

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПОИСКУ ДВОЙНОГО БЕЗНЕЙТРИННОГО БЕТА-РАСПАДА

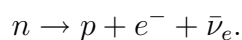
В. Д. Ашитков¹, А. С. Барабаш¹, В. Я. Браднова², Л. А. Гончарова³,
О. И. Орурк⁴, Е. А. Пожарова¹, Н. Г. Полухина³, В. А. Смирнитский¹,
Н. И. Старков³, Тан Найнг Со³, В. И. Юматов¹

В работе представлены последние результаты подготовки эксперимента по поиску двойного безнейтринного распада с использованием эмульсионных камер с молибденовым наполнением. Приведены результаты тестирования эмульсий, приготовленных на ОАО "Компания Славич". Описаны алгоритмы распознавания треков электронов на прямолинейных и криволинейных участках.

Ключевые слова: нейтрино, двойной бета-распад, эмульсионные камеры, распознавание образа.

В течение последних 3-х лет в ФИАН'е ведётся работа по подготовке эксперимента по поиску двойного безнейтринного бета-распада [1, 2].

Всем хорошо известен обычный бета-распад, когда нейтрон в свободном состоянии или в составе некоторых ядер распадается на протон, электрон и антинейтрино:



Намного более редки события двойного бета-распада ($\beta\beta 2\nu$), когда два нейтрона в ядре одновременно испускают электрон и антинейтрино.

Эти две реакции вписываются в стандартную модель электрослабого взаимодействия и хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально. Однако ведётся

¹ ИТЭФ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и экспериментальной физики.

² ОИЯИ – Объединенный институт ядерных исследований.

³ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: starkov@sci.lebedev.ru.

⁴ ООО "НИИ шинной промышленности".

поиск другого гипотетического типа реакции: безнейтринного двойного бета-распада ($\beta\beta\nu$). В результате такого распада два нейтрона ядра испускают по электрону и антинейтрино, но два антинейтрино внутри ядра аннигилируют друг с другом, если они имеют противоположно направленные спины, и таким образом наружу “вылетают” только два электрона (рис. 1).

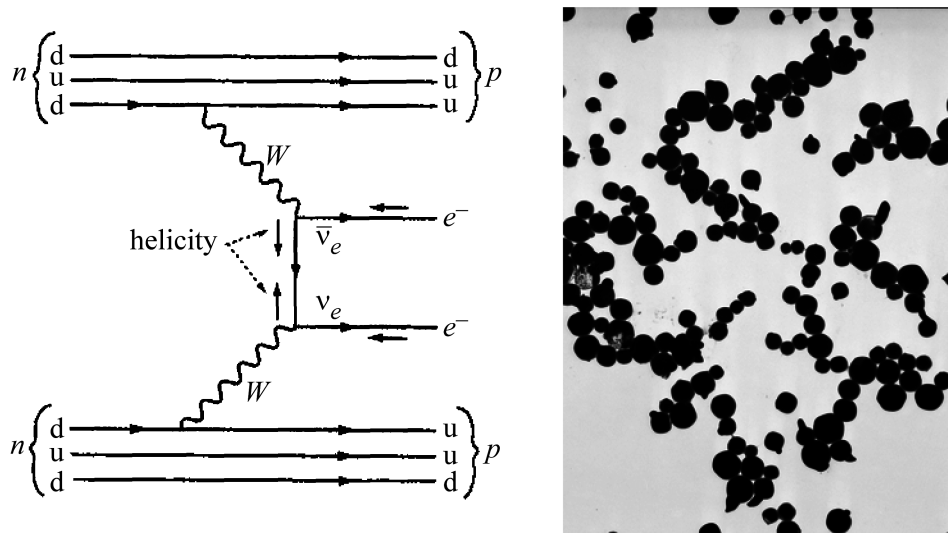


Рис. 1: Диаграмма процесса двойного бета-распада.

Рис. 2: Микрофотографии микрокристаллов эмульсии партии 14С.

Такой процесс выходит за рамки стандартной модели, т.к. он не сохраняет лептонное число, и, самое главное, в этой модели нейтрино и антинейтрино оказываются одной и той же частицей. Нейтрино с такими свойствами должно быть, в таком случае, античастицей самой себе и являться майорановскими, в противоположность обычным, предложенным Дираком.

Выяснение вопроса о природе нейтрино имеет не только теоретический интерес, но важно также с точки зрения следствий для различных физических задач, в первую очередь в астрофизике.

Т.о. вопрос о природе нейтрино имеет фундаментальный характер. Это, естественно, привлекает внимание экспериментаторов. Упомянем здесь только два таких эксперимента, поскольку их результаты в настоящее время создали довольно интригующую ситуацию.

Первый из них – это работа коллаборации Гейдельберг-Москва, в которой изучается двойной бета-распад ядра ${}^{76}_{32}\text{Ge} \rightarrow {}^{76}_{34}\text{Se} + 2e^-$. Энергия электронов безнейтринно-

го распада этого ядра составляет около 2 МэВ, теоретическое время жизни порядка $T \sim 10^{25}$ лет. Для обычного двойного бета-распада $T = 10^{18}$ лет. В 2010 году эта коллаборация сообщила о наблюдении событий безнейтринного распада с оценкой времени жизни $T = (2.2 \pm 0.3) \cdot 10^{25}$ лет [3]. По этой причине с большим интересом ожидалось результаты более позднего эксперимента GERDA, который исследует то же ядро. Авторы этого эксперимента летом 2013 сообщили свои первые результаты, которые не подтвердили ранее полученный результат. По их данным $T > 2.1 \cdot 10^{25}$ лет [4]. В настоящее время GERDA совершенствует свою установку, планируя довести чувствительность до уровня $2 \cdot 10^{25}$ лет через два года.

Т.о. к сегодняшнему дню сложилась довольно неопределённая и противоречивая ситуация, которая требует своего разрешения.

Группа ПАВИКОМ (ФИАН) в сотрудничестве с ИТЭФ уже несколько лет также готовит эксперимент по поиску $\beta\beta 0\nu$ распада. В качестве источника предполагается использовать $^{100}_{42}\text{Mo}$, а в качестве детектора ядерную фотоэмульсию. Предложена оригинальная идея поместить источник внутри объёма детектора. Для этого мелкодисперсный порошок Мо смешивается с эмульсионным гелем и эту смесь предполагается использовать в качестве источника и детектора одновременно.

Одной из наиболее серьёзных проблем при осуществлении данного эксперимента является получение высокочувствительной ядерной фотоэмульсии. Проблема усугубляется ещё и тем фактом, что за последние два десятилетия были закрыты многие предприятия по её приготовлению, а технология по приготовлению высокочувствительной ядерной фотоэмульсии в России была утеряна. В последние несколько лет ОАО “Славич” в г. Переяславль-Залесский ведётся работа по восстановлению утраченных технологий.

ОАО “Славич” является одним из старейших в России промышленных предприятий в области производства фотографических материалов.

С 1974 г. компанией “Славич” организовано производство фотопластинок ВР-П для микроэлектроники на основе наноэмульсии ВР, содержащей нанокристаллы размером 60 нм, а с 1978 г. осуществляется производство фотопластинок для голографии на основе эмульсии ПЭ-2 с нанокристаллами размером 8–15 нм. Методы синтеза эмульсий типа ПЭ-2 для голографии не освоила ни одна фирма за рубежом. За прошедшие годы произведено усовершенствование технологии, освоен выпуск четырёх видов фотопластинок и плёнок для голографии. Россия является единственным производителем и поставщиком фотопластинок и фотоплёнок для голографии на основе эмульсии ПЭ-2.

В 2008 г. в ОАО “Славич” цехом “Микрон” начато освоение производства ядерной фотоэмульсии для научных исследований. Основными задачами, поставленными перед цехом, являются восстановление производства ядерных эмульсий типа Р-2 и БР-2, а также создание нового типа ядерной эмульсии, обеспечивающего детектирование частиц с малой энергией. Для создания эмульсии предполагается использовать известный способ синтеза голографической эмульсии ПЭ-2, но с более крупными нанокристаллами и большей чувствительностью.

На данный момент “Славич” осталась единственной в России организацией, сохранившей линию производства ядерных эмульсий.

Ранее в экспериментах на ускорителях и в космических лучах было показано, что плотность почернений на следах частиц зависит от удельных ионизационных потерь энергии при прохождении заряженной частицы через вещество. Это позволяет идентифицировать частицы по измеренным значениям их заряда и массы, определять их энергии, исследовать времена жизни и характеристики распада нестабильных частиц. При измерении пробега ионизирующих частиц в фотоэмульсии чрезвычайно важна стабильность количества зерен на единицу длины трека элементарной частицы. Высокая стабильность количества зерен на единицу длины трека элементарной частицы в фотоэмульсии достигается за счет резкого повышения концентрации галоидного серебра в фотографическом слое до 85–87% веса при равномерном распределении его по объему фотослоя. Если в рентгеновских эмульсиях на 1 см^3 приходится приблизительно $6 \cdot 10^9$ кристаллов галоидного серебра, то в ядерных эмульсиях на 1 см^3 приходится примерно 10^{13} кристаллов. На стабильность количества зерен также влияет то, что в ядерных фотоэмульсиях кристаллы галоидного серебра при малых размерах весьма однородны по размерам. Все это создает высокую гомогенность эмульсии, и путь ионизирующей частицы получается в виде четкой линии проявленных зерен, причем их количество на единицу длины трека находится в соответствии с потерей энергии частицей на данном участке ее пути. Для полной идентификации ионизирующих частиц и успешного определения их массы и энергии с помощью методов, основанных на измерении плотности зерен, необходимо увеличение толщины эмульсионного слоя. Для эмульсий с толщиной слоя от 200 до 600 мкм важной технической проблемой является равномерное проявление слоя по всей его глубине и уменьшение дисторсии. Таким образом, наиболее общим требованием, которому должна удовлетворять ядерная эмульсия, является наличие у нее постоянной во времени и относительно высокой чувствительности (не менее 30 зерен на 100 мкм) на следах частиц с минимальной ионизацией. Таким образом, ядерные

эмульсии для регистрации релятивистских частиц должны обладать:

а) максимальной однородностью кристаллов по размерам, составу, форме (габитусу), чувствительности и т.д.;

б) минимальным размером кристаллов;

в) высокой предельной чувствительностью, т.е. возможностью регистрации частиц с минимальной ионизирующей способностью;

г) стабильностью свойств при хранении, воспроизводимостью от партии к партии, минимальной регрессией (распадом центров чувствительности из-за окисления и термических флуктуаций).

К 2012 году на ОАО “Славич” разработаны требования к технологическому процессу, который должен обеспечивать максимальную однородность микрокристаллов по их размерам. Для этого необходимо, чтобы процесс как физического, так и химического созревания на всех стадиях изготовления эмульсий протекал с практически однородной скоростью для всего множества микрокристаллов эмульсий. Выбран метод синтеза эмульсии. Показано, что аммиачный метод синтеза ядерной эмульсии, в отличие от безаммиачного, позволяет получить форму микрокристаллов, близкую к сферической. Определены основные принципы и преимущества метода контролируемой двухструйной кристаллизации, позволяющего обеспечить требования однородности. Проведены разработка и оптимизация технических требований для производства ядерной эмульсии (по этапам производства ядерной эмульсии). Определены оптимальные условия этапов эмульсификации, первого и второго созревания, диспергирования, сенсбилизации, а также полива и сушки слоев эмульсии. Наилучшее качество эмульсии достигается при выделении твердой фазы механическим методом тонкослойной сепарации. Реализованы мероприятия по достижению технико-экономических показателей:

- подобраны оптимальные параметры геля, в том числе содержание воды в растворах;
- определено пластифицирующее действие глицерина на физико-химические свойства эмульсии;
- найден поставщик натуральной желатины необходимого качества;
- сформулированы требования к физико-химическим свойствам готовой эмульсии.

В процессе естественного хранения, как правило, падают чувствительность и контрастность, растет оптическая плотность вуали (нормальное старение). Для улучшения сохраняемости в эмульсию нужно вводить вещества, препятствующие росту центров светочувствительности, дающие с ионами недиссоциирующие или малодиссоциирующие соединения. Одним из важнейших требований, предъявляемых к фотоэмульсиям

для ядерных исследований, является требование максимальной однородности микрокристаллов по их размерам. В результате проведенных исследований названы основные этапы технологического производства ядерной эмульсии и определены показатели доброкачественности фотоматериалов. Сформулированы возможные методы снижения фона кулоновского рассеяния и дисторсии, замедления процесса нормального старения фотоматериалов. Разработаны требования к технологическому процессу, который должен обеспечивать максимальную однородность микрокристаллов по их размерам, и выбран метод синтеза эмульсии. Показано, что аммиачный метод синтеза ядерной эмульсии, в отличие от безаммиачного, позволяет получить форму микрокристаллов, близкую к сферической.

В 2012-2013 году были обработаны образцы эмульсии, произведенные ОАО “Славич”. В настоящее время рассматривается перспектива применения этих эмульсий для физических задач. Тестирование полученных образцов эмульсии проводилось с помощью пучка пионов с импульсом 10 ГэВ/с на ускорителе ЦЕРН. Основное внимание при исследовании качества образцов эмульсии уделялось ее чувствительности (плотности зерен на 100 мкм следа) и плотности фоновых зерен (вуали).

В табл. 1 приводятся сравнительные результаты измерения геометрических характеристик микрокристаллов (МК) AgBr в эмульсии, приготовленной на “Славиче” на разных этапах разработки технологии, и японской эмульсии, приготовленной в университете г. Нагойя (Япония).

На рис. 2–4 показаны микрофотографии с электронного микроскопа (увеличение 15000 раз) микрокристаллов AgBr не облученной и не проявленной эмульсии партий 14С и 38С ОАО “Славич” (рис. 2 и 3, номер партии соответствует этапу разработки технологии) и японской эмульсии (рис. 4), соответственно. На рис. 5–7 представлены соответствующие распределения по размерам микрокристаллов (“Диаметр”).

Из сопоставления изображений зёрен и кривых распределения по размерам виден значительный прогресс в качестве эмульсии ОАО “Славич”. В последней партии (38С) размеры зёрен намного меньше более ранних образцов (например, по сравнению с партией 14С), имеют форму намного более близкую к сферической (отношение длины к ширине (oblong) близко к 1). Главный недостаток по сравнению с японской эмульсией заключается в большем в два раза разбросе размеров зёрен, но это не должно сильно сказываться на чувствительности.

Измерение чувствительности эмульсии 38С проводилось путём облучения электронами от источника ^{207}Bi , имеющими энергию 1 МэВ. Результаты представлены в табли-

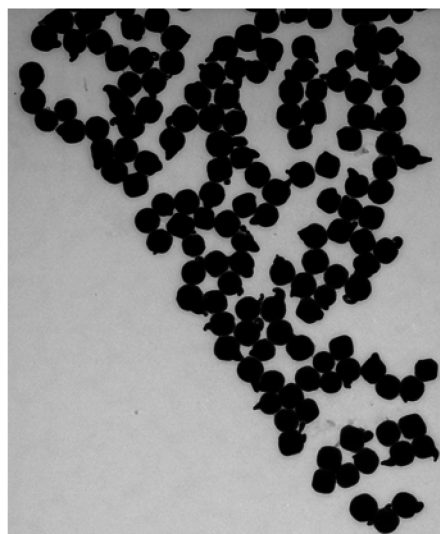
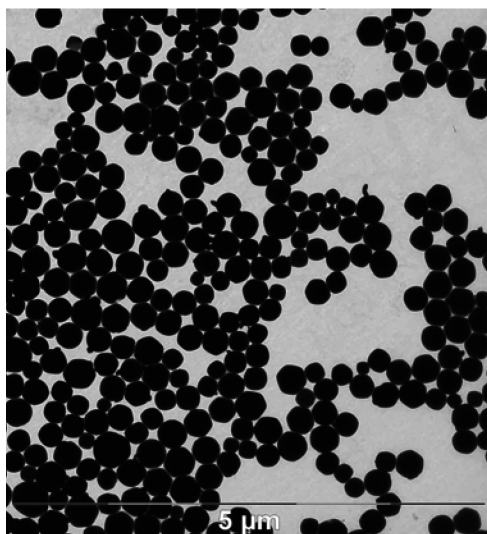


Рис. 3: Микрофотографии микрокристаллов эмульсии партии 38С.

Рис. 4: Микрофотографии микрокристаллов японской эмульсии.

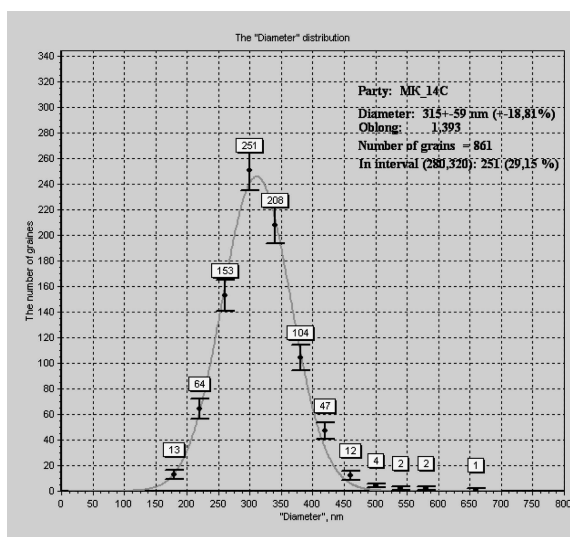


Рис. 5: Распределение по размерам микрокристаллов эмульсии “Славич”, партия 14С.

це 1, в которой приведено количественное сравнение характеристик микрокристаллов эмульсии разных партий ОАО “Славич” с эмульсией из Японии.

Таким образом, итоги работы по восстановлению технологии производства ядерной фотоэмульсии таковы:

– По основным гранулометрическим характеристикам ядерные эмульсии, производимые компанией “Славич”, приближаются к ядерным эмульсиям, выпускавшимся ра-

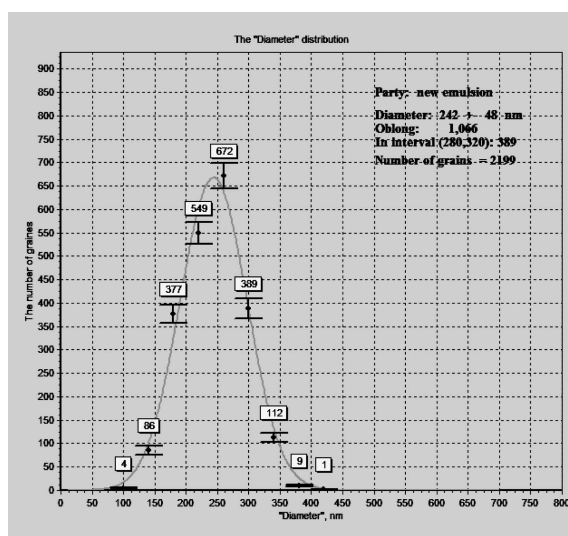


Рис. 6: Распределение по размерам микрокристаллов эмульсии “Славич”, партия 38С.

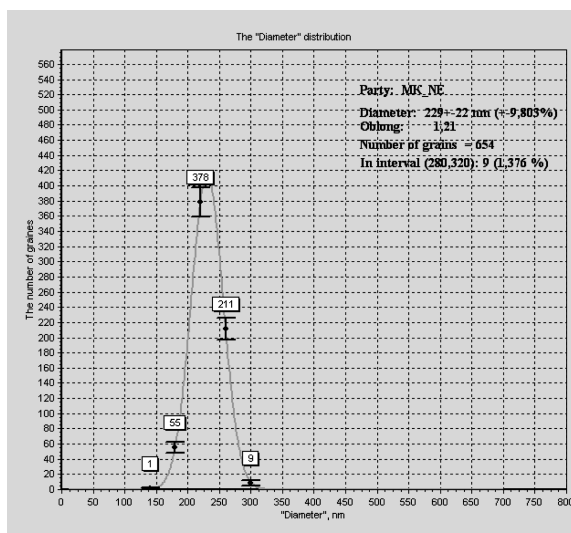


Рис. 7: Распределение по размерам микрокристаллов японской эмульсии (Nagoya).

нее в НИКФИ – ГосНИИхимфотопроект – ФОМОСе.

– Некоторые колебания распределений размеров МК AgBr не должны существенно сказываться на чувствительности ядерных эмульсий “Славича”.

– Содержание серебра в исследованных образцах эмульсий доведено до необходимого минимума – 180 г/кг, т.е. количество МК AgBr в толще эмульсии достаточное.

– Недостаточная чувствительность ядерных эмульсий, производимых в начальных партиях компанией “Славич”, могла быть следствием того, что часть МК AgBr не обла-

дает способностью регистрировать энергию на пути движения релятивистских частиц. Это могло быть обусловлено либо пониженной чувствительностью МК, недостаточной для регистрации энергии частиц, либо неэффективным проявлением этой части МК, когда следы взаимодействия с частицами могут быть, но слабые. В последней партии эмульсии (38С) чувствительность уже достаточная для использования в физических экспериментах, хотя работа по улучшению её характеристик должна быть продолжена.

Т а б л и ц а 1

Партия	Число измеренных МК	Средний диаметр D , нм	ΔD , нм	Вытянутость (L/W)	Чувствительность (количество зёрен на 100 мкм пробега)
NE Nagoya	654	229	22	1.21	35
12С	1564	330	54	1.257	22
14С	861	315	59	1.393	22
17С	591	302	52	1.29	21
18С	1162	289	51	1.309	22
28С	677	266	61	1.09	20
32С	705	297	52	1.064	22
38С	2199	242	48	1.066	32

Другая важная сторона эксперимента связана с обработкой предполагаемых событий, с распознаванием и кинематическим анализом треков испускаемых электронов. В более ранних работах эта проблема частично уже обсуждалась [1, 2]. Была показана возможность идентификации зёрен молибдена и следов частиц, распознавания ядерных звёзд после распада радиоактивных ядер, образующих фон для основной реакции и т.д. Здесь мы обсудим алгоритмы прослеживания треков электронов.

Энергия электронов, испускаемых в бета-распаде, составляет несколько МэВ. При такой энергии их движение является ультрарелятивистским, поэтому начальные участки трека выглядят почти прямолинейными и ввиду малости ионизационных потерь представляют собой редкую цепочку зёрен металлического серебра. На рис. 8 показан пример события испускания двух электронов ядром молибдена в виде иллюстративного изображения в видеокамере автоматизированного оптического микроскопа. Трек, идущий влево, почти прямолинеен, а идущий вправо сначала прямолинеен, а затем искривляется из-за потерь энергии и увеличивающейся вследствие этого степени перераспределения. Величина искривления в данном примере не очень велика, поскольку потери

энергии на этом участке (около 100 мкм) не очень большие. Вблизи точки останова характер траектории совершенно меняется и она больше похожа на беспорядочно закручивающуюся спираль. В данной работе эта часть траектории не рассматривается.

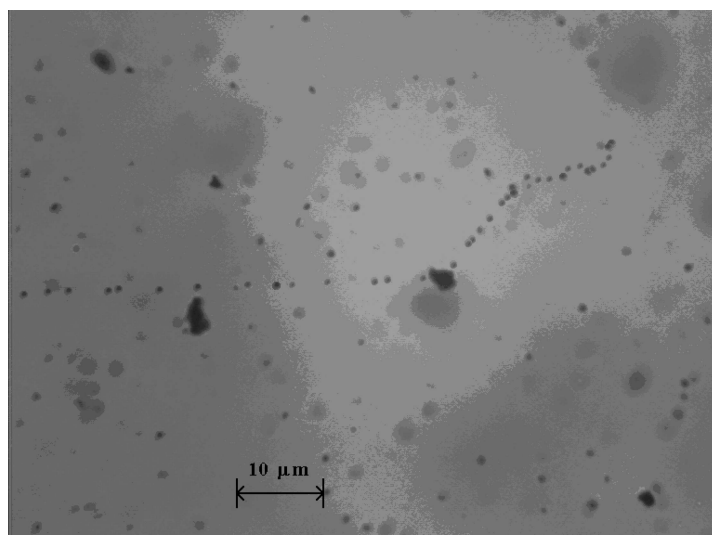


Рис. 8: Иллюстративное изображение следа двойного бета-распада на оптическом микроскопе.

Приведённое на рис. 8 изображение использовалось для разработки и реализации алгоритма распознавания начальных участков траектории релятивистского электрона, включая искривлённую часть трека.

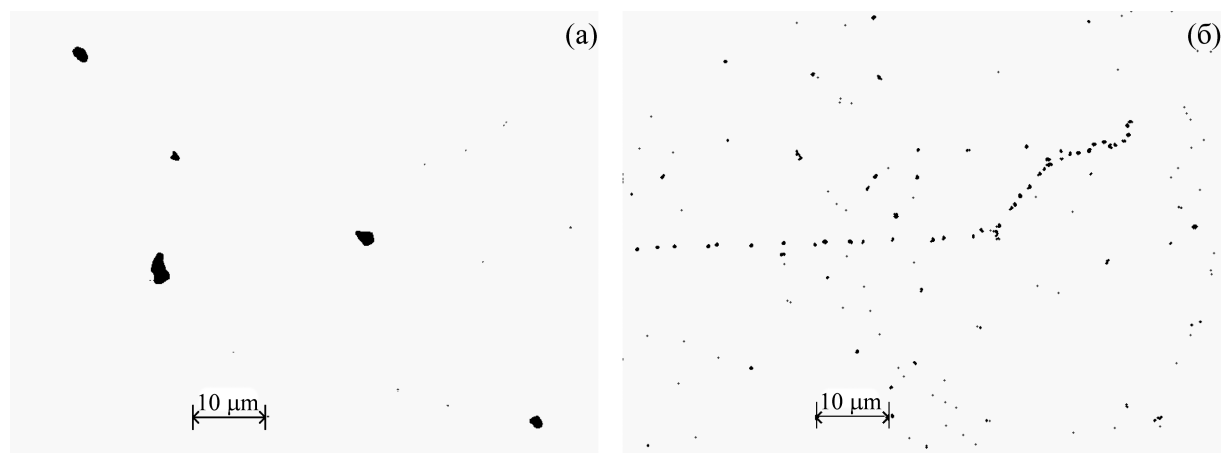


Рис. 9: Результат выделения зёрен молибдена на изображении рис. 8(а); результат выделения зёрен треков электронов на изображении рис. 8(б).

Алгоритм распознавания содержит несколько этапов. На первом этапе отдельно выделяются зёрна молибдена (тип зерна М) и следов трека (тип Т), характеристики которых заносятся в соответствующие базы данных. Свойства зёрен каждой из этих групп различаются довольно сильно, поэтому для них используются различные критерии распознавания (размер, форма, степень почернения и т.д.) и выделение соответствующих кластеров проводится в два этапа. Результат такого выделения для зёрен молибдена и электронов представлен на рис. 9(а) и 9(б), соответственно.

Затем просматриваются окрестности каждого из зёрен молибдена. Размер окрестности определяется путём оценки максимального расстояния между зёрнами серебра в эмульсии от релятивистских электронов. Для эмульсии, след в которой приведён на рис. 8 это расстояние составляет 10–12 мкм. Размер окрестности выбирается с некоторым запасом и для данной пластины составляет 15 мкм. Внутри этой окрестности отбираются зёрна типа Т и для каждого из них производится просмотр его окрестности размером 15 мкм. Если внутри окрестности имеется другое зерно типа Т, через эту пару проводится прямая – кандидат на ось трека. Затем производится проверка того, проходит ли прямая через зерно молибдена. Если она не проходит, производится переход к другому зерну. Если проходит, то прямая продолжается в сторону от зерна молибдена и осуществляется отбор зёрен типа Т, находящихся не далее трёх мкм от прямой и так, чтобы между соседними зёрнами расстояние было не более 15 мкм. При выполнении этих условий отобранные зёрна рассматриваются как принадлежащие треку и эта совокупность сохраняется в базе.

На рисунке 10 показан результат сбора зёрен в два трека, выходящих из зерна молибдена и имеющих пересечение внутри него. Такая комбинация рассматривается как кандидат на двойной бета-распад, а точка пересечения треков как вершина распада. На том же рисунке для примера приведена прямая (штриховая линия), которая не удовлетворяет условиям отбора и далее не рассматривается.

Более сложной для обработки является искривлённая часть трека. В данной работе будет описан алгоритм распознавания только начального участка, где кривизна ещё не так велика. Поскольку аппроксимация прямой линией в данном случае невозможна, отбор зёрен трека производится в конической области. Начальный конус, ось которого совпадает с осью прямолинейного участка, выходит из его конца. Угол раствора начального конуса, для определенности, взят равным 135° . По мере продвижения вдоль трека по криволинейному участку угол изменяется. Внутри каждого конуса проводится поиск зёрен, находящихся на расстоянии не далее 15 мкм. Каждое из этих зёрен, в свою

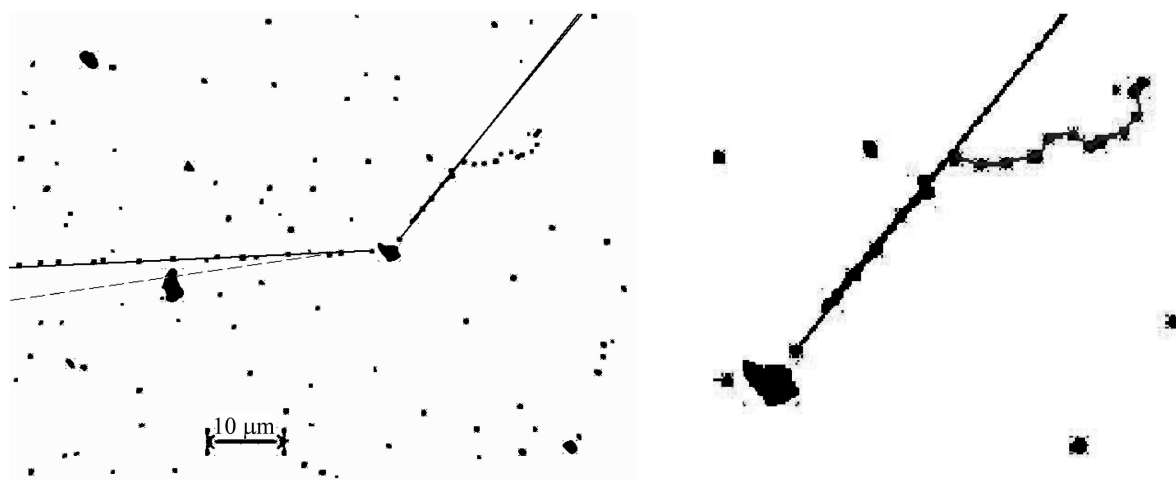


Рис. 10: Результат поиска прямолинейных участков треков электронов. Штриховой линией показана прямая, не удовлетворяющая критериям отбора.

Рис. 11: Результат поиска криволинейного участка трека электрона.

очередь, становится началом поиска продолжения. Таким образом, набираются цепочки вариантов продолжения всего трека, между которыми устраивается конкуренция. В рассматриваемом случае таких вариантов не много. После применения к нему приведённого выше алгоритма было получено криволинейное продолжение прямолинейного участка трека, которое показано на рис. 11 в виде ломаной линии.

Более запутанный участок трека электрона вблизи точки останова (последние 20–30 мкм) требует более сложных методов распознавания. Ситуация осложняется тем, что при автоматической обработке просмотр трека по глубине осуществляется с дискретным шагом и участки, находящиеся на разном уровне, проецируются на одно изображение видеокамеры. В этом случае часто бывает необходимо распутать частично самопересекающиеся участки трека, представляющие собой кривую со сложной топологией. При ручной обработке имеется возможность просмотреть промежуточные по глубине участки, чтобы понять порядок прохождения частей трека. При автоматизированной обработке для этого необходимо аппроксимировать траекторию гладкими кривыми и устраивать конкуренцию между разными вариантами конфигурации траектории. Этот этап обработки будет описан отдельно.

Выводы:

1. Последняя партия эмульсии имеет чувствительность, достаточную для использования в экспериментах с однозарядными частицами, однако требуется дополнительная работа для получения большей однородности по размерам микрокристаллов.

2. Разработано программное обеспечение, позволяющее проводить поиск и отбор треков электронов от двойного бета-распада. Программа позволяет прослеживать трек почти до точки останова. Оставшаяся часть трека (последние 20–30 мкм) требует дополнительного алгоритма.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ N 11–02–00476–а.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. Д. Ашитков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **38**(10), 22 (2011).
- [2] А. С. Барабаш и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(10), 35 (2012).
- [3] arXiv: 1308.2524v4.
- [4] www.mpi-hd.mpg.de/gerda; arXiv:1307.4720.

Поступила в редакцию 3 декабря 2013 г.