



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2003–1
На правах рукописи

Семенов Павел Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПРОТОТИПА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА
ЭКСПЕРИМЕНТА ВTeV**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Протвино 2003

УДК 539.1.07

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

Научный руководитель – доктор физико-математических наук А.Н. Васильев.

Официальные оппоненты: кандидат физико-математических наук М.Ф. Рунцо (кафедра “Экспериментальные методы ядерной физики” МИФИ), доктор физико-математических наук С.В. Донсков (ОЭФ, ИФВЭ).

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

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2003 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета К 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 034.02.01

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2003

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию характеристик электромагнитного калориметра на основе сцинтилирующих кристаллов вольфрамата свинца (PbWO_4). Такой калориметр будет использоваться в эксперименте VTeV [1], в котором участвует автор.

VTeV — новый коллайдерный эксперимент в Фермилаб. Целью эксперимента является поиск явлений, выходящих за рамки Стандартной Модели (СМ), и прецизионное измерение параметров СМ, таких как углы смешивания в матрице Кабиббо-Кобаяши-Маскава. Конкретно предлагаются измерения CP -нарушения, редких распадов и смешивания адронов, содержащих b - и c -кварки.

Для реконструкции фотонов конечного состояния в состав детектора VTeV входит электромагнитный калориметер. Он должен обеспечивать хорошее энергетическое и пространственное разрешение, иметь небольшой мольеровский радиус для минимизации перекрывающихся ливней, а также быстрый сигнал для минимизации перекрытия ливней во времени. Так как некоторые из компонентов детектора VTeV будут работать в условиях высокого уровня радиации, необходимая радиационная стойкость очень важна. Одним из материалов, который потенциально удовлетворяет требованиям эксперимента VTeV , и является PbWO_4 .

Характеристики калориметра, существенные для ответа на вопрос о возможности применения данных кристаллов в эксперименте ВТeV, изучались на примере прототипа. Работа проводилась в Протвино на ускорителе У-70, где на канале 2Б была оборудована установка, позволяющая проводить исследования с чистым электронным пучком в широком диапазоне энергий 1–45 ГэВ, точным определением импульса пучковой частицы и интенсивностью до 10^6 за цикл ускорителя, а также с пучком мюонов и высокоинтенсивным пучком пионов.

Актуальность изучаемых задач

Изучение *CP*-нарушения является сегодня одним из наиболее актуальных направлений физики высоких энергий. Ключевым моментом в измерениях является точность. Стабильность характеристик детектора вносит существенный вклад в предельную точность измерений. Как показали исследования CMS и ALICE, кристаллы $PbWO_4$ обладают очень хорошим энергетическим и координатным разрешением.

Но насколько стабильны их характеристики? Кроме того, эти исследования проводились на фоне постоянно развивающейся технологии производства кристаллов $PbWO_4$, что не позволяет однозначно сравнивать их характеристики при проектировании нового детектора. Необходимо было провести систематическое исследование широкого спектра характеристик кристаллов, произведенных с учетом последних достижений технологии разных производителей.

В отличие от CMS электромагнитный калориметр детектора ВТeV не находится в сильном магнитном поле. Поэтому в качестве фотодетектора выбран фотоумножитель, который обеспечивает лучшее энергетическое разрешение, чем фотодиод или фототриод, используемый в CMS. Кроме того, CMS исследовал свойства радиационной стойкости кристаллов в основном с помощью радиоактивных источников, и не ясно было, как ведут себя кристаллы при облучении высокоэнергичными частицами.

Исследование энергетического и координатного разрешений прототипа электромагнитного калориметра с фотоумножителем в качестве фотоприемника и радиационной стойкости кристаллов

PbWO₄ при облучении их частицами ГэВ-ных энергий явилось новой и актуальной задачей.

Цель диссертационной работы

Целью данной работы является прецизионное исследование свойств прототипа электромагнитного калориметра на основе кристаллов вольфрамата свинца нескольких производителей (Китай – Шанхайский институт керамики и Пекин, Россия – Апатиты и Богородицк) и сравнение полученных результатов с данными моделирования по методу Монте-Карло.

Основные пункты программы измерений:

- Энергетическое разрешение для электронов с энергиями 1–45 ГэВ.
- Координатное разрешение в той же области энергий.
- Однородность светосбора вдоль кристалла.
- Зависимость световыхода от температуры.
- Свойства радиационной стойкости при облучении электронами, пионами и смешанным спектром частиц.

Научная новизна и практическая ценность работы

Полученные энергетическое и координатное разрешения являются лучшими в мире для кристаллов такого типа.

Впервые в мире проведены измерения радиационной стойкости кристаллов при облучении высокоэнергичными электронным и адронными пучками, а также смешанным спектром частиц, с новой остротой поставившие проблему радиационной стойкости PbWO₄.

Результаты работы вошли в отчетные и проектные документы коллаборации VTeV.

Для проверки свойств кристаллов нескольких производителей на ускорителе У-70 была создана специализированная установка, включающая прототип электромагнитного калориметра и систему прецизионного измерения импульса пучковой частицы ($\sigma_p/p = 0.13\%$ при энергии 45 ГэВ, когда многократное рассеяние пренебрежимо мало).

В работе предложена и опробована система мониторинга изменения прозрачности кристаллов от радиации на основе нескольких светодиодов разной длины волны.

На защиту выносятся

- Результаты и методика измерений энергетического и координатного разрешений прототипа электромагнитного калориметра на основе сцинтиллирующих кристаллов вольфрамата свинца.
- Результаты исследований свойств радиационной стойкости кристаллов вольфрамата свинца.
- Результаты и методика измерения продольной однородности светосбора и температурной зависимости световыхода этих кристаллов.

Апробация работы

Результаты, приведенные в диссертации, опубликованы во внутренних документах коллаборации BTeV, в виде препринтов ГИЦ ИФВЭ, в электронном архиве arXiv.org, трудах конференции INSTR02 и посланы для публикации в журнал NIM [1,2,3,4]. Результаты диссертации также докладывались на рабочих совещаниях коллаборации BTeV и CMS, семинарах ОЭФ ГИЦ ИФВЭ, международных конференциях INSTR02, RDMS CMS и на сессии АН РФ.

Апробация диссертации прошла в ГИЦ ИФВЭ 4 декабря 2002 г.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации 82 страницы печатного текста, в том числе 44 рисунка и 8 таблиц; библиография включает 32 наименования.

Содержание работы

В **Главе 1** рассматриваются задачи эксперимента BTeV.

Основными задачами эксперимента BTeV являются проверка объяснения Стандартной Моделью смешивания кварков и *CP*-

нарушения, а также поиск явлений, выходящих за рамки Стандартной Модели. Углы и стороны Унитарного Треугольника в $B\text{TeV}$ могут быть определены с большой точностью из реакций с b -кварками. А изучение эффектов смешивания и CP -нарушения в реакциях с c -кварками, которые, как предсказывает Стандартная Модель, должны быть незначительными, является хорошей возможностью обнаружить явления, не укладывающиеся в рамки Стандартной Модели.

Основные характеристики установки $B\text{TeV}$, позволяющие достичь поставленной цели:

- Хорошее временное разрешение трековой системы, которое обеспечивает эффективный триггер на смещенную вершину и позволяет сильно подавить фон при анализе данных.
- Очень хорошая система идентификации частиц на основе Ring Imaging Cherenkov (RICH) детектора.
- Электромагнитный калориметр с высоким разрешением на основе кристаллов вольфрамата свинца, что дает возможность надежно и с хорошей точностью измерять конечные состояния с одиночными фотонами или нейтральными пионами.

Более подробно в представляемой работе рассмотрены электромагнитный калориметр $B\text{TeV}$ на основе сцинтиллирующих кристаллов $PbWO_4$ и его роль в решении задач эксперимента. Кроме определения конечных состояний с одиночными фотонами и нейтральными мезонами электромагнитный калориметр будет очень полезен при идентификации электронов для определения типа B -мезона в исследованиях CP -нарушения.

Требования $B\text{TeV}$ к электромагнитному калориметру однозначно определяют кристаллы вольфрамата свинца как наиболее подходящий материал.

Глава 2 содержит описание установки, состоящей из прототипа электромагнитного калориметра и системы мечения для определения импульса пучковой частицы. Приведены характеристики используемого пучка, системы мечения, электроники системы сбора данных и мониторинной системы.

Прототип электромагнитного калориметра представляет собой матрицу 5×5 кристаллов PbWO_4 с 10-диодными ФЭУ Hamamtsu R5800 в качестве фотоприемников, помещенную в светоизолированный корпус. Кристаллы с размерами $27 \times 27 \text{ мм}^2$ в сечении и 220 мм в длину обернуты в тайвек толщиной 170 мкм. При измерении разрешения между кристаллами и ФЭУ была нанесена оптическая замазка, во время измерения радиационной стойкости кристаллов замазка удалялась. Световыход PbWO_4 сильно зависит от температуры [3], поэтому корпус прототипа выполнен как термостат, а температура внутри стабилизируется криотермостатом LAUDA с точностью $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ и измеряется в 24 точках системой термодатчиков.

Прототип калориметра установлен на перемещаемую подставку для целей калибровки и облучения любого кристалла в матрице при исследовании радиационной стойкости. Исследования проводились на канале 2Б ускорителя У70, где после модернизации системы питания магнитных элементов был получен электронный пучок в широком диапазоне энергий 1–45 ГэВ. Кроме того, канал легко перестраивался на высокоинтенсивный пучок пионов (до 10^7 за сброс) и электронный пучок (до 10^6 за сброс), что позволяет эффективно проводить исследования радиационной стойкости.

При измерении энергетического разрешения необходимо учесть разброс по импульсу электронного пучка, который при энергии 45 ГэВ составляет 2–3% и может достигать 5–7% при низких энергиях около 1 ГэВ. Так как ожидаемое энергетическое разрешение калориметра на PbWO_4 значительно лучше, импульс каждой заряженной пучковой частицы определяется спектрометром из четырех дрейфовых камер и анализирующего магнита [2]. Таким образом, разрешение по импульсу при энергии 45 ГэВ, когда многократное рассеяние пренебрежимо мало, достигало 0.13%.

Система сбора данных на основе электроники стандарта КАМАК и VME интерфейсом к шине PCI (см. **рис. 1**) состоит из:

- крейта КАМАК с системой АЦП для регистрации заряда с ФЭУ;
- модулей ВЦП для измерения времени прихода сигналов с дрейфовых камер;
- триггерной логики.

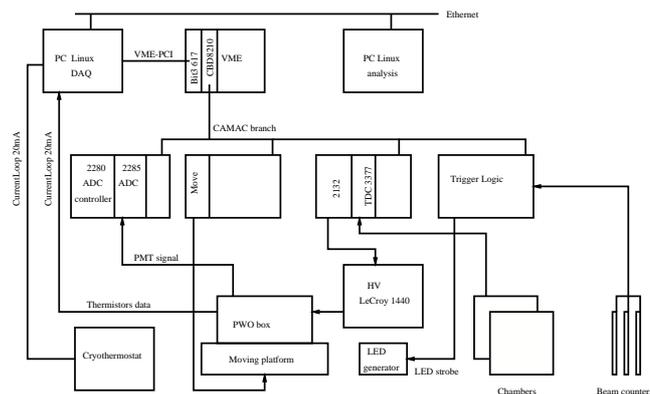


Рис. 1. Блок-схема системы сбора данных.

Управление и считывание электроники КАМАК происходит через драйвер ветви CES CBD8210, который также обеспечивает и прерывания для синхронизации с циклом У70. Программное обеспечение системы сбора данных работает под управлением операционной системы Linux, что позволяет эффективно организовать распределенную систему на основе сетевого протокола TCP/IP.

При длительных прецизионных измерениях большое значение имеет мониторинг различных параметров измерительной системы. Это осуществляет система медленного контроля, которая включает в себя:

- мониторинг и управление системой высоковольтного питания (LeCroy 1440),
- управление температурой внутри прототипа криотермостатом LAUDA,
- измерение температуры кристаллов термодатчиками,
- мониторинг коэффициентов усиления ФЭУ с помощью светодиодных импульсов,
- управление перемещаемой подставкой.

Сигнал с ФЭУ измеряется интегрирующим 15-битным АЦП LeCroy 2285 в течение 150 нс. Чувствительность АЦП, используемая в описываемых измерениях, составляет 30 fC на отсчет.

Мониторная система на светодиодах занимает существенное место в представляемой работе как по объему затраченного времени, так и по значению полученных данных. Последний вариант мониторинной системы состоит из:

- 4 светодиода с длинами волн 660; 580; 530; 470 нм;
- 50 оптических волокон;
- двух PIN-диодов Hamamtsu S6468-05;
- отдельного ФЭУ с α -источником (YAP кристалл).

Результаты работы мониторинной системы представлены на **рис. 2, 3 и 4.**

В **Главе 3** описаны результаты измерений энергетического и координатного разрешений прототипа, измерений продольной однородности кристаллов, температурной зависимости световыхода, зависимости координатного разрешения от точки попадания в кристалл и угла падения пучковой частицы на кристалл. Описана форма электромагнитного ливня и ее зависимость от энергии. Экспериментальные результаты сравниваются с расчетами по программе GEANT.

Продольная неоднородность светосбора $PbWO_4$ измерялась с помощью мюонного пучка поперек кристалла отдельно для каждого сантиметра его длины. Получившееся распределение Ландау фитировалось, после чего строилась зависимость положения пика распределения в зависимости от расстояния до ФЭУ вдоль кристалла. Определенные таким образом коэффициенты продольной неоднородности использовались при моделировании программой GEANT энергетического и координатного разрешений прототипа калориметра.

Зависимость световыхода $PbWO_4$ от температуры была измерена с хорошей точностью благодаря определению температуры в 24 точках матрицы кристаллов с точностью 0.03 градуса. Измерения проводились с электронным пучком двух энергий 10 и 27 ГэВ. Изменение температуры 1 °С/час обеспечивал криотермостат LAUDA. Световыход линейно зависит от температуры с коэффициентом пропорциональности -2.3% на °С при 18 °С для обеих энергий.

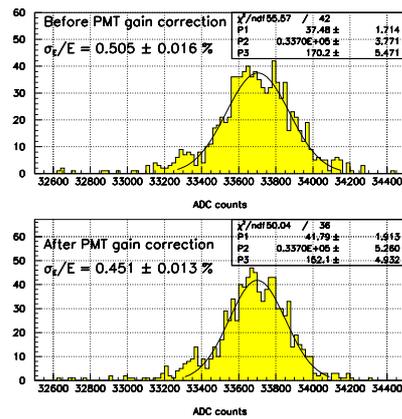


Рис. 2. Энергетическое разрешение до и после коррекции коэффициента умножения ФЭУ с использованием информации монитора по светодиоиду.

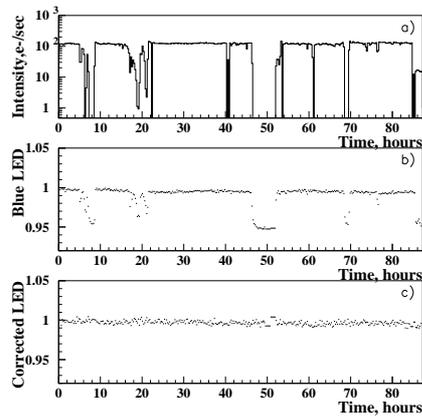


Рис. 3. Интенсивность электронного пучка от времени для шанхайского кристалла S22 – (а). Поведение сигнала от голубого светодиода для этого кристалла до (b) и после (c) коррекции на красный светодиод.

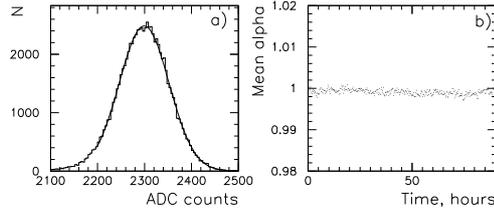


Рис. 4. Спектр α -источника, набранный за 1.5 часа. $\text{Sigma}/\text{mean} = 2.3\%$ при фитировании гауссом – (а). Нормированный сигнал от α в зависимости от времени – (б). Каждая точка соответствует 15 минутам измерения.

При измерениях энергетического разрешения прототип калориметра позиционировался так, что электронный пучок попадал в центр сборки 5×5 . Энергетическое разрешение измерялось при энергиях электронов 1; 2; 5, 10; 27 и 45 ГэВ. Полученная зависимость относительного разрешения от энергии фитируется по формуле

$$\sigma_E/E = a \oplus b/\sqrt{E} \oplus c/E \quad [\%], \quad (1)$$

где E – в ГэВ; $a = (0.33 \pm 0.02)\%$ представляет константный член, обусловленный ошибками калибровки, утечками ливня и продольной неоднородностью светосбора. Монте-Карло (МК) расчеты показывают, что флуктуации ливня и продольная неоднородность светосбора дают вклад в константный член 0.23 и 0.27% соответственно. Таким образом, расчетное значение константного члена 0.35%, что с хорошей точностью совпадает с измеренным.

Стохастический член $b = (1.8 \pm 0.1)\%$ возникает за счет фотостатистики и поперечных утечек ливня из сборки кристаллов 5×5 . Вклад флуктуаций ливня в стохастический член из расчетов МК составляет 0.72%. Основной вклад обусловлен фотостатистикой. Если учесть, что паспортный световыход для PbWO_4 равен 10 фотоэлектронам/МэВ, а площадь окна ФЭУ составляет только 52% площади торца кристалла, расчетный вклад фотостатистики в стохастический член равен 1.45%, и расчетное значение для $b = 1.7\%$.

Линейный член $c = (2.4 \pm 0.2)\%$ возникает из-за шумов электроники фотодетектора. В представляемых измерениях в линейный член также вносит вклад неопределенность в измерении импульса за счет многократного рассеяния электрона в канале.

Результаты моделирования программой GEANT версии 3.21 и сравнение с экспериментальными данными представлены на **рис. 5**.

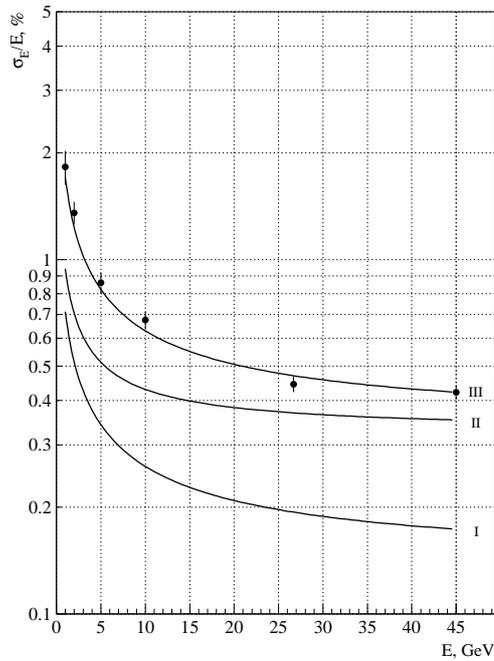


Рис. 5. Сравнение измеренного энергетического разрешения с моделированием программой GEANT. Кривая I показывает результат моделирования с учетом только флуктуаций ливня. Кривая II получена с учетом неоднородности световых выходов вдоль кристалла. На кривой III включена фотостатистика. Точки представляют данные измерений, где вычтены вклады многократного рассеяния и импульсного разрешения пучкового спектрометра.

Трековая система пучкового спектрометра использовалась также при изучении координатных характеристик прототипа электромагнитного калориметра.

При измерении поперечного профиля электромагнитного ливня отбирались события, когда электрон попал в центральный кристалл прототипа для исключения поперечных утечек ливня за пределы сборки. Поперечный профиль ливня для электронов 45 ГэВ представлен на **рис. 6**, где энергосодержание в кристалле нормировано на полную энергию со сборки кристаллов 5×5 . По оси X отложено расстояние от центра кристалла в миллиметрах, определенное трековой системой. Y -координата электрона при этом лежит в пределах 1 мм в центре кристалла.

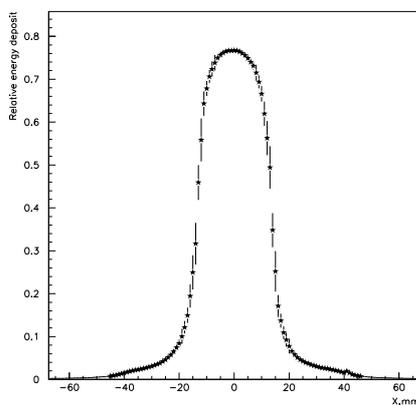


Рис. 6. Поперечный профиль электромагнитного ливня для электронов 45 ГэВ.

Измерения поперечного профиля ливня проводились при энергиях электронов 1; 2; 5; 10; 27 и 45 ГэВ и показывают, что профиль ливня слабо зависит от энергии в этом диапазоне. Зависимость энергосодержания в центральном кристалле от энергии представлена на **рис. 7**.

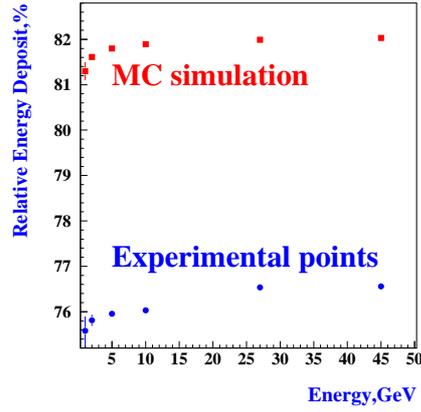


Рис. 7. Зависимость энерговыделения в центральном кристалле от энергии. Отобраны события, когда электроны попадают в площадку $4 \times 4 \text{ мм}^2$ в центре сборки кристаллов.

В табл. 1 представлено энерговыделение (в процентах) в шести кристаллах при попадании электрона в площадку $4 \times 4 \text{ мм}^2$ в центральном кристалле сборки. Цифры в верхней части ячеек определены как среднее для энергий 1 и 2 ГэВ, нижние соответствуют измерениям при энергии 45 ГэВ.

Таблица 1. Энерговыделение в кристаллах (в процентах) при попадании электрона в центральный кристалл сборки.

	Центр	Центр+1	Центр+2
Центр, 1-2 ГэВ	75.7		
45 ГэВ	76.6		
Центр+1, 1-2 ГэВ	3.92	1.180	
45 ГэВ	3.83	1.137	
Центр+2, 1-2 ГэВ	0.402	0.250	0.076
45 ГэВ	0.375	0.226	0.069

Для сравнения результатов измерения поперечного профиля ливня с расчетами использовался программный пакет GEANT версии 3.21 с порогами 500 кэВ для электронов (позитронов) и 60 кэВ для фотонов. Моделирование с использованием программы GEANT-4 с теми же порогами и с порогом до 1 кэВ дает аналогичные результаты. Моделирование с использованием пакета GEANT также указывает на то, что поперечный профиль ливня не зависит от энергии, но для энерговыделения в центральном кристалле дает величину 82% (см. **рис. 7**).

Для определения координаты вершины ливня использовался метод вычисления центра тяжести по энерговыделениям в кристаллах сборки

$$x_{meas} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot x_i / \sum_{i=1}^n E_i , \quad (2)$$

где E_i — энергия с i -того кристалла; x_i — координата его центра, а n — количество кристаллов, по которым проводится взвешивание. Если для лучшего энергетического разрешения необходимо учитывать все кристаллы сборки ($n = 25$), то лучшее координатное разрешение получается при $n = 9$, что объясняется большими флуктуациями остатков ливня вне матрицы 3×3 . Координатное разрешение, усредненное по всему центральному кристаллу сборки, измерялось при нескольких энергиях электронов. Результаты представлены на **рис. 8**. Фитирование дает

$$\sigma_x = (0.16 \pm 0.06) \oplus \frac{2.80 \pm 0.08}{\sqrt{E}} \quad (3)$$

(E — в ГэВ и σ_x — в миллиметрах), что хорошо совпадает с результатами МК-расчетов для координатного разрешения

$$\sigma_x = (0.17 \pm 0.01) \oplus \frac{2.77 \pm 0.01}{\sqrt{E}} . \quad (4)$$

Координатное разрешение сильно зависит от точки попадания электрона в кристалл, как видно из **рис. 9**, где кривая представляет данные расчетов по программе GEANT.

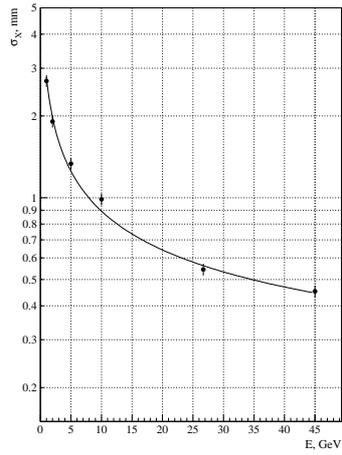


Рис. 8. Измеренная зависимость координатного разрешения от энергии. Использовались данные со сборки кристаллов 3×3 . Кривая соответствует фиту экспериментальных данных.

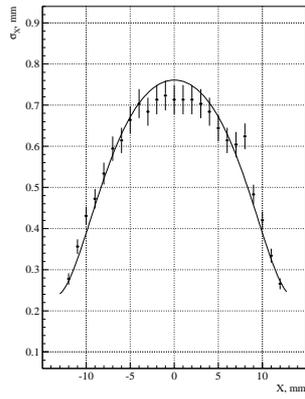


Рис. 9. Измеренная зависимость координатного разрешения от точки попадания электрона в кристалл. Ноль по оси X соответствует центру кристалла. Кривая представляет данные моделирования.

Измеренное координатное разрешение в центре кристалла лучше расчетного, что объясняется более узким размером ливня при моделировании по сравнению с измерениями.

Для определения зависимости координатного разрешения прототипа от угла попадания электрона были проделаны измерения, когда сборка кристаллов повернута так, что нормаль к поверхности составляла 5; 10 и 15 градусов относительно пучка. Результаты измерений для электронов с энергиями 10 и 27 ГэВ представлены на **рис. 10**.

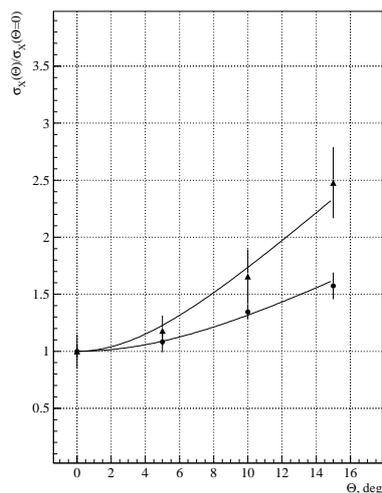


Рис. 10. Зависимость координатного разрешения от угла падения электрона на кристалл, нормированного на координатное разрешение при нормальном падении. Точки представляют данные для электронов с энергией 10 ГэВ, треугольники — для электронов с энергией 27 ГэВ.

Глава 4 посвящена изучению радиационной стойкости кристаллов вольфрамата свинца при облучении электронным и пионным пучками, а также при облучении в смешанных полях адронов и γ -квантов.

Очень важное значение при построении электромагнитных калориметров имеют исследования радиационной стойкости материала калориметра и электроники [4]. Любые типы сцинтиллирующих кристаллов в той или иной степени подвержены радиационным повреждениям. Обычно повреждения вызваны образованием так называемых центров окрашивания, т.е. ловушек для электронов, за счет дефектов в кристаллической решетке и примесей [4]. Центры окрашивания приводят к ухудшению прозрачности кристаллов. Электроны в центрах окрашивания находятся в метастабильных состояниях в широком диапазоне времен жизни.

Таким образом, прозрачность кристаллов может восстанавливаться, когда электрон вырывается из ловушки, что происходит даже при комнатной температуре. В момент, когда скорости образования и разрушения центров окрашивания становятся одинаковыми, прозрачность кристалла перестает уменьшаться, т.е. при постоянной мощности поглощенной дозы должен существовать уровень потери сигнала с кристалла, после которого прозрачность кристалла не изменяется. Кроме того, адронные взаимодействия могут приводить к повреждениям другого типа, изменяя тип ядер, что может вызвать уменьшение сцинтилляционного света. Такие повреждения являются невосстанавливаемыми.

Кристаллы PbWO_4 исследовались очень активно при подготовке эксперимента CMS на LHC. Однако радиационная стойкость изучалась с использованием низкоэнергичных γ -квантов от радиоактивного источника. Поглощенная доза при этом распределяется в основном у поверхности кристалла, что отличается от профиля поглощенной дозы для высокоэнергичных электронного и пионного пучков [4].

В представляемой работе описываются результаты исследования радиационной стойкости кристаллов PbWO_4 при облучении интенсивными пучками электронов 27 ГэВ, пионов 40 ГэВ, а также в смешанном поле адронов и γ -квантов. Облучение электронами и пионами проводилось на канале 2Б при нескольких интенсивностях пучка. При этом прозрачность кристаллов отслеживалась мониторинговой системой на светодиодах, уровень сигнала контролировался пе-

риодически калибровкой на низкоинтенсивном пучке электронов и на мюонах.

Облучение интенсивным (до 6×10^5 частиц за сброс) электронным пучком проводилось в течение недели для шести кристаллов сборки. Мощность поглощенной дозы вычислялась для каждого кристалла по энергovyделению в нем и общей интенсивности пучка. Результат для одного из кристаллов, облученного с мощностью дозы около 15 рад/час, что, согласно расчетам по программе MARS, соответствует средней мощности дозы для большей части детектора VTeV [4], представлен на **рис. 11**.

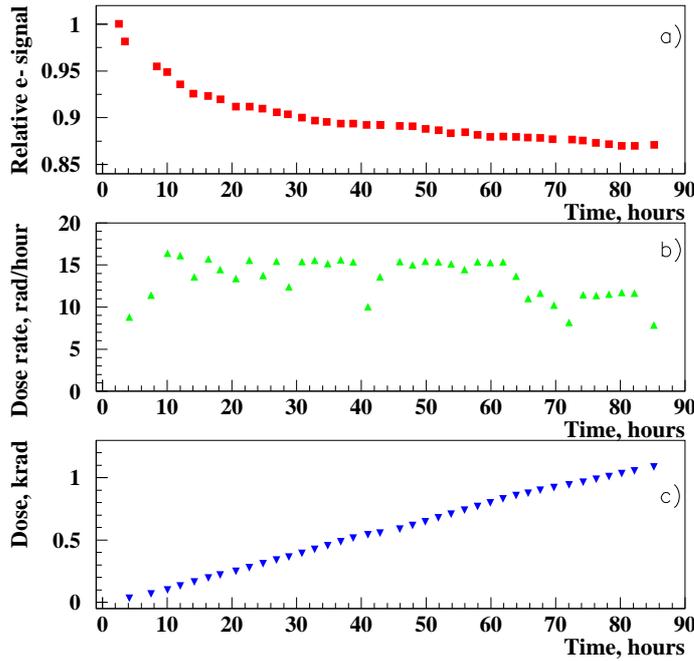


Рис. 11. Нормированный сигнал от электрона с энергией 27 ГэВ для кристалла В14 при 85-часовом облучении – (а). Интенсивность пучка в единицах мощности дозы – (b). Поглощенная доза – (c).

В среднем для мощности дозы 10–25 рад/час 8 кристаллов потеряли 8% света от электрона при поглощенной дозе 1–2 крад.

Для отслеживания деградации прозрачности кристаллов с помощью мониторинжной системы на светодиодах необходимо знать соответствие изменения сигнала от светодиода и электрона. Так как свет от светодиода и сцинтилляций проходит разный путь по кристаллу и имеет отличающиеся спектры, соотношение между потерей сигнала от электрона и мониторинжной системы не будет единицей (**рис. 12a**). Однако наблюдается строгая корреляция между изменениями этих сигналов (см. **рис. 12b**). Коэффициенты пропорциональности при фитировании этих зависимостей линейной функцией для нескольких кристаллов представлены на **рис. 12c**.

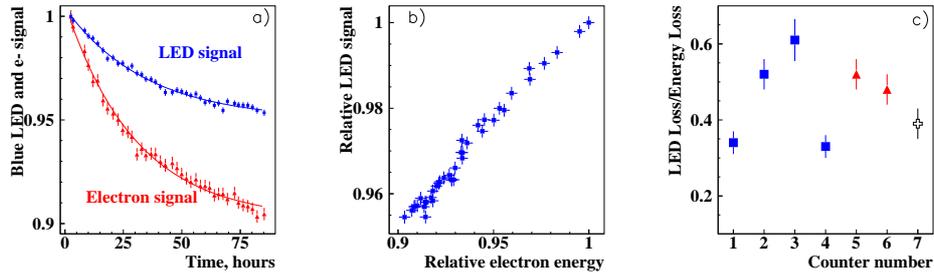


Рис. 12. Сигналы от голубого светодиода и электрона для кристалла S22 при облучении электронами 27 ГэВ при мощности дозы 16 рад/ч – (a). Корреляция светодиод-электрон для этого кристалла – (b). Коэффициенты пропорциональности светодиод-электрон для семи кристаллов – (c). Квадратами обозначены данные для кристаллов V12, V13, V14 и V17, треугольниками — для S14 и S22 и крестами — для апатитского кристалла 1447.

На пионном пучке были проведены исследования радиационной стойкости при нескольких мощностях доз, что достигалось изменением интенсивности пучка от 2×10^5 частиц за сброс до 8×10^6 частиц за сброс. Облучение при каждой мощности дозы длилось 6 часов, после чего интенсивность понижалась до нескольких тысяч за сброс, и в течение 2 часов измерялся сигнал от минимально-ионизирующей ча-

стицы (МІР). Зависимость сигнала МІР, нормированного на сигнал до облучения, от поглощенной дозы для двух кристаллов представлена на рис. 13а и б.

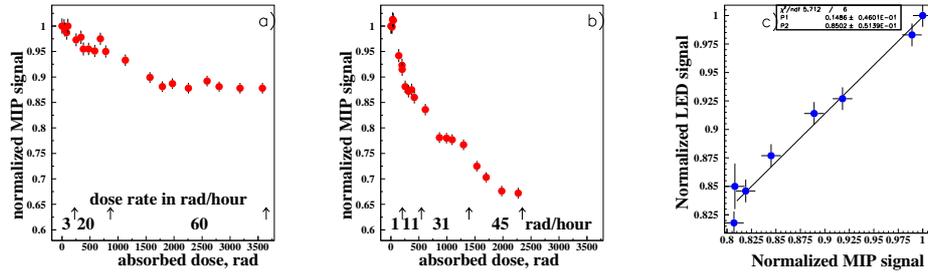


Рис. 13. Нормированный сигнал от минимально ионизирующей частицы в зависимости от поглощенной дозы для кристаллов S16 (а) и S20 (б). Корреляция между сигналами от светодиода и МІР при облучении пионами – (с).

Важная характеристика поведения кристаллов при радиационных нагрузках — скорость восстановления их прозрачности. Восстановление измерялось в течение 15 дней после окончания облучения на сигнале от светодиода. Среднее значение параметра восстановления (200 ± 40) часов. При этом сигнал от светодиода для 6 кристаллов восстановился на $(87 \pm 5)\%$ за 400 часов.

Другой тип радиационных исследований проводился на установке внутри кольца У70, где можно было получить очень высокие мощности доз (до 100 крад/час) и облучение в смешанном поле заряженных и нейтральных адронов и γ -квантов. До и после облучения кристаллы устанавливались в сборку для измерения сигналов от электрона и светодиода.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации:

- Полученные энергетическое и координатное разрешения являются лучшими для кристаллов такого типа.
Для энергетического разрешения:

- получен стохастический член $(1.8 \pm 0.1)\%$, что совпадает с расчетами;
- нет заметной разницы в разрешении для кристаллов из Богородицка и Шанхая;
- зависимость энергетического разрешения от угла не ухудшается до 5° .

Для энергосовмещения и профиля ливня:

- слабая зависимость от энергии (в диапазоне 1–45 ГэВ);
- 76% от полной энергии выделяется в центральном кристалле;
- моделирование дает более узкий профиль ливня.

Для координатного разрешения:

- для зависимости от энергии получен стохастический член 2.8 мм, совпадает с моделированием;
- сильная зависимость от угла.

- Измерена неоднородность светосбора, результаты использованы для моделирования.
- Температурная зависимость световыхода: $-2.3\%/^\circ\text{C}$ (при 18°C).
- Впервые проведены измерения радиационной стойкости кристаллов PbWO_4 при облучении высокоэнергичными электронным и адронными пучками, а также смешанным спектром частиц, с новой остротой поставившие проблему радиационной стойкости PbWO_4 .

Потери световыхода кристаллов при облучении интенсивными высокоэнергичными пучками:

- при облучении e^- с энергией 27 ГэВ с мощностью дозы 10–25 рад/час 8 кристаллов в среднем потеряли 8 %;
- при облучении π^- с энергией 40 ГэВ со сравнимой мощностью дозы потеряли 12 %;
- при облучении π^- с энергией 40 ГэВ с мощностью дозы 30–60 рад/час 5 кристаллов в среднем потеряли 20% световыхода;

- при облучении в смешанных полях заряженных адронов, γ -квантов и нейтронов со средней энергией 10 ГэВ и мощностью дозы 500 рад/час два кристалла потеряли 10%;
- при том же смешанном облучении, но с мощностью дозы 1 крад/час потеряли 25%;
- при облучении со сверхвысокими мощностями доз 100 крад/час (интегральная доза 2.5 Мрад) световыход упал в 3 раза.

Наблюдается насыщение потерь световыхода при постоянной мощности дозы.

- Корреляция между изменением сигнала от светодиода и пучка (e^- или МIP). Наблюдается линейная зависимость в диапазоне измерения с коэффициентам пропорциональности 0.3–0.6 при облучении e^- и 0.5–0.9 — при облучении адронами для разных кристаллов.
- Однородность светосбора вдоль кристалла с точностью измерений не изменяется при мощностях доз, ожидаемых в калориметре ВTeV.
- Восстановление: среднее время восстановления (200 ± 40) часов; за 400 часов восстанавливается 87% от потери сигнала.
- Предложена и опробована система мониторинга изменения прозрачности кристаллов от поглощенной дозы на основе нескольких светодиодов с излучением разной длины волны.
- Для проверки свойств кристаллов была создана специализированная установка, включающая прототип электромагнитного калориметра и систему прецизионного измерения импульса пучковой частицы ($\sigma_p/p = 0.13\%$ при 45 ГэВ).

Список литературы

- [1] S.N. Alexeev, V.A. Batarin, T. Brennan, J. Butler, H. Cheung, V.S. Datsko, A.A. Derevschikov, Y.V. Fomin, V. Frolov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, V.Y. Khodyrev, K. Khroustalev, A.S. Konstantinov, V.A. Kormilitsin, V.I. Kravtsov, Y. Kubota, V.M. Leontiev, V.S. Lukanin, V.A. Maishev,

Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.G. Minaev, N.E. Mikhailin, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, R. Mountain, L.V. Nogach, V.I. Pikalov, P.A. Semenov, K.E. Shesternanov, L.F. Soloviev, V.L. Solovianov, S. Stone, M.N. Ukhanov, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.

The BTeV Electromagnetic Calorimeter Prepared for 8th International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics, Novosibirsk, Russia, Feb 28 - March 6, 2002 (Presented by P. Semenov) Nucl. Instr. and Meth., A 494/1-3, pp. 313-317, 2002.

- [2] V.A. Batarin, J. Butler, A.A. Derevschikov, Y.V. Fomin, V. Frolov, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, V.Y. Khodyrev, A.S. Konstantinov, V.I. Kravtsov, Y. Kubota, V.M. Leontiev, V.A. Maisheev, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, L.V. Nogach, P.A. Semenov, K.E. Shesternanov, L.F. Soloviev, V.L. Solovianov, S. Stone, M.N. Ukhanov, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.

Development of a Momentum Determined Electron Beam in the 1–45 GeV Range. – IHEP Preprint 2002-29, Protvino, 2002; e-Print Archive hep-ex/0208012; принято к печати в Nucl. Instr. and Meth.

- [3] V.A. Batarin, T. Brennan, J. Butler, H. Cheung, A.A. Derevschikov, Y.V. Fomin, V. Frolov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, V.Y. Khodyrev, K. Khroustalev, A.S. Konstantinov, V.I. Kravtsov, Y. Kubota, V.M. Leontiev, V.A. Maisheev, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.E. Mikhailin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, R. Mountain, L.V. Nogach, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, K.E. Shesternanov, L.F. Soloviev, V.L. Solovianov, S. Stone, M.N. Ukhanov, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.

Precision Measurement of Energy and Position Resolutions of the BTeV Electromagnetic Calorimeter Prototype. – IHEP Preprint

2002-34, Protvino, 2002; e-Print Archive hep-ex/0209055; послан в Nucl. Instr. and Meth.

- [4] V.A. Batarin, T. Brennan, J. Butler, H. Cheung, V.S. Datsko, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, R.I. Dzhelyadin, Y.V. Fomin, V. Frolov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, V.Y. Khodyrev, K. Khroustalev, A.K. Konoplyannikov, A.S. Konstantinov, V.I. Kravtsov, Y. Kubota, V.M. Leontiev, V.A. Maisheev, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.E. Mikhailin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, R. Mountain, L.V. Nogach, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, K.E. Shestermanov, L.F. Soloviev, V.A. Pikalov, V.L. Solovianov, S. Stone, M.N. Ukhanov, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.

Study of Radiation Damage in Lead Tungstate Crystals Using Intense High-Energy Beams – BTEV-DOC-1105, Oct 2002; IHEP Preprint 2002-35, Protvino, 2002; e-Print Archive: hep-ex/0210011; послан в Nucl. Instr. and Meth.

Рукопись поступила 10 января 2003 года.

П.А. Семенов.

Исследование свойств прототипа электромагнитного калориметра эксперимента
VTeV.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L^AT_EX**.

Редактор Н.В. Ежела.

Технический редактор Н.В. Орлова.

Подписано к печати 16.01.2003. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.

Печ.л. 1,48. Уч.-изд.л. 1,26. Тираж 100. Заказ 5. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий

142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2003-1, И Ф В Э, 2003
