РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



ПРЕПРИНТ В.Ф. АНДРЕЕВ, П.С. БАРАНОВ, А.С. БЕЛОУСОВ, В. БОДРИ, Я.А. ВАЗДИК, Н.З. ГОГИТИДЗЕ, А.И. ЛЕБЕДЕВ, С.В. ЛЕВОНЯН, Е.И. МАЛИНОВСКИЙ, Ф. МОРО, С.В. РУСАКОВ, И.П. ШЕВЯКОВ, Л.Н. ШТАРКОВ, П.А.СМИРНОВ, Ю.В. СОЛОВЬЕВ, А. ШПЕКА, А.М. ФОМЕНКО

КОМПАКТНЫЙ СЧЕТЧИК ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ДЛЯ ДЕТЕКТОРА Н1 НА КОЛЛАЙДЕРЕ НЕRA2

Компактный счетчик электронов высоких энергий для детектора H1 на коллайдере HERA2

В.Ф.Андреев¹, П.С.Баранов¹, А.С.Белоусов¹, В.Бодри², Я.А.Ваздик¹, Н.З. Гогитидзе¹, А.И. Лебедев¹, С.В. Левонян¹, Е.И. Малиновский¹, Ф.Моро², С.В.Русаков¹, И.П.Шевяков¹, Л.Н.Штарков¹, П.А.Смирнов¹, Ю.В. Соловьев¹, А. Шпека², А.М. Фоменко¹

1.Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН, 119991, Россия 2. LPNE, Ecole Polytechnique, IN2P3 – CNRS, 91128 Palaiseau, France

Абстракт

Дано описание электромагнитного калориметра малых размеров. Детектор типа «спагетти» представляет из себя сборку из свинцовых пластин, содержащую сцинтилляционные фиберы (Kuraray SCSF-81). Он использовался для выделения реакций фоторождения в эксперименте H1 на ер-коллайдере HERA после его модернизации, а так же для контроля фона от событий с малыми Q^2 в глубоконеупругом ер-рассеянии, играющих важную роль в измерениях продольной структурной функции F_L. Калориметр был установлен внутри одного из квадруполей ускорителя на расстоянии 6 метров от точки пересечения пучков вблизи камеры ускорителя. Это позволило эффективно выделять события фоторождения в диапазоне энергий $\sqrt{S} = 210 - 270$ ГэВ. При калибровке на пучках ускорителей DESY и CERN были получены значения энергетического и пространственного разрешения $\sigma/E = 13(%)E^{-1/2}(\Gamma$ эВ) и σ_{xy} = 7(мм)E^{-1/2}(ГэВ), соответственно. Эти значения согласуются в целом с оценками, проведенными путем моделирования методом Монте-Карло. В течение четырех лет работы в условиях высокой светимости детектор показал высокую стабильность и отсутствие заметных радиационных повреждений.

Abstract

Small size calorimeter of SPAGHETTI type is described, which contains scintillating KURARAY SCSF-81 fibers embedded in lead matrix. It serves to tag photoproduction events in the H1 experiment at the upgraded ep-collider HERA as well as to control background in low Q² DIS events, which is especially important for the F_L measurement. The calorimeter was installed inside one of the machine quadrupoles at 6 meters from the interaction point close to the beam pipe. This allows to efficiently tag γp -events in the energy range $\sqrt{S} = 210-270$ GeV. In the beam tests at DESY and CERN the energy and space resolution of $\sigma/E = 13(\%)E^{-1/2}(\text{GeV})$ and $\sigma_{XY} \cong 7(\text{mm})E^{-1/2}(\text{GeV})$, respectively were achieved in accordance with expectations based upon detailed MC simulations. During four years of operation at high luminosity the detector showed good performance. No radiation damage was observed.

1. Введение

Коллайдер HERA в DESY, работая с 1992 года, обеспечивал соударения электронов (или позитронов) при энергии 27.5 ГэВ с протонами, имеющими энергию 920 ГэВ (820 ГэВ до 1998г.). Большую часть взаимодействий, происходящих при этом, можно рассматривать как соударения протона с квазиреальным фотоном, таким фотоном для которого $Q^2 \cong 0$, где $Q^2 = -q^2$ четырехмерный импульс фотона, которым обмениваются электрон и протон. Энергия E_{γ} в таком процессе фоторождения связана с энергиями электрона *до* и *после* взаимодействия E_e и E'_e соотношением

$$y = 1 - \frac{E'_{e}}{E_{e}} + \frac{Q^{2}}{4E_{e}^{2}} \cong 1 - \frac{E'_{e}}{E_{e}} = \frac{E_{\gamma}}{E_{e}}$$
(1)

здесь у = pq/pk, где p и k четырехмерные векторы протона и электрона в начальном состоянии, соответственно. Измерение энергии вылетающего электрона позволяет определить энергию фотона. Фотон таким образом оказывается «меченым». Детекторы электронов, предназначенные для мечения фотонов, получили название таггеров. В первый период работы HERA фотоны метились в диапазонах от 0.3 < y < 0.7, 0.08 < y <0.15 и 0.85< y < 0.95, используя таггеры электронов ЕТЗЗ, ЕТ44 и ЕТ8, соответственно. Модернизация HERA [1] привела к почти 4-х кратному увеличению светимости ер соударений (до 5 · 10³¹ см⁻²с⁻¹) и открыла новые перспективы для более глубокого проникновения в структуру материи на предельно малых расстояниях. Увеличение светимости было достигнуто путем магнитного сжатия соударяющихся пучков вблизи точки соударения и быстрого разведения пучков после нее. Это потребовало существенной модификации магнитной оптики HERA в области ± 40 м. от точки соударения пучков. Все это привело к необходимости изменения существовавшей ранее системы таггеров детектора Н1. В частности, бывший таггер ЕТ33, который располагался на расстоянии 33 метра от точки соударения пучков по направлению пучка электронов [2], должен был быть заменен на новый таггер. Наиболее важным требованием к новому таггеру было обеспечение регистрации электронов отдачи под очень малыми углами к направлению падающего пучка в реакции

$$e + p \rightarrow e + X$$
 (2)

что соответствует обмену почти реальными фотонами. Это позволяло изучать процессы мягкого и жесткого фоторождения при энергиях в системе центра масс, которые недостижимы в экспериментах с фиксированной мишенью.

Расчеты траекторий электронов методом Монте Карло с использованием программ [3] для вакуумного тракта модернизированной установки HERA (Puc.1) показали, что новый таггер должен быть расположен на расстоянии около 6 метров от точки соударения пучков между полюсами квадруполя GIR5. Высота и ширина таггера были ограничены апертурой магнита и не должны были превышать 27 х 90 мм.

Был изготовлен специальный отрезок вакуумной камеры с выходным окном для электронов отдачи, такой чтобы около него можно было разместить детектор длиной 400 мм. Поперечная ширина выходного окна (75.4 мм) определяла аксептанс рассеянных электронов в диапазоне 6 – 15 ГэВ, что соответствует энергиям в системе центра масс $\sqrt{S} = (210 - 270)$ ГэВ.

Новый таггер мог так же быть использован для проверки измерений светимости и для проверочной калибровки Фотонного детектора монитора светимости установки H1, используя процесс тормозного излучения

$$e + p \rightarrow e' + \gamma + p,$$
 (3)

описываемый формулой Бете-Гайтлера. Методические требования регистрации этого процесса к новому таггеру такие же, как и для процесса (1). Детектор должен удовлетворять следующим требованиям:

• детектор должен быть компактным

• обеспечивать разрешение по энергии не хуже чем
$$\frac{20(\%)}{\sqrt{E(\Gamma \ni B)}}$$

- нелинейность меньше 1%
- иметь пространственное разрешение порядка 1 3 мм в данном диапазоне энергий.

Чтобы удовлетворить этим требованиям был выбран детектор малых размеров, изготовленный по технологии «SPACHETTI» [4]. В результате сравнительного изучения различных материалов для компонент детектора (свинец или вольфрам в качестве поглотителя, сцинтилляционные нити (файеры) Вicron или Kuraray, фотоумножители типа Philips XP1911 или ФЭУ-147 для считывания сигналов) и тестовых измерений на калибровочных пучках в DESY и CERN [5] как оптимальная была выбрана комбинация свинец - Kuraray – Philips. Такой детектор был построен и установлен внутри квадруполя GIR5, входящего в состав элементов ускорителя.

Описание детектора и оценки его аксептанса приведены в разделе 2. В разделе 3 описаны калибровки детектора на калибровочных пучках и работа детектора при измерении светимости HERA в рабочем сеансе. Триггер и программы обработки результатов измерений кратко описаны в разделе 4. Процедура измерений и адаптация детектора в физическую программу H1 приведены в разделе 5. Статья завершается разделом Заключение.



Рис.1: Траектории электронов с энергиями от 1 ГэВ до 27.5 ГэВ после точки пересечения пучков (пунктирная кривая соответствует номинальной энергии пучка 27.5 ГэВ)

2. Детектор

Калориметр ЕТ6 содержит сцинтилляционные файберы *KURARAY SCSF-81* с диаметром 0.5 мм, помещенные внутри свинцового блока. Заряженные частицы электромагнитного ливня, образованного рассеянным электроном е' в процессах 2) и 3) в свинце (Pb), генерируют в сцинтилляционных файберах свет, который регистрируется фотоумножителями (PMs). Хорошая радиационная стойкость файберов *KURARAY SCSF-81* [6], выдерживающих поглощенные дозы до 10 кРад, позволяет им надежно работать при интегральной светимости до 100 обратных пикобарн в год, которая достигается на коллайдере HERA 2.

Детектор состоит из одного свинцового калориметрического блока разделенного на 12 ячеек (матрица 6х2). На Рис.2 показан схематически его вид. Он собран из 30 свинцовых пластин с размерами 0.78 х 75.6 х 200 мм³, имеющих по 84 канавки, в которые помещаются сцинтилляционные файберы. Эти пластины были изготовлены из имеющихся запасных материалов для электромагнитного калориметра SPACAL детектора Н1 [7]. Отношение объемов активного и пассивного материалов калориметра равно 1 : 2.26, что соответствует эффективной радиационной длине $X_0 = 9$ мм и Мольеровскому радиусу $R_m = 25.4$ мм. Полная длина блока примерно равна 22 X_0 (20 см). Канавки в соседних горизонтальных пластинах смещены для обеспечения более равномерного поглощения частиц ливня.



Рис.2: Схема конструкции (вид сверху) детектора ЕТ6.

Размер ячейки составляет 12.6 x 11.7 мм². Она содержит 14 x15 файберов, которые собираются в квадратный жгут размером 7.5 x 7.5 мм² и склеиваются зачерненным эпоксидным клеем. После затвердевания клея концы жгутов обрезаются и полируются. Транспортировка света к фотоумножителю осуществляется прозрачными световодами, перед которыми установлены светосборники. Они имеют форму квадратных прямоугольных пирамид и вырезаны из прозрачного полистирола, имеющего показатель преломления близкий к показателю преломления файберов. Светосборники соединены с жгутами файберов так, что квадратный торец светосборника полностью перекрывает квадратный торец жгута. Длина светосборника равна 38.3 мм. Торец жгута файберов и торец светосборника имеют размеры 5x5 мм² и 9x9 мм², соответственно. Светосборники смонтированы внутри алюминиевых кожухов, к которым привинчиваются световоды. Сами световоды собраны из 90 нитей типа KURARAY Clear-PS диаметром 0.5 мм, помещенных в пластиковую трубку и склеенных на обоих концах в круглый жгут диаметром 5.6 мм. Длина световода составляет примерно 50 см. Он доставляет свет сцинтилляций к фотоумножителю *Philips XP1911*, имеющему фотокатод диаметром 15 мм. Для улучшения светосбора передний торец калориметра покрывался полосой белого тефлона. Свинцовые пластины соединялись лентой из нержавеющей стали толщиной 0.1 мм и помещались в кожух с размерами 25х105х 317 мм³, изготовленную из стали толщиной 0.3 мм. Сталь была немагнитной.

Светодиоды монтировались внутри кожуха в небольшом свободном зазоре в передней части калориметра. Они генерировали световые сигналы для мониторирования светосбора и проверки работы детектора. Триггерная электроника и система сбора данных были такими же, как для нового монитора светимости [8]. Они кратко описаны в Разделе 4.

Таггер механически соединен с квадруполем IG1 так, что он расположен вблизи вакуумной камеры ускорителя. Фотоумножители находятся на внешней стенке металлической конструкции моста, соединяющего детектор H1 с туннелем ГЕРЫ, где расположены магниты IG1 и IG2. Фотоумножители помещались в свинцовой коробке для защиты от синхротронного излучения. Поскольку температура вакуумной камеры во время работы коллайдера может значительно расти, была предусмотрена возможность охлаждения таггера холодным воздухом или азотом.

Для оценки аксептанса детектора и его энергетического и пространственного разрешений использовался пакет программ быстрого моделирования H1LUMI [3]. Аксептанс может быть так же определен из данных о процессе (2) методом, который использовался в [9, 10]. Моделирование методом Монте-Карло показало (Рис.3а), что доминирующая часть рассеянных электронов (70%) не вылетают за пределы пространства $y_{e'} = \pm 1$ см по вертикали от оси пучка электронов если ET6 расположен вплотную к вакуумной камере, имеющей диаметр 4 см. Горизонтальные размеры детектора определялись из корреляционного графика $x_{e'}/E_{e'}$ (Рис.3b) и равны 8 см. Точное измерение координат необходимо для получения хорошей реконструкции энергии в таких событиях, когда электрон попадает в детектор вблизи его границы и заметная часть энергии электромагнитного ливня вылетает за его пределы.

Таким образом ЕТ6 с размерами 2.5 х 8 х 30 см³ занимает все свободное пространство и обеспечивает максимально возможный аксептанс для событий фоторождения. Хорошее пространственное разрешение, позволяющее определить точку попадания электрона, достигается путем измерения энергии от индивидуальных ячеек детектора.

Энергетическое распределение электронов, показанное на Рис.3с получено для процесса образования частиц квазиреальными фотонами с $Q^2 < 0.01 \ \Gamma \Rightarrow B^2$. Это распределение покрывает область энергий электронов от 6 до $12 - 15 \ \Gamma \Rightarrow B$ в зависимости от минимального расстояния от внутреннего края ET6 до оси пучка е⁻. Для оптики позитронов энергетический интервал аксептанса смещен в сторону меньших энергий примерно на 1 ГэВ по сравнению со случаем электронов. На Рис.3d показаны значения аксептанса ET6 для различных минимальных расстояний до пучка электронов. Соответствующие энергии квазиреальных фотонов лежат в интервале 11 - 22 ГэВ. Аксептанс ET6, достигающий 80% в области плато, позволяет изучать процессы фоторождения в самом высоком в мире диапазоне энергий W_{ур} вплоть до 280 ГэВ.

3 Калибровки детектора на калибровочных пучках и в процессе работы.

Работа калориметра исследовалась на калибровочном пучке электронов в DESY при энергиях 1.6 – 6 ГэВ и на пучке электронов H4 ускорителя SPS в CERN при энергии 6 – 15 ГэВ. В DESY использовалась система тестовых пучков ускорителя DESY2, где электроны, ускоренные до энергии 7 ГэВ, направлялись на внутреннюю мишень, представлявшую из себя углеродную нить диаметром 10 мкм, и генерировали в ней тормозные фотоны. Эти фотоны конвертировались в пары e^+e^- в медной мишени толщиной 3 мм. Электроны проходили через коллиматор и два отклоняющих магнита и попадали в зал калибровочных пучков. Энергия выведенного электронного пучка определялась величиной магнитного поля и могла быть выбрана в интервале 1 – 6 ГэВ. Энергетический разброс пучка составлял около 2%. Процедура тестирования предполагает общую калибровку различных каналов детектора.

Только четыре прилегающих друг к другу ячейки (матрица 2x2) калориметра были выбраны для изучения на тестовом пучке в DESY. Для считывания использовались фотоумножители типов: Philips XP1911 и ФЭУ-147. Сигналы от различных каналов выравнивались следующим образом: калориметр сканировался в пучке по горизонтали и по вертикали при энергии электронов 3 ГэВ и пучок направлялся на центр каждой ячейки. Отклики ячеек выравнивались с точностью примерно 10% путем регулировки напряжения питания фотоумножителей. Амплитудные спектры событий, попадающих в центральную область каждой ячейки размером 2x2 мм, после вычитания пьедесталов фитировались Гауссовскими распределениями для каждой энергии 1.6 – 6 ГэВ. Энергетическое сканирование проводилось с пучком в центре матрицы 2x2 и измерялись линейность и энергетическое разрешение. В заключение были получены калибровочные коэффициенты путем нормировки относительных калибровочных коэффициентов к сумме амплитуд всех каналов, фитированных Гауссом.

В тестовых измерениях в CERN участвовали все 12 ячеек калориметра (матрица 6х2). Для считывания применялись фотоумножители Philips и ФЭУ-147. Использовалась система сбора и обработки данных принятая в детекторе CMS [11]. Размер пучка на переднем торце детектора был 2х2 см², что определялось размером сцинтилляционного счетчика, включенного в триггер. Пучок проходил через 4 плоскости дрейфовых камер (по 2 плоскости для каждой координаты), стоявших перед детектором, и определявших точку попадания с точностью около 0.2 мм. Калориметр располагался на платформе, которая перемещалась дистанционно в двух направлениях горизонтально и вертикально с точностью около 0.25мм. В вертикальном направлении положение платформы фиксировалось так, чтобы центр пучка был в средине горизонтальной плоскости детектора. В горизонтальном направлении платформа двигалась так, чтобы пучок облучал все ячейки калориметра в нескольких сериях измерений. Процедура калибровки в CERN была аналогична процедуре калибровки в DESY. Перед сканированием по энергиям и координатам отклики всех ячеек выравнивались путем регулировки высокого напряжения, питающего ФЭУ с точностью до 10%. Относительные коэффициенты калибровки определялись off-line путем отбора данных для области облучения размером 2х2 мм около центра каждой ячейки. Окончательная настройка off-line геометрии дала точность около 0.1 мм.



Рис.3: Результаты моделирования методом Монте Карло реакций ур для $Q^2 < 0.01 \ \Gamma$ эB²:

- а) распределение по координате на 6м от точки соударения пучков,
- b) зависимость энергии от координаты,
- с) энергетическое распределение зарегистрированных электронов,
- d) аксептанс детектора ЕТ6.

3.1 Энергетическое разрешение и линейность детектора

Измерениях в DESY проводились при 6 значениях энергии пучка: 1.6, 2.0, 4.0, 5.0 и 6.0 ГэВ. Скорости счета достигали нескольких десятков Герц. Для каждого значения энергии измерялись суммы четырех амплитуд импульсов матрицы 2х2. После вычитания пьедесталов и калибровки каждого канала суммарные спектры фитировались Гауссовским распределением для нахождения среднего значения амплитуды и ширины распределения, связанных с энергетическим разрешением калориметра.

Соответствующая энергетическая зависимость отклика калориметра от энергии пучка (Рис.4) с точностью лучше 1% является линейной независимо от типа ФЭУ. На Рис.5 показана зависимость энергетического разрешения калориметра σ_E от энергии регистрируемых частиц, полученная с использованием фотоумножителей ФЭУ-147 и Philips XP1911. Энергетический разброс калибровочного пучка входил в экспериментальную неточность. Для сравнения на этом же рисунке приведены результаты моделирования энергетического разрешения методом Монте Карло.

Экспериментальные результаты и результаты моделирования фитировались суммой стохастического и постоянного членов:



$$\sigma_{E} / E = \frac{a}{\sqrt{E(\Gamma \ni B)}} \oplus b$$
 (4)

Рис.4: Энергетическая зависимость отклика детектора (сумма 4 АЦП).

Значения параметров **a** и **b**, полученные при фитировании экспериментальных ранных и результатов моделирования приведены в Таблице 1. На Рис.5 сплошными кривыми представлены соответствующие результаты. Можно видеть, что экспериментально лучшее энергетическое разрешение достигается с детектором, использующим фотоумножители Philips XP1911, и результаты измерений которого в большей степени соответствуют данным, полученных при моделировании методом Монте-Карло.

Необходимо отметить, что измерянные значения σ'_E превосходят данные, полученные при моделировании методом Монте-Карло, особенно для ФЭУ-147 Возможно это связано со статистикой фотоэлектронов, которая в расчетах не учитывалась. Соответствующий вклад в σ'_E для ФЭУ фотонного детектора модернизированного монитора светимости [8] может достигать нескольких процентов [12].



Рис.5: Зависимость энергетического разрешения детектора от энергии, полученная в измерениях на тестовом пучке в ДЕЗИ.

Таблица 1: Результаты фитирования зависимости энергетического разрешения калориметра от энергии пучка выражением (4)

Источник	ФЭУ	a (%)	b (%)	χ^2/N
Данные DESY	Philips XP1911	13.0 ± 1.0	0.0 ± 1.0	0.2/6
Данные DESY	ФЭУ-147	16.8 ± 0.6	2.9 ± 0.9	0.2/6
Монте Карло	Не включены	12.6 ± 0.4	0.3 ± 1.2	1.6/6

В калибровках, проводившихся в CERN для определения линейности и энергетического разрешения, область облучаемая пучком по центру детектора была выбрана в виде прямоугольника с размерами 12х4 мм² по горизонтали и вертикали соответственно. Отношение энергии, поглощенной в калориметре, к энергии падающего пучка, показано на Рис.6. для энергии пучка электронов 10 ГэВ. Распределение величины отношения состоит из Гауссовского пика и хвоста в области малых энергий, возникающего за счет утечек энергии из детектора. Калориметр показал линейность характеристики в пределах 1% (затемненная область на Рис.7).

Зависимость энергетического разрешения калориметра σ_E' от энергии (данные как DESY, так и CERN) показана на Рис.8. Эта зависимость фитировалась выражением (3) со стохастическим членом 17.3 ± 0.4%. Постоянный член равен 0.6 ± 0.8%. Фитирование только данных ЦЕРН дает следующие значения стохастического и постоянного членов: а = (16.7 ± 0.5)% и b = (1.5 ± 0.5)%.



Рис.6 Нормированный энергетический спектр электронов, зарегистрированный калориметром при энергии пучка 10 ГэВ.

Сравнение с данными DESY (см. Таблицу1 для ФЭУ-147) показало, что данные DESY и CERN сопоставимы. Экспериментальные значения стохастических членов отличаются от предсказаний, полученных при моделировании методом Монте-Карло, что обусловлено в основном вкладом статистики фотоэлектронов. Основные вклады в постоянный член обусловлены несовершенством калибровки и неоднородностями детектора. Равномерность отклика детектора исследовалась как в горизонтальном (х), так и вертикальном (у) направлениях. Это особенно важно потому, что вертикальный размер детектора составляет всего 24мм, что обусловлено размером зазора в магните. Этот размер соответствует примерно одному радиусу Мольера для материала калориметра.

Исследования показали, что характеристика однородна в пределах 2% для свинцового детектора (за исключением ячеек, прилегающих к границам) вдоль горизонтальной оси. В соответствии с данными Монте-Карло, примерно 99% электронов отдачи попадают в область с размерами ± 4 мм в от горизонтальной плоскости, в которой лежит пучок (средней горизонтальной плоскости детектора) [4]. Учитывая возможный вертикальный хвост е-пучка и неточность установки детектора мы принимаем размеры этой области равными ± 5 мм. Поведение характеристики вдоль вертикальной оси калориметра показано на Рис.9 для энергии 10 ГэВ. Из рисунка можно видеть, что отклик однороден в пределах 4% в области ± 5 мм. Эффект каналирования [13] изучался для углов падения пучка на детектор превышающих 2⁰ (минимальный угол падения в рабочих условия) и был найден несущественным.



Рис.7 Нелинейность энергетической характеристики калориметра (ошибки не превышают размеров точек)

3.2 Профиль ливня и пространственное разрешение

Для оценки пространственного разрешения σ_{xy} (которое так же влияет на точность реконструкции энергии) в DESY проводилось сканирование по **x** вдоль горизонтальных границ верхних и нижних рядов ячеек. На Рис.10 показано отношение сумм сигналов АЦП для пар вертикальных ячеек (A₁) к сумме примыкающей вертикальной пары (A₂) (**a** – верхний горизонтальный ряд ячеек, **b** – нижний ряд) как функция расстояния **x** от вертикальной границы между ячейками (**x** = 0). Профиль ливня был измерен в DESY по данным теста при энергии

электронного пучка 3 ГэВ. Видно, что отношение A₁/A₂ чувствительно к положению точки попадания электронов, особенно вблизи границы прилегающих ячеек. Данные моделирования методом Монте-Карло лежат близко к экспериментальным точкам около этой границы, но отклоняются от них в области внешних краев ячеек.



Рис.8: Зависимость энергетического разрешения детектора от энергии пучка.



Рис.9: Однородность отклика калориметра вдоль вертикальной оси.



Рис.10. Профиль ливня, полученный в ДЕЗИ при энергии Е = 3 ГэВ.

В DESY не было трекового устройства на тестовом пучке для измерения координат точки попадания электронов в детектор с достаточной точностью. Пространственные размеры пучка 3 мм являются слишком большими для измерения пространственного разрешения детектора. По этому ниже для оценки величины пространственного разрешения конструкции детектора σ_{xy} использовалось моделирование методом Монте Карло.

В расчетах методом Монте Карло рассматривалась структура ячеек (3х2). Реальные размеры ячеек калориметра использовались в расчетах для энергии 6 ГэВ. Точка попадания электронов в калориметр размывалась по прямоугольной области с размерами 0.5 (по вертикали) х 12 (по горизонтали) мм² в центре матрицы (3х2).

Реконструкция точки попадания осуществлялась с использованием функции профиля для каждых двух пар ячеек, одна из которых была ячейкой с максимальной поглощенной энергией, а две других были примыкающими к ним ячейками, с соответствующим взвешиванием энергий для двух полученных координат. На Рис.11 приведен график корреляции между экспериментально измеренной начальной точкой положения калибровочного пучка частиц при энергии 6 ГэВ Х_{пуч} и реконструированной координатой точки попадания Х_{рек} в детектор. Можно видеть, что процедура реконструкции работает достаточно корректно – корреляция очевидна.

На Рис.12 показаны разности между реконструированными координатами и первоначальной точкой попадания, полученные в расчетах Монте-Карло. Фитирование Гауссовским распределением позволило получить точность пространственной реконструкции при 6 ГэВ, усредненную по площади центральной

ячейки, $\sigma_x = 0.74 \pm 0.01$ мм. Учитывая выражение для энергетической зависимости пространственного разрешения

$$\sigma_{x} = \frac{c}{\sqrt{E(GeV)}} \tag{5}$$

Монте-Карло дает для калориметра значение параметра $c = (1.81 \pm 0.02)$ мм. Приведенные ошибки являются только статистическими. Таким образом, моделирование методом Монте-Карло показало, что конструкция детектора способна обеспечить необходимое пространственное разрешение. Следует отметить, что полученное значение параметра **с** является лишь оценкой верхней границы разрешения, а при измерениях с реальным детектором величина **с** будет больше.

При калибровках в CERN профиль ливня измерялся в горизонтальном направлении для различных энергий пучка с использованием информации о координатах, полученной с помощью дрейфовых камер. Размер пучка в вертикальном направлении был выбран равным ± 2мм относительно средней горизонтальной плоскости детектора.



Рис.11. Полученная методом Монте Карло корреляция между X_{пуч} и X_{рек} в калориметре при энергии 6 ГэВ.



Рис.12. Полученное методом Монте-Карло распределение разности между реконструируемой координатой точки попадания и положением пучка.

Нормированная сумма энергий в 4 (2х2) прилегающих ячейках с правой (E_R/E_0) и левой (E_L/E_0) сторон от центра детектора представлялась как функция координаты X падающего электрона. На Рис.13 показаны X-проекции профиля ливня в детекторе для энергии падающего электрона, равной 10 ГэВ. Данные фитировались суммой двух функций ошибок и, как следствие, проекция профиля ливня на одну координату могла быть описана суммой 2 Гауссовских распределений (направленная и изотропная компоненты), как это показано на Рис.13.

Поведение профиля ливня изучалось при других энергиях в диапазоне 6 – 15 ГэВ. Профили ливня хорошо описывались одним Гауссовским распределением при энергиях 6 и 8 ГэВ и двумя Гауссовскими распределениями при энергиях 10 и 15 ГэВ. А эффективная ширина оставалась постоянной с экспериментальной ошибкой в этом интервале энергий ($\sigma_{3\phi\phi} = (3.4 \pm 0.3)$ мм).

Реконструкция точки входа электрона производилась с использованием экспериментальной функции относительного распределения ливня

$$F_{rs} = (A_1 - A_2)/(A_1 + A_2)$$
(6)

чтобы учесть профиль ливня, где A₁, A₂ энергии, поглотившиеся в примыкающих ячейках (слоях), одна из которых является ячейкой (слоем) с максимальным сигналом или A₁, A₂ являются энергиями, выделившимися в ячейках примыкающих к ячейкам с максимальным сигналом. На Рис.14 (верх) показана экспериментальная функция F_{гs} для двух примыкающих горизонтальных слоев (верхнего и нижнего) калориметра (Y_{пуч} = 0 соответствует границе между верхним и нижним слоями). Разница между значениями реконструированной (измеренной) и полученной от дрейфовых камер (пучковой) Y-координатами показана на Рис.14 (низ) для энергии падающего пучка 10 ГэВ.



Рис.13. Профиль ливня вдоль оси **X** в калориметре для электронов с энергией E _{пучка} = 10 ГэВ.

Реконструкция X -координаты падающего электрона с использованием функции F_{rs} для энергий выделившихся в ячейках примыкающих к ячейкам с максимальным энерговыделением показала, что в случае калориметра со свинцовым поглотителем заметной разницы при выборе функции F_{rs} для реконструкции координат нет и координатные разрешения для X и Y направлений примерно одинаковы.

На Рис.15 показана энергетическая зависимость координатного разрешения детектора. Фитирование данных квадратичной формой (4) может быть представлено в виде

$$\sigma_{xy} = \frac{7.2(MM)}{\sqrt{E(GeV)}} \quad . \tag{6}$$



Рис.14. Экспериментальная функция относительного распределения энергии в вертикальном направлении в калориметре (верх) и соответствующее разрешение по Y- координате для энергии электронов 10 ГэВ (низ).

3.3 Калибровка ЕТ6 и работа на коллайдере HERA – 2

Для калибровки калориметра ET6 использовался процесс тормозного излучения Бете-Гайтлера ер \rightarrow еүр. Поскольку передачей энергии протону можно пренебречь, должно быть справедливым соотношение

$$E_{\text{tarrep}} + E_{\gamma} = E_0 , \qquad (7)$$

где E₀ – энергия пучка электронов, E_{таггер} – суммарное энерговыделение калориметров ET, E_γ - измеренная энергия фотона.

Стандартная процедура калибровки, описанная детально в [15] определяет коэффициенты калибровки C(n) путем минимизации следующей суммы:

$$F = \sum_{i} \left(\sum_{n=1}^{N} C(n) \bullet A_{i}(n) - E_{0} \right)^{2}$$
(8)

где n – номер канала детектора, N – полное число каналов, i – номер события, $A_i(n)$ – амплитуда сигнала от события i в элементе n и C(n) – калибровочный коэффициент элемента n.



Рис.15: Координатное разрешение детектора в зависимости от энергии пучка.

На Рис.16 показана зависимость от времени калибровочного коэффициента одного из каналов электронного калориметра.. Ухудшение характеристик работы детектора ЕТ6 (уменьшение амплитуды сигналов и, соответственно, увеличение величин калибровочных коэффициентов для отдельных каналов) в течение последнего периода работы коллайдера HERA2 (2006 и 2007 годы) в основном было связано с сильным фоном синхротронного излучения.

Необходимо отметить, что уменьшение величины отклика детектора отражает суммарный эффект воздействия радиации как непосредственно на сам калориметр ЕТ6, так и на световоды и на фотоумножители. Качество калибровки и линейности системы измерения светимости (детектора фотонов и электронного таггера) иллюстрируется на Рис.17, где показано энергетическое распределение одиночных событий процесса Бете Гайтлера (пик при 27.55 ГэВ) и «двойных» событий (пик при 55.10 ГэВ).

На Рис.18 показано типичное энергетическое распределение в ЕТ6, распределение точек попадания на торце детектора ЕТ6 и корреляция между энергией и точкой попадания. Наблюдается значительная утечка энергии для событий, в которых точка попадания частицы в детектор находится близко к границе.



Рис.16: Зависимость от времени коэффициента калибровки одного из каналов детектора ЕТ6 в течение всего периода измерений на коллайдере HERA-2.



Рис.17: Энергетическое распределение для одиночных событий Бете-Гайтлера (пик при 27.55 ГэВ) и для «двойных» событий (пик при 55.10 ГэВ).

4. Сбор данных и триггер.

Из за ограничений, связанных с геометрией пучка в прямолинейной секции, электронный таггер расположен на расстоянии 6 м от точки соударения, а детектор фотонов на расстоянии 103 м, внутри туннеля HERA в ограниченном пространстве и области сильных шумов и высокого радиационного фона, неприемлемого при нормальной работе. Поэтому большую часть электронных систем (насколько это было возможно) разместили в неэкстремальных условиях экспериментального зала детектора H1. Однако, для коаксиальных кабелей длиной 125 м на каждый канал это приводило к необходимости бороться с наложениями импульсов за счет дисперсии, ослаблением сигналов в кабелях(10 дб) и обычными наведенными шумами. Для выполнения всех этих задач была создана аналоговая электроника.

Каждый отдельный канал был снабжен предусилителем, расположенным в тоннеле, и часть усиленного сигнала суммировалась для 12 каналов. При этом достигалось 12-кратное снижение когерентного наведенного шума в аналоговом суммарном сигнале. Для этого все три группы предусилителей (1 для ЕТ6 и 2 для PD – детектора фотонов) располагались как можно ближе к своим группам ФЭУ. Кроме того, каждая группа имела один канал, в котором вход предусилителя был закорочен на землю. Этот «слепой» канал был предназначен для аналогового вычитания низкочастотных шумов, наведенных в коаксиальном кабеле. Измерение в типичном случае дает снижение шумов при частоте 150 Герц с 80 до 8 мВ.

На другом конце линии передачи индивидуальные и суммарные импульсы приобретают «хвосты» медленной временной компоненты. После вычитания «слепых» каналов происходит восстановление нулевой линии сигнала. Получающиеся в результате импульсы теряют не более 1% от их максимального в диапазоне 72 нсек. Наконец их первоначальная амплитуда восстанавливается усилением в 10 дб. Измеренные собственные шумы в отдельном канале имеют величину 0.55 мВ (0.98 мВ в сумме) при частоте порядка 150Гц.

Сигналы оцифровывались непрерывно четыре раза за время пересечения пучков (т.е. каждые 24 нсек), с точностью 12 бит и накапливались в двух буферах с независимыми магистралями. Считывание первой магистрали происходило по стандартной VME шине и запускалось центральной системой вывода данных (DAC) детектора H1 при типичной частоте 150 Герц. Вторая магистраль считывалась в соответствии с заданной процедурой контроля светимости через обычную 24 битную шину, работающую при частоте 20 Мгерц. Для каждого события и для каждого канала, независимо от того является ли он индивидуальным или суммой, считывался максимум импульса и пьедестал путем вычитания события за событием. Система вывода данных (DAQ) измерений светимости построена полностью на основе коммерчески доступных компонент (многофункциональных компьютерных блоков (MFCC) станции RIO2 работающей под операционной системой Linux) и работает в двух основных модах: как последовательность



Рис.18: Типичные распределения для детектора ЕТ6:

- а распределение по энергии ЕТ6,
- **b** распределение точек попадания на торце ЕТ6 (пунктир показывает вертикальные границы детектора),
- с корреляция между энергией лептона и точкой попадания.

банчей она работает быстро, или как гистограммирование энергий суммы последовательности банчей для измерения светимости. В триггерной моде все каналы считываются для измерения положения пучка и калибровки. Процесс сбора данных: функция шины, триггерная логика, определение последовательности, форматирование и выходной регистр, все это осуществляется блоками FLGA и MFCC.



Рис.19: Схема электронной аппаратуры системы измерения светимости детектора H1.

Энергетические гистограммы и данные события накапливаются в памяти MFCC и передаются затем на станцию RIO2 примерно каждую секунду, где производится их дальнейшая обработка, такая как определение on-line светимости и положения пучка. Схема аппаратуры вывода данных системы измерения светимости показана на рисунке 19.

5. Включение таггера ЕТ6 в инфраструктуру детектора Н1

Таггер электронов был установлен в 2003 году в туннеле коллайдера HERA и участвовал в измерениях на детекторе H1 с самого начала работы его на HERA-2. Основной его задачей было улучшение триггерных возможностей детектора Н1 для таких процессов фоторождения, которые другими методами, кроме выделения электрона отдачи, эффективно зарегистрировать было невозможно. Это в основном реакции с малыми и средними p_t, такие как дифракционные процессы или фоторождение струй с малым порогом E_{t,jet} ≥ 5 ГэВ (см. Рис.20). Основная загрузка в ЕТ6 обусловлена электронами от процесса тормозного излучения (3), который имеет большее поперечное сечение, чем процесс (2). Для подавления этого фона триггер ЕТ6 дополнен требованием у - запрета в детекторе фотонов, что снижает вклад от процесса (3), в зависимости от параметров пучка в 10 - 20 раз. Эффективность запрета регистрации фотонов определяется геометрическим аксептансом фотонного детектора, который во время работы HERA-2 имел величину от 0.96 до 0.88, в зависимости от настройки пучка и его расходимости в точке столкновения. В результате полная скорость счета триггера etag 6 = ЕТ6 & PD имела величину около 30 кГц для средних значений токов. Таким образом, комбинация условий etag 6 с некоторыми элементами триггера основного детектора Н1 дает фактор подавления фоновых событий, равный

$$R = r(BC) / r(etag_6) \cong 200 - 300.$$



Рис.20: Примеры двух типичных классов *ер* - событий, выделяемых триггером ЕТ6: а) фоторождение струй, б) диффракционные процессы с большим зазором по псевдобыстроте.

В приведенном выражении r(BC) = 6.5 ÷ 8.3 МГц - частота пересечения пучков сталкивающихся *ер* - банчей в различных режимах работы HERA-2.

Выражение для R справедливо только для фона от p-пучка, к которому ET6 нечувствителен, и следовательно, таггер может срабатывать от случайных совпадений с e' от peakций (2) или (3). Фон, обусловленный протонами, доминирует в большинстве элементов триггера H1, таких как требования к вершине взаимодействия или энергии, выделившейся в основном калориметре Детектора H1.

Ценой, которую приходится платить за такое подавление фона, является некоторая потеря «хороших» событий фоторождения за счет ограничения аксептанса ЕТ6. Эта потеря эффективности регистрации определяется соотношением

$$\varepsilon_{ET6}(S) = \frac{\int A_{ET6}(y,Q^2) F_{WWA}(y,Q^2) dy dQ^2}{\int F_{WWA}(y,Q^2) dy dQ^2}$$
(9)

где $F_{WWA}(y,Q^2)$ хорошо известное выражение для потока виртуальных фотонов Вайцзекера-Вильямса [14]. Интегрирование в (6) распространяется на область, которая представляет физический интерес: $Q^2 \le 1 \ \Gamma \ni B^2$ (фоторождение) и $y > y_{\text{мин}}$, где $y_{\text{мин}}$ зависит от конечного состояния изучаемого процесса. Для минимального порога событий не выделяемых мечением ($y_{\text{мин}} \cong 0.01$) $\varepsilon_{\text{ЕТ6}}(S) \approx 2\%$, что дает приемлемое улучшение значения отношения сигнала к фону, R(S/B) примерно в 4 раза, тогда как для диапазона высоких $W_{\gamma p}$, $W_{\gamma p} = \sqrt{yS} > 200 \ \Gamma \ni B$ достигается величина R(S/B) $\cong 30 - 35$. Причина этого очевидна, если посмотреть на функцию аксептанса $A_{\text{ЕТ6}}(y)$, которая имеет максимум при больших значениях у, что можно видеть из Рис.21.

Из приведенного выше очевидно, что мы получаем возможность пометить процессы фоторождения, имеющие сравнительно большое поперечное сечение, или процессы при очень больших W_{ур}. В Таблице 2 приведен список стандартных триггеров Детектора H1 для мечения ур процессов.

На Рисунке 22 представлено распределение по z-координате вершин взаимодействий событий набранных с триггером от трековых детекторов и при совпадении треков в дрейфовой камере в H1 с энерговыделением в ET_6. Пики при z \approx -150 см и z \approx -75 см обусловлены протонами, попавшими в коллиматоры, тогда как события от взаимодействия протонов с остаточным газом приводят к плоскому распределению z-координаты вершины взаимодействия. А «истинные» ер-события имеют Гауссовское распределение с координатой вблизи 0 и ширину порядка 10 см. Рисунок иллюстрирует подавление фона, вызванного протонами, триггером ET_6. Скорости счета триггеров, приведенные на Рис.23 демонстрирует, что большинство этих триггеров работает хорошо и удовлетворяет нужным условиям, типичным из которых является скорость счета 1 – 2 Гц, за исключением малых pt для триггера s82, который нуждается в дальнейшем подавлении, и вследствие этого собирает меньше светимости по сравнению с другими γ p субтриггерами.



Рис.21: Аксептансы ЕТ6 для настройки ГЕРЫ на оптику *e⁺p* и *e^p* столкновений, определенные по результатам измерений.

Другой задачей ЕТ6 являлся контроль фона в процессах фоторождения при малых Q^2 в глубоко неупругом рассеянии (DIS) при $Q^2 = 2 - 120 \Gamma_2 B^2$. В истиных событиях глубоко неупругого рассеяния электрон отдачи регистрируется в главных калориметрах H1: жидкоаргоновом (Q² ≥ 120 ГэВ²) или в SPACAL ($2 \le Q^2 \le 120 \ \Gamma \Rightarrow B^2$). Однако, в некоторых случаях энергия, выделившаяся в адронных конечных состояниях ур реакций, может имитировать электромагнитный кластер или рассеянный электрон, тогда как собственно сам электрон не регистрируется, вылетая в пределах вакуумного тракта пучка частиц. Такой фон фоторождения является основным источником неточности, особенно при высоких у (низких E_{e^2}) и, следовательно, он должен быть надежно учтен. Один из методов заключается в оценке и вычитании этого фона, используя часть его помеченную с помощью ЕТ6. Рис.24 иллюстрирует хорошую работу этого метода в анализе данных Н1. События, помеченные электронным таггером, имеют симметричное распределение по заряду для «кандидатов в рассеянные лептоны», это подтверждает их фактически ложный характер («истинные» рассеянные лептоны должны иметь заряд равный заряду лептонов в пучке, в данном случае позитронов).



Рис.22: Распределение по z-вершинам для событий, проходящих по триггеру для трековых параметров, и по совпадению трека в дрейфовой камере в H1 с элементом триггера ET_6.

Габлица 2:	I риггера	. Детектора І	Н для	выделения	меченного	фоторож	сдения

Субтриггер	Основные	Физическая	$L \text{ pb}^{-1}$	
	условия	задача	e ⁻ p e ⁺ p	
s44	etag 6 && Е(Спакал)>6	Поиск Оддерона	164.7 177.8	
	ГэВ	Эксклюзив вы-		
		сокие p _t y's		
s82		Струи с малыми	15.5 6.3	
s86	etag 6 &&вершина&&	p _t	51.6 121.2	
	трек	Струи с боль-		
	etag 6 &&E(Lar) &&	шим р _t		
	трек			
s89	еtag 6 && FNC && трек	Лидирующий	148.6 164.3	
		нейтрон		
		$\gamma + p \rightarrow n + X$		
s113	etag 6 && FPS && трек	Лиффракция с		
s116	etag 6 && VFPS&& трек	меченым		
		протоном	156.4 174.3	
		$\gamma + p \rightarrow p + X$	154.1 112.2	



Рис.23: Скорость счета триггеров как функция светимости .



Рис.24: Фон процессов фоторождения в глубоконеупругом *ер*-рассеянии при больших **у**, полученный в процессе работы HERA при низкой энергии.

6. Выводы и заключение

В соответствии с проектом [4] был создан электромагнитный калориметр малых размеров типа SPACAL, который был размещен внутри магнита IG1 коллайдера HERA.

Было проведено моделирование параметров этого детектора методом Монте Карло, а так же его изучение на калибровочном пучке в DESY при энергиях электронов 1.5 – 6 ГэВ и в CERN на тестовом пучке электронов H4 с энергиями 6 – 15 ГэВ. Результаты этих калибровок дали сопоставимые результаты, которые согласуются с данными расчетов методом Монте-Карло. Линейность характеристики калориметра оказалась не хуже ≈ 1 %, что позволило уверенно использовать этот калориметр для мечения электронов по энергии в рабочей области детектора H1. Анализ всех данных об энергетическом разрешении σ_E/E показал, что лучшие результаты достигаются в конструкции со свинцовым поглотителем при считывании сигналов фотоумножителями Philips XP1911.

Получены следующие лучшие значения энергетического и пространственного разрешений детектора:

$$\sigma_{E/E} = \frac{17.3 \pm 0.4}{\sqrt{E(\Gamma \ni B)}} \oplus (0.6 \pm 0.8)\%$$
 (10)

$$\sigma_{\rm x} = -\frac{(7.2 \pm 0.3)_{MM}}{\sqrt{E(\Gamma \Im B)}} \tag{11}$$

Длительная эксплуатация калориметра в инфраструктуре детектора H1 после модернизации в 2000 году показала, что предложенная конструкция позволила успешно выполнять все задачи по мечению событий фоторождения и вместе с детектором фотонов проводить измерение светимости коллайдера HERA.

Авторы отмечают большой вклад сотрудников Физического института им. П.Н. Лебедева РАН Горбова Л.А. и Зачесова Г.А. в создание конструкции детектора и благодарят группы эксплуатации в DESY и CERN SPS H4, обеспечившие калибровочные пучки высокого качества.

ЛИТЕРАТУРА

- R. Bacher et al., HERA Luminosity Upgrade (Revised 3nd Draft 30.03.98),
- I. Abt et al., The H1 detector at HERA. NIM A321 (1997) 310.
- S.Levonian, H1LUMI A Fast Simulation Package for the H1 Luminosity System. H1-note H1-04/93-287
- 4. V. Andreev et al., Proposal for an Upgrade of the H1 Luminosity System and its Associated Electronics for HERA 2000. H1-note H1-06/98-544.
- 5. V. Andreev et al., Beam Tests of the New H1 Electron Tagger. H1-note H1-11/01-597
- 6. The Hadron Calorimeter Project, CERN/LHC 97-31,
- 7. T. Nickolls et al. The H1 Lead/Scintillating-Fibre Calorimeter. NIM A386 (1997) 397.
- 8. V. Andreev et al., The new H1 luminosity system for HERA II. NIM A494 (2002) 45-50.
- 9. V. Andreev, Acceptance determination of electron tagger ET44 H1 note H1-10/96-493
- 10. V. Andreev et al., ET8 Tagger Performance and User Guide. H1 note H1-06/00-588
- 11. The Electromagnetic Calorimeter Project, CMS TDR 4, CERN/LHCC 97-33, 1997.
- 12. F. Moreau, The communication at the H1 LUMI meeting
- 13. M. Livan et al., Scintillating Fibre Calorimetry, CERN 95-02, 28 February 1995..
- 14. C.F.Weizs Z.Phys. 88 (1934) 612;
 E.J.Williams, Phys.Rev. 45 (1934) 729;
 S.Frixione et.al. Phys.Lett. B319 (1993) 339.
- 15. H1 Collab., Experimental Study of Hard Photon Radiation Processes at HERA, DESY Preprint, DESY-95-024.