



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 96-62  
ОЭФ

С.А.Акименко, А.А.Деревщиков, А.С.Константинов, О.Д.Цай,  
Б.В.Чуйко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА  
ДЕТЕКТОРА ЛИВНЯ НА ОСНОВЕ  
ГАЗОВЫХ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ СЧЕТЧИКОВ**

Направлено в *ИТЭ*

Протвино 1996

**Аннотация**

Акименко С.А. и др. Исследование прототипа детектора максимума ливня на основе газовых пропорциональных счетчиков: Препринт ИФВЭ 96-62. – Протвино, 1996. – 9 с., 7 рис., 1 табл., библиогр.: 13.

Представлены результаты исследования в интервале энергий 1 – 26.6 ГэВ прототипа детектора максимума электромагнитного ливня, состоящего из газовых пропорциональных счетчиков. Для разных положений детектора внутри электромагнитного калориметра измерены координатное, энергетическое разрешения и поперечные профили электромагнитных ливней.

**Abstract**

Akimenko S.A. et al. Study of prototype shower maximum detector based on a proportional gas counters: ИФВЭ Preprint 96-62. – Protvino, 1996. – p. 9, figs. 7, tables 1, refs.: 13.

A study of a prototype shower maximum detector based on a proportional gas counters is presented. Beam tests provide results on performance parameters at the energy range from 1 to 26.6 GeV.

Создаваемая в настоящий момент многоцелевая коллайдерная установка STAR предназначена для изучения широкого класса адронных и ядерных процессов в pp-, pA- и AA-соударениях при энергии сталкивающихся пучков до 500 ГэВ на ускорителе тяжелых ионов RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории (БНЛ)[1]. Составной частью установки является электромагнитный калориметр (э.м.к.) с рабочей площадью  $\sim 90 \text{ м}^2$  и размером ячейки  $\sim 140. \times 236. \text{ мм}^2$  [2]. В районе максимума ливня на глубине  $\sim 5\text{--}7$  радиационных длин (X0) предполагается поместить детектор с более мелкой гранулярностью для разделения близко лежащих ливней и более точного определения оси ливня. Ранее нами были представлены результаты исследования детекторов максимума ливня (д.м.л.), состоящих из сцинтилляционных счетчиков [3] и пластиковых стримерных трубок [4]. В данной работе представлены характеристики д.м.л. на основе газовых пропорциональных счетчиков. Этот вариант детектора выбран для установки STAR из соображений экономичности и надежности в эксплуатации, что подтверждено успешным использованием подобного д.м.л. в эксперименте CDF во FNAL [5].

Измерения характеристик д.м.л. проводились на электронных пучках 14-го канала ускорителя У-70 (ИФВЭ) ( $e^-$  26,6 и 13.3 ГэВ) для разных положений д.м.л. по глубине и на тестовом пучке А2 ускорителя AGS в БНЛ в диапазоне энергий  $e^\pm$  1÷7 ГэВ при положении детектора на глубине 5X0 внутри э.м.к.. На рис. 1 показано оборудование, использовавшееся в БНЛ. В составе установки использовались: пучковые сцинтилляционные счетчики  $C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot \bar{A}_0$ , пороговый газовый черенковский счетчик  $\check{C}_1$  для идентификации электронов, двухплоскостной сцинтилляционный годоскоп  $H_{2xy}$  с шириной счетчиков 2 мм, прототип модуля электромагнитного калориметра (сэндвич из слоев: 5 мм Pb + 5-мм сцинтиллятор) толщиной 20 радиационных длин. Детектор максимума ливня располагался на глубине 5 радиационных длин внутри э.м.к.

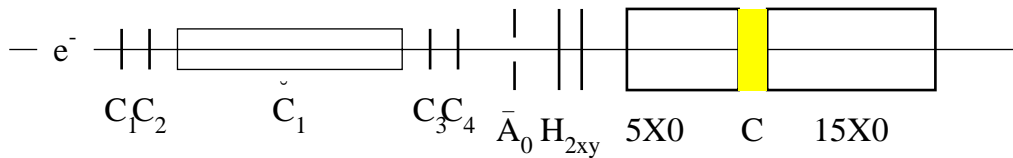


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  $C_1 \div C_4, \bar{A}_0$  — сцинтилляционные счетчики;  $\check{C}_1$  — пороговый газовый черенковский счетчик,  $H_{2xy}$  — двухплоскостной сцинтилляционный годоскоп; 5X0 и 15X0 электромагнитный калориметер; C — детектор максимума ливня.

Конструктивно д.м.л. представлял собой набор пропорциональных счетчиков с рабочей площадью  $22.4 \times 50 \text{ см}^2$ , изготовленных из алюминиевого профиля с ячейкой сечением  $6 \times 6 \text{ мм}^2$  и толщиной разделяющих ребер между ячейками 1 мм. По центру каждой ячейки натягивалась анодная проволока диаметром 50 мкм из золоченого вольфрама. На разделительные ребра через три слоя эпоксидной смолы наклеивалась крышка из стеклотекстолита толщиной 2.5 мм со стрипами шириной 13.5 мм (зазор между стрипами 0.5 мм) для формирования газового объема и съема информации о развитии ливня вдоль анодных проволок. Сигналы со стрипов и проволок поступали на линейные гибридные усилители типа "Гарантия" [6] и затем подавались на вход а.ц.п.. Использовались 12-битный а.ц.п. П-267 [7] и 11-битный LeCroy 4300 с чувствительностью 0.25 пКл/канал.

Более подробно аппаратура, использовавшаяся в ИФВЭ, описана в [8].

При измерениях в ИФВЭ использовалась газовая смесь  $50\%Ar + 50\%CO_2$  с добавлением  $\sim 0.7\%$  паров изопропилового спирта, в БНЛ использовалась газовая смесь  $85\%Ar + 15\%CO_2$ .

В связи с предполагаемой длительной эксплуатацией д.м.л. в установке STAR в условиях ограниченного доступа к детектору особые требования предъявляются к надежности работы прибора. По этой причине характеристики детектора измерялись при минимально допустимом напряжении, которое определялось чувствительностью электроники. Рабочее напряжение на детекторе при измерениях на пучках электронов с энергией 26.6 и 13.3 ГэВ было 1450 В, что соответствовало коэффициенту газового усиления  $\sim (3 \div 4) \cdot 10^3$ . При измерениях в диапазоне энергий 1-7 ГэВ счетчики работали при напряжении 1500 В, при коэффициенте газового усиления  $\sim 10^4$ .

Детектор имел линейный по энергии отклик от ливней, инициированных электронами с энергиями от 1 до 7 ГэВ, при положении д.м.л. на глубине 5X0 внутри э.м.к. Зависимость энергетического разрешения д.м.л. от энергии при положении детектора на глубине 5X0 показана на рис.2 сплошной линией.

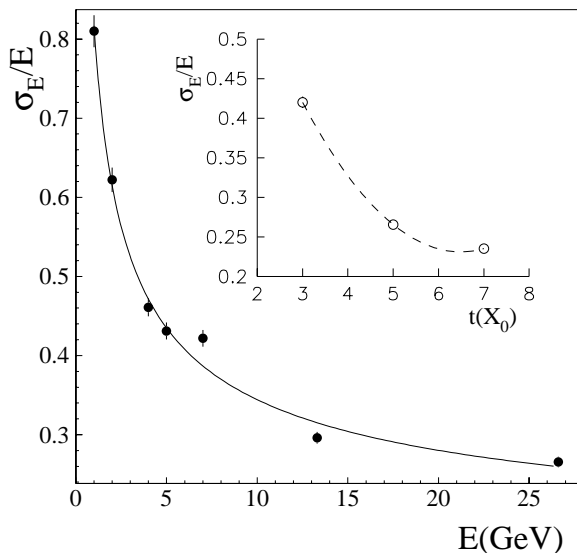


Рис. 2. Энергетическое разрешение д.м.л. Сплошной линией показана зависимость от энергии при положении детектора на глубине 5X0, пунктирной — разрешение д.м.л. для электронов с энергией 26.6 ГэВ в зависимости от положения детектора по глубине  $t$ .

Она может быть описана [4] как  $\sigma_E/E = (0.69 \pm 0.01)/\sqrt{E(\text{ГэВ})}$ . На этом же рисунке пунктирной линией показана зависимость энергетического разрешения д.м.л. от положения по глубине в э.м.к. для электронов с энергией 26.6 ГэВ. Наилучшее разрешение достигается при положении детектора в области максимума ливня. Следует отметить, что энергетические разрешения д.м.л. разного типа (сцинтиляционный годоскоп [3], стримерные трубки [4], стриповый кремниевый детектор [9], пропорциональные счетчики), помещенных на одной и той же глубине внутри э.м.к., практически совпадают и определяются флуктуациями в развитии электромагнитного ливня по глубине.

На рис. 3а показаны поперечные профили ливней от электронов с энергиями 1 и 26.6 ГэВ при положении д.м.л. на глубине 5X0. На рис. 3б профили от электронов с энергией 26.6 ГэВ при положении детектора на глубине 7X0 и 3X0. Для описания профиля ливня часто используют плотность поперечного энерговыделения в ливне в виде

$$dE/dx = a_1 e^{-x/b_1} + a_2 e^{-x/b_2}. \quad (1)$$

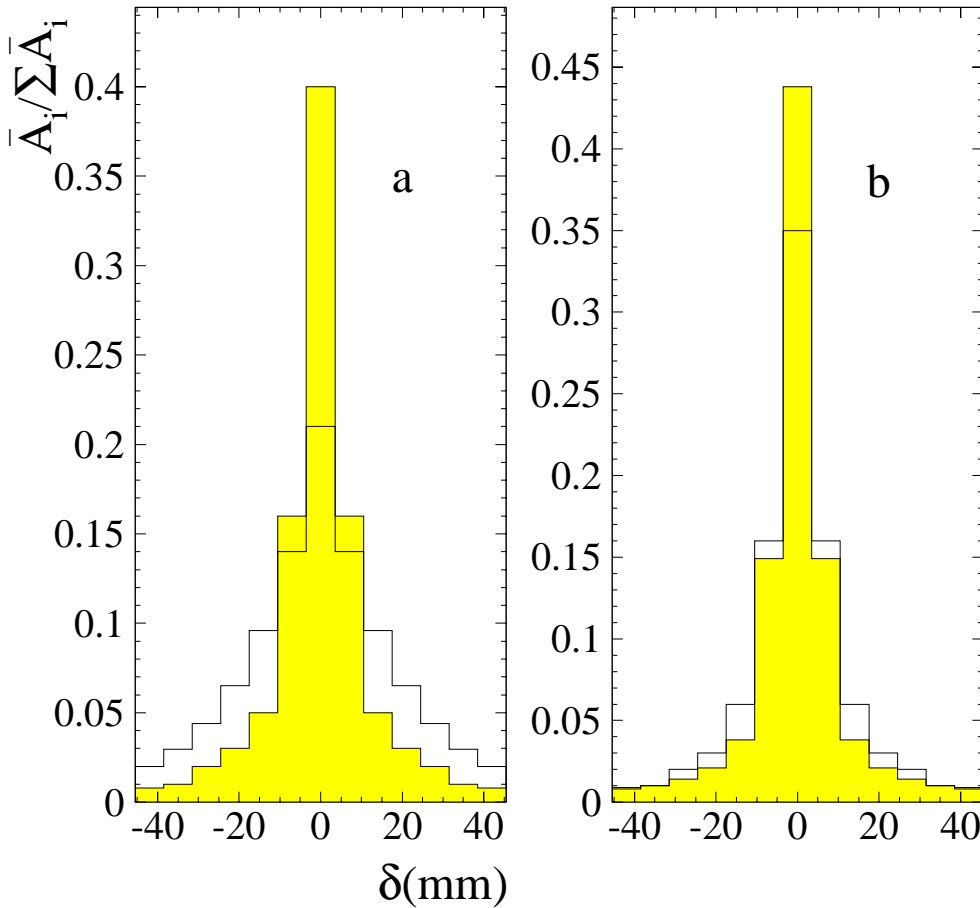


Рис. 3. Поперечные профили ливней в проволочной плоскости д.м.л.: а — положение 5X0, профили от электронов с энергией 1 и 26.6 ГэВ (заштриховано); б — энергия электронов 26.6 ГэВ, положение д.м.л. 7X0 и 3X0 (заштриховано).

В частности, в работе [10] обсуждаются результаты исследования подобного д.м.л. в диапазоне энергий от 6 до 100 ГэВ при положении детектора на глубине  $\sim 6X0$  в калориметре подобного типа. По данным [10], форма ливня при энергиях выше 10 ГэВ практически не меняется и показатели экспонент в выражении (1) соответствуют  $b_1 = 0.5$  см и  $b_2 = 2.3$  см для проволочной плоскости и  $b_1 = 0.6$  см и  $b_2 = 2.8$  см для стриповой плоскости, что согласуется с результатами наших измерений. Следует, однако, отметить, что профиль ливня неадекватно описывается зависимостью (1). Более корректное описание зависимости среднего энерговыведения в элементах д.м.л. от расстояния до оси ливня получается при использовании плотности поперечного энерговыведения в виде

$$dE/dx = \underbrace{ae^{-x^2/b}}_A + \underbrace{ce^{-x/d}}_B + \underbrace{fe^{-x/g}}_C. \quad (2)$$

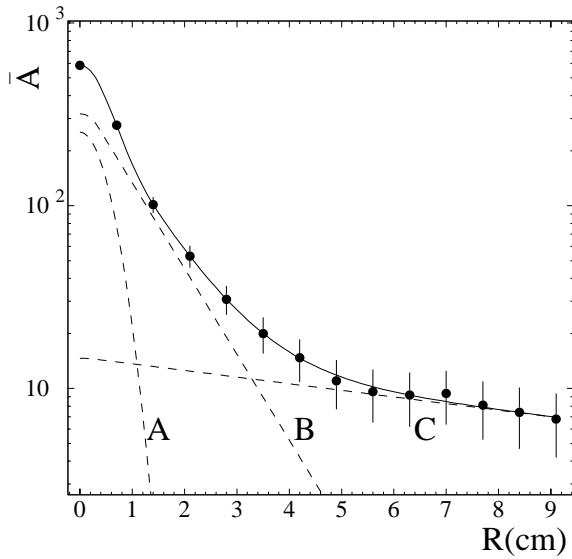


Рис. 4. Средние энерговыведения в проволочных элементах д.м.л. в зависимости от расстояния до оси ливня показаны точками. Сплошная линия — фит экспериментальных данных, при использовании плотности поперечного энерговыведения в виде (2); А, В, С вклад соответствующих членов из выражения (2) в энерговыведение в д.м.л.

На рис. 4 показаны измеренные средние энерговыведения в элементах д.м.л. в зависимости от расстояния до оси ливня; результат фитирования экспериментальных данных, используя  $dE/dx$  из (2): ( $\chi^2/ndf=1.18$ ). И там же показан вклад соответствующих членов из (2) в средние энерговыведения в элементах д.м.л. Данные приведены для положения детектора на глубине  $7X0$  для электронов с энергией 26.6 ГэВ. Значения параметров  $b$ ,  $d$ ,  $g$  в (2) слабо меняются при перемещении детектора по глубине от  $3X0$  до  $7X0$  и их характерные величины 0.35, 0.9 и 12.0 см соответственно. Полная ионизация газа д.м.л. частицами электромагнитного ливня (число ионных пар  $w_i$  согласно GEANT Монте-Карло) и относительный вклад в амплитуду сигнала соответствующих членов из выражения (2) при разных положениях детектора по глубине, по измерениям на электронном пучке с энергией 26.6 ГэВ представлены в табл.1.

Таблица 1. Полная ионизация газа д.м.л. частицами электромагнитного ливня ( $w_i$  — число ионных пар) и относительный вклад в амплитуду сигнала соответствующих членов из (2) для трех положений д.м.л. внутри калориметра. Энергия электронов — 26.6 ГэВ.

Положение д.м.л.	Число ионных пар ( $w_i$ )	Вклад в амплитуду (%)		
		А	В	С
3X0	~4230.	48.2	33.2	18.6
5X0	~10390.	37.	47.3	15.7
7X0	~14230.	24.3	59.8	15.9

Как следует из этих данных, 90% всего энерговыделения происходит в счетчиках, расположенных в зоне  $\sim 3.5$  см от оси ливня. В этой же области происходит перераспределение энерговыделения между членами А и В из (2) при перемещении д.м.л. по глубине. Следует отметить, что поперечный профиль ливня, измеряемый в газовом детекторе, существенно шире по сравнению с профилем, измеренным в сцинтилляционном годоскопе [3], для которого  $\sim 90\%$  энерговыделения происходит в счетчиках, расположенных в зоне  $\sim 1.5$  см от оси ливня. По-видимому, это связано с большой длиной пробега в газе частиц, которые составляют мягкую компоненту электромагнитного ливня и распространяются в плоскости д.м.л.

При измерениях на пучке электронов с энергией 26.6 ГэВ режим работы счетчиков мониторировался по сигналу от радиоактивного источника  $^{55}\text{Fe}$  [8]. Нарушение режима пропорциональности газового усиления, определяемое по соотношению амплитуд, соответствующих линиям с энергиями 3 и 5.9 кэВ в спектре  $\gamma$ -излучения  $^{55}\text{Fe}$  для данной смеси, наступало при напряжении 1520 В. Соответствующая этому напряжению плотность заряда положительных ионов вдоль анодной проволоочки была не менее  $7 \cdot 10^6 \text{ мм}^{-1}$ . Как указывалось ранее, рабочее напряжение на д.м.л. составляло 1450 В. При этом напряжении, исходя из расчетов методом Монте-Карло первичной ионизации в д.м.л. (табл.1), оцениваемая нами плотность заряда положительных ионов вдоль анодной проволоочки в центральном элементе д.м.л., имеющем максимальную первичную ионизацию, была не более  $3 \cdot 10^6 \text{ мм}^{-1}$ . Таким образом, вплоть до энергии 26.6 ГэВ все элементы д.м.л. работали в области пропорционального газового усиления, т.е. измеренные поперечные профили прямо пропорционально отражают первичную ионизацию газа д.м.л. частицами электромагнитного ливня.

Все измерения проводились при падении электронов перпендикулярно плоскости д.м.л. Зависимости координатного разрешения от положения и энергии пучка определялись для случая, когда электрон, инициирующий ливень, был направлен в центр одного из элементов д.м.л. Координата электрона, инициировавшего ливень, определялись согласно  $x = f(Y_a)$ , где  $f$  — калибровочная зависимость координаты точки входа электрона  $x$  от координаты оси ливня  $Y_a$ . Для определения  $f$  использовалась информация со сцинтилляционного годоскопа  $H_{2xy}$ , расположенного перед

калориметром. Координата оси ливня в плоскости д.м.л.  $Y_a$  определялась двумя методами:

$$Y_a = \frac{\sum_i w_i y_i}{\sum_i w_i}, \quad (3)$$

где  $y_i$  — координата центра  $i$ -го элемента, а  $w_i$  либо энерговыделение  $E_i$  в  $i$ -ом элементе, т.е. просто центр тяжести ливня, либо веса, которые нелинейно зависят от энерговыделения в  $i$ -ом элементе и выбираются согласно

$$w_i = \max(0, W + \ln(\frac{E_i}{\sum_i E_i})), \quad (4)$$

где  $W$  — эмпирически подбираемая константа [11]. Типичная зависимость координатного разрешения  $\sigma_x$  в стриповой плоскости от значения константы  $W$  представлена на рис.5, данные приведены для электронов с энергией 4 ГэВ.

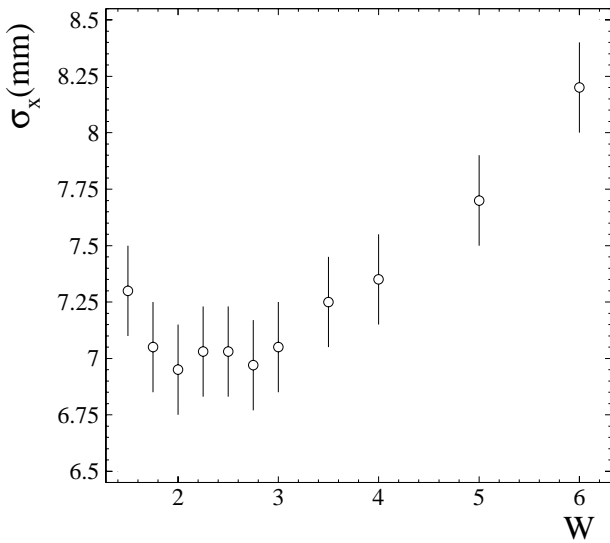


Рис. 5. Зависимость координатного разрешения от значения константы  $W$ , используемой для вычисления логарифмических весов элементов д.м.л. при определении координаты. Энергия электронов 4 ГэВ, положение д.м.л. — 5X0.

Зависимости  $\sigma_x$  от  $W$  имели широкий минимум и выбор значений  $W$  в диапазоне от 2.0 до 3.0 приводил к наилучшему координатному разрешению в диапазоне энергий от 1 до 7 ГэВ. При этом само разрешение практически совпадало с разрешением, определенным по центру тяжести ливня, когда центр тяжести определялся по пяти элементам детектора. В работе [12] представлены расчетные характеристики сцинтилляционного д.м.л. подобной геометрии. Оптимальное разрешение для электронов с энергиями 10 ГэВ и 1 ТэВ получено при значениях  $W$  равных  $\sim 2.0$  и 2.4 соответственно. Таким образом, результат расчета работы [12] совпадает с экспериментально определенным в данной работе значением  $W$ , несмотря на различие в веществе д.м.л. Интересно отметить, что и для счетчиков полного поглощения [11,13] слабая зависимость оптимального значения  $W$  от энергии  $e^-$  наблюдается в широком диапазоне энергий.

Как отмечалось ранее, поперечный профиль ливня, регистрируемый в газовом д.м.л., существенно отличается от профиля, регистрируемого в сцинтилляционном детекторе. При этом периферийные от оси ливня элементы газового детектора с



большими флуктуациями в энерговыделении дают существенно больший, по сравнению со сцинтилляционным детектором, вклад в среднюю амплитуду сигнала. Это приводит к сильной зависимости координатного разрешения газового д.м.л. от числа элементов детектора, по которым определяется центр тяжести ливня. В работе [3] изучалась зависимость координатного разрешения сцинтилляционного д.м.л. от числа элементов детектора по которым определялся центр тяжести ливня. На рис.6 показаны зависимости координатного разрешения для сцинтилляционного годоскопа с шириной счетчиков 10 мм (кривая (а)) и для проволочной плоскости газового д.м.л. (кривая (b)) от  $R$ , где  $R$  — размер зоны (от оси ливня), по которой определялся центр тяжести. Измерения проводились на пучке  $e^-$  с энергией 26.6 ГэВ при положении детекторов на глубине  $5X_0$ . Как следует из этих данных, координатное разрешение сцинтилляционного д.м.л. слабо зависит от  $R$ , и координатные разрешения обоих детекторов практически совпадают при определении центра тяжести по трем элементам.

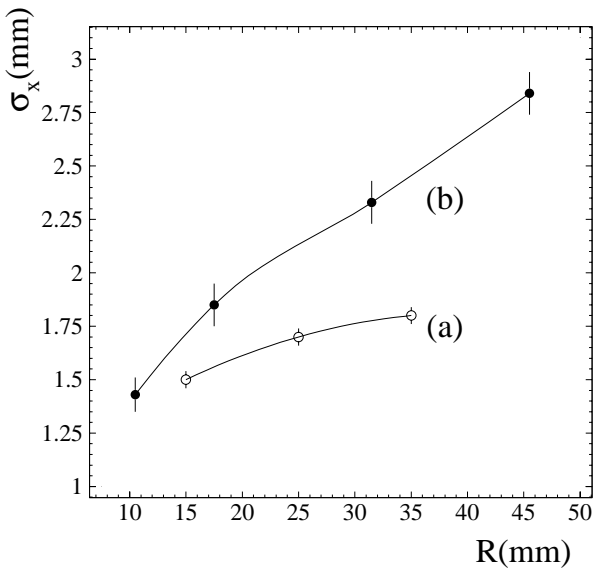


Рис. 6. Зависимость координатных разрешений сцинтилляционного (а) и газового (b) д.м.л. в зависимости от  $R$ , где  $R$  — размер зоны от оси ливня, по которой определялся центр тяжести. Энергия электронов 26.6 ГэВ, положение детекторов —  $5X_0$ .

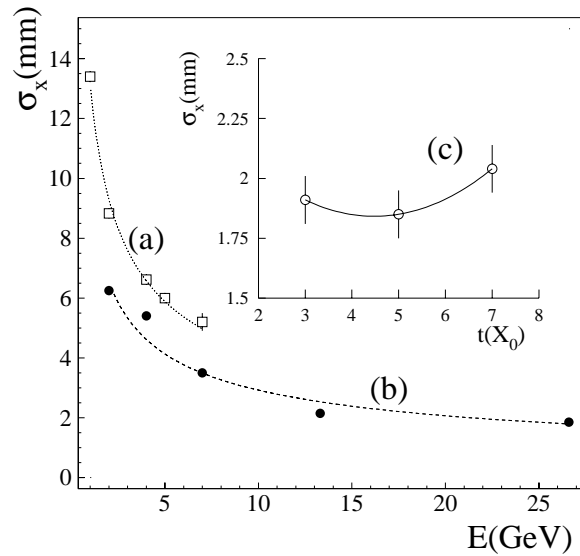


Рис. 7. Энергетическая зависимость координатного разрешения д.м.л., расположенного на глубине  $5X_0$ , для стриповой плоскости (а) и проволочной плоскости (b). (с) — зависимость координатного разрешения в плоскости проволок от положения по глубине, энергия электронов 26.6 ГэВ.

Энергетические зависимости координатного разрешения при положении д.м.л. на глубине  $5X_0$  представлены на рис.7а — для стриповой плоскости и б — для проволочной. Разрешение в стриповой плоскости ведет себя как  $\sigma_x(\text{мм}) = (13.15 \pm 0.13) / \sqrt{E(\text{ГэВ})}$ . Для проволочной плоскости зависимость координатного разрешения от энергии электронов описывается кривой (b).

натного разрешения от энергии имеет вид  $\sigma_x(\text{мм}) = (9.23 \pm 0.12) / \sqrt{E(\text{ГэВ})}$ . Зависимость координатного разрешения от положения д.м.л. по глубине в калориметре при энергии  $e^-$  26.6 ГэВ показана на рис.7с. Наилучшее разрешение наблюдалось на глубине 5X0. На глубинах 3X0 и 7X0 оно хуже на  $\sim 3$  и 10% соответственно. Таким образом, координатное разрешение имеет более слабую зависимость от глубины положения д.м.л. внутри калориметра, чем энергетическое разрешение.

Сравнительный анализ данного варианта д.м.л. с детекторами на основе сцинтилляционного годоскопа [3], пластиковых стримерных трубок [4] и стриповой кремниевой плоскости [9] показывает, что энергетические и пространственные (при одинаковой гранулярности) разрешения всех детекторов практически совпадают и определяются флуктуациями в развитии электромагнитного ливня по глубине. Существенно отличаются поперечные профили ливней, регистрируемые в газовых д.м.л., и например, более плотном сцинтилляционном годоскопе, что, по-видимому, объясняется различием в развитии мягкой компоненты электромагнитного ливня в плоскости детектора. Последнее, вероятно, приведет к более худшему разделению близко расположенных ливней и  $\pi^0/\gamma$ -сепарации в газовом д.м.л. по сравнению со сцинтилляционным годоскопом. Данный вопрос требует дальнейшего изучения.

В заключение нам приятно поблагодарить В.Л.Соловьянова за помощь при проведении измерений на 14-ом канале; В.М.Леонтьева и В.А.Кормилицина за помощь при подготовке аппаратуры; Г.Вестфала, А.Вандермолена, В.Лоупа и Д.Андервуда за содействие при измерениях в БНЛ; авторов работы [3] за предоставленные данные; К.Е.Шестерманова за данные расчетов методом Монте-Карло; А.Н.Васильева, А.И.Павлинова, С.В.Ерина и Н.Г.Минаева за интересные обсуждения.

## Список литературы

- [1] *The STAR collaboration*. The STAR Experiment at the Relativistic Heavy Ion Collider // Nucl. Phys; 1994, A566, p.277-286.
- [2] *The STAR EMC collaboration*. The Electromagnetic Calorimeter for the Solenoidal Tracker At RHIC. A Conceptual Design Report // LBNL Pub-5380, 1993.
- [3] Акименко С.А., Белоусов В.И., Васильев А.Н. и др.// ПТЭ, 1995, № 4, с.27. S.A. Akimenko, V.I. Belousov, B.V. Chujko et. al.// Nucl. Instrum. and Methods 1995, v.A365, p.92.
- [4] Белоусов В.И., Васильев А.Н., Константинов А.С. и др.// ПТЭ, 1995, N4, с.21; Belousov V.I., Chujko B.V., Kotov I.V. et.al. // Nucl. Instrum. and Methods 1996, v.A369, p.45.
- [5] L. Nodulman, R. Diebold, N. Hill et. al. // Nucl. Instrum. and Methods 1983, v.204, p.351.
- [6] Барков И.П. и др.// ПТЭ, 1991. № 1, с.132.

- [7] Зимин С.А., Солдатов М.М. — Препринт ИФВЭ 93-50, Протвино, 1993.
- [8] Акименко С.А., Деревщиков А.А., Морозов А.А. и др. — Препринт ИФВЭ 95-52, Протвино, 1995.
- [9] Gorodnichev V.B., Kachanov V.A., Khodyrev V.Yu. et.al. — Preprint ИИЕР 93-106, Protvino, 1993;  
Gorodnichev V.B., Kachanov V.A., Khodyrev V.Yu. et.al. — Nucl. Instrum. and Methods 1994, v.A343, p.470.
- [10] Harris R. M. // CDF Note 1329, Jan. 22, 1991.
- [11] Aves T.C. et. al. // Nucl. Instrum. and Methods 1992, v.A311, p.130.
- [12] Levi M.E. // CDC Note 93-431, Jan. 25, 1993.
- [13] Bekishev M.G., Ivanchenko V.N. // Nucl. Instrum. and Methods 1995, v.A361, p.138.

*Рукопись поступила 6 августа 1996 г.*

С.А.Акименко и др.

Исследование прототипа детектора максимума ливня на основе газовых пропорциональных счетчиков.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы ЛАТ<sub>Е</sub>Х.

Редактор М.Л.Фоломешкина.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 08.08.96. Формат 60 × 84/8.      Офсетная печать.

Печ.л. 1.12.    Уч.-изд.л. 0.86.    Тираж 240.    Заказ 738.    Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

---

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

Индекс 3649

---

П Р Е П Р И Н Т 96-62,      И Ф В Э,      1996

---