

## МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 539.1.074.3

**СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
МОДУЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА  
НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ  $BaF_2$** 

М. В. Белов, М. В. Завертяев, В. А. Козлов, В. С. Цхай

*Исследованы оптические и сцинтилляционные характеристики модулей прототипа электромагнитного калориметра на основе кристаллов фторида бария  $BaF_2$  с размерами  $25 \times 25 \times 160$  мм<sup>3</sup>. Методом Монте-Карло проведена оптимизация длины кристаллического радиатора калориметра с целью улучшения его энергетического разрешения. Показана однородность световых выходов от различных участков модуля с использованием гамма-квантов от источника  $^{137}Cs$ . Измерено время высвечивания кристаллического модуля под действием гамма-возбуждения.*

**Ключевые слова:** сцинтилляционные кристаллы, электромагнитный калориметр, гамма-излучение, время затухания сцинтилляций.

В современных экспериментах в области физики высоких энергий в качестве детекторов, измеряющих энергию электронов и фотонов, применяются электромагнитные калориметры. Известно, что гомогенные электромагнитные калориметры на основе сцинтилляционных кристаллов обеспечивают лучшее энергетическое разрешение в широком интервале энергий электронов и фотонов.

Хорошо известный сцинтиллятор, легированный церием кристалл оксиортосиликата лютеция  $Lu_2SiO_5$  (LSO), имеет лучшее сочетание большой плотности материала, атомного номера, светового выхода и короткого времени сцинтилляции для использования в электромагнитной калориметрии. Однако при этом необходимо учитывать неоднородность световых выходов по длине кристалла [3]. Известно, что концентрация активатора –

---

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: kozlovva@lebedev.ru.

цера – вдоль длинного кристалла неоднородна, и это приводит к неоднородности световых выходов и, как следствие, к ухудшению энергетического разрешения калориметров на основе LSO/LYSO.

Поэтому использование сцинтилляционных кристаллов с собственной люминесценцией актуально для электромагнитной калориметрии с высоким энергетическим разрешением.

Одним из кристаллов с собственной люминесценцией является фторид бария  $BaF_2$ , производство которых освоено в АО “НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова” [4]. Основные характеристики кристаллов  $BaF_2$ : плотность –  $4.89 \text{ г/см}^3$ , радиационная длина –  $2.03 \text{ см}$ , максимум эмиссии –  $220/310 \text{ нм}$ , время высвечивания –  $0.6/620 \text{ нс}$ .

Благодаря высокой радиационной стойкости, механической стабильности и наличия быстрой компоненты высвечивания кристаллы-сцинтилляторы  $BaF_2$  являются востребованными кандидатами для использования их в качестве радиаторов в электромагнитной калориметрии [5, 6]. В последнее время кристаллы  $BaF_2$  предлагаются для использования в лаборатории Fermilab (USA) в эксперименте Mu2e по поиску конверсии отри-

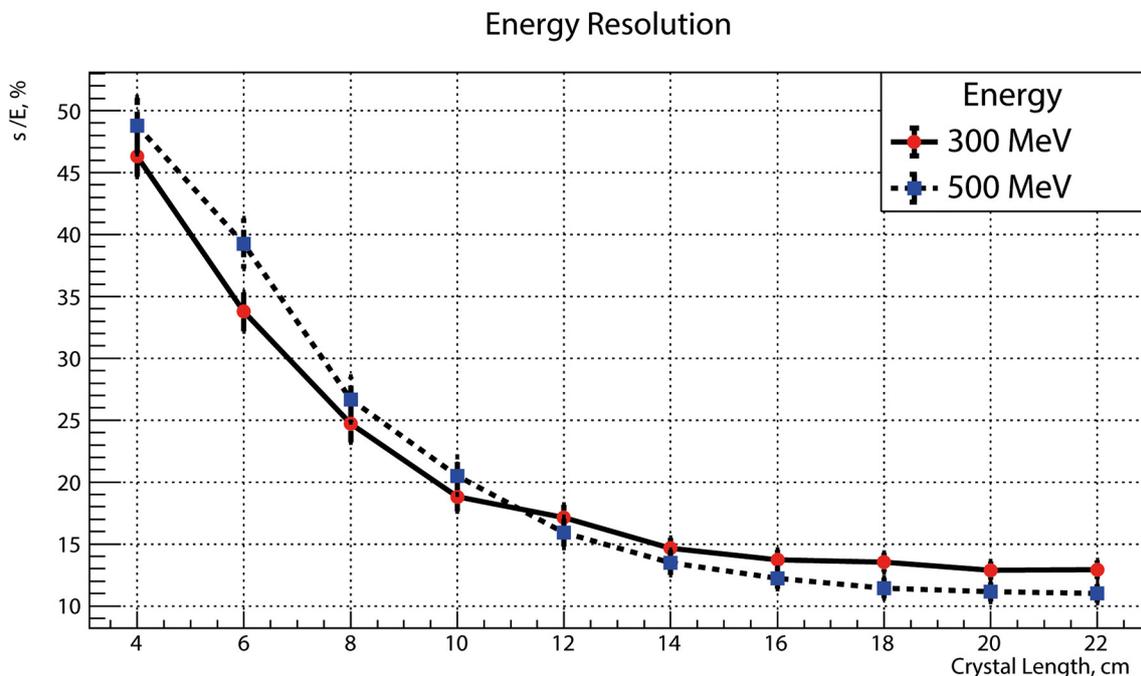


Рис. 1: Относительное разрешение радиатора на основе кристалла  $BaF_2$  в зависимости от его длины.



Рис. 2: Фотография кристаллических модулей  $BaF_2$ .

цательных мюонов в электроны без испускания нейтрино [7]. Данная работа посвящена исследованиям характеристик модулей для прототипа электромагнитного калориметра на основе кристаллов  $BaF_2$ .

Для оценки размеров радиатора  $BaF_2$ , необходимых для полного поглощения энергии электронов с энергиями до 300 МэВ, использовалось компьютерное моделирование с помощью программы GEANT4. Возможность оптимизации длины кристаллического радиатора калориметра основана на том эффекте, что при ее увеличении в некотором диапазоне длин энергетическое разрешение калориметра улучшается из-за уменьшения утечки электромагнитного ливня за задний торец кристалла вдоль продольной оси. При решении задачи моделирование проводилось для разных длин радиатора в пределах  $4 \div 22$  см и для энергий электронов 300 и 500 МэВ. Из рис. 1 видно, что при длине  $16 \div 17$  см достигается минимум энергетического разрешения для энергии 300 МэВ, связанный с минимальными продольными утечками ливня.

Исходя из результатов моделирования были изготовлены полированные модули из кристаллов  $BaF_2$  с размерами  $25 \times 25 \times 160$  мм<sup>3</sup> с целью использования их в прототипе электромагнитного калориметра (рис. 2).

Спектр оптического пропускания для полированного модуля кристалла  $BaF_2$  измерялся спектрофотометром UNICO 2800 UV-VIS в интервале  $200 \div 700$  нм перпендикулярно оси кристалла (рис. 3).

Для изучения световыхода модулей кристаллов  $BaF_2$  использовали спектры люминесценции кристалла при возбуждении гамма-квантами от источника  $^{137}Cs$  (фотопики). Исследуемый сцинтилляционный кристалл с помощью оптической смазки Dow Corning

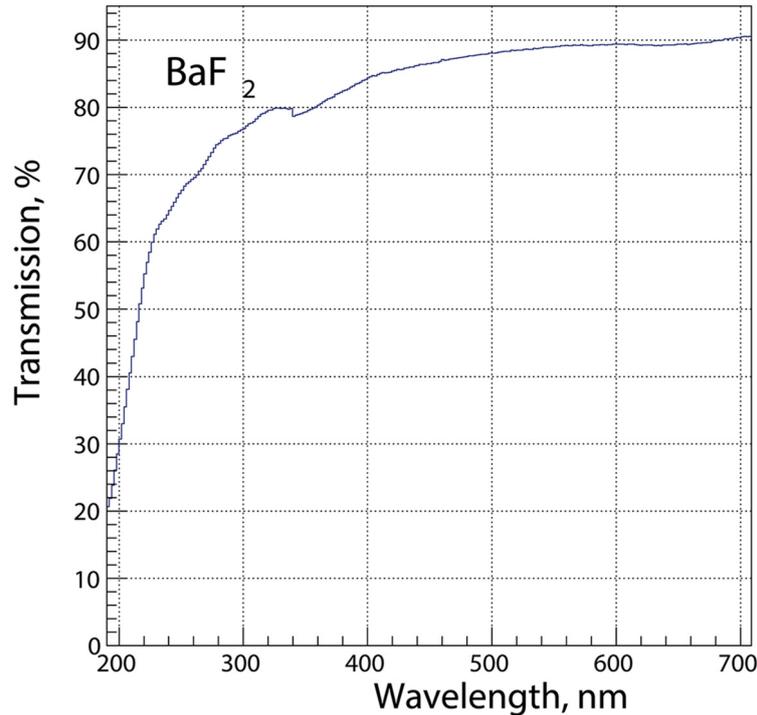


Рис. 3: Спектр оптического пропускания кристаллического модуля  $BaF_2$ .

Q2-3067 был соединен с фотоумножителем R4125Q с кварцевым окном. Все остальные поверхности кристалла были завернуты в один слой алюминизированного майлара. Размеры модуля для исследований световых выходов были  $25 \times 25 \times 160$  мм<sup>3</sup>.

Сигнал от фотоумножителя через предусилитель Canberra 2007B поступал на спектрометрический усилитель POLON 1101 и далее на амплитудный преобразователь ADC Schlumberger JCAN-21C. На рис. 4 приведен фотопик от  $^{137}Cs$  для кристалла  $BaF_2$ .

Для вычисления средних значений полученных амплитудных распределений использовалась стандартная процедура фиттирования посредством функции Гаусса и функции для описания эффекта Комптона. Фотопик на рис. 4 соответствует световых выводу 1990 фотонов/МэВ. Для изучения однородности отклика была измерена зависимость световых выходов кристаллического модуля  $BaF_2$  от расстояния между источником  $^{137}Cs$  и фотоумножителем. Измерялись амплитудные распределения при облучении модуля от источника  $^{137}Cs$  в семи точках, равномерно распределенных вдоль оси кристалла (рис. 5). В качестве референсной была взята средняя точка.

Зависимость относительного световых выходов от расстояния между источником и фотоумножителем аппроксимировалась функцией вида  $Y = Y_{mid} \cdot [1 + \delta(X/X_{mid} - 1)]$ , где

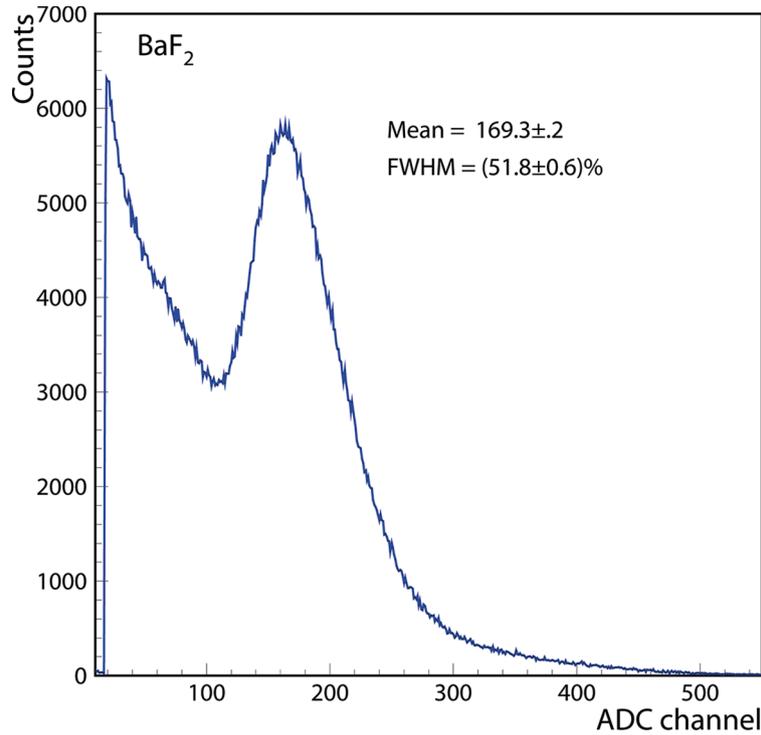


Рис. 4: Амплитудное распределение сцинтилляционного сигнала от кристалла  $\text{BaF}_2$ , облученного гамма-квантами от источника  $^{137}\text{Cs}$  в середине модуля.

$Y_{\text{mid}}$  – световыход в середине кристалла,  $\delta$  – отклонение от однородности световыхода,  $Y$  – расстояние от поверхности торца кристалла, противоположного фотоумножителю. Полученное значение  $\delta$  составляет  $-0.0047$  (0.47%).

Времена высвечивания модуля  $\text{BaF}_2$  изучались с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS2024C с полосой пропускания 200 МГц и входным сопротивлением 50 Ом. Люминесценция в кристаллическом модуле возбуждалась с помощью гамма-квантов от радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$ , затем свет от сцинтилляций регистрировался фотоумножителем с кварцевым окном Hamamatsu R4125Q; накопленная статистика составила  $3 \cdot 10^5$  событий.

На рис. 6 представлена зависимость интенсивности высвечивания сцинтилляций в модуле  $\text{BaF}_2$  от времени при облучении источником противоположного от ФЭУ торца кристалла. Для определения параметров временного спектра использовалась функция вида  $I = I_0 + I_1 \cdot \exp(-t/\tau)$ , где  $\tau$  – время высвечивания сцинтиллятора, за которое интенсивность светового излучения уменьшалась в  $e$  раз,  $I_0$ ,  $I_1$  – интенсивности высвечивания. Фон в измерении был мал (значение  $I_0 = 0.77 \pm 3.6$  сопоставимо с нулём,

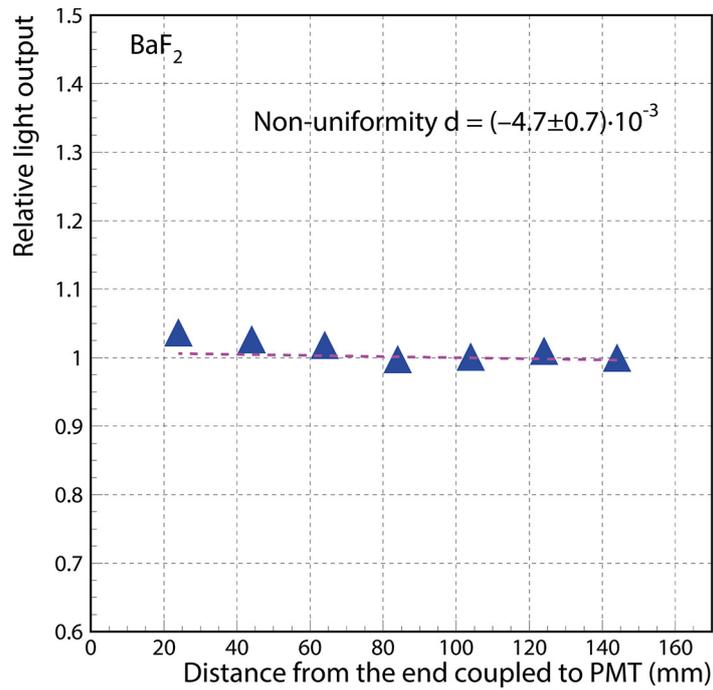


Рис. 5: Относительный световыход кристаллического модуля BaF<sub>2</sub> в зависимости от расстояния между источником <sup>137</sup>Cs и фотоумножителем.

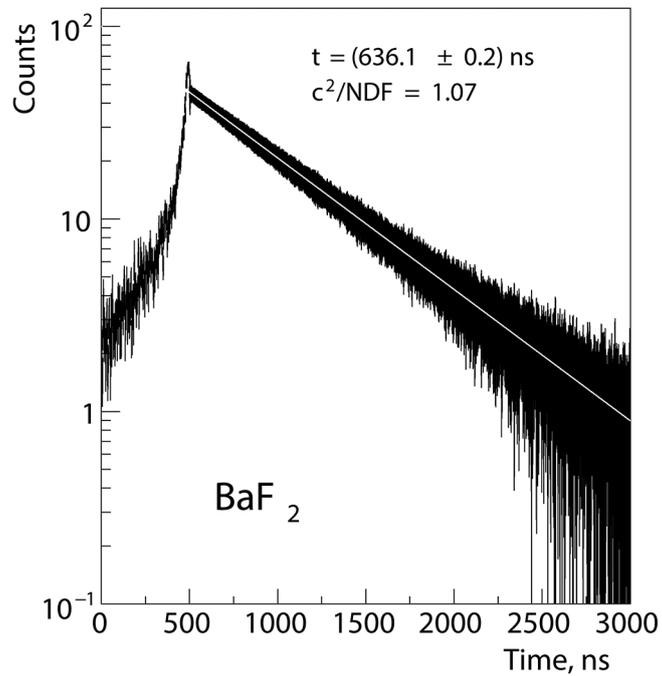


Рис. 6: Зависимость интенсивности высвечивания кристалла BaF<sub>2</sub> от времени.

$I_1 = (1.08 \pm 0.03) \cdot 10^2$ ), поэтому для окончательного фита использовалась формула  $I = I_1 \cdot \exp(-t/\tau)$ . При фитировании временного спектра получаем время высвечивания кристалла  $636.1 \pm 0.2$  нс.

Проведено исследование оптических и сцинтилляционных характеристик модулей прототипа электромагнитного калориметра на основе произведенных в России кристаллов ВаF<sub>2</sub>. Полученные результаты по однородности световыхода модуля позволяют определить параметр  $\delta$  – отклонение от однородности световыхода, которое составляет 0.47%. Известно, что для кристаллических электромагнитных калориметров параметр  $\delta$  не должен превышать 5%. Измеренное время высвечивания модуля при его облучении источником с противоположного от ФЭУ торца кристалла отличается от табличных значений для образцов ВаF<sub>2</sub> на 2.5%, что связано с многократными отражениями света в длинном модуле.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] М. В. Белов, М. В. Завертяев, В. А. Козлов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **48**(11), 12 (2021). DOI: 10.3103/S106833562111004X.
- [2] М. В. Белов, Ю. Д. Заварцев, М. В. Завертяев и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **48**(4), 3 (2021). DOI: 10.3103/S1068335621040035.
- [3] Jianming Chen, Rihua Mao, Liyuan Zhang, Ren-Yuan Zhu, IEEE Transaction on Nuclear Science **54**(3), June 2007. DOI: 10.1109/TNS.2007.897823.
- [4] АО “НПО Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова” (<http://goi.ru>).
- [5] R. Novotny, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **61B**, 137 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(97\)00552-5](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(97)00552-5).
- [6] G. Graham, H. Yamamoto, Nucl. Instr. Meth. A **307**, 340 (1991). [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(91\)90188-V](https://doi.org/10.1016/0168-9002(91)90188-V).
- [7] Chen Hu, Chao Xu, Liyuan Zhang, et al., IEEE Transactions on Nuclear Science **66**(7), 1854 (2019). DOI: 10.1109/TNS.2019.2918305.

Поступила в редакцию 21 марта 2024 г.

После доработки 4 июня 2024 г.

Принята к публикации 7 июня 2024 г.