

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЖИДКОГО ОРГАНИЧЕСКОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ПЕРОВСКИТА НЕОДИМА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕЗНЕЙТРИННОГО ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА ^{150}Nd

Пшуков А.М., Кокоева А.А.*, Блиева О.З., Башиева Ф.А., Ефимкин А.П.

*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
Центр новых детекторных технологии регистрации нейтрино*

***al-aneta@mail.ru**

В работе рассматривается возможность создания и применения жидкого сцинтиллятора, легированного квантовыми точками перовскита содержащих неодим в эксперименте по поиску безнейтринного двойного бета распада. Редкоземельный Nd^{3+} ионы легировали в перовскитные квантовые точки CsPbBr_3 методом обработки в растворе при комнатной температуре. Измерены их спектры люминесценции.

Ключевые слова: сцинтилляторы, неодим, процессы сцинтилляции и светоизлучения, жидкие сцинтилляторы, детекторы нейтрино, двойной бета-распад, наночастицы перовскита.

ON THE POSSIBILITY OF CREATING A LIQUID ORGANIC SCINTILLATION DETECTOR USING QUANTUM DOTS OF NEODYMIUM PEROVSKITE TO DETECT NEUTRINOLESS BINARY BETA DECAY ^{150}Nd

Pshukov A.M., Kokoeva A.A., Blieva O.Z., Bashieva F.A., Efimkin A.P.

*Kabardino-Balkarian State University
Center for New Detector Technologies for Neutrino Registration*

The paper considers the possibility of creating and using a liquid scintillator doped with quantum dots of perovskite containing neodymium in an experiment to search for neutrinoless double beta decay. Rare-earth Nd^{3+} ions were doped into CsPbBr_3 perovskite quantum dots by treatment in solution at room temperature. Their luminescence spectra were measured.

Keywords: scintillators, neodymium, scintillation and light emission processes, liquid scintillators, neutrino detectors, double beta decay, perovskite nanoparticles.

Введение

Жидкие сцинтилляторы нашли широкое применение во многих открытиях физики нейтрино. Эта задача связана с определением природы массы нейтрино и возможным нарушением закона сохранения лептонного числа. Решение этих задач имеет фундаментальное значение для физики частиц и космологии. Поиску $0\nu 2\beta$ в настоящее время посвящены около десятка действующих или находящихся в стадии запуска крупномасштабных экспериментов, использующих различные изотопы, испытывающие двойной бета-распад. До настоящего времени $0\nu 2\beta$ не обнаружен и для его периода полураспада ($T_{1/2}$) получены только верхние пределы.

Наибольшие ограничения на значения $T_{1/2}$ на уровне 10^{26} лет получены в экспериментах GERDA (^{76}Ge) и KamLAND-Zen collaboration (^{136}Xe), KamLAND, Borexino, Daya Bay, RENO, Double Chooz и PROSPECT [1–8].

Будущие поколения нейтринных экспериментов с жидкими сцинтилляторами потребуют стабильной загрузки тонн изотопов-кандидатов в детекторы килотонного масштаба при одновременном контроле оптических свойств сцинтиллятора. Уникальные структурные свойства наночастиц позволяют использовать их в качестве хорошо настраиваемых преобразователей длины волны, которые можно использовать для улучшения обнаружения двойного бета-распада и распознавания фона. Кроме того, эти наночастицы могут быть изготовлены из изотопов двойного бета-распада, что предлагает многообещающий метод загрузки изотопов.

Нанокристаллы перовскита особенно привлекательны, благодаря надежности их кристаллической структуры и легко масштабируемому синтезу. Эта технология хорошо подходит для физики нейтрино, поскольку она обеспечивает экономически эффективное масштабирование до масс в масштабе килотонн, обеспечивая при этом прямое подавление фона посредством очистки, анализа пространственных и временных совпадений, самоэкранирования и распознавания формы импульса. В то время как достижения текущих экспериментов с жидкими сцинтилляторами впечатляют, следующее поколение измерений имеет еще более строгие требования к фону и требует более высоких концентраций примесей с более разнообразным набором изотопов.

Появился новый тип квантовых точек со структурой перовскита, отличающийся высокой люминесценцией и простотой синтеза – коллоидные квантовые точки. Они **являются отличной заменой традиционных органических и неорганических люминофоров**, превосходя их по яркости флуоресценции, фотостабильности и другими уникальными свойствами. Кроме того, эти наночастицы могут быть изготовлены из изотопов двойного бета-распада, что предлагает многообещающий метод загрузки изотопов. Нанокристаллы перовскита привлекательны из-за надежности их кристаллической структуры и легкости масштабирования процесса синтеза. Использование перовскитных нанокристаллов в качестве преобразователей длины волны представляет собой перспективное направление в физике нейтрино, которое может привести к созданию более эффективных детекторов нейтрино и улучшению нашего понимания природы массы нейтрино и законов сохранения лептонного числа. Уникальные структурные свойства наночастиц перовскита позволяют использовать их в качестве легко настраиваемых преобразователей длины волны, которые можно использовать для улучшения обнаружения двойного бета-распада и распознавания фона. Кроме того, эти наночастицы могут быть изготовлены из изотопов двойного бета-распада, что предлагает многообещающий метод загрузки изотопов.

В статье мы представляем первое исследование нанокристаллов перовскита на основе синтита в эксперименте с жидким сцинтиллятором, демонстрируя свойства нанокристаллов как преобразователи длины волны. Мы предлагаем новый подход к созданию сцинтилляционных детекторов, с использованием возможности использования квантовых точек перовскита неодима, как эффективного сцинтилляционного материала.

Экспериментальная часть

Простой и надежный синтез нанокристаллов перовскита позволяет для масштабирования до количеств, необходимых для детектора нейтрино. Разработка нано кристаллов перовскита до сих пор приводила к получению нанокристаллов с более длинной длиной волны излучения, которые в меньшей степени подходили для применения в детекторах. Тем не менее подробный анализ этих длинноволновых нано кристаллов перовскита по-прежнему будет мотивировать и информировать будущие исследования и разработки кристаллов, излучающих на более коротких волнах.

Известен ряд работ зарубежных авторов, которые занимались получением нанокристаллов перовскита с целью применения в нейтринных экспериментах [9–11].

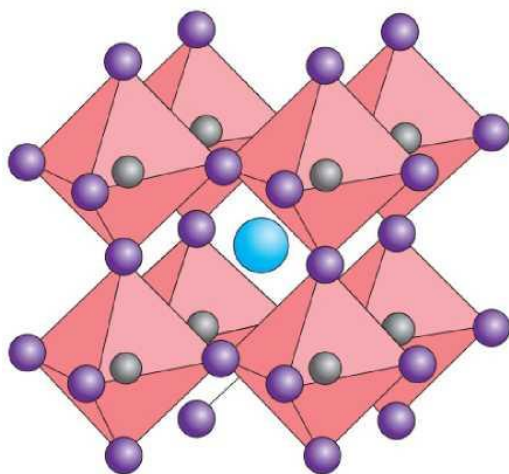
В данной работе мы синтезировали полностью неорганические КТ $\text{CsPbBr}_3(\text{Cs}(\text{Nd } 5\%)\text{PbX}^3)$ и $\text{Cs}(\text{Nd } 15\%)\text{PbX}^3$, где $X = \text{Cl}, \text{Br}$), легированные редкоземельными ионами Nd^{3+} методом упрощенного растворения при комнатной температуре, примененный в приведенной выше работе [9].

Редкоземельный Nd^{3+} ионы легировали в перовскитные квантовые точки (КТ) CsPbBr_3 методом обработки в растворе при комнатной температуре. Контролируя различные коэффициенты легирования, были получены полностью неорганические КТ перовскита со смешанными катионами.

В нашей работе, расширяя область применения, будем исследовать свойства нанокристаллов применительно к детекторам. Следуя работе [9], мы проверили спектры поглощения и излучения наших сцинтилляционных смесей, чтобы продемонстрировать успешный синтез.

Обсуждение результатов

В качестве перспективного материала применялся новый тип квантовых точек со структурой перовскита, отличающийся высокой люминесценцией и простотой синтеза. Объемная кристаллическая структура перовскита имеет формулу ABX_3 , где А представляет собой одновалентный органический или неорганический катион, В представляет собой двухвалентный катион металла, а X представляет собой галогенид-анион. Добавление лигандов (L) в синтез предотвращает образование объемного перовскита, оставляя нанопластинки с толщиной, зависящей от начального соотношения $LX: BX_2: AX$. Изменение компонентов А, В или X этого кристалла на более мелкие или более крупные атомы сдвигает длину волны излучения в сторону более коротких или более длинных длин волн.



A = Cs, FA, MA.
B = Pb, Sn.
X = Cl, Br, I.
L: = BA, OA.

Рис. 1. Модель кристаллической структуры перовскита: А: цезий = Cs, формаидиний = FA, метиламмоний = MA; В: свинец = Pb, олово = Sn; X: хлорид = Cl, бромид = Br, йодид = I; L: бутиламмоний = BA, октиламмоний = OA

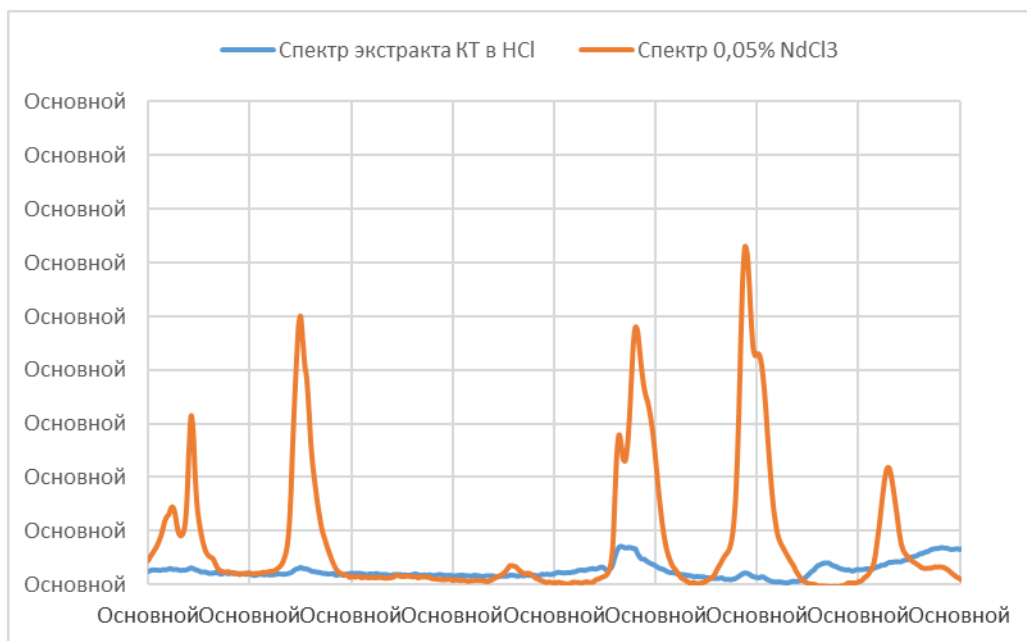


Рис. 2. Спектры поглощения коллоидных квантовых точек

Для получения максимальной загрузки нанокристаллов перовскита была опробована методика, разработанная зарубежными авторами, с добавкой неодима около 5 %. В результате были получены с максимумом излучения 490 нм, который после очистки составил 475 нм.

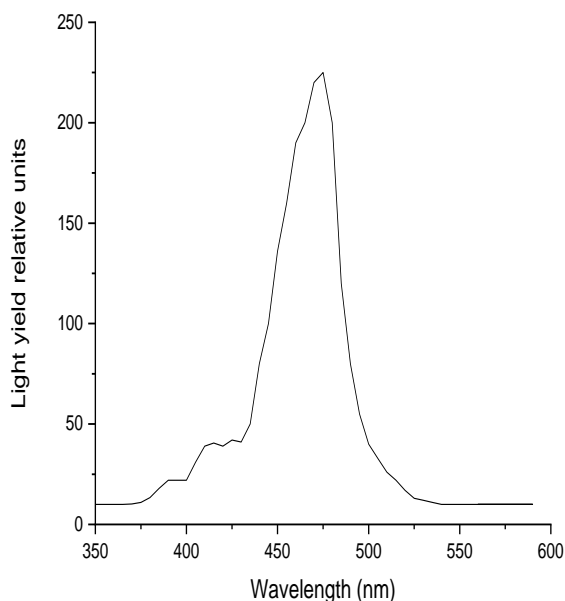


Рис. 3. Спектры излучения коллоидных КТ после очистки

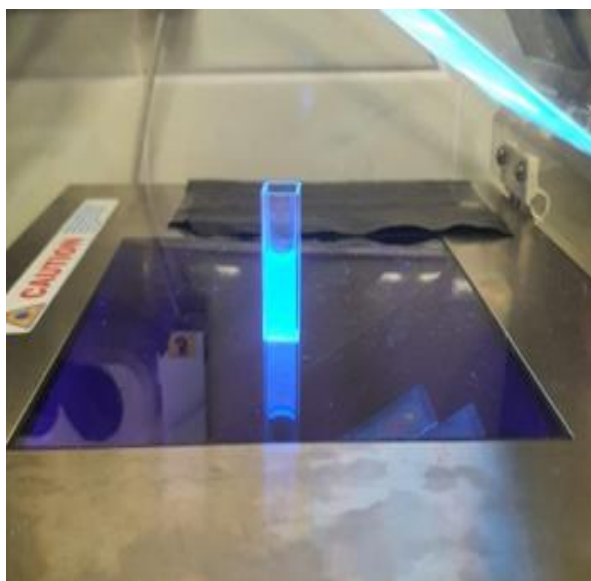


Рис. 4. Свечение раствора коллоидных КТ под действием УФ-облучения

Исследование свойств нанокристаллов перовскита в детекторах частиц может привести к разработке более эффективных детекторов нейтрино. Синтез нанокристаллов перовскита проще, чем синтез квантовых точек ядро-оболочка, нанокристаллы перовскита обладают меньшим количеством структурных дефектов, что дает более достоверные спектры. Нанокристаллы перовскита также могут быть легко масштабируемы для синтеза в больших количествах, что позволяет использовать их в крупномасштабных экспериментах по физике нейтрино.

В целом, использование нанокристаллов перовскита в качестве преобразователей длины волны для улучшения обнаружения двойного бета-распада и распознавания фона представляет собой многообещающее направление в физике нейтрино. Разработка нанокристаллов перовскита может привести к созданию более эффективных детекторов нейтрино и улучшению наших знаний о природе массы нейтрино и законах сохранения лептонного числа.

Заключение

Продолжается работа по поиску новых комплексных соединений с неодимом для использования в жидком сцинтилляторе. Проведен поиск литературы по применению коллоидных квантовых точек, для разработки технологии изготовления гибридных сцинтилляторов с растворенным в нем неодимом природного состава. Из работ зарубежных ученых следует, что нанокристаллы особенно привлекательны по причине надежности их кристаллической структуры и легко масштабируемого синтеза. Кроме того, они обладают свойствами легко настраиваемых преобразователей длин волн и лучшими оптическими характеристиками смеси сцинтилляторов при увеличении массовой нагрузки квантовых точек. Проводится работа по освоению технологии изготовления коллоидных КТ с включением в них неодима.

Нами предложен новый подход к созданию сцинтилляционных детекторов для обнаружения безнейтринного двойного бета распада Nd-150 с использованием квантовых точек перовскита неодима. Ожидается, что такие детекторы будут обладать высокой эффективностью и разрешающей способностью, а также устойчивостью к радиационному повреждению. Этот подход может быть полезным для проведения экспериментальных исследований в области физики частиц и атомной энергетики. Дальнейшее исследование и разработка этой технологии могут привести к новым достижениям в области фундаментальной науки и технологии.

Библиография

1. Cowan C.L., Reines F., Harrison F.B., Kruse H.W., McGuire A.D. Detection of the free neutrino: A Confirmation // *Science*. 1956. N 124. P. 103–104.
2. Suzuki A., Collaboration K. Results from KamLAND Reactor Neutrino Detection // *Physica Scripta*. 2005. V. 121, N 33. P. 374–387.
3. Alimonti G. Arpesella C., Back H., Balata M. The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2009. V. 600, N 3. P. 568–593.
4. Abe Y., Aberle C., Akiri T., Anjos J.C., Ardellier F. Indication of Reactor electron antineutrinos Disappearance in the Double Chooz Experiment // *Physical Review Letters*. 2012. V. 108, N 13. P. 273–282.
5. An F.P., Bai J.Z., Balantekin A.B., Band H.R., Beavis D., Beriguete W., Bishai M., Blyth S., Boddy K., Brown R.L. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108, N 7. P. 108.
6. Ahn J.K., Chebotaryov S. Observation of Reactor Electron Antineutrinos Disappearance in the RENO Experiment // *Physical Review Letters*. 2012. V. 108, N 19. P. 191802.
7. An F., An G., An Q., Baussan E., Bellato M. Neutrino Physics with JUNO // *Physics*. 2016. V. 192, N 1. P. 224.
8. Aberle C., Elagin A., Frisch H.J., Wetsteinb M., Winslowa L. Measuring directionality in double-beta decay and neutrino interactions with kiloton-scale scintillation detectors // *Journal of Instrumentation*. 2014. V. 9, N 6. P. 06012.
9. Weijia Duan, Lei Hu, Weiren Zhao, and Xiaoli Zhang. Rare-earth ion-doped perovskite quantum dots: synthesis and optoelectronic properties // *China J. Mater. Sci.: Mater. Electron*. 2022. N. 33. P. 19019–19025.
10. Weidman M.C., Seitz M., Stranks S.D., Tisdale W.A. Highly Tunable Colloidal Perovskite Nanoplatelets through Variable Cation, Metal, and Halide Composition // *ACS Nano*. 2016. N 10. P. 7830–7839.
11. Lindley Winslow, Raspberry Simpson Characterizing Quantum-Dot-Doped Liquid Scintillator for Applications to Neutrino Detectors // *JINST (расшифровать)*. 2012. V. 7. P. 07010.