

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.1.073.7

ИССЛЕДОВАНИЕ α -ДИССОЦИАЦИИ ЯДЕР ^{12}C И ^{16}O НА ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ ПУЧКЕ АДРОНОВ С ИМПУЛЬСОМ 7 ГэВ/с УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА У-70

© 2024 г. А. М. Горин^а, С. В. Евдокимов^а, А. А. Зайцев^{б, *}, П. И. Зарубин^б, В. И. Изучеев^а,
Д. С. Криницын^а, Б. В. Полищук^а, В. И. Рыкалин^а, С. А. Садовский^а, Ю. В. Харлов^а, А. А. Шангараев^а

^аИнститут физики высоких энергий им. А.А. Логонова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Протвино, Московская обл., 142281 Россия

^бОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

*E-mail: zaicev@jinr.ru

Поступила в редакцию 19.07.2024 г.

После доработки 19.07.2024 г.

Принята к публикации 29.07.2024 г.

В данной работе в условиях 4 π -геометрии выполнен анализ событий α -частичной фрагментации ядер ^{12}C и ^{16}O из состава ядерной фотоэмульсии в неупругих взаимодействиях с положительно заряженными адронами с импульсом 7 ГэВ/с. Накопленная статистика событий позволила дать оценку сечения реакции фрагментации ядер $^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$ и $^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$ в пучке адронов.

Ключевые слова: альфа-фрагментация, ядра ^{12}C , ^{16}O , ядерная эмульсия, адронный пучок, сечение реакции

DOI: 10.56304/S2079562924060150

ВВЕДЕНИЕ

Первые наблюдения фрагментации атомных ядер наблюдались в слоях ядерной фотоэмульсии, облученных космическими лучами [1]. Исследование процессов фрагментации ядер мишени в нуклон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях привлекает большой интерес и в настоящее время [2–7]. Не последнюю роль играют здесь эксперименты по исследованию процессов фрагментации ядер, которые дают возможность извлекать значимую информацию о механизме фрагментации [8] и кластерной структуре фрагментирующих ядер, что влияет на сечение образования фрагментов.

Особый интерес в этой связи представляют экспериментальные исследования фрагментации $n\alpha$ -кратных ядер, таких как ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne и т.д., где роль альфа-кластерной структуры доминирует во взаимодействиях с релятивистскими адронами. Изучение ансамблей нескольких α -частиц позволяет выявить роль нестабильных ядер ^8Be и ^9Be и вести поиск их аналогов, начиная с 3α -состояния Хойла (HS) [9–11]. При этом надо иметь в виду, что ядерная волновая функция основного состояния таких ядер имеет большую составляющую α -кластеров плюс остальные нуклоны, например, ^6Li имеет большую $\alpha + d$ компоненту [12]. Многие более тяжелые $n\alpha$ -ядра также демонстри-

руют большие компоненты α -кластеров, например, ^{20}Ne имеет большое перекрытие 5α -волновой функции основного состояния и конфигурации в виде ядра ^{12}C и двух α -кластеров [13].

Энергия распада $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ составляет всего 91.8 кэВ. Его ширина, 5.57 ± 0.25 эВ, отвечает времени жизни состояния на 8–9 порядков больше характерного времени самой ядерной реакции [14]. Ядро ^8Be является прямым продуктом распада ядра ^9Be . Основное состояние ядра ^9Be выше массового порога $^8\text{Be} + p$ на 185.1 кэВ, а его ширина, составляющая 0.54 ± 0.21 кэВ [14], также указывает на него как на долгоживущее состояние. Возросший интерес к нестабильным состояниям, включающим ансамбли α -частиц, мотивирован концепцией α -частичного конденсата Бозе–Эйнштейна (αBEC), выдвинутой в начале 2000-х гг. по аналогии с квантовыми газами атомной физики [15]. Проявлением αBEC могут считаться возбуждения $n\alpha$ -кратных ядер сразу над порогами связи системы α -частиц. Сосуществуя с фермионными возбуждениями, они рассматриваются на основе среднего поля бозонного типа, формируемого газом почти идеальных (α) бозонов в S-состоянии.

В плане исследования фрагментации ядер под действием релятивистских адронов метод ядерных эмульсий (ЯЭ), по сравнению с электронными экспериментами, представляет уникальный экспе-

Таблица 1. Топология найденных событий в результате сканирования трех пластинок, облученных в пучке адронов на установке Гиперон-М. Суммарная площадь просмотра во всех пластинках составила 90 см² при толщине слоя ЯЭ 190 мкм. L_α — истинная длина пробега α -частицы в ЯЭ, nh — число сильноионизирующих h -частиц в найденных событиях

	$nh = 3$	$nh = 4$	Большие звезды
N событий	150	33	1200
$L_\alpha \leq 80$ мкм	51	14	—

риментальный материал и обеспечивает всю полноту наблюдений в 4 π -геометрии с полной идентификацией всех заряженных фрагментов в каждом акте взаимодействия и прецизионным измерением пробегов и углов вылета вторичных частиц. Этим объясняется актуальность исследования методом ЯЭ, в том числе и представленный в данной работе анализ процессов α -фрагментации ядер ^{12}C и ^{16}O .

В данной работе проведен последовательный анализ событий образования 3 и 4 α -частиц в столкновениях ядер-мишеней ^{12}C и ^{16}O с адронами положительного пучка с импульсом 7 ГэВ/с. Получены энергетические и кинематические характеристики α -частиц, образующихся в результате указанных реакций. Накопленная статистика событий позволила дать оценки парциальных сечений альфа-фрагментации ядер ^{12}C и ^{16}O , представляющие интерес как для задач фундаментальной ядерной физики и астрофизики, так и для прикладных задач в области геофизики, геологии и медицины (адронная терапия) [16–18]. Кроме того, детальная информация о взаимодействии адронов высоких энергий с рассматриваемыми ядрами критически важна и в космической отрасли, поскольку события α -фрагментации являются частым результатом ядерных взаимодействий из-за вхождения атомов ^{12}C и ^{16}O в биологические ткани и конструкционные материалы (полиэтилен, пластик и т.д.) космического корабля.

Важным фактором биологических эффектов космической радиации и адронной терапии рака является образование ионов с высокой переданной энергией, которые образуются при фрагментации ядер ^{12}C и ^{16}O [19]. Поэтому важно, чтобы транспортные коды для моделирования этих эффектов включали наиболее точные оценки сечений указанных выше ядерных реакций.

1. ОБЛУЧЕНИЕ ЯЭ НА ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ ПУЧКЕ 18 КАНАЛА У-70

Облучение пластинок ядерной эмульсии проводилось на пучке положительно заряженных частиц с импульсом 7 ГэВ/с 18 канала ускоритель-

ного комплекса У-70 [20] в зоне экспериментальной установки Гиперон-М. Состав пучка: $\pi^+ \approx 65\%$, $p \approx 30\%$, $K^+ \approx 4\%$ и $\mu^+ \approx 1\%$. В дальнейшем вкладом мюонов будем пренебрегать, а пучок называть адронным. Несмотря на то, что данный пучок представляет собой смесь трех видов, это обстоятельство не является существенным при анализе фрагментации ядер мишени, поскольку импульс пучка отвечает выходу на режим предельной фрагментации ядер. Кроме того, топология изучаемых $n\alpha$ -событий отвечает когерентному характеру взаимодействий без рождения мезонов.

Первые образцы ЯЭ были облучены во время весеннего сеанса в 2018 г. на установке Гиперон-М (2 стопки по 10 пластин с толщиной эмульсионного слоя 100 мкм и 1 стопка с толщиной эмульсии 190 мкм). Суммарный поток адронов, прошедший через стопки ЯЭ, составил $3 \cdot 10^6$ частиц. Вторая партия ЯЭ была облучена в осеннем сеансе 2023 г. Облучалась каждая пластинка по отдельности: $(1-2) \cdot 10^6$ событий на совпадение сигналов с трех пучковых сцинтилляционных счетчиков диаметром 20 см. Поскольку площадь светочувствительного слоя пластинок ЯЭ не перекрывает всю поверхность сцинтилляционного счетчика S3 и форма профиля ускоренного пучка адронов нам не известна, то погрешность в определении потока, прошедшего через пластинку ЯЭ, можно оценить на уровне 14%.

Проявка пластинок ЯЭ проводилась в химической группе обработки толстослойных пластин расположенной в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ. Процедура проявки в основном зависит от толщины слоя ЯЭ, поэтому процесс проявки включал в себя два этапа: проявка слоев 100 и 190 мкм соответственно.

2. ПРОСМОТР ОБЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ЯЭ

Сканирование проявленных слоев ЯЭ проводилось в секторе обработки толстослойных ЯЭ Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ в рамках эксперимента БЕККЕРЕЛЬ [21]. Просмотр осуществлялся на оптическом микроскопе МБИ-9 с использованием объектива с 20 $\times$ -кратным увеличением и окуляров 15 $\times$ -крат (общее увеличение 300 $\times$ -крат). Был выбран метод сканирования по полосам шириной 1 мм. Такой метод позволяет вести полноценный поиск ядерных событий по всей площади без потери информации.

Для удобства просмотра в процессе проявки на поверхность эмульсии специальным образом была нанесена координатная маркировочная сетка. Ширина стороны одного квадрата равна 1 мм. В начале просмотра выбирается крайний квадрат, отстоящий от краев пластинки на расстоянии не менее чем 1 см. Это условие необходимо для обеспечения комфортного просмотра и нивелирова-

ния краевых дефектов на пластинке. В табл. 1 приведена сводная топология событий по числу наблюдаемых треков *h*-частиц (классификация треков в ЯЭ приведена ниже). Большими звездами будем называть события, в которых наблюдается множественное образование *b*-, *g*- и *s*-частиц ($nb + ng \geq 4$ и $ns > 2$).

3. КЛАССИФИКАЦИЯ СОБЫТИЙ
ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДЕР В ЯЭ

Точная идентификация провзаимодействовавшего ядра-мишени в эмульсионном эксперименте — непростая задача, поскольку среда имеет многокомпонентный атомарный состав. В методике ЯЭ принята следующая классификация заряженных частиц, в зависимости от их относительной ионизации I/I_0 , пробега L и скорости β [22]:

1. “Черные” (*b*-частицы) — представляют собой следы фрагментов ядра мишени с относительной ионизацией $I/I_0 \geq 7.0$ и $\beta < 0.23$, где I_0 — ионизация на треках релятивистских частиц с зарядом $Z = 1$. Однако в практическом плане, *b*-частицы зачастую удобно идентифицировать по величине их пробега в объеме ЯЭ — $L \leq 3$ мм.

2. “Серые” (*g*-частицы) — в основном это протоны, выбитые из ядра-мишени, с относительной ионизацией $6.8 > I/I_0 \geq 1.4$ и $\beta < 0.7$, с остаточным пробегом более 3 мм. Также к этому типу частиц относится возможная небольшая примесь π -мезонов, зависящая от начальной энергии взаимодействия. При этом совокупность *b* и *g*-частиц относят к группе сильноионизирующих *h*-частиц.

3. “Релятивистские” (ливневые, или *s*-частицы) — к этому классу частиц относят однозарядные релятивистские частицы с относительной ионизацией $I/I_0 < 1.4$ и скоростью $\beta > 0.7$. Большая часть этих частиц принадлежит пионам.

4. “Фрагменты” (*f*-частицы) — многозарядные фрагменты налетающего ядра с зарядом $Z > 2$. Они не входят в число *b*- и *g*-частиц, которым соответствуют по производимой ими ионизации. Треки релятивистских однозарядных частиц и фрагменты ядра-снаряда с $Z = 2$ легко различимы под микроскопом числом проявленных зерен на единицу длины трека.

Метод ЯЭ отличается высокой эффективностью регистрации заряженных частиц в широкой области энергий, вплоть до однозарядных релятивистских частиц. Благодаря рекордному пространственному разрешению (~0.5 мкм) и низкому порогу чувствительности (~10 кэВ) следы заряженных частиц в ЯЭ регистрируются беспрецедентно точно. Однако стоит учесть систематические погрешности при измерении длины пробега, связанные в основном с изменением первоначальной толщины слоя ЯЭ после химической проявки и с восстановлением истинного пробега по изме-

Таблица 2. Элементарный состав ЯЭ [23]

	G5 стандартная ЯЭ		
	0%	58%	84%
Относительная влажность	0%	58%	84%
Плотность, г/см ³	4.033	3.828	3.608
Ag (10 ²² ат./см ³)	1.092	1.013	0.929
Br (10 ²² ат./см ³)	1.085	1.007	0.923
I (10 ²² ат./см ³)	0.0062	0.0057	0.0052
H (10 ²² ат./см ³)	2.83	3.20	3.57
C (10 ²² ат./см ³)	1.498	1.390	1.274
N (10 ²² ат./см ³)	0.343	0.318	0.291
O (10 ²² ат./см ³)	0.705	0.938	1.190
S (10 ²² ат./см ³)	0.0146	0.0135	0.0124

ренным проекциям трека (ложное рассеяние, шум зерен, шум столика, перефокусировки, тепловой шум и шум отсчета). Ошибка первой группы минимизируются посредством механических и оптических измерений усадки слоя ЯЭ. Что касается второй группы погрешностей, то они, не превышают одного процента. Надежность идентификации фрагментов в ЯЭ определяется удельными ионизационными потерями на единицу длины трека, являющаяся функцией плотности проявленных зерен трека. Таким образом треки ядер He и H отличаются существенным образом по геометрическим размерам трека и его остаточному пробегу.

ЯЭ по своему составу представляет собой гомогенную смесь химических элементов: водорода H, группы легких ядер CNO и группы тяжелых ядер AgBr (в эту группу могут также включаться и другие тяжелые компоненты, в зависимости от типа ЯЭ, однако их относительный весовой вклад незначителен). Основной вклад во взаимодействия дают тяжелые ядра AgBr ≈ 75%. Вклад средних ядер CNO ≈ 21%. В табл. 2 представлен покомпонентный состав стандартной ЯЭ при нормальных условиях.

Далее, в зависимости от типа провзаимодействовавшего ядра с налетающей релятивистской частицей в методике ЯЭ принято разделение ядерных событий на три группы:

1. Квазинуклонные взаимодействия. В эту группу входят взаимодействия на свободном водороде и на квазисвободных нуклонах в ядрах.

2. Взаимодействия на группе легких ядер CNO. В эту группу отнесены события с числом сильноионизирующих *h*-частиц $1 \leq nh \leq 6$ и числом *b*-частиц $nb \geq 1$, при пробеге *b*-частицы $Lb \leq 80$ мкм.

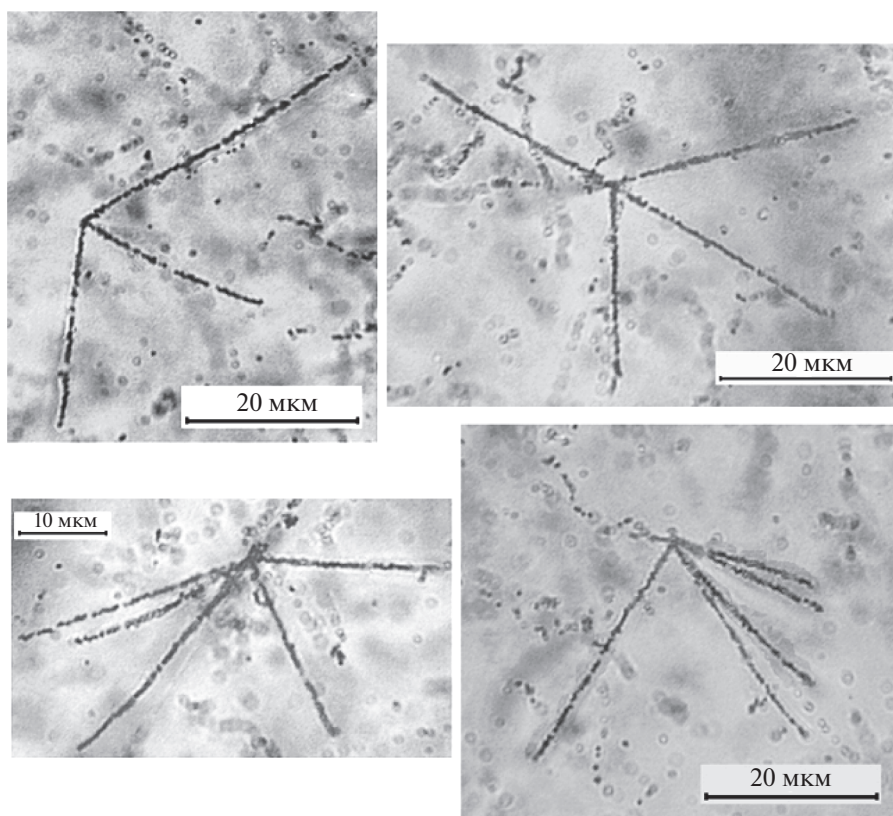


Рис. 1. Изображения событий с образованием треков α -частиц при взаимодействии адронов с ядрами из состава ЯЭ, облученных на 18 канале установки Гиперон-М.

3. Взаимодействия на группе тяжелых ядер ArBr. Для таких событий различают две подгруппы по числу образовавшихся h и b -частиц:

3.1. $1 \leq nh \leq 6$, $nb \geq 1$ и $Lb > 80$ мкм;

3.2. $nh \geq 7$ такие события характеризуются большим возбуждением ядра-мишени.

В настоящей работе при просмотре облученных образцов ЯЭ отбирались только те события, в которых полностью наблюдаются треки $3b$ и $4b$ -частиц, пробег которых в ЯЭ не превышает 100 мкм. Это ограничение позволяет идентифицировать взаимодействие релятивистских адронов непосредственно с ядрами ^{12}C и ^{16}O , необходимые для последующего анализа. Таким образом, в данной работе b -частицы есть ничто иное как α -частицы, см. в качестве иллюстрации события на рис. 1.

4. ИЗМЕРЕНИЯ СОБЫТИЙ С ТРЕМЯ И ЧЕТЫРЬМЯ ТРЕКАМИ АЛЬФА-ЧАСТИЦ

Измерения найденных событий проводились на оптическом микроскопе KSM-1 с применением масляно-иммерсионного объектива 50 $\times$ -крат и окуляров 15 $\times$ -крат увеличениями. Толщина, координаты и пробеги частиц были тщательно

измерены и записаны для каждой α -частицы, выходящей из вершины события. Пространственная конфигурация каждого события была восстановлена путем измерения координат x , y и z каждого трека и вершины для определения глубинного и плоского углов α и ϕ . Истинный пробег α -частиц в

ЯЭ определялся как: $L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + (k\Delta z)^2}$, где Δx , Δy и Δz — разности координат вершины события и конца трека α -частицы, k — фактор усадки эмульсионного слоя, определяемый отношением первоначальной (производственной) толщины к толщине после химической проявки. Распределения по пробегам α -частиц в событиях $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ для двух сеансов облучений приведены на рис. 2.

Средняя длина измеренных треков в событиях с тремя α -частицами составляет величину $\langle L \rangle = 25.9 \pm 1.5$ мкм, а среднеквадратичное отклонение от среднего значения $\sigma = 7.8 \pm 1.1$ мкм. Для событий с 4-мя α -частицами соответствующие величины равны $\langle L \rangle = 28.1 \pm 3.4$ мкм и $\sigma = 7.2 \pm 2.5$ мкм.

При помощи программы SRIM [24] было проведено моделирование прохождения α -частиц через объем ЯЭ (из стандартной библиотеки SRIM

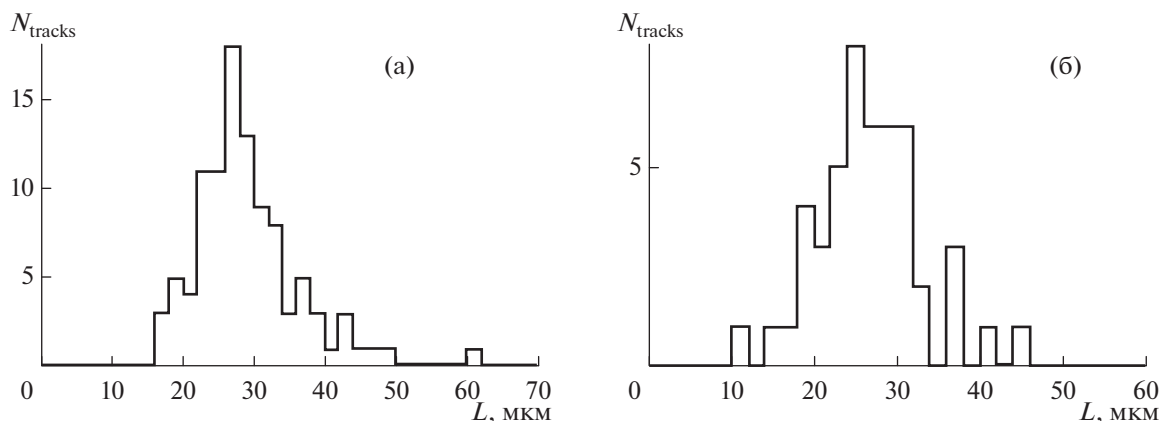


Рис. 2. Распределение по измеренному пробегу α -частиц в событиях взаимодействия релятивистских адронов с ядрами ^{12}C (а) и ядрами ^{16}O (б) соответственно с тремя и четырьмя α -частицами в конечном состоянии.

Emulsion-Ilford G5) с кинетической энергией в области 0.05–12 МэВ. Результаты моделирования приведены на рис. 3. Модельная зависимость кинетической энергии фрагмента E_{kin} от длины пробега L была аппроксимирована функцией (1):

$$E_{\text{kin}}(L) = -1.638 - 1.29 \lg(L/L_0) + 1.746 \sqrt{L/L_0} \quad [\text{МэВ}], \quad (1)$$

где $L_0 = 1$ мкм. Подставляя измеренные пробеги α -частиц в событиях $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ в функциональную зависимость пробег-энергия (1), можно восстановить полные кинетические энергии остановившихся в эмульсии α -частиц. На рис. 4 приведены распределения по восстановленным таким образом кинетическим энергиям α -частиц и по их суммарному энерговыделению в рассматриваемых событиях. Параметры приведенных распределений представлены в табл. 3.

Измерения смещения x -, y - и z -координат зерен вдоль линейного участка наблюдаемого трека α -частицы, достаточно близко расположенного к вершине взаимодействия, позволяют получить угловые распределения образующихся фрагментов.

В качестве примера, на рис. 5а приведены комбинаторные распределения углов раствора пар α -частиц в реакции $^{12}\text{C}(h,h')3\alpha$. Аналогичные распределения для пар α -частиц в реакции $^{16}\text{O}(h,h')4\alpha$ приведены на рис. 6а.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ АЛЬФА-СИСТЕМ В РЕАКЦИЯХ $^{12}\text{C}(h,h')3\alpha$ И $^{16}\text{O}(h,h')4\alpha$

Измеренные углы вылета α -частиц в реконструированных событиях и определенные по длинам пробега кинетические энергии (1) частиц позволяют определить инвариантную массу системы $n\alpha$ частиц как сумму всех скалярных произведений 4-импульсов P_j α -фрагментов:

$M_{\text{inv}}^2 = \sum_{j=1}^n P_j^2 = \sum_{ik=1}^n (P_i P_k)$. В свою очередь это позволяет вычислить энергию возбуждения системы, которая определяется как разность ее инвариантной массы и суммы масс α -частиц системы: $Q_{n\alpha} = M_{\text{inv}}^{n\alpha} - \sum_{i=1}^n m_{\alpha i}$.

Полученное распределение по комбинаторной величине $Q_{2\alpha}$ пар α -частиц в событиях реакции $^{12}\text{C}(h,h')3\alpha$ представлено на рис. 5б. Распределение по энергии возбуждения $Q_{2\alpha}$ отражает особенности возбуждения уровней ядра ^8Be [14]. События с парным углом разлета $\Theta_{2\alpha} < 30^\circ$, см. рис. 5а, могут при этом соответствовать по энергии возбуждения $Q_{2\alpha}$ основному состоянию ядра $^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$, а области больших углов $30^\circ < \Theta_{2\alpha} < 110^\circ$ и $\Theta_{2\alpha} > 110^\circ$, соответственно первому (2^+) и второму (4^+) возбужденным состояниям ядра ^8Be .

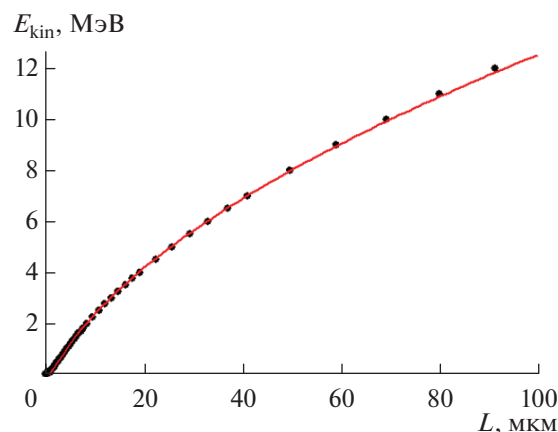


Рис. 3. Зависимость ионизационных потерь при прохождении через объем ЯЭ α -частиц от линейных пробегов α -частиц, рассчитанная с помощью программы SRIM. Кривая линия — фит зависимости аппроксимирующей функцией (1).

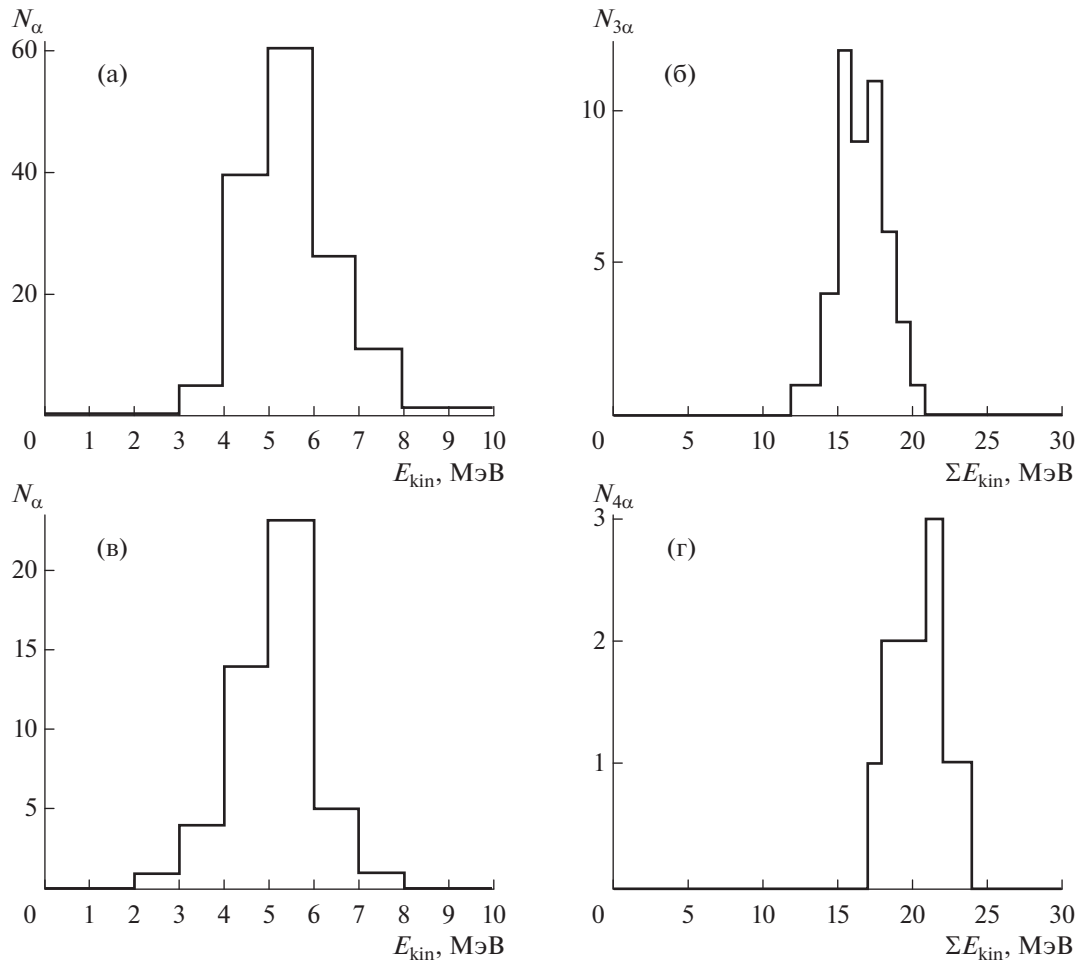


Рис. 4. Распределения по восстановленным энергиям α -частиц в событиях реакций $^{12}\text{C}(h,h')3\alpha$ (а, б) и $^{16}\text{O}(h,h')4\alpha$ (в, г): (а, в) одночастичные распределения, (б, г) – суммарные энерговыделения в соответствующих $n\alpha$ -системах.

Для событий фрагментации ядер ^{16}O на 4 α -частицы аналогичные угловые и энергетические спектры показаны на рис. 6. “Мягкое” условие $Q_{2\alpha} < 0.5$ МэВ позволяет выделить распады ^8Be из основного (0^+) состояния в 4-х событиях реакции $^{16}\text{O}(h,h')4\alpha$.

6. ОЦЕНКА СЕЧЕНИЯ АЛЬФА ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДЕР ^{12}C И ^{16}O В АДРОННОМ ПУЧКЕ

В работе [25] были измерены сечения рождения стабильных и нестабильных ядер в процессах фраг-

ментации ядер ^{16}O в пучке с импульсом 3.25 АГэВ/с на водородной мишени в реакции с обратной кинематикой. Показано, что сечение образования α -частиц в этой реакции большое и составляет величину

$$\sigma_{\alpha}(^{16}\text{O}) = 164 \pm 1.9 \text{ мб}. \quad (2)$$

Схожая величина сечения,

$$\sigma_{\alpha}(^{12}\text{C}) = 159 \pm 21 \text{ мб}, \quad (3)$$

получена в статье [26] для реакции фрагментации ядер ^{12}C на водородной мишени с энергией 3.66 АГэВ, а также и при более низких энергиях, 1.87 и 2.69 АГэВ, см. [27]. Согласно последней работе, сечение реакций фрагментации ядра ^{12}C достаточно большое и слабо зависит от энергии пучка. Слабую зависимость от энергии, по-видимому, следует ожидать и для реакции фрагментации ядра ^{16}O . При этом из данных указанных работ по сечениям фрагментации ядер ясно видно, что доминирующими процессами фрагментации являются процессы с образованием α -частиц (^4He).

Таблица 3. Параметры распределений по кинетической энергии α -частиц и их суммарной энергии в событиях реакций $^{12}\text{C}(h,h')3\alpha$ и $^{16}\text{O}(h,h')4\alpha$.

Реакция	$\langle E_{\text{kin}} \rangle$, МэВ	$\sigma_{E_{\text{kin}}}$, МэВ	$\langle \Sigma E_{\text{kin}} \rangle$, МэВ	$\sigma_{\Sigma E_{\text{kin}}}$, МэВ
$h+^{12}\text{C} \rightarrow h'+3\alpha$	5.5 ± 0.1	0.9 ± 0.1	16.6 ± 0.3	1.5 ± 0.1
$h+^{16}\text{O} \rightarrow h'+4\alpha$	5.1 ± 0.1	0.9 ± 0.1	20.7 ± 0.5	1.7 ± 0.3

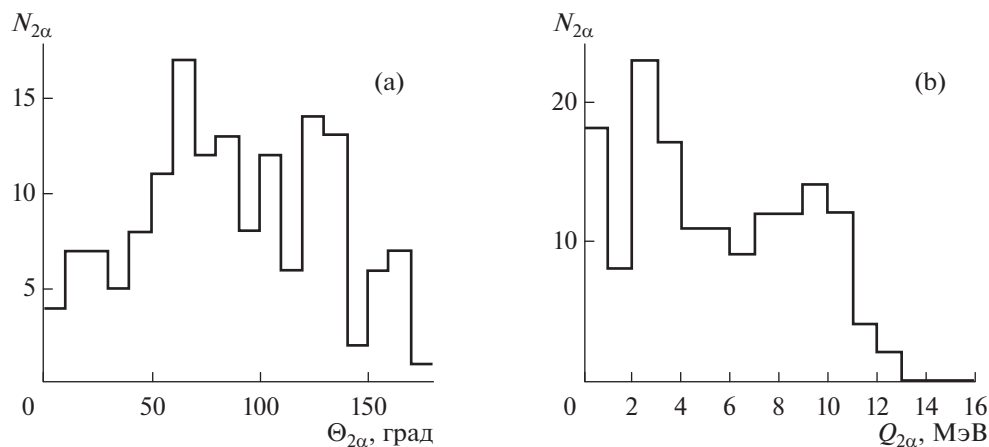


Рис. 5. Комбинаторное распределение по пространственному углу раствора $\Theta_{\alpha\alpha}$ (а) и энергии возбуждения $Q_{\alpha\alpha}$ (б) пар α -частиц в событиях реакции $^{12}\text{C}(h,h')3\alpha$.

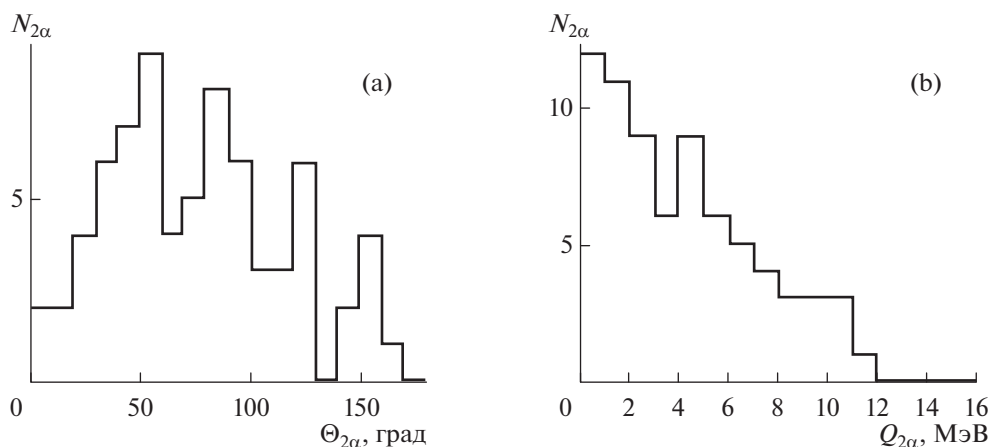


Рис. 6. Комбинаторное распределение по пространственному углу раствора $\Theta_{\alpha\alpha}$ (а) и энергии возбуждения $Q_{\alpha\alpha}$ (б) пар α -частиц в событиях реакции $^{16}\text{O}(h,h')4\alpha$.

В настоящей работе для оценки наблюдаемого сечения фрагментации ядер ^{12}C и ^{16}O на 3α - и 4α -частицы, соответственно, были проанализированы пластинки ЯЭ, облученные в контролируемых условиях на положительном пучке адронов с импульсом 7 ГэВ/с. Среди всего многообразия ядерных звезд были найдены события с образованием трех и четырех треков, соответствующих трекам α -частиц в ядерной эмульсии. Им отвечает статистика в 16 и 2 событий фрагментации ядер ^{12}C и ^{16}O ЯЭ во взаимодействиях с адронами пучка. Во время облучения интегральный поток частиц, прошедших через указанные пластинки, составил величину $\approx 1.6 \cdot 10^6$ адронов. События 3α - и 4α -фрагментации были найдены и измерены на суммарной площади просмотра ЯЭ $S = 51.8 \text{ см}^2$ при первоначальной толщине слоя ЯЭ $t = 190 \text{ мкм}$. Таким образом, объем просканированной ЯЭ составил $V = 0.984 \text{ см}^3$. Согласно

табл. 2 концентрация атомов ^{12}C в составе ЯЭ приблизительно равна $N_C = 1.39 \cdot 10^{22} \text{ ат./см}^3$ (будем считать это референтным значением), а атомов кислорода — $N_O = 0.938 \cdot 10^{22} \text{ ат./см}^3$. В результате после стандартной нормировки были получены следующие значения сечений 3α - и 4α -диссоциации ядер ^{12}C и ^{16}O соответственно,

$$\sigma(h^{12}\text{C} \rightarrow h'3\alpha) = 78 \pm 19_{\text{st}} \pm 11_{\text{sys}} \text{ мб}, \quad (4)$$

$$\sigma(h^{16}\text{O} \rightarrow h'4\alpha) = 14 \pm 10_{\text{st}} \pm 2_{\text{sys}} \text{ мб}, \quad (5)$$

где систематические ошибки определяются, в основном, неопределенностью интегрального потока адронного пучка через ЯЭ. Следует отметить, что сечение (4) хорошо согласуется с сечением 3α -фрагментации ядра ^{12}C ($\sigma_{3\alpha} = 64.1 \pm 5.2_{\text{st}} \pm 17.8_{\text{sys}}$), измеренном ранее в эксперименте Гиперон-М [15] при той же энергии адронного пучка,

но с использованием совершенно другой методики, т.е. в пределах 1.2 стандартного отклонений при учете только статистических ошибок измеренных сечений в обоих экспериментах.

Чтобы сравнить полученные значения сечений (4) и (5) с данными работ [25, 27], надо иметь в виду, что в этих работах приведены величины, соответствующие интегральным потокам одиночных фрагментов в конечном состоянии после взаимодействия, в то время как сечения (4) и (5) соответствуют потокам одновременно троек и четверок α -частиц. Поэтому указанные сечения надо сравнивать, соответственно, с величинами

$$\sigma_{\alpha}(^{12}\text{C})/3 = 41 \pm 0.5 \text{ мб}, \quad (6)$$

$$\sigma_{\alpha}(^{16}\text{O})/4 = 53 \pm 7 \text{ мб}, \quad (7)$$

учитывающими эти особенности указанных экспериментов, см. уравнения (3) и (2). Учитывая далее существенно другую методику измерения сечений в этих экспериментах по сравнению с настоящим и заметно отличающиеся при этом энергии пучков, согласие полученных сечений фрагментации (3 стандартных отклонения) для ядра ^{12}C можно назвать удовлетворительным. Согласие же сечений фрагментации ядра ^{16}O , ср. (5) и (7), при этом заметно хуже.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ облученных образцов ядерной фотоэмульсии в пучке положительно заряженных адронов с импульсом 7 ГэВ/с. Среди многообразия ядерных звезд найдены 51 и 14 событий диссоциации ядер ^{12}C и ^{16}O в пучке адронов с образованием трех и четырех α -треков, соответственно.

В этих событиях измерены длины пробега треков α -частиц и восстановлены их кинетические энергии. Исследованы спектры по относительным пространственным углам разлета и энергиям возбуждения пар α -частиц. Подчеркнута роль нестабильного ядра ^8Be в рассматриваемых процессах. Накопленная статистика событий в контролируемом облучении ЯЭ в 2023 г. позволила дать оценку парциальных сечений α -частичной диссоциации ядер ^{12}C и ^{16}O при их взаимодействии с адронами пучка (π^+ , K^+ , p). Полученное сечение фрагментации $\sigma(^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha) = 78 \pm 19_{\text{ст}} \pm 11_{\text{sys}}$ мб находится в хорошем согласии с данными эксперимента Гиперон-М и в удовлетворительном согласии с данными экспериментов, проведенными с ^{12}C -пучком в обратной геометрии при более низких энергиях. Наконец, что касается измерения сечения фрагментации $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$, для статистически обоснованных выводов необходимо существенно нарастить статистику событий.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Freier P., Lofgren E.J., Ney E.P., Oppenheimer F., Bradt H.L., Peters B. // Phys. Rev. 1948. V. 74 (2). P. 213. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.74.213>
2. Yariv Yo., Fraenkel Z. // Phys. Rev. C. 1979. V. 20 (6). P. 2227. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.20.2227>
3. Kaufman S.B., Steinberg E.P. // Phys. Rev. C. 1980. V. 22 (1). P. 167. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.22.167>
4. Hüfner J. // Phys. Rep. 1985. V. 125 (4). P. 129. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(85\)90124-3](https://doi.org/10.1016/0370-1573(85)90124-3)
5. Sümmerer K., Brühlle W., Morrissey D.J., Schädel M., Szewy B., Weifan Y. // Phys. Rev. C. 1990. V. 42 (6). P. 2546. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.42.2546>
6. Cherry M.L., Dabrowska A., Deines-Jones P., Hoynski R., Nilsen B.S., Olszewski A., Szarska M., Trzupek A., Waddington C.J., Wefel J.P., et al. // Eur. Phys. J. C. 1998. V. 5. P. 641. <https://doi.org/10.1007/s100529800985>
7. Khushnood H. et al. // Proc. DAE Symp. on Nucl. Phys. 2014. V. 59. P. 748.
8. Strugalska-Gola E., Chmielowski W., Strugalski Z. // Technical Report. 1997. SCAN-9711083.
9. Hoyle F. // Astrophys. J. Suppl. 1954. V. 1. P. 121. <https://doi.org/10.1086/190005>
10. Зайцев А.А., Зарубин П.И. // Ядерная физика и инжиниринг. 2019. Т. 10 (1). С. 9 [Zaitsev A.A., Zarubin P.I. // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 1225. <https://doi.org/10.1134/S1063778819090114> <https://doi.org/10.1134/S2079562919010202>
11. Artemenkov D.A., Bradnova V., Kashanskaya O.N., Kondratieva N.V., Kornegrutsa N.K., Mitsova E., Peresadko N.G., Rusakova V.V., Stanoeva R., Zaitsev A.A., Zarubina I.G., Zarubin P.I. // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85 (6). P. 528. <https://doi.org/10.1134/S1063778822060035>
12. Hodgson P.E. // Z. Phys. A. 1994. V. 349. P. 197. <https://doi.org/10.1007/BF01288959>
13. Maruhn J.A., Kimura M., Schramm S., Reinhard P.G., Horiuchi H., Tohsaki A. // Phys. Rev. C. 2006. V. 74 (4). P. 044311. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.74.044311>
14. Tilley D.R., Kelley J.H., Godwin J.L., Millener D.J., Purcell J.E., Sheu C.G., Weller H.R. // Nucl. Phys. A. 2004. V. 745 (3–4). P. 155. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.09.059>
15. Tohsaki A., Horiuchi H., Schuck P., Röpke G. // Rev. Mod. Phys. 2017. V. 89 (1). P. 011002. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.011002>
16. Горин А.М., Евдокимов С.В., Зайцев А.А., Зарубин П.И., Изучеев В.И., Полищук Б.В., Романишин К.А., Рыкалин В.И., Садовский С.А., Шангараев А.А. // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т. 14 (6). С. 612.

- [Gorin A.M., Evdokimov S.V., Zaitsev A.A., Zarubin P.I., Izucheev V.I., Polishchuk B.V., Romanishin K.A., Rykalin V.I., Sadovsky S.A., Shangaraev A.A. // *Phys. At. Nucl.* 2023. V. 86 (11). P. 2478.
<https://doi.org/10.1134/S106377882311011X>
<https://doi.org/10.56304/S2079562923010104>
17. Durante M., S. Loeer J. // *Nat. Rev. Clin. Oncol.* 2010. V. 7 (1). P. 37.
<https://doi.org/10.1038/nrclinonc.2009.183>
 18. De Lellis G., Buontempo S., Di Capua F., Di Crescenzo A., Migliozi P., Petukhov Y., Pistillo C., Russo A., Strolin P., Tioukov V., et al. // *Nucl. Phys. A.* 2011. V. 853 (1). P. 124.
<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2011.01.019>
 19. Cucinotta F., Katz R., Wilson J., Townsend L., Shinn J., Hajnal F. // *Radiat. Res.* 1991. V. 127 (2). P. 130.
<https://doi.org/10.2307/3577956>
 20. Evdokimov S.V., Izucheev V.I., Kondratyuk E.S., Polishchuk B.V., Sadovsky S.A., Kharlov Yu.V., Shangaraev A.A. // *JETP. Lett.* 2021. V. 113. P. 289.
<https://doi.org/10.1134/S0021364021050040>
 21. Bradnova V., Chernyavsky M.M., Just L., Kharlamov S.P., Kovalenko A.D., Haiduc M., Kotelnikov K.A., Krasnov V.A., Larionova V.G., Lepekhin F.G. et al. // *Phys. At. Nucl.* 2003. V. 66. P. 1646.
<https://doi.org/10.1134/1.1611575>
 22. Адамович М.И., Ларионова В.Г., Масленникова Н.В. и др. // *Труды ФИАН.* 1979. Т. 108. С. 65–149.
 23. Powell C.F., Fowler P.H., Perkins D.H., Friedlander M.W. // *Phys. Today.* 1960. V. 13 (9). P. 45.
<https://doi.org/10.1063/1.3057116>
 24. Ziegler J.F., Ziegler M.D., Biersack J.P. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 2010. V. 268 (11–12). P. 1818.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091>
 25. Bazarov E.Kh., Glagolev V.V., Lugovoy V.V., Lutpulaev S.L., Olimov K., Petrov V.I., Yuldashev A.A., Yuldashev B.S. // *JETP Lett.* 2005. V. 81. P. 140.
<https://doi.org/10.1134/1.1914868>
 26. Korejwo A. // *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf.* Aug. 17–25, 1999. Salt Lake City, Utah, USA. Under the Auspices of the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP). 1999. V. 4. P. 267.
 27. Korejwo A., Giller M., Dzikowski T., Pereygin V.V., Zarubin A.V. // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2002. V. 28 (6). P. 1199.
<https://doi.org/10.1088/0954-3899/28/6/304>

Study of the α -Dissociation of the ^{12}C and ^{16}O Nuclei in a 7 GeV/c Positive Hadron Beam of the U-70 Accelerator Complex

A. M. Gorin¹, S. V. Evdokimov¹, A. A. Zaitsev^{2, *}, P. I. Zarubin², V. I. Izucheev¹, D. S. Krinitsyn¹,
B. V. Polishchuk¹, V. I. Rykalin¹, S. A. Sadovsky¹, Yu. V. Kharlov¹, and A. A. Shangaraev¹

¹ Logunov Institute for High Energy Physics, National Research Centre “Kurchatov Institute”,
Protvino, Moscow oblast, 142281 Russia

² Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

*e-mail: zaitcev@jinr.ru

Received July 19, 2024; revised July 19, 2024; accepted July 29, 2024

Abstract—Events of the α -fragmentation of the ^{12}C and ^{16}O nuclei in nuclear track emulsion in inelastic interactions with 7 GeV/c positively charged hadrons has been studied in the 4 ϕ geometry. The accumulated event statistics has allowed us to estimate the cross section for the $^{12}\text{C}(h, h')3\alpha$ and $^{16}\text{O}(h, h')4\alpha$ fragmentation reactions induced by a hadron beam.

Keywords: α -fragmentation, ^{12}C and ^{16}O nuclei, nuclear emulsion, hadron beam, reaction cross section