

**Заявка на грант «3+3» Полномочного представителя Чешской
республики в ОИЯИ**

Проект

**Автоматизированный анализ взаимодействий нейтронов и
тяжелых ионов в ядерной эмульсии
(Automated analysis of interactions of neutrons and heavy ions
in nuclear track emulsion)**

Обладая превосходной чувствительностью и пространственным разрешением, ядерная эмульсия (ЯЭ) сохраняет позиции универсального и недорогого детектора для обзорных и поисковых исследований в физике микромира. Использование этой классической методики на пучках современных ускорителей и реакторов оказывается весьма продуктивным. В ряде важных задач полнота наблюдений, обеспечиваемая в ЯЭ, остается недостижимой для электронных методов детектирования. В частности, в прошедшее десятилетие исследована кластеризация целого семейства легких ядер, в том числе радиоактивных, в процессах диссоциации релятивистских ядер в ЯЭ [1–4]. В области низких энергий недавно выполнен анализ распадов ядер ^8He , имплантированных в ЯЭ [5] и 3α -развалов ядер ^{12}C термоядерными нейтронами [6]. Работа [6] завершена и опубликована при поддержке грантом «3+3» ПП ЧР в ОИЯИ за 2013. Статистика событий, проанализированных в настоящем исследовании, составляет небольшую долю от наблюдаемого их числа. Это ограничение определяется «разумными» затратами человеческого времени и труда. Вместе с тем, ядерная эмульсия дает основу для применения автоматических микроскопов и программ распознавания изображений, позволяя в перспективе рассчитывать на беспрецедентную статистику анализируемых событий. Тем самым может быть достигнута синергия классической методики и современных технологий. Видео такого решения в эксперименте ОПЕРА находится на странице <http://becquerel.jinr.ru/miscellanea/LNGS/LNGS.html>.

Новый горизонт открывает разработка ЯЭ с субмикронным разрешением для поиска гипотетических частиц темной материи по следам ядер отдачи. Таким образом, постановки впечатляющего разнообразия задач оказываются связанными с возвращением метода ЯЭ в практику ядерного эксперимента на современном уровне. Будущее метода ЯЭ недавно обсуждалось на тематическом совещании [7].

В рамках проекта БЕККЕРЕЛЬ [8] проводятся облучения опытных образцов ЯЭ, произведенных цехом МИКРОН, входящим в состав ОАО «Компания Славич» [9]. Образцы создаются путем полива ЯЭ слоями от 50 до 200 μm на стеклянные подложки. По основным характеристикам данная ЯЭ близка к ЯЭ БР-2 с чувствительностью к релятивистским частицам. Производство ЯЭ БР-2 велось более четырех десятилетий и прекратилось около десяти лет назад. Воспроизведенная ЯЭ [9] уже использовалась для спектрометрии α -частиц по пробегу [3,4]. Накопленный опыт позволяет ставить прикладные задачи по применению ЯЭ для α -дозиметрии.

Опытные облучения направлены, прежде всего, на общий контроль качества и чувствительности ЯЭ к релятивистским частицам, а также на сравнение пробегов ядер медленных сильноионизирующих низких энергий со значениями, вычисляемыми в программе моделирования SRIM [10]. Облучения воспроизведенной ЯЭ на современных пучках ускорителей и реакторов позволяют не только выполнить калибровку пробег-энергия на перспективу, но и сделать физические наблюдения и выводы, имеющие самостоятельную ценность. В свою очередь эти облучения стимулируют развитие самого метода ЯЭ, поскольку предоставляют новый материал для развития автоматических микроскопов и ядерно-физического образования. Настоящий проект объединяет задачи анализа недавних и предстоящих в 2014 г. облучений ЯЭ тепловыми нейтронами и тяжелыми ионами низких энергий. Столь разнообразные постановки экспериментов, включая работы [3] и [4], связаны с единым методическим использованием новой ЯЭ для координатных измерений следов длиной от нескольких до десятков микрон. Видеоматериалы по взаимодействиям, изучаемым в ЯЭ, доступны на сайте [8].

В настоящее время возникает новый круг задач калибровки пробегов тяжелых ионов в ЯЭ. Их решение расширит методическую основу для применения ЯЭ на пучках нейтронов и исследования методом ЯЭ новых аспектов физики деления тяжелых ядер. Применение автоматических микроскопов позволяет на новом уровне подойти к применению ЯЭ в физике нейтронов и тяжелых ионов. В этом отношении уникальные возможности возникают при сотрудничестве эмульсионного сектора ЛФВЭ ОИЯИ и Отделения дозиметрии ИЯФ ЧАН, располагающего мощным автоматизированным микроскопом HSP-1000 фирмы Seiko. В 2014 г. Отделением дозиметрии планируется модернизация этого микроскопа фирмой Seiko для анализа ЯЭ, которая включит его адаптацию и разработку программного обеспечения для работы с объективами 60- и 90-кратного увеличения NIKON в условиях оптического контакта через иммерсионное масло. Существует предварительная договоренность между участниками проекта о 100%-ом использовании гранта ПП ЧР на 2014 по проекту БЕККЕРЕЛЬ как 20%-го вклада в эту важную работу. Цель запроса финансирования по настоящему проекту состоит в обеспечении визитов сотрудников ОИЯИ и ИЯФ для облучения образцов ЯЭ в ОИЯИ и проведении автоматизированного анализа в Отделении дозиметрии. Далее следует резюме состояния неавтоматизированного анализа.

ОБЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Добавление борной кислоты в ЯЭ позволяет решать практические задачи на пучках тепловых нейтронов (n_{th}) – определять профили и потоки. Обогащение ЯЭ бором позволяет наблюдать заряженные продукты реакции $n_{th} + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li} + (\gamma) + {}^4\text{He}$. Эта реакция, дающая выход энергии 2.8 МэВ, с вероятностью около 93 % протекает с испусканием γ -кванта с энергией 478 кэВ ядром ${}^7\text{Li}$ из единственного возбужденного состояния. Образцы ЯЭ, изготовленные с добавлением борной кислоты, были облучены в канале №1 реактора ИБР-2 ОИЯИ тепловыми нейтронами n_{th} при интенсивности примерно $10^7 n_{th} \text{ c}^{-1}$ в течение 30 мин. В 2013 г. в Отделении был получен опыт сканирования ЯЭ при облучении борированной ЯЭ тепловыми нейтронами (<http://becquerel.jinr.ru/miscellanea/Prague-dosimetry/Prague-dosimetry.html>).

Выбранная длительность позволила избежать переоблучения и выполнить координатные измерения следов в 112 событиях ${}^7\text{Li} + {}^4\text{He}$ на микроскопе KSM при 90-кратном увеличении объектива. Благодаря отчетливой разнице в ионизации продуктов реакции, координаты ее вершины определяются с точностью 0.5 – 0.8 мкм. Средняя длина следов ядер Li составила 3.1 ± 0.3 мкм (RMS 0.8 мкм) при средней толщине 0.73 ± 0.02 мкм (RMS 0.05 мкм), а для следов ядер ${}^4\text{He}$, соответственно, 5.5 ± 0.5 мкм (RMS 1.1

мкм) и 0.53 ± 0.01 мкм (RMS 0.04 мкм). На основе этих измерений получены углы разлета для пар из ядер ${}^7\text{Li}$ и ${}^4\text{He}$. Направления разлета в парах оказываются неколлинеарными, как следствие испускания γ -квантов. Значение среднего угла разлета $\Theta({}^7\text{Li} + {}^4\text{He})$ составило $148 \pm 14^\circ$ (RMS 35°). В распределении $\Theta({}^7\text{Li} + {}^4\text{He})$ присутствует несколько событий с $\Theta({}^7\text{Li} + {}^4\text{He}) < 90^\circ$. Их происхождение может быть связано с неразличимым визуальным рассеянием α -частиц на начальных участках вылета из вершины реакции.

Программа моделирования SRIM позволяет дать оценку кинетической энергии ядер на основе измерения длин следов. Знание энергии и углов эмиссии позволяет получить распределение энергии $Q({}^7\text{Li} + {}^4\text{He})$ пар ядер ${}^7\text{Li}$ и ${}^4\text{He}$. Переменная Q определяется как разница между инвариантной массой конечной системы M^* и массой распадающегося ядра M . $Q = M^* - M$. M^* определяется как сумма всех произведений 4-импульсов $P_{i,k}$ фрагментов, т. е. $M^{*2} = (\sum P_j)^2 = \sum (P_i \cdot P_k)$. Ее релятивистски-инвариантный характер позволяет сравнивать единым образом разнородные данные по ядерным реакциям. Среднее значение $Q({}^7\text{Li} + {}^4\text{He})$, составившее 2.4 ± 0.2 МэВ (RMS 0.8 МэВ), соответствует ожидаемому с учетом энергии, уносимой γ -квантом.

Распределение по углу $\Theta(\gamma + {}^7\text{Li})$ между направлениями испускания γ -квантов, вычисленными согласно условию сохранения импульса, и направлениями вылета ядер ${}^7\text{Li}$ проявляет явную антикорреляцию в случае ядер ${}^7\text{Li}$. Оно характеризуется средним значением $\Theta(\gamma + {}^7\text{Li})$ равным $128 \pm 3^\circ$ (RMS 31°) и коэффициентом асимметрии относительно угла 90° равным 0.75 ± 0.07 . В случае ядер ${}^4\text{He}$ среднее значение $\Theta(\gamma + {}^4\text{He})$ составило $84 \pm 4^\circ$ (RMS 40°), а коэффициентом асимметрии 0.14 ± 0.01 .

Таким образом, α -частичные калибровки на основе распадов ядер ${}^8\text{He}$ [5] и развалов ядер ${}^{12}\text{C}$ [6] дополнены применением на пучках тепловых нейтронов и расширены на ядро ${}^7\text{Li}$. Следующим шагом в этом направлении станут калибровочные измерения на основе реакции $n_{\text{th}} + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ в ЯЭ с добавлением бората лития.

ОБЛУЧЕНИЕ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Вызывает интерес применение ЯЭ в физике тройного деления ядер [11]. Спонтанное деление ядер ${}^{252}\text{Cf}$ или деление ${}^{235}\text{U}$, инициированное тепловыми нейтронами, представляется источником поиска молекулярно-подобных ядерных систем. В отношении ${}^{235}\text{U}$ оказывается весьма полезным опыт анализа облучения борированной ЯЭ тепловыми нейтронами, в котором получен и профиль пучка и сделана калибровка. Поэтому задачи по нейтронам и тяжелым ионам оказываются методически связанными.

Эмиссия этих фрагментов может оказаться коллинеарной. При распаде 3-тельной системы один из тяжелых осколков может увлекать легкий. ЯЭ позволит исследовать корреляции при малых углах фрагментов коллинеарного тройного деления. Предполагается, что ЯЭ будет засвечиваться фрагментами деления путем контакта с пленкой, на которой выполнено напыление исследуемого изотопа. В настоящее время ведется анализ ЯЭ, облученной в 2013 г. в Отделении дозиметрии источником ${}^{252}\text{Cf}$, дающего в основном α -частицы и с вероятностью 6% осколки спонтанного деления, а также, для сравнения, источником ${}^{241}\text{Am}$, дающего только α -частицы. Необходимо выполнить калибровку пробегов и оценку углового разрешения для возможно большего разнообразия тяжелых ионов известной энергии, имплантированных в ЯЭ. Энергетическую калибровку важно продвинуть в область ниже значений кулоновского барьера ядерных реакций. Опыт спектрометрии тяжелых ядер по пробегу будет востребован и в поисках гипотетических частиц темной материи.

ЯЭ была облучена ионами $^{86}\text{Kr}^{+17}$ и $^{124}\text{Xe}^{+26}$, ускоренными до энергии около 1.2 А МэВ на циклотроне ИЦ-100 Лаборатории ядерных реакций имени Г. Н. Флерова ОИЯИ. Поскольку энергия этих ионов мала, облучение ЯЭ выполнено без светозащитной бумаги. Поэтому закрепление эмульсионных пластин в камере облучения выполнялось при освещении обыкновенном в фотолаборатории. За 5 сек. облучения плотность следов составила около $10^5 - 10^6$ ядер/см². Эмульсионные слои размерами 9×12 см² и толщиной 161 ± 10 мкм для криптона и 119 ± 3 мкм для ксенона, устанавливались с наклоном 45° к оси пучка, что обеспечило наблюдение остановок ионов. В 2013 г. в Отделении был получен опыт сканирования ЯЭ при облучении ЯЭ тяжелыми ионами. Видеоматериалы по облучению находятся на странице <http://becquerel.jinr.ru/miscellanea/IC-100/IC-100.html>.

Измерения длин треков ионов, остановившихся в слое ЯЭ без рассеяния, выполнялись на микроскопе KSM с 90-кратным увеличением. Средние длины следов без рассеяния составляют для ионов Кг 14.3 ± 0.15 мкм (RMS 0.9 мкм), а для ионов Хе – 17.5 ± 0.1 мкм (RMS 1.0 мкм), что близко к значениям, рассчитанным по модели SRIM, для Кг 18.5 ± 1.3 мкм (RMS 1.3 мкм) и для Хе – 20.1 ± 2.2 мкм (RMS 1.3 мкм). На основе сплайн-интерполяции расчета пробег-энергия измерения длин следов ионов позволяют по модели SRIM дать оценку значений их кинетической энергии. Ее среднее значение составило для Кг 0.74 ± 0.01 А МэВ (RMS 0.1 А МэВ), а для Хе – 0.92 ± 0.01 А МэВ (RMS 0.1 А МэВ). Средние значения, оказавшиеся несколько ниже ожидавшихся величин, указывают на необходимость уточнения моделирования. Средний угол погружения в слой ЯЭ для ионов Кг равен $43.8 \pm 0.6^\circ$ (RMS 4°), а для ионов Хе – $44.7 \pm 0.6^\circ$ (RMS 4°), что соответствует углу ориентации пластины с ЯЭ относительно оси пучка.

Многие из первичных треков завершаются искривлениями и «вилками», являющимися результатами рассеяния на ядрах, составляющих ЯЭ. При торможении до рассеяния энергия ионов снижается до величин на порядок меньших кулоновского барьера. На основе детальных координатных измерений «вилки» предполагается идентифицировать наблюдаемые ядра отдачи и расширить исследование энергетического разрешения до предельно низких значений энергии. Тем самым может быть восстановлена кинематика рассеяния, и разрешение ЯЭ подвергнуто новой проверке. Этот аспект важен для будущей калибровки ЯЭ с субмикронным разрешением для поиска частиц темной материи.

Практическим результатом настоящей работы станет демонстрация возможностей недавно воспроизведенной ядерной эмульсии. Запрашиваемым ресурсом для решения поставленных задачи, являются средства для со-финансирования взаимного командирования и участия в конференциях по ядерной кластеризации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. I. Zarubin, Lect. Notes in Phys., **875**, 51(2013) Springer Int. Publ.; arXiv:1309.4881 [nucl-ex].
2. К. З. Маматкулов и др., ЯФ **76**, 1286(2013) [Phys. At. Nucl. **76**, 1224(2013)]; arXiv:1309.4241 [nucl-ex].
3. Р. Р. Каттабеков и др., ЯФ **76**, 1281(2013) [Phys. At. Nucl. **76**, 1219(2013)]; arXiv:1310.2080 [nucl-ex].
4. Н. К. Корнегруца и др., ЯФ **76**, доп. выпуск, 84(2013).
5. Д. А. Артеменков и др., Письма в ЭЧАЯ **10**, 679(2013). [Phys. of Part. and Nucl. Lett., **10**, 415 (2013)]; arXiv:1309.4808.
6. Р. Р. Каттабеков и др., ЯФ **76**, доп. выпуск, 88(2013).

7. CERN Courier **54**, 1, 42(2014); <http://www.space-science.ro/wnte2013/>
8. The BECQUEREL Project, <http://becquerel.jinr.ru/>
9. Slavich Company JSC, www.slavich.ru , www.newslavich.com.
10. Ziegler J. F., Biersack J. P. and Ziegler M. D. SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter 2008, ISBN 0-9654207-1-X., SRIM Co; <http://srim.org/>.
11. D. V. Kamanin and Y. V. Pyatkov, Lect. Notes in Phys., **875**, 183(2013) Springer Int. Publ.

Ответственные руководители проекта: Зарубин П.И. (ОИЯИ, Дубна), Майлинг Л. (ИЯФ, Ржеж)

Участники проекта: Д. А. Артеменков, Браднава В., Зарубина И. Г., Каттабеков Р. Р., Маматкулов К. З., Русакова В. В., Амброзова, И., Турек К., Плоч А., Вагнер Р.

Работа в рамках темы:

02-1-1087-2009/2014 «Исследования по физике релятивистских тяжелых и легких ионов на Нуклотроне, SPS и SIS18» (рук. Малахов А. И), п.2. «Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ» (рук. Зарубин П.И.)

Цель проекта:

Цель проекта состоит в разработке методов автоматического анализа калибровочных облучений ЯЭ нейтронами и тяжелыми ионами, что даст основу для совместного применения ЯЭ и автоматических микроскопов для исследования новых аспектов физики деления тяжелых ядер. Перспективная цель состоит в освоении возможностей микроскопа HSP-1000 для обеспечения исследований по ядерной физике «на расстоянии».

Ожидаемый результат:

Основной результат должен состоять в в разработке процедур автоматического сканирования облученной ЯЭ и координатного измерения следов тяжелых ионов.

Календарный план:

Июнь – декабрь 2014 г. Модернизация микроскопа HSP-100)

Сентябрь – декабрь 2014 г. Сканирование образцов и совместный анализ статистики.

Декабрь – май 2015 г. Совместный физический анализ статистики, подготовка видеоматериалов и публикации.

Финансовый план:

Командировки 8 000 USD

Руководители проекта: Зарубин П. И.
Майлинг Л.

"Согласовано":

Кекелидзе В. Д
Директор Лаборатории физики высоких энергий
имени В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ