



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи

2006–1

Рязанцев Андрей Викторович

**РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА  
МОНИТОРИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА  
ПРОЕКТА ВТeV**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Протвино 2006

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), профессор С.П. Денисов (ОНФ, ИФВЭ).

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

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2006 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 “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета К 034.02.01

Ю.Г.Рябов

© Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт физики высоких энергий, 2006

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Кристаллы вольфрамата свинца ( $\text{PbWO}_4$ , часто – PWO) стали использоваться для строительства калориметров сравнительно недавно, но, благодаря таким крупным экспериментам, как CMS и ALICE на LHC (ЦЕРН), остановившим на них свой выбор, очень быстро прошли путь от изготовления опытных образцов до массового производства. Подробные исследования радиационной стойкости кристаллов в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксперимента, показали, что световыход кристаллов заметно изменяется при изменении мощности дозы, с которой они облучаются. Более того, все кристаллы в большей или меньшей степени отличаются друг от друга по диапазону этих изменений. Нахождение общих закономерностей их поведения является актуальнейшей задачей, поскольку дает возможность разработать единый алгоритм мониторинга всех каналов калориметра при работе в составе установки, тем самым сохраняя его высокое разрешение.

**Целью диссертационной работы** является экспериментальное доказательство возможности непрерывного мониторинга с высокой точностью электромагнитного калориметра на кристаллах вольфрамата свинца с фотоэлектронными умножителями, спроекти-

рованного для работы в условиях высоких радиационных нагрузок эксперимента VTeV (Фермилаб, США), разработка метода мониторинга и мониторинговой системы калориметра, а также разработка метода измерения радиационной стойкости кристаллов при их массовом производстве.

При выполнении диссертационной работы были получены следующие **новые результаты**, которые **выносятся на защиту**:

- Прямыми измерениями подтверждено отсутствие нарушения сцинтилляционного механизма в кристаллах вольфрамата свинца при адронном облучении с мощностями доз до  $\sim 20$  рад/ч.
- Установлена корреляция между относительными изменениями сигналов от светодиода и электронов при облучении кристаллов пионными и электронными пучками высокой интенсивности, что позволило обосновать простой и надежный способ непрерывного мониторинга электромагнитного калориметра с помощью импульсных источников света.
- Разработана мониторинговая система на светодиодах калориметра VTeV, изготовлен ее прототип, долговременная нестабильность которого составила менее 0.1 % (*RMS*) за неделю.
- Показано, что относительные изменения световыходов кристаллов при их облучении пионами и гамма-квантами с одинаковыми мощностями (до 60 рад/ч) и профилями дозы близки по значениям, поэтому предварительные измерения радиационной стойкости кристаллов могут проводиться с помощью радиоактивного источника.
- Разработан и экспериментально обоснован метод контроля относительного изменения световыходов кристаллов непосредственно во время их облучения радиоактивным источником гамма-квантов; создан рабочий прототип установки, на котором можно изучать радиационные свойства одновременно пяти кристаллов.

### **Апробация работы**

Основные работы [1,2,3,4,5] опубликованы в журнале "Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A". Кроме того, результаты, приведенные в диссертации, опубликованы во внутренних документах сотрудничества ВТeV, препринтах ГНЦ ИФВЭ, электронном архиве arxiv.org. Результаты докладывались на международных конференциях "The 8-th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics" (6-10 октября 2003 г., Комо, Италия) и "The 9-th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors" (23-26 мая 2004 г., Сиена, Италия), а также на совещаниях сотрудничества ВТeV и CMS и семинарах ОЭФ ГНЦ ИФВЭ.

Апробация диссертации прошла в ГНЦ ИФВЭ 24 августа 2005 г.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 103 страницы, в том числе 43 рисунка и 6 таблиц. Список литературы включает в себя 34 наименования.

## **Содержание работы**

Диссертация начинается с формулирования задач, обоснования их актуальности и научной новизны.

В **Главе 1** описывается электромагнитный калориметр проекта ВТeV и обосновывается необходимость его непрерывного мониторинга.

Главной задачей проекта ВТeV являлось изучение нарушения  $CP$ -симметрии в  $B$ -распадах. Предлагалось выполнить прецизионные измерения параметров Стандартной Модели, таких как углы смешивания в матрице Кабиббо-Кобаяши-Маскава. Вычисление параметров одновременно для нескольких мод распадов  $B$ -мезонов являлось бы хорошей проверкой Стандартной Модели.

Исходя из физических целей эксперимента, были сформулированы технические требования и предложена конструкция калориметра, в которой в качестве среды для развития электромагнитного ливня и одновременной конверсии его энергии в свет служат кристаллы

вольфрамата свинца, а для регистрации этого света используются фотоэлектронные умножители. Применение ФЭУ в качестве фотоприемника оказывается возможным благодаря тому, что калориметр должен был располагаться в слабом остаточном магнитном поле, экранирование которого не составляло проблемы. Для того, чтобы построить калориметр ВТeV, потребовались бы 10500 кристаллов со следующими размерами:

- длина – 220 мм ( $\sim 25$  радиационных длин);
- поперечное сечение входной грани –  $27.2 \times 27.2$  мм<sup>2</sup>;
- поперечное сечение со стороны крепления ФЭУ –  $28.0 \times 28.0$  мм<sup>2</sup>.

Предполагалось, что каждый кристалл должен быть обернут тайвеком для улучшения светосбора на входном окне ФЭУ. Сами фотумножители должны иметь кварцевые окна диаметром 1 дюйм и приклеиваться к кристаллам радиационно стойким оптическим клеем.

Обоснована возможность калибровки калориметра по месту (in situ) с помощью изолированных электронов, источниками которых являлись бы конверсия фотонов в электрон-позитронные пары в области соударений и полуплеетонные  $B$ -распады. Приведены результаты расчетов, из которых следует, что энергетическая калибровка всех каналов калориметра с заданной точностью 0.2% могла быть выполнена не реже чем один раз в сутки. Однако одной такой калибровки было бы недостаточно, поскольку коэффициенты усиления фотоэлектронных умножителей в калориметре могут заметно меняться по разным причинам в течение дня или даже часа. Световой выход кристаллов  $PbWO_4$  также может меняться при резком изменении потока облучающих частиц, например при новом заполнении Теватрона протонами и антипротонами. Поэтому необходимо непрерывное мониторинговое наблюдение таких быстрых изменений, или интеркалибровка. Ее предполагалось делать при помощи источника импульсов света стабильной интенсивности.

В **Главе 2** приведены результаты тестов, доказывающих принципиальную возможность непрерывного мониторинга калориметра в ходе эксперимента с помощью импульсных источников света.

Изучение свойств кристаллов вольфрамата свинца проводилось на экспериментальной установке, содержащей прототип калориметра, которая располагалась на канале 2Б протонного синхротрона У-70 в Протвино. Прототип электромагнитного калориметра собирался в виде матрицы  $5 \times 5$  кристаллов с фотоэлектронными умножителями для съема информации и был помещен в специальный термоизолированный и светонепроницаемый ящик. Ящик был установлен на подвижной платформе, позволявшей перемещать сборку кристаллов в горизонтальной и вертикальной плоскости, а также вокруг своей вертикальной оси, и устанавливал ее в нужном положении относительно оси пучка с точностью до 0.1 мм.

Для изучения изменения прозрачности кристаллов  $PbWO_4$  при их облучении высокоэнергичными частицами и для непрерывного контроля коэффициентов усиления фотоприемников в данной установке применялась мониторинговая система на светодиодах [1]. Кроме изучения поведения кристаллов при их облучении, проводилось наблюдение за процессом их длительного естественного восстановления после снятия радиации. Таким образом, экспериментальная установка оставалась включенной на протяжении более чем трех месяцев, что позволило измерить долговременную стабильность данной мониторинговой системы. По результатам проведенного анализа сделаны следующие заключения:

- используемая в экспериментальной установке мониторинговая система позволяет проводить измерения с точностью выше 1 %;
- главным источником нестабильности мониторинговой системы в анализируемый период были колебания температуры;
- данное техническое решение может быть применено для создания мониторинговой системы эксперимента ВТeV при условии решения проблемы температурной нестабильности.

Прежде чем приступить к разработке мониторинговой системы калориметра, необходимо было доказать, что изменение световых выходов кристаллов происходит только по причине изменения прозрачности, а сцинтилляционный механизм не нарушается. До сих пор прямого экспериментального подтверждения отсутствия нарушения сцинтил-

ляционного механизма при облучении кристаллов адронами в литературе не встречалось. Идею прямой экспериментальной проверки отсутствия нарушения сцинтилляционного механизма предложил при частном общении Ren-Yuan Zhu (CALTECH). Суть предложенного метода заключается в следующем. Сначала узким мюонным пучком измеряется световыход кристалла в нескольких точках по его длине (кристаллы должны быть повернуты своей боковой поверхностью перпендикулярно оси пучка). Затем в одной из точек производится облучение узким пучком пионов высокой интенсивности и снова сканируется световыход от мюонов. Если количество рождаемого света меняется во время облучения, то при повторном сканировании световыхода должна проявиться неоднородность в зоне облучения.

Для реализации этой идеи были использованы пять кристаллов, произведенных в Богородицке, и пять кристаллов, изготовленных Шанхайским Институтом Керамики [2]. Распределение мощности дозы для каждого облученного кристалла было получено программой моделирования GEANT3. Пример поперечного профиля мощности дозы для одного из кристаллов приведен на рис. 1(a), а максимальная мощность дозы, полученная каждым кристаллом, представлена на рис. 1(b).

Чтобы качественно представить ожидаемый эффект, была разработана математическая модель распространения сцинтилляционного света в кристалле и добавлена в программу GEANT3. Предполагалось, что кристалл имеет идеальные оптические свойства. Анизотропия и диффузное отражение не учитывались. Предполагалось также, что распределение цветовых центров, образующихся при радиационном повреждении кристаллов, такое же, как представлено на рис. 1(a) – гауссово распределение с  $\sigma=1.3$  см. Для наглядности предполагалось, что деградация световыхода пропорциональна поглощенной энергии и в зоне максимума поглощенной дозы составляет 3 %. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

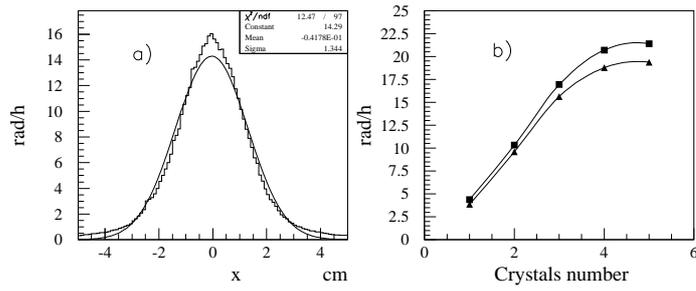


Рис. 1. Результаты моделирования программой GEANT3: (а) поперечный профиль мощности дозы в одном из кристаллов во время облучения пионным пучком; (б) максимальные мощности доз в кристаллах при пионном облучении. Квадратами обозначены шанхайские, а треугольниками – богородицкие кристаллы.

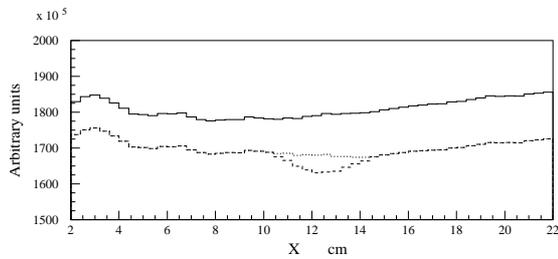


Рис. 2. Результаты моделирования программой GEANT3 продольной неоднородности световыхода кристалла. По горизонтальной оси отложены расстояния от точек сцинтилляционных взаимодействий до фотокатода ФЭУ. Сплошная линия показывает световыход кристалла до облучения, а штриховая – после облучения при наличии деградации эмиссии фотонов 3 % в зоне максимума поглощенной дозы. Пунктиром нанесена кривая, полученная при условии отсутствия нарушения сцинтилляционного механизма.

По горизонтальной оси отложены расстояния от точек сцинтилляционных взаимодействий до фотокатода ФЭУ. Сплошная линия показывает световыход кристалла до облучения, а штриховая – после облучения, которое привело к снижению сигналов по всей длине кристалла. Зона, в которой была задана деградация световыхода, проявилась в виде дополнительного ослабления сигнала на фоне общего падения. Для сравнения, пунктиром нанесена кривая, полученная при условии отсутствия нарушения сцинтилляционного механизма в зоне облучения.

Для каждого исследуемого кристалла были построены кривые изменения световыхода по его длине до и после облучения пионами. На рис. 3 приведены результаты, полученные для одного из богородицких кристаллов.

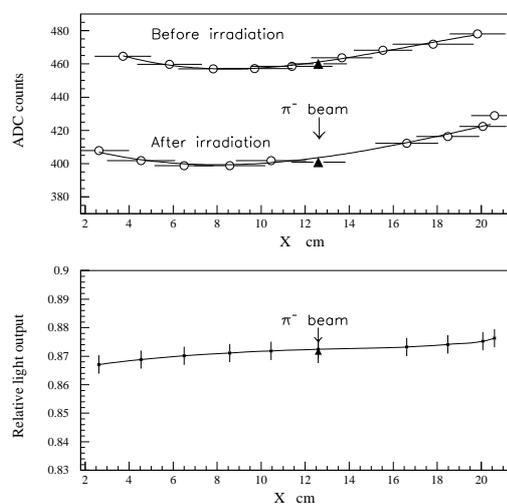


Рис. 3. Вверху: результаты измерения световыхода по длине одного из кристаллов до и после облучения пионным пучком, профитированные полиномом 3-й степени. Максимальная интенсивность пучка была на расстоянии 12.6 см от фотокатода ФЭУ. Внизу: относительное изменение световыхода кристалла по его длине после облучения.

На этом рисунке центр зоны облучения обозначен стрелкой, а измеренный до и после облучения световыход в этом месте – треугольниками. Полученные результаты (вверху) были профитированы полиномом 3-й степени, причем экспериментальное значение световыхода в зоне облучения при фитировании не учитывалось. Как видно, для данного кристалла дополнительного падения световыхода в зоне облучения не наблюдается, что свидетельствует о том, что при данном уровне поглощенной дозы сцинтилляционный механизм не пострадал. Нижняя картинка на том же рисунке показывает относительное изменение световыхода кристалла по его длине после облучения и позволяет численно оценить величину эффекта по отклонению относительного световыхода в зоне облучения от кривой, построенной по другим точкам. Относительное изменение числа испускаемых при сцинтилляции кристалла фотонов характеризует величина  $rs$ , которая не зависит от изменения прозрачности кристалла [2]:

$$rs(x_\pi) = \frac{LE^a(x_\pi)}{LE^b(x_\pi)},$$

где через  $LE(x_\pi)$  обозначено число испускаемых фотонов в точке облучения  $x_\pi$ , а индексы  $a$  и  $b$  обозначают, что величина берется, соответственно, после (*after*) и до (*before*) облучения.

Значения  $rs$  для всех десяти облученных кристаллов приведены на рис. 4. Можно утверждать, что в пределах точности измерений  $\sim 0.5$  % нарушения эмиссии фотонов после пионного облучения не наблюдалось ни в одном из них. Среднее значение величины  $1 - rs$  по десяти кристаллам составило  $(0.20 \pm 0.15)$  %. Следовательно, изменение световыхода кристаллов можно мониторировать, контролируя изменение прозрачности с помощью источника света с длиной волны в районе максимума их спектра высвечивания, например синего светодиода. При этом важно установить вид зависимости между изменениями сигналов от светодиода и от электронов при облучении кристаллов электронными и пионными пучками высокой интенсивности и определить точность, с которой можно поддерживать изначально (до облучения) рекордное разрешение калориметра, мониторируя изменения сигналов от радиации с помощью световой

мониторной системы. В первом приближении ожидалось, что, поскольку длина пути, которую проходит сцинтилляционный свет, не равна той, что проходит свет от светодиода, изменения сигналов от электрона и светодиода будут происходить по-разному, но при этом пропорционально друг другу [3].

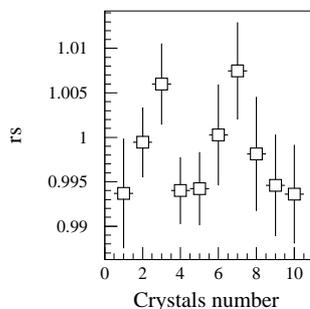


Рис. 4. Относительные изменения эмиссии фотонов сцинтилляций для десяти кристаллов после их облучения пионным пучком, вычисленные в зонах его максимальной интенсивности. Первые пять кристаллов богородицкие, вторые – шанхайские.

Анализ данных, накопленных во время облучения сборки кристаллов пионным пучком с энергией 34 ГэВ и электронным пучком с энергией 23 ГэВ, подтвердил данное предположение и позволил получить коэффициенты пропорциональности для кристаллов от разных производителей. Исследовались 25 кристаллов, расположенных в виде сборки  $5 \times 5$ . Длинная сторона кристаллов была сориентирована вдоль оси пучка. Все исследуемые кристаллы получили за время измерений поглощенную дозу от 0.5 до 1.5 крад.

Периоды облучения пионами чередовались с короткими интервалами, во время которых производились измерения световыхода кристаллов от электронного пучка низкой интенсивности (калибровка). На рис. 5 представлена зависимость между относительными изменениями сигналов от электронов и синего светодиода в одном

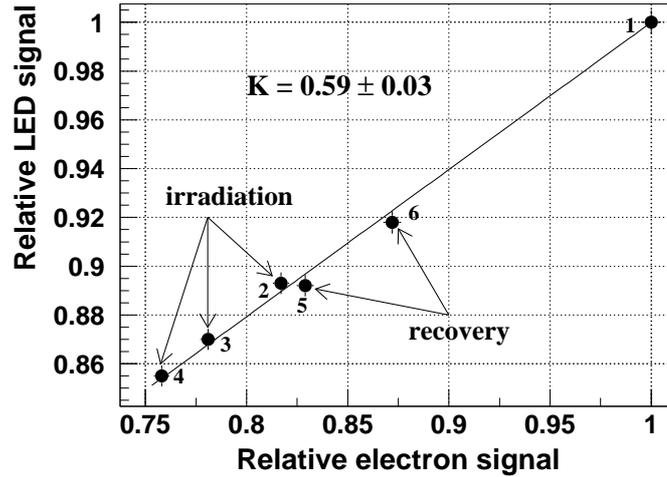


Рис. 5. Зависимость между относительными изменениями сигналов от электронов и синего светодиода в одном из кристаллов сборки при пионном облучении. Точки соответствуют результатам, полученным при калибровках электронным пучком низкой интенсивности. Результаты профитированы линейной функцией с коэффициентом пропорциональности  $K = 0.59 \pm 0.03$ .

из кристаллов сборки, построенная по результатам обработки калибровочных наборов данных. Точки 1–4 соответствуют периоду, когда данный кристалл облучался, а 5–6 – когда происходило восстановление его оптических показателей после смещения из зоны облучения. Как видно, во время облучения сигналы от светодиода и электрона падали, а во время восстановления – росли. Замечательно, что все относительные изменения сигналов – как падение, так и рост – происходили вдоль одной прямой линии, которой фитировались экспериментальные точки. Прямая проходила через начальную точку 1:

$$1 - y = K(1 - x),$$

где  $x$  и  $y$  – нормированные сигналы от электрона и светодиода, а  $K$  – коэффициент пропорциональности между их относительными изменениями. Как и предполагалось, в ограниченном промежутке

времени хорошо работает линейная аппроксимация данной зависимости со значением  $K = 0.59 \pm 0.03$  для выбранного кристалла.

При облучении электронным пучком высокой интенсивности изменение световыхода кристаллов можно отследить по изменению положения электронного пика в процессе набора статистики. Таким образом, отпадает необходимость в калибровке низкоинтенсивным пучком, а сам процесс выглядит как калибровка по месту в реальном калориметре. Высокая интенсивность электронного пучка позволяла вычислять значения световыхода с хорошей статистической точностью в последовательные интервалы времени по 15 минут, что в конечном результате дало плавную картину изменения световыхода.

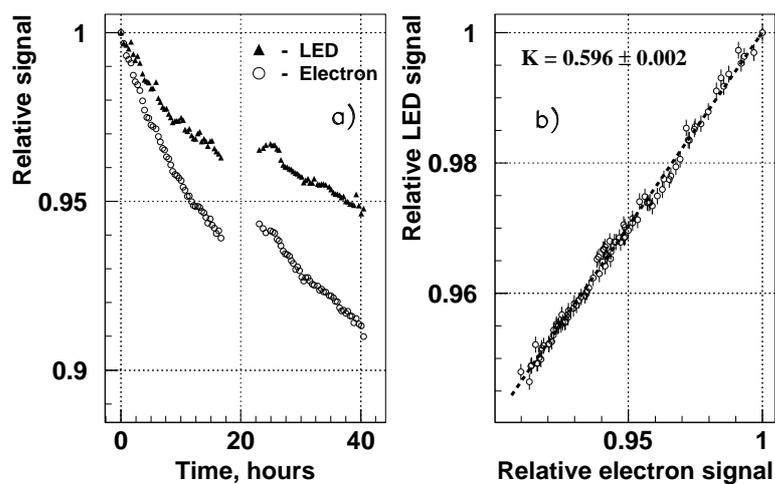


Рис. 6. (а) Поведение электронного сигнала (кружки) и сигнала от синего светодиода (треугольники) в одном из кристаллов сборки во время облучения электронным пучком со средней мощностью дозы 20 рад/ч и (б) зависимость между относительными изменениями этих же сигналов, профитированная линейной функцией с коэффициентом пропорциональности  $K = 0.596 \pm 0.002$ .

На рис. 6(a) показано поведение сигналов от электрона и светодиода при электронном облучении в том же кристалле, что и на рис. 5. Средняя мощность дозы составляла 20 рад/ч. Оба сигнала отнормированы на свои начальные значения. В районе временной отметки 20 ч пучок отсутствовал и кристалл восстанавливался, что выразилось в увеличении сигналов в первый момент после возобновления облучения. Зависимость между относительными изменениями сигналов от светодиода и электронов представлена на рис. 6(b). Видно, что как и в случае пионного облучения, эта зависимость хорошо фитируется линейной функцией, но при этом коэффициент пропорциональности  $K$  определяется с гораздо лучшей точностью,  $\pm 0.3\%$ , и составляет  $0.596 \pm 0.002$ .

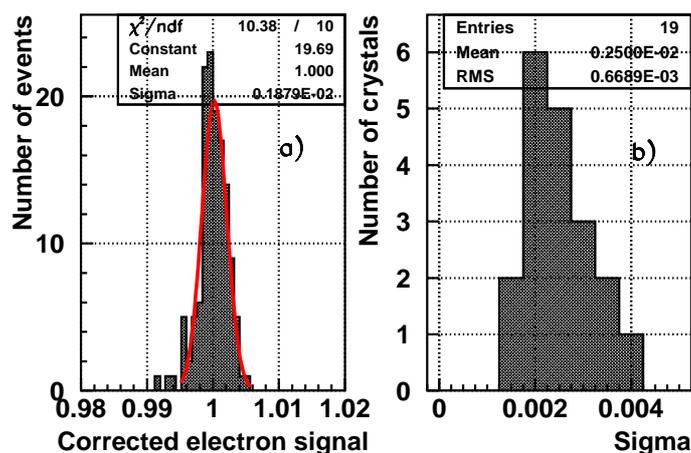


Рис. 7. (а) Средние нормированные значения сигналов от электронов в одном из кристаллов за каждые 15 мин электронного облучения в течение 35 часов после коррекции на сигналы от синего светодиода, профитированные распределением Гаусса с  $\sigma=0.2\%$ . (б) Распределение гауссовых  $\sigma$ , вычисленных для 19 кристаллов по примеру (а).

Рис. 7(a) демонстрирует, насколько точно может быть выполнена коррекция энергии в отдельном канале калориметра с помощью стабильного сигнала от светодиода, если известно значение коэффициента пропорциональности  $K$ . Скорректированное нормированное

значение энергии для данного канала прототипа представлено в виде гистограммы, профитированной распределением Гаусса с  $\sigma=0.2\%$ . На рис. 7(b) показано распределение значений гауссовых  $\sigma$ , вычисленных по результатам коррекции энергии в 19 каналах прототипа. Среднее значение этого распределения оказалось равным  $0.25\%$  с  $RMS=0.07\%$ .

Главным результатом проведенных измерений стало доказательство наличия корреляции между изменениями сигналов от светодиода и электронов при облучении кристаллов пионными и электронными пучками высокой интенсивности. Было показано, что на ограниченных интервалах времени зависимости между относительными изменениями этих сигналов хорошо описываются линейными функциями. Кроме того, средние значения распределений коэффициентов пропорциональности, вычисленных для группы кристаллов при пионном и электронном облучениях, совпали в пределах ошибок [3].

**Глава 3** посвящена описанию конструкции и рабочих характеристик прототипа мониторинг системы калориметра ВТeV. Объясняется, почему было решено строить мониторинг систему с использованием синего и красного светодиодов и обосновывается выбор компонентной базы [4]. Структурная схема прототипа мониторинг системы приведена на рис. 8.

В состав устройства входят:

- два генератора импульсов управления светодиодами;
- синий и красный светодиоды;
- диффузный отражатель света;
- световод-смеситель;
- два кремниевых фотодиода;
- жгут волокон-световодов;
- система регулирования и стабилизации температуры;
- корпус из теплоизолирующего материала.

Важным техническим решением является размещение всех компонентов прототипа в теплоизолирующем корпусе, температуру внутри которого можно поддерживать на заданном уровне, поскольку,

как было показано в работе [1], именно изменения внешней температуры являются главным источником нестабильности мониторинговой системы на светодиодах.

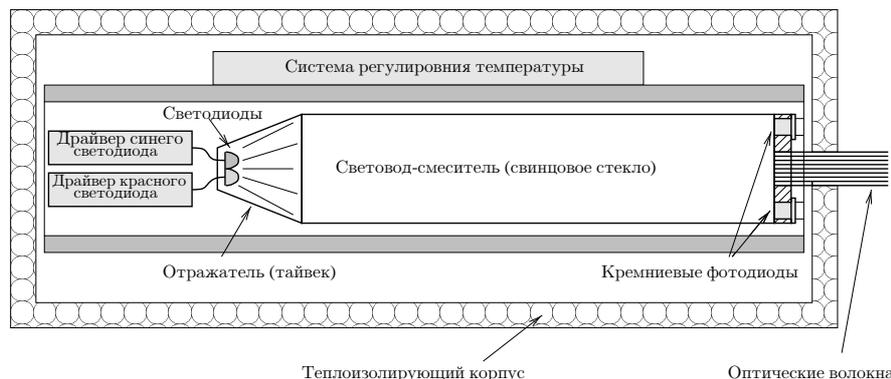


Рис. 8. Структурная схема прототипа мониторинговой системы калориметра.

В прототипе использовался световод-смеситель из свинцового стекла размером  $38 \times 38 \times 200$  мм<sup>3</sup>, обернутый тайвеком. Указанное поперечное сечение позволяет засвечивать одновременно четыре фотодиода и около 3000 кварцевых оптических волокон диаметром 0.4 мм, собранных в пучок. Для мониторингования всех каналов калориметра предполагалось использовать четыре одинаковых модуля, расположенных по его периметру. Это позволило бы использовать волокна меньшей длины и упростило бы их монтаж в установке. Распределение света по площади выходного окна световода-смесителя приведено на рис. 9. Полная ширина полученного распределения составляет 8 %, что удовлетворяет техническому требованию.

В качестве фотоприемников, мониторирующих стабильность сигналов от светодиодов, использовались кремниевые фотодиоды Hamamatsu S1226-5BQ. Информация с фотодиодов необходима для повышения точности калибровки калориметра при наборе данных. При испытании прототипа эта информация позволила оценить его долговременную стабильность. Процедура анализа стабильности подробно описана в работе [1].

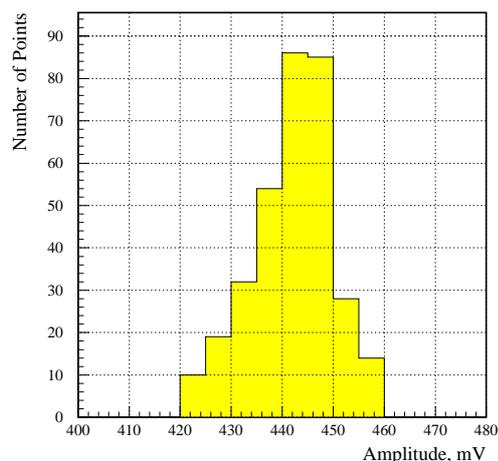


Рис. 9. Распределение амплитуд анодных сигналов ФЭУ от светодиода, измеренных осциллографом при сканировании выходного окна световода-смесителя оптическим волокном с шагом 2 мм по горизонтали и вертикали. Волокно освещало фотокатод ФЭУ через кристалл  $\text{PbWO}_4$ .

Поведение сигналов от синего и красного светодиодов на выходе одного из фотодиодов приведено на рис. 10 в виде временных диаграмм (a) и (b), а также в виде их нормализованных проекций на вертикальную ось (c) и (d). Сигналы во втором фотодиоде вели себя подобным образом. За неделю непрерывной работы нестабильность всех сигналов системы ( $RMS$ ) не превышала 0.05 %, что с большим запасом удовлетворяет техническим требованиям к мониторингной системе, диктуемым условиями эксперимента.

В **Главе 4** предложено решение проблемы измерения радиационной стойкости каждого кристалла при их массовом производстве с помощью радиоактивного источника гамма-квантов.

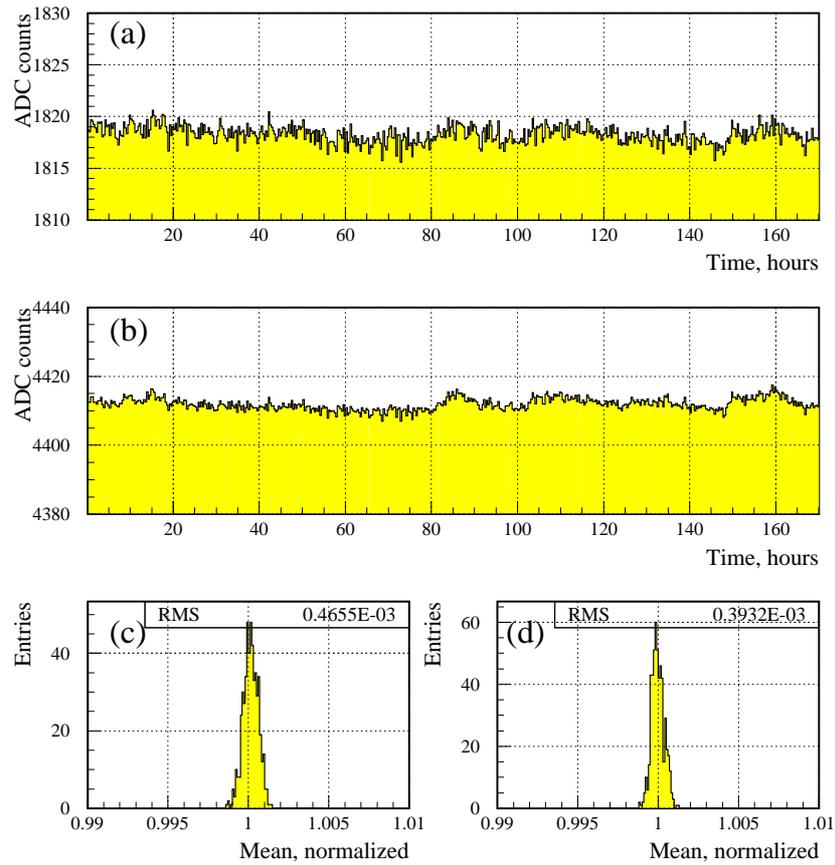


Рис. 10. Стабильность сигналов синего ((a) и (c)) и красного ((b) и (d)) светодиодов, измеренная одним из фотодиодов прототипа мониторинговой системы за неделю непрерывной работы.

В работе [5] было показано, что облучение пионами и гамма-квантами с одинаковыми мощностями доз дают схожий результат потери световыходов кристаллов. Поэтому был создан прототип установки для измерения радиационной стойкости кристаллов с использованием гамма-источника  $^{137}\text{Cs}$ , на котором был проведен ряд измерений.

Структурная схема прототипа установки (далее по тексту – установка) приведена на рис. 11. В ее состав входят:

- коллимированный источник  $^{137}\text{Cs}$  с активностью  $5 \times 10^{12}$  Бк;
- сменная кассета для размещения пяти кристаллов;
- пять световодов в виде трубок длиной 10 см с зеркальной внутренней поверхностью;
- пять ФЭУ с делителями;
- мониторинговая система на светодиодах с оптическими волокнами и фотодиодами;
- система измерения температуры.

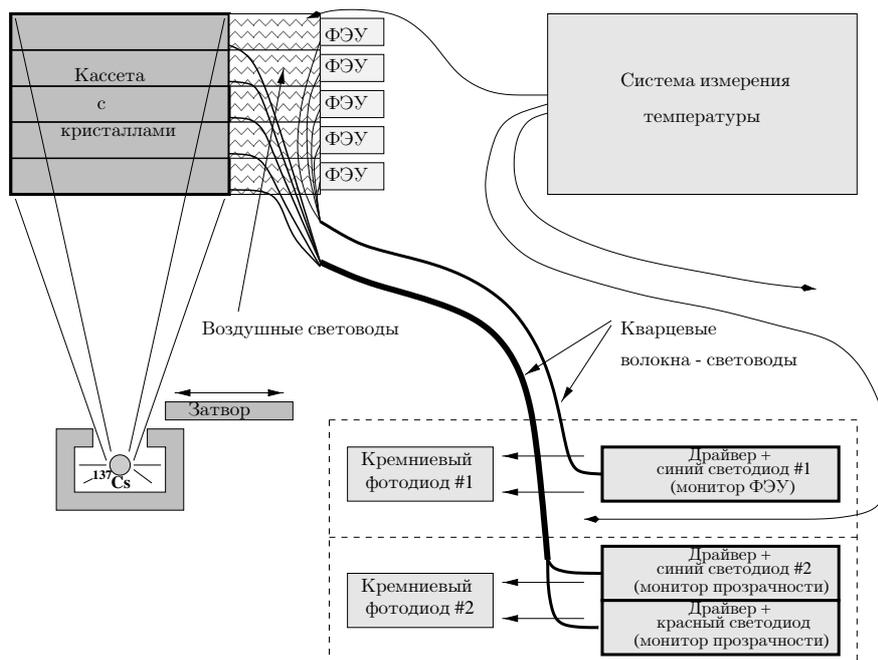


Рис. 11. Блок-схема прототипа установки для радиационного контроля качества кристаллов.

Установка позволяет одновременно облучать и измерять световой выход пяти кристаллов. Мощность дозы облучения зависит от расстояния между источником и кассетой с кристаллами и может достигать до 100 рад/ч. Кроме того, предусмотрено мониторингирование изменения прозрачности кристаллов не только синим, но и красным светодиодами. При этом коэффициенты усиления ФЭУ контролируются отдельным синим светодиодом, свет от которого через оптические волокна попадает непосредственно на фотокатоды.

2005/06/02 16.18

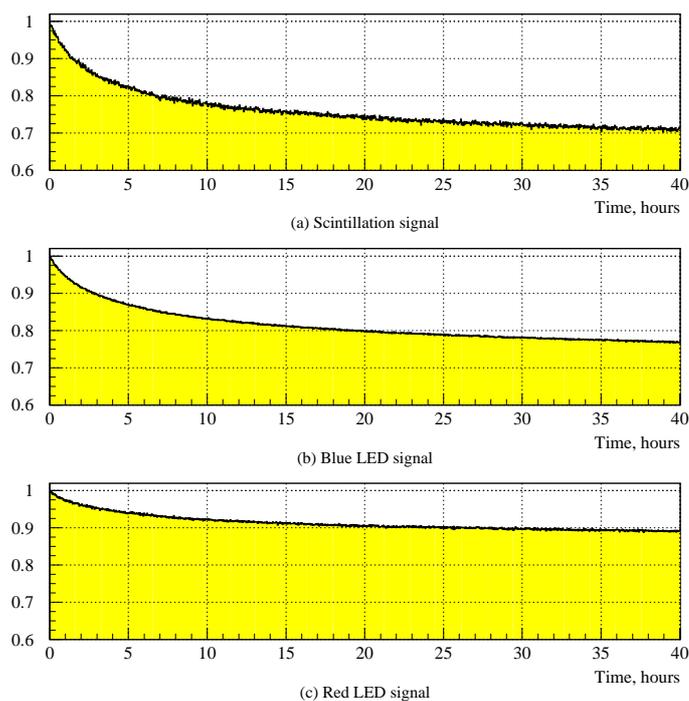


Рис. 12. Характерное поведение анодных сигналов ФЭУ при облучении кристалла гамма-источником: (а) – сцинтилляционный сигнал; (б) – сигнал от синего светодиода, прошедший через кристалл; (с) – сигнал от красного светодиода, прошедший через кристалл.

Измерения проводились по следующему сценарию. Группа кристаллов, включавшая в себя двенадцать апатитских, два шанхайских и два богородицких кристалла, была предварительно изучена на предмет радиационной стойкости при облучении электронами на пучке в ноябре 2004 года. Кристаллы были разделены на четыре группы, состоящие из трех апатитских и одного не апатитского кристаллов. Средняя мощность дозы при облучении кристаллов составляла около 20 рад/ч, а облучение каждой четверки происходило в течение  $\sim 36$  часов до состояния "насыщения" в изменении световых выходов кристаллов.

Измерения с гамма-источником были проведены в апреле 2005 г. после восстановления кристаллов при комнатной температуре. Для удобства было решено облучать по четыре кристалла, сгруппированных, как при измерениях на пучке. Таким образом было произведено четыре цикла облучения. Из-за высокой интенсивности сцинтилляций в кристалле в анодной цепи ФЭУ возникал постоянный ток, изменявшийся вместе со световым выходом кристалла. На рис. 12 показано характерное поведение токового сигнала и сигналов от светодиодов при облучении одного из кристаллов. Каждая точка на представленных гистограммах является средним значением в интервале 2 мин.

Для сравнения с результатами, полученными на пучке, для всех кристаллов были вычислены относительные изменения сцинтилляционных сигналов через 35 часов после начала облучения. На рис. 13 показана корреляция между величинами относительного падения сигналов от электронов и гамма-квантов, полученная по 16 кристаллам. Как видно, кристаллы сильно отличаются друг от друга по радиационной стойкости, но именно благодаря этому обстоятельству оказалось возможным сделать вывод о правомочности применения токового метода для ее оценки.

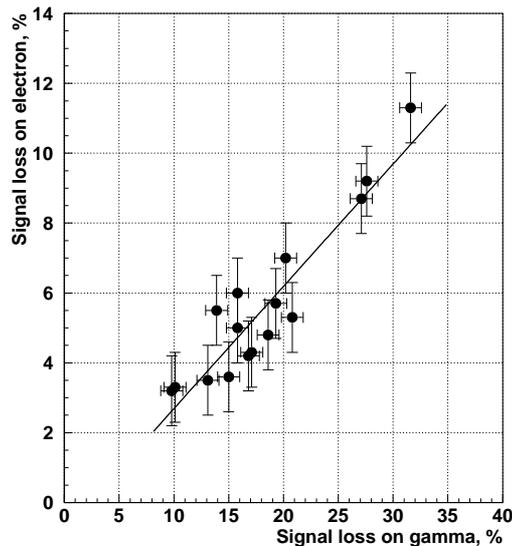


Рис. 13. Корреляция между величинами относительного падения сигналов от электронов и гамма-квантов после, соответственно, электронного и гамма облучения кристаллов с одинаковыми мощностями дозы.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

- Впервые проведены прямые измерения, доказавшие отсутствие нарушения сцинтилляционного механизма в кристаллах  $\text{PbWO}_4$  при их облучении адронами с мощностями доз до  $\sim 20$  рад/ч.
- Было установлено наличие корреляции между изменениями сигналов от светодиода и электронов при облучении кристаллов пионными и электронными пучками высокой интенсивности и показано, что на ограниченных интервалах времени зависимости между относительными изменениями этих сигналов хорошо описываются линейными функциями. При коррекции

сигналов от электронов на сигналы от синего светодиода во время непрерывного облучения прототипа калориметра электронным пучком достигнута средняя точность восстановления энергии 0.25 % для целой группы кристаллов, произведенных в Шанхае и Богородицке, что удовлетворяло техническим требованиям к калориметру ВТeV.

- По результатам анализа долговременной стабильности мониторинжной системы на светодиодах, применявшейся в экспериментальной установке для изучения свойств кристаллов вольфрамата свинца во время всех измерений на пучке, установлено, что данное схмотехническое решение могло быть применено для создания мониторинжной системы эксперимента ВТeV при условии решения проблемы температурной нестабильности.
- Предложен вариант секционированной мониторинжной системы калориметра ВТeV на светодиодах с использованием четырех одинаковых модулей генераторов импульсов синего и красного света, каждый из которых обеспечивал бы мониторинг до 3000 ячеек калориметра через жгут оптических волокон-световодов. Разработан и изготовлен на современной компонентной базе прототип модуля мониторинжной системы. Измеренная нестабильность мониторинжного сигнала составила 0.05 % *RMS* за одну неделю непрерывных наблюдений. Полученный результат с большим запасом удовлетворяет требованиям эксперимента.
- Сравнительные измерения потерь световых кристаллов  $\text{PbWO}_4$  при облучении пионами и гамма-квантами с одинаковыми профилями и мощностями доз (до 60 рад/ч), проведенные для шести образцов кристаллов от разных производителей, дали схожий результат. Это наблюдение позволило обосновать возможность предварительной селекции кристаллов по радиационной стойкости с помощью радиоактивного источника.
- Предложен метод непрерывного измерения относительного изменения световых кристаллов непосредственно в процессе их облучения гамма-источником с высокой активностью. Он основан на регистрации постоянного тока с анода ФЭУ, вы-

званного большой интенсивностью сцинтилляций в кристалле при облучении. Данное решение позволяет проводить измерения одновременно нескольких кристаллов, что очень важно, учитывая общее количество кристаллов, которое необходимо протестировать перед сборкой калориметра.

- Проведены сравнительные измерения относительного падения световыходов кристаллов при их облучении электронами и гамма-квантами с одинаковыми мощностями доз, но разными их профилями. Методы измерения также были различными: при облучении электронами использовался обычный метод амплитудного анализа импульсов с анодов ФЭУ, а при облучении гамма-квантами использовался токовый метод. Получена четкая корреляция между результатами двух измерений одних и тех же кристаллов, что доказывает правомочность применения токового метода для оценки радиационной стойкости кристаллов при их облучении гамма-источником.

### Список литературы

- [1] V.A. Batarin, J. Butler, T.Y. Chen, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, A.S. Konstantinov, V.I. Kravtsov, V.A. Kormilitsin, Y. Kubota, Y.A. Matulenko, V.A. Medvedev, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.E. Mikhailin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, L.V. Nogach, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, V.K. Semenov, K.E. Shestermanov, L.F. Soloviev, S. Stone, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.  
**LED monitoring system for the BTeV lead tungstate crystal calorimeter prototype.** / Nucl. Instrum. and Meth. A534 (2004) 486-495.
- [2] V.A. Batarin, J. Butler, T.Y. Chen, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, A.S. Konstantinov, V.I. Kravtsov, V.A. Kormilitsin, Y. Kubota, V.S. Lukanin, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin,

N.E. Mikhailin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, L.V. Nogach, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, V.K. Semenov, K.E. Shestermanov, L.F. Soloviev, S. Stone, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.

**Study of possible scintillation mechanism damage in PbWO<sub>4</sub> crystals after pion irradiation.**/ Nucl. Instrum. and Meth. A540 (2005) 131-139.

- [3] V.A. Batarin, J. Butler, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, A.S. Konstantinov, V.I. Kravtsov, Y. Kubota, V.S. Lukanin, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.E. Mikhailin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, L.V. Nogach, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, V.K. Semenov, K.E. Shestermanov, L.F. Soloviev, S. Stone, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.  
**Correlation of beam electron and LED signal losses under irradiation and long-term recovery of lead tungstate crystals.**/ Nucl. Instrum. and Meth. A550 (2005) 543-550.

- [4] V.A. Batarin, J. Butler, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, V.Y. Khodyrev, A.S. Konstantinov, V.A. Kormilitsin, V.I. Kravtsov, Y. Kubota, V.S. Lukanin, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.E. Mikhailin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, L.V. Nogach, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, V.K. Semenov, K.E. Shestermanov, L.F. Soloviev, S. Stone, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.  
**Design and performance of LED calibration system prototype for the lead tungstate crystal calorimeter.**/ Nucl. Instrum. and Meth. A556 (2006) 94-99.

- [5] V.A. Batarin, J. Butler, T.Y. Chen, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, V.Y. Khodyrev, A.S. Konstantinov, V.I. Kravtsov, Y. Kubota, V.S. Lukanin, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.E. Mikhailin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov,

L.V. Nogach, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, V.K. Semenov, K.E. Shestermanov, L.F. Soloviev, S. Stone, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.

**Comparison of radiation damage in lead tungstate crystals under pion and gamma irradiation.** / Nucl. Instrum. and Meth. A530 (2004) 286-292.

*Рукопись поступила 16 января 2006 г.*

А.В. Рязанцев

Разработка и экспериментальное обоснование метода мониторинга электромагнитного калориметра проекта ВТeV.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Технический редактор И.В. Кожина.

---

Подписано к печати 18.01.2006. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.

Печ.л. 1,66. Уч.-изд.л. 1,35 Тираж 100. Заказ 7. Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий

142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2006-1, И Ф В Э, 2006

---