калориметром была установлена мишень из органического стекла длиной 14 см и диаметром 3 см. π^0 -мезоны образовывались в мишени в результате реакции перезарядки при прохождении отрицательного пучка частиц. Набор статистики π^0 -мезонов проводился при различных энергиях пучка $E = 3; 5; 7$ ГэВ и расстояниях L от π^0 -мишени до супермодуля ($L = 169$ см при $E = 3; 5$ ГэВ; $L = 237$ см при $E = 5; 7$ ГэВ).

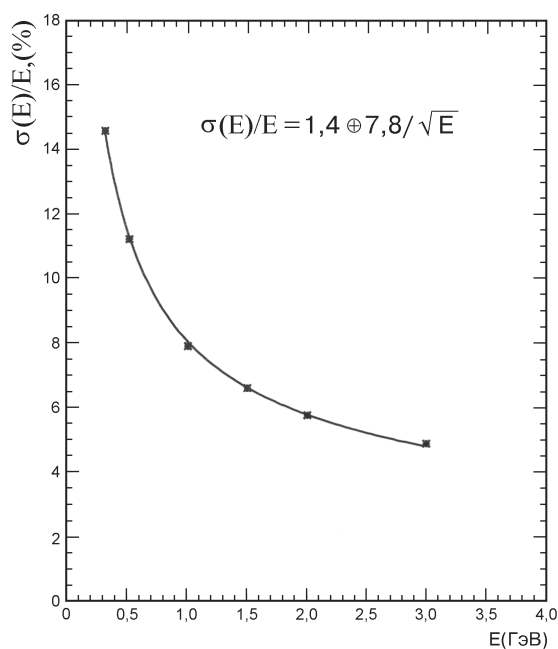


Рис. 11. Зависимость относительного энергетического разрешения калориметра $\sigma(E)/E$ от энергии E .

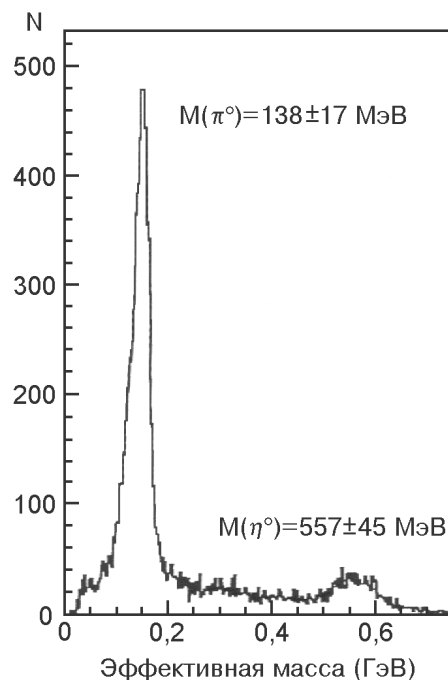


Рис. 12. On-line распределение эффективной массы частиц в двухфотонных событиях при импульсе частиц пучка $p=7$ ГэВ/с.

На рис.12 приведено on-line распределение эффективной массы частиц в двухфотонных событиях, полученное при экспонировании супермодуля в пучке частиц с импульсом $p = 7$ ГэВ/с. Видно, что π^0 - и η^0 -мезоны чётко выделяются и значения их масс составляют $m(\pi^0) = (138 \pm 17)$ МэВ; $m(\eta^0) = (557 \pm 45)$ МэВ.

В четвёртой главе представлена разработанная методика калибровки калориметра вне пучка на космических мюонах с использованием лазерной системы мониторинга, приведены полученные данные для калибровочных коэффициентов и световых башен для ≈ 4000 каналов калориметра.

Для проведения измерений на пучке RHIC калориметр должен быть откалиброван, т.е. для каждого канала должны быть известны калибровочные коэффициенты $\alpha_i = E_i / A_i$, где i — номер канала; E_i — энергия, выделяемая частицей в i -ом канале; A_i — амплитуда сигнала в i -ом канале. Так как сигналы калориметра RHENIX используются для выработки триггера всей установки, то калориметр нужно отбалансировать, т.е. отклик всех каналов детектора на одинаковую выделенную энергию должен быть выровнен. Разброс в усилении G различных экземпляров ФЭУ-115М при фиксированном значении высокого напряжения достигает величины $\Delta G \approx 10$, а максимальный коэффициент усиления VGA-усилителя равен $K=3$, поэтому для балансировки калориметра необходимо провести подбор ФЭУ к каналам детектора.

Необходимость подбора ФЭУ к каналам калориметра, а также стремление иметь детектор готовым к работе в момент запуска ускорителя RHIC, привели к решению о проведении калибровки калориметра на специальном стенде, используя космические мюоны и лазерную систему мониторинга детектора. Два сцинтилляционных счётчика размерами $100 \times 20 \text{ см}^2$, расположенные сверху и снизу супермодуля, выделяют космические мюоны, проходящие поперечно модулям калориметра. Через определённое время после мюонного триггера, на лазер поступает запускающий импульс от генератора. Импульс лазерного света транспортируется по кварцевому волокну к супермодулю и через оптический сплиттер попадает в ПММА-стержни каждого модуля, вызывая сцинтилляционную вспышку в башнях. Лазерный свет попадает также и в фотодиодную ячейку, установленную непосредственно на супермодуле и являющуюся его составной частью. На стенде калибруются поочерёдно все супермодули калориметра. Для калибровки супермодулей используется постоянный набор из 144 ФЭУ-115М с заранее измеренными параметрами усиления. Выражение для энергии E , измеряемой в башне калориметра, можно представить

$$E = \alpha(t) \times A(t) = \alpha_{t=0} \times (A_{\text{laser},t=0} / A_{\text{PD},t=0}) / (A_{\text{laser},t} / A_{\text{PD},t}) \times A(t),$$

где $t = 0$ — время калибровки калориметра на космических мюонах; t — время работы калориметра на пучке; $A(t)$ — амплитуда сигнала башни калориметра от частицы; A_{laser} — амплитуда сигнала башни калориметра от лазера; A_{PD} — амплитуда сигнала реперного фотодиода, установленного на супермодуле, от лазера; $\alpha_{t=0} = E(\mu) / A(\mu)_{t=0}$.

Среднее значение энергии $E(\mu) = 42 \text{ МэВ}$, выделяемое поперечным мюоном в башне, было измерено на ускорителе AGS из соответствия энергий, выделяемых частицами пучка и космическими мюонами. Калибровка каждого супермодуля проводилась в течение ≈ 10 часов, статистика в максимуме мюонного пика каждого канала составляла ≥ 200 отсчётов. Результатом калибровки детектора на космических мюонах является получение абсолютной величины отношения

$R = A_{\text{laser}}/A_{\text{PD}}/A(\mu)$ в момент времени $t=0$. Полученные при калибровке 26 супермодулей значения отношения R представлены на рис.13.

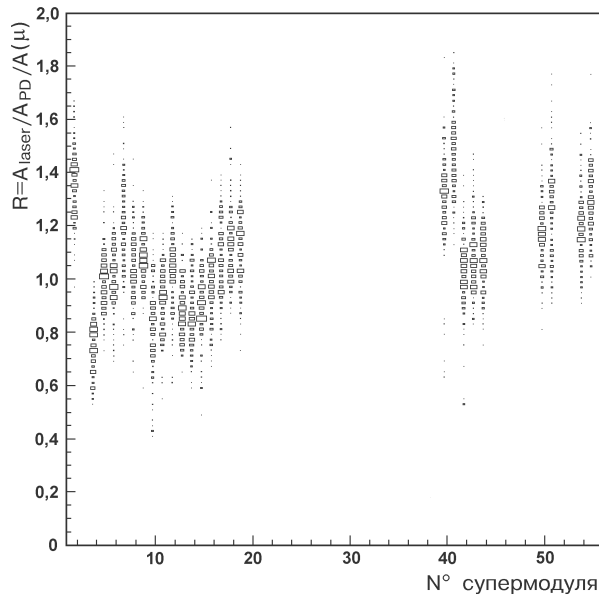


Рис. 13. Распределение величины $R=A_{\text{laser}}/A_{\text{PD}}/A(\mu)$ для 26 откалиброванных супермодулей калориметра.

Результаты измерений абсолютного световыхода башен для 26 супермодулей представлены на рис.14. Неоднородность абсолютного световыхода для ≈ 4000 каналов калориметра составила $\sigma=12,5\%$. Полученные значения $n(\gamma)$ используются для подбора ФЭУ к башням детектора. Так как для сбалансированного калориметра $A(\mu)=\text{const}$, то критерий подбора ФЭУ к башням $(QE_{\text{PMT}} \times \text{GAIN}_{\text{PMT}}) = \text{const}/n(\gamma)$.

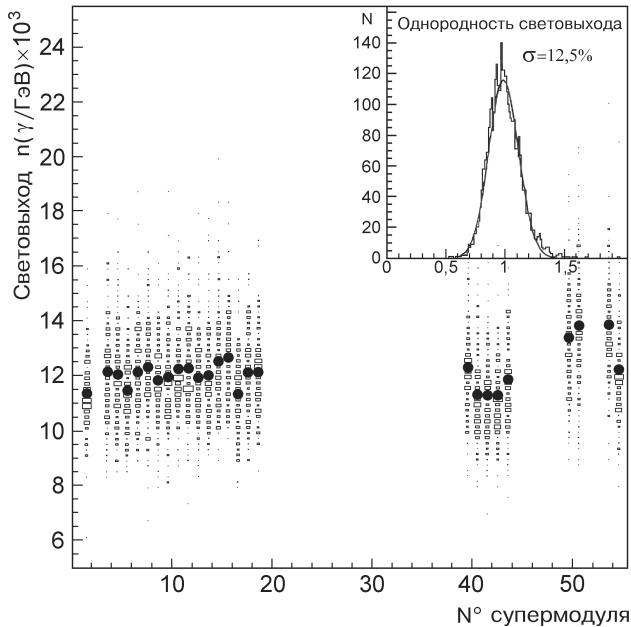


Рис. 14. Распределение абсолютного световыхода $n(\gamma/\text{ГэВ})$ для 26 супермодулей калориметра.

Для проверки методики калибровки калориметра на космических мюонах с использованием лазерной системы мониторинга в мае 1997 г. один из откалиброванных супермодулей был установлен в пучок частиц ускорителя AGS (BNL). Свет от лазера был подведен к супермодулю с помощью кварцевого волокна. Для измерений в пучке набор из 144 ФЭУ-115М, использованных при калибровке супермодуля, был заменен на другой набор ФЭУ-115М, с которыми супермодуль не калибровался. Новый набор ФЭУ был отобран, исходя из данных измерений усиления ФЭУ и световых башен супермодуля, так, чтобы обеспечить балансировку каналов с точностью лучше 5%. Каждые две соседние вертикальные колонны модулей, состоящие из 48 каналов, образовывали группу, на которую подавалось индивидуальное высокое напряжение, величина которого могла отличаться от значения высокого напряжения, при котором производилась калибровка супермодуля.

После экспонирования башен супермодуля лазерным светом, с учётом величины отношения $R = A_{\text{laser}} / A_{\text{PD}} / A(\mu)$, полученного при калибровке супермодуля на космических мюонах, были определены положения мюонных пиков в каналах детектора с новым набором ФЭУ. Набор статистики π^0 -мезонов был проведён при энергии пучка $E=2$ ГэВ с использованием мишени из органического стекла длиной 14 см и диаметром 3 см, установленной перед супермодулем на расстоянии около 2 м.

На рис.15 приведено on-line распределение эффективной массы частиц в двухфотонных событиях, зарегистрированных в калориметре. Видно, что π^0 -мезон чётко выделяется, и значение его массы составляет $m(\pi^0) = (142 \pm 16)$ МэВ. Совпадение значений масс и ширин π^0 -мезонов, полученных при калибровке супермодуля на электронах, с соответствующими величинами, полученными при калибровке супермодуля на космических мюонах с использованием лазерной системы мониторинга, позволяет сделать вывод о корректности созданной методики калибровки калориметра.

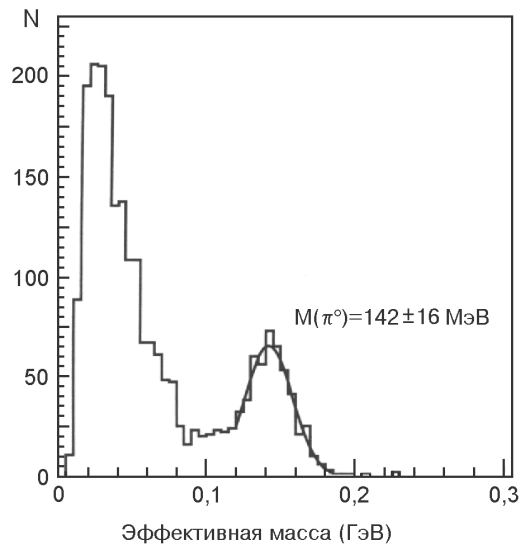


Рис. 15. On-line распределение эффективной массы частиц в двухфотонных событиях при импульсе частиц пучка $p=2$ ГэВ/с.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Разработан и создан автоматизированный стенд для измерения характеристик фотоумножителей, на котором изучены основные параметры фотодетекторов калориметра — новых фотоумножителей ФЭУ-115М: линейность, усиление, неоднородность и квантовая эффективность фотокатода. Полученные результаты измерений позволили создать фотоумножитель ФЭУ-115М с параметрами, отвечающими требованиям эксперимента PHENIX.

2. Изучена возможность использования различных сцинтилляционных добавок РТ, РРО, ВФ-203, ВО, РОРОР, для полистирольных пластин калориметра измерены спектры поглощения и излучения этих добавок. Созданы стенды для изучения характеристик пластин, на которых измерены световыходы и длины затухания пластин с различными сцинтилляционными добавками. Определён серийный состав сцинтилляционных добавок для полистирольных пластин калориметра PHENIX.
3. Изучена зависимость светосбора от типа поверхности пластин — полированная поверхность, металлизированная поверхность, матовая поверхность и поверхность, обёрнутая светоотражающей бумагой. Определён оптимальный вид поверхности пластин — полированные верхняя и нижняя плоскости и металлизированные боковые грани.
4. Измерены характеристики серийных сцинтилляционных пластин и определено влияние разброса световыхода пластин на энергетическое разрешение калориметра.
5. Изучены более 20 образцов волокон российского и иностранного производства с различными спектросмещающими добавками. Измерены их спектры поглощения и излучения, длины затухания, световыход и времена высвечивания. Определён тип волокна — ВСФ-99(29А) — для использования в калориметре PHENIX.
6. Исследована зависимость светосбора от конструктивных характеристик модуля — числа волокон в сцинтилляционной пластине, диаметра волокон и отверстий в пластине, формы отверстий в пластине.
7. Изучена зависимость величины оптических кросс-токов между башнями модуля от координаты точки высвечивания в сцинтилляционной пластине.
8. На основе работ по оптимизации сцинтилляционных пластин, спектросмещающих волокон и фотоумножителей разработана конструкция калориметра.
9. Создана комплексная методика контроля качества производства сцинтилляционных пластин и модулей калориметра.
10. На пучке частиц ускорителя, космических частицах, а также с помощью радиоактивного источника проведено исследование следующих характеристик калориметра: световыхода, продольной и поперечной неоднородности, энергетического и временного разрешения, линейности. Проведён тестовый набор статистики π^0 - и η^0 -мезонов в пучке отрицательных частиц.
11. Разработана методика калибровки калориметра на космических мюонах с использованием лазерной системы мониторинга. На основании разработанной методики создан специальный стенд, на котором к середине 1997 г. было откалибровано более 5000 каналов калориметра.

Список литературы

- [1] Беликов С.В., Гилицкий Ю.В., Гутников Ю.Е., Денисов А.Г., Кочетков В.И., Макеев В.В., Мельников Е.А., Усачёв А.П. *Характеристики фотоумножителей ФЭУ-115М для электромагнитного калориметра установки ФЕНИКС*: Препринт ИФВЭ 96-42, Протвино, 1996. // ПТЭ, 1997, т.3, с.44.
- [2] Беликов С.В., Вайт С., Гутников Ю.Е., Денисов А.Г., Дьячков А.И., Жарков В.В., Кистенёв Э.П., Кочетков В.И., Макеев А.В., Маяцкий В.А., Мельников Е.А., Усачёв А.П. *Характеристики литьевого полистирольного сцинтиллятора для электромагнитного калориметра установки ФЕНИКС*: Препринт ИФВЭ 95-91, Протвино, 1995. // ПТЭ, 1996, т.4, с.33.
- [3] Беликов С.В., Вайт С., Гутников Ю.Е., Денисов А.Г., Дьячков А.И., Жарков В.В., Кистенёв Э.П., Кочетков В.И., Макеев А.В., Макеев В.В., Мельников Е.А., Усачёв А.П. *Характеристики спектросмещающих волокон для электромагнитного калориметра установки ФЕНИКС*: Препринт ИФВЭ 95-118, Протвино, 1995. // ПТЭ, 1996, т.5, с.48.
- [4] David G., Kistenev E., Patwa A., Stoll S., White S., Woody C., Bazilevsky A., Belikov S., Chernichenkov S., Denisov A., Gilitzky Yu., Kochetkov V., Melnikov Y., Onuchin V., Semenov V., Shelikhov V., Soldatov A. : *Performance of the PHENIX EM Calorimeter*: – IEEE Transactions On Nuclear Science. June 1996, vol.43, №3.

Рукопись поступила 23 сентября 1997 г.

Е.А.Мельников.

Оптимизация, реализация и исследование электромагнитного калориметра PHENIX.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 3.10.97. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 2,37. Уч.-изд.л. 1,8. Тираж 100. Заказ 1127. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

