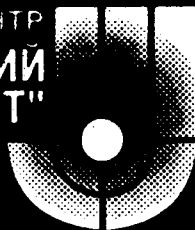


РОССИЙСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

"КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ"



В.Г. Антоненко, Д.С. Блау

ИАЭ-6432/1

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА
«PHOS» В ПРОЕКТЕ «ALISE»**

**I. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА БАЗОВОГО
МОДУЛЯ НА ГАММА-КВАНТ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ**

Ключевые слова: неорганический сцинтиллятор, световыход, пропускание, преломление, отражение, моделирование светосбора, электромагнитный ливень.

После получения от производителя кристаллов вольфрамата свинца для сборки гамма-спектрометра «PHOS» в проекте эксперимента «ALICE» на Большом Адронном Коллайдере (БАК) проведено компьютерное моделирование светосбора в единичном сцинтилляционном модуле спектрометра с учетом конкретных свойств полученной партии кристаллов.

After all lead tungstate crystals have been fabricated and transferred for assembling of the gamma-spectrometer «PHOS» in frame of «ALICE» experiment on the Large Hadron Collider (LHC) a simulation was performed of the light collection in single scintillation module taking into account realistic properties of entire crystal party.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ
ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА «PHOS» В ПРОЕКТЕ
«ALICE».**

**I. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА БАЗОВОГО
МОДУЛЯ НА ГАММА-КВАНТ ВЫСОКОЙ
ЭНЕРГИИ.**

В.Г.Антоненко, Д.С.Блау

1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с запуском в ближайшем будущем нового сверхмощного ускорителя «LHC» (Большой Адронный Коллайдер) в ЦЕРН'е исследования экстремальных свойств ядерной материи, в частности, возможного образования нового состояния вещества: кварк-глюонной плазмы [1,2], там готовится многоцелевая экспериментальная установка «ALICE» [3]. Она включает в себя электромагнитный калориметр «PHOS», предназначенный для регистрации прямых фотонов и нейтральных π^0 и η -мезонов области высоких энергий [4].

Спектрометр представляет собой сложную сегментированную систему с 17920 измерительными каналами на основе сцинтилирующих кристаллов вольфрамата свинца $PbWO_4$ (PWO). Подобные сложные и дорогостоящие установки требуют проведения до их запуска

на современных ускоренных пусках компьютерного моделирования процессов, происходящих в реальных условиях. Для каждого прибора создается специальный пакет программ, учитывающий его конструкцию (геометрию и материалы) и специфику происходящих физических процессов. Так, для эксперимента «CMS», также использующем электромагнитный калориметр на основе кристаллов PWO, созданы пакеты «LUX» [5] и «Litrani» [6]. Для первого прототипа «PHOS» была написана на Фортране, отлажена и применена программа «LIGHT» [7].

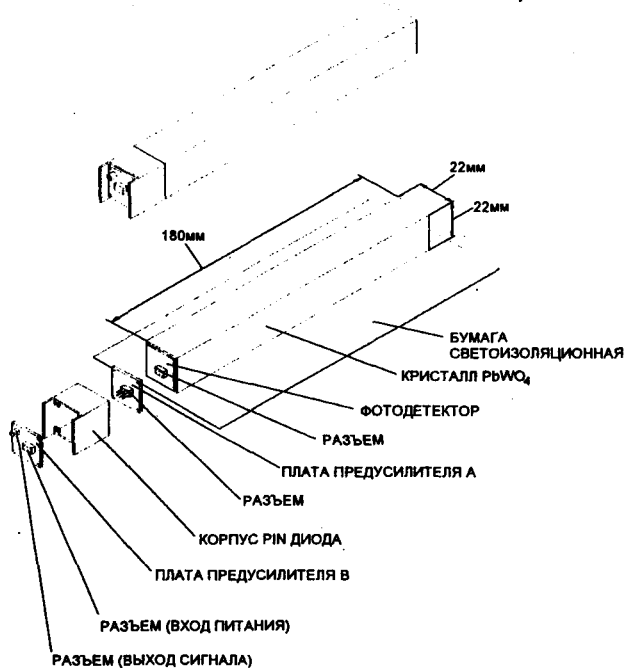
Настоящая работа посвящена компьютерному моделированию процессов светосбора в базовом модуле – основе каждого измерительного канала. Алгоритм «LIGHT» сохранён в данном пакете, использующем C++ и ROOT и учитывающем современное состояние характеристик элементов базового модуля.

2. БАЗОВЫЙ МОДУЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА «PHOS»

2.1 Устройство базового модуля.

Детектор PHOS состоит из набора кристаллов $PbWO_4$ размерами 22x22x180 мм, ориентированными торцами 22x22 мм к потоку регистрируемого излучения. Ливни, возникающие в кристаллах под действием фотонов высоких энергий, преобразуются в сцинтилляционное световое излучение, регистрируемое лавинным PIN-диодом, оптически соединённым с кристаллом при помощи специальной смазки. Для исключения засветки соседних кристаллов каждый из них оборачивается либо чёрной бумагой, либо специальными отражателями.

Таким образом, базовый модуль, т.е. изолированный от света кристалл $PbWO_4$ в сборе с PIN-диодом составляет основу единичного канала регистрации детектора PHOS. Поэтому конструкция детектора и основных его узлов, прежде всего, обусловлена условиями работы единичного канала регистрации.



Необходимое выделение сигнала из шумов достигается при условии, что температура всего массива кристаллов поддерживается равной минус $25^{\circ}C$. При этом необходимо поддерживать стабильность температуры во времени с точностью $\pm 0,1^{\circ}C$.

2.2 Физические процессы в кристаллах.

В сцинтилляционных спектрометрах гамма-квантов высоких энергий используется вторичное свечение вещества при образовании электромагнитных ливней, включающих в себя заряженные частицы e^+ и e^- , которые приводят к высвечиванию возбужденных ими атомов. Время высвечивания характеризуется одним или несколькими средними временами τ_i . Процесс формирования ливня не прост, но довольно хорошо изучен. В частности, в литературе можно найти формулы для продольной и поперечной формы ливня [8,9]. На данный момент в нашей программе использовался модельный вид ливня, а именно равномерное распределение по поперечной составляющей и $\theta(L - z)$ по продольной. Здесь L – это «длина ливня», т.е. расстояние на котором ливень достигает своего максимума, после чего он быстро спадает. Координата z отсчитывается от грани модуля, куда попадает высокоэнергетичный квант. Число фотонов, рождаемых в ливне от одной высокоэнергетичной частицы, бралось в расчете 250 фотонов на MeV энергии частицы, при этом учитывается, что рабочая температура модуля принималась равной -25°C .

2.3 Физические свойства составляющих.

Кристалл вольфрамата свинца – главный элемент модуля. Среди множества сцинтилляторов был выбран именно PbWO_4 , так как его свойства оптимально подходят для решения поставленных задач: он имеет высокую плотность ρ и большой атомный номер Z и, следовательно, малые мольеровский радиус R_M и радиационную длину поглощения Λ_a , значительный световыход и невысокую стоимость, по сравнению с другими тяжелыми сцинтиллирующими кристаллами, а также высокий показатель преломления. Основные свойства вольфрамата свинца приведены

в таблице 1. Кристалл $PbWO_4$ является двулучепреломляющим и при моделировании использовалась стандартная для таких кристаллов методика – луч света раскладывался на обыкновенную и необыкновенную составляющие.

Table 1: Свойства $PbWO_4$.

| | |
|--|------------------------|
| Плотность | 8.28 г/см ³ |
| Радиационная длина | 0.89 см |
| Длина взаимодействия | 19.5 см |
| Мольеровский радиус | 2.0 см |
| Точка плавления | 1123° С |
| Твердость | 4 Moh |
| Показатель преломления вдоль продольной оси (на длине волны 632нм) | 2.16 |
| Максимум спектра испускания | 430 нм |
| Гидроскопичность | нет |
| Химическая активность | инертен |

Производство кристаллов вольфрамата свинца, используемых в PHOS, происходило на заводе «North Crystal», г. Апатиты, после чего они тестировались на измерительных стендах лаборатории ЛИВСЯ, РИЦ «Курчатовский Институт» [10].

Спектр испускания фотонов

Длина волны испускаемых в процессе вторичного свечения фотонов находится в диапазоне от 350 до 600 нм. Проведенные в Лаборатории Исследований Взаимодействий Сложных Ядер РНЦ «Курчатовский Институт» измерения спектров эмиссии были обработаны, в результате чего получена формула, описывающая усредненный спектр эмиссии. Аппроксимация представляет собой трехгауссовую кривую (Рис. 2).

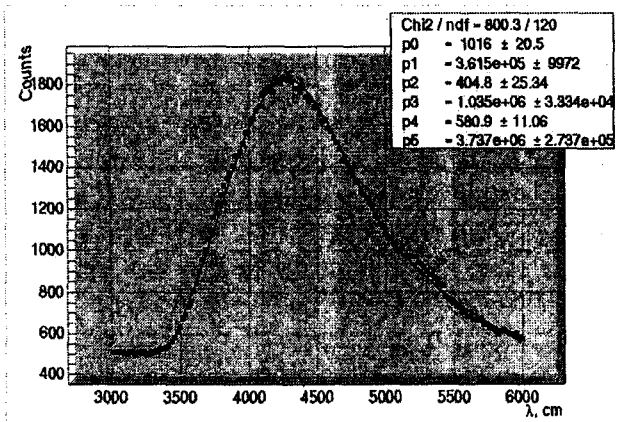


Рис. 2 Спектр испускания для кристаллов PWO, произведенных на заводе «North Crystal».

Показатель преломления и коэффициент поглощения PWO

Помимо спектров испускания в лаборатории были измерены и спектры пропускания для более чем 9000 кристаллов. Каждый кристалл был измерен в продольном и поперечном направлениях. После чего из формул аппроксимации этих спектров были

извлечены физические параметры кристалла, зависящие от длины волны, — показатель преломления и коэффициент поглощения [11]. Для обыкновенной (вдоль оси кристалла) и необыкновенной (поперек кристалла) составляющих эти величины различны и показаны на Рис. 3.

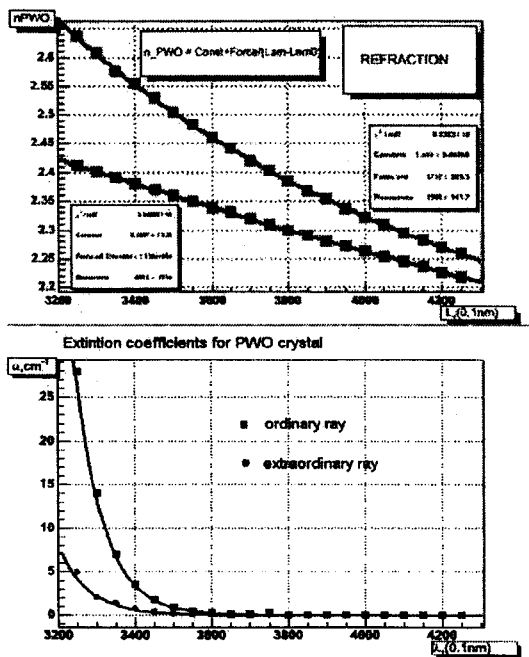


Рис. 3 Зависимость показателя преломления (верхний рисунок) и коэффициента поглощения (нижний рисунок) для обыкновенного и необыкновенного лучей в кристаллах PWO от длины волны фотона.

Время высвечивания кристалла

Как было сказано выше, вероятность испустить фотон за время t после начала распространения ливня равна $\sum_i A_i \exp(-t/\tau_i)$

[12]. Мы использовали упрощенную модель, в которой эта сумма состоит только из двух составляющих – «быстрой» и «медленной», у которых средние времена высвечивания τ были приняты за 2нс и 20нс соответственно.

Обертки кристалла

Были изучены и введены в программу несколько модельных оберток кристаллов. Помимо «черной» обертки, которая поглощает весь свет, покидающий кристалл, были добавлены «зеркальная» обертка, которая зеркально отражает весь свет, падающий на нее, и «диффузная» обертка, которая отражает свет в случайном направлении, с равномерным распределением.

Показатель преломления смазки и кварца

С помощью смазки обеспечивается оптический контакт между кристаллом и фотоприемником. Вероятность фотона пройти систему PWO-смазка-кварцевое окошко APD максимальна, когда показатель преломления смазки лежит между показателем преломления PWO и кварца. На Рис. 4 показаны показатели преломления используемой в модулях смазки (Melt-Mount Quick-Stick) и кварца.

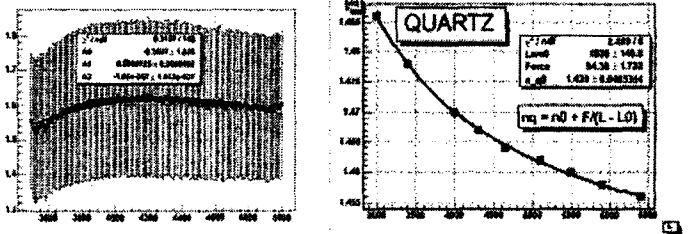


Рис. 4 Показатели преломления для смазки Melt-Mount Quick Stick и кварца в зависимости от длины волны фотона.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Зная физические свойства составляющих модуля, можно перейти к моделированию процессов распространения света и, в конечном счете, получить зависимость светосбора от координат рождаемых фотонов и от времени.

К одной из простейших характеристик, описывающих отклик на фотодетекторе, можно отнести средний пробег зарегистрированных фотонов – т.е. тот путь, который проходят фотоны в кристалле.

Гистограмма этого распределения (с диффузной оберткой, засвечивался весь кристалл) показана на Рис.6. Из данной гистограммы можно оценить средний путь фотонов, он оказывается порядка одного метра.

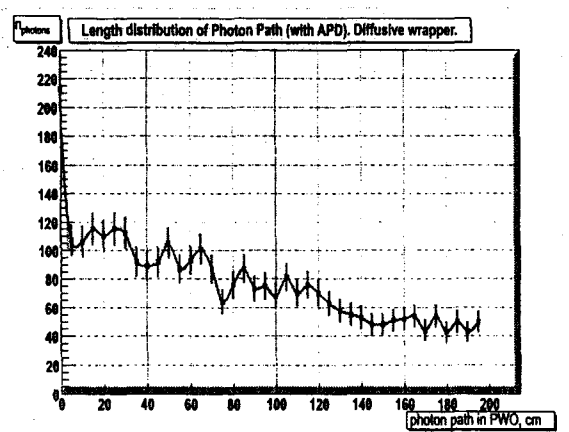


Рис. 6. Распределение по длинам путей, пройденных фотонами в кристалле.

Однако, для того, чтобы смоделировать временной отклик от электромагнитного ливня, образовавшегося от попадания высокоэнергетичного гамма-кванта, необходимо учитывать время высвечивания и характеристики ливня. Учитывая это, были

смоделированы временные отклики от ливней различных энергий. На Рис. 7 приведены графики для энергий ливня 1, 10 и 100 ГэВ, обертка кристалла – диффузная. Полученные гистограммы были аппроксимированы функцией

$$Y_t = p_0 * x^{p_1} * \exp(-x/p_2) \quad (1)$$

Результаты находятся в хорошем соответствии с формой импульса, приведенной в [15].

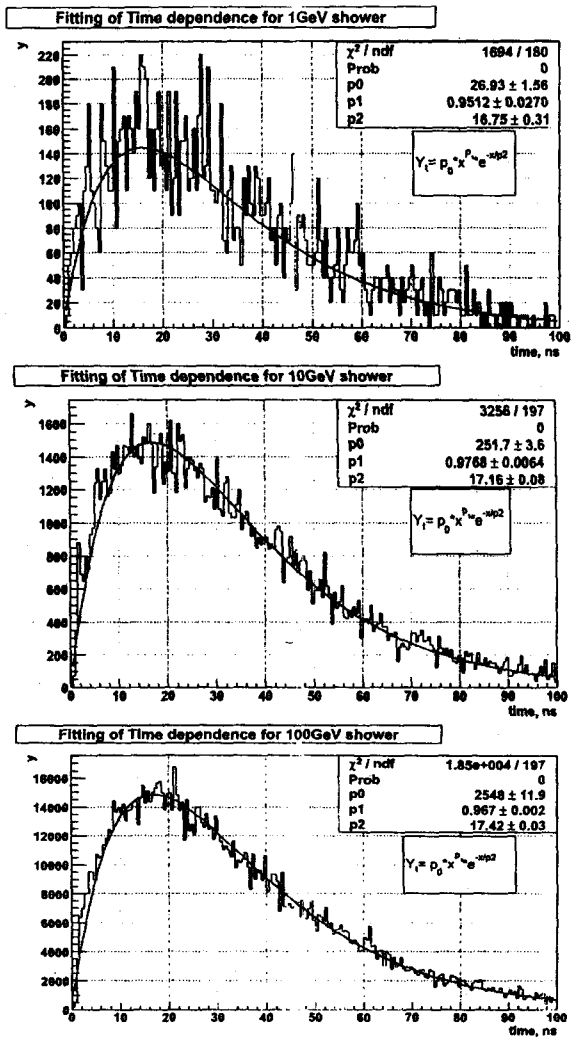


Рис. 7 Форма временного импульса на APD от ливней с энергией 1, 10 и 100 GeV. Аппроксимация формулой (1).

Также было проведено исследование зависимости светосбора от начальных координат зарегистрированных фотонов. Зависимость светосбора от координаты z (вдоль оси кристалла) приведена на Рис.8. В пределах статистической ошибки светосбор от координаты z не зависит. Далее была исследована зависимость светосбора от координат (x,y) – лежащих в плоскости, перпендикулярной оси кристалла, для некоторых точек z . Одна из типичных для этого моделирования гистограмм приведена на Рис. 9.

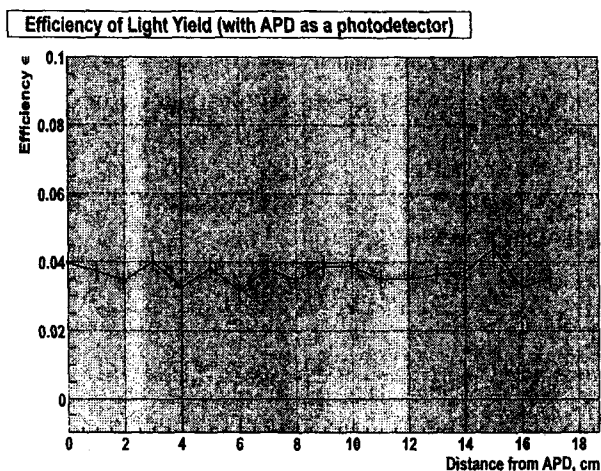


Рис. 8. Зависимость светосбора от координаты z (вдоль оси кристалла).

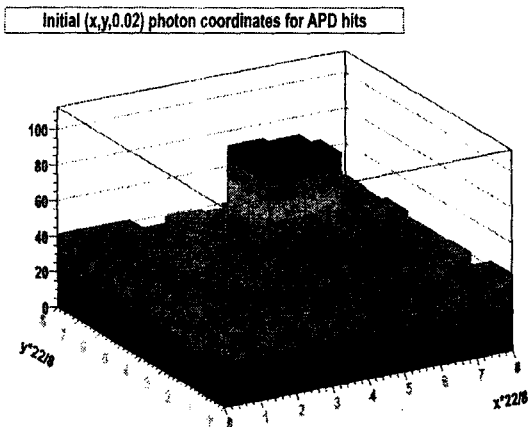


Рис. 9. Зависимость светосбора от координат (x,y) в поперечной оси кристалла плоскости, при $z = 0.02$ см (вблизи фотоприемника). Сечение кристалла разбито на 8×8 ячеек, высота равна числу зарегистрированных фотонов из каждой ячейки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате этой работы создана полная база данных о физико-оптических свойствах всех элементов базового модуля спектрометра PHOS, необходимых как для моделирования зависимости эффективности световыхода от координат высвечивания сцинтилляционных фотонов, так и для получения временного отклика базового модуля на образование в нем электромагнитного ливня от гамма-кванта высокой энергии. Предполагается использовать полученные результаты на последующих этапах моделирования спектрометра PHOS. Авторы выражают свою благодарность А.В. Казанцеву, М.С. Ипполитову, С.А. Никулину, А.С. Нянину и руководителю проекта PHOS В.И. Манько за интерес к данной работе.

5. ЛІТЕРАТУРА

- [1] C.M.Hung and E.V.Shuryak, Phys.Rev.Lett.75 (1995) 4003.
- [2] D.H.Rischke, Nucl.Phys. A 610 (1996) 88c.
- [3] Letter of Intent for A Large Ion Collider Experiment. CERN/LHHC/93-16, LHHC/I 4 (1993)
- [4] ALICE collaboration, Technical Design Report of the Photon Spectrometer (PHOS), CERN/LHCC 99-4 ALICE TDR 2, 1999.
- [5] R.Chipaux and M.Geleoc, Nucl.Instr. and Meth. in Phys. Res., A451 (2000) 610-622
- [6] R.Chipaux and F.-X.Gentit, Nucl.Instr. and Meth. in Phys. Res., A486 (2002) 48-54
- [7] V. Antonenko, Simulation of light collection processes in "PHOS" prototype, ALICE / IN 99-15, (1999).
- [8] F. Gautheron, A. Givernaud, CMS Note 1997/037.
- [9] M.J. Berger and S.M. Seltzer, "Tables of Energy Losses and Ranges of Electrons and Positrons," National Aeronautics and Space Administration Report NASA-SP-3012 (Washington DC 1964).

[10] M. Ippolitov, S. Beloglovsky, M. Bogolubsky, S. Burachas, S. Erin, A. Klovning, A. Kuriakin, V. Lebedev, M. Lobanovc, O. Maeland, V. Manko, S. Nikulin, A. Nyanin, O.H. Odland, V. Punin, S. Sadovsky, V. Samoilenko, Yu. Sibiriak, B. Skaali, A. Tsvetkov, Yu. Vinogradov, A. Vasiliev, Nucl. Instr. and Meth. in Nucl. Phys. Res. A 486 (2002) 121-125.

[11] Блау Д.С., Дипломная работа на соискание степени бакалавра, ИИНСНЭК, 2005.

[12] См. [4] стр. 22.

[13] Qun Deng, Ren-yuan Zhu, Quantum Efficiency Measurement for XP2262B Photomultipliers, CMS Note 1997/046.

[14] Hamamatsu Si APD 8864 series datasheet, http://jp.hamamatsu.com/resources/products/ssd/pdf/s8664_series_kapd1012e04.pdf

[15] А.В. Курякин, Ю.А. Кучеряев, Ю.Г. Сибиряк, «Исследование временного и амплитудного разрешения фотонного спектрометра PHOS с помощью моделирования.

Подписано в печать 19.10.2006. Формат 60×90/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1

Тираж 65 экз. Заказ 75. Индекс 3624

Отпечатано в РИЦ «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

