

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук

Демьяновой Аллы Сергеевны

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

Диссертационная работа Зайцева Андрея Александровича посвящена экспериментальному исследованию структурных особенностей диссоциации релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{C}$  и  $^{12}\text{C}$ , включая реконструкцию распадов короткоживущих ядерных объектов  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{B}$  и  $^{12}\text{C}$  в состоянии Хойла (второе возбужденное состояние ядра  $^{12}\text{C}$ ), методом ядерной фотоэмульсии. В диссоциации релятивистского ядра кластерные особенности проявляются в наиболее периферических взаимодействиях. Идентификация релятивистских ядер  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{B}$  возможна по вычислению инвариантной массы системы фрагментов, по их импульсам. Такой подход требует наилучшего пространственного и углового разрешения, что обеспечивается в релятивистском случае только методом ядерной фотоэмульсии. Уникальность проведенного исследования заключается в рекордном угловом разрешении (вплоть до 0.1 мрад), которое позволило реконструировать релятивистские распады короткоживущих ядерных резонансов в предельно узкие струи фрагментов, в том числе распады ядер  $^{12}\text{C}$  из состояния Хойла.

**Актуальность** выполненного исследования состоит в применении концепций и экспериментальных методов релятивистской ядерной физики для развития представлений о нуклонной кластеризации в ядрах. Несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные работы, многие вопросы кластеризации остаются открытыми. Традиционно исследования кластеризации нуклонов в ядрах прерогатива физики средних энергий, в данной области энергий получена достаточно подробная информация о структуре ядер. Однако при продвижении к релятивистскому масштабу энергий возникают принципиальные преимущества экспериментального плана и полученные таким образом данные формируют целостное представление о кластеризации ядер.

**Новизна** диссертационной работы заключается в исследовании особенностей диссоциации релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$  и  $^{11}\text{C}$ , в которых впервые установлено преобладание каналов  $2\text{He} + \text{H}$  и  $2\text{He} + 2\text{H}$ , соответственно. Впервые идентифицирован и установлен вклад каналов с нестабильными ядрами  $^8\text{Be}$  и  $^{10}\text{B}$  в диссоциацию релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$  и  $^{11}\text{C}$ . Именно, вследствие применения метода ядерной фотоэмульсии с рекордным пространственным разрешением, из фрагментации релятивистских ядер  $^{12}\text{C}$  удалось идентифицировать события с образованием трех  $\alpha$ -частиц, отвечающих состоянию Хойла.

В **практическом плане** полученные в диссертационной работе результаты могут быть востребованы при планировании экспериментов с релятивистскими пучками ядер в ведущих научных центрах, как нашей страны (ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт»), так и за рубежом. Данные по диссоциации релятивистских ядер могут стать основой для теоретических моделей, описывающих механизм релятивистской фрагментации ядер. Развитый подход и метод регистрации ядерно-молекулярных объектов  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^{12}\text{C}$  в состоянии Хойла в дальнейшем могут стать ориентирами для поиска сложных состояний разреженной ядерной материи при диссоциации более тяжелых релятивистских ядер в ультра узкие струи легчайших ядер.

Выполненный сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с данными более ранних работ показал, что метод ядерной фотоэмульсии, обладающий рекордным пространственным и энергетическим разрешением, дает **надежные и достоверные** результаты диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, списка опубликованных работ и приложения с иллюстрациями характерных событий в ядерной эмульсии.

**Во Введении** обосновывается актуальность исследования, формулируются цели и задачи работы, представлены использующиеся для анализа данных методология и сама фотоэмульсионная методика. Дан обзор предшествующих работ, в котором прослеживается кластерная взаимосвязь легких ядер.

В **Главе 1** представлено исследование по диссоциации релятивистского ядра  ${}^{10}\text{B}$  с энергией  $1\text{ A}$  ГэВ. Используемая методика позволила исследовать зарядовый состав вторичного пучка и выполнить анализ полученной топологии диссоциации ядра  ${}^{10}\text{B}$ . Впервые из угловых распределений релятивистских фрагментов He и H в лидирующем канале диссоциации  $\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$  (76%) получены достоверные указания на существование событий с образованием узких струй  $\alpha$ -пар и троек  $2\alpha + \text{p}$ . Также распределения по инвариантной массе систем  $2\alpha$  и  $2\alpha\text{p}$  указывают на образование в этих каналах нестабильных ядер  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$  с вероятностями  $(24 \pm 3)\%$  и  $(12 \pm 2)\%$  соответственно. Проведенная изотопная идентификация релятивистских фрагментов H позволила определить распады ядра  ${}^8\text{Be}$  из первого возбужденного состояния.

Детальное понимание диссоциации ядра  ${}^{10}\text{B}$  послужило основой для интерпретации данных для следующего изотопа –  ${}^{11}\text{C}$ . Исследованию структуры ядра  ${}^{11}\text{C}$  посвящена следующая **глава 2**. Была получена информация о вероятностях образования комбинаций вторичных фрагментов при диссоциации релятивистского ядра  ${}^{11}\text{C}$ . Как и в случае диссоциации ядра  ${}^{10}\text{B}$  доминируют каналы, содержащие только фрагменты He и H. Сравнительный анализ топологии диссоциации изотопов углерода указал на появление нового канала  $\text{Li} + \text{He} + \text{H}$ , характерного только для ядра  ${}^{11}\text{C}$ . В каналах  $2\text{He} + 2\text{H}$  и  $3\text{He}$  по инвариантной массе системы  $2\alpha$  реконструированы распады ядра  ${}^8\text{Be}$  из основного состояния и достаточно надежно определен их вклад в эти каналы на уровне  $(20 \pm 3)\%$  и  $(25 \pm 2)\%$  соответственно. В

свою очередь в канале  $2\text{He} + 2\text{H}$  установлен факт образования ядер  ${}^9\text{B}$  в  $(13 \pm 1)\%$  событий. В целом, проведенный анализ диссоциации ядра  ${}^{11}\text{C}$  указал на присутствие в его структуре кластеров  ${}^{10}\text{B} + p$  и  ${}^7\text{Be} + \alpha$ .

Полученный опыт реконструкции ядер  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$  был применен для поиска релятивистских распадов состояния Хойла, чему посвящена **глава 3**. Эксперименты проводились в Институте физики высоких энергий (г. Протвино) с пучком ядер  ${}^{12}\text{C}$  с импульсом  $1 \text{ A ГэВ}/c$  и ранее на синхрофазотроне ОИЯИ при импульсе  $4.5 \text{ A ГэВ}/c$ . В первом случае было отобрано 86 событий  ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ , во втором – 186 событий. Такой охват по энергии позволил проверить универсальность идентификации состояния Хойла в переменной инвариантной массы. В распределении по инвариантной массе пар  $\alpha$ -частиц в обоих случаях был установлен вклад ядер  ${}^8\text{Be}$  на уровне 20%. С достаточной надежностью был сделан вывод о наблюдении событий в состоянии Хойла с вкладом около 11% в обоих облучениях.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые выносятся автором на защиту.

Диссертация, в целом, производит хорошее впечатление. Следует отметить высокий методический и экспериментальный уровень работы, а также адекватность выбранной методики поставленным в диссертации задачам. Необходимо отметить, что ряд результатов невозможно получить вне рамок фотоэмульсионной методики, и это делает полученные данные особенно ценными для ядерной физики.

Вместе с тем диссертационная работа не лишена недостатков. В пункте 3 основных положений, выносимых на защиту; не совсем корректно сформулировано следующее положение; «Впервые идентифицировано образование троек  $\alpha$ -частиц в состоянии Хойла и установлены особенности их образования в диссоциации релятивистских ядер  ${}^{12}\text{C}$ » - скорее нужно представить это положение следующим образом, что именно применяемая уникальная фотоэмульсионная методика позволила реконструировать образование 3-х альфа частиц, соответствующих состоянию Хойла в диссоциации релятивистских ядер  ${}^{12}\text{C}$ .

Состояние Хойла было экспериментально обнаружено в 1957 году. Оно расположено на  $0.287 \text{ МэВ}$  выше порога развала на 3  $\alpha$ -частицы. В настоящее время, в ядерной физике широко обсуждается внутренняя структура этого состояния, которая до сих пор не известна. Одно из последних возможных предложенных конфигураций этого состояния: разреженный газ  $\alpha$ -частиц – бозе-эйнштейновский конденсат.

Указанное замечание не снижает главного достоинства диссертационной работы Андрея Александровича Зайцева – получения качественно новых экспериментальных данных.

Диссертация Зайцева Андрея Александровича представляет собой законченное исследование. По теме диссертации опубликованы 11 статей в реферируемых отечественных и зарубежных журналах. Основные результаты диссертации

обсуждались на международных и российских конференциях и семинарах, в которых Зайцев А. А. принимал личное участие.

Диссертация изложена на 100 страницах печатного текста, включая 49 рисунков, 15 таблиц и 10 микрофотографий с примерами взаимодействия релятивистских ядер в ядерной эмульсии. Список литературы содержит 58 наименований. Автореферат правильно и полностью отражает основное содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Зайцева Андрея Александровича по теме «Исследование диссоциации релятивистских ядер  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{C}$  и  $^{12}\text{C}$  методом ядерной фотоэмульсии» и ее автореферат отвечают требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Зайцев Андрей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц за получение новых экспериментальных данных, которые внесут определенный вклад в развитие современных знаний о структуре атомных ядер.

Отзыв составила:

начальник лаборатории ядерных структур  
Национального исследовательского центра

«Курчатовский институт»

доктор физ.-мат. наук

А.С. Демьянова

15.05.2019

Адрес: 123182 Россия, г. Москва,

пл. Академика Курчатова д. 1

Федеральное государственное бюджетное учреждение

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

лаборатория ядерных структур

тел: +7 (499) 196-93-09

e-mail: a.s.demyanova@bk.ru

Подпись Демьяновой А.С. заверяю

Главный ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт»

доктор физ. - мат. наук



П.А. Форш