

09

Разработка высокоразрешающих фотоматериалов НИЦ „Курчатовский институт“ для ядерных исследований

© Р.В. Рябова,¹ А.А. Балыш,¹ А.Н. Пономарев,¹ Е.П. Сенченков²

¹ Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия
e-mail: danviking@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 17 мая 2021 г.

Принято к публикации 18 мая 2021 г.

В ходе программы разработки фотографических материалов высокого разрешения для исследований по физике нейтрино показана возможность получения ядерной эмульсии с разрешающей способностью, превосходящей известные материалы в 5 раз. Чувствительность в таких материалах сохраняется на высоком уровне, достаточном для регистрации ядерного излучения. При увеличении концентрации галоидного серебра до 80 wt.% ядерные фотоматериалы можно будет использовать для решения многих физических задач.

Ключевые слова: фотографические материалы, разрешающая способность, ядерная фотоэмульсия, физика нейтрино, галоидное серебро.

DOI: 10.21883/JTF.2021.11.51538.100-21

Введение

Природа нейтрино — фундаментальная проблема физики слабых взаимодействий. Являются ли нейтрино собственными античастицами, нарушая при этом законы лептонного заряда, подчиняясь так называемому майорановскому описанию, почему массы нейтрино столь малы по сравнению с массами других лептонов и каковы их абсолютные значения, как реально выглядит иерархия масс — вот неполный список проблем, которые пытаются решить физики.

Поиск безнейтринной моды двойного бета-распада — единственный на сегодняшний день эксперимент, способный дать ответы на многие из этих вопросов, осуществляется во многих лабораториях мира. Обнаружение такого распада представило бы важную информацию для развития теории фундаментальных частиц и построения астрофизических и космологических моделей. Все многообразие экспериментов по двойному бета-распаду можно условно поделить на 2 типа — калориметрические и трековые (в последнее время в трековом подходе используется сочетание обоих методов). Простой подход основан на прецизионном измерении суммарной энергии двух электронов, более сложный заключается в изучении треков электронов. В последнем случае эксперимент дает существенно большее количество информации о распаде — величину энергии каждого электрона, (вылет электронов из одной точки), информацию о заряде частицы и величине пробега. Настоящая разработка ядерной эмульсии направлена на изучение процессов двойного бета-распада, т.е. распада ядра, размер кото-

рого составляет $\sim 10^{-12} - 10^{-13}$ см, с вылетом из него электронов. Так как размер зерна эмульсии значительно больше размера ядра, то на практике вылет электронов соответствует вылету из одной точки. Все это дает возможность с гораздо большей достоверностью идентифицировать происходящее событие как двойной бета-распад на фоне большого количества имитирующих процессов. Как правило, калориметрический метод применяется в тех случаях, когда материал источника двойного бета-распада одновременно является материалом детектора (германиевые детекторы, различные сцинтилляторы, ксенонные камеры). Однако ряд изотопов, весьма перспективных для исследования двойного бета-распада, достаточно сложно (или практически невозможно) использовать в качестве детекторов. В этом случае альтернативы трековому методу нет. Подробное описание современного состояния экспериментов по поиску безнейтринного двойного бета-распада можно найти в многочисленных обзорах (см., например, [1,2])

Ядерные эмульсии были одним из первых детекторов, использовавшихся для поиска двойного бета-распада [3]. Однако из-за низкой скорости анализа изображений — основного недостатка эмульсионных детекторов — со временем их начали вытеснять методики на основе время-проекционных камер [4–6], с помощью которых впервые были получены периоды полураспада двухнейтринной моды двойного бета-распада ряда изотопов.

Тем не менее развитие и автоматизация методов обработки полученных изображений позволяет в настоящее время вернуться к использованию ядерных эмульсий для изучения двойного бета-распада. Известно, что ядерные

эмульсии обладают прекрасным угловым разрешением. Это их качество может быть использовано для отличия безнейтринного двойного бета-распада, при котором в конечном состоянии появляются два электрона, от двухнейтринного распада (появляются два электрона и два нейтрино). Ключом к решению этой проблемы энергетического разрешения является уменьшение размеров зерен галоидного серебра [7,8]. Подобная проблема исследуется, например, в работе по поиску темной материи в университете Нагоя, Япония. [9,10]. Правда, там речь идет о регистрации короткопробежных частиц. Настоящая работа посвящена возможности создания эмульсии с малым размером зерна при сохранении их способности к регистрации ядерного излучения.

1. Методика эксперимента

Требования к ядерным фотоэмульсиям для изучения двойного бета-распада значительно выше, чем для эмульсий, предназначенных для изучения темной материи. Кроме повышенных требований к разрешающей способности фотоэмульсий и высокой чувствительности к регистрации ядерного излучения, предъявляются высокие требования к степени монодисперстности фотоэмульсий. Задачей настоящей работы является разработка и создание фотографического материала на основе солей галоидного серебра для ядерных исследований с разрешающей способностью (R), превышающей R известных ядерных фотоматериалов в 5–6 раз и достаточной чувствительностью для регистрации ядерных излучений. Необходимо получить фотоэмульсию с размерами микрокристаллов $0.05 \mu\text{m}$, с высокой концентрацией галоидного серебра в слое до 80 wt.% и достаточной чувствительностью к ядерному излучению. Работа была разделена на 2 этапа.

1. Получение высокоразрешающей фотоэмульсии с размером микрокристаллов $0.05 \mu\text{m}$ и чувствительной к ядерному излучению.

2. Концентрирование фотоэмульсии с целью получения в дальнейшем фотослоев с содержанием галоидного серебра не менее 80 wt.%.

В настоящей статье представлены экспериментальные результаты первого этапа работы.

Почему выбран размер микрокристаллов $0.05 \mu\text{m}$, а не меньше? Согласно теории Герни и Мотта [11], процесс образования скрытого фотографического изображения состоит из двух стадий: электронной и ионной. Существенным фактором для образования скрытого изображения является наличие в кристаллах межзельных ионов серебра. По данным работы [12], а так же экспериментальным данным работ [13,14] количество межзельных ионов серебра при комнатной температуре в 1cm^3 бромистого серебра равно $\sim 8 \cdot 10^{14}$ ионов. В работе [15] представлены расчетные данные о концентрации межзельных ионов серебра в кристаллах галоидного

серебра с диаметрами 0.02 и $0.03 \mu\text{m}$: количество межзельных ионов серебра чрезвычайно мало и составляет ~ 0.6 и ~ 2 ионов серебра на микрокристалл даже с учетом приповерхностной зоны, в которой межзельных ионов серебра больше, чем во всем объеме кристалла. Этим обстоятельством объясняется, в первую очередь, низкая чувствительность кристаллов таких размеров и даже химическая сенсibilизация, которой подвергается фотоэмульсия, не сможет увеличить чувствительность столь мелкозернистых эмульсий из-за малой поверхности зерен.

Что касается размеров кристаллов в $0.05 \mu\text{m}$, то расчеты показывают, что количество межзельных ионов серебра по сравнению с кристаллами в 0.02 и $0.03 \mu\text{m}$ увеличивается более чем в 2–3 раза и составляет ~ 5 ионов в кристалле.

В качестве материалов для сравнения использовались ядерные фотопластинки Переславского химического завода и японские ядерные фотопластинки.

За основу технологического процесса получения ядерных фотоэмульсий с высоко разрешающей способностью был взят технологический регламент получения высокоразрешающих фотоматериалов для голографии во встречных пучках с необходимыми изменениями процессов синтеза и очувствления фотоэмульсий [15]. Этот технологический регламент не обеспечивал необходимую концентрацию галоидного серебра в разрабатываемых фотоматериалах (до 80 wt.%). Можно говорить лишь о получении кристаллов определенных размеров и их чувствительности. Полученные фотоматериалы облучали источником Wi_{207} .

2. Обсуждение результатов

Размеры и форма микрокристаллов были исследованы в лаборатории электронной микроскопии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Проведено сравнительное исследование разрабатываемых фотоматериалов НИЦ „Курчатовский Институт“ с известными фотоматериалами Переславского химического завода и японскими ядерными материалами. Получены обнадеживающие результаты по размерам микрокристаллов и их чувствительности.

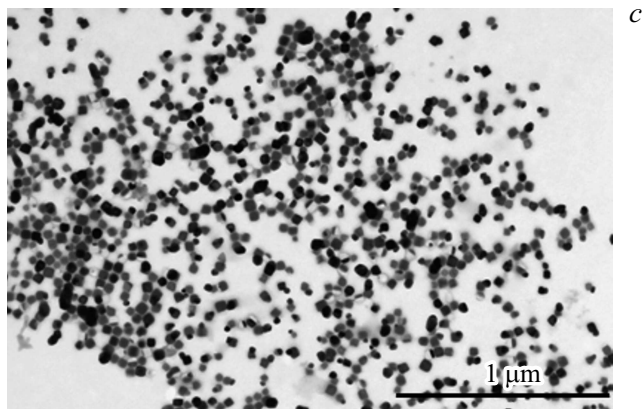
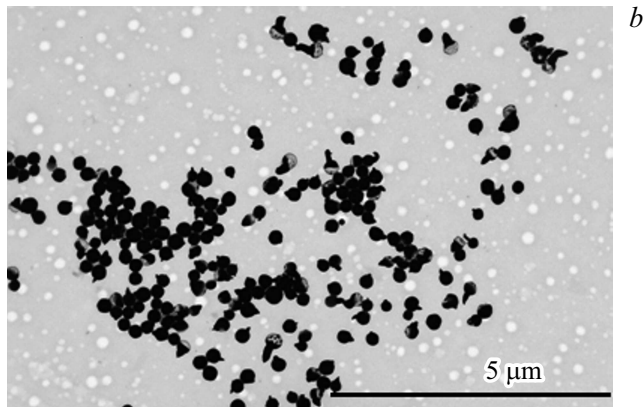
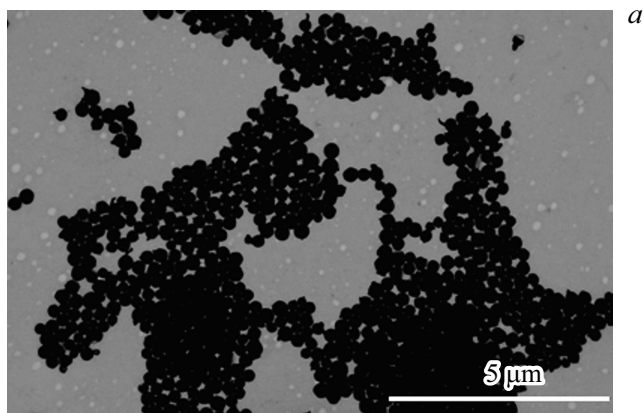
На рисунке показаны фотографии зерен: Переславской ядерной эмульсии (а), Японской ядерной эмульсии (б), фотоэмульсии НИЦ „Курчатовский Институт“ (с).

Из рисунков следует, что размеры микрокристаллов фотоэмульсий Переславского завода и японской очень близки и составляют в диаметре ~ 0.3 – $0.4 \mu\text{m}$. Размеры кристаллов НИЦ „КИ“ составляют $\sim 0.05 \mu\text{m}$.

Концентрация галоидного серебра составляет $\sim 80 \text{wt.}\%$ в эмульсиях Переславских и японских, в эмульсии НИЦ „КИ“ пока только $\sim 20 \text{wt.}\%$ и в дальнейшем предстоит работа по увеличению галоидного серебра в этой эмульсии.

Оптические плотности и время экспонирования фотопластинки Переславских, японских и НИЦ „КИ“, облученных W_{1207} и проявленных в проявителе Д-19

Наименование фотопластинок	Время экспонирования, h	Оптическая плотность изображения
Переславские ядерные фотопластинки	2	~ 0.30
	48	> 3
Японские ядерные фотопластинки	2	~ 0.30
	48	> 3
Фотопластинки НИЦ „КИ“	48	~ 0.3



Фотографии микрокристаллов ядерных фотоэмульсий переславской (a), японской (b) и НИЦ „Курчатовский институт“ (c), выполненных на микроскопе МГУ им. Ломоносова.

В таблице представлены значения оптических плотностей и времени экспонирования фотопластинок, облученных W_{1207} и проявленных в проявителе Д-19.

Малая плотность на пластинках НИЦ „КИ“, как указывалось выше, объясняется, в первую очередь, недостаточным содержанием галоидного серебра в фотопластинках.

Заключение

Подводя итоги проделанной работы, можно говорить о возможности получения ядерных фотоэмульсий с размерами микрокристаллов $\sim 0.05 \mu\text{m}$, чувствительных к ядерному излучению, что, безусловно, увеличит разрешающую способность фотоматериалов и позволит применить их для изучения двойного бета-распада, темной материи и других целей.

Работа по увеличению концентрации галоидного серебра в фотоматериалах НИЦ „КИ“ будет продолжена и описана в следующих публикациях.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] I. Ostrovskiy, K. O'Sullivan. *Mod. Phys. Lett. A*, **31**, 1630017 (2016).
- [2] J.D. Vergados, H. Ejiri, F. Simkovic. *Int. J. Mod. Phys. E*, **25**, 163007 (2016).
- [3] J.H. Fremlin, M. Walters. *Pros. Phys. Soc. A*, **65**, 911 (1952).
- [4] S.R. Elliot, A.A. Hahn, M.K. Moe. *Phys. Rev. Lett.*, **59**, 1987 (2020).
- [5] A. Balysh, A. De Silva, V.I. Lebedev, K. Lou, M.K. Moe, M.A. Nelson, A. Piepke, A. Pronskiy, M.A. Vient, P. Vogel. *Phys. Rev. Lett.*, **77**, 5186 (1996).
- [6] A.De. Silva, M.K. Moe, M.A. Nelson, M.A. Vient. *Phys. Rev. C*, **56**, 2451 (1997).
- [7] T. Asada. *Directional Dark Matter Search With Ultra Fine Grain Nuclear Emulsion, Nagoya University*. Workshop on Nuclear Track Emulsion and its Future 14–18 October 2013 Predeal, Romania.
- [8] T. Naka, T. Asada, T. Katsuragawa et al. *Nucl. Instr. Met. In Phys. Res. A*, **718**, 519 (2013).
- [9] T. Asada, T. Naka, Ken-ichi Kuwabara, Ma. Yoshimoto. *Prog. Theor. Exp. Phys.*, (2017).
- [10] A. Alexandrov, A.M. Anokhina, T. Asada, D. Bender, all 59 authors. *Nuclear Emulsions for WIMP Search, Letter of Intent* (News Collaboration, 2018) https://www.researchgate.net/publication/301877123_NEWS_Nuclear_Emulsions_for_WIMP_Search 2018
- [11] R.W. Gerney, N.F. Mott. *The Theory of the Photolysis of Silver Bromide and the Photogr. Latent Image*, **164** S.A.P., 151 (1983).
- [12] P. Muller. *Phys. Stat. Sol.*, **12** (2), 775 (1965).
- [13] E. Moiser, E. Klein. *Ber. Bunsenges Phys. Chem.*, **67** (5), 949 (1963).
- [14] K. Kliever. *Phys. Chem. Sol.*, **27** (2), 705 (1966).
- [15] Р.В. Рябова, Н.Д. Ворзобова, С.Е. Курилова, В.И. Попенко. *Химия высоких энергий*, **39** (4), 293 (2005).