

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 539.1.074

РАЗРАБОТКА СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ СИЛИКОНОВОГО КОМПАУНДА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РАЗНЫХ ТИПОВ ЧАСТИЦ

© 2026 г. Д. А. Кулешов^{а, *}, К. О. Куринов^а, И. О. Малий^{а, b}, Ю. В. Стенькин^{а, b}

^аИнститут ядерных исследований Российской академии наук, Москва, 117312 Россия

^bМосковский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

*E-mail: den_kuleshov481@mail.ru

Поступила в редакцию 21.07.2025 г.

После доработки 21.07.2025 г.

Принята к публикации 04.08.2025 г.

Нами разрабатываются специализированные сцинтилляторы на основе отечественных люминофоров, погруженных в оптически прозрачный силиконовый компаунд. Дисперсные сцинтилляторы такого класса могут быть оптимизированы для регистрации частиц разных типов. Представлены методы численного моделирования дисперсных силиконовых сцинтилляторов и их экспериментально измеренный отклик на атмосферные мюоны, быстрые нейтроны и γ -кванты.

Ключевые слова: сцинтиллятор, силикон, сульфид цинка, нейтрон, мюон, люминофор, моделирование эксперимента

DOI: 10.56304/S2079562926010203

ВВЕДЕНИЕ

Идея использования для регистрации элементарных частиц дисперсных сцинтилляторов, которые состоят из нескольких несмешиваемых между собой фракций, появилась достаточно давно. Так, одно из ранних упоминаний есть в работе [1], где предлагается использование смеси двух сцинтилляторов, с эффективными атомными номерами одного меньше, а другого больше эффективного атомного номера воздуха, для создания дозиметрического детектора γ -квантов. В качестве таких сцинтилляторов предлагается взять пластический сцинтиллятор с равномерно распределенной небольшой примесью к нему гранул сульфида цинка, активированного серебром — ZnS(Ag). Авторами было показано, что относительная эффективность такого дозиметрического детектора будет мало зависеть от энергии γ -квантов в широком диапазоне, а экспериментально измеренное отношение конверсионной эффективности (η) сцинтиллятора с 1/200 части ZnS(Ag) в несцинтиллирующей пластмассе к пластическому сцинтиллятору составило $\eta_{\text{ZnS}}/\eta_{\text{plastic}} = 4.1$.

Гетерогенные (дисперсные) сцинтилляторы, где в качестве одного из компонентов выступает силикон, акриловая или эпоксидная смола, а в качестве другого — дробленое литиевое стекло ($\text{SiO}_2 + \text{LiO}_2 + \text{Ce}_2\text{O}_3$), предлагается применять для регистрации тепловых нейтронов [2]. Такой подход позволяет снизить на два порядка γ -чув-

ствительность детектора по сравнению с гомогенным литиевым стеклом. С учетом преимуществ малого времени высвечивания (50–60 нс), литиевое стекло, однако, обладает и существенными недостатками: маленьким световыходом и невозможностью разделения нейтронов от γ -квантов по форме импульса. Оба этих недостатка отсутствуют в сцинтилляторах на основе ZnS(Ag).

Дисперсные сцинтилляторы на основе оптически прозрачного силиконового компаунда, с погруженными в него спекшимися гранулами сульфида цинка и оксида природного бора (сцинтиллятор ЛРБ-2: $\text{ZnS(Ag)} + \text{B}_2\text{O}_3$), уже давно успешно применяются в экспериментах по изучению адронной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ) через вторичные тепловые нейтроны совместно с электронной-фотонной компонентой [3, 4]. Нами накоплен многолетний опыт создания и оптимизации такого класса сцинтилляторов и, на основе него, появилась идея разработки аналогичных дисперсных сцинтилляторов, но адаптированных уже для более широкого класса ядерно-физических экспериментов по регистрации заряженных частиц, γ -квантов, мюонов и нейтронов.

ДИСПЕРСНЫЕ СЦИНТИЛЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ СИЛИКОНА

В своей основе разрабатываемые нами дисперсные силиконовые сцинтилляторы содержат среду

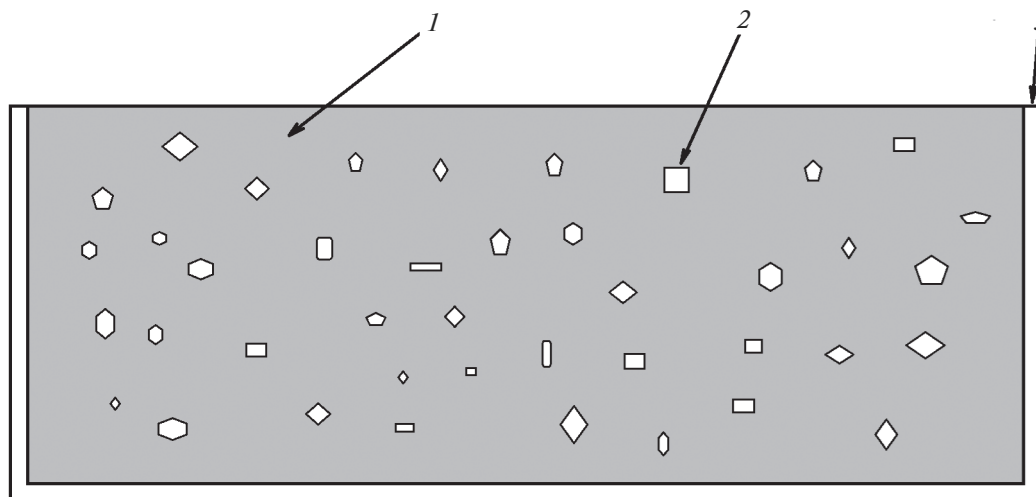


Рис. 1. Структура дисперсного силиконового сцинтиллятора. 1 – Оптически прозрачный силиконовый компаунд, 2 – гранулы люминофора, 3 – боковые стенки из материала с высоким коэффициентом отражения.

распространения света – оптически прозрачный силикон $[(\text{CH}_3)_2\text{SiO}]_n$ и дисперсную добавку – люминофоры отечественного производства преимущественно на основе сульфида цинка (рис. 1). Среда, помимо своей основной функции трансляции света от сцинтиллирующих гранул дисперсной добавки до фотоприемника, помогает в решении и других задач. Так, например, вследствие большого содержания атомов водорода в молекуле силикона (шесть атомов водорода на один фрагмент молекулы), силикон будет играть роль рабочего тела для детектора быстрых нейтронов, которые теряют свою энергию в упругом столкновении с ядрами водорода и образуют протоны отдачи с энергиями, пропорциональными энергии налетающего нейтрона. На таком принципе можно построить детектор быстрых нейтронов, если в сцинтилляторе в качестве дисперсной добавки использовать люминофор на основе $\text{ZnS}(\text{Ag})$ с хорошим разделением сигналов от легких и тяжелых заряженных частиц. Кроме того, в силиконовых дисперсных сцинтилляторах будет подавляться фактор γ -фона от естественной радиоактивности, вследствие укрытия толстым слоем силикона зерен люминофора, что не мешает, однако, регистрации атмосферных мюонов, легко пролетающих сквозь любую толщину сцинтиллятора.

Сульфид цинка в качестве дисперсной добавки был выбран по целому ряду факторов. Сам по себе $\text{ZnS}(\text{Ag})$ отличается очень большим световыходом (до 10^5 фотонов/МэВ) среди всех неорганических сцинтилляторов, а тем более органических. Вследствие наличия в нем нескольких временных компонент высвечивания (от нескольких десятков наносекунд и вплоть до сотни

микросекунд) появляется возможность разделять сигналы по форме импульса от легких и от тяжелых заряженных частиц, что невозможно в пластических сцинтилляторах [5, 6]. Используемый нами для регистрации тепловых нейтронов сцинтиллятор ЛРБ-2, производимый ЗАО “НПФ “Люминофор” методом спекания люминофора РС-450 и гранул оксида природного бора, демонстрирует теоретическую эффективность порядка 20% при толщине сцинтиллятора 50 мг/см², погруженного в 3 мм слой силикона. Помимо РС-450, ЗАО “НПФ “Люминофор” производит и другие вариации порошков люминофоров на основе ZnS : с различными активаторами, а следовательно разными временными и частотными характеристиками и световыходом сцинтилляции; с разным размером гранул. Частично, исследования параметров таких люминофоров представлены в работе [7, 8].

В процессе изготовления дисперсных сцинтилляторов происходит смешивание двух компонентов оптически прозрачного силиконового компаунда, добавление необходимого количества дисперсной добавки – люминофора, перемешивание и дегазация смеси с последующей заливкой в подготовленную форму с высоким коэффициентом отражения (для повышения полного световыхода детектора). Таким образом, одним из ключевых преимуществ использования дисперсных сцинтилляторов на основе силикона является возможность придания им абсолютно любой желаемой формы в процессе изготовления в лаборатории, а также их высокая долговечность.

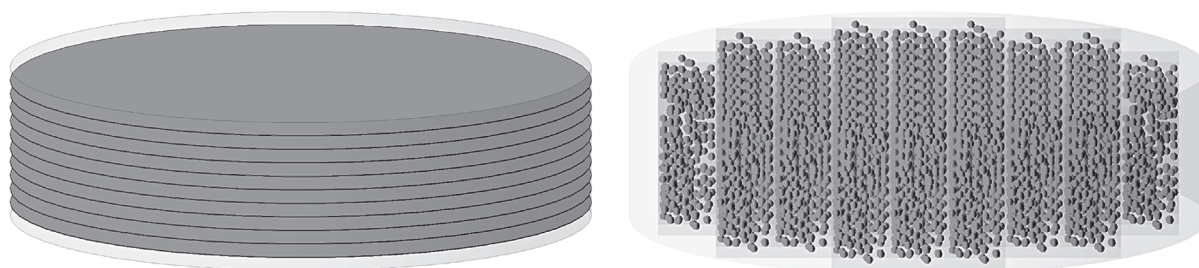


Рис. 2. Две модели сцинтиллятора в программном пакете Geant4. Слева — упрощенная модель со слоями люминофора, справа — реалистичная модель с гранулами люминофора.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

Для качественного изучения свойств дисперсного сцинтиллятора и исследования влияния толщины и пропорций между силиконовым компаундом и дисперсной добавкой на эффективность регистрации частиц разных типов были разработаны численные модели сцинтиллятора в программном пакете Geant4 (версия 11.1.2). В общем случае, в отличие от однородных, слабо поглощающих и слабо рассеивающих свет пластиковых сцинтилляторов, моделирование дисперсных сцинтилляторов, с множеством гранул и частей с различными показателями преломления и коэффициентами рассеяния, представляет собой нетривиальную задачу. Нами были рассмотрены как упрощенная модель с одним или несколькими слоями дисперсного компонента в силиконовой среде, так и более детальная “реалистичная” модель, практически полностью отражающая тонкую внутреннюю структуру сцинтиллятора с гранулами люминофора реальных размеров (от 8 до 22 мкм в зависимости от типа люминофора), погруженными в прозрачный силиконовый компаунд (рис. 2).

Упрощенная модель сцинтиллятора существенно убыстряет численные Монте—Карло расчеты детектора, однако ее корректность и применимость напрямую зависит от длины пробега частицы, отклик от которой мы пытаемся промоделировать. Так, например, атмосферные мюоны с энергией несколько гигаэлектронвольт пролетают силиконовый сцинтиллятор насквозь с потерей энергии на своем пути около 2 МэВ на г/см². Поэтому количество слоев и их толщина в упрощенной модели, если правильно учтена доля люминофора в дисперсном сцинтилляторе, не играет заметной роли. Для заряженных частиц с короткими длинами пробега в веществе, например для протонов отдачи в силиконе от быстрых нейтронов источника ²⁵²Cf или для ядра ⁷Li и α -частицы образующихся при захвате теплового нейтрона ядрами ¹⁰B (для сцинтиллятора ЛРБ-2), толщина слоев в упрощенной модели должна быть сопоставима с

размерами гранул поликристаллического порошка моделируемого люминофора.

Помимо энергосвечения в моделях дисперсных сцинтилляторов были применены методы расчета распространения фотонов. Использовались два основных подхода: модель с простым экспоненциальным затуханием света и модель с ламбертовским отражением света от каждой гранулы люминофора внутри сцинтиллятора. В простом экспоненциальном затухании весь сцинтиллятор рассматривается как однородная среда с реальным коэффициентом преломления силикона $n_{\text{Silicon}} = 1.41$, при этом расчетная длина затухания света в сцинтилляторе получается не физической, а некоторой эффективной, моделирующей радикальное уменьшение потока фотонов в результате их случайного блуждания, возникающего при взаимодействии с гранулами. Данная модель является наиболее быстрой для численного расчета. В модели с ламбертовским отражением света от поверхности каждой гранулы задаются реальные значения коэффициентов преломления силиконового компаунда и люминофора на основе ZnS ($n_{\text{ZnS}} = 2.36$). Данная модель лучше подходит для расчетов многократного рассеяния света на гранулах люминофора, однако значительно увеличивает расчетное время, поэтому применялась в редких случаях, когда расхождения с простой экспоненциальной моделью затухания света были существенные.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцы дисперсных силиконовых сцинтилляторов исследовались на стандартном лабораторном стенде (рис. 3). В светозащищенном боксе фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-200, усиление порядка 10^6 , квантовая эффективность $\sim 10\%$) располагается над исследуемым сцинтилляционным образцом. Для лучшего сбора света используется светособирающий конус с углом при основании 45° . Под сцинтилляционным образцом, для использования схемы совпадений при выделении сигналов от атмосферных мюонов, расположен

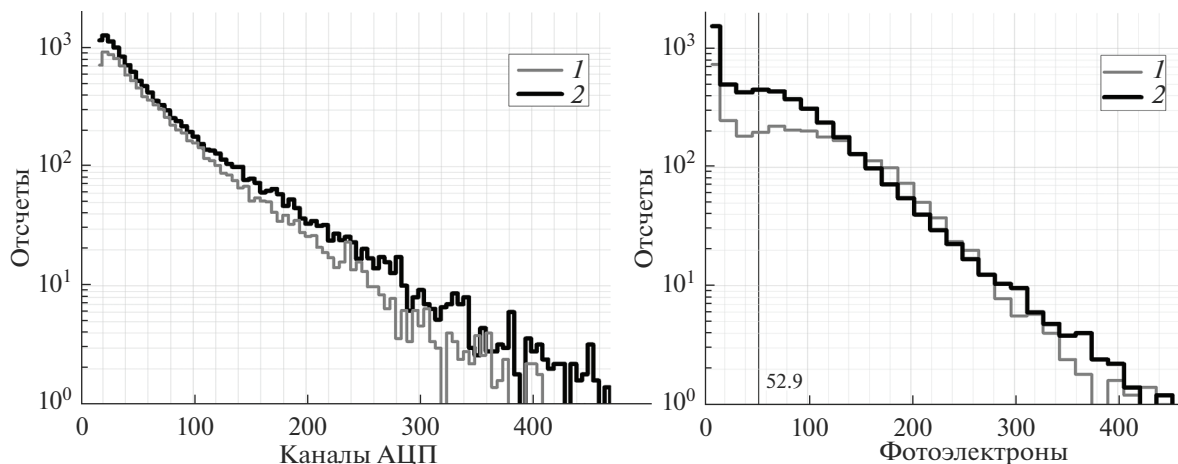


Рис. 4. Суточный амплитудный спектр от источника быстрых нейтронов ^{252}Cf для люминофора PC-450 толщиной 33 мг/см^2 (1) и 66 мг/см^2 (2) (слева) и результаты моделирования этого сцинтиллятора с использованием “реалистичной” модели гранул и экспоненциального затухания света (справа).

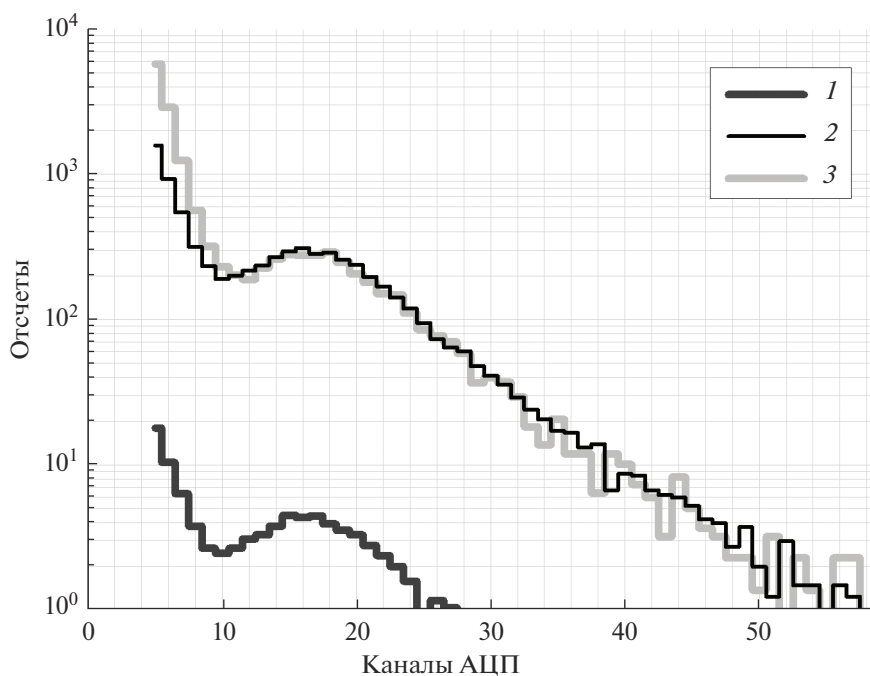


Рис. 5. Амплитудные спектры дисперсного силиконового сцинтиллятора с люминофором PC-424: 1 – в режиме совпадений с пластиковым сцинтиллятором, 2 – в режиме без совпадений, 3 – с добавлением источника γ -квантов ^{137}Cs .

что данный люминофор имеет несколько “быстрых” компонент, укладывающихся в интервал до 1 мкс и не имеет более длинных “медленных” временных компонент, и при этом обладает повышенным световыходом. Нами был изготовлен образец силиконового сцинтиллятора высотой 3 см и толщиной люминофора PC-424 равной 30 мг/см^2 , амплитудный спектр которого представлен на (рис. 5).

В режиме совпадений в лабораторном стенде с дополнительным пластиковым сцинтиллятором можно четко выделить сигналы от атмосферных мюонов (кривая 1) с ярко выраженной “пик – долиной”. При этом даже в режиме без совпадений (кривая 2) мюонный пик сохраняется и легко выделяется от шумовой (самой левой) части кривой. Мы предполагаем, что такое хорошее соотношение “пик – долина” для отклика сцинтиллятора на прохождение через него атмосферных мюонов

реализуется благодаря прямым (баллистическим) фотонам, достигающим фотодетектора минуя множественные отражения на гранулах люминофора вследствие его достаточно малой концентрации в данном образце. Кроме того, была проведена проверка чувствительности данного сцинтиллятора к γ -квантам добавлением источника ^{137}Cs (0.662 МэВ). Отчетливо видно повышение уровня кривой 3 в ее левой шумовой области, которое, однако, не затрагивает область мюонного пика. Таким образом, в дисперсном сцинтилляторе с люминофором РС-424 присутствует чувствительность и к γ -квантам, обусловленная комптоновским рассеянием (сечение которого пропорционально заряду ядра) на ядрах Zn, Si и S с достаточно высокими атомными номерами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были представлены дисперсные сцинтилляторы на основе силиконового компаунда и отечественных люминофоров с сульфидом цинка, пригодные для изготовления детекторов различных типов частиц, с требуемыми размерами и геометрической формой под нужды конкретного эксперимента. Разработаны программные модели дисперсного сцинтиллятора в пакете Geant4, с учетом трекинга фотонов, для качественной оценки его свойств и эффективности регистрации. Сцинтиллятор на основе люминофора РС-450 толщиной 66 мг/см² показал эффективность регистрации потока быстрых нейтронов от источника ^{252}Cf на уровне 1%. Была показана возможность выделе-

ния мюонного пика даже в режиме без совпадений дисперсным силиконовым сцинтиллятором с люминофором РС-424 толщиной 30 мг/см², а также возможность регистрации γ -квантов с энергией, соответствующей уровню естественного радиоактивного фона.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 24-22-00339.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Vershinina S.P., Volosyuk G.P., Tsirlin Yu.A. and Strzheimchny M.A.* // Sov. At. Energy. 1969. V. 26. P. 386–390.
2. *Kuzmin E.S., Zimin I.Y.* // Instrum. Exp. Tech. 2021. V. 64 (5). P. 657–662.
3. *Stenkin Yu.V.* Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications. *Sidorov M., Ivanov O.* (Eds.). 2010. Hauppauge: Nova Sci. Publish. 2010. Ch. 10. P. 253.
4. *Amelchakov M.B. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2025. V. 1076. P. 170547.
5. *Carel W.E. van Eijk* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 2001. V. 460 (1). P. 1–14.
6. *Yamamoto S., Tomita H.* // Appl. Radiat. Isot. 2021. V. 168. P. 109527.
7. *Kuleshov D.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2025. V. 89 (6). P. 1030.
8. *Arsaev M.I., Kladov A.V.* // Instrum. Exp. Tech. 2009. V. 53 (2). P. 183–186.

Development of Silicone Rubber Based Scintillators for Different Particles Recording

D. A. Kuleshov^{1, *}, K. O. Kurinov¹, I. O. Maliy^{1, 2}, and Yu. V. Stenkin^{1, 2}

¹*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow oblast, 141701 Russia*

*e-mail: den_kuleshov481@mail.ru

Received July 21, 2025; revised July 21, 2025; accepted August 4, 2025

Abstract—We develop specialized scintillators based on domestically produced phosphors immersed in an optically transparent silicone compound. Dispersed scintillators of this class can be optimized for recording different types of particles. Methods of Monte Carlo simulation of dispersed silicone scintillators are presented, along with their experimentally measured response to atmospheric muons, fast neutrons, and gamma rays.

Keywords: scintillator, silicone, zinc sulfide, neutron, muon, phosphor, detector simulation