

ПРИМЕНЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ PWO В КОМПЕНСИРОВАННЫХ ГИБРИДНЫХ КАЛОРИМЕТРАХ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Г. Ю. Дробышев, А. Е. Борисевич, В. И. Дорменев, М. В. Коржик,
А. Е. Корнеев, В. А. Мечинский

1. Введение

Развитие физики высоких энергий в последние десятилетия привело к возникновению насущной необходимости в создании технической базы, которая позволила бы вести исследования в области энергий частиц порядка нескольких ТэВ. С одной стороны, в ходе этих экспериментов планируется продолжить исследования в рамках так называемой «Стандартной модели» (СМ) [1]. СМ включает в рассмотрение такие понятия, как частицы материи, силы и механизм П. Хиггса [2, 3], объясняющий возникновение фундаментальных частиц, лептонов, кварков и калибровочных бозонов посредством взаимодействия со скалярным полем, распространенным в пространстве – времени. С другой стороны, новые эксперименты должны создать основу для разработки более общей модели, включающей СМ как частный случай [4, 5]. В ходе экспериментов, проведенных на ускорителе LEP2 в Европейской лаборатории ядерных исследований (ЦЕРН), был установлен нижний предел массы бозонов Хиггса – 100 ГэВ, однако достоверных результатов, свидетельствующих о существовании или не существовании бозонов Хиггса не было получено в силу ограниченности возможностей LEP2.

Для обеспечения потребностей физики высоких энергий ближайшего десятилетия в Европейской лаборатории физики частиц (ЦЕРН) создан Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider, LHC). Он позволит организовать ряд крупных многоплановых экспериментов при энергиях до 14 ТэВ при интенсивности пучка 10^{34} см⁻²с⁻¹ [6, 7]. На базе этого ускорителя планируется проведение нескольких экспериментов, являющихся ключевыми для дальнейшего развития фундаментальных исследований в области физики частиц высоких энергий, таких как, например, эксперимент CMS по поиску бозонов Хиггса [8]. Каждый подобный эксперимент включает многоуровневую детектирующую систему, одним из принципиальных элементов которой являются системы электромагнитного (ЭМК) и адронного калориметров (АК).

Поскольку специфика современных исследований в данной области заключается в значительном, порядка 20 лет, времени, требуемом на разработку, постройку и организацию экспериментальных исследований такого рода, уже сейчас начаты исследования по разработке подходов и принципов построения новых экспериментов «после LHC». В частности, начата проработка принципов работы и конструкций адронных калориметров, которые будут использоваться в экспериментах на планирующемся Международном линейном электронно-позитронном коллайдере ILC [9], Компактном линейном коллайдере CLIC [10] и других новых ускорителях.

Одной из принципиальных особенностей современных экспериментов по физике высоких энергий является чрезвычайно высокие требования к энергетическому разрешению калориметров в совокупности с необходимостью их функционирования в интенсивных радиационных и электромагнитных полях. Данные требования обусловлены необходимостью регистрации чрезвычайно редких событий, что уже привело к увеличению светимости в новом поколении экспериментальных установок. В настоящее время ведутся работы по созданию прототипов электромагнитных и адронных калориметров.

При обсуждении концепций построения новых калориметров для физики высоких энергий в настоящее время выявились следующие принципиальные тенденции:

- предлагается разрабатывать гибридные калориметры для регистрации и электромагнитной и адронной компонент, что позволит избежать негативного влияния материала ЭМК на работу АК и повысить точность идентификации частиц;
- предлагается, что конструкция АК должна обеспечить их компенсацию (т. е. эквивалентность сигналов от электромагнитной и неэлектромагнитной компонент) [11].

Исследование принципов построения новых адронных калориметров проводится в настоящее время на экспериментальном детекторе DREAM (Dual-REAdout Module – модуль с двойным трактом регистрации) [12– 17]. Принципиальной особенностью детектора DREAM является одновременная регистрация сцинтилляционного и черенковского сигнала в каждом детектирующем элементе калориметра. Детектирующий элемент состоит из семи оптических световодов, материал в трех из которых активирован, т. е. является сцинтиллятором, а остальные четыре регистрируют только черенковское излучение. Одновременная регистрация сцинтилляционного и черенковского излучений должна обеспечить надежную сепарацию релятивистских и нерелятивистских частиц ливня и уменьшить флуктуации электромагнитной компоненты ливня. В результате уменьшаются вызванные этими флуктуациями эффекты, такие как нелинейность сигнала и негауссовость функции отклика, что, в свою очередь, улучшает адронное энергетическое разрешение.

2. Кристалл PWO – перспективный материал для нового поколения калориметров

Нами было предложено использовать при разработке нового гибридного калориметра сцинтилляционные кристаллы вольфрамата свинца $PbWO_4$ (PWO), в которых будет осуществлена одновременная регистрация как сцинтилляционных, так и черенковских фотонов, возникающих под действием электромагнитной (ЭМ) и адронной (А) компонент.

Сцинтиллятор PWO был разработан научной группой НИИ ЯП в сотрудничестве с Европейской лабораторией физики частиц – ЦЕРН (Женева, Швейцария), Лабораторией физики частиц – ЛАПП (Анси-ле-Вье, Франция) и Богородицким заводом теххимических изделий – БЗТХИ (Богородицк, Россия) для

применения в новом поколении экспериментов в области физики высоких энергий, планируемых на ускорителях с высокой светимостью. По сравнению с другими используемыми сцинтилляторами, кристалл PWO имеет самую высокую плотность, наименьшие радиационную длину L_R и радиус Мольера R_M , что позволило создать на основе PWO компактные ЭМК с высокой эффективностью регистрации гамма-квантов высоких энергий.

Благодаря уникальному сочетанию своих характеристик вольфрамат свинца уже стал наиболее широко применяемым сцинтилляционным материалом в экспериментах по физике частиц текущего десятилетия [18]. В настоящее время кристалл PWO используется для изготовления Электромагнитного калориметра (ECAL) проекта CMS и Фотонного детектора в эксперименте ALICE в CERN [8, 19], а также для создания детектора для коллаборации PANDA в GSI (Дармштадт, Германия).

Большой коэффициент преломления PWO ($n = 2.28$) делает его пригодным для использования в качестве черенковского радиатора. Применение современных технологий позволяет выращивать сцинтилляционные элементы PWO длиной до 30 см. Эта длина соответствует порядка 1.5 ядерных длин взаимодействия, что гарантирует возникновение адронного ливня в кристалле. Одновременная регистрация сцинтилляционного и черенковского света из кристалла должна обеспечить надежное разделение релятивистских и нерелятивистских частиц в ливне и снизить влияние флуктуаций электромагнитной компоненты на энергетическое разрешение. Это, в свою очередь, позволит уменьшить нелинейность сигнала и негауссовость функции отклика, которые возникают вследствие флуктуаций электромагнитной компоненты. Таким образом, будет улучшено энергетическое разрешение детектора при регистрации адронов.

Проблема компенсации гибридного ЭМ-А калориметра, в конструкции которого используются сцинтилляционные кристаллы, может быть решена с помощью традиционного метода селективного усиления адронного сигнала за счет ядерных взаимодействий, при этом высокая концентрация свинца в PWO является положительным фактором [11]. Также могут оказаться эффективными два метода компенсации «off-line».

Первый метод компенсации «off-line» основан на различии характеров развития в калориметре ливней, имеющих электромагнитную и неэлектромагнитную (адронную) природу. Это различие становится особенно выраженным при использовании поглотителей с большим значением атомного номера Z . Использование этого метода требует построения высокогранулярного калориметра.

Второй метод компенсации «off-line» основан на том факте, что вторичные частицы (электроны и позитроны) электромагнитного ливня остаются релятивистскими вплоть до энергий в несколько кэВ. Нерелятивистские протоны, возникающие в реакциях расщепления и упругого рассеяния на нейтронах, доминируют в адронных ливнях. Одновременная регистрация черенковского и сцинтилляционного излучения позволит точнее оценить вклад каждой компоненты и осуществить компенсацию калориметра [11].

Таким образом, PWO представляется идеальным кандидатом для реализации всех трех методов компенсации гибридного калориметра.

К настоящему времени нами предложены и проанализированы различные методы разделения черенковского и сцинтилляционного сигнала в PWO. Проведены теоретические исследования и моделирования взаимодействия различных частиц с PWO с целью оценки вкладов черенковского и сцинтилляционного сигналов. Исследованы возможности создания кристаллов PWO с модифицированными спектральными и сцинтилляционными характеристиками. Изготовлены экспериментальные кристаллы с различным световыходом для уравнивания сцинтилляционных и черенковских сигналов и оптимизации их разделения. Начата подготовка к экспериментальным измерениям, которые планируется провести во второй половине 2009 г.

3. Оценки выхода черенковского излучения в сцинтилляторе PWO в различных диапазонах длин волн

Нами проведены серии моделирований с целью оценки выхода черенковского излучения в сцинтилляторе PWO в различных диапазонах длин волн при прохождении пучков электронов и пионов под различными углами через кристалл с стандартными размерами элемента торцевой части калориметра CMS (ЦЕРН).

Три диапазона длин волн были выбраны для моделирований:

- 320–500 нм, который соответствует области чувствительности ФЭУ;
- 300–675 нм, который определен как область высвечивания сцинтилляций;
- 675–1000 нм, в котором отсутствуют сцинтилляционные сигналы и который пригоден для селективной регистрации черенковского излучения.

Результаты представлены на рис. 1–6. Моделирования выполнялись для случая кристаллов PWO, имеющих характеристики, аналогичные тем, которые будут использованы в эксперименте CMS, т. е. не оптимизированные для построения гибридного калориметра. Таким образом, данные моделирования дают нижнюю оценку. Отношение черенковского сигнала к сцинтилляционному может быть улучшено при использовании технологических мер, подавляющих сцинтилляционный выход PWO.

4. Исследование методов разделения черенковского и сцинтилляционного сигнала в PWO

Для разделения сигналов черенковского и сцинтилляционного света могут быть использованы четыре метода [20, 21]:

- посредством анализа спектров эмиссии;
- посредством анализа временных характеристик сигналов;
- посредством использования факта направленности черенковского излучения в отличие от изотропного света сцинтилляций;
- посредством использования факта поляризованности черенковского излучения в отличие от неполяризованного света сцинтилляций.

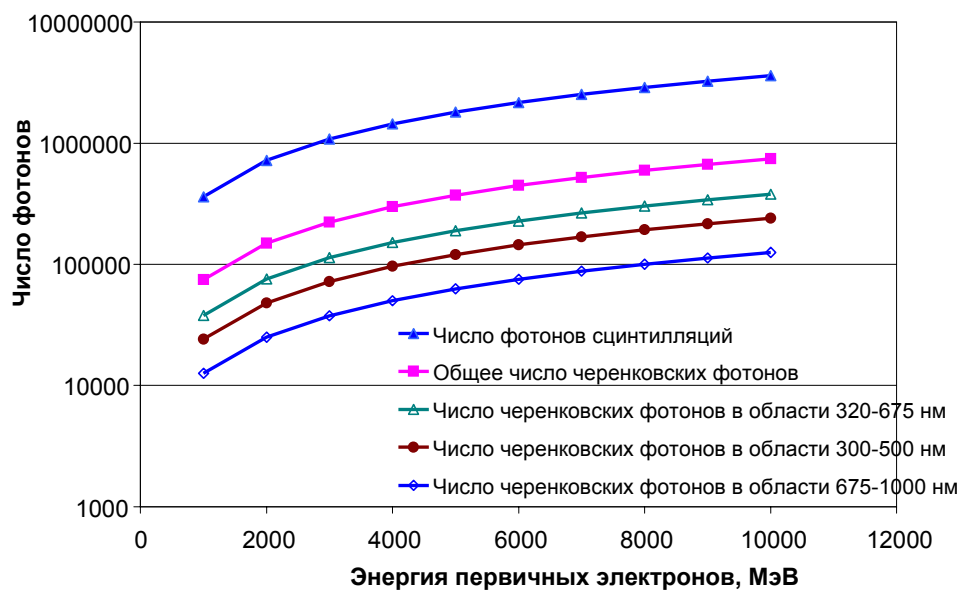


Рис. 1. Число сцинтилляционных и черенковских фотонов, возникающих в кристалле PWO под действием облучения электронами различных энергий. Угол падения пучка электронов на кристалл 0°

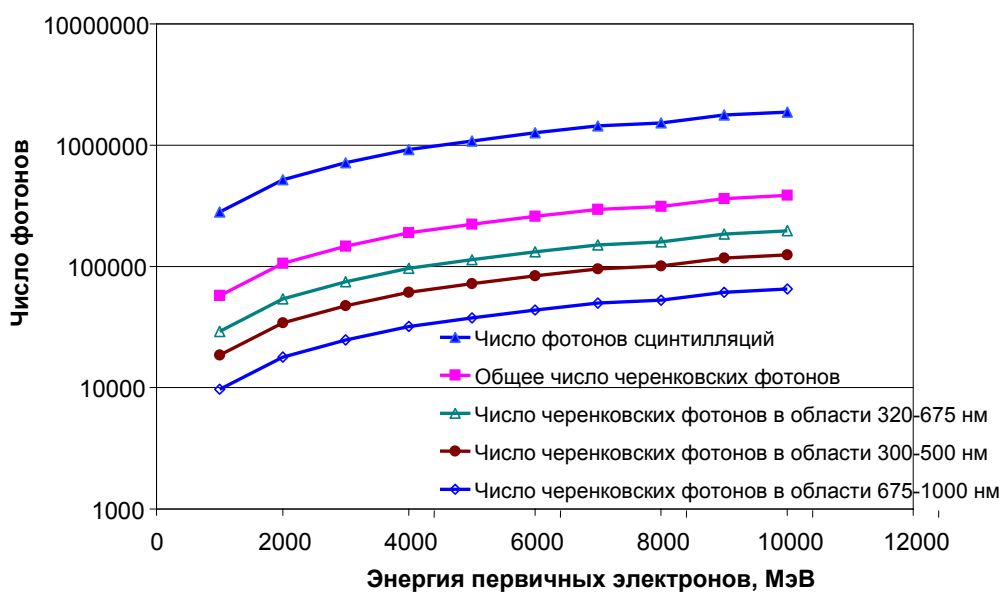


Рис. 2. Число сцинтилляционных и черенковских фотонов, возникающих в кристалле PWO под действием облучения электронами различных энергий. Угол падения пучка электронов на кристалл 25°

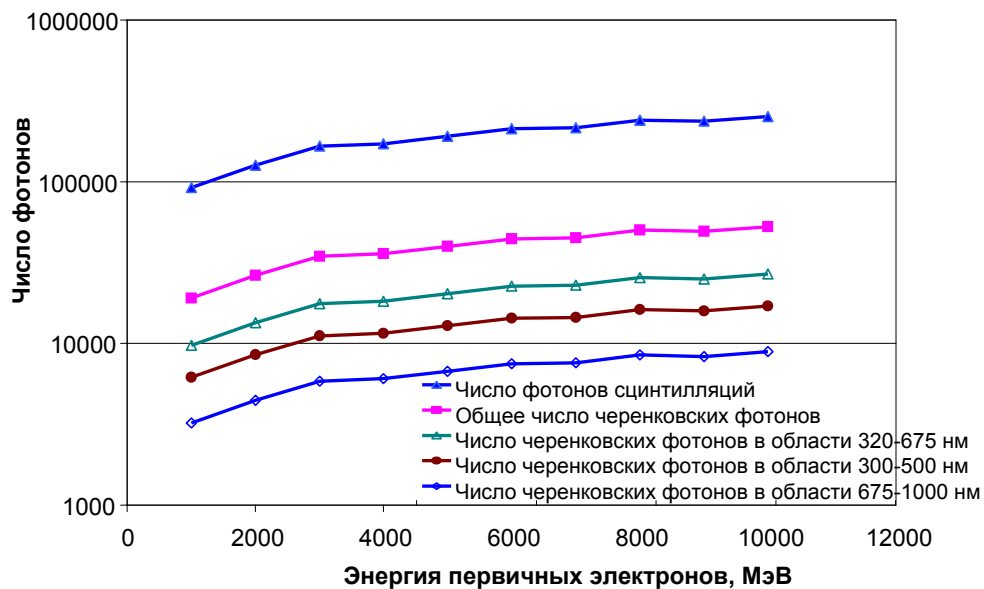


Рис. 3. Число сцинтилляционных и черенковских фотонов, возникающих в кристалле PWO под действием облучения электронами различных энергий. Угол падения пучка электронов на кристалл 90°

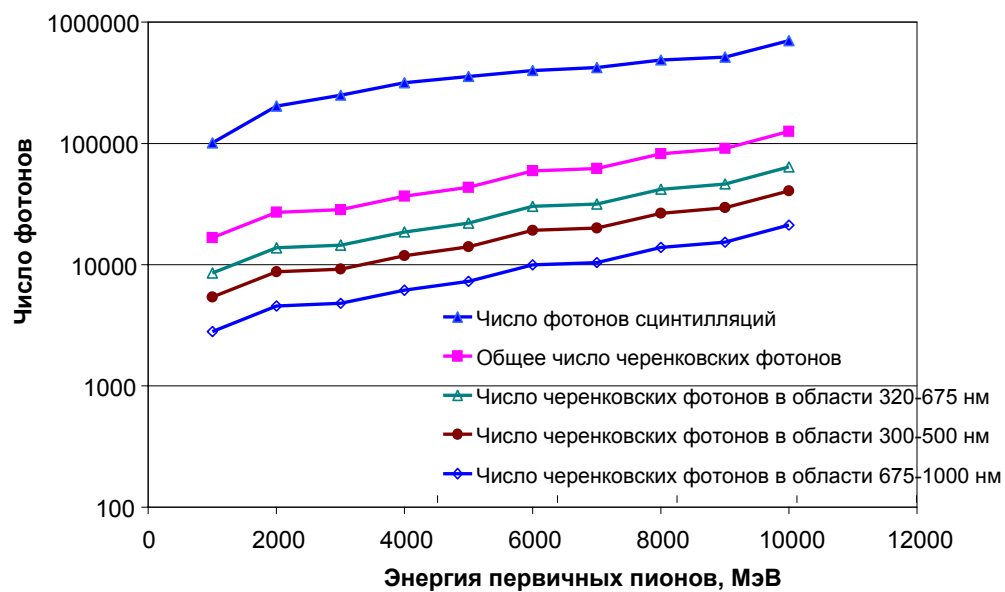


Рис. 4. Число сцинтилляционных и черенковских фотонов, возникающих в кристалле PWO под действием облучения пионами различных энергий. Угол падения пучка пионов на кристалл 0°

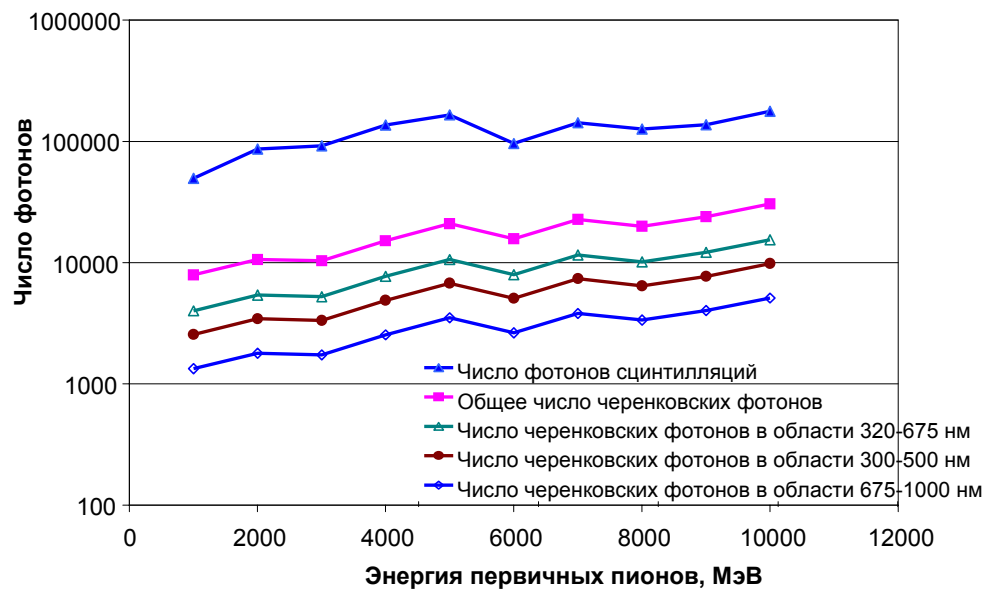


Рис. 5. Число сцинтилляционных и черенковских фотонов, возникающих в кристалле PWO под действием облучения пионами различных энергий. Угол падения пучка пионов на кристалл 25°

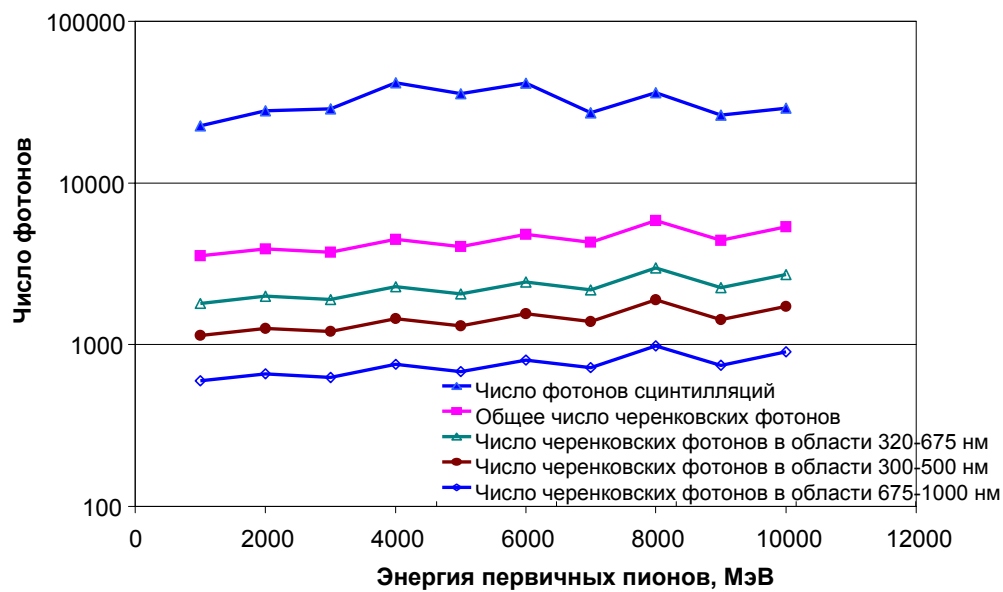


Рис. 6. Число сцинтилляционных и черенковских фотонов, возникающих в кристалле PWO под действием облучения пионами различных энергий. Угол падения пучка пионов на кристалл 90°

К настоящему времени нами проведен предварительный анализ различных методов разделения. Для экспериментального подтверждения проведенных моделирований и установления оптимального метода или комбинации методов разделения черенковского и сцинтилляционного излучения в PWO планируется провести серию экспериментальных исследований на пучках высоких энергий в ЦЕРНе. Для экспериментов будут использованы как стандартные сцинтилляционные элементы PWO для эксперимента CMS, так и кристаллы с модифицированными спектральными и сцинтилляционными характеристиками.

4.1. Метод разделения по спектральной области

Применение этого метода основано на том, что спектр сцинтилляций PWO локализован в полосе с максимумом порядка 420 нм, в то время как черенковское излучение можно, в первом приближении, считать распределенным изотропно в широком спектральном диапазоне. В случае кристаллов PWO, имеющих характеристики, аналогичные тем, которые будут использованы в эксперименте CMS, можно осуществить регистрацию сцинтилляционного света в области высвечивания сцинтилляций, а регистрацию черенковского излучения – в диапазоне 675–1000 нм. Разделение может быть осуществлено с помощью фотодетектора со специальным селектором (красный оптический фильтр с краем спектрального диапазона пропускания 690 нм).

4.2. Метод временного разделения

Метод основан на различиях во временных характеристиках сигналов – черенковское излучение возникает практически мгновенно и продолжается в течение прохождения релятивистской заряженной частицы через среду, в то время как сцинтилляции в PWO возникают с задержкой, содержат несколько затухающих компонент и достигают максимума через 6–11 нс после поглощения энергии частицы сцинтиллятором. Поэтому разделение сигналов может осуществляться посредством анализа формы импульса и времени высвечивания.

4.3. Метод анализа углового распределения

Метод основан на пространственной анизотропии черенковского излучения. Черенковские фотоны излучаются в конус, соосный траектории заряженной частицы, в то время как сцинтилляционное излучение пространственно изотропно.

Следует отметить, что анизотропность распространения черенковского излучения в длинных кристаллах PWO сохранится и при использовании кристаллов с диффузными отражающими поверхностями, поскольку отражение света от шлифованных поверхностей анизотропно [4].

4.4. Метод разделения по поляризации излучения

Этот метод основан на факте поляризованности черенковского излучения в отличие от неполяризованного сцинтилляционного.

5. Исследование возможности создания кристаллов PWO с модифицированными спектральными и сцинтилляционными характеристиками

Как видно из результатов моделирований, в стандартных кристаллах PWO при регистрации частиц одной и той же энергии сцинтилляционный сигнал на порядок – два превосходит сигнал черенковского излучения. Столь значительный динамический диапазон затрудняет регистрацию черенковского излучения. Отношение черенковского сигнала к сцинтилляционному может быть улучшено при использовании технологических мер, подавляющих сцинтилляционный выход PWO. Некоторое уменьшение световыхода сцинтиллятора PWO не является в данном случае критическим, так как данные сцинтилляционные элементы предназначены для регистрации частиц высоких энергий (десятки и сотни ГэВ). На рис. 7 представлены амплитудные спектры трех кристаллов PWO, измеренные с помощью ФЭУ XP 2020 при облучении гамма квантами с энергией 1.25 МэВ от источника Co^{60} . Образец № 4073 является стандартным элементом калориметра эксперимента CMS, образцы № 127-78 и №127-81 – специально выращенные кристаллы с подавленным световыходом сцинтилляций. Измеренные характеристики приведены в следующей таблице.

Номер кристалла	Световыход, фотоэлектрон/МэВ (ФЭУ XP 2020)
4073	12.3
127-78	6
127-81	5.9

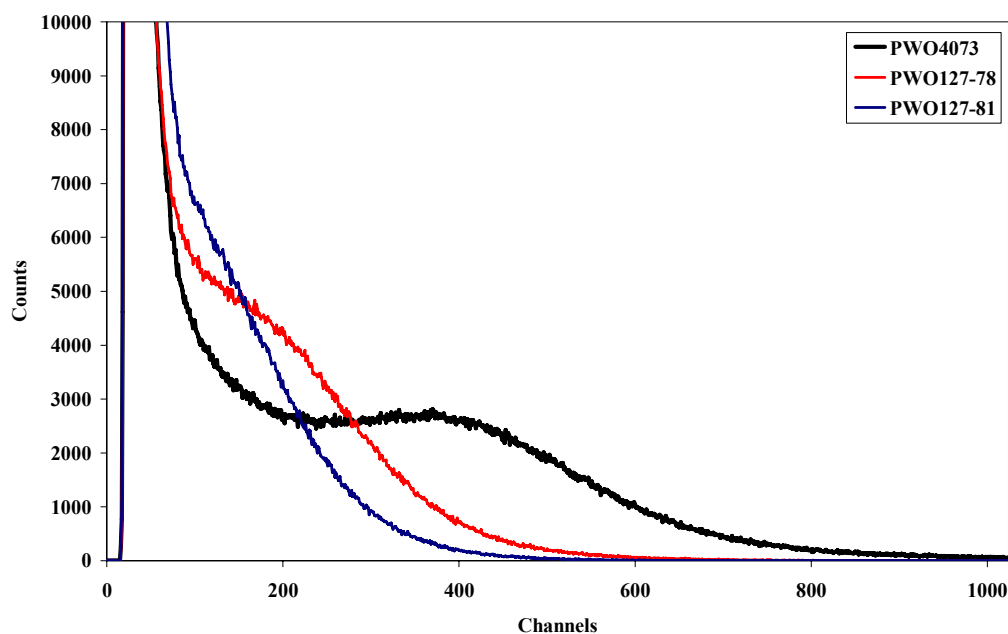


Рис. 7. Амплитудные спектры трех кристаллов PWO, измеренные с помощью ФЭУ XP 2020 при облучении гамма квантами с энергией 1.25 МэВ от источника Co^{60}

6. Заключение

В ходе исследований предложены и изучены различные методы разделения черенковского и сцинтилляционного сигнала в PWO. Показана принципиальная возможность использования этих методов. Окончательный выбор наилучшего метода или комбинации будет сделан по результатам экспериментальных измерений на пучке высоких энергий. Такие измерения планируется провести во второй половине 2009 г. в ЦЕРНе.

Проведены теоретические исследования и моделирования взаимодействия различных частиц с PWO с целью оценки вкладов черенковского и сцинтилляционного сигналов в различных диапазонах длин волн. Для немодифицированных кристаллов PWO при регистрации частиц одной и той же энергии сцинтилляционный сигнал на порядок – два превосходит сигнал черенковского излучения, что делает использование кристаллов для одновременной регистрации черенковского и сцинтилляционного сигналов возможным, однако, неоптимальным.

Исследованы возможности создания кристаллов PWO с модифицированными спектральными и сцинтилляционными характеристиками. Изготовлены экспериментальные кристаллы со световыходом, в два раза ниже световыхода немодифицированных кристаллов PWO при сохранении остальных потребительских характеристик (спектральный диапазон высвечивания, поглощение, радиационная стойкость) для уравнивания сцинтилляционных и черенковских сигналов и оптимизации их разделения.

Результаты планируемых исследований имеют важное значение для работ по созданию нового поколения экспериментальных установок для фундаментальных исследований по физике высоких энергий. В использовании результатов планируемых исследований заинтересованы, в частности, научные группы, планирующие проведение экспериментов в ЦЕРН (Швейцария).

7. Благодарности

Авторы выражают благодарность доктору П. Лекоку из ЦЕРНа за помощь в организации проведения экспериментальных исследований в ЦЕРН.

Литература

1. Particle data group. LBNL // Phys. Rev. D. Particles and fields. Part 1. Review of particle physics. 1996. Vol. 54. P. 77.
2. *Gunion J. F., Haber H. E.* et al. The Higgs Hunter's Guide. 1990.
3. *Denegri D.* // CMS TN. 1995. № 167. 24 p.
4. The Compact Muon Solenoid. Technical Proposal CERN/LHCC 94-38. 1994.
5. *Virdee T.* // CMS TN. 1995. № 168. 16 p.
6. *Bomeštar D.* // CMS TN. 1995. № 156. 8 p.
7. *Iashvili I.* // CMS CR. 1998. № 013. 6 p.
8. CMS. The Electromagnetic Calorimeter Technical Design Report. CERN/LHCC 97-33. CMS TDR4. 15 December 1997.
9. International Linear Collider. <http://www.linearcollider.org/cms/>
10. The Compact Linear Collider. <http://clic-study.web.cern.ch/clic%2Dstudy/>

11. *Wigmans R.* // International Series of Monographs on Physics. Vol. 107. 2000.
12. *Akchurin N., Wigmans R.* // Rev. Sci. Instr. 2003. Vol. 74. P. 2955.
13. *Akchurin N., Carrell K.* et al. // NIM. 2004. Vol. A 533. P. 305.
14. *Akchurin N., Carrell K.* et al. // NIM. 2005. Vol. A 536. P. 29.
15. *Akchurin N., Carrell K.* et al. // NIM. 2005. Vol. A 537. P. 537.
16. *Akchurin N., Carrell K.* et al. // NIM. 2005. Vol. A 548. P. 336.
17. *Akchurin N., Atramentov O.* et al. // NIM. 2005. Vol. A550. P. 185.
18. *Annenkov A., Korzhik M.* et al. // IEEE'2000 Abstr. NSS-527. 2000. 3 p.
19. ALICE Technical Proposal, CERN/LHC 95–71, 15 December 1995.
20. *Akchurin N., Carrell K.* et al. // NIM. 2005. Vol. A 548. P. 336.

APPLICATION OF PWO CRYSTALS FOR CONSTRUCTION OF COMPENSATED HYBRID CALORIMETERS FOR EXPERIMENTAL HIGH ENERGY PHYSICS

**G. Yu. Drobychev, A. E. Borisevich, V. I. Dormenev, M. V. Korjik,
A. E. Karneyeu, V. A. Mechinsky**

Different methods for separation of Cherenkov and scintillation light from PWO scintillator were studied. A possibility of use of PWO crystals for simultaneous registration of Cherenkov and scintillation signals was proved. Possibilities to produce PWO scintillators with modified spectral and scintillation characteristics were studied. Experimental crystals with reduced scintillation yield were produced and tested.