

УТВЕРЖДАЮ

Директор Лаборатории физики высоких энергий

им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

\_\_\_\_\_ В.Д. Кекелидзе

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно-технического совета

Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

Объединенного института ядерных исследований на диссертацию А.А. Зайцева на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук

«Исследование диссоциации релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{C}$  и  $^{12}\text{C}$  методом ядерной  
фотоэмульсии»

Диссертация «Исследование диссоциации релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{C}$  и  $^{12}\text{C}$  методом ядерной фотоэмульсии» выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований. В период подготовки диссертации Зайцев Андрей Александрович работал в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина в должности младшего научного сотрудника отделения №2 «Физика на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН-NICA», Научно-экспериментального отдела физики тяжелых ионов, сектора №4 обработки толстослойных эмульсий. В 2014 году Зайцев А.А. окончил Смоленский государственный университет по специальности 05.02.03 «Физика»; в 2018 году окончил аспирантуру в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по специальности 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц». Удостоверение о сдаче Зайцевым А.А. кандидатских экзаменов выдано в 2019 году Физическим институтом им. П.Н. Лебедева Российской академии наук. Научный руководитель – Зарубин Павел Игоревич, доктор физико-математических наук, - работает в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина в должности начальника сектора №4 обработки толстослойных эмульсий отделения №2 «Физика на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН-NICA», Научно-экспериментального отдела физики тяжелых ионов.

## По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертационная работа посвящена исследованию диссоциации релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$  (1.6 А ГэВ/с),  $^{11}\text{C}$  (2 А ГэВ/с) и  $^{12}\text{C}$  (1 и 4.5 А ГэВ/с) методом ядерной фотоэмульсии. Работа выполнена в рамках эксперимента «Беккерель» на Нуклотроне ОИЯИ, в соответствии с темой «Исследования по физике релятивистских тяжелых и легких ионов на ускорительных комплексах Нуклотрон/NICA ОИЯИ и SPS ЦЕРН» (ПТП 02-1-1087-2009/2020). В наблюдаемых событиях изучались вероятности образования различных конфигураций заряженных релятивистских фрагментов. На основе анализа угловых распределений фрагментов Н и Не определен вклад распадов нестабильных изотопов ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$  и идентифицированы события с образованием троек  $\alpha$ -частиц в состоянии Хойла при диссоциации релятивистских ядер  $^{12}\text{C}$ .

## Актуальность работы:

В качестве фундаментальных элементов своей структуры атомные ядра содержат виртуальные ассоциации нуклонов, или «кластеры». Их простейшие наблюдаемые проявления – легчайшие ядра  $^{4,3}\text{He}$  и  $^{3,2}\text{H}$ , не имеющие возбужденных состояний. Возможные ассоциации нуклонов и кластеров образуют группу легких ядер в начале таблицы изотопов, в числе которых имеются нестабильные ядра. В свою очередь, легкие ядра могут играть роль ядра-основы в структуре более тяжелых ядер. В диссоциации ядра  $^{10}\text{B}$  природа каналов с образованием двух фрагментов Не и одного Н не была изучена ранее. Источником таких мод диссоциации могут быть распады ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$ . Такой эффект был установлен ранее при исследовании релятивистской диссоциации ядра  $^{10}\text{C}$ . Возможное присутствие нестабильных ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$  в ядерной структуре было предположено и для ближайшего изотопа –  $^{11}\text{C}$ , при диссоциации которого также наблюдаются каналы с большой множественностью фрагментов Не и Н. Полученный опыт реконструкции  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$  во фрагментации ядер  $^{10}\text{B}$  и  $^{11}\text{C}$  был расширен для поиска релятивистских распадов состояния Хойла в диссоциации релятивистских ядер  $^{12}\text{C}$ .

Традиционно, исследования кластерных степеней свобод относятся к физике низких энергий, однако при продвижении к релятивистским энергиям возникает ряд преимуществ детектирования, в том числе возможность изучения целого класса радиоактивных ядер. В диссоциации релятивистского ядра кластерные особенности проявляются в наиболее периферических взаимодействиях. В экспериментальном плане, распад релятивистского ядра выглядит как узкая струя вторичных фрагментов в переднем конусе фрагментации, угол раствора которого составляет несколько градусов. Применение магнитных спектрометров с электронным детектированием заставляет ограничиться регистрацией фрагментов с зарядами близкими к изучаемому ядру и, как развитие, одного или пары изотопов Не или Н. При этом пропускаются каналы с более высокой множественностью фрагментов Не и Н. Однако роль этих каналов является ключевой в силу того обстоятельства, что фрагменты Не и Н являются продуктами распадов нестабильных изотопов  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$ . Идентификация релятивистских ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$  возможна по вычислению инвариантной массы системы фрагментов по углу разлета в них. Такой подход требует наилучшего пространственного разрешения, что обеспечивается

в релятивистском случае только методом ядерной фотоэмульсии. Рекордное угловое разрешение (0.1 мрад) ядерной фотоэмульсии также позволяет реконструировать по  $\alpha$ -тройкам с предельно узкими углами разлета релятивистские распады из состояния Хойла.

### **Научная новизна**

Новизна диссертационной работы заключается в извлечении уникальной информации о кластерных возбуждениях легких ядер вблизи порогов диссоциации релятивистских ядер  $^{11}\text{C}$  и  $^{10}\text{B}$ , что включает в себя получение распределения каналов диссоциации по вероятностям образования ансамблей вторичных фрагментов (зарядовая топология) и высокопрецизионные измерения углов эмиссии треков фрагментов в конусе фрагментации. Анализ угловых распределений треков ядер He и H позволил впервые оценить вклад распадов нестабильных ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$  во фрагментацию изучаемых ядер, а также впервые идентифицировать образование трех  $\alpha$ -частиц в состоянии Хойла в реакциях релятивистской диссоциации ядра  $^{12}\text{C}$  с энергиями 450 А МэВ и 3.65 А МэВ. Уникальность полученных результатов основана на рекордном пространственном и угловом разрешении ядерной фотоэмульсии, недоступном для электронных методов детектирования. Идентификация событий в состоянии Хойла в диссоциации релятивистских ядер  $^{12}\text{C}$  откроет перспективу для поиска этим методом молекулярно-подобных состояний с большим числом кластеров и нуклонов в диссоциации более тяжелых ядер, ускоренных на комплексе NICA.

### **Практическая ценность работы**

Результаты, полученные в исследовании диссоциации релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$  и  $^{11,12}\text{C}$ , будут востребованы при планировании экспериментов с высокой статистикой событий и разнообразием детекторов на ядерных пучках нуклотрона ОИЯИ, ускорителя У-70 ИФВЭ и зарубежных исследовательских центров. Кластерная картина диссоциации релятивистских ядер важна для исследований по физике космических лучей и физике промежуточных энергий. В частности, детальная информация о конечных кластерных состояниях ядер может быть полезна для интерпретации данных в экспериментах по кумулятивному рождению частиц, направленных на исследование кварк-партоновых степеней свободы в легких ядрах. В астрофизическом аспекте, сведения о вероятностях образования конечных кластерных состояний могут указать на возможные новые сценарии синтеза ядер, которые не были рассмотрены ранее. Фундаментальные представления о релятивистской фрагментации ядра  $^{11}\text{C}$  необходимы также для применения интенсивных пучков этих ядер в ядерной медицине.

**Достоверность** полученных результатов основана на применении слоев ядерной фотоэмульсии, обладающей рекордным пространственным разрешением, недоступным для электронных методов детектирования. Точность измерения углов испускания фрагментов обеспечена высокопрецизионным оптическим микроскопом KSM-1, разрешающая способность которого позволяет различать узко расходящиеся треки под углом не менее 1 мрад. Результаты, полученные в диссертации, сравниваются с данными более ранних работ. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях. Основополагающие результаты диссертации были опубликованы

в реферируемых и рекомендованных ВАК журналах. В совокупности, всё перечисленное свидетельствует о достоверности полученных в диссертации результатов и сделанных на их основе выводов.

**Научно-технический совет ЛФВЭ ОИЯИ отмечает следующие, наиболее важные, результаты диссертационной работы, в получение которых А.А. Зайцев внес определяющий вклад:**

1. Впервые получено и исследовано распределение каналов по вероятностям образования вторичных фрагментов в событиях диссоциации релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$  и  $^{11}\text{C}$ . Установлено преобладание каналов диссоциации с большой множественностью фрагментов, включающие только ядра He и H.

2. На основании прецизионных измерений углов вылета и изотопной идентификации релятивистских фрагментов He и H в событиях  $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$  и  $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$  впервые определен вклад нестабильных ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$ .

3. В диссоциации релятивистских ядер  $^{12}\text{C}$  с импульсом 1 А ГэВ/с и 4.5 А ГэВ/с впервые идентифицированы события с образованием трех  $\alpha$ -частиц в состоянии Хойла, установлены особенности их образования.

Диссертационная работа А.А. Зайцева представляет собой законченное исследование. Её актуальность, научная новизна и достоверность полученных результатов и выводов не вызывает сомнений. Поставленная перед соискателем задача успешно выполнена.

Результаты, представленные в диссертации, обсуждались на научных семинарах в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина и опубликованы в научных работах, а также докладывались на международных и российских конференциях.

**Основное содержание работы отражено в следующих опубликованных работах:**

1. A.A. Zaitsev et al. *Dissociation of relativistic  $^{10}\text{B}$  nuclei in nuclear track emulsion* // Phys. Part. Nucl. 48 (2017), pp. 960-963; А.А. Зайцев и др. *Диссоциация релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$  в ядерной эмульсии* // Физика элементарных частиц и атомного ядра 48 №6 (2017), с. 919-924;

2. D.A. Artemenkov ... A.A. Zaitsev et al. *Recent Findings in Relativistic Dissociation of  $^{10}\text{B}$  and  $^{12}\text{C}$  Nuclei* // Few-Body Systems 58 (2017), pp. 89-92;

3. D.A. Artemenkov ... A.A. Zaitsev et al. *Charge topology of the coherent dissociation of relativistic  $^{11}\text{C}$  and  $^{12}\text{N}$  nuclei* // Phys. Atom. Nucl. 78 (2015), pp. 794-799; Д.А. Артеменков ... А.А. Зайцев и др. *Зарядовая топология когерентной диссоциации релятивистских ядер  $^{11}\text{C}$  и  $^{12}\text{N}$*  // Ядерная физика, 78 №9 (2015), с. 845-845;

4. D.A. Artemenkov ... A.A. Zaitsev et al. *Study of the Involvement of  $^8\text{Be}$  and  $^9\text{B}$  Nuclei in the Dissociation of Relativistic  $^{10}\text{C}$ ,  $^{10}\text{B}$ , and  $^{12}\text{C}$*  // Phys. Atom. Nuclei, 80 (2017), pp. 1126-1132;

*Исследование диссоциации релятивистских ядер  $^{10}\text{C}$ ,  $^{10}\text{B}$  и  $^{12}\text{C}$ , сопровождаемой ядрами  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$*  // Ядерная физика, 2017. – Т.80. – №.6. – с. 645-651;

5. D.A. Artemenkov, A.A. Zaitsev, P.I. Zarubin *Search for the Hoyle State in Dissociation of Relativistic  $^{12}\text{C}$  Nuclei* // Phys. Part. Nucl. 49 (2018), pp. 530-539; Д.А. Артеменков, А.А. Зайцев, П.И. Зарубин *Поиск состояния Хойла в диссоциации релятивистских ядер  $^{12}\text{C}$*  // Физика элементарных частиц и атомного ядра 49 №4 (2018), с. 929-945;

6. Zaitsev A. A., Zarubin P. I. *Application of nuclear track emulsion in search for the Hoyle state in dissociation of relativistic  $^{12}\text{C}$  nuclei* // Phys. Atom. Nuclei, 81 №9 (2018).– pp. 1237-1243; А.А. Зайцев, П.И. Зарубин *Применение ядерной эмульсии для поиска состояния Хойла в диссоциации релятивистских ядер  $^{12}\text{C}$*  // Ядерная физика и инжиниринг 8 №5 (2017), с. 425-431;

7. D.A. Artemenkov ... A.A. Zaitsev et al. *Nuclear track emulsion in search for the Hoyle-state in dissociation of relativistic  $^{12}\text{C}$  nuclei* // Radiation Measurements 119 (2018), pp. 199-203;

8. D.A. Artemenkov, A.A. Zaitsev, P.I. Zarubin *Unstable nuclei in dissociation of light stable and radioactive nuclei in nuclear track emulsion* // Phys. Part. Nucl. 48 (2017), pp. 147-157;

9. D.A. Artemenkov ... A.A. Zaitsev et al. *Progress of analysis of dissociation of  $^{10}\text{C}$ ,  $^{10}\text{B}$  and  $^{12}\text{C}$  nuclei in nuclear track emulsion* // EPJ Web of Conf. 138 (2017), p. 01030;

10. D.A. Artemenkov ... A.A. Zaitsev et al. *Unstable nuclei in coherent dissociation of relativistic nuclei  $^7,9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$  and  $^{10,11}\text{C}$*  // J. Phys: Conf. Ser. 724 (2016), p. 012055;

11. D.A. Artemenkov ... A.A. Zaitsev et al.  *$^8\text{Be}$  and  $^9\text{B}$  nuclei in dissociation of relativistic  $^{10}\text{B}$  and  $^{11}\text{C}$  nuclei* // J. Phys: Conf. Ser. 675 (2016), p. 022003.

**Основные результаты и отдельные положения диссертации лично докладывались автором на следующих конференциях:**

European Nuclear Physics Conference EuNPC 2018, (г. Болонья, Италия, 2018); New Trends in High-Energy Physics (г. Будва, Черногория, 2016 г.); VIII International Symposium on EXotic Nuclei 2016 (г. Казань, Россия, 2016 г.); X и XII Черенковские чтения (г. Москва, Россия, 2016 и 2018 гг.); International Session-Conference of the Section of Nuclear Physics of PSD RAS (г. Нальчик, Россия, 2017 г.); Международная Сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН, (г. Дубна, Россия, 2017); XXIV International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems 2018 (г. Дубна, Россия, 2018г.); LXVIII INTERNATIONAL CONFERENCE “NUCLEUS 2018“ (г. Воронеж, Россия, 2018 г).

Диссертация Зайцева Андрея Александровича «Исследование диссоциации релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{C}$  и  $^{12}\text{C}$  методом ядерной фотоэмульсии» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Заключение принято на заседании Научно-технического совета Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований. Присутствовало на заседании 23 члена НТС ЛФВЭ из полного состава численностью 40 человек. Результаты голосования: «за» – 23 человека, «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол №2 от 19 марта 2019 года.

Заключение составил  
доктор физ.-мат. наук

А.Г. Литвиненко

Председатель НТС ЛФВЭ  
доктор физ.-мат. наук

Е.А. Строковский

Ученый секретарь НТС ЛФВЭ  
кандидат физ.-мат. наук

С.П. Мерц