

Д. А. Артеменков, А. А. Зайцев, П. И. Зарубин

Новости эксперимента BECQUEREL

Будучи нестабильными к испусканию α -частиц и нуклонов вблизи порогов связи, ядра ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ и ряд возбуждений легких изотопов имеют времена жизни порядка фемтосекунд или ширины от нескольких электронвольт до 1 кэВ. В рамках концепций молекулярноподобных и α -конденсатных структур такие состояния представляются как объединения пространственно-разделенных групп нуклонов. Они могут указывать на более широкий класс долгоживущих нестабильных состояний, существование которого возможно на нижнем пределе плотности и температуры ядерной материи. Идентификация известных состояний позволяет изучать их возникновение во взаимодействиях между фрагментами в реакциях легких ядер и на этой основе вести поиск более сложных аналогов.

Предельно низкие энергии распадов нестабильных состояний ведут к наименьшим инвариантным массам соответствующих ансамблей фрагментов. Для их определения в конусе релятивистской диссоциации ядер в ядерной эмульсии достаточно измерения

углов испускания фрагментов и предположения о сохранении ими начального импульса на нуклон. Таким образом, при изучении диссоциации легких изотопов, включая радиоактивные, в эксперименте BECQUEREL идентифицированы распады ${}^8\text{Be}(0^+) \rightarrow 2\alpha$, ${}^9\text{B} \rightarrow 2\alpha p$, ${}^6\text{Be} \rightarrow \alpha 2p$ и состояние Хойла ${}^{12}\text{C}(0_2^+) \rightarrow 3\alpha$. На сайте имеется видео характерных событий [1].

Вслед за ${}^8\text{Be}(0^+)$ и ${}^{12}\text{C}(0_2^+)$ в фокусе остается поиск 4α -конденсата Бозе–Эйнштейна, в качестве которого рассматривается возбуждение ${}^{16}\text{O}(0_6^+)$ при 660 кэВ над порогом 4α . Выявлено несколько кандидатов ${}^{16}\text{O}(0_6^+)$ среди ${}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{12}\text{C}(0_2^+)\alpha$ и $2{}^8\text{Be}(0^+)$. Возрастание вероятности ${}^8\text{Be}(0^+)$ с увеличением числа α -частиц во фрагментации более тяжелых ядер позволяет предложить механизм слияния $2\alpha \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+)\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}(0_2^+)\alpha \rightarrow {}^{16}\text{O}(0_6^+)$.

На статистике 712 событий ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha(n)$ при 2 ГэВ/с на нуклон оценены поперечные импульсы, уносимые нейтронами, и на этой основе инвариантные массы троек $2\alpha n$ [2]. При условии присутствия ${}^8\text{Be}(0^+)$

D. A. Artemenkov, A. A. Zaitsev, P. I. Zarubin

BECQUEREL Experiment News

Being unstable to the emission of α particles and nucleons near the binding thresholds, the nuclei of ${}^8\text{Be}$ and ${}^9\text{B}$ and a number of excitations of light isotopes have lifetimes of the order of femtoseconds or widths from several eV to 1 keV. Within the framework of the concepts of molecular-like and α -condensate structures, such states are represented as associations of spatially separated groups of nucleons. They may indicate a broader class of long-lived unstable states, the existence of which is possible at the lower limit of the density and temperature of nuclear matter. Identification of the known states allows one to study their occurrence in interactions between fragments in reactions of light nuclei and, on this basis, to search for more complex analogues.

The extremely low decay energies of the unstable states lead to the smallest invariant masses of the corresponding ensembles of fragments. To determine them in the cone of

relativistic dissociation of nuclei in a nuclear emulsion, it is sufficient to measure the angles of fragment emission and assume that the initial momentum per nucleon is conserved. Thus, when studying the dissociation of light isotopes, including radioactive ones, the BECQUEREL experiment identified the decays ${}^8\text{Be}(0^+) \rightarrow 2\alpha$, ${}^9\text{B} \rightarrow 2\alpha p$, ${}^6\text{Be} \rightarrow \alpha 2p$ and the Hoyle state ${}^{12}\text{C}(0_2^+) \rightarrow 3\alpha$. The site contains a video of characteristic events [1].

Following ${}^8\text{Be}(0^+)$ and ${}^{12}\text{C}(0_2^+)$, the search for the 4α Bose–Einstein condensate remains in focus, with the excitation of ${}^{16}\text{O}(0_6^+)$ at 660 keV above the 4α threshold being considered as the candidate. Several ${}^{16}\text{O}(0_6^+)$ candidates have been identified among ${}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{12}\text{C}(0_2^+)\alpha$ and $2{}^8\text{Be}(0^+)$. The increase in the probability of ${}^8\text{Be}(0^+)$ with the number of α particles in the fragmentation of heavier nuclei allows us to propose the fusion mechanism $2\alpha \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+)\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}(0_2^+)\alpha \rightarrow {}^{16}\text{O}(0_6^+)$.

в этом распределении при 21 кэВ над порогом ${}^8\text{Be}(0^+)n$ проявляется пик (рис. 1). Он согласуется с распадами наиболее низкого возбуждения ${}^9\text{Be}^*(1.7 \text{ МэВ})$. Его вклад в канал ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+)n$ составляет 33 %.

В 510 событиях диссоциации ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ при 4,5 ГэВ/с на нуклон идентифицированы распады возбуждения ${}^{12}\text{C}(3^-)$ при 2,37 МэВ над 3α -порогом [2] (рис. 2). Структура ${}^{12}\text{C}(3^-)$ предполагается в виде равностороннего треугольника α -частиц с единичными угловыми моментами относительно общего центра. Вклад ${}^{12}\text{C}(0_2^+)$ и ${}^{12}\text{C}(3^-)$ в канал ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+)\alpha$ (43 % всей 3α -статистики) составил 26 и 45 %. Схожим образом распады ${}^{12}\text{C}(0_2^+)$ и ${}^{12}\text{C}(3^-)$ идентифицированы в 648 событиях ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ [3] (рис. 2). Вклад ${}^{12}\text{C}(0_2^+)\alpha$ составил 22 %, а ${}^{12}\text{C}(3^-)\alpha$ — 32 %. Состояние ${}^{12}\text{C}(3^-)$ усиливается в диссоциации ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ по сравнению со случаем ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ аналогично ${}^{12}\text{C}(0_2^+)$.

Альтернативной структурой ${}^{16}\text{O}(0_6^+)$ может оказаться ${}^{12}\text{Ca}$. Распределения по инвариантной массе в канале диссоциации ${}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{12}\text{Ca}$ могут быть сосредоточены ниже 4α -порога, усиливая тем самым аргументацию в пользу 4α -структуры ${}^{16}\text{O}(0_6^+)$. Нельзя исключить сосуществования возбуждений ${}^{12}\text{C}(0_2^+)\alpha$ и ${}^{12}\text{Ca}$ в пределах ширины ${}^{16}\text{O}(0_6^+)$, равной 165 кэВ. Разрешение этой двойственности требует реконструк-

The transverse momenta carried away by neutrons and, on this basis, the invariant masses of $2\alpha n$ triplets were estimated using the statistics of 712 ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha(n)$ events at 2 GeV/c per nucleon [2]. Provided that ${}^8\text{Be}(0^+)$ is present, a peak appears in this distribution at 21 keV above the ${}^8\text{Be}(0^+)n$ threshold (Fig. 1). It is consistent with the decays of the lowest excitation ${}^9\text{Be}^*(1.7 \text{ MeV})$. Its contribution to the ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+)$ channel is 33 %.

In 510 ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ dissociation events at 4.5 GeV/c per nucleon, decays of the excitation ${}^{12}\text{C}(3^-)$ at 2.37 MeV above the 3α threshold were identified [2] (Fig. 2). The ${}^{12}\text{C}(3^-)$ structure is assumed to be an equilateral triangle of α particles with unit angular momenta about a common centre. The contributions of ${}^{12}\text{C}(0_2^+)$ and ${}^{12}\text{C}(3^-)$ to the ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+)\alpha$ channel (43 % of the total 3α statistics) are 26 and 45 %. Similarly, ${}^{12}\text{C}(0_2^+)$ and ${}^{12}\text{C}(3^-)$ decays were identified in 648 ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ events [3] (Fig. 2). The contribution of ${}^{12}\text{C}(0_2^+)\alpha$ was 22 %, and the one of ${}^{12}\text{C}(3^-)\alpha$ was 32 %. The ${}^{12}\text{C}(3^-)$ state is enhanced in the ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ dissociation compared to the ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ case, similar to ${}^{12}\text{C}(0_2^+)$.

An alternative structure of ${}^{16}\text{O}(0_6^+)$ may be ${}^{12}\text{Ca}$. The invariant mass distributions in the ${}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{12}\text{Ca}$ dissocia-

Рис. 1. Распределение по инвариантным массам троек, состоящих из пар α -частиц и нейтронов $Q_{2\alpha n}$ в диссоциации ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+)n$ при 2 ГэВ/с на нуклон; кривая — распределение Брейта–Вигнера [1]

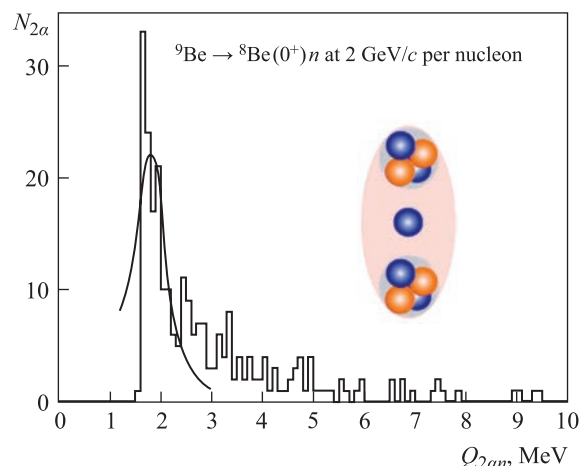


Fig. 1. Distribution of invariant masses of triplets consisting of pairs of α particles and neutrons $Q_{2\alpha n}$ in the dissociation ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+)n$ at 2 GeV/c per nucleon; curve is the Breit–Wigner distribution [1]

Рис. 2. Распределение по инвариантной массе троек α -частиц $Q_{3\alpha}$ в событиях ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+)\alpha$ (точки) и ${}^{16}\text{O} \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+)2\alpha$ (сплошная линия); нормировка на число событий [2, 3]

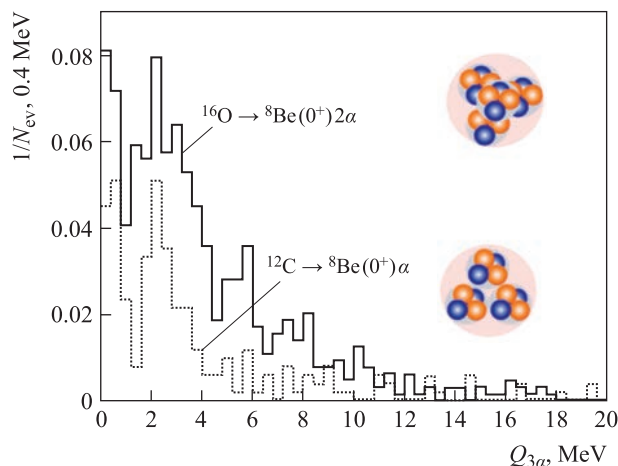


Fig. 2. Distribution of the invariant mass of α -particle triplets $Q_{3\alpha}$ in the events ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+)\alpha$ (dotted line) and ${}^{16}\text{O} \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+)2\alpha$ (solid line), normalized to the number of events [2, 3]

tion channel may be concentrated below the 4α threshold, thus strengthening the argument in favor of the 4α structure of ${}^{16}\text{O}(0_6^+)$. The coexistence of ${}^{12}\text{C}(0_2^+)\alpha$ and ${}^{12}\text{Ca}$ excitations within the 165 keV width of ${}^{16}\text{O}(0_6^+)$ cannot be excluded. Resolving this duality requires a decay reconstruction. Identification of threshold states of ${}^{12}\text{Ca}$ could be used to search for decays involving them in the dissoci-

ции распадов. Идентификация пороговых состояний $^{12}\text{C}\alpha$ может быть применена для поиска распадов с их участием в диссоциации более тяжелых ядер. Ведется анализ бинарной диссоциации $^{16}\text{O} \rightarrow ^{12}\text{C}\alpha$.

В каналах диссоциации изотопов Be, B, C и N, некратных числу α -частиц, лидируют ансамбли He и H. Для $^{10,11}\text{C}$, ^{10}B идентифицированы распады $^9\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}(0^+)p$ и $^7\text{Be}-^6\text{Be} \rightarrow \alpha 2p$. Для ^{14}N идентифицированы $^9\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}(0^+)p$ и $^{12}\text{C}(0_2^+) \rightarrow ^8\text{Be}(0^+)\alpha$. Эти факты позволяют расширить гипотезу о формировании нестабильных состояний путем подхвата $2\alpha \rightarrow ^8\text{Be}(0^+)p \rightarrow ^9\text{Ba} \rightarrow ^{13}\text{N}^*(15,1 \text{ МэВ})$ и $2\alpha \rightarrow ^8\text{Be}(0^+)\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}(0_2^+)p \rightarrow ^{13}\text{N}^*(15,1 \text{ МэВ})$. В таком контексте ведется поиск обратных последовательностей распадов изобар-аналогового состояния $^{13}\text{N}^*(15,1 \text{ МэВ})$.

Недавнее расширение списка идентифицированных состояний, распадающихся с участием $^8\text{Be}(0^+)$, позволяет усилить аргументацию в пользу как самого подхода, так и универсальности в образовании нестабильных состояний. Идентификация $^8\text{Be}(0^+)$ и $^{12}\text{C}(0_2^+)$, играющих значимую роль в ядерной астрофизике, указывает на интригующую возможность воспроизведения условий нуклеосинтеза в конусе релятивистской фрагментации. Ядро ^{16}O оказывается своего рода перевалом от кластерных ядер к ядрам с оболочечной

структурой. В релятивистской диссоциации ядер ^{22}Ne , ^{24}Mg и ^{28}Si могут исследоваться распады гигантских дипольных резонансов как модели многочастичных состояний ядерной астрофизики. Эмульсия, облученная на синхрофазотроне ОИЯИ, и ранние данные служат отправным пунктом на этом направлении. Наш подход, разработанный в рамках ставшего классическим метода ядерной эмульсии, позволяет придать беспрецедентный размах и глубину исследованиям ядерных ансамблей на основе интеллектуальной микроскопии.

Список литературы

1. <http://becquerel.jinr.ru/>.
2. *Artemenkov D.A., Kornegrut N.K., Peresadko N.G., Rusakova V.V., Zaitsev A.A., Zarubin P.I., Zarubina I.G.* High-lights of Unstable States in Relativistic Dissociation of Light Nuclei in Nuclear Emulsion // *Int. J. Mod. Phys. E*. 2024. V. 33, No. 12. P. 2441015; <https://doi.org/10.1142/S0218301324410155>; arXiv: 2409.14814.
3. *Zaitsev A.A., Zarubin P.I.* On Formation of the $^{12}\text{C}(0_2^+)$ and $^{12}\text{C}(3^-)$ States in Relativistic Dissociation of Light Nuclei // *Phys. At. Nucl.* (submitted); arXiv:2411.18394.

ation of heavier nuclei. An analysis of the binary dissociation $^{16}\text{O} \rightarrow ^{12}\text{C}\alpha$ is underway.

In the dissociation channels of Be, B, C and N isotopes that are not multiples of the number of α particles, the He and H ensembles are in the lead. For $^{10,11}\text{C}$, ^{10}B , the decays $^9\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}(0^+)p$ and $^7\text{Be}-^6\text{Be} \rightarrow \alpha 2p$ have been identified. For ^{14}N , $^9\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}(0^+)p$ and $^{12}\text{C}(0_2^+) \rightarrow ^8\text{Be}(0^+)\alpha$ have been identified. These facts allow one to expand the hypothesis about the formation of unstable states by pick-up $2\alpha \rightarrow ^8\text{Be}(0^+)p \rightarrow ^9\text{Ba} \rightarrow ^{13}\text{N}^*(15.1 \text{ MeV})$ and $2\alpha \rightarrow ^8\text{Be}(0^+)\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}(0_2^+)p \rightarrow ^{13}\text{N}^*(15.1 \text{ MeV})$. In this context, the search for inverse decay sequences of the isobaric analogue state $^{13}\text{N}^*(15.1 \text{ MeV})$ is conducted.

The identification of $^8\text{Be}(0^+)$ and $^{12}\text{C}(0_2^+)$, playing an outstanding role in nuclear astrophysics, points to an intriguing possibility of reproducing the conditions of nucleosynthesis in the relativistic fragmentation cone. The recent expansion of the list of identified states decaying with the participation of $^8\text{Be}(0^+)$ allows one to strengthen the arguments both in favor of the approach itself and its universality in the formation of unstable states. The ^{16}O nucleus turns out to be a kind of a pass from cluster nuclei to nuclei with a shell structure. In the relativistic dissocia-

tion of ^{22}Ne , ^{24}Mg and ^{28}Si nuclei, the decays of giant dipole resonances can be studied as models of many-particle states of nuclear astrophysics. The emulsion exposed at the JINR Synchrophasotron and early data serve as a starting point in this direction. Our approach, developed within the framework of the now classic nuclear emulsion method, allows for unprecedented scope and depth of studies of nuclear assemblies based on intelligent microscopy.

References

1. <http://becquerel.jinr.ru/>.
2. *Artemenkov D.A., Kornegrut N.K., Peresadko N.G., Rusakova V.V., Zaitsev A.A., Zarubin P.I., Zarubina I.G.* High-lights of Unstable States in Relativistic Dissociation of Light Nuclei in Nuclear Emulsion // *Int. J. Mod. Phys. E*. 2024. V. 33, No. 12. P. 2441015; <https://doi.org/10.1142/S0218301324410155>; arXiv: 2409.14814.
3. *Zaitsev A.A., Zarubin P.I.* On Formation of the $^{12}\text{C}(0_2^+)$ and $^{12}\text{C}(3^-)$ States in Relativistic Dissociation of Light Nuclei // *Phys. At. Nucl.* (submitted); arXiv:2411.18394.