

КОСМОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДЕР

© 2024 г. А. А. Зайцев^{1), 2)*}, Н. Маримутху¹⁾, Д. А. Артеменков¹⁾, П. И. Зарубин^{1), 2)},
Н. Г. Пересадько²⁾, В. В. Русакова¹⁾

Поступила в редакцию 28.07.2023 г.; после доработки 28.07.2023 г.; принята к публикации 28.07.2023 г.

Представлен статус исследования множественной фрагментации ядер Кг с энергией 950 МэВ на нуклон в ядерной эмульсии, нацеленного на определение вкладов 2α -распадов ^8Be , 3α -состояния Хойла и поиска 4α -частичного конденсатного состояния. В событиях с образованием нескольких релятивистских фрагментов He и H изучена возможность оценки множественности нейтронов в конусе фрагментации ядра-снаряда. Для планарной компоненты поперечных импульсов нейтронов, оценивавшихся по углам расположения наблюдаемых вторичных звезд, параметр распределения Рэлея составил (35 ± 7) МэВ/с. Отмечается важность таких событий для интерпретации космофизических наблюдений.

DOI: 10.31857/S0044002724010066, EDN: KEDJQJ

1. ВВЕДЕНИЕ

Начиная с открытия ядерной компоненты космических лучей только метод ядерной эмульсии (ЯЭ) позволяет изучать состав релятивистской фрагментации ядер на ускорителях высоких энергий. Многообещающий потенциал релятивистского подхода к анализу ансамблей фрагментов проявился в облучениях ЯЭ ядрами при энергии несколько гигаэлектронвольт на нуклон, начавшихся еще в 1970-х гг. на синхрофазотроне ОИЯИ и Бевалаке в Лаборатории имени Лоуренса в Беркли (США). Однако объективные трудности не позволили продвинуться в этом направлении иными методами. С 2000-х гг. метод ЯЭ применяется в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ в исследованиях кластерной структуры ядер, в том числе радиоактивных, а также в поиске нестабильных ядерно-молекулярных состояний [1].

Согласно наблюдениям релятивистские ядра вплоть до самых тяжелых могут фрагментировать в ядерной эмульсии на нуклоны и нуклонные кластеры. Последние представлены изотопами H и He (в основном протонами и α -частицами), а также легкими ядрами, обладающими выраженной кластерной структурой. Один из наиболее ярких примеров представлен на рис. 1, где отчетливо виден срыв ионизации в результате множественной фрагментации налетающего ядра. Несколько процентов

взаимодействий содержат струи фрагментов с суммарным зарядом, близким к заряду начального ядра, зачастую не сопровождаемые образованием фрагментов мишени. До сих пор интерпретация этого явления не предложена. Кроме того, внутри конуса фрагментации тяжелых ядер часто наблюдаются вторичные звезды, не имеющие следов до вершины взаимодействия, которые образуют релятивистские нейтроны-фрагменты.

Средний пробег релятивистских нуклонов в среде ЯЭ около 35 см. В принципе, множественность нейтронов может оцениваться по многократно уменьшающейся средней длине появления ядерных звезд, не имеющих входного следа. Будучи трудоемкими, измерения многократного рассеяния следов позволяют идентифицировать релятивистские изотопы $^2, ^3\text{H}$ и $^3, ^4\text{He}$, которые косвенно указывают на число нейтронов в наиболее периферических столкновениях. Целостное исследование образования нейтронов в антилабораторной системе представляется важным как в ядерной астрофизике и космофизике, так и в прикладных ядерных исследованиях.

Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ нацелен на поиск в релятивистском подходе α -частичного конденсата Бозе–Эйнштейна (αBEC) — нестабильного состояния S -волновых α -частиц [2, 3]. Крайне короткоживущее ядро ^8Be описывается как $2\alpha\text{BEC}$, а возбуждение $^{12}\text{C}(0^+_2)$, или состояние Хойла (HS), — как $3\alpha\text{BEC}$. Реализуемость более сложных состояний существенна в ядерной астрофизике. Поиск αBEC проводится в слоях ЯЭ, продольно облученных ядрами от C до Au. Инвариантная масса α -ансамблей и ее превышение над порогом Q определяются по углам испускания в приближении

¹⁾ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

²⁾ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

*E-mail: zaicev@jinr.ru

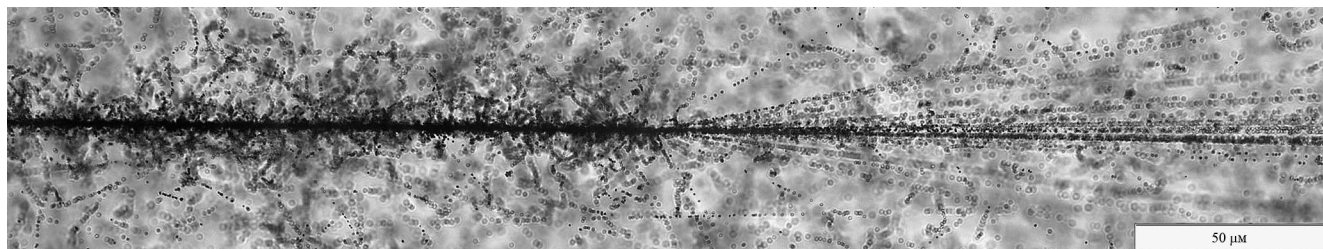


Рис. 1. Макрофотография периферического взаимодействия ядра ^{124}Xe с энергией 3.8 ГэВ на нуклон (облучение 2022 г. на ускорительном комплексе NICA).

сохранения импульса на нуклон родительского ядра. Для легких ядер было показано, что благодаря предельно малым значениям энергий и ширин распады ^8Be и HS идентифицируются ограничением Q . Распады $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ и $^{12}\text{C}(0^+_{2}) \rightarrow ^8\text{Be}_\alpha$ могут служить сигнатурами более сложных распадов $n\alpha\text{BEC}$. Так, состояние $^{16}\text{O}(0^+_{6})$ при массе 660 кэВ над 4α -порогом, рассматриваемое как $4\alpha\text{BEC}$, может распадаться на $\alpha^{12}\text{C}(0^+_{2})$ или 2^8Be .

Будучи апробирован с легкими ядрами, универсальный метод инвариантной массы стал применяться для идентификации ^8Be и HS и поиска более сложных состояний $n\alpha\text{BEC}$ в рамках накопленных ранее данных по фрагментации средних и тяжелых ядер. Недавно на статистике десятков распадов ^8Be обнаружено возрастание вероятности обнаружения ^8Be с ростом числа ассоциированных α -частиц n_α . Сделан предварительный вывод о том, что вклады распадов ^9Be и HS также растут. Экзотически большие размеры и времена жизни ^8Be и HS позволяют предположить возможность синтеза αBEC последовательным подхватом возникающих α -частиц $2\alpha \rightarrow ^8\text{Be}$, $^8\text{Be}_\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}(0^+_{2})$, $^{12}\text{C}(0^+_{2}) \alpha \rightarrow ^{16}\text{O}(0^+_{6})$, $2^8\text{Be} \rightarrow ^{16}\text{O}(0^+_{6})$ и далее с вероятностью, падающей на каждом шаге, при испускании γ -квантов или частиц отдачи. Заслуживает изучения возможность непрямого определения сечения этих реакций слияния по вероятностям диссоциации в нестабильные состояния.

Далее представлен статус поиска αBEC и первые наблюдения образования нейтронов в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ.

2. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ α -ЧАСТИЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ

В эксперименте БЕККЕРЕЛЬ ведется целенаправленное изучение n_α -каналов фрагментации ядер ^{84}Kr до 1 ГэВ на нуклон в слоях ЯЭ, облученных продольно в 1990-х гг. в GSI (Дармштадт) [1]. Ускоренный поиск таких взаимодействий при поперечном просмотре слоев начат на моторизованном микроскопе Olympus BX63. Статистика измеренных событий с образованием 5–10 α -частиц

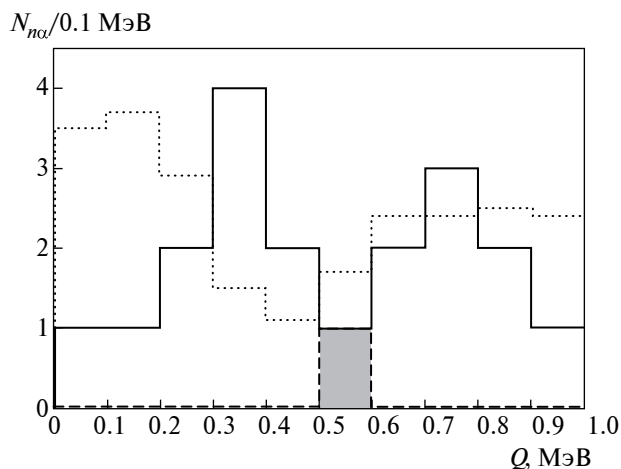


Рис. 2. Распределение в области малых значений избытка инвариантной массы Q пар (точки), троек (сплошная линия) и четверок (заштрихованная область) α -частиц, образовавшихся во фрагментации ядер Kr .

в конусе фрагментации достигла 146 в шести слоях. На рис. 2 представлены распределения по избытку инвариантной массы Q пар, троек и четверок α -частиц. Число событий с распадами ^8Be ($Q_{2\alpha} < 0.4$ МэВ) составляет 96, HS ($Q_{3\alpha} < 0.7$ МэВ) — 13 и парой 2^8Be — 17, давая отношение HS/ ^8Be 0.14 ± 0.04 , а 2^8Be — 0.18 ± 0.05 . Их распределение по n_α [1] демонстрирует взаимную пропорциональность, следовательно, рост при нормировке на число событий n_α , быстро падающее с n_α . Идентифицировано событие 2^8Be ($Q_{4\alpha} = 0.6$ МэВ), изолированное в области $Q_{4\alpha} < 1$ МэВ.

Набираемая статистика позволяет выявить нейтронную компоненту, возрастающую с n_α . В то же время множественность нейтронов-спектаторов, испускаемых во взаимодействиях, должна еще быстрее возрастать с множественностью ассоциированных фрагментов Н (в основном протонов). На рис. 3 представлена корреляция множественностей n_e и n , где средние значения составляют 5.3 ± 0.1 и 4.3 ± 0.2 соответственно. Суммарный заряд этих фрагментов около 18, т.е. примерно половина заряда родительского ядра. Таким образом, можно

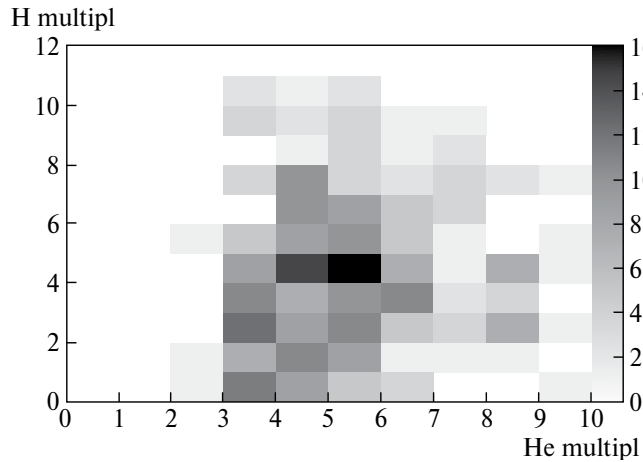


Рис. 3. Распределение событий по множественности релятивистских фрагментов He и H.

ожидать мгновенной эмиссии нескольких десятков нейтронов, оставшихся в конусе фрагментации.

3. НАБЛЮДЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ НЕЙТРОНОВ

Для получения опыта поиска вторичных звезд в конусе фрагментации, которые могли быть индуцированы нейтронами (SNS), использовались 10 событий из числа описанных выше с топологией (He, H), отмеченной на рис. 4. В отобранных 10 событиях средний пробег ядер Kг в ЯЭ до неупругого взаимодействия составил 19 мм. При просмотре примерно на 10 мм от вершин по X (вдоль) и ± 0.3 мм по Y (поперек) обнаружено 67 звезд SNS, примеры которых приведены на рис. 5. Распределение числа SNS на рис. 4 может служить для разработки вероятностной оценки множественности нейтронов.

Согласно распределению в плоскости слоя ЯЭ по продольной X и поперечной Y координатам от вершин (рис. 6) SNS концентрируются на площади

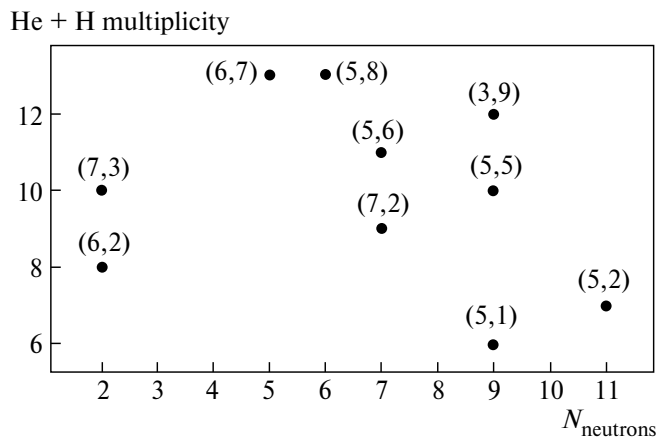


Рис. 4. Корреляция числа SNS и множественности фрагментов He и H в конусе фрагментации. В скобках указано число фрагментов He и H.

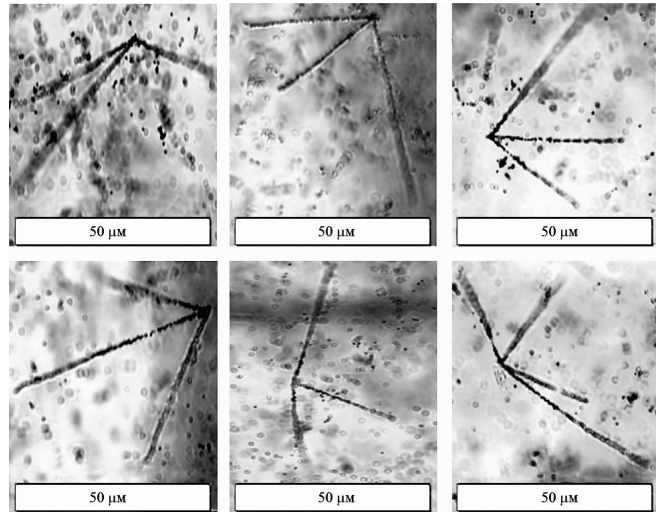


Рис. 5. Макрофотографии вторичных звезд в конусе фрагментации, интерпретируемые как индуцированные нейтронами.

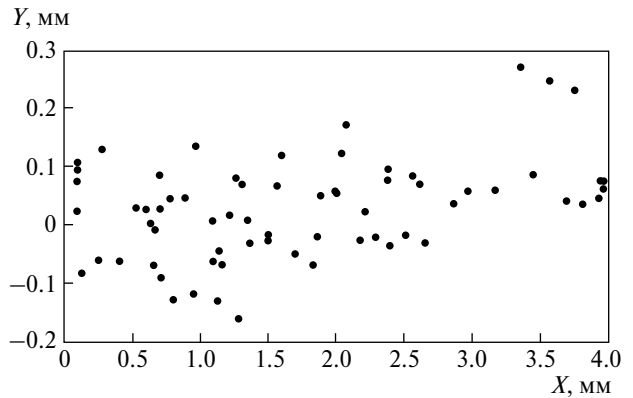


Рис. 6. Распределение координат звезд SNS в фокальной плоскости XY относительно первичной вершины.

по X до 4 мм и по $Y \pm 0.2$ мм. Дальнейшее уменьшение их числа может определяться сокращением охватываемого телесного угла. Не сокращая существенно статистику SNS, ограничение на площадь позволяет уменьшить возможный фон. Начаты измерения координат Z по глубине резкости.

На рис. 7 представлено распределение по планарному углу между направлением первичного трека Kг и зарегистрированными событиями SNS в фокальной плоскости XY . Полученное распределение описывается функцией Гаусса с параметрами $\langle \phi \rangle = (-18 \pm 1)$ мрад и $\sigma = (38 \pm 1)$ мрад. В приближении сохранения импульса на нуклон на рис. 8 представлено распределение планарной компоненты p_y поперечного импульса нейтронов. Оно описывается функцией Рэлея с параметром $\sigma = (35 \pm 7)$ МэВ/с. Тогда средний поперечный импульс с учетом объемного фактора составляет 50 МэВ/с, отвечая энергии в системе родительского ядра 1.3 МэВ. Столь малая величина указывает на

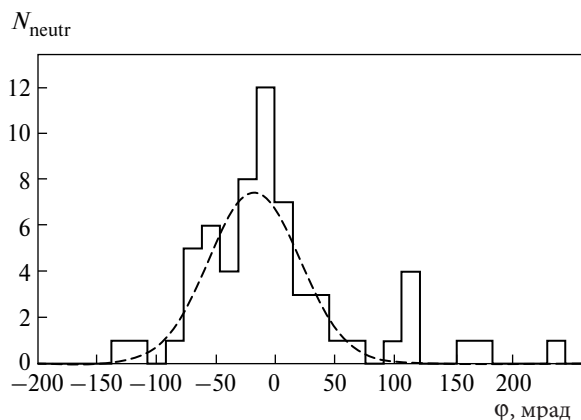


Рис. 7. Распределение по плоскому углу ϕ наблюдения SNS относительно направления первичного следа, аппроксимированное функцией Гаусса (штриховая кривая).

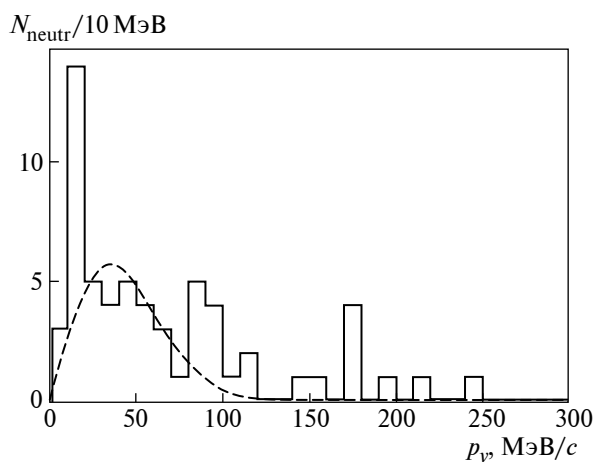


Рис. 8. Распределение по планарной компоненте поперечных импульсов нейтронов в конусе фрагментации, аппроксимированное функцией Рэлея (штриховая кривая).

определяющий вклад импульсного распределения периферических нейтронов в родительском ядре. Она может быть использована для оценок в космофизических и прикладных исследованиях.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Будучи источником для поиска неисследованных форм ядерной материи, фрагментация тяжелых ядер с одновременным образованием десятков нуклонов и легчайших ядер должна проявляться и в космофизических аспектах. Взаимодействие в атмосфере Земли тяжелых ядер космического происхождения может приводить к событиям, являющимся эффективным источниками вторичных мезонов и в итоге групп релятивистских мюонов (muon bundles). Прохождение последних отмечается в крупномасштабных детекторах на коллайдерах (например, [4]). Наблюдения групп мюонов

с большими углами по отношению к зениту ведутся в эксперименте NEVOD-DECOR (см. недавние публикации [5–7]).

Гигантские значения энергии первичных ядер существенно не изменяют течение диссоциации вблизи порогов связи, по существу, остающейся низкоэнергетическим явлением. Однако они ведут к сжатию конуса фрагментации на соответствующие порядки величин и коллимации регистрируемых мюонов. Еще один вопрос состоит в том, насколько события множественной фрагментации симулируют взаимодействие протонов с энергией на один или два порядка большей, чем у ядерных нуклонов. Для учета этого явления потребуется дополнить картину последовательной фрагментации мгновенным образованием легчайших ядер и нейтронов. Представленное исследование может служить отправным пунктом на этом направлении.

Невысокое значение энергии ядер (существенно ниже режима предельной фрагментации) ведет к их быстрому торможению и усложнению динамики взаимодействий, что ухудшает идентификацию HS и тем самым ее перспективы в поиске 4α ВЕС [3]. Применить отработанные подходы позволяет облучение ЯЭ тяжелыми ядрами при энергии несколько гигаэлектронвольт на нуклон. Также сужение конуса фрагментации оказывается полезным в отношении наблюдения звезд, индуцированных нейтронами. Такую возможность открыло ускорение ядер ^{124}Xe до энергии 3.8 ГэВ на нуклон, осуществленное в зимнем сеансе 2022 г. на ускорительном комплексе NICA. Начат анализ стопок ЯЭ, облученных в начальном участке выведенного пучка и в здании выведенных пучков 205 за экспериментом BM@N. В последнем случае пучок тяжелых ядер доводится по магнитооптическому каналу длиной около 70 м в ионопроводе.

Поиск n_α ВЕС служит отправным пунктом на пути к изучению ядерной материи с температурой и плотностью от красных гигантов до сверхновых. В этом отношении слои ЯЭ, облученные тяжелыми ядрами при энергии несколько гигаэлектронвольт на нуклон ускорительного комплекса NICA, позволят применить отработанные подходы к анализу релятивистских ансамблей изотопов H и He, а также нейтронов беспрецедентной множественности. Соотношения и значения энергии в системе ядра-снаряда идентифицируемых изотопов ^{1-3}H и $^3,^4\text{He}$ характеризуют возникающую материю [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. A. Artemenkov, V. Bradnova, O. N. Kashanskaya, N. V. Kondratieva, N. K. Kornegruitsa, E. Mitsova, N. G. Peresadko, V. V. Rusakova, R. Stanoeva, A. A. Zaitsev, I. G. Zarubina, and P. I. Zarubin, Phys. At. Nucl. **85**, 528 (2022); doi.org/10.1134/S1063778822060035; arXiv: 2206.09690.

2. A. Tohsaki, H. Horiuchi, P. Schuck, and G. Ropke, *Rev. Mod. Phys.* **89**, 011002 (2017);
doi.org/10.1103/RevModPhys.89.011002
3. W. von Oertzen, *Lect. Notes Phys.* **818**, 1 (2010);
doi.org/10.1007/978-3-642-13899-7_3
4. J. Abdallah *et al.* (DELPHI Collab.), *Astrophys. J.* **28**, 273 (2007);
doi.org/10.1016/j.astropartphys.2007.06.001; arXiv: 0706.2561 [astro-ph].
5. A. G. Bogdanov, R. P. Kokoulin, G. Manocchi, A. A. Petrukhin, and O. Saavedra, *Astrophys. J.* **98**, 13 (2018);
doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.01.003
6. V. S. Vorobev and A. A. Petrukhin, *Phys. At. Nucl.* **84**, 934 (2021);
doi.org/10.1134/S1063778821130408
7. G. Trinchero, M. B. Amelchakov, A. G. Bogdanov, A. Chiaavassa, A. N. Dmitrieva, G. Mannocchi, S. S. Khokhlov, R. P. Kokoulin, K. G. Kompaniets, A. A. Petrukhin, V. V. Shutenko, I. A. Shulzhenko, I. I. Yashin, and E. A. Yurina, *Astrophys. J.* **945**, 123 (2023);
doi.org/10.3847/1538-4357/acb1fc; arXiv: 2210.09690.
8. S. Typel, G. Röpke, T. Klähn, D. Blaschke, and H. H. Wolter, *Phys. Rev. C* **81**, 015803 (2010);
doi.org/10.1103/PhysRevC.81.015803; arXiv.org/abs/0908.2344 [nucl-th].

COSMOPHYSICAL ASPECTS OF RELATIVISTIC NUCLEAR FRAGMENTATION

**A. A. Zaitsev^{1), 2)}, N. Marimuthu¹⁾, D. A. Artemenkov¹⁾, P. I. Zarubin^{1), 2)},
N. G. Peresad'ko²⁾, V. V. Rusakova¹⁾**

¹⁾*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

²⁾*P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The status of the study of multiple fragmentation of 950 MeV per nucleon Kr nuclei in a nuclear track emulsion aimed at determining the contributions of 2α decays of ^8Be , the Hoyle 3α state, and the search for a 4α particle condensate state, is presented. In events with the production of few relativistic fragments of He and H, the possibility of estimating the multiplicity of neutrons in the fragmentation cone of a projectile nucleus is studied. For the planar component of neutron transverse momenta estimated from the angles of observed secondary stars, the Rayleigh distribution parameter was 35 ± 7 MeV/c. The importance of such events for the interpretation of cosmophysical observations is noted.