

ТЕХНОЛОГИЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 539.1.073.7

НЕДАВНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ

© 2016 г. П. И. Зарубин

*Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

Физический институт им. П.П. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

E-mail: zarubin@ihe.jinr.ru

Поступила в редакцию 11.05.2016 г.

Дан обзор недавних результатов, полученных с помощью метода ядерной эмульсии (ЯЭ) в низкоэнергетических применениях. Облучение ЯЭ ядрами ^8He с энергией 60 МэВ позволило идентифицировать их распады при остановке, оценить возможности пробежной α -спектрометрии и наблюдать дрейф термализованных атомов ^8He . Корреляции α -частиц, изучавшихся в расщеплениях $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$, вызванных нейтронами с энергией 14.1 МэВ, указывают на наличие суперпозиции состояний 0^+ и 2^+ ядра ^8Be в основном состоянии ^{12}C . В обогащенной бором ЯЭ исследованы угловые корреляции фрагментов, обсуждаются перспективы ЯЭ в исследованиях радиоактивности и ядерного деления. Предложено использовать автоматизированный микроскоп для поиска коллинеарного тройного деления тяжелых ядер, имплантированных в ЯЭ. Начаты поверхностные облучения образцов ЯЭ источником ^{252}Cf . Изучаются планарные события, содержащие пары фрагментов и длиннопробежные α -частицы, и только тройки фрагментов. Образцы ЯЭ калибровались на ионах Кг и Хе с энергией 1.2 и 3 А МэВ.

Ключевые слова: ядерная эмульсия, альфа-частицы, нейтроны, тяжелые ионы, автоматизированный микроскоп, деление, циклотрон

DOI: 10.1134/S2079562916010115

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что полвека прошло со времени разработки ядерной эмульсии (ЯЭ), она сохраняет статус универсального и недорогого детектора [1–3]. ЯЭ типа БР-2 с непревзойденным пространственным разрешением, составляющим около 0.5 мкм, обеспечивает наблюдение следов, начиная с осколков деления и вплоть до релятивистских частиц. Метод ЯЭ заслуживает дальнейшего применения в фундаментальных и прикладных исследованиях на современных ускорителях и реакторах, а также с источниками радиоактивности, включая естественные. Применение ЯЭ особенно обосновано в таких пионерских экспериментах, в которых следы ядерных частиц не могут быть реконструированы с помощью электронных детекторов. Так, в последнее десятилетие метод ЯЭ, используемый в рамках проекта БЕККЕРЕЛЬ [4] на нуклотроне ОИЯИ, позволил с уникальной полнотой исследовать кластеризацию в ядрах ^7Li , $^{7,9}\text{Be}$, $^{8,10}\text{B}$, $^{9,10}\text{C}$ и $^{12,14}\text{N}$ при их релятивистской диссоциации в ЯЭ [5].

Производство слоев ЯЭ, которое велось в Москве в течение четырех десятилетий, завершилось десять лет назад. Интерес к дальнейшему применению ЯЭ стимулировало ее воспроизведение в цеху МИКРОН, являющимся частью компании

“Славич” (г. Переславль-Залесский) [6]. В настоящее время образцы ЯЭ производятся поливом слоев от 50 до 200 мкм на стеклянную основу. Недавно стали доступны слои толщиной до 500 мкм без подложки. Проверка новой ЯЭ в облучениях релятивистскими частицами подтвердила ее сходство с ЯЭ БР-2.

Недавно конкурентоспособность ЯЭ была продемонстрирована в серии измерений коротких следов α -частиц и тяжелых ионов на наиболее точных оптических микроскопах KSM с $90\times$ объективами. При измерениях распадов ядер ^8He , имплантированных в ЯЭ, были проверены возможности α -спектрометрии и был установлен эффект дрейфа атомов ^8He [7–9]. Исследовались корреляции α -частичных троек в расщеплениях ядер ^{12}C из состава ЯЭ нейтронами с энергией 14.1 МэВ [10], а также угловые корреляции ядер ^7Li и ^4He , рожденных в развале ядер ^{10}B тепловыми нейтронами в ЯЭ, обогащенной бором [11]. В этой серии облучений угловое разрешение ЯЭ подтвердило свое совершенство по ожидавшимся физическим эффектам, которые проявились в распределениях по углам разлета продуктов изучавшихся реакций.

Образцы воспроизведенной ЯЭ также облучались мюонами с энергией 160 ГэВ [11]. Такое облучение позволяет изучать множественную фраг-

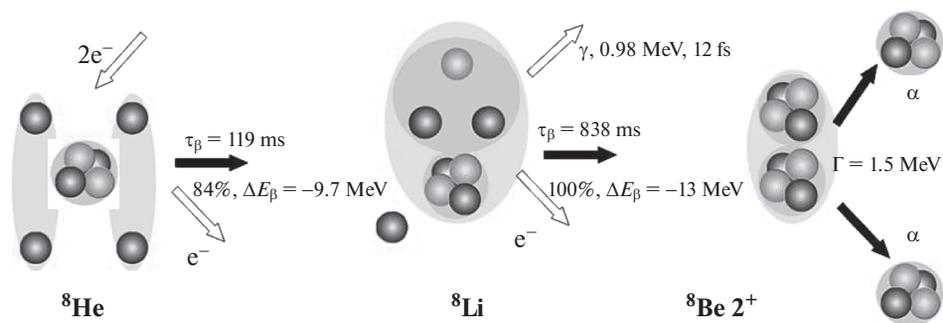


Рис. 1. Схема главного канала каскадных распадов изотопа ${}^8\text{He}$: светлые кружки соответствуют протонам, темные – нейтронам.

ментацию под действием чисто электромагнитного пробника. Механизмами фрагментации могут служить мультифотонные обмены или переходы виртуальных фотонов в мезоны. Установлено, что в расщеплениях ядер углерода на тройки α -частиц проявляется скорее механизм ядерной дифракции, чем электромагнитный. Подтверждение этого вывода важно не только для интерпретации мультифрагментации под действием ультрарелятивистских мюонов. Он также может служить основой для интерпретации мультифрагментации релятивистских ядер в наиболее периферических взаимодействиях, не сопровождаемых фрагментами ядер мишени. Таким образом, возникает связь ядерной физики высоких и низких энергий.

Одной из предложенных задач является поиск коллинеарного кластерного тройного деления тяжелых ядер [12]. Существование этого явления может быть установлено в наблюдениях такого типа тройного деления тяжелых ядер, в котором легчайший фрагмент испускается в направлении одного из тяжелых фрагментов. Вопреки определенной наблюдаемости фрагментов деления они не могут быть полностью идентифицированы в ЯЭ. Ценность ЯЭ состоит в комбинировании наилучшего углового разрешения и максимальной чувствительности. Кроме того, возможны измерения длин и толщин следов и, значит, классификация фрагментов. На начальном этапе, чтобы обеспечить опытную статистику тройных делений, было предложено проанализировать достаточные площади ЯЭ, облученной источником ${}^{252}\text{Cf}$ с подходящей плотностью следов α -частиц и осколков спонтанного деления [13]. Следующий вариант состоит в облучении тепловыми нейтронами слоев ЯЭ, обогащенных ${}^{235}\text{U}$. Такой подход может быть развит на ЯЭ с добавкой изотопа ${}^{252}\text{Cf}$ [14, 15].

При высоких энергиях воспроизведенная эмульсия недавно облучалась на нуклотроне ОИЯИ во вторичном пучке ядер ${}^{11}\text{C}$ с энергией 1.2 А ГэВ [16], что позволяет включить кластеризацию это-

го ядра в общую картину, связывающую данные по легким ядрам, включая радиоактивные. Весной 2016 г. слои ЯЭ облучались ядрами ${}^{12}\text{C}$ с энергией 450 А МэВ на медико-биологическом пучке Института физики высоких энергий (г. Протвино). В этом случае перед продольно облучаемыми стопками устанавливался вольфрамовый конвертор для усиления эффекта электромагнитного механизма.

Такова панорама облучений в 2012–2016 гг. новых образцов ЯЭ. Опубликованные результаты, полученные на их основе, будут суммированы далее.

ОСТАНОВИВШИЕСЯ ЯДРА ${}^8\text{He}$

Облучение ЯЭ ядрами ${}^8\text{He}$ с энергией 60 МэВ [7–9] выполнено на фрагмент-сепараторе АККУЛЛИНА в Лабратории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ. Особенности распада изотопа ${}^8\text{He}$ представлены на рис. 1 [17]. Рис. 2 демонстрирует макрофотографии молоточковых распадов остановившихся в ЯЭ ядер ${}^8\text{He}$. Они являются типичными среди около двух тысяч, наблюдавшихся в этом исследовании. Сохранены видеозаписи таких распадов, полученные с помощью микроскопа и цифровой фотокамеры [18].

Поиск β -распадов ядер ${}^8\text{He}$ был сфокусирован на поиске “молоточков”. Нередко, в событиях, названных “разорванными”, наблюдались промежутки между точками остановки первичных следов и молоточковыми распадами. “Разорванные” события были отнесены за счет дрейфа образовавшихся атомов ${}^8\text{He}$. В 136 “целых” и 142 “разорванных” событиях были определены направления прилета ${}^8\text{He}$, точки остановки их ядер, вершины их распадов и точки остановки α -частиц. В “разорванных” событиях точки распада определялись экстраполяцией следов электронов. Распределение углов разлета α -частичных пар имеет среднее значение $(164.9 \pm 0.7)^\circ$. Такие изломы “молоточков” связаны с импульсами, уносимыми $e\nu$ -парами.

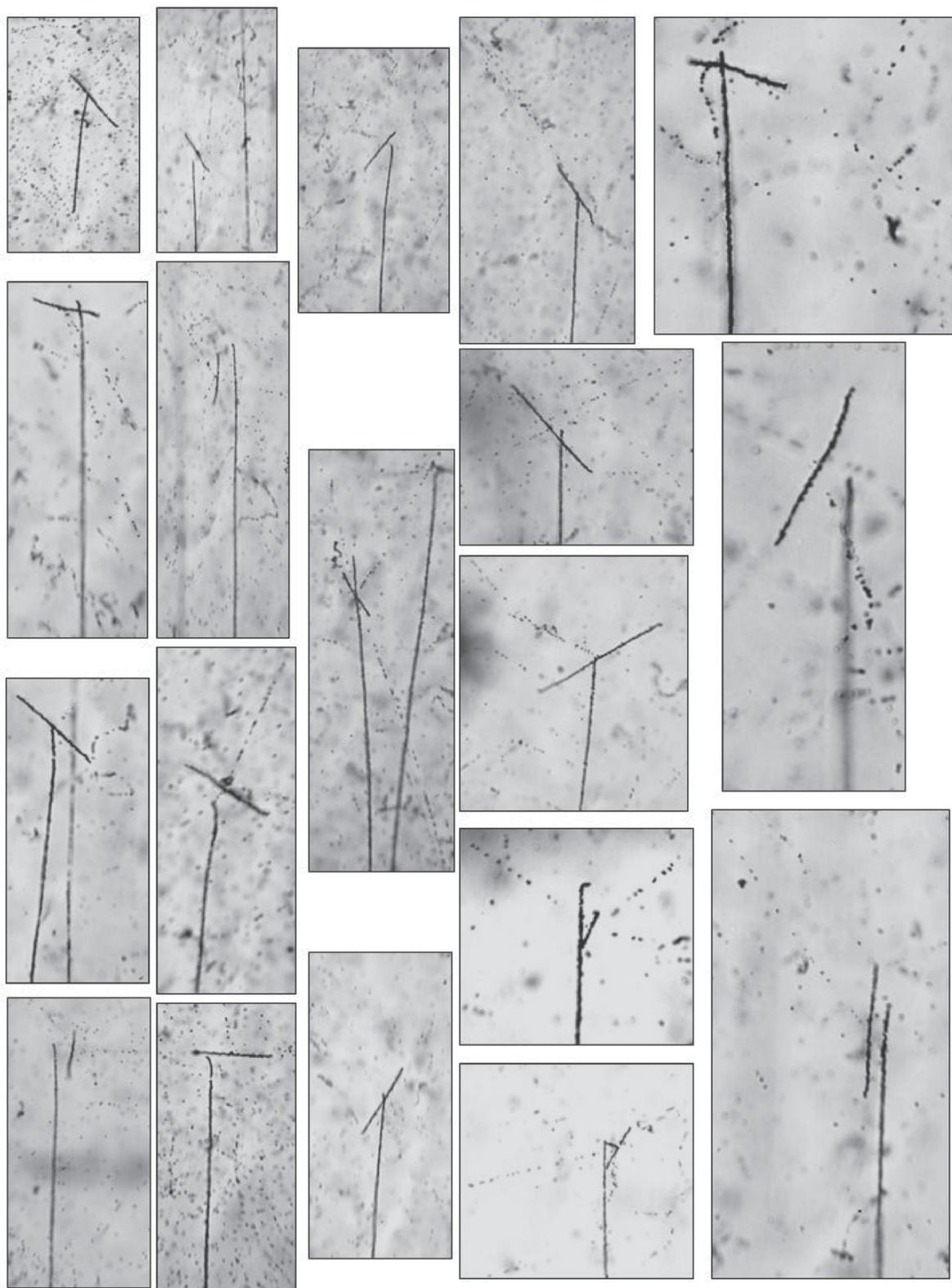


Рис. 2. Макрофотографии молоточковых распадов от остановившихся в ЯЭ ядер ^8He : начинаясь снизу, следы ^8He ориентированы вертикально; короткие следы отвечают распадам $^8\text{Be}_{2+}$; точечные следы произведены электронами распадов.

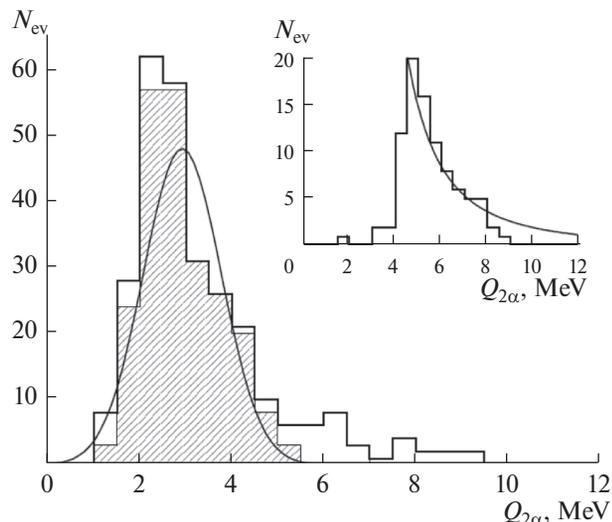


Рис. 3. Распределение по энергии $Q_{2\alpha}$ 278 пар α -частиц: заштрихованная гистограмма соответствует α -частицам с пробегами менее 12.5 мкм; линия – аппроксимация функцией Гаусса; на вставке – распределение $Q_{2\alpha}$ дополнительных 98 пар с пробегами α -частиц свыше 12.5 мкм.

Связь пробегов α -частиц и значений их энергии определялась по сплайн-интерполяции расчетов в модели SRIM [19]. Знание энергии и углов испускания α -частиц позволяет получить распределение по энергии α -распада $Q_{2\alpha}$. Инвариантная переменная Q определяется как разность между инвариантной массой конечной системы M^* и массой первичного ядра M . M^* определяется суммой произведений 4-импульсов P_i , т.е., $M^{*2} = (\sum P_i)^2$.

В основном распределение по $Q_{2\alpha}$ (рис. 3) соответствует распаду из первого возбужденного состояния ${}^8\text{Be}_{2+}$. Для событий, в которых пробеги обеих α -частиц менее 12.5 мкм и углы разлета свыше 145° , среднее значение $Q_{2\alpha}$ равно (2.9 ± 0.1) МэВ при среднеквадратичном рассеянии (RMS) 0.85 МэВ, что соответствует ${}^8\text{Be}_{2+}$. Вместе с тем, в этом распределении имеется протяженный “хвост”, не описываемый функцией Гаусса. Вставка на рис. 3 демонстрирует распределение $Q_{2\alpha}$, соответствующее обоим пробегам свыше 12.5 мкм. Физическая причина появления “хвоста” в распределении $Q_{2\alpha}$ осталась неясной. Возможно, что его форма отражает пространственную структуру состояния ${}^8\text{Be}_{2+}$.

В “разорванных” событиях были определены расстояния $L({}^8\text{He}-{}^8\text{Be})$ между точками остановки ионов ${}^8\text{He}$ и вершинами распадов, а также углы $\Theta({}^8\text{He}-{}^8\text{Be})$ между направлениями прихода ионов и направлениями от точек остановки к вершинам распадов (рис. 4). Однородность распре-

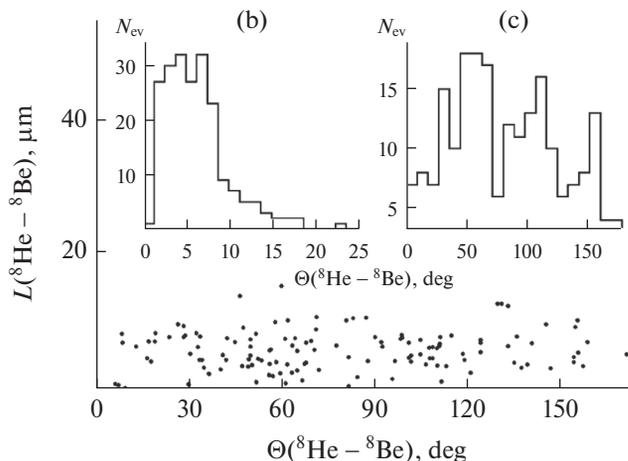


Рис. 4. Распределение событий по расстояниям $L({}^8\text{He}-{}^8\text{Be})$ и углам $\Theta({}^8\text{He}-{}^8\text{Be})$; на вставках: проекции $L({}^8\text{He}-{}^8\text{Be})$ (b) и $\Theta({}^8\text{He}-{}^8\text{Be})$ (c).

ления событий по этим параметрам и отсутствие ярких корреляций указывают на термальный дрейф атомов ${}^8\text{He}$. Среднее значение $L({}^8\text{He}-{}^8\text{Be})$, составляющее (5.8 ± 0.3) мкм при RMS 3.1 мкм, может быть ассоциировано со средним пробегом атомов ${}^8\text{He}$. Малое значение средней скорости атомов ${}^8\text{He}$, определенное как отношение среднего значения $L({}^8\text{He}-{}^8\text{Be})$ к периоду полураспада ядра ${}^8\text{He}$ указывает на картину диффузии.

В качестве следующего шага представляется интересным изучить угловые $\beta\beta$ корреляции с целью поиска сохранения поляризации промежуточных ядер ${}^8\text{Li}$. В перспективе наблюдение диффузии указывает на возможность генерации и откочки радиоактивных атомов ${}^8\text{He}$. Увеличение средней скорости и длины дрейфа достигими при нагреве и уменьшении плотности мишени. Возникает возможность накопления значительного количества атомов ${}^8\text{He}$. Прикладной интерес состоит в изучении тонких фильтров путем прокачки атомов ${}^8\text{He}$ и их внедрении в α -детекторы.

РАСЩЕПЛЕНИЕ ЯДЕР ${}^{12}\text{C}$ НА ТРОЙКИ α -ЧАСТИЦ ТЕРМОЯДЕРНЫМИ НЕЙТРОНАМИ

При развитии концепции α -частичной кластеризации нуклонов ядро ${}^{12}\text{C}$ является признанным “пунктом отправления”. Можно предположить, что основное состояние ${}^{12}\text{C}_{g.s.}$ содержит пару виртуальных α -кластеров (вне массовой поверхности), каждая из которых имеет 2 единицы орбитального углового момента (D -волны), соответствующие первому возбужденному состоянию ${}^8\text{Be}_{2+}$. “Вращение” в противоположных направлениях двух α -кластеров вокруг общего центра,

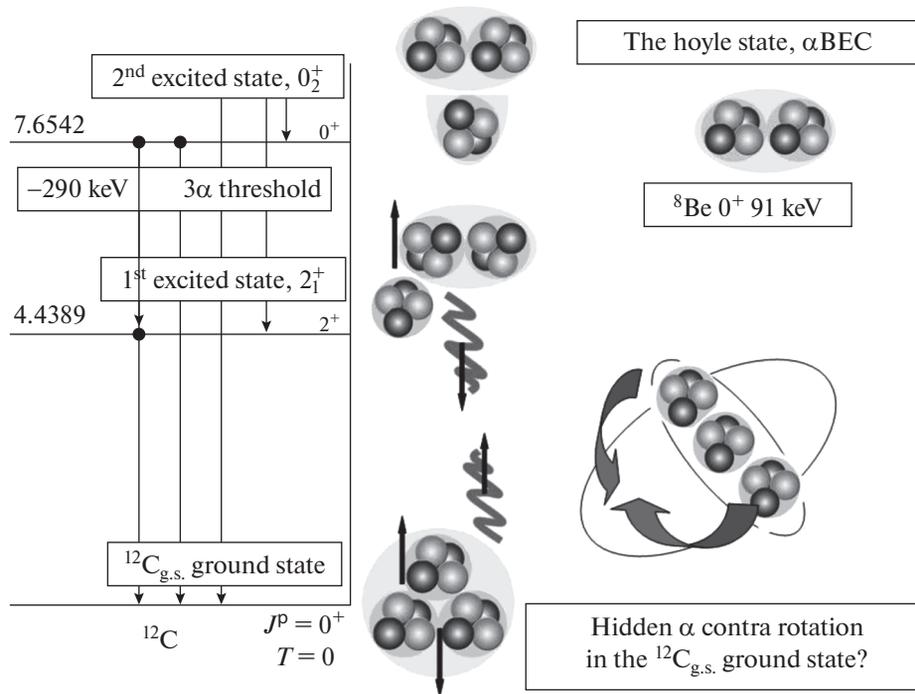


Рис. 5. Диаграмма синтеза ядра ^{12}C в 3α -процессе.

представленного третьим α -кастером может быть представлено как соответствующее основному состоянию $^8\text{Be}_{g.s.}$ (S -волна). В результате суперпозиция тройного спаривания ведет к нулевому спину $^{12}\text{C}_{g.s.}$. Такая упрощенная картина классического типа может проявиться в интенсивном образовании нестабильных состояний при развале ядер ^{12}C .

Такая концепция не противоречит сценарию синтеза ^{12}C , принятому в ядерной астрофизике (рис. 5). Слияние тройки α -частиц может происходить, когда она оказывается во втором возбужденном состоянии 0^+_2 ядра ^{12}C (состояние Хойла). Это состояние, располагающееся на 270 кэВ выше порога развала $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$, может рассматриваться как тройная суперпозиция $^8\text{Be}_{g.s.}$, поскольку каждая из α -частичных пар находится на 90 кэВ над порогом связи, как и $^8\text{Be}_{g.s.}$. Переход в первое возбужденное состояние ядра ^{12}C , уже являющееся связанным, происходит при испускании фотона, уносящего 2 единицы углового момента тройки ($0^+_2 \rightarrow 2^+_1$). Таким образом, в тройке возникает D -волновая α -пара как следствие сохранения углового момента. Последующий переход в $^{12}\text{C}_{g.s.}$, также сопровождаемый испусканием фотона, ведет к образованию другой D -волновой α -пары. Эта пара должна иметь противоположное направление углового момента по отношению к первой, чтобы обеспечить нулевой спин $^{12}\text{C}_{g.s.}$. Итак, ядро ^{12}C приобре-

тает скрытую поляризацию. Образно выражаясь, оно консервирует “скрытое вращение”.

Можно предположить, что выход α -частичных пар через состояния $^8\text{Be}_{2+}$ и $^8\text{Be}_{g.s.}$ в реакциях, не сопровождаемых передачей углового момента, отразит такую спин-кластерную структуру $^{12}\text{C}_{g.s.}$. Изучение α -частичных троек возможно в развалах ядер углерода из состава ЯЭ нейтронами с энергией 14.1 МэВ. Передаваемая α -частицам энергия достаточна для измерения их пробегов и направлений, и, в то же время, остается ниже порога фоновых каналов. Стопка слоев ядерной эмульсии, политой на стекло, облучалась нейтронами, рожденными в реакции $d + t \rightarrow n + \alpha$ на одном из приборов ДВИН прикладного назначения [20]. Сканирование слоев ориентировалось на поиск 3α -развалов. В 400 α -тройках, отобранных среди 1200, на микроскопе KSM были выполнены измерения углов вылета α -частиц относительно плоскости и поверхности слоя ЯЭ, а также их пробеги. Единственным критерием отбираемых событий была полнота измерения в нем.

Определение углов и значений энергии по пробегам в модели SRIM позволяет определить энергию пары $Q_{2\alpha}$. Корреляция по энергии $Q_{2\alpha}$ и углу разлета $\Theta_{2\alpha}$ в α -частичных парах указывает на присутствие ^8Be (рис. 6). Область с большими углами разлета $\Theta_{2\alpha} > 90^\circ$ соответствует $Q_{2\alpha}$ для $^8\text{Be}_{2+}$ а $\Theta_{2\alpha} < 40^\circ - ^8\text{Be}_{g.s.}$. Распределение событий по $Q_{2\alpha}$ указывает на оба состояния (рис. 7), но не-

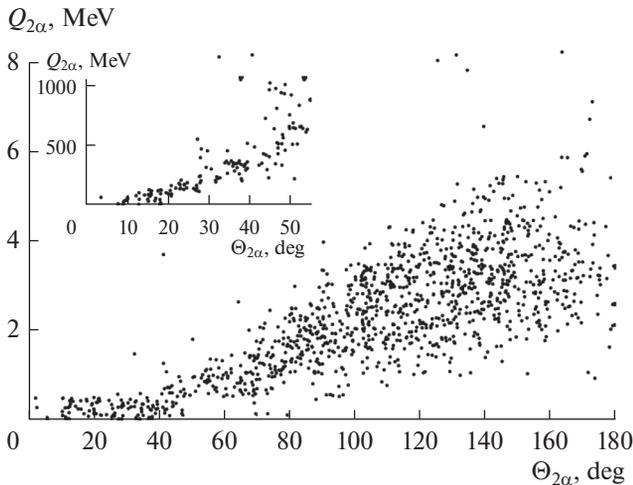


Рис. 6. Корреляция по энергии $Q_{2\alpha}$ и углу разлета $\Theta_{2\alpha}$ в парах α -частиц.

сколько размазанные из-за эффектов выбивания кластеров нейтронами. Мягкое условие $Q_{2\alpha} < 500$ кэВ позволяет насчитать 110 распадов ${}^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$. Отбор ${}^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$ ведет к появлению второго пика в области ${}^8\text{Be}_{2+}$. Итак, несмотря на сложный механизм реакции ${}^{12}\text{C}(n, n)3\alpha$, существование виртуальной конфигурации ${}^8\text{Be}_{2+} + {}^8\text{Be}_{2+} + {}^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$ в основном состоянии ${}^{12}\text{C}$ проявляется в четверти 3α -развалов.

Важность обсуждаемой структуры определяется не только интересом описания ${}^{12}\text{C}_{\text{g.s.}}$, но также и фактом, что она является начальной конфигурацией для обратного процесса генерации 3α -частичных ансамблей в состоянии Хойла. Предполагается, что след ${}^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$ оно представляет собой

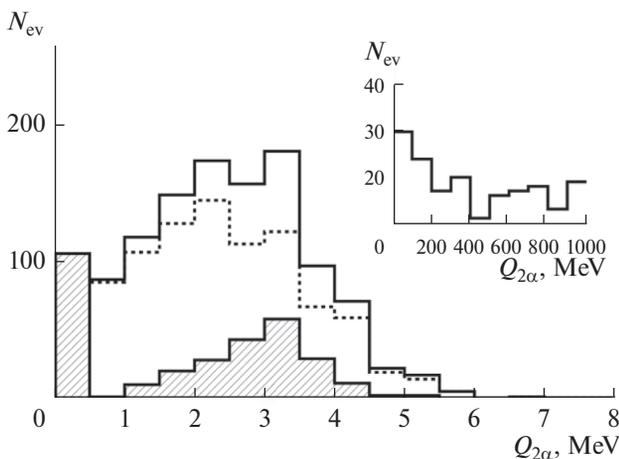


Рис. 7. Распределение α -частичных пар, рожденных в развалах ядер ${}^{12}\text{C}$ нейтронами с энергией 14 МэВ по энергии $Q_{2\alpha}$ всех α -пар (сплошная линия), с отбором ${}^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$ (заштрихованная) и их разность (пунктир).

конденсат Бозе–Эйнштейна, состоящий из α -частиц в S -состоянии [21]. Его идентификация в развалах ядер ${}^{12}\text{C}$, в которых все пары соответствуют ${}^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$, позволяет продвинуться к генерации конденсатных состояний с большим числом α -частиц. Фундаментальный аспект воссоздания такого конденсата состоит в необходимости “эвакуировать” два скрытых вращения в ${}^{12}\text{C}_{\text{g.s.}}$. В этом отношении, кулоновская диссоциация быстро движущегося ядра на тяжелом ядре мишени представляется наиболее подходящим процессом, поскольку при ней возможен обмен несколькими квазиреальными фотонами.

КАЛИБРОВКИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Образцы ЯЭ облучались в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ на циклотроне ИЦ-100 ионами ${}^{86}\text{Kr}^{+17}$ и ${}^{124}\text{Xe}^{+26}$ с энергией 1.2 А МэВ и на циклотроне У-400М ионами ${}^{84}\text{Kr}$ с энергией 3 А МэВ. Облучения выполнялись в условиях вакуума ускорителей без светозащитной бумаги. Фиксация образцов в камерах облучения происходила при обычном в фотолаборатории освещении. Для наблюдения следов образцы устанавливались со значительным наклоном по отношению к направлениям пучков. Плотность облучения образца достигала 10^6 следов/см $^{-2}$ за несколько секунд. Рисунок 8 демонстрирует распределение по пробегам ионов, остановившихся в ЯЭ без видимого рассеяния. Эти данные дают ориентиры для дальнейших калибровок ЯЭ при меньших значениях энергии, которые характерны для деления тяжелых ядер.

ОБЛУЧЕНИЕ ИСТОЧНИКОМ Cf

Поверхностные облучения образцов ЯЭ в Отделении радиационной дозиметрии (ИЯФ ЧАН,

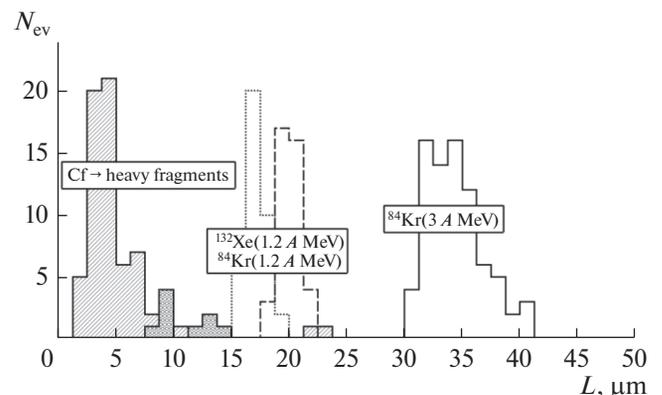


Рис. 8. Распределения пробегов ионов ${}^{84}\text{Kr}$, ${}^{132}\text{Xe}$, ${}^{86}\text{Kr}$ в распадах $\text{Cf} \rightarrow 3$ осколка и $\text{Cf} \rightarrow 2$ осколка + длиннопробежная α .

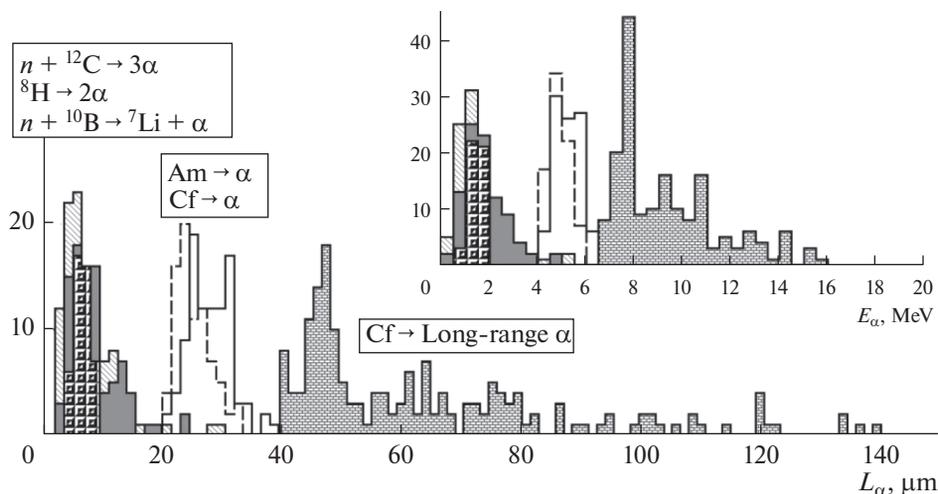


Рис. 9. Распределения пробегов α -частиц: $n(14.1 \text{ МэВ}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (наклонная штриховка), ${}^8\text{He} \rightarrow 2\alpha$ (серая заливка), $n_{\text{th}} + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha$ (черные точки), $\text{Cf} \rightarrow \alpha$ (сплошная линия), $\text{Am} \rightarrow \alpha$ (пунктирная линия), $\text{Cf} \rightarrow$ длиннопробежная α (темная штриховка); на вставке: распределение по значениям энергии α -частиц, оцененным по сплайн-интерполяции расчета пробег-энергия в модели SRIM.

Прага) выполнялись первоначально ручным перемещением источника ${}^{252}\text{Cf}$. Затем использовалось специально разработанное устройство, по поверхности которого источник перемещается автоматически по удобной схеме и длительности. Наиболее вероятным образом изотоп ${}^{252}\text{Cf}$ распадается излучением α -частиц с энергией 5–6 МэВ, следы которых в основном заполняют облучаемый образец. Этот изотоп также испытывает спонтанное деление на пару или даже тройку осколков с вероятностью 3% и 0.1%, соответственно. Для сравнения образец ЯЭ облучался источником ${}^{241}\text{Am}$, излучающим только α -частицы в том же диапазоне энергии. Так как пробеги продуктов распада малы, облучения источниками выполнялись без светозащитной бумаги в фотоконате при освещении красным светом.

В случае поверхностного облучения не должно было бы наблюдаться более двух осколков деления, поскольку третий излучается в сторону контактирующего источника. Признак облучения ${}^{252}\text{Cf}$ состоит в присутствии следов α -частиц тройного деления, пробеги которых значительно превышают пробеги α -частиц распада. Этот канал доминирует в тройном делении ${}^{252}\text{Cf}$, имея вероятность 90%. Рисунок 9 объединяет измеренные пробеги α -частиц в описанных выше облучениях. Значения энергии на вставке рис. 9 вычислены в модели SRIM [19].

При просмотре поверхности слоев ЯЭ, облученной источником Cf, обнаружены планарные тройки, состоящие из пар фрагментов и длиннопробежных α -частиц, а также троек осколков (примеры на рис. 10). Стоит подчеркнуть замечательный факт наблюдения в ЯЭ именно троек, а не

только пар фрагментов. Для столь полного наблюдения троек следов, их вершины должны погружаться на глубину не менее типичной толщины следов. На рис. 11 представлено распределение 96 вершин деления Cf на три фрагмента по глубине слоя ЯЭ, среднее значение которого составляет (4.1 ± 0.2) мкм при RMS 2.5 мкм. Возможно, что этот эффект обязан связыванию атомов Cf в микрокристаллах AgVg и их дрейфу. По-видимому, поверхностная защита источника с начальной толщиной напыленного золота 50 мкг/см² (согласно паспорту источника) не предотвратила такое проникновение.

В 96 событиях истинно тройного деления, т.е. не содержащих α -частиц, измерены пробеги всех осколков (рис. 12). Сравнение с данными на рис. 9 указывает на то, что средняя энергия осколков деле-

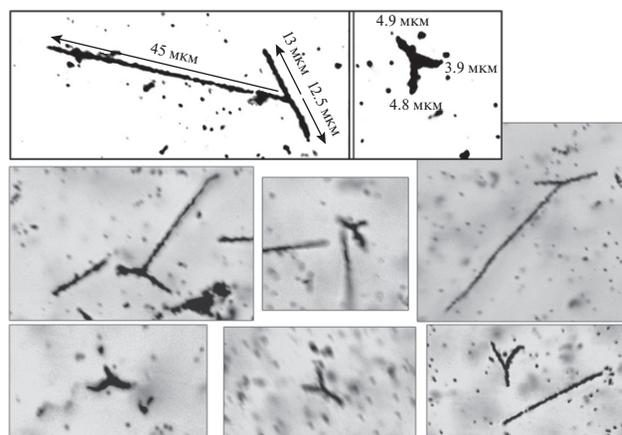


Рис. 10. Примеры наблюдавшихся событий тройного деления; в двух случаях указаны длины следов.

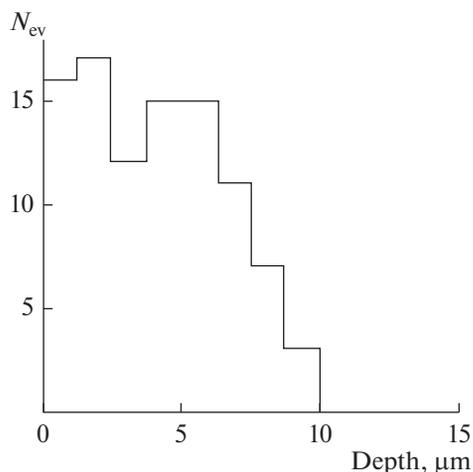


Рис. 11. Распределение событий тройного деления ^{252}Cf по глубине в слое ЯЭ.

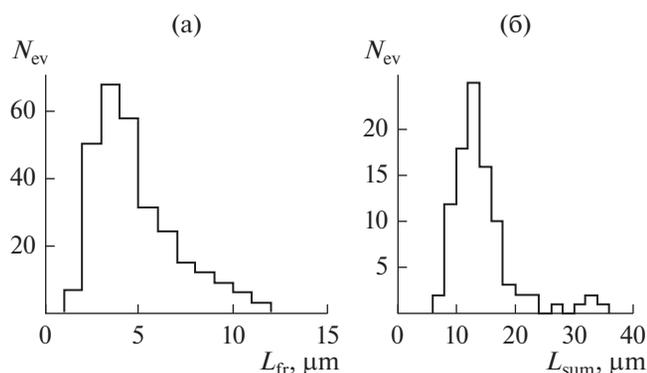


Рис. 12. Распределение событий тройного деления ^{252}Cf по пробегу осколков L_{fr} (слева) и их сумме в тройках L_{sum} (справа).

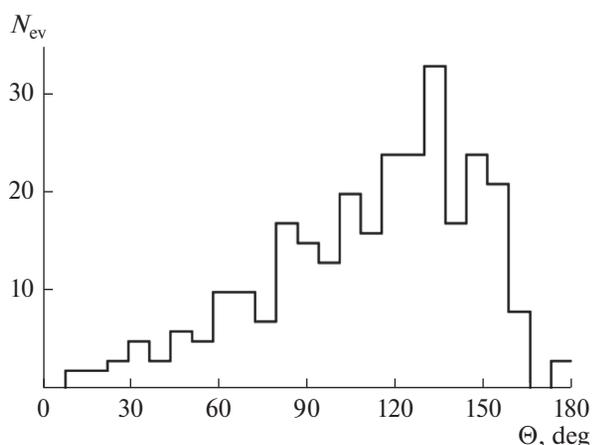


Рис. 13. Распределение событий тройного деления ^{252}Cf по углам разлета между парами осколков.

ния составляет порядка 400 А кэВ. Однако, это грубая оценка. Калибровка пробегов ионов в ЯЭ должна быть продвинута существенно ниже 1 А МэВ в контролируемых условиях, обеспечиваемых ускорителями и ионными источниками. Эффективным критерием деления на три тяжелых осколка является их суммарный пробег (рис. 13). В этих событиях измерены углы разлета между осколками (рис. 13). Их распределение характеризуется средним значением $(111 \pm 2)^\circ$ при $\text{RMS } 36^\circ$. Можно заключить, что кандидатов на коллинеарное деление пока не обнаружено, а их поиск должен быть продолжен.

ОПЫТ АВТОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

На образцах ЯЭ, облученной тяжелыми ионами, были изучены возможности компьютерного анализа следов на микроскопе HSP-1000 с использованием программы ImageJ [22]. Микроскоп HSP-1000 [23], изготовленный “Сейко Прецижн”, оборудован линейным сенсором высокого разрешения, который осуществляет в 50 раз большую скорость захвата изображения по сравнению с обычными ПЗС-камерами. Полное изображение образца восстанавливается при непрерывном фотографировании относительно малого числа длинных цепочек. До сих пор этот микроскоп использовался при анализе твердотельных детекторов.

На рис. 14 представлены этапы подобного анализа для случая облучения ЯЭ ионами Кг с энергией 1.2 А МэВ на циклотроне ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ. На микроскопе HSP-1000 выполнено фотографирование нескольких сот кадров. Затем настроены параметры отбираемых следов. Далее программа анализирует последовательные кадры. В результате получены распределения пробегов ионов и планарных углов входа ионов (рис. 15). Распределение по углам указывает на наличие двух компонент по заряду ионов. Таким образом, ЯЭ оказывается весьма полезным детектором при детальном анализе ионных пучков.

ОБЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Образцы ЯЭ, изготовленные с добавлением бора (борная кислота и бура), облучались в течение 30 минут на канале тепловых нейтронов на реакторе ИБР-2 ОИЯИ. Последующий анализ образцов дал оценку интенсивности $5 \cdot 10^5$ нейтронов в секунду. Образцы изготавливались поливом слоя борной ЯЭ толщиной около 60 мкм на стеклянную подложку около 2 мм. Использование стекла вело к активации содержащегося в нем натрия, что оказалось проблемным, хотя и неизбежным фактором.

Присутствие в ЯЭ бора позволяет наблюдать заряженные продукты реакции $n_{th} + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li} + (\gamma) + {}^4\text{He}$. Эта реакция, выделяющая 2.8 МэВ, протека-

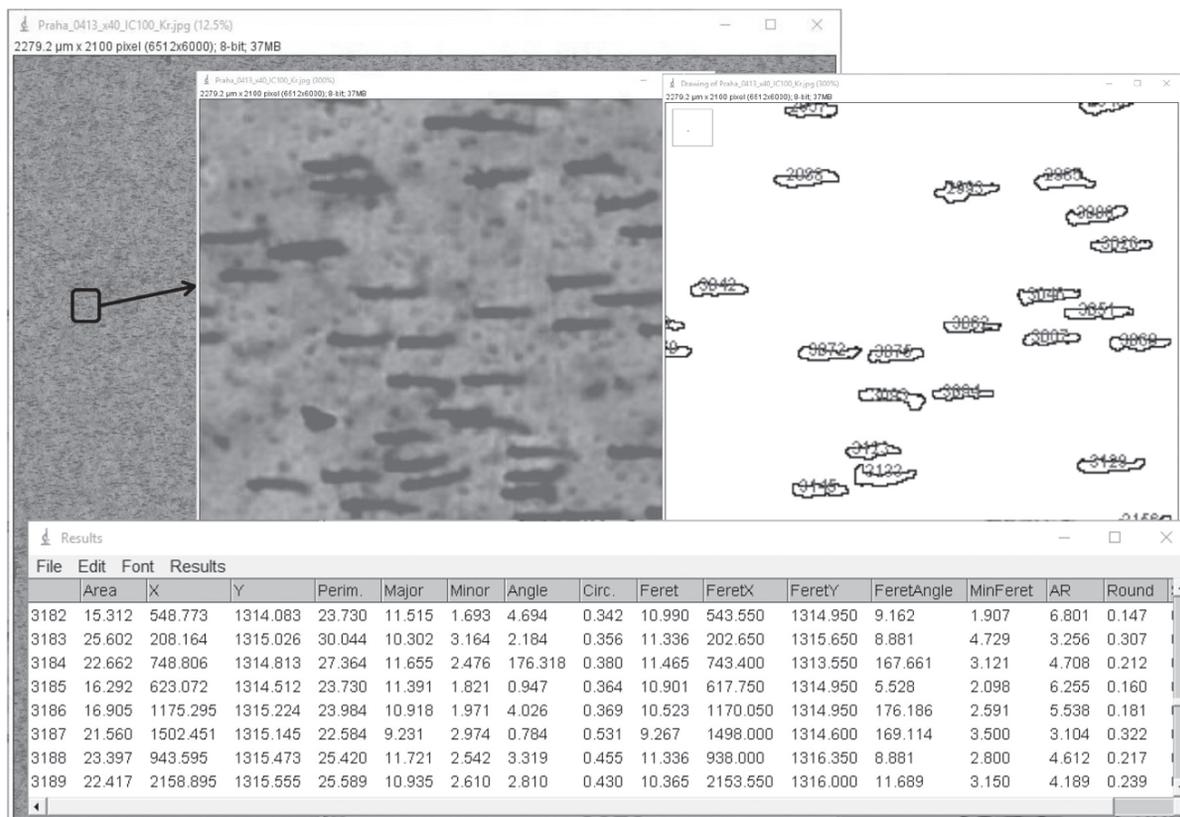


Рис. 14. Иллюстрация распознавания следов в программе ImageJ: сканированная при 20-кратном увеличении поверхность ЯЭ, облученная ионами Kr с энергией 1.2 А МэВ (задний план); фрагмент с различными следами (в центре), обнаруженные объекты с последовательными номерами (справа), выходной список с параметрами найденных объектов.

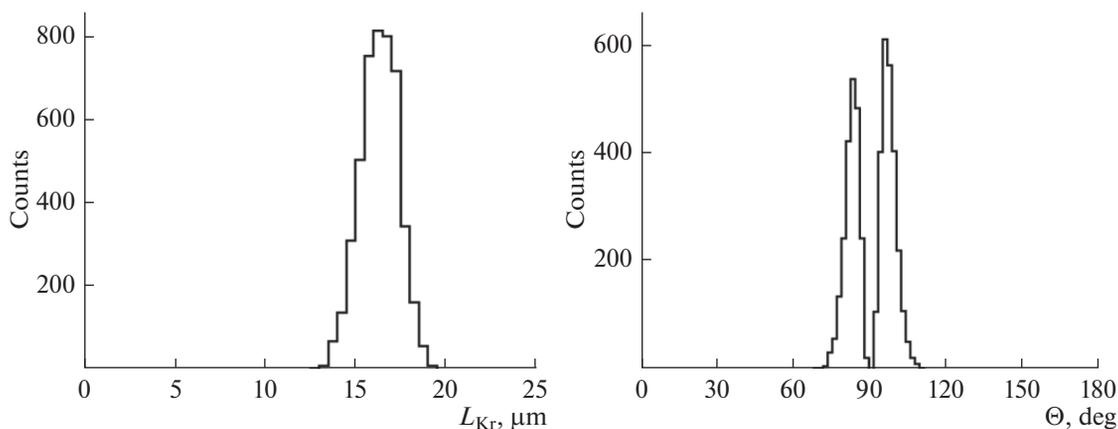


Рис. 15. Результат работы программы ImageJ: длины найденных следов ионов Kr с энергией 1.2 А МэВ (слева) и их планарные углы входа в ЯЭ (справа).

ет с вероятностью 93% с испусканием γ -квантов с энергией 478 кэВ ядром ${}^7\text{Li}$ из единственного возбужденного состояния. Выполнены координатные измерения следов в 112 событиях ${}^7\text{Li} + {}^4\text{He}$. Их на-

правления в парах неколлинеарны и имеют средний угол $\Theta({}^7\text{Li} + {}^4\text{He}) (148 \pm 14)^\circ$ из-за испускания γ -квантов. Среднее значение энергии $Q({}^7\text{Li} + {}^4\text{He})$ составило (2.4 ± 0.2) МэВ при среднеквадратичном рассея-

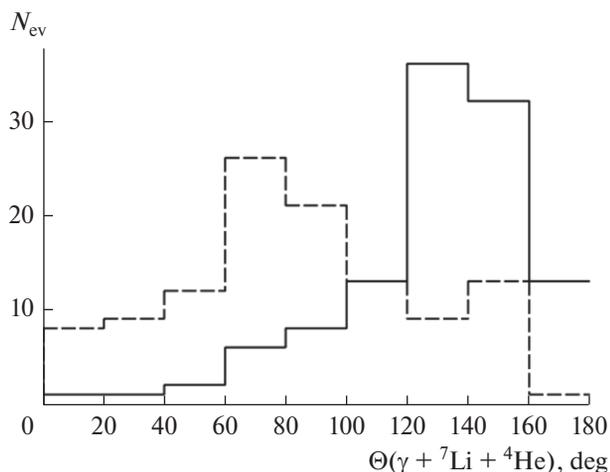


Рис. 16. Распределения по углам $\Theta(\gamma + {}^7\text{Li}, {}^4\text{He})$ между вычисленными направлениями γ -квантов и направлениями ядер ${}^7\text{Li}$ (сплошная) и ${}^4\text{He}$ (штрихованная).

нии 0.8 МэВ в соответствии с энергией уносимой γ -квантом. Распределение углов $\Theta(\gamma + {}^7\text{Li})$ между направлениями испускания γ -квантов, вычисленными согласно закону сохранения импульса, и направлением ${}^7\text{Li}$ указывает на явную антикорреляцию (рис. 16).

Благодаря сканированию на микроскопе HSP-1000 был получен опыт компьютерного счета следов от расщепления ядер бора. Реконструкция планарных следов Li + He и одиночных следов He программой ImageJ [23] позволила найти до 16000 следов вдоль сканированной полосы длиной 25 мм и шири-

ной 1 мм. На основе этих событий был восстановлен профиль пучка тепловых нейтронов (рис. 17).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До сих пор метод ЯЭ основывается на интеллекте, зрении и работоспособности исследователей, использующих традиционные микроскопы. Несмотря на широкий интерес к возможностям этого метода, его трудоемкость ведет к ограниченной статистике в сотни измеренных следов, что составляет, как правило, ничтожную часть доступных событий. Применение компьютеризованных и полностью автоматизированных микроскопов позволяет преодолеть этот разрыв. Эти сложные и дорогие приборы коллективного или даже удаленного пользования позволяют описывать беспрецедентную статистику ядерных следов. Чтобы сделать такое развитие целеустремленным, необходимо сфокусироваться на таких актуальных проблемах ядерной физики, решение которых может быть редуцировано до простых задач распознавания и измерения следов в ЯЭ, решаемых с помощью уже разработанных программ. Тем самым будут созданы предпосылки для широкого распространения этого опыта.

В частности, предложенная задача анализа крайне редких событий тройного деления сводится к нахождению планарных троек ядерных осколков. Начинаясь в общей вершине, будучи случайно направлены, их следы должны иметь протяженность от 1 до 10 мкм. Компьютерный анализ изображений позволит отобрать распады для совершенного ручного анализа. Автоматизация поиска событий тройного деления резко сократит наиболее затратный этап по времени и поможет

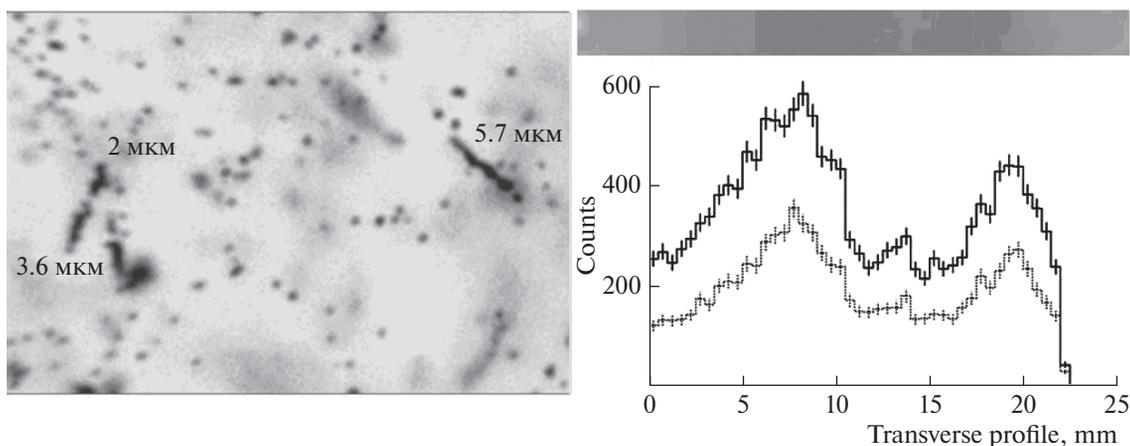


Рис. 17. Макрофотография типичных следов в борной ЯЭ, облученной тепловыми нейтронами (слева); полоса длиной 25 мм, сканированная на автоматическом микроскопе (справа сверху); распределения следов Li + He (выше) и одиночных He (ниже) вдоль по этой полосе (справа снизу).

сфокусировать ручной анализ на уже обнаруженных событиях. Таким образом, ручной и автоматический анализ дополняют друг друга.

В целом, синергия современных источников радиоактивности, проверенной метрологии ЯЭ и продвинутой микроскопии представляется обещающей перспективой исследования α -радиоактивности и ядерного деления. Можно представить, что ионы трансфермиевых элементов будут когда-то имплантированы в ЯЭ. Их яркие распады могут быть найдены как общие вершины для нескольких α -частиц и ядерных осколков. Эта перспектива подчеркивает фундаментальное значение сохранения и модернизации метода ЯЭ. Таким образом, настоящее исследование, сфокусированное на возвращении ЯЭ в практику ядерного эксперимента, послужит прототипом решения впечатляющего числа задач. Макрофотографии облученных образцов и видео, базирующихся на них, доступны на сайте проекта БЕККЕРЕЛЬ [4].

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор обзора считает своим приятным долгом выразить благодарность коллегам, вклад которых позволил осуществить не только испытание воспроизведенной ядерной эмульсии, но и выполнить серию перспективных экспериментов по ядерной физике низких энергий.

Использование новых образцов ядерной эмульсии стало возможным благодаря всесторонней поддержке координатора проекта О.И. Огурка, а также творческой работе сотрудников предприятия “Микрон” Ю.А. Березкиной, А.В. Кузнецова, М.Н. Матвеевой и Л.В. Балабановой (Компания “Славич”, г. Переславль-Залесский). Большую методическую помощь в воспроизводстве технологии ядерной эмульсии оказал А.С. Михайлов (Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова).

Сотрудники эмульсионного сектора Д.А. Артеменков, В. Брандова, А.А. Зайцев, И.Г. Зарубина, Р.Р. Каттабеков, К.З. Маматкулов, Н.В. Кондратьева, Л.И. Куликова, В.В. Русакова Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина ОИЯИ активно участвовали в разнообразных облучениях, проявлениях и анализе ядерной эмульсии, результаты которых вошли в цитируемые здесь публикации. Н.Г. Полухина (ФИАН) и А.И. Малахов (ОИЯИ) оказывали постоянное содействие в наших исследованиях.

Сотрудники ОИЯИ обеспечили облучение образцов ЯЭ: С. Б. Борзаков – на пучке тепловых нейтронов реактора ИБР-2, О.М. Иванов (ОИЯИ) – тяжелыми ионами на циклотроне ИЦ-100, А.Б. Садовский – нейтронами на приборе ДВИН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Powell C.F., Fowler P.H., Perkins D.H.* // Study of Elementary Particles by the Photographic Method. 1959. London: Pergamon.
2. *Barkas W.H.* // Nuclear Research Emulsions. 1963. New York, London: Academic.
3. *Goldschmidt-Cremont Y.* // Ann. Rev. Nucl. Sci. 1953. P. 141.
4. “The BECQUEREL Project” // <http://becquerel.jinr.ru/>.
5. *Zarubin P.I.* // Lect. Notes Phys. 2014. V. 875. № 3 “Clusters in Nuclei.” P. 51.
6. “Slavich Company JSC” // <http://www.newslavich.com/>.
7. *Artemenkov D.A. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10. P. 415.
8. *Artemenkov D.A. et al.* // Few-Body Syst. 2014. V. 55. Nos. 8–10. P. 733736.
9. *Zarubin P.I. et al.* // EPJ Web of Conf. 2014. V. 66. P. 11044.
10. *Kattabekov R.R. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2013. V. 76. P. 1219.
11. *Artemenkov D.A. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2015. V. 78. P. 579.
12. *Kamanin D.V., Pyatkov Y.V.* // Lect. Notes Phys. 2014. V. 875. No. 3 “Clusters in Nuclei.” P. 184.
13. *Mamatkulov K.Z. et al.* // Phys. Procedia. 2015. V. 74. P. 59.
14. *Titterton E.W., Brinkley T.A.* // Nature. 1960. V. 187. P. 228.
15. *Muga M.L., Bowman H.R., Thompson S.G.* // Phys. Rev. 1961. V. 121. P. 271.
16. *Artemenkov D.A. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2015. V. 78. P. 794.
17. *Ajzenberg-Selove F.* // Nucl. Phys. A. 1988. V. 490. P. 1; TUNL. “Nucl. Data Eval. Proj.” <http://www.tunl.duke.edu/NuclData/>.
18. “The BECQUEREL Project” // <http://becquerel.jinr.ru/miscellanea/8He/8He.html>.
19. *Ziegler F., Biersack J.P., Ziegler M.D.* // “SRIM – the Stopping and Range of Ions in Matter.” 2008. SRIM Co. <http://srim.org/>.
20. *Bystritsky V.M. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2009. V. 6. P. 505.
21. *Yamada T., Funaki Y., Horiuchi H., Roepke G., Schuck P., Tohsaki, A.* // Lect. Notes Phys. 2012. V. 848. No. 1 “Clusters in Nuclei.” P. 102.
22. “Image processing and analyses in Java” // <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.
23. “Microscope HSP-100” // <http://www.odz.ujf.cas.cz/home/resources/microscope-hsp-1000>.

Recent Applications of the Nuclear Track Emulsion Technique

P. I. Zarubin

*Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, Joint Institute for Nuclear Research,
Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia*

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

e-mail: zarubin@lhe.jinr.ru

Received May 11, 2006

Abstract—Recent results obtained by means of the nuclear track emulsion (NTE) technique in low energy applications are reviewed. Exposure of NTE to 60-MeV ^8He nuclei makes it possible to identify their decays when they are stopped, to estimate the possibilities of α -range spectrometry, and to observe the drift of thermalized ^8He atoms. Correlations of α particles studied in $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ decays induced by 14.1-MeV neutrons indicate the presence of a superposition of the 0^+ and 2^+ states of the ^8Be nucleus in the ground state of ^{12}C . The study of the angular correlations of fragments produced by thermal neutrons in boron-enriched NTE points to the production of the excited ^7Li nucleus. Prospects of NTE in studies of radioactivity and nuclear fission are discussed. It is suggested to use an automated microscope for searching for a collinear cluster tripartition of heavy nuclei implanted in NTE. Calibrations of α particles and ion ranges in a novel NTE are carried out. Surface exposures of NTE samples to a ^{252}Cf source started. Planar events containing fragments and long-range α -particles, as well as fragment triples only, are studied. Nuclear track emulsion samples are calibrated by ions Kr and Xe with energies of 1.2 and 3 A MeV.

Keywords: nuclear track emulsion, alpha particles, neutrons, heavy ions, automated microscope, fission, cyclotron