

# СТАТУС ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ВО ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДЕР-МИШЕНЕЙ В ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

*А. М. Горин<sup>1</sup>, Н. Е. Воронков<sup>1</sup>, С. В. Евдокимов<sup>1</sup>,  
А. А. Зайцев<sup>2,3,\*</sup>, П. И. Зарубин<sup>2,3</sup>, В. И. Изучеев<sup>1</sup>,  
Н. Маримутху<sup>2</sup>, В. И. Рыкалин<sup>1</sup>, С. А. Садовский<sup>1</sup>,  
А. А. Шангараев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,  
Протвино, 142281, Россия

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

<sup>3</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия

Представлены первые результаты исследования нестабильных ядерных состояний, возникающих в процессах  $\alpha$ -фрагментации ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  в ядерной фотоэмульсии под действием релятивистских заряженных адронов с импульсом 7 ГэВ/с. Методика исследования основана на идентификации событий с образованием не менее трех короткопробежных  $\alpha$ -частиц, что позволяет осуществить полную кинематическую реконструкцию событий в условиях  $4\pi$ -геометрии детектирования. Благодаря прецизионным координатным измерениям треков  $\alpha$ -частиц в ядерной эмульсии определены их полные пробеги и углы эмиссии, а также восстановлены их кинетические энергии. На этой основе восстановлены инвариантные массы пар и троек  $\alpha$ -частиц в каждом событии. Анализ спектров инвариантных масс позволил дать количественную оценку вероятности образования низколежащих возбужденных состояний ядер  $^8\text{Be}$  и  $^{12}\text{C}$  и показал перспективность дальнейшего изучения  $\alpha$ -частичной диссоциации ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  методом ядерной фотоэмульсии при существенно большей статистике, которой планируется достигнуть с помощью роботизированного микроскопа с автоматическим распознаванием изображений.

The paper presents the first results of a study of unstable nuclear states arising in the processes of  $\alpha$  fragmentation of  $^{12}\text{C}$  and  $^{16}\text{O}$  nuclei in nuclear photoemulsion under the action of relativistic charged hadrons with a momentum of 7 GeV/c. The experimental technique is based on the identification of events with the production of at least three short-range  $\alpha$  particles, which makes it possible to perform a full kinematic reconstruction of the events under conditions of  $4\pi$ -detection

---

\* E-mail: zaicev@jinr.ru

geometry. Owing to precision coordinate measurements of  $\alpha$ -particle tracks in nuclear emulsion, their full ranges and emission angles were determined, and their kinetic energies were reconstructed. On this basis, the invariant masses of  $\alpha$ -particle pairs and triplets were obtained for each event. The analysis of the invariant mass spectra provided a quantitative estimate of the probability of formation of low-lying excited states of  ${}^8\text{Be}$  and  ${}^{12}\text{C}$  nuclei and demonstrated the prospects for further investigation of  $\alpha$ -particle dissociation of  ${}^{12}\text{C}$  and  ${}^{16}\text{O}$  nuclei using the nuclear photoemulsion method with significantly higher statistics, which is expected to be achieved with the help of a robotic microscope with automatic image processing.

PACS: 25.70.Pq; 29.40.Rg; 21.60.Gx

## ВВЕДЕНИЕ

Фрагментация легких ядер в их взаимодействиях с высокоэнергетическими заряженными адронами является эффективным инструментом для изучения внутренней структуры и динамики атомных ядер [1–4]. Подобные исследования не только углубляют фундаментальные представления о природе ядерной материи, но и значимы в прикладных направлениях современной науки. В этом контексте особое внимание привлекают ядра  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$ , отличающиеся ярко выраженной  $\alpha$ -кластерной структурой [5–7]. Изучение механизмов их распада на  $\alpha$ -частицы в адрон-ядерных столкновениях высоких энергий позволяет выявить закономерности образования нестабильных ядерных состояний, таких как резонансы в ядре  ${}^8\text{Be}$  и состояние Хойла в  ${}^{12}\text{C}$ , и тем самым получить важную информацию о роли кластерных конфигураций в динамике ядерных реакций. Особый интерес представляет возможность восстановления угловых и импульсных характеристик  $\alpha$ -фрагментов, по которым можно судить о механизмах образования промежуточных состояний и их связи с коллективными степенями свободы в легких ядрах.

Актуальность задачи также определяется тем, что нестабильные состояния ядра  ${}^8\text{Be}$  и состояние Хойла в  ${}^{12}\text{C}$  играют ключевую роль в астрофизическом процессе трехтельной  $\alpha$ -реакции, ответственной за образование углерода в звездах [8, 9]. Таким образом, исследование механизмов  $\alpha$ -фрагментации ядер  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$  под действием адронов высоких энергий имеет как фундаментальное значение для понимания кластерной структуры атомных ядер, так и прикладное значение в контексте ядерной астрофизики. Исследование нестабильных  $\alpha$ -частичных состояний во фрагментации ядерных мишеней активно проводится и с использованием времяпроекционных камер [10]. Однако эти методы имеют ряд недостатков, связанных с порогами регистрации медленных частиц, геометрической эффективностью и трудностями идентификации событий с очень малыми углами разлета между фрагментами. Важным преимуществом представленной работы является использование метода ядерных фотоэмульсий, который обеспечивает регистрацию треков частиц с высоким пространственным разрешением. Это позволяет проводить анализ в усло-

виях полной  $4\pi$ -геометрии и осуществлять полную кинематическую реконструкцию событий. Такой подход открывает возможность детального исследования угловых распределений, продольных и поперечных импульсов  $\alpha$ -частиц, а также восстановления инвариантных масс систем из двух и трех  $\alpha$ -фрагментов, что критически важно для идентификации нестабильных ядерных состояний.

Целью настоящей работы является исследование угловых характеристик  $\alpha$ -фрагментов и реконструкция инвариантных масс образующихся систем  $\alpha$ -частиц в событиях диссоциации ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  под действием заряженных адронов высоких энергий с целью поиска низлежащих возбужденных состояний ядер  $^8\text{Be}$  и  $^{12}\text{C}$ .

## 1. НЕСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЯДЕР $^8\text{Be}$ И $^{12}\text{C}$

Изучение нестабильных состояний легких ядер, возникающих при их  $\alpha$ -фрагментации, играет ключевую роль в понимании механизмов ядерных реакций и природы кластеризации нуклонов. В этом аспекте наиболее показательными объектами для подобных исследований являются ядра  $^8\text{Be}$  и  $^{12}\text{C}$ , которые в силу своей структуры демонстрируют выраженные признаки  $\alpha$ -кластеризации [5–7].

Ядро  $^8\text{Be}$  в основном состоянии ( $0^+$ ) является нестабильным и распадается на две  $\alpha$ -частицы с крайне малой энергией связи (около 92 кэВ) [11]. Это делает его исключительно важным звеном в  $\alpha$ -кластерных сценариях и ключевым промежуточным состоянием в  $3\alpha$ -реакции [12]. Первое возбужденное состояние  $^8\text{Be}$  ( $2^+$ , около 3 МэВ) также значимо проявляется в экспериментах по фрагментации ядер, что позволяет получить информацию о распределении углового момента между  $\alpha$ -кластерами [5, 13]. Соотношение между выходами основных и возбужденных состояний  $^8\text{Be}$  в реакциях с легкими ядрами рассматривается как один из фундаментальных индикаторов  $\alpha$ -кластерной структуры ядер [14].

Особый интерес представляет ядро  $^{12}\text{C}$ , которое традиционно рассматривается как «лаборатория»  $\alpha$ -кластеризации. В классических моделях структура его основного состояния описывается как суперпозиция конфигураций трех  $\alpha$ -кластеров с различными орбитальными моментами [15]. Ключевое значение имеет наличие второго возбужденного состояния  $0_2^+$  (так называемое состояние Хойла), расположенного на 380 кэВ выше порога распада  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  [16]. Изучение этого состояния дает возможность проверить гипотезы о пространственном распределении  $\alpha$ -кластеров и существовании  $\alpha$ -частичных конденсатных конфигураций [17].

В экспериментах по взаимодействию ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  с адронами высоких энергий регистрация  $\alpha$ -фрагментов и восстановление инвариантных масс пар и троек  $\alpha$ -частиц позволяют идентифицировать образования промежуточных возбужденных состояний  $^8\text{Be}^*$  и  $^{12}\text{C}^*$ . В частности,

появление характерных пиков в спектрах инвариантных масс  $\alpha$ -частичных систем свидетельствует об образовании нестабильных ядерных состояний [18]. Такие исследования представляют собой прямой метод проверки  $\alpha$ -кластерных моделей и механизмов их проявления в условиях высокоэнергетических ядерных столкновений.

## 2. АНАЛИЗ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ $\alpha$ -ФРАГМЕНТОВ В СОБЫТИЯХ $^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$ И $^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$

Для настоящего исследования было проведено облучение опытных образцов ядерных фотоэмульсий в пучке положительно заряженных адронов с импульсом 7 ГэВ/с 18-го канала ускорительного комплекса У-70 в зоне экспериментальной установки «Гиперон-М» [19]. Поиск неупругих взаимодействий релятивистских адронов с ядрами из состава ядерной эмульсии осуществлялся при помощи оптического микроскопа методом сканирования по полосам. Из всего многообразия найденных событий были отобраны события, в которых регистрировались 3 трека  $b$ -частиц, см. [20], полностью остановившихся в веществе ядерной эмульсии и имеющих пробег не более 100 мкм. Такой критерий позволяет идентифицировать в эмульсии треки  $\alpha$ -частиц от других возможных вторичных фрагментов, образующихся в результате диссоциации ядер. К настоящему времени для анализа доступна статистика в 51 событие  $^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$  и 14 событий  $^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$ .

Для каждого события определялись пространственные характеристики эмиссии  $\alpha$ -частиц. По измеренным координатам вершины взаимодействия  $(x_0, y_0, z_0)$  и концов треков  $(x, y, z)$  вычислялись пространственные векторы вылета  $\alpha$ -частиц. На их основе определялись следующие углы: полярный угол  $\theta$  — угол между направлением трека  $\alpha$ -частицы и осью пучка (ось  $Z$ ), азимутальный угол  $\varphi$  — угол между проекцией трека на плоскость эмульсии ( $XY$ ) и осью  $X$ , глубинный угол  $\alpha$  — угол наклона трека относительно плоскости эмульсии ( $XY$ ). На рис. 1 представлено распределение по азимутальному  $\varphi$  (а) и глубинному  $\alpha$  (б) углам эмиссии  $\alpha$ -частиц в событиях  $^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$  и  $^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$ . Распределения по глубинному углу демонстрируют ярко выраженную концентрацию событий в окрестности  $\alpha \approx 0$  рад, с уменьшением выхода при больших углах  $\alpha$ . Данная особенность обусловлена совокупностью геометрических факторов регистрации в эмульсии и анизотропной эмиссией  $\alpha$ -фрагментов в лабораторной системе. В свою очередь, распределения по азимутальному углу  $\varphi$  близки к равномерным на интервале  $[-\pi, \pi]$ , что указывает на отсутствие предпочтительных направлений в плоскости эмульсии ( $XY$ ). Различия в малых флуктуациях объясняются меньшей статистикой для событий фрагментации  $^{16}\text{O}$ . Сопоставление выборок  $^{12}\text{C}(h, h') \rightarrow 3\alpha$  и  $^{16}\text{O}(h, h') \rightarrow 4\alpha$  показывает качественное согласие указанных закономерностей для обоих ядер, что свидетельствует об общности динамики фрагментации.

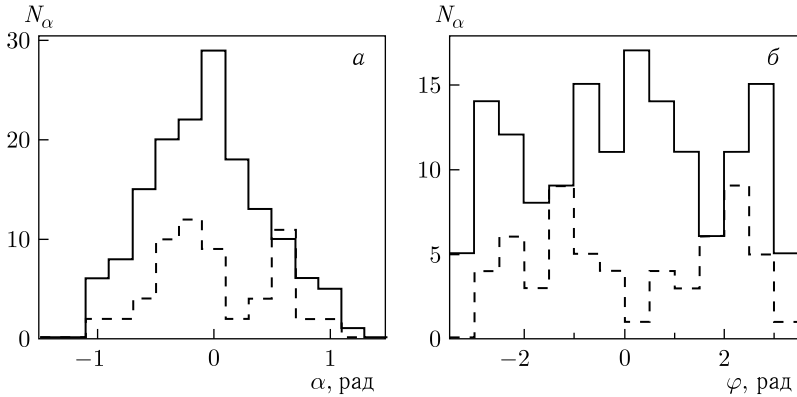


Рис. 1. Распределение по глубинному (*а*) и азимутальному (*б*) углам эмиссии  $\alpha$ -частиц в событиях диссоциации ядер  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  (сплошная линия) и  $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$  (штриховая линия), образующихся во взаимодействиях с заряженными адронами с импульсом 7 ГэВ/с

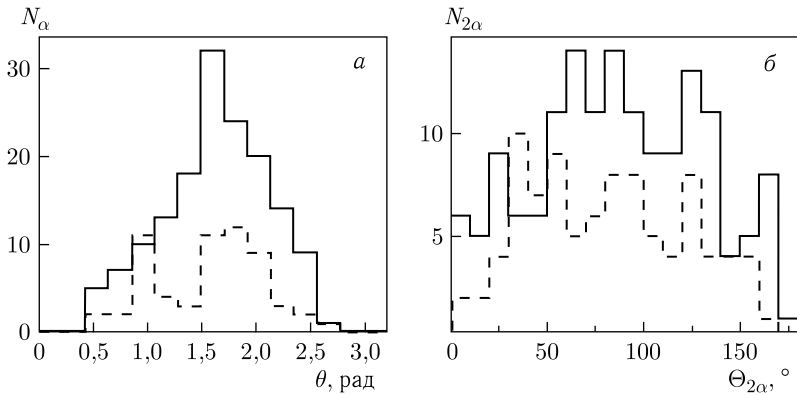


Рис. 2. Распределение по полярному углу  $\theta$  (*а*) и парному углу  $\Theta_{2\alpha}$  (*б*) эмиссии  $\alpha$ -частиц в событиях диссоциации ядер  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  (сплошная линия) и  $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$  (штриховая линия), образующихся во взаимодействиях с заряженными адронами с импульсом 7 ГэВ/с

Распределения по полярному углу  $\theta$  (рис. 2, *а*) демонстрируют ярко выраженный максимум вблизи  $\theta \approx 90^\circ$ , что соответствует преимущественно поперечной эмиссии  $\alpha$ -фрагментов относительно оси падения пучка адронов. Такое распределение может свидетельствовать о коллективных эффектах в механизме диссоциации и не сводится к чисто статистическому эффекту.

На рис. 2, *б* показан спектр по парному углу разлета  $\Theta_{2\alpha}$  в событиях  $^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$  и  $^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$ . Видно, что распределение носит нелиней-

ный характер: группы событий концентрируются в отдельных угловых интервалах. Подобная структура указывает на то, что процесс образования  $\alpha$ -частиц не сводится к статистическому механизму диссоциации. Вероятнее всего, это отражает вклад промежуточных коррелированных состояний, в первую очередь образования нестабильных ядер  ${}^8\text{Be}$  в основном и возбужденных состояниях. Малые углы  $\Theta_{2\alpha}$  соответствуют  $\alpha$ -парам из распада  ${}^8\text{Be}_{g.s.}$ , тогда как широкое распределение событий свидетельствует о возбужденных конфигурациях.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ МАСС СИСТЕМ $\alpha$ -ЧАСТИЦ В СОБЫТИЯХ ${}^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$ И ${}^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$

В работе [20] были измерены пробеги  $\alpha$ -частиц в событиях диссоциации ядер  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$  в ядерной фотоэмульсии и на их основе восстановлены кинетические энергии этих частиц. Полученные данные позволяют определить инвариантные массы систем  $\alpha$ -частиц и поиск образования промежуточных нестабильных состояний ядер  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^{12}\text{C}$ .

Инвариантная масса двух  $\alpha$ -частиц рассчитывалась по формуле

$$M_{2\alpha}^2 = (E_{\alpha 1} + E_{\alpha 2})^2 - (\mathbf{p}_{\alpha 1} + \mathbf{p}_{\alpha 2})^2,$$

где  $E_{\alpha i}$  и  $\mathbf{p}_{\alpha i}$  — энергия и импульс  $i$ -й  $\alpha$ -частицы. Для анализа использовался параметр  $Q$  — эффективная инвариантная масса, которая вычислялась следующим образом:

$$Q_{n\alpha} = M_{n\alpha} - \sum_{i=1}^n m_{\alpha},$$

где  $m_{\alpha}$  — масса  $\alpha$ -частицы.

Реконструкция параметров  $Q_{2\alpha}$  и  $Q_{3\alpha}$  позволяет выявлять возбужденные состояния ядер, нестабильных относительно распада на  $\alpha$ -кластеры. В частности, основное состояние ядра  ${}^8\text{Be}$  ( $0^+$ ) и его первое возбужденное состояние  $2^+$  проявляются вблизи значений  $Q_{2\alpha} \approx 0,1$  и  $Q_{2\alpha} \sim 3$  МэВ, тогда как состояние Хойла ядра  ${}^{12}\text{C}$  соответствует области  $Q_{3\alpha} \sim 0,38$  МэВ.

На рис. 3 представлены спектры эффективных инвариантных масс для пар (а) и троек (б)  $\alpha$ -частиц в событиях  ${}^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$  и  ${}^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$ . В распределении не учитывается комбинаторный фон от пар  $\alpha$ -частиц, если в событии обнаружена хотя бы одна  $\alpha$ -пара, удовлетворяющая «мягкому» условию идентификации  ${}^8\text{Be}(0^+)$   $Q_{2\alpha} < 0,5$  МэВ. В распределении по  $Q_{2\alpha}$  наблюдается концентрация выходов для пар  $\alpha$ -частиц вблизи нуля, что соответствует распадам через основное состояние ядра  ${}^8\text{Be}(0^+)$ . Доля событий, в которых пара  $\alpha$ -частиц идентифицируется как продукты распада ядра  ${}^8\text{Be}(0^+)$ , для реакции  ${}^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$  оценивается на уровне  $(19 \pm 6)\%$ , а для событий  ${}^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$  —  $(35 \pm 14)\%$ . Таким образом, относительный выход  ${}^8\text{Be}(0^+)$  в указанных ядрах определяется как

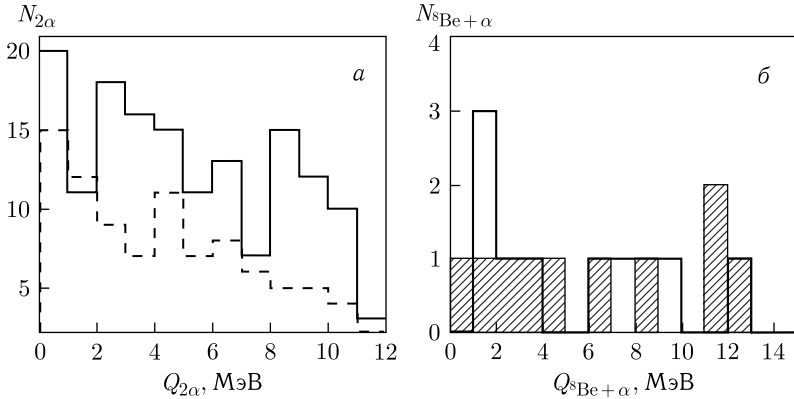


Рис. 3. Спектры эффективных инвариантных масс для пар  $Q_{2\alpha}$  (а)  $\alpha$ -частиц в событиях диссоциации ядер  $^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$  (сплошная линия) и  $^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$  (штриховая линия) и троек  $Q_{s_{\text{Be}+\alpha}}$  (б)  $\alpha$ -частиц в событиях диссоциации ядер  $^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$  (заштрихованная гистограмма) и  $^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$  (сплошная линия)

( $1,84 \pm 0,94$ ), что находится в хорошем согласии со значением, полученным в работе [21]. Кроме того, в спектре для событий диссоциации  $^{12}\text{C}$  при исключении пар с идентифицированными распадами  $^8\text{Be}(0^+)$  дополнительно фиксируется пик в диапазоне  $Q_{2\alpha} \sim 2\text{--}5$  МэВ, со средним значением  $Q_{2\alpha}$  равным ( $3,4 \pm 0,2$ ) МэВ для событий диссоциации ядер  $^{12}\text{C}$ , который может быть интерпретирован как вклад первого возбужденного состояния  $^8\text{Be}(2^+)$ . Табличное значение массы такого состояния принято равным 3,03 МэВ [11]. В случае диссоциации ядер  $^{16}\text{O}$  в этой области спектра наблюдается монотонный спад. Этот вывод можно рассматривать лишь только как предварительный результат, требующий уточнения на более репрезентативной выборке событий.

На рис. 3, б представлен спектр по эффективной инвариантной массе  $Q_{3\alpha}$  в событиях с идентифицированными распадами  $^8\text{Be}(0^+)$ . Для событий  $^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$  можно выделить только одно событие в области  $Q_{s_{\text{Be}+\alpha}} < 0,7$  МэВ со значением  $Q_{s_{\text{Be}+\alpha}} = 389$  кэВ, близким к ожидаемой энергии состояния Хойла. В случае событий с ядром  $^{16}\text{O}$  сигнал от такого распада отсутствует. В обеих выборках возможно выделить события в окрестности  $Q_{s_{\text{Be}+\alpha}} \sim 1\text{--}5$  МэВ, которые можно отнести к распадам ядра  $^{12}\text{C}$  из состояния  $3^-$  (9,64 МэВ), соответствующего величине  $Q_{s_{\text{Be}+\alpha}} = 2,2$  МэВ.

Механизм  $\alpha$ -частичной диссоциации ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  проявляется по распределению суммарного поперечного импульса  $\alpha$ -частиц в событиях. На рис. 4 представлено распределение по  $P_{T_{3\alpha}}$  для событий  $^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$ . Оно имеет среднее значение ( $284 \pm 25$ ) МэВ/с. Среднее значение распределения по  $P_{T_{4\alpha}}$  событий  $^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$  составляет ( $350 \pm 43$ ) МэВ/с. Оба эти значения характерны для ядерного дифракционного взаимодей-

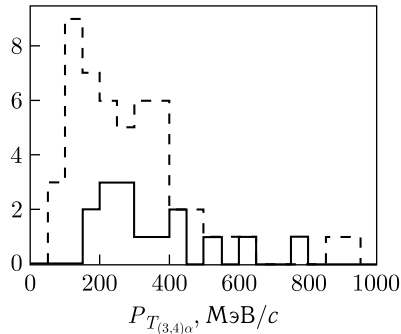


Рис. 4. Распределение событий  $^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$  (сплошная линия) и  $^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$  (штриховая линия) по суммарному поперечному импульсу  $\alpha$ -частиц

ствия. В случае событий  $n(14,1 \text{ МэВ}) + ^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  [22] распределение по  $P_{T_{3\alpha}}$  заметно более узкое со средним значением  $(69 \pm 4) \text{ МэВ/с}$ . Их уменьшение в случае с нейтронами 14,1 МэВ указывает на образование составного ядра.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование продемонстрировало возможность прецизионной реконструкции  $\alpha$ -диссоциации ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  при взаимодействии с заряженными адронами высоких энергий методом ядерных фотоземлюсий. В спектрах инвариантных масс пар и троек  $\alpha$ -частиц выявлены сигналы возбужденных состояний ядер  $^8\text{Be}$  и  $^{12}\text{C}$ . В частности, в событиях диссоциации  $^{12}\text{C}$  идентифицированы распады через основное состояние  $^8\text{Be}(0^+)$  с вероятностью  $(17 \pm 6)\%$  и через его первое возбужденное состояние  $^8\text{Be}(2^+)$  с вероятностью  $(61 \pm 11)\%$ . Зарегистрировано также одно событие-кандидат в области состояния Хойла в  $^{12}\text{C}$ . Таким образом, проведенные исследования показали перспективность дальнейшего изучения  $\alpha$ -частичной диссоциации ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  методом ядерной фотоземлюсии на ансамблях событий с существенно большей статистической обеспеченностью, которой планируется достигнуть благодаря использованию полностью роботизированного микроскопа с автоматическим распознаванием изображений.

**Благодарности.** Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00095-П, <https://rscf.ru/project/22-12-00095/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Araseki H., Fujita T.* Target Fragmentation in Hadron-Nucleus Collision at High-Energy // Nucl. Phys. A. 1983. V. 399. P. 434; [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(83\)90257-9](https://doi.org/10.1016/0375-9474(83)90257-9).
2. *Hébert J. et al.* Nuclear Interactions of 200 GeV Protons in Emulsion // Phys. Lett. B. 1974. V. 48. P. 467–470; [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(74\)90380-3](https://doi.org/10.1016/0370-2693(74)90380-3).

3. *Matsushita K., Nishio T., Tanaka S., Tsuneda M., Sugiura A., Ieki K.* Measurement of Proton-Induced Target Fragmentation Cross Sections in Carbon // Nucl. Phys. A. 2016. V. 946. P. 104–116; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2015.11.007>.
4. *Randrup J.* Nuclear Multifragmentation: Models and Observables // Nucl. Phys. A. 1989. V. 495. P. 245–257; [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(89\)90323-0](https://doi.org/10.1016/0375-9474(89)90323-0).
5. *Freer M.* The Clustered Nucleus-Cluster Structures in Stable and Unstable Nuclei // Rep. Prog. Phys. 2007. V. 70. P. 2149; <https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/12/R03>.
6. *Ikeda K., Horiuchi H., Saito S.* Introduction to Comprehensive Nuclear Structure Study Based on Cluster Correlations and Molecular Viewpoint. Comprehensive Study of Structure of Light Nuclei Based on the Viewpoint of Alpha-Cluster Correlations and Molecular Structure // Prog. Theor. Phys. Suppl. 1981. V. 68.
7. *von Oertzen W., Freer M., Kanada-En'yo Y.* Nuclear Clusters and Nuclear Molecules // Phys. Rep. 2006. V. 432. P. 43–113; <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.07.001>.
8. *Hoyle F.* On Nuclear Reactions Occurring in Very Hot STARS: I. The Synthesis of Elements from Carbon to Nickel // Astrophys. J. Suppl. 1954. V. 1. P. 121.
9. *Fynbo H., Diget C., Bergmann U. et al.* Revised Rates for the Stellar Triple- $\alpha$  Process from Measurement of  $^{12}\text{C}$  Nuclear Resonances // Nature. 2005. V. 433. P. 136–139; <https://doi.org/10.1038/nature03219>.
10. *Bishop J. et al.* Signatures of Clustering Accessible with a Time Projection Chamber: TexAT // Eur. Phys. J. Web Conf. 2024. V. 311. P. 00007; <https://doi.org/10.1051/epjconf/202431100007>.
11. *Tilley D. R. et al.* Energy Levels of Light Nuclei  $A = 8, 9, 10$  // Nucl. Phys. A. 2004. V. 745. P. 155; <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.09.059>.
12. *Freer M., Fynbo H. O. U.* The Hoyle State in  $^{12}\text{C}$  // Prog. Part. Nucl. Phys. 2014. V. 78. P. 1; <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2014.06.001>.
13. *Curtis N. et al.*  $^8\text{Be} + ^8\text{Be}$  and  $^{12}\text{C} + \alpha$  Breakup States in  $^{16}\text{O}$  Populated via the  $^{13}\text{C} (^4\text{He}, 4\alpha)n$  Reaction // Phys. Rev. C. 2016. V. 94. P. 034313; <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.94.034313>.
14. *Rodkin D. M., Tchuwil'sky Yu. M.* Description of Alpha-Clustering of  $^8\text{Be}$  Nucleus States in High-Precision Theoretical Approach // Chin. Phys. C. 2020. V. 44. P. 124105; <https://doi.org/10.1088/1674-1137/abb4d4>.
15. *Kanada-En'yo Y.* The Structure of Ground and Excited States of  $^{12}\text{C}$  // Prog. Theor. Phys. 2009. V. 121, Iss. 4. P. 895; <https://doi.org/10.1143/PTP.121.895>.
16. *Kelley J. H., Purcell J. E., Sheu C. G.* Energy Levels of Light Nuclei  $A = 12$  // Nucl. Phys. A. 2017. V. 968. P. 71–253; <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2017.07.015>.
17. *Yamada T., Schuck P.* Single  $\alpha$ -Particle Orbits and Bose–Einstein Condensation in  $^{12}\text{C}$  // Eur. Phys. J. A. 2005. V. 26. P. 185–199; <https://doi.org/10.1140/epja/i2005-10168-1>.
18. *Artemenkov D. A., Kornegrutsa N. K., Peresadko N. G., Rusakova V. V., Zaitsev A. A., Zarubin P. I., Zarubina I. G.* Highlights of Unstable States in Relativistic Dissociation of Light Nuclei in Nuclear Emulsion // Intern. J. Mod. Phys. E. 2024. V. 33. P. 2441015; <https://doi.org/10.1142/S0218301324410155>.

19. Горин А. М. и др. Изучение механизмов адрон-ядерных взаимодействий на положительном пучке 18 канала ускорителя У-70 // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. С. 1109–1115; <https://doi.org/10.31857/S0367676523701995>.
20. Gorin A. M. et al. Study of the  $\alpha$  Fragmentation of the  $^{12}\text{C}$  and  $^{16}\text{O}$  Nuclei in a 7 GeV/c Positive Hadron Beam of the U-70 Accelerator Complex // Phys. At. Nucl. 2024. V. 87. P. 1890–1898; <https://doi.org/10.1134/S1063778824090138>.
21. Artemenkov D. A., Bradnova V., Chernyavsky M. M. et al. Unstable States in Dissociation of Relativistic Nuclei // Eur. Phys. J. A. 2020. V. 56. P. 250; <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00252-3>.
22. Artemenkov D. A., Bradnova V., Zaitsev A. A. et al. Irradiation of Nuclear Track Emulsions with Thermal Neutrons, Heavy Ions, and Muons // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78. P. 579–585; <https://doi.org/10.1134/S106377881504002X>.