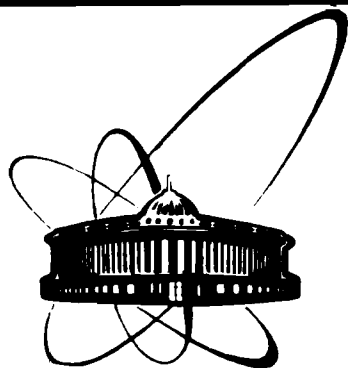


89-830



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

A 721

P13-89-830

Ю.М.Антипов¹, Ю.П.Горин¹, Ю.А.Горнушкин,
В.С.Дацко¹, П.Кантони², Р.Лейтнер, В.Лелли²,
Г.В.Мицельмахер, А.А.Ноздрин, А.Г.Ольшевский,
Ф.Паломбо², А.И.Петрухин¹, Г.М.Соловьева,
П.Л.Фрабетти²

ГОДОСКОПИЧЕСКИЙ АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР
ТИПА СЭНДВИЧА (Fe-СЦИНТИЛЛЯТОР)

Направлено в журнал "Приборы и техника
эксперимента"

¹ Институт физики высоких энергий, Серпухов

² Национальный институт ядерной физики, Италия

ВВЕДЕНИЕ

Для измерения энергии и координат адронов высоких энергий в последние годы широкое распространение получили годоскопические адронные калориметры типа сэндвича (металл (Fe, U, Pb, Cu) — сцинтиллятор) с ячеистой структурой, в которых светосбор сцинтилляционного света осуществляется с помощью световодов-смесителей спектра^{/1-15/}. Использование последних существенно упрощает конструкцию ячейки и позволяет создавать удобные в эксплуатации широкоапертурные калориметры.

В последние годы наблюдается также существенный прогресс в теоретическом понимании адронной калориметрии^{/16-19/}.

В настоящей работе приведены описание конструкции и результаты измерения характеристик секционного Fe-сцинтилляционного адронного калориметра с апертурой 4 м^2 , созданного для экспериментов на установке СИГМА-АЯКС, работающей на ускорителе ИФВЭ.

ОПИСАНИЕ КАЛОРИМЕТРА

Автономным элементом калориметра является секция, содержащая четыре счетчика полного поглощения с поперечными размерами $20 \times 20 \text{ см}$. Калориметр представляет собой матрицу из 24-х секций (96-счетчиков) — 3×8 (12×8 счетчиков) по горизонтали и вертикали соответственно. Апертура калориметра $2,5 \times 1,6 \text{ м}^2$, общий вес — 30 т^* .

Схематический вид и фотография секции приведены на рис. 1 и 2. Конструктивно она представляет собой сборный стальной контейнер с размерами $200 \times 825 \times 1190 \text{ мм}$, в котором размещены 40 стальных пластин-поглотителей сечением $194 \times 800 \text{ мм}^2$ и толщиной 20 мм (полная толщина — $80 \text{ см} \approx 5$ ядерных длин), прослоенные рядами из пластин пластического сцинтиллятора сечением $194 \times 199 \text{ мм}^2$ и толщиной 5 мм (полная толщина сцинтиллятора — 20 см), и световоды-смесители спектра сечением $198 \times 3 \text{ мм}^2$, длиной 1150 мм. Пластины-поглотители подвешены с помощью специальных вкладышей на боковых стенках

* В настоящее время изготовлено еще 8 секций и, таким образом, апертура составит $5,3 \text{ м}^2$, вес 40 т.

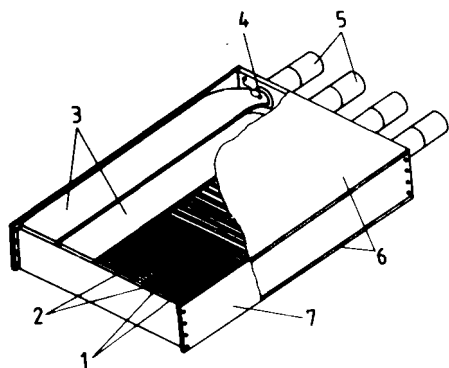


Рис. 1. Схема секции адронного калориметра. 1 — пластины стального поглотителя, 2 — пластины сцинтиллятора, 3 — световоды-смесители спектра, 4 — импульсный светодиод, 5 — корпуса ФЭУ, 6 — верхняя и нижняя крышки из жести, 7 — боковая стенка секции.

контейнера, имеющих толщину 12 мм. Для обеспечения светоизоляции сверху и снизу секция закрывается съемными крышками из жести толщиной 1 мм. Корпуса фотоумножителей (ФЭУ) с магнитной защитой закреплены на задней стенке секции. Секция снабжена рымами для транспортировки краном (ее вес $\approx 1,2$ т).

В калориметре применен высококачественный полистирольный пластический сцинтиллятор^{120'}, изготовленный в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и экструдированный на установке ИФВЭ. Пластины

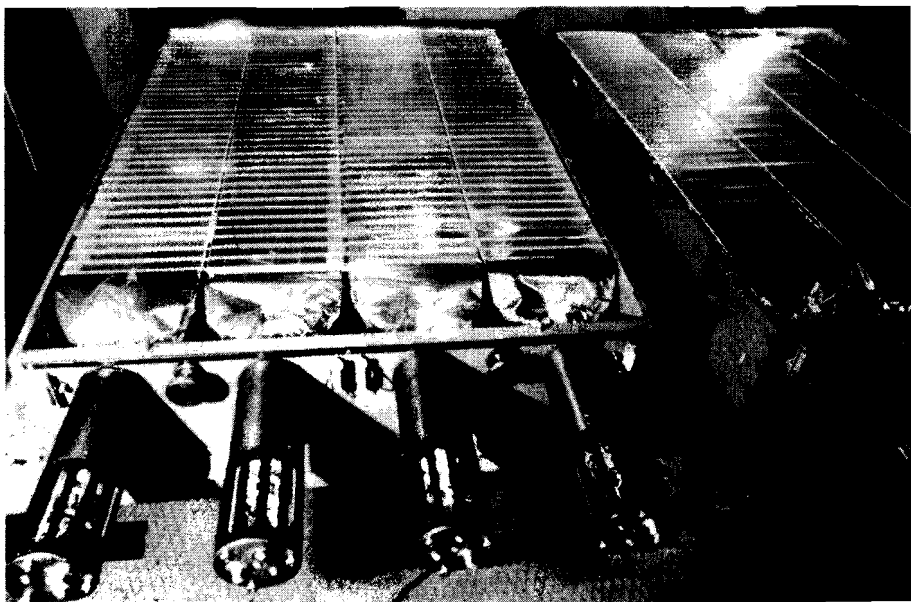


Рис. 2. Общий вид секции калориметра.

сцинтиллятора (4000 шт.) вырезались из экструдированных полос и не полировались. Для улучшения однородности светосбора они были на 1/3 обернуты черной бумагой (со стороны световода) и на 2/3 — алюминизированным майларом. Это обеспечивало также светоизоляцию счетчиков друг от друга.

Световоды, собирающие свет от сцинтилляторов, изготавливались из пластин технического органического стекла толщиной 3 мм. Смеситель спектра наносился на поверхность световода путем погружения его в раствор, причем таким образом, чтобы обеспечить переменную толщину спектросмещающего слоя для компенсации затухания света* по длине световода^{121'}. Конечная часть пластины, на которую смесь спектра не наносилась, с помощью специального приспособления формовалась в разогретом состоянии в волнообразное сечение (рис.2) с размерами, соответствующими диаметру фотокатода используемого ФЭУ. Получаемый после формовки торец световода фрезеровался и полировался.

Соединение сцинтилляторов со световодом, а также световода и ФЭУ осуществлялось без оптического контакта. Для улучшения светосбора торцы стальных пластин со стороны световода-смесителя спектра и его внешняя поверхность покрывались алюминизированным майларом.

Фотоумножитель ФЭУ-110, выбранный нами для регистрации света, имеет мультищелочной фотокатод диаметром 60 мм, максимум спектральной чувствительности которого находится в области спектра излучения смесителя спектра. Для обеспечения стабильности усиления ФЭУ в условиях высоких нагрузок предусмотрена возможность объединения общей разводкой и запитки последних четырех диодов от отдельных сильноточных источников.

Сигналы с анодов ФЭУ по высокочастотным кабелям длиной 100 м поступают на 10-битные преобразователи амплитуда-код (длительность сигнала составляла ≈ 70 нс, длительность стробирующих "ворот" была выбрана также 70 нс), а суммарный аналоговый сигнал с диодов может использоваться для выработки триггера, соответствующего определенному энерговыделению в калориметре.

Для настройки и контроля временной стабильности каналов калориметра к световодам вблизи ФЭУ были приклеены импульсные светодиоды (рис. 1), запитываемые от запускающего генератора, а непосредственно на торцы ФЭУ — пластинки сцинтиллятора толщиной 100 мкм с α -источниками^{241Am}.

* Специальные измерения показали, что получаемая длина затухания света составляет $2 \div 4$ м.

НАСТРОЙКА И КАЛИБРОВКА НА МЮОНАХ

Настройка и предварительная калибровка счетчиков калориметра были проведены на пучке мюонов с импульсом ≈ 20 ГэВ/с. Каждая секция калориметра устанавливалась на подвижную платформу, обеспечивающую горизонтальное и вертикальное перемещение. С помощью телескопа счетчиков, определяющего область пучка ≈ 1 см², проводилось облучение счетчиков секции при различных координатах. Типичный амплитудный спектр, соответствующий прохождению мюонов через счетчик, представлен на рис. 3. Спектр имеет характерную форму

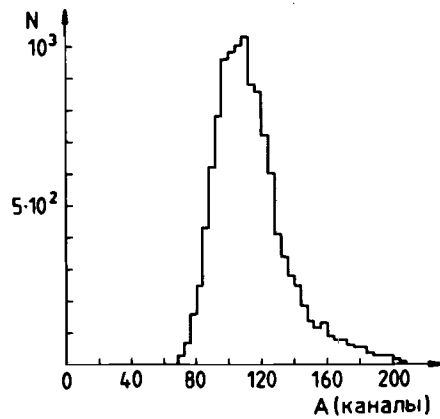
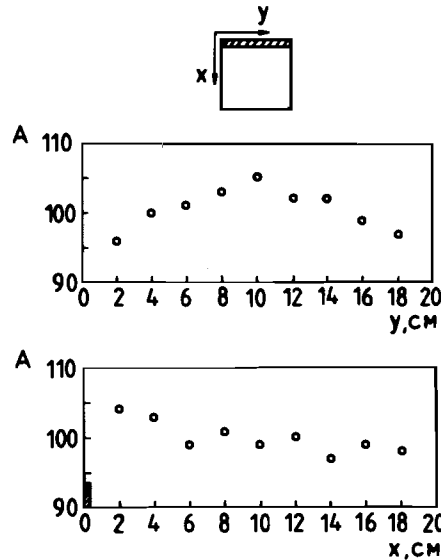


Рис. 3. Амплитудный спектр сигналов, соответствующий прохождению мюонов через счетчик калориметра.

Рис. 4. Зависимость средней амплитуды мюонных импульсов от координаты области облучения счетчика калориметра. Здесь и на следующих рисунках заштрихованным прямоугольником показано положение световода-смещителя спектра.



распределения Ландау и амплитудное разрешение $\approx 35\%$ (FWHM). На рис. 4 приведены типичные для отдельного счетчика зависимости средней амплитуды мюонных импульсов от координаты области облучения. Неоднородность светособирания по площади ячейки не превышает $\pm 5\%$.

В процессе мюонной калибровки счетчиков калориметра высокое напряжение на ФЭУ подбиралось так, чтобы средняя амплитуда мюонно-

го сигнала имела заданное значение (≈ 20 каналов) с точностью $\approx 20\%$. По амплитудным спектрам, соответствующим мюону и светодиоиду, можно оценить среднее число фотоэлектронов на фотокатоде ФЭУ, образующихся при прохождении релятивистской частицы через счетчик калориметра, которое оказалось равным ≈ 160 (≈ 4 фотоэлектрона на пластину сцинтиллятора). Полученное число фотоэлектронов — больше, чем в ряде калориметров подобного типа^{7, 8, 13}, вследствие лучших условий светосбора (использование ФЭУ большого диаметра) и качества сцинтиллятора.

КАЛИБРОВКА КАЛОРИМЕТРА НА АДРОНАХ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

После проведения мюонной калибровки секции калориметра были собраны в матрицу и установлены в рабочее положение на установке СИГМА-АЯКС^{12, 21} (после спектрометрического магнита и системы координатных детекторов). В этом положении калориметр облучался широким пучком адронов, получавшимся при взаимодействии 40-ГэВного пучка π^- -мезонов с медной мишенью толщиной 10 см. Координатная и амплитудная информация с детекторов установки записывалась на магнитные ленты. Было записано $\approx 5 \cdot 10^4$ событий.

При обработке событий импульсы вторичных заряженных адронов в диапазоне $4 \div 35$ ГэВ/с измерялись с помощью магнитного спектрометра с разрешением существенно лучшим по сравнению с разрешением калориметра ($\sigma_p/p \approx 1,5\%$ по сравнению с 18% для 10 ГэВ). При 40 ГэВ разрешения магнитного спектрометра и калориметра становятся сравнимыми (6 и 10% соответственно), поэтому при этой энергии для калибровки использовались частицы пучка, импульсный разброс которого $\approx 1\%$.

Калибровочные коэффициенты для каждого из 96 счетчиков калориметра определялись итерационным методом. Для калибровки отбирались соответствующие адронному ливню кластеры размером 3×3 счетчика вокруг локального максимума в счетчиках калориметра. Суммарная амплитуда (A) в кластере сравнивалась со значением импульса (p) налетающего адрона, измеренного магнитным спектрометром. В нулевом приближении калибровочные коэффициенты всех счетчиков предполагались одинаковыми, и для счетчика, соответствующего локальному максимуму, строилось распределение отношений A/p . На полученное среднее значение этого отношения корректировалось значение калибровочного коэффициента перед следующей итерацией, и вся процедура повторялась. Описанная процедура сходилась через 3-4 итерации.

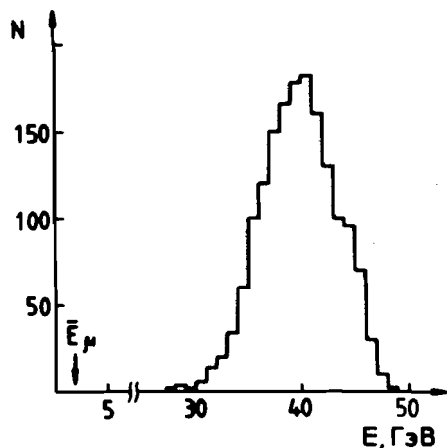


Рис. 5. Спектр суммарных амплитуд импульсов, соответствующий облучению калориметра π^- -мезонами с энергией 40 ГэВ. Стрелкой показано положение среднего значения мюонного сигнала.

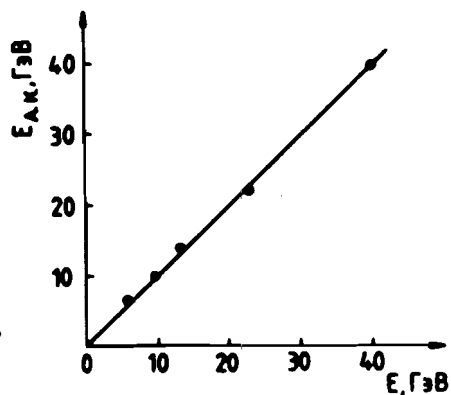


Рис. 6. Зависимость энерговыделения в калориметре $E_{A.K.}$ от энергии налетающих на него адронов E , измеренной магнитным спектрометром.

На рис. 5 приведен спектр суммарных амплитуд импульсов, соответствующий облучению калориметра π^- -мезонами с энергией 40 ГэВ. Средний сигнал от мюона $\langle E_\mu \rangle$ соответствует адрону с энергией $\approx 1,8$ ГэВ. Чувствительность калориметра (число фотоэлектронов, выбиваемых из фотокатода фотоумножителей счетчиков) составляет $N_{ф.э.} \approx 90 \text{ ГэВ}^{-1}$.

На рис. 6 приведена зависимость измеренного энерговыделения в калориметре от энергии налетающих на него адронов, измеренной магнитным спектрометром (спектр адронов был разбит на интервалы со средними энергиями $\approx 6, 9, 13$ и 23 ГэВ; 40 ГэВ — энергия пучковых π^- -мезонов). Отклонение зависимости от линейности не превышает 5%.

На рис. 7 представлена зависимость энергетического разрешения от энергии адронов. Оно составляет 10% при 40 ГэВ и аппроксимируется следующим выражением:

$$\sigma_E/E = 0,02 + 0,52/\sqrt{E},$$

где E — в ГэВ. Полученное разрешение удовлетворительно согласуется с расчетными данными, приведенными в ¹⁸. Оно определяется, в основном, сэмплинг-флуктуациями, связанными с тем, что лишь малая

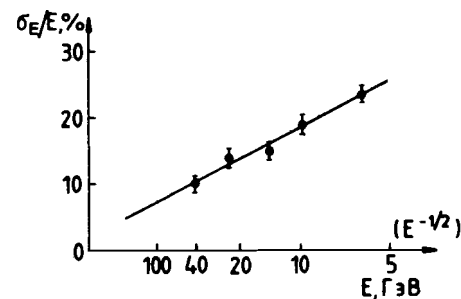


Рис. 7. Зависимость энергетического разрешения калориметра от энергии адронов.

доля энергии адронного ливня выделяется в активном веществе — сцинтилляторе. Сэмплинг-флуктуации вычисляются по формуле ¹⁷: $\sigma_c/E = 0,09\sqrt{\Delta E/E}$, где E — энергия налетающего адрона в ГэВ, а ΔE — энергетические потери в одном сэмплинг-слое ($Fe +$ сцинтиллятор) в МэВ, и составляют в нашем случае $\approx 0,44/\sqrt{E}$. Вклад в суммарное разрешение статистических флуктуаций количества фотоэлектронов невелик — $\approx 0,1/\sqrt{E}$.

Энергетическое разрешение с точностью до полученных статистических ошибок практически не зависит от координаты попадания частицы в счетчик (рис. 8).

Характеристики калориметра были изучены также на электронном пучке с энергией ≈ 25 ГэВ. Энергетическое разрешение составило $\sigma_E/E \approx 5,4\%$, что соответствует зависимости $\sigma_E/E = 0,27/\sqrt{E}$. С учетом поправки на поглощение части электромагнитного ливня в определяемом конструкцией "мертвом" веществе перед первым сцинтилляционным слоем (4 см стали) отношение сигналов e/π (электрон/адрон) получилось равным $\approx 1,1$.

Координаты адронов определялись по центру тяжести энерговыделения ливня в счетчиках калориметра. На рис. 9 приведены зависимости измеренной координаты центра тяжести адронного ливня от истинной координаты адрона (измеренной проволочными детекторами с точностью ≈ 2 мм) без коррекции и после коррекции систематических смещений, связанных с экспоненциальной формой ливня ²³. После

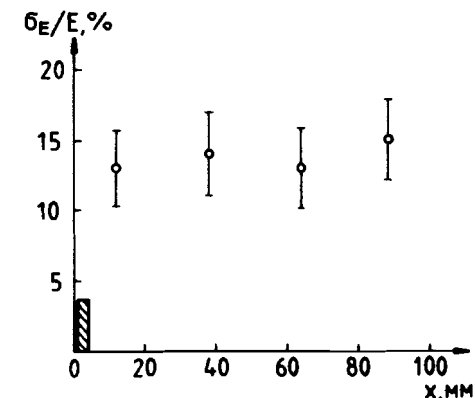


Рис. 8. Зависимость энергетического разрешения от координаты области попадания адронов со средней энергией $\langle E \rangle \approx 23$ ГэВ в счетчик калориметра. Поперечный размер счетчика разбит на области шириной 25 мм. Здесь, а также на рис. 9 и 10, показаны результаты при координатах от 0 (край счетчика) до 100 мм (центр счетчика).

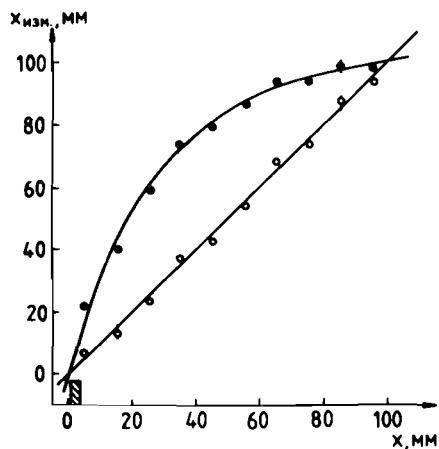


Рис. 9. Зависимость измеренной координаты центра тяжести адронного ливня $x_{изм.}$ от истинной координаты адрона: ● — без коррекции, ○ — после коррекции.

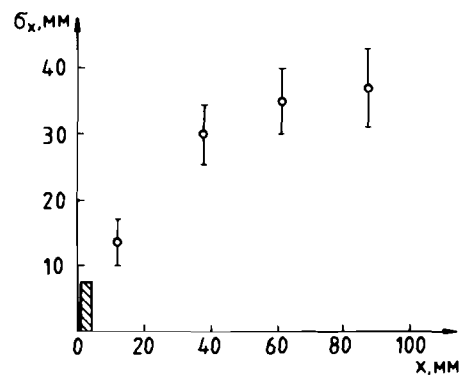


Рис. 10. Зависимость координатной точности σ_x от координаты области попадания адронов ($\langle E \rangle \approx 23$ ГэВ) в счетчик калориметра.

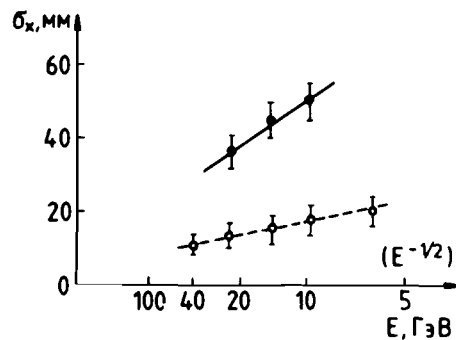


Рис. 11. Зависимость координатной точности от энергии: ● — при попадании адрона в центр счетчика калориметра, ○ — при попадании в край счетчика.

коррекции средние измеренные координаты совпали с истинными в пределах 2 мм.

Рис. 10 иллюстрирует улучшение координатной точности σ_x при приближении места попадания частицы к краю счетчика калориметра. Энергетическая зависимость координатного разрешения представлена на рис. 11. Аппроксимация дает следующие выражения:

$$\sigma_x = 7 + 136/\sqrt{E}, \text{ мм,}$$

в центре счетчика и

$$\sigma_x = 4 + 42/\sqrt{E}, \text{ мм (E в ГэВ),}$$

на краю счетчика. Среднее по ширине счетчика координатное разрешение составляет ≈ 2 см при 40 ГэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в данной работе секционный адронный калориметр в настоящее время используется в экспериментах на установке СИГМА-АЯКС для исследования редких эксклюзивных процессов взаимодействия адронов. Энергетическое разрешение составляет $\sigma_E/E = 0,02 + 0,52/\sqrt{E}$, среднее пространственное разрешение составляет ≈ 2 см при 40 ГэВ. Калориметр технологичен в изготовлении и сборке, удобен в эксплуатации, его апертура может наращиваться по мере изготовления дополнительных секций.

Авторы выражают благодарность всему коллективу сотрудничества СИГМА-АЯКС за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eckardt V. et al. — NIM, 1978, v.155, p.389.
2. Botner O. et al. — NIM, 1981, v.179, p.45.
3. Bellettini G. et al. — NIM, 1982, v.204, p.73.
4. De Marzo C. et al. — NIM, 1983, v.217, p.405.
5. Beer A. et al. — NIM, 1984, v.A224, p.360.
6. Akesson T. et al. — NIM, 1985, v.A241, p.17; NIM, 1987, v.A262, p.243.
7. Дацко В.С. и др. — Препринт ИФВЭ 87-65, Серпухов, 1987.
8. Бинон Ф. и др. — Препринт ИФВЭ 86-109, Серпухов, 1986; NIM, 1987, v.A256, p.444.
9. Битюков С.И. и др. — Препринт ИФВЭ 87-172, Серпухов, 1987; ПТЭ, 1989, №4, с.58.
10. Bernardi E. et al. — NIM, 1987, v.A262, p.229.
11. Bertolucci S. et al. — NIM, 1988, v.A267, p.301.
12. D'Agostini G. et al. — NIM, 1989, v.A274, p.134.
13. Алеев А.Н. и др. — Препринт ОИЯИ Р1-89-434, Дубна, 1989.
14. Awes T.S. et al. — NIM, 1989, v.A279, p.479.
15. Joung G.R. et al. — Ibid, p.503.
16. Brau J.E., Gabriel T.A. — NIM, 1985, v.A238, p.489.
17. Fabjan C.W. — NIM, 1986, v.A252, p.145.
18. Wigmans R. — NIM, v.A259, p.389.
19. Bruckmann H. et al. — NIM, 1988, v.A263, p.136.
20. Виноградова Н.В. и др. — Препринт ОИЯИ 13-88-176, Дубна, 1988; ПТЭ, 1989, №4, с.56.

21. Дацко В.С. и др. — В сб.: Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции по сцинтилляторам. Харьков: изд. НПО "Монокристаллреактив", 1986, с.85.
22. Вишневецкий А.В. и др. — Сообщение ОИЯИ P1-89-202, Дубна, 1989.
23. Бинон Ф. и др. — Препринт ИФВЭ 79-128, Серпухов, 1979; NIM, 1980, v.174, p.369.

Антипов Ю.М. и др.

P13-89-830

Годоскопический адронный калориметр
типа сэндвича (Fe-сцинтиллятор)

Описан годоскопический адронный калориметр типа сэндвича (Fe-сцинтиллятор), который собран из автономных секций, содержащих четыре счетчика полного поглощения с размером сечения 20x20 см. Энергетическое разрешение для адронов в диапазоне энергий $E = 4 \div 40$ ГэВ составляет $\sigma_E/E = 0,02 + 0,52/\sqrt{E}$, среднее пространственное разрешение ≈ 2 см при 40 ГэВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и Институте физики высоких энергий, Серпухов.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод М.И.Потапова

Antipov Yu.M. et al.

P13-89-830

Fe-Scintillator Hodoscopic Hadron Calorimeter

A hodoscopic hadron calorimeter of the Fe-scintillator type is described. It consists of independent sections, each containing four full absorption counters 20x20 cm in cross section. The energy resolution for hadrons in the energy range $E = 4 \div 40$ GeV is $\sigma_E/E = 0.02 + 0.52/\sqrt{E}$, the mean space resolution is ≈ 2 cm at 40 GeV.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR and IHEP, Serpukhov.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989

Рукопись поступила в издательский отдел
15 декабря 1989 года.