

КРАТКИЙ ОБЗОР ПО ИССЛЕДОВАНИЮ НЕСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В ДИССОЦИАЦИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

*А. А. Зайцев**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Представлен краткий обзор результатов по исследованию нестабильных состояний в диссоциации релятивистских ядер ^{10}B , $^{11,12}\text{C}$, ^{16}O , ^{22}Ne , ^{28}Si , ^{84}Kr и ^{197}Au в области энергий от сотен МэВ/нуклон до нескольких десятков ГэВ/нуклон методом ядерной фотоэмульсии. Систематическое изучение фрагментации налетающих ядер с множественным образованием легчайших фрагментов He и H позволило понять динамику проявления нестабильных ядерных состояний ^8Be , состояние Хойла и 4α -частичное состояние ядра ^{16}O над порогом в релятивистской диссоциации ядер благодаря прецизионным измерениям углов эмиссии фрагментов. Показано, что для реконструкции релятивистских распадов нестабильных ядер в ядерной фотоэмульсии достаточно определить инвариантную массу системы фрагментов He и H в приближении сохранения импульса на нуклон родительского ядра. В данном подходе возможен поиск более сложных ядерных состояний. Получено указание на возрастание вероятности обнаружения ^8Be с ростом числа релятивистских α -частиц в событии.

The article presents a review of the results of studying unstable states in the dissociation of relativistic nuclei ^{10}B , $^{11,12}\text{C}$, ^{16}O , ^{22}Ne , ^{28}Si , ^{84}Kr and ^{197}Au in the energy range from hundreds of MeV/nucleon to several tens of GeV/nucleon using the nuclear track method. A systematic study of the fragmentation of incident nuclei with multiple formation of the lightest fragments of He and H made it possible to study the dynamics of the manifestation of unstable nuclear states of ^8Be , the Hoyle state and the 4α -particle state of the ^{16}O nucleus above the threshold in the relativistic dissociation of nuclei thanks to precision measurements of fragment emission angles. It is shown that to reconstruct the relativistic decays of unstable nuclei in a nuclear photographic emulsion, it is sufficient to determine the invariant mass of the system of He and H fragments in the approximation of conservation of momentum per nucleon of the parent nucleus. This approach makes it possible to search for more complex nuclear states. An indication was obtained of an increase in the probability of detecting ^8Be with an increase in the number of relativistic α particles in the event.

PACS: 21.45+v; 23.60+e; 25.10+s

* E-mail: zaicev@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых аспектов ядерной структуры является наличие степеней свободы, в которых квартеты спаренных по спину протонов и нейтронов ведут себя как составляющие кластеры, проявляющиеся в интенсивном образовании α -частиц в самых разнообразных ядерных реакциях и распадах. Переход к изучению ансамблей α -частиц сразу над порогами связи позволяет выявить роль нестабильных ядер ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ и 3α -состояния Хойла (HS) и вести поиск их аналогов.

Применение технически несложного и недорогого метода ядерной эмульсии (ЯЭ) в пучках релятивистских ядер дает гибкость и единообразие на поисковом этапе, а в теоретическом аспекте — прозрачность интерпретации. Весьма ценно продемонстрировать схожесть выводов на основе релятивистской инвариантности. При диссоциации релятивистских ядер в узком телесном угле фрагментации интенсивно генерируются ансамбли ядер He и H (рис. 1). Особенно ценными являются так называемые белые звезды, в области вершины взаимодействия которых не наблюдаются треки ядра-мишени и рожденных мезонов. Кроме того, при прослеживании в направлении конуса фрагментации тяжелых ядер можно наблюдать звезды, не имеющие входящего трека из вершины события, которые возникают во взаимодействиях релятивистских нейтронов-фрагментов и ядер из состава ЯЭ [1].

Согласно ширинам распада ${}^8\text{Be}$, ${}^9\text{B}$ и HS происходят при пробегах от нескольких тысяч (${}^8\text{Be}$ и HS) до нескольких десятков (${}^9\text{B}$) атомных размеров и должны идентифицироваться минимальной инвариантной массой. Вследствие минимальной энергии распада ${}^8\text{Be}$, ${}^9\text{B}$ и HS должны проявляться как пары и тройки релятивистских фрагментов He и H с наименьшими углами разлета. Инвариантная масса системы релятивистских фрагментов определяется как сумма всех скалярных произведений 4-импульсов $\mathbf{P}_{i,k}$ фрагментов $M^{*2} = \Sigma(\mathbf{P}_i \cdot \mathbf{P}_k)$. Для удобства представления принята переменная Q , определенная как разность инвариантной массы и суммы масс фрагментов: $Q = M^* - \Sigma m$. Компоненты $\mathbf{P}_{i,k}$ определяются в приближении сохранения фрагментами начального импульса на нуклон.

Современный интерес к ядерной α -кластеризации в значительной степени мотивирован концепцией α -частичного конденсата Бозе–Эйнштейн-

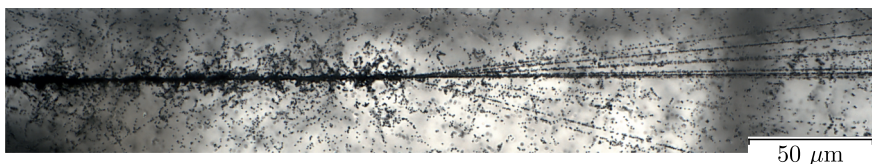


Рис. 1. Макрофотография периферического взаимодействия ядра ${}^{84}\text{Kr}$ с энергией 950 МэВ/нуклон с множественным образованием вторичных фрагментов He и H

на (α ВЕС). Нестабильные ядра ${}^8\text{Be}$ и HS описываются как состояния 2 и 3α ВЕС, а их распады могут служить сигнатурами распадов более сложных состояний $n\alpha$ ВЕС. Существование последних может расширить картину нуклеосинтеза тяжелых ядер. Недавно на статистике десятков распадов ${}^8\text{Be}$ обнаружено возрастание вероятности обнаружения ${}^8\text{Be}$ с ростом числа ассоциированных α -частиц $n\alpha$. Сделан предварительный вывод о том, что вклады распадов ${}^9\text{B}$ и HS также растут.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАСПАДОВ ЯДЕР ${}^8\text{Be}$ И ${}^9\text{B}$ В ДИССОЦИАЦИИ ЛЕГКИХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

Анализ облучения слоев ЯЭ в пучке ядер ${}^{10}\text{B}$ с энергией 1 ГэВ/нуклон позволил выявить эффект доминирования канала множественной фрагментации [2, 3]. В распределении фрагментов по зарядовому состоянию доля канала ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ составила 77% . На основании измерений углов вылета фрагментов He и H было установлено, что нестабильное ядро ${}^8\text{Be}_{\text{gs}}$ (рис. 2, б) проявляется с вероятностью $(25 \pm 5)\%$, из которых $(13 \pm 3)\%$ приходится на распады нестабильного ядра ${}^9\text{B}$ (рис. 2, а). Неожиданным представляется тот факт, что число «белых» звезд ${}^9\text{B} + n$ в 10 раз превысило ${}^9\text{Be} + p$. Это наблюдение может указывать на более широкое пространственное распределение нейтронов в ядре ${}^{10}\text{B}$ по сравнению с протонами, что приводит к большему сечению канала ${}^9\text{B} + n$ по сравнению с зеркальным каналом. Кроме того, с вероятностью 8% наблюдаются звезды в канале ${}^{10}\text{B} \rightarrow {}^6\text{Li} + \alpha$. Возможно, что ядро Li, слабо проявляющееся в диссоциации ${}^{10}\text{B}$,

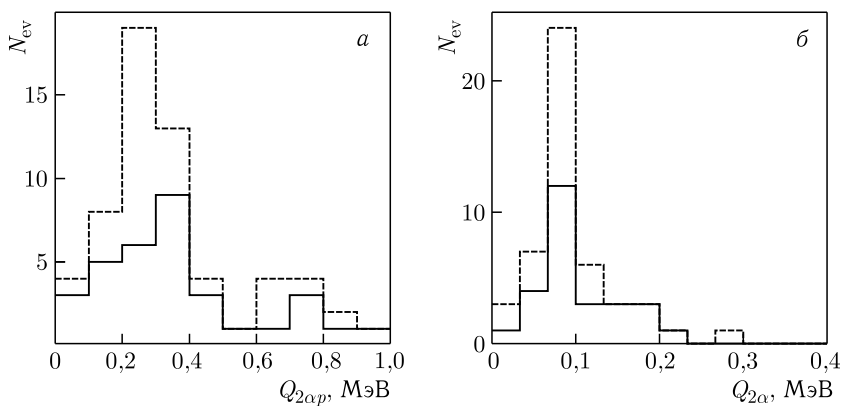


Рис. 2. Распределения троек $2\alpha p$ по энергии возбуждения $Q_{2\alpha p}$ (а) для фрагментации ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ при $1,6$ ГэВ/с (сплошная линия) и ${}^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ при $2,0$ ГэВ/с (штриховая линия) и $Q_{2\alpha}$ α -пар в распадах ${}^9\text{B}$, выявленных в этих событиях (б) [7]

также присутствует в ^{10}B в основном в «растворенном» виде и дает в распределении $\Theta_{2\text{He}}$ нерезонансный вклад [2–4].

Исследована зарядовая топология каналов диссоциации ядер ^{11}C в ЯЭ с энергией 1,2 ГэВ/нуклон. Среди звезд ^{11}C преобладают события с наблюдением только для релятивистских фрагментов He и H, особенно $2\text{He} + 2\text{H}$, их вклад составил 77% [5]. Установлен характерный только для ядра ^{11}C канал с образованием фрагментов $\text{Li} + \text{He} + \text{H}$. На основании измеренных углов эмиссии фрагментов He и H (в представлении инвариантной переменной Q) было показано, что распады ядер $^8\text{Be}_{\text{gs}}$ (см. рис. 2, б) из всех найденных «белых» звезд ^{11}C представлены в 21% событий $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ и 19% для канала $^{11}\text{C} \rightarrow 3\text{He}$. Распады ^9B (см. рис. 2, а) выявлены у «белых» звезд $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$, составляющих 14% «белых» звезд $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$. Установлено, что, как и в случае ^{10}C , $^8\text{Be}_{\text{gs}}$ -распады «белых» звезд ^{11}C почти всегда возникают за счет распадов ^9B [5, 6]. Стоит отметить самый низкий энергетический пик в распределении $Q_{2\alpha 2p}$ 18 найденных звезд $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$, характеризующийся средним значением $Q_{2\alpha 2p}$ ($2,7 \pm 0,4$) МэВ при среднеквадратичном значении 2,0 МэВ [6].

Установленное при анализе данных по диссоциации ядер ^{10}B и ^{11}C ограничение на идентификацию распадов ядер ^8Be ($Q_{2\alpha} < 0,2$ МэВ) позволило оценить вклад таких распадов в диссоциации релятивистских ядер $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ в ЯЭ на уровне (45 ± 4)% и (62 ± 3)% соответственно (рис. 3) [7–9].

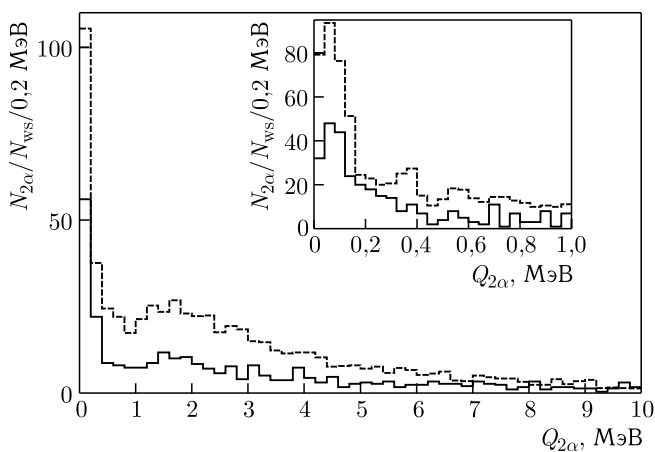


Рис. 3. Распределение числа 2α -пар $N_{2\alpha}$ по энергии возбуждения $Q_{2\alpha}$ в когерентной диссоциации $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (сплошная линия) и $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ (штриховая линия) при 3,65 ГэВ/нуклон; на вставке — увеличенный участок $Q_{2\alpha} < 1$ МэВ (шаг 40 кэВ); гистограммы нормированы на количество «белых» звезд N_{ws} [9]

НАБЛЮДЕНИЕ СОБЫТИЙ С РАСПАДАМИ СОСТОЯНИЯ ХОЙЛА

Определенность в идентификации ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{Be}$ стала основанием для поиска распадов HS в диссоциации ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (рис. 4), где было установлено ограничение по переменной Q α -троек до 0,7 МэВ [7]. Комплексный анализ звезд ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ позволил установить, что доля событий, содержащих распады HS, составляет $(11 \pm 3)\%$ для ${}^{12}\text{C}$ и $(22 \pm 2)\%$ для ${}^{16}\text{O}$ (см. рис. 4) [7–11]. Идентифицированы 33 события ${}^{16}\text{O} \rightarrow 2{}^8\text{Be}$, что составляет $(5 \pm 1)\%$ «белых» звезд ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$. В распределении по величине Q системы из 4 α -частиц в событиях ${}^{16}\text{O} \rightarrow 2{}^8\text{Be}$ [12] указывают на два кандидата ${}^{16}\text{O}(0_6^+) \rightarrow 2{}^8\text{Be}$ в области $Q < 1,0$ МэВ. Статистика диссоциации по каналам ${}^{16}\text{O} \rightarrow 2{}^8\text{Be}$ и ${}^{16}\text{O} \rightarrow \alpha\text{HS}$ имеет отношение $0,22 \pm 0,02$ [9].

Можно заметить, что с ростом 2 α - и 3 α -комбинаций в событии усиливается проявление нестабильных ${}^8\text{Be}$ и HS. Таким образом, HS, идентифицированный в релятивистской диссоциации ${}^{12}\text{C}$, проявляется и в случае ${}^{16}\text{O}$. Такой результат показывает, что HS не сводится к обычному возбуждению ядра ${}^{12}\text{C}$, а, как и ${}^8\text{Be}$, является более универсальным объектом ядерно-молекулярной природы. Ближайшим подтверждением этого предположения могут выступать наблюдения HS в релятивистской фрагментации ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha$ [13]. Тем не менее такое наблюдение заслуживает проверки для более тяжелых ядер, когда α -комбинаторика стремительно нарастает с массовым числом.

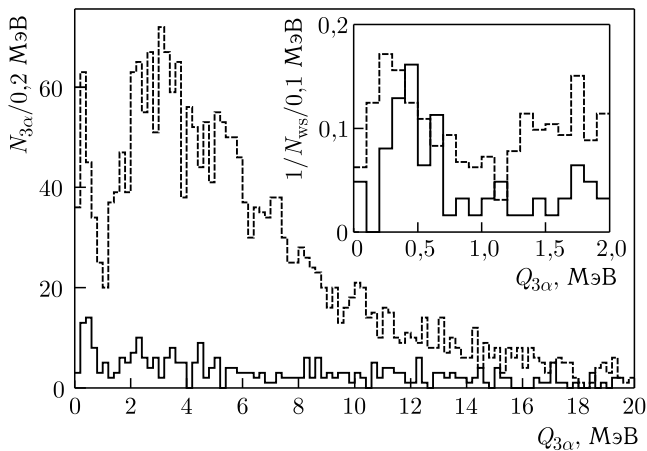


Рис. 4. Распределение числа 3 α -троек $N_{3\alpha}$ по энергии возбуждения $Q_{3\alpha}$ для 316 «белых» звезд ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (сплошные линии) и 641 «белой» звезды ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ (штриховые) при энергии 3,65 ГэВ/нуклон; на вставке — увеличенная часть $Q_{3\alpha} < 2$ МэВ, нормированная на число «белых» звезд N_{ws} [9]

α -ЧАСТИЧНАЯ ДИССОЦИАЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

Будучи апробированным при изучении легких ядер, подобный поиск был применен к исследованию событий диссоциации более средних и тяжелых ядер для идентификации ${}^8\text{Be}$ и HS и поиска более сложных $n\alpha$ ВЕС-состояний. Проведенный анализ позволил проследить вклад нестабильных состояний с большей множественностью фрагментов He и H методом поперечного сканирования слоев ЯЭ. Начиная с фрагментации ядер ${}^{16}\text{O}$ в диапазоне значений энергии 3,65–200 ГэВ/нуклон, анализ показал относительное увеличение вклада ядер ${}^8\text{Be}$ при увеличении числа релятивистских α -частиц на событие [14]. Проанализированы результаты измерений 4301 взаимодействия ядер ${}^{22}\text{Ne}$ при энергии 3,22 ГэВ/нуклон [15]. Этот набор данных включает прецизионные измерения углов вылета релятивистских от 2α - до 5α -частиц, что позволило провести анализ в переменных $Q_{(2-5)\alpha}$. Установлено, что вероятность идентификации ${}^8\text{Be}$, ${}^9\text{B}$ и HS возрастает с множественностью α -частиц в событии [15]. Аналогичный результат был получен при анализе 1093 событий $n\alpha$ -фрагментации ядер ${}^{28}\text{Si}$ с энергией 14,6 ГэВ/нуклон в ядерной эмульсии вплоть до 6α -частиц в событии [14]. Распределение событий с идентифицированными ядрами ${}^8\text{Be}$ по переменной $Q_{3\alpha}$ для набора данных по ядрам ${}^{12}\text{C}$, ${}^{22}\text{N}$ и ${}^{28}\text{S}$ приведено на рис. 5.

Исследованы $n\alpha$ -события при поперечном сканировании слоев ЯЭ, продольно облученных в пучке ядер ${}^{84}\text{Kr}$ с энергией 950 МэВ/нуклон [12, 16]. В этом анализе импульс фрагментов был скорректирован с учетом ионизационных потерь в ЯЭ и факторизован на коэффициент 0,8, чтобы приблизительно подсчитать падение начального

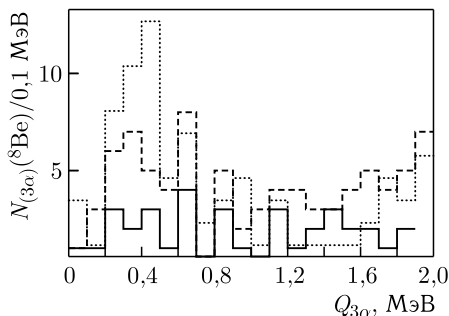


Рис. 5. Распределения 3α -систем с идентифицированными распадами ${}^8\text{Be}$ $N_{(3\alpha)}({}^8\text{Be})$ по энергии возбуждения $Q_{3\alpha}$ (≤ 2 МэВ) в событиях фрагментации ядер ${}^{22}\text{Ne}$ с энергией 3,22 ГэВ/нуклон (сплошная линия) и ${}^{28}\text{Si}$ при энергии 14,6 ГэВ/нуклон (штриховая линия). Пунктирной линией отмечено распределение $N_{(3\alpha)}({}^8\text{Be})$ в диссоциации ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$, нормированное на статистику ${}^{22}\text{Ne}$ и ${}^{28}\text{Si}$ [14]

значения импульса при взаимодействии [16]. Будучи непринципиальным для отбора $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be}) \leq 0,4$ МэВ, далее он позволяет сохранить условие отбора $Q_{3\alpha}(\text{HS}) < 0,7$ МэВ, ориентируясь на пик $Q_{3\alpha}(\text{HS})$ (рис. 6). Распределения по $Q_{4\alpha}$ до 10 МэВ указывают на α -квартет при $n\alpha = 6$ с изолированным значением $Q_{4\alpha} = 0,6$ МэВ, отвечающий как варианту αHS , так и ${}^8\text{Be}$ [12]. Не противореча распаду ${}^{16}\text{O}(0_6^+)$, это единичное наблюдение служит отправным пунктом дальнейшего накопления статистики по проблеме $4\alpha\text{BEC}$ -состояния.

Широкий охват по $n\alpha$ обеспечен измерениями 1316 неупругих взаимодействий ${}^{197}\text{Au}$ при 10,7 ГэВ/нуклон [14]. Доля событий с $n\alpha > 3$ среди измеренных составила 16%. Из-за усложнения измерений условие от-

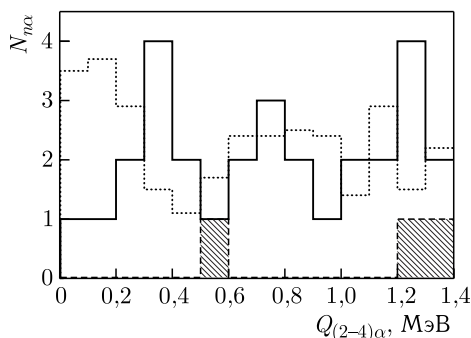


Рис. 6. Распределение в области малых значений энергии возбуждения $n\alpha$ -систем Q : пар (пунктирная линия, фактор 0,1), троек (сплошная линия) и четверок (заштриховано) α -частиц, образовавшихся во фрагментации ядер Кг [12]

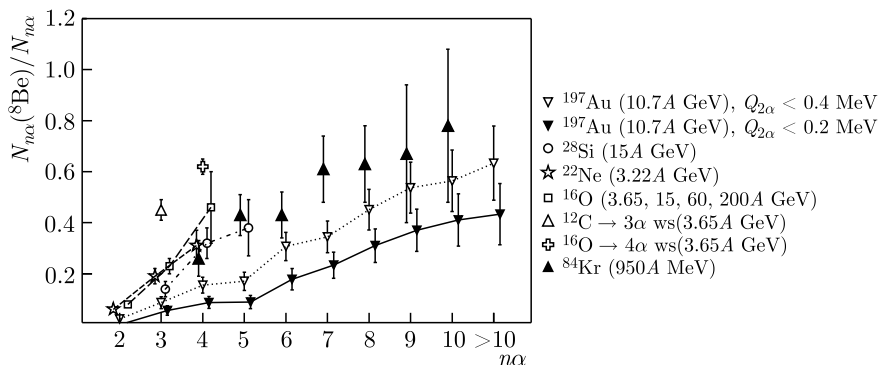


Рис. 7. Зависимость относительного вклада распадов ядер ${}^8\text{Be}$ $N_{n\alpha}({}^8\text{Be})$ в статистику событий $N_{n\alpha}$ с множественностью α -частиц $n\alpha$ в релятивистской фрагментации ядер С, О, Ne, Si и Au; отмечены «белые» звезды ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ (ws); для удобства точки несколько смещены вокруг значений $n\alpha$ и соединены линиями

бора $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be})$ было ослаблено до $\leq 0,4$ МэВ. Оказалось, что отношения числа событий $N_{n\alpha}({}^8\text{Be})$ с хотя бы одним идентифицированным распадом ${}^8\text{Be}$ к их числу $N_{n\alpha}$ демонстрируют сильный рост с $n\alpha$ [14, 17]. В целом корреляционная картина зависимости множественности α -частиц в событии и от числа событий с идентифицированными распадами ${}^8\text{Be}$ (не менее одного) показана на рис. 7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zaitsev A. A., Marimuthu N., Artemenkov D. A., Zarubin P. I., Peresadko N. G., Rusakova V. V. *Cosmophysical Aspects of Relativistic Nuclear Fragmentation*. arXiv:2307.16465 [nucl-ex].
2. Zaitsev A. A., Artemenkov D. A., Bradnova V., Zarubin P. I., Zarubina I. G., Kattabekov R. R., Kornegrutsa N. K., Mamatkulov K. Z., Mitsova E. K., Neagu A., Rukoyatkin P. A., Rusakova V. V., Sarkisyan V. R., Stanoeva R., Haiduc M., Firu E. *Dissociation of Relativistic ${}^{10}\text{B}$ Nuclei in Nuclear Track Emulsion // Phys. Part. Nucl.* 2017. V. 48. P. 960–963; doi: 10.1134/S1063779617060012.
3. Artemenkov D. A., Mamatkulov K. Z., Kharlamov S. P., Zaitsev A. A., Zarubin P. I. *Recent Findings in Relativistic Dissociation of ${}^{10}\text{B}$ and ${}^{12}\text{C}$ Nuclei // Few-Body Syst.* 2017. V. 58, No. 2. P. 89; doi: 10.1007/s00601-017-1240-3.
4. Artemenkov D. A., Bradnova V., Britvich G. I., Zaitsev A. A., Zarubin P. I., Zarubina I. G., Kalinin V. A., Kattabekov R. R., Kornegrutsa N. K., Kostin M. Yu., Maksimov A. V., Mamatkulov K. Z., Mitseva E., Neagu A., Pikalov V. A., Polkovnikov M. K., Rukoyatkin P. A., Rusakova V. V., Sarkisyan V. R., Stanoeva R., Firu E., Haiduc M., Kharlamov S. P. *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 ${}^{12}\text{C}$ Nuclei // Phys. Atom. Nucl.* 2017. V. 80. P. 1126–1132; doi: 10.1134/S1063778817060047.
5. Artemenkov D. A., Bradnova V., Zaitsev A. A., Zarubin P. I., Zarubina I. G., Kattabekov R. R., Kornegrutsa N. K., Mamatkulov K. Z., Rukoyatkin P. A., Rusakova V. V., Stanoeva R. *Charge Topology of the Coherent Dissociation of Relativistic ${}^{11}\text{C}$ and ${}^{12}\text{N}$ Nuclei // Phys. Atom. Nucl.* 2015. V. 78. P. 794–799; doi: 10.1134/S1063778815060022; arXiv:1411.5806 [nucl-ex].
6. Artemenkov D. A., Zaitsev A. A., Zarubin P. I. *Unstable Nuclei in Dissociation of Light Stable and Radioactive Nuclei in Nuclear Track Emulsion // Phys. Part. Nucl.* 2017. V. 48. P. 147–157; doi: 10.1134/S1063779617010026; arXiv:1607.08020 [nucl-ex].
7. Artemenkov D. A., Bradnova V., Britvich G. I., Firu E., Haiduc M., Kalinin V. A., Kharlamov S. P., Kornegrutsa N. K., Kostin M. Yu., Maksimov A. V., Mitsevae E., Neagu A., Pikalov V. A., Polkovnikov M. K., Rusakova V. V., Stanoeva R., Zaitsev A. A., Zarubin P. I., Zarubina I. G. *Nuclear Track Emulsion in Search for the Hoyle-State in Dissociation of Relativistic ${}^{12}\text{C}$ Nuclei // Radiat. Meas.* 2018. V. 119. P. 199–203; doi: 10.1016/j.radmeas.2018.11.005; arXiv:1812.09096 [nucl-ex].
8. 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. Nucl.* 2018. V. 81. P. 1237–1243; doi: 10.1134/S106377881809020X.

9. *Artemenkov D. A., Bradnova V., Chernyavsky M. M., Firu E., Haiduc M., Kornegrutsa N. K., Malakhov A. I., Mitsova E., Neagu A., Peresadko N. G., Rusakova V. V., Stanoeva R., Zaitsev A. A., Zarubin P. I., Zarubina I. G.* Unstable States in Dissociation of Relativistic Nuclei: Recent Findings and Prospects of Research // *Eur. Phys. J. A.* 2020. V. 56, No. 10. P. 250.
10. *Artemenkov D. A., Zaitsev A. A., Zarubin P. I.* Search for the Hoyle State in Dissociation of Relativistic ^{12}C Nuclei // *Phys. Part. Nucl.* 2018. V. 49. P. 530–539; doi: 10.1134/S1063779618040081.
11. *Artemenkov D. A., Haiduc M., Kornegrutsa N. K., Mitsova E., Peresadko N. G., Rusakova V. V., Stanoeva R., Zaitsev A. A., Zarubin P. I., Zarubina I. G.* The Hoyle State in Relativistic ^{12}C Dissociation // *Recent Progress Few-Body Phys. (FB22 2018)*. 2022. V. 238. P. 137–139; doi: 10.1007/978-3-030-32357-8_24; arXiv:2004.10277 [nucl-ex].
12. *Артеменков Д. А., Брaднова В., Кашанская О. Н., Кондратьева Н. В., Корнегруца Н. К., Мицова Э., Пересадыко Н. Г., Русакова В. В., Станоева Р., Зайцев А. А., Зарубина И. Г., Зарубин П. И.* Перспективы поиска нестабильных состояний в релятивистской фрагментации ядер // *ЯФ.* 2022. Т. 85, № 6. С. 397–408.
13. *Mitsova E., Zaitsev A. A., Artemenkov D. A., Kornegrutsa N. K., Rusakova V. V., Stanoeva R., Zarubin P. I., Zarubina I. G.* Search for Decays of the ^9B Nucleus and Hoyle State in ^{14}N Nucleus Dissociation // *Phys. Part. Nucl.* 2022. V. 53, No. 2. P. 456–460; doi: 10.1134/S1063779622020575; arXiv:2011.06265 [nucl-ex].
14. *Zaitsev A. A., Artemenkov D. A., Glagolev V. V., Chernyavsky M. M., Peresadko N. G., Rusakova V. V., Zarubin P. I.* Correlation in Formation of ^8Be Nuclei and α -Particles in Fragmentation of Relativistic Nuclei // *Phys. Lett. B.* 2021. V. 820. P. 136460; doi: 10.1016/j.physletb.2021.136460; arXiv:2102.09541 [nucl-ex].
15. *Zaitsev A. A., Zarubin P. I.* The Hoyle State in the Relativistic Dissociation of Light Nuclei // *Phys. Atom. Nucl.* 2019. V. 82. P. 1225–1233; doi: 10.1134/S1063778819090114; arXiv:1907.07430 [nucl-ex].
16. *Zarubin P., Zaitsev A., Peresadko N.* Enhanced Production of ^8Be Nuclei in Relativistic Nuclei Fragmentation // *PoS PANIC2021*. 2022. P. 219; doi: 10.22323/1.380.0219; arXiv:2111.07678 [nucl-ex].
17. *Zaitsev A. A., Zarubin P. I., Peresadko N. G.* An Enhancement of Formation of Unstable ^8Be Nucleus with the Growth of α -Particle Multiplicity in Fragmentation of Relativistic Nuclei // *Phys. Atom. Nucl.* 2021. V. 84, No. 9. P. 1641–1646; doi: 10.1134/S1063778821090386; arXiv:2207.13568 [nucl-ex].