22
ITEP-10-98

Институт теоретической и
экспериментальной физики

10-98

FERMILAB
DEC 14 1998
LIBRARY

В.Ю.Егорычев

Оптимизация Детектора Переходного Излучения эксперимента HERA-B.

Fermilab Library
0 1140 0068082 1

Москва 1998

УДК 539.172 М-16
ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА HERA-B: Препринт ИТЭФ 10-98/
В.Ю.Егорычев - М., 1998 - 20с.

Детектор переходного излучения (ДПИ) является частью системы идентификации электронов в эксперименте HERA-B. Главная задача, которую будет решать ДПИ в эксперименте HERA-B, - разделение электронов и адронов с высокой эффективностью регистрации электронов во внутренней области электромагнитного калориметра, который работает в условиях высокой плотности частиц. ДПИ создан на основе новейшей технологии многослойной структуры радиатора переходного излучения и тонкостенных цилиндрических пропорциональных камер. Данная работа выполнена в рамках создания детектора переходного излучения для эксперимента HERA-B. Описана оптимизация ДПИ в условиях физических событий, отвечающих условиям работы эксперимента HERA-B, что позволило произвести выбор оптимальных параметров детектора с точки зрения фактора электрон-адронной режекции при обеспечении высокой эффективности регистрации электронов.

Рис. - 9, список лит. - 11 наим.

© Институт теоретической и экспериментальной физики, 1998

1 Введение

Одним из наиболее интересных и интригующих явлений в физике элементарных частиц несомненно является CP-нарушение, связанное с фундаментальными вопросами пространства, времени и ранней стадии развития Вселенной [1].

Экспериментальное наблюдение CP-ассиметрии до сих пор проверено только в системе нейтральных K-мезонов. Однако, выполнить точную проверку CP-нарушения в Стандартной Модели (СМ) в системе нейтральных K-мезонов нельзя из-за больших теоретических неопределенностей в вычислениях. Система нейтральных B-мезонов представляет из себя прецизионную систему, в которой возможно наблюдение CP-нарушения. В отличии от системы K-мезонов - в распадах B-мезонов предсказывается значительный эффект CP-нарушения. Кроме того исследование системы B-мезонов вероятно позволит провести оценку основных положений СМ [2].

Наблюдение CP-нарушения - ближайшая задача современной экспериментальной физики. В настоящее время на наблюдение CP-нарушения нацелено большое число экспериментов физики высоких энергий. В этой области физики остро ощущается необходимость использования последних достижений и преимуществ современной экспериментальной методики.

Основной целью предполагаемого эксперимента HERA-B является экспериментальное наблюдение CP-нарушения в системе нейтральных B-мезонов с множественным лептонным конечным состоянием, в частности распад $B \to J/\psi K_s^0 \to l^+l^-\pi^+\pi^-$, с лептонами в конечном состоянии, представляется наилучшим как с теоретической так и с экспериментальной точки зрения [3]. Энергия в системе центра масс $\sqrt{s}$=40 ГэВ, обеспечивает порядка 10^9 B-мезонов в год, что достаточно для наблюдения CP-нарушения в системе B-мезонов и изучения других важных аспектов и проблем B-физики.

Эффективная лептонная идентификация является одним из принципиальных требований эксперимента HERA-B и играет ключевую роль в реконструкции распадных каналов, идентификации B-мезонов (мечение лептонов) и возможности исследования дополнительной физики. Использование Детектора Переходного Излучения в системе электронной идентификации с Электромагнитным Калориметром позволяет достичь требуемой эффективности для решения поставленной задачи.

2 Анализ и оптимизация ДПИ HERA-B.

2.1 Моделирования детектора HERA-B.

Оптимизация спектрометра HERA-B (см рис. 1) была выполнена на основе метода Монте-Карло (МС), которая позволила изучить кинематические особенности рождения B-мезонов, а также и продуктов их распада, рассмотреть характерные черты фоновых событий и исследовать основные параметры HERA-B спектрометра. С этой целью использовался генератор событий с помощью МС программ PYTHIA5.7 и FRITIOF7.0, разработанных LUND группой [5].

Для изучения физических процессов в эксперименте HERA-B рассматривались следующие события:

- неупругое взаимодействие с мишенью;
- событие с образованием $b\bar{b}$-пары и дальнейшей ее фрагментации в мезоны и адроны, содержащие прелестный кварк;
- событие с образованием $b\bar{b}$-пары, фрагментацией одного из кварков в B-мезон, с последующим распадом в $J/\psi K_s^0$;
- событие с образованием $c\bar{c}$-кварковой пары и фрагментацией их в очарованные частицы.

Для оптимизации спектрометра HERA-B и анализа возможности реконструкции событий в условиях отвечающий условиям эксперимента HERA-B, была создана программа HBGEAN [6], на основе программного пакета GEANT3.21, которая моделирует прохождение частиц через спектрометр HERA-B. Программа HBGEANT состоит из набора подпрограмм и функций, добавляемых к стандартной версии пакета GEANT, которые:

- создают и описывают полную геометрию спектрометра HERA-B;
- проводят треки через детектор и показывают (или записывают) информацию о взаимодействии частиц с веществом детектора или с его компонентами;
- изображают детектор или отдельные его части, а также показывают все треки, прошедшие через данный детектор;

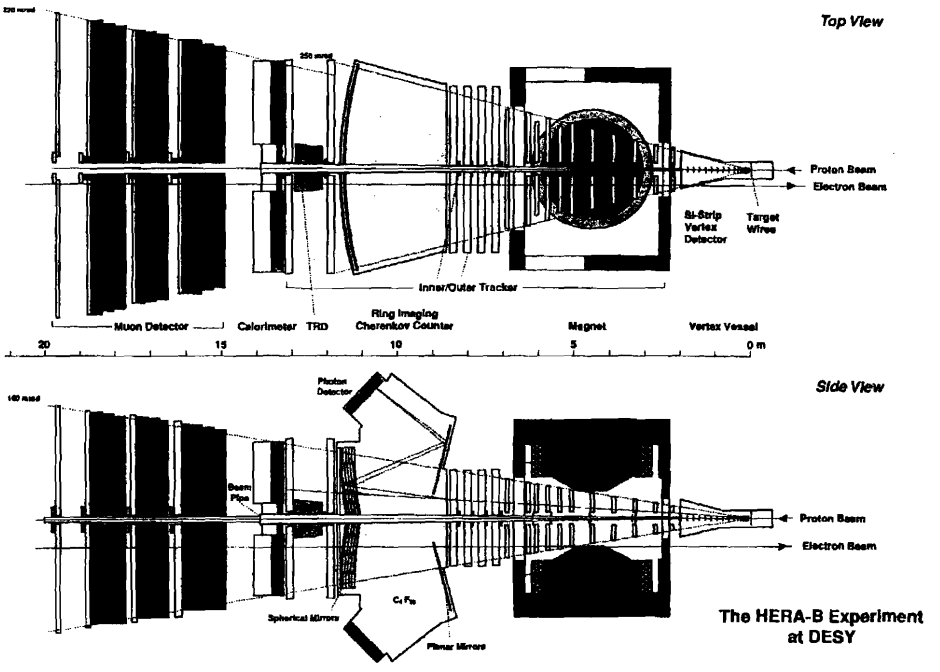

Рис. 1. Внешний вид спектрометра HERA-B.

Программа HBGEAN четко и точно описывает геометрию спектрометра HERA-B. Подпрограммы пакета HBGEAN заполняют структуру спектрометра в стандартные банки пакета GEANT3.21. С точки зрения программы GEANT детектор состоит из суперслоев, которые в свою очередь могут состоять из детекторов (чувствительные объемы) и из стенок (нечувствительные объемы). Геометрия суперслоев соответствует геометрии детекторов спектрометра HERA-B, описанных в [4]. Каждый суперслой имеет свой индивидуальный номер или уникальное символьное имя. В программе принята правая система координат, ось Z направлена вдоль оси протонного пучка, ось Y - вверх. Пакет HBGEAN описывает свойства материалов, из которых изготовлены суперслои: заряд и атомный номер, плотность, радиационная длина, длина поглощения, сечение и другие свойства характерные для применяемого материала. При прохождении частицы через чувствительную среду, сохраняются характерные особенности взаимодействия частицы с материалом среды.

Для анализа ДПИ HERA-B было создано и отлаженно программное обеспечение, которое интегрировано в общую схему анализа HERA-B, что дало возможность произвести анализ ДПИ в общих условиях эксперимента HERA-B, с учетом всех физических процессов. ДПИ представляет собой структуру из чередующихся слоев детектирующих элементов, разделенных между собой радиатором. Радиатор - слоистая структура, излучающая рентгеновское переходное излучение при прохождении высокоэнергетичных заряженных частиц. В качестве детектирующего элемента используется пропорциональная цилиндрическая камера (ПК), заполненная газовой смесью на основе Xe. Моделирование ДПИ включает в себя следующие процессы, происходящие в детекторе переходного излучения при прохождении через него заряженной частицы [7],[8]:

- энергетические и угловые спектры фотонов рентгеновского переходного излучения;
- процесс фотопоглощения включает в себя процесс фотопоглощения в среде радиатора, а также и в газе, который регистрирует фотоны переходного излучения, кроме того учитываются процессы выбивания электронов с K- и L- оболочек атомов;
- распределение первичных соударений и вычисление энергии, потерянной частицей в тонких слоях газа, на базе моделирования ионизационных потерь в тонких слоях газа;

- зависимость скорости дрейфа заряда от напряженности электрического поля, учитывая и эффект нестабильности положения анода;
- моделирование электронного сигнала, используя реальный отклик электроники: предусилителей, формирователей и дискриминаторов, а также шумы и флуктуацию пьедесталов электроники.

Идентификации, используемые в экспериментальном анализе на основе переходного излучения, применяемые в широкоаппертурных детекторах, основаны на следующих методах [9]:

- Измерение полной энергии, выделившейся в детектирующем элементе, (dE/dx + γ ДПИ). Это так называемый Q-метод. Основным фоном является "хвост" распределения Ландау для ионизационных потерь.
- Метод счета кластеров - N-метод. Кластеры образуются фотоэлектронами от абсорбции фотонов РПИ. Для подобных ионизационных кластеров фоном являются уже не полные ионизационные потери, а только δ -электроны с энергией порядка нескольких кэВ.

Для создания практического ДПИ, содержащего, как правило, большое количество элементов, очень важным требованием является простота и надежность электроники. Учитывая этот факт, а также то, что N-метод дает возможность реализации быстрого триггера, и учитывая преимущества этого метода, в качестве метода идентификации в ДПИ HERA-B выбран метод счета кластеров.

2.2 Оптимизация ДПИ HERA-B.

В большинстве случаев построения детектора переходного излучения (ДПИ) фиксируется длина детектора L_{det}: либо это протяженность детектора вдоль направления пучка для экспериментов с фиксированной мишенью, либо это расстояние по радиусу для экспериментов на встречных пучках.

Для оптимизации детектора с фиксированной длиной применяют подбор [10]:

- толщины радиатора, l_1;
- расстояние между соседними частями радиатора, l_2;

- число слоев радиатора;
- газовая смесь и размер детектирующего элемента.

Основным критерием оптимизации ДПИ является фактор режекции R. Это значение определяется для двух типов частиц (1 и 2) с одинаковым значением Лоренц-фактора

$$R = \frac{\eta_1}{\eta_2} \ , \tag{1}$$

где η_1, η_2 - эффективность детектирования частиц 1 и 2.

2.2.1 Анализ загрузки и выбор структуры и детектирующих элементов детектора.

Детекторы, которые будут решать задачи подобные задачам эксперимента HERA-B, должны отвечать требованиям работы спектрометра с большим потоком данных. В связи с этим встает вопрос о загрузках детекторов, входящих в спектрометр HERA-B. Загрузка ДПИ заряженными частицами была проанализирована для условий отвечающих реальным условиям эксперимента с помощью метода МС. Двумерное распределение загрузки заряженными частицами в области расположения ДПИ показано на рис. 2.

Наиболее загруженной областью является область расположенная в непосредственной близости от пучковой трубы. Конструктивно детектор был разбит на 4 модуля (2 больших модуля и 2 маленьких), причем детектирующий элемент большого модуля разделен на две части. Анализ загрузок детектирующих элементов ДПИ проведен для событий отвечающих условиям эксперимента HERA-B с помощью пакета HBGEAN. В качестве детектирующего элемента рассматривались пропорциональные камеры диаметром 4, 6 и 8 мм. В ходе проведения анализа отбирались треки заряженных частиц, проходящие через ДПИ. На рис. 3 показано распределение загрузок по ПК в отдельных блоках ДПИ (соответственно для диаметров ПК равных 6 мм).

В пропорциональных камерах, находящихся в непосредственной близости от протонной трубы, загрузки значительно выше, чем в камерах расположенных на переферии. Видна тенденция увеличения загрузок с увеличением диаметра детектирующего элемента. Однако уменьшение диаметра пропорциональной камеры связано с увеличением числа каналов электроники, что не только приводит к техническим трудностям

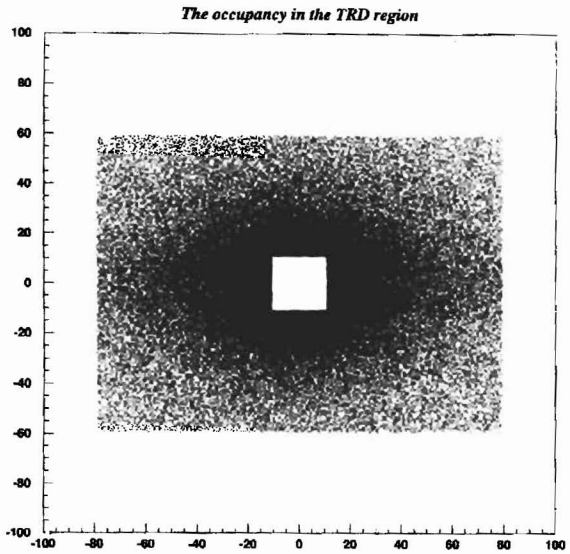

Рис. 2. Распределение загрузки заряженными частицами в области расположения ДПИ (в плоскости XY).

изготовления детектора, но и снижает надежность детектора, а также значительно увеличивает цену детектора. Среди особенностей, присущих детекторам, используемым в экспериментах на коллайдерах, следует отметить радиационную стойкость, малое энергопотребление, предельно достижимую миниатюризацию и возможность компрессировать информацию с детектора для уменьшения числа электрических или оптических линий связи между детектором и системой сбора информации. Дополнительные требования к электронике увеличивают ее стоимость, что в связи с большим числом регистрирующих каналов, достигающих в современных экспериментах сотен тысяч и более, может являться решающим фактором при выборе того или иного детектора или метода регистрации. Исходя из рассмотрения загрузок ДПИ, а также учитывая выше перечисленные аспекты надежности работы детектора и его стоимости, диаметр детектирующего элемента был выбрал 6 мм. Загрузки в этом случае составляют примерно 10-20 % в зависимости от положения детектирующего элемента.

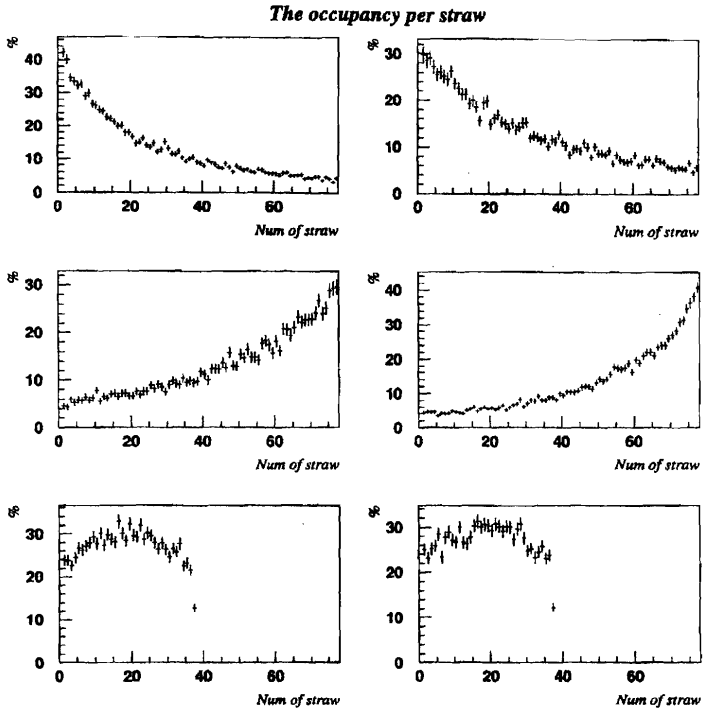

Рис. 3. Распределение загрузок по ПК в отдельных блоках ДПИ (диаметр ПК 6 мм).

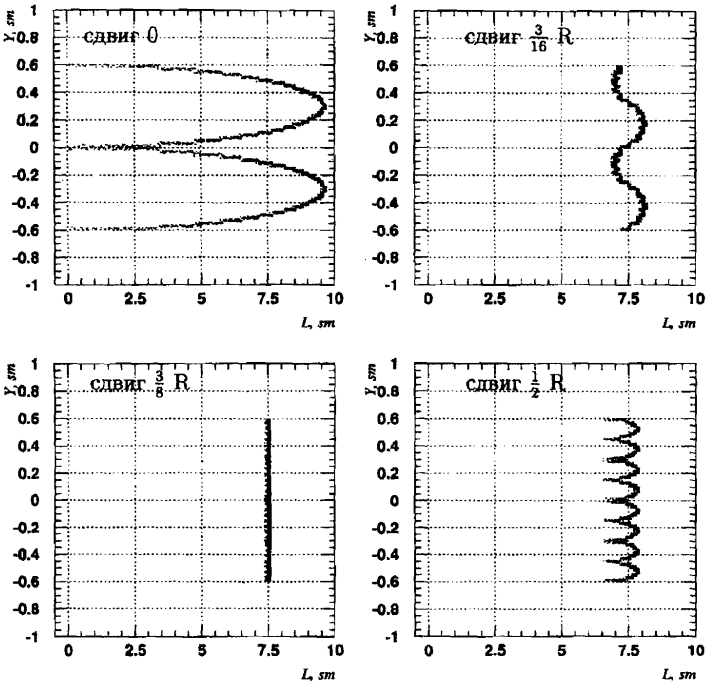

Рис. 4. Выбор оптимального сдвига слоев ПК относительно друг друга.

2.2.2 Позиционирование пропорциональных камер в слое.

Важным вопросом является вопрос взаимного расположения слоев ДПИ для обеспечения однородности чувствительности детектора (одинаковой толщины газа на треке частицы). Анализ проведен на основе структуры из 16 слоев ПК диаметром 6 мм, сдвинутых относительно друг друга на величину δ (рис. 4). При δ=0, существует сильная неоднородность в количестве газа на треке частицы: есть области, в которых частица проходит значительное количество газа (вблизи анода), а есть области, в которых на пути частицы встречается незначительное количество газа (вблизи катода). Эта ситуация хорошо просматривается на рис. 4, верхняя левая гистограмма. Наиболее оптимальным сдвигом, с точки зрения однородности чувствительности ДПИ, является значение $\frac{3}{8}$ R, для которого неоднородность не более 5%.

2.2.3 Оптимизация радиатора.

Важным аспектом оптимизации ДПИ является вопрос о длине радиатора. С увеличением длины радиатора выход переходного излучения увеличивается и достигает насыщения, которое определяется процессами генерации и поглощения фотонов РПИ, т.е. наступает эффект насыщения. Для выбора оптимальной длины радиатора ДПИ HERA-B был произведен анализ зависимости фактора режекции пионов от длины радиатора для различного числа слоев (ПК + радиатор) и для различных энергетических порогов (E_{th}^{cut} = 5,6,8,10 кэВ). В качестве регистрирующего элемента использовались: ПК диаметром 6 мм, радиатор - полипропиленовые фибры, газ - тройная газовая смесь на основе ксенона (70%Xe + 20 % CF_4 + 10% CO_2). Число слоев (ПК + радиатор) изменялось: 28, 32 и 36 слоев. Для определения e/π-режекции использовались электроны и пионы с импульсом 30 ГэВ/с. Были получены зависимости фактора e/π-режекции от длины радиатора и выбран наиболее оптимальная длина радиатора (L_{rad}^{opt} = 2.3 см) с точки зрения наилучшего фактора режекции (см. рис. 5).

Одним из ключевых моментов в разработке ДПИ является вопрос о полной длине детектора (или о числе слоев в ДПИ), который прямым образом связан с возможностью создания идентификатора большой апертуры. На рис. 6 показана зависимость π/e-режекции от числа слоев в ДПИ, из которых видно, что для довольно широкого диапазона порогов (при высокой эффективности регистрации электронов $\epsilon \geq$ 97.5 %), наи-

более предпочтительным является ДПИ состоящий из 32 слоев (длина радиатор+straw L=2.3 см).

В подтверждении правильности вывода о полной длине ДПИ можно привести расчет зависимости режекции от эффективности регистрации электронов. На рис. 7 показана зависимость π/e-режекции как функции эффективности регистрации электронов для изолированных частиц с энергией 30 ГэВ для различных энергетических порогов (4 - 12 кэВ) и для различного количества слоев (детектирующий элемент плюс радиатор). Характерные особенности легко видны из рис. 7. Однако заметим, что при фиксированной эффективности регистрации электронов (напр, ϵ = 95 %), наилучшим фактором режекции обладает детектор с большим числом слоев ("длинный" ДПИ, $\sim$ 70-85 см), однако фактор режекции слабо меняется при переходе от 32 слоев к 36 слоям, что обьясняется увеличением вероятности взаимодействия π с материалом ДПИ. Кроме того, уменьшение числа слоев при незначительном изменении фактора режекции позволит уменьшить и число каналов электроники, что тоже само по себе немаловажно, т.к. значительно упрощает обслуживание детектора, а также уменьшает и общую стоимость детектора. В окончательном варианте ДПИ HERA-B имеет 32 слоя.

Важной характеристикой метода счета кластеров является зависимость режекции частиц от пороговой энергии. На рис. 8 показана e/π-режекция как функция пороговой энергии. Видно, что в диапазоне изменения порогов (TH = 5.0-8.0 кэВ) сепарация частиц изменяется довольно слабо. Это свойство определяет требование к стабильности всей системы в целом и, в частности, позволяет использовать для счета кластеров простую и недорогую электронику.

3 Описание ДПИ HERA-B.

Данные такого полного анализа позволили произвести окончательный выбор геометрии ДПИ HERA-B. Основной задачей ДПИ в эксперименте HERA-B, как прибора предназначенного для идентификации электронов, является задача разделения электронов и пионов в многочастичных событиях. ДПИ представляет собой структуру из слоев пропорциональных цилиндрических камер (straw), заполненных газовой смесью с большим содержанием Xe, разделенных между собой излучающей структурой (радиатор) на основе полипропиленовых волокон (полипропиленовых фи-

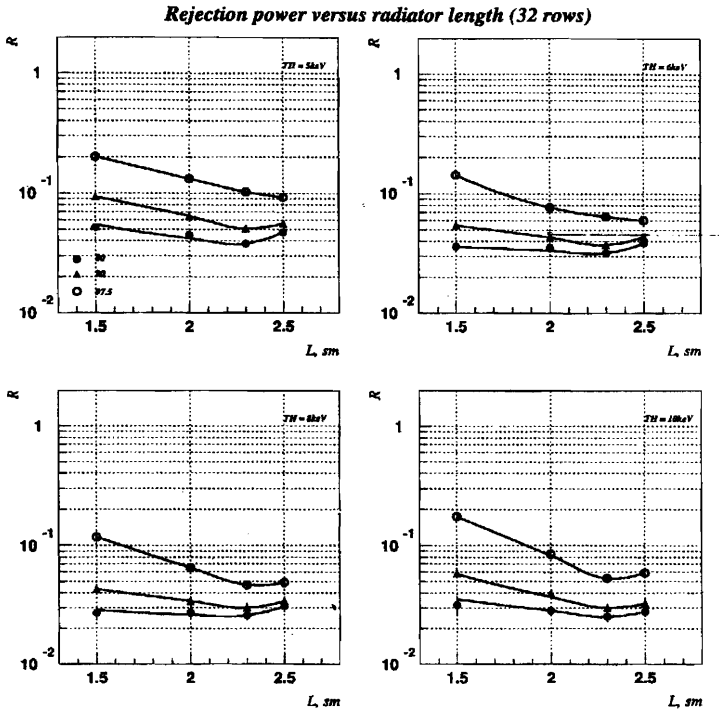

Рис. 5. Зависимость коэффициента режекции от длины радиатора для 32 слоев (ПК + радиатор).

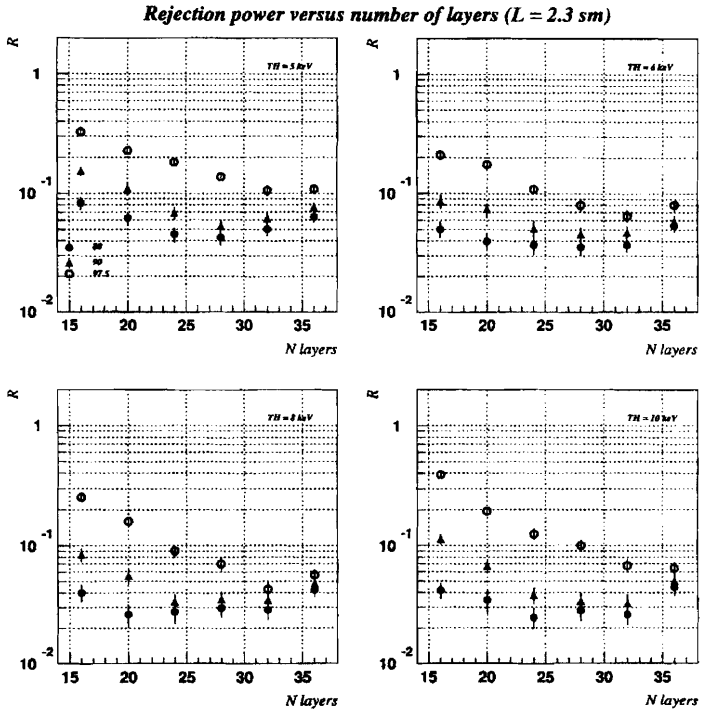

Рис. 6. Зависимость коэффициента режекции от числа слоев (ПК + радиатор) для радиатора длиной 2.3 см.

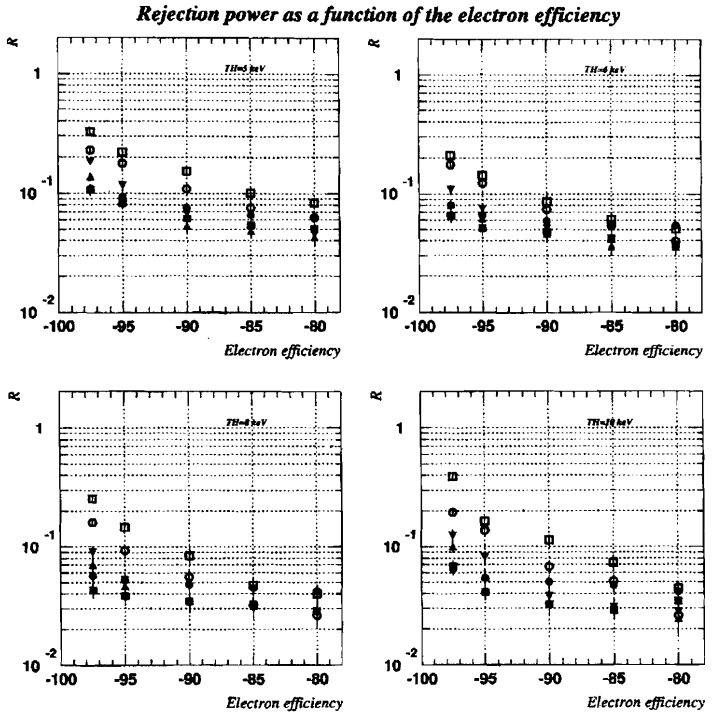

Рис. 7. Зависимость коэффициента режекции от эффективности регистрации электронов.

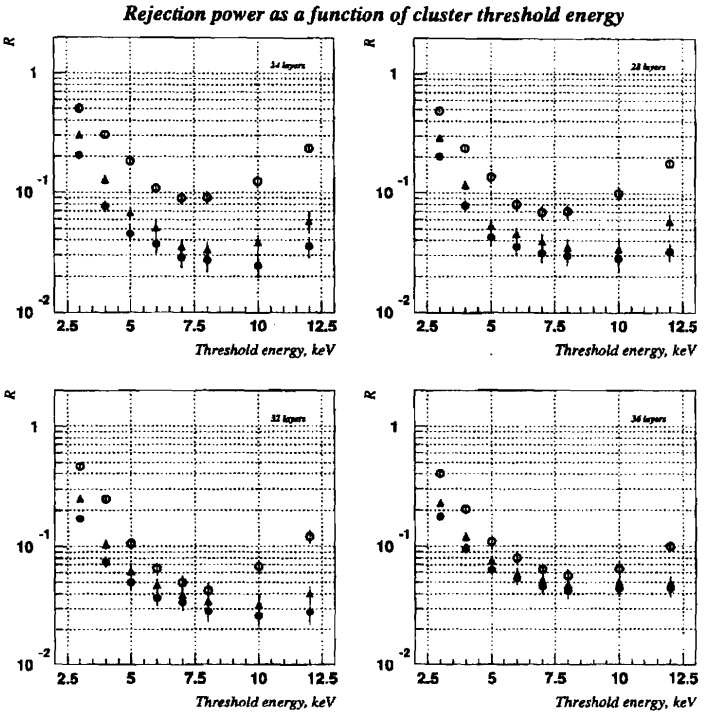

Рис. 8. Зависимость коэффициента режекции от энергетического порога

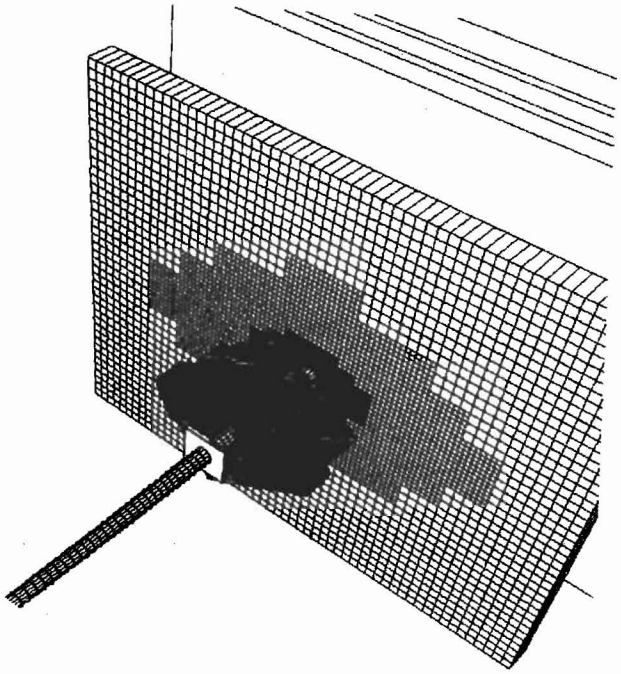

Рис. 9. Внешний вид ДПИ.

бров) ориентированных специальным образом. ДПИ размещен между трекерными плоскостями TC01 и TC02. Размеры ДПИ - выбраны так чтобы перекрыть внутреннюю часть электромагнитного калориметра, работающую в самых тяжелых условиях, с точки зрения загрузок частиц. Внешний вид ДПИ показан на рис 9.

В выбранной конфигурации детектор разделен на два суперслоя вдоль оси Z, в каждом из которых по 4 модуля двух типов (см. табл 1).

Модуль ДПИ выполнен на основе новейшей технологии многослойной структуры радиатора переходного излучения и пропорциональных камер. Стереоугол суперслоев $\pm$ 30 град (что позволяет определять координаты прохождения частицы). Каждый модуль имеет 16 слоев ПК, разделенных между собой радиатором переходного излучения. Последующий слой ПК сдвинут относительно предыдущего на 3/8 диаметра ПК,

Таблица 1: Основные характеристики модулей ДПИ.

	Тип I	Тип II
Полная длина модуля, мм	1300	580
Рабочая длина ПК, мм	1240	550
Длина модуля вдоль оси Z, мм		
без прерадиатора	357	357
с прерадиатором	367	367
полная	377	377
Ширина модуля, мм		
минимальная	424	196
максимальная	456	255
диаметр ПК, мм	6	6
Количество слоев в модуле	16	16
Количество ПК в слое	78	36
Количество ПК в модуле	1248	576

чтобы обеспечить одинаковую толщину ксенона на пути частицы, а также уменьшить дисперсию числа сработавших ПК при прохождении частицы через модуль. Слой - самоподдерживающаяся конструкция склеенная из ПК и чередующихся полосок из углекомпозита толщиной 0.25 мм и шириной 5.5 мм, играющих роль жесткого элемента. Слой размещен в герметичном параллелепипеде, стенки которого выполнены из трехслойной сотовой структуры на основе углепластиковых композиционных материалов. В качестве детектирующего элемента для регистрации переходного излучения используются пропорциональные цилиндрические камеры диаметром 6 мм, изготовленные из Kapton-пленки и имеющие высокую пропускаемость РПИ и хорошие механические свойства. Анодом является позолоченная вольфрамовая проволочка диаметром 30 мкм , изготовленная фирмой "LUMI METALL". Рабочий газовый объем заполнен смесью (70 % Xe + 20% CF_4 + 10%CO_2) [4].

Радиатор переходного излучения - полипропиленовые фибры (плотность $\rho = 0.101$ г/cm^3). Выбор типа радиатора основан на результатах тестирования полномаштабного прототипа ДПИ [4].

При функционировании ДПИ через него будет протекать поток инертной газовой смеси состава: ксенон (70±1 %), фторид углерода CF_4 (20±1 %) и диоксид углерода CO_2 (10±1 %). Примеси кислорода, азота и воды, соответственно, 0.1, 0.05 и 0.001 %. Объем газа 200 л, скорость потока газа 0.03 cm^3/мин/ПК. Поскольку газообразный ксенон высшей категории качества составляет 70 % от общего объема рабочей смеси и является

дорогостоящим газом, то его одноразовое использование при эксплуатации детектора в непрерывном режиме нерентабельно. Поэтому необходимо использование системы циркуляции и чистки газовой смеси при функционировании ДПИ.

Высоковольтные и сигнальные выводы размером 0.3 мм выходят наружу с одной из поверхностей модуля. Такая поверхность является несущей для расположенных на ней специальных плат с разъемами для соединения с электроникой. Высокое напряжение подается с помощью специальной шины, расположенной на этой же поверхности.

Сигналы с чувствительных проволочек передаются на вход усилителя-формирователя-дискриминатора ASDBLR (Pensilvania, USA) [11]. Основные характеристики: время формирования - 8 нсек; восстановление базовой линии меньше чем за 90 нсек при сигнале 100 fC; стабильный порог при частоте 20 МГц; низкий и высокий порог дискриминатора, соответственно для восстановления трека или регистрации рентгеновского переходного излучения. Выход ASDBLR соединен со входом TDC платы с помощью витой пары. TDC плата и буфер памяти для каждого канала расположен в общей DAQ системе. Каждая TDC плата состоит из 16 ASIC чипов. Старт TDC совпадает с приходом сигнала с анодной проволочки, а Стоп вырабатывается по Общему Стопу от bunch clock. Общий Стоп будет задерживаться для каждого суперслоя с помощью подбора индивидуальных линий задержек.

Основные требования к ДПИ HERA-B являются:

- идентификация электронов с эффективностью больше 95%;
- фактор режекции адронов на уровне $\sim 10^{-2}$;
- быстродействующая электроника обеспечивает сигнал для работы детектора в триггере второго уровня;
- возможность реконструкции треков заряженных частиц.

4 Заключение.

Полномасштабный модуль ДПИ (тип I) был установлен в экспериментальном зале на коллайдере HERA, DESY. Экспериментальные данные, полученные в ходе проведения тестовых сеансов 1996-97 годов, показали

возможность работы детектора переходного излучения в реальных условиях эксперимента HERA-B. ДПИ может работать в условиях больших загрузок, в тяжелых фоновых и радиационных условиях. В данных исследованиях ДПИ проявил себя как надежный прибор, работающий в стабильном режиме длительное время.

5 Благодарность.

Хочу выразить свою глубокую, искреннюю благодарность и признательность Долгошеину Б.А. и Савельеву В.И. за плодотворное обсуждение результатов, а также за постоянное внимание и создание творческой атмосферы. Мне приятно поблагодарить коллектив коллаборации HERA-B за предоставленную возможность участия в эксперименте.

Литература

[1] I.I.Y.Bigi et all., in C.Jarlskog (ed.): CP violation: Advaced Series on Directions in High Energy Physics, Vol. 3, World Scientific, Singapore, 1989.

[2] M.Gronau : CP violation in the standart model: the B mezon system, TECHNION-PH-93-36, Oct 1993. 19pp. Invited talk at the Workshop on B Physics at Hadron Accelerators, Snowmass, CO, 21 Jun - 2 Jul 1993.

[3] H.Albrecht et al., An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring, Letter of Intent, DESY-PRC 92/04 (1992)

[4] Hartouni E. et. al., An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring. Design Report, DESY-PRC 95/01; January 1995.

[5] PYTHIA 5.7 and JETSET7.4, Physics and Manual, CERN-TH.7112/93

[6] H.Albrecht, S.Nowak ARTE.The event Reconstruction and Analysis Tool for HERA-B, DESY, January 1996

[7] V.Saveliev, Proceeding of the International Conference on Computing in High-energy Physics (CHEP 97), Berlin, Apr 1997.

[8] V.Saveliev, Proceeding of the International Conference on Computing in High-energy Physics (CHEP 95), Rio de Janeiro, Sept. 1995.

[9] B.Dolgoshein// Nucl. Instr. Methods 1986, A252, p.137.

[10] B.Dolgoshein// Nucl. Instr. Methods 1993, A326, p.434.

[11] B.Bevensee et al., An Amplifier-Shaper-Discriminator with Baseline Restoration for the ATLAS Transition Radiation Tracker, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104