

ДИССОЦИАЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР ^{10}B В ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ

А. А. Зайцев^{1,2,*}, Д. А. Артеменков¹, В. Браднова¹,
П. И. Зарубин^{1,2}, И. Г. Зарубина^{1,2}, Р. Р. Каттабеков¹,
Н. К. Корнегруца¹, К. З. Маматкулов¹, Е. К. Мицова^{1,3},
А. Неагу⁴, П. А. Рукояткин¹, В. В. Русакова¹, В. Р. Саркисян⁵,
Р. Станоева³, М. Хайдук⁴, Е. Фиру⁴

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

³ Юго-западный университет «Неофит Рильский», Благоевград, Болгария

⁴ Институт космических исследований, Магурель-Бухарест, Румыния

⁵ Ереванский физический институт, Ереван

В диссоциации ядер ^{10}B при энергии 1А ГэВ в ядерной эмульсии исследуются структурные особенности этого изотопа. В распределении по зарядовым состояниям фрагментов доля канала $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ составляет 78 %. На основе измерений углов испускания фрагментов в нем установлено, что нестабильные ядра $^8\text{Be}_{\text{gs}}$ проявляются с вероятностью $(26 \pm 4) \%$, причем $(14 \pm 3) \%$ из них возникают в распадах нестабильного ядра $^9\text{B}_{\text{gs}}$. Канал $\text{Be} + \text{H}$ оказался подавленным и составил около 1 %.

In dissociation of ^{10}B nuclei at energy of 1А GeV in nuclear track emulsion, structural features of this isotope are studied. In a charge state distribution of fragments the share of the channel $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ is 78%. On the basis of measurements of fragment emission angles, it is determined that unstable $^8\text{Be}_{\text{gs}}$ nuclei manifest with a probability of $(26 \pm 4) \%$, where $(14 \pm 3) \%$ of them occur in decays of the unstable $^9\text{B}_{\text{gs}}$ nucleus. Channel $\text{Be} + \text{H}$ appeared subdued, accounting for about 1%.

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

В качестве фундаментальных элементов своей структуры атомные ядра содержат виртуальные ассоциации нуклонов, или кластеры. Их простейшие наблюдаемые проявления — легчайшие ядра $^{4,3}\text{He}$ и $^{3,2}\text{H}$, не имеющие возбужденных состояний. Суперпозиции легчайших кластеров и нуклонов образуют следующие ядра, в том числе нестабильные ^8Be и ^9B , которые,

*E-mail: zaicev@ihe.jinr.ru

в свою очередь, играют роль составляющих кластеров. Баланс возможных суперпозиций в состояниях с подходящим спином и четностью определяет факт связанности и параметры основного состояния соответствующего ядра. Кластеризация основного состояния легкого ядра определяет структуру его возбуждений и начальные условия реакций с его участием. Дальнейшее присоединение нуклонов и легчайших ядер ведет к оболочечному типу структуры. Переплетение кластерных и оболочечных степеней свободы делает группу легких ядер своего рода «лабораторией» ядерной квантовой механики, полной сюрпризов. Кластеризация лежит в основе процессов, сопровождающих явления физики ядерных изобар, гиперъядер, кварк-партоновых степеней свободы. Представления о кластеризации ядер важны для применения в ядерной астрофизике, физике космических лучей, ядерной медицине и, возможно, в ядерной геологии.

В рамках проекта BECQUEREL [1], ориентированного на изучение кластерной структуры легких ядер, на нуклотроне ОИЯИ проведен цикл облучений ядерной эмульсии (ЯЭ) релятивистскими изотопами Ве, В, С и N, включая радиоактивные [2]. Продольно облученные слои ЯЭ позволяют полно анализировать ансамбли фрагментов. Особенно ценными в этом отношении являются события когерентной диссоциации ядер, в которых отсутствуют следы медленных фрагментов и заряженных мезонов («белые» звезды, см. рис. 1). Облучение ЯЭ ядрами ^{10}B с энергией 1 А ГэВ было проведено в 2002 г. в первом сеансе на выведенном пучке нуклотрона. Успех этого облучения стал основанием для последующих облучений во вторичных пучках, обогащенных ядрами ^8B и ^9Be , которые формировались на основе ускорения и фрагментации ^{10}B . При диссоциации ядра ^{10}B был отмечен эффект доминирования «белых» звезд $2\text{He} + \text{H}$ (около 70%), однако он не был исследован. Кроме того, оказался подавленным канал $\text{Be} + \text{H}$ (не более 2%). Это облучение оказалось в «тени» облучений релятивистскими радиоактивными ядрами с дефицитом нейтронов. Обнаружение значительного вклада

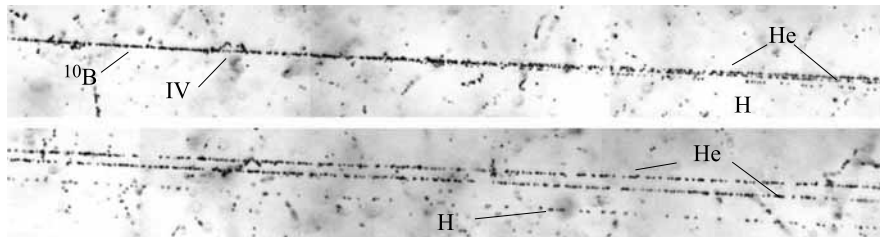


Рис. 1. Макрофотография события когерентной диссоциации ядра ^{10}B на фрагменты He и H; IV — примерное положение вершины взаимодействия. Характеристики данного события: $\Theta_{2\alpha} = 5,3$ мрад, $Q_{2\alpha} = 87$ кэВ, $Q_{2\alpha p} = 352$ кэВ

нестабильного ядра ^9B в структуре радиоактивного ядра ^{10}C [3] указывает на важность углубленного анализа диссоциации $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$. Его целью является определение вероятностей когерентной диссоциации ядра ^{10}B с участием ^8Be , а также ядра ^9B . Возобновление исследований по структуре ядра ^{10}B стало актуальным для интерпретации данных по ядру ^{11}C , в котором ^{10}B может играть роль структурного элемента [4].

Роль осколков в ^{10}B должны играть ядра с выраженной кластерной структурой, на что указывают пороги отделения нуклонов и легчайших ядер $^6\text{Li} + \alpha$ (4,5 МэВ), $^8\text{Be} + d$ (6,0 МэВ), $^9\text{Be} + p$ (6,6 МэВ) и $^9\text{B} + n$ (8,4 МэВ). Как и в случае ядра ^{10}C , при диссоциации ^{10}B распады нестабильного ядра ^9B могут быть источником ядер $^8\text{Be}_{\text{gs}}$ в основном состоянии 0^+ . Источником ядер ^8Be в первом возбужденном состоянии 2^+ могла бы быть кластерная конфигурация $^8\text{Be}_{2^+} + d$. Другая компонента ^{10}B основана на ядре ^9Be , в структуре которого $^8\text{Be}_{\text{gs}}$ и $^8\text{Be}_{2^+}$ присутствуют с примерно равными весами. При диссоциации ^{10}B эта компонента может проявиться как в образовании ядер ^9Be , так и пар α -частиц $^8\text{Be}_{\text{gs}}$ и $^8\text{Be}_{2^+}$. В случае когерентной диссоциации по каналу $^9\text{B} + n$ можно ожидать ту же вероятность, как и для зеркального канала $^9\text{Be} + p$. Аналогично ядро ^6Li может присутствовать как целостное образование и как виртуальная связь $\alpha + d$.

Эти соображения привели к возобновлению анализа облучения ^{10}B в 2015 г. К настоящему времени выполнен просмотр ЯЭ по следам пучковых ядер ^{10}B на длине 241 м, в результате чего найдено 1664 неупругих взаимодействия. Распределение 127 «белых»

звезд ^{10}B по зарядовой топологии (таблица) из их числа подтверждает лидерство канала $2\text{He} + \text{H}$ (78 %) и подавление канала $\text{Be} + \text{H}$ ($\sim 1\%$), который должен соответствовать конфигурации $^9\text{Be} + p$.

Для получения надежного опорного сигнала о ядрах ^8Be и ^9B по угловым измерениям статистика событий $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ была доведена до 296, включая 166 «белых» звезд. Такое увеличение достигнуто путем их ускоренного поиска $2\text{He} + \text{H}$ по площади и добавлением в измерения «небелых» звезд $2\text{He} + \text{H}$. Выборка обусловлена $2\text{He} + \text{H}$ в основном геометрическом расположением событий в объеме эмульсии относительно маркировки и не вносит каких-либо дополнительных критериев отбора.

Распределение пар 2He данной выборки по пространственному углу $\Theta_{2\text{He}}$ (рис. 2, а) в интервале $0 < \Theta_{2\text{He}} < 10,5$ мрад указывает на наличие 56 распадов $^8\text{Be}_{\text{gs}}$, включая 40 из «белых» звезд. Из распределения событий по

Распределение 127 «белых» звезд ^{10}B по зарядовым конфигурациям фрагментов

Канал	Число звезд
$\text{Be} + \text{H}$	1 (1%)
$2\text{He} + \text{H}$, включая ^8Be , ^9B	99, 24, 13 (78, 19, 10%)
$\text{He} + 3\text{H}$	16 (12%)
$\text{Li} + \text{He}$	5 (4%)
$\text{Li} + 2\text{H}$	5 (4%)
5H	1 (1%)

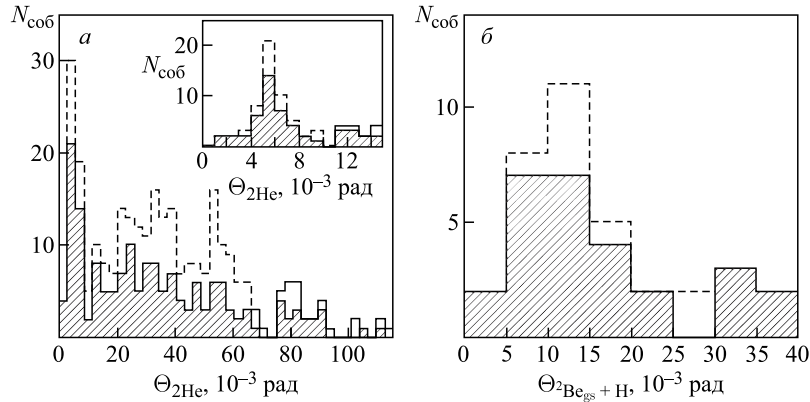


Рис. 2. Распределение событий $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ по углу разлета $\Theta_{2\text{He}}$ в парах 2He (а) и углу разлета $\Theta_{8\text{Be}_{\text{gs}} + \text{H}}$ в парах 8Be_{gs} и H (б) для всех найденных событий (штриховые линии) и в «белых» звездах (заштрихованные области)

пространственному углу $\Theta_{2\text{He}+\text{H}}$ между направлением 8Be_{gs} и H в интервале $0 < \Theta_{8\text{Be}+\text{H}} < 25$ мрад можно выделить 28 распадов, относимых к 9B_{gs} (аналогично [5]) во всех измеренных событиях, включая 22 таких распада в «белых» звездах (рис. 2, б). Таким образом, только для половины событий образование ядер 8Be_{gs} происходит через распады 9B_{gs} .

Реконструкция распадов релятивистских ядер 8Be и 9B возможна по энергии возбуждения $Q = M^* - M$, представляющей собой разность инвариантной массы фрагментов M^* , $M^{*2} = \sum(P_i P_k)$ и суммарной массы фрагментов M ; $P_{i,k}$ — 4-импульсы, определенные в приближении сохранения фрагментами начального импульса на нуклон. В области малых углов разлета оправданно предположение о соответствии изотопа H протонам, а He — α -частицам. Распределение по энергии $Q_{2\alpha}$ (рис. 3, а) в области $0 < Q_{2\alpha} < 200$ кэВ имеет среднее значение (105 ± 7) кэВ при RMS 46 кэВ и соответствует основному состоянию 8Be_{gs} . В свою очередь, распределение по энергии $Q_{2\alpha}$ троек $2\alpha + p$ (рис. 3, б) в области $0 < Q_{2\alpha p} < 400$ кэВ имеет среднее значение (261 ± 23) кэВ при RMS 91 кэВ и соответствует основному состоянию 9B_{gs} . Распределение по поперечному импульсу $P_{T(9\text{B})}$ ядер 9B_{gs} (рис. 4) описывается распределением Рэля с параметром $\sigma_{P_T(9\text{B})} = (121 \pm 30)$ МэВ/с, не противоречащим статистической модели (96 МэВ/с). В настоящее время ведется идентификация изотопов He и H методом многократного рассеяния, что позволит расширить область интерпретируемых углов разлета фрагментов.

Итак, нестабильные ядра 8Be и 9B проявляют себя в когерентной диссоциации по каналу $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ с вероятностью $(26 \pm 4)\%$ и $(14 \pm 3)\%$ соответственно и, следовательно, являются существенными ингредиентами

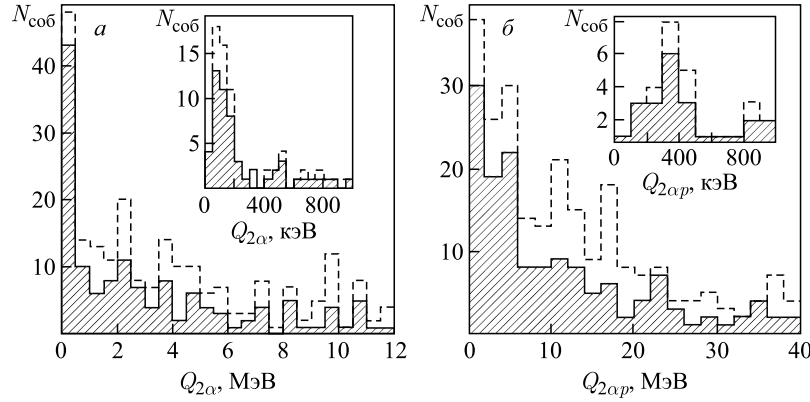


Рис. 3. Распределение событий $^{10}\text{В} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ по энергии $Q_{2\alpha}$ пар α -частиц (а) и $Q_{2\alpha p}$ троек $2\alpha + p$ (б) для всех найденных событий (штриховые линии) и в «белых» звездах (заштрихованные области); на вставках — увеличенные распределения $Q_{2\alpha}$ и $Q_{2\alpha p}$

ядра $^{10}\text{В}$. Неожиданным представляется тот факт, что число «белых» звезд $^9\text{В} + n$ в 10 раз превысило $^9\text{Ве} + p$ (см. таблицу). Это наблюдение может указывать на более широкое пространственное распределение нейтронов в ядре $^{10}\text{В}$ по сравнению с протонами, что приводит к большему сечению канала $^9\text{В} + n$ по сравнению с зеркальным каналом.

Возможная физическая картина состоит в следующем. Ядро $^9\text{В}$ представляет собой «разреженную» ядерно-молекулярную структуру из кластеров $2\alpha + p$. Кулоновский барьер может усиливать удержание протона. Возможно, что в ядре $^{10}\text{В}$ ядро-основа $^9\text{Ве}$ также присутствует

в «разреженном» виде $2\alpha + n$ как примерно равная суперпозиция связей $^8\text{Ве}_{\text{gs}}$ и $^8\text{Ве}_{2+}$ с нейтроном, а не как целостное образование. Тогда превышение распадов $^8\text{Ве}_{\text{gs}}$ над $^9\text{В}_{\text{gs}}$ в диссоциации может быть обусловлено дополнительным вкладом «разреженного» ядра $^9\text{Ве}$. Для сравнения отметим, что в структуре $^{10}\text{С}$ присутствие $^9\text{Ве}$ невозможно. Действительно, в «белых» звездах $^{10}\text{С}$ распады $^8\text{Ве}_{\text{gs}}$ всегда ассоциируются с распадами $^9\text{В}_{\text{gs}}$. Возможно,

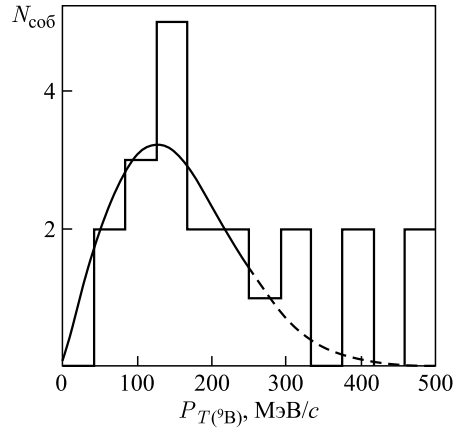


Рис. 4. Распределение «белых» звезд по поперечному импульсу $P_{T(^9\text{В})}$ троек $2\text{He} + \text{H}$ с образованием ядра $^9\text{В}_{\text{gs}}$

что ядро Li, слабо проявляющееся в диссоциации ^{10}B (см. таблицу), также присутствует в ^{10}B в основном в «растворенном» виде и дает в распределение $\Theta_{2\text{He}}$ нерезонансный вклад.

При изучении ядра ^{10}B , позволяющем проследить эволюцию от кластерного к оболочечному типу ядерной структуры, требуется привлечение сведений о релятивистской диссоциации ядер ^6Li и ^9Be , а также идентификация фрагментов H в канале $2\text{He} + \text{H}$. В свою очередь, детальное понимание когерентной диссоциации ядра ^{10}B служит основой интерпретации структуры следующего изотопа — ^{11}C .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *The BECQUEREL Project*. <http://becquerel.jinr.ru>.
2. *Zarubin P. I.* “Tomography” of the Cluster Structure of Light Nuclei via Relativistic Dissociation // *Lect. Notes Phys.* 2014. V.875, No.3 “Clusters in Nuclei”. P.51; arXiv:1309.4881.
3. *Маматкулов К. З. и др.* Диссоциация ядер ^{10}C с энергией 1,2А ГэВ в ядерной фотографической эмульсии // *ЯФ.* 2013. Т.76. С.1286 (*Mamatkulov K. Z. et al.* Dissociation of ^{10}C Nuclei in a Track Nuclear Emulsion at Energy of 1.2 GeV per Nucleon // *Phys. At. Nucl.* 2013. V. 76. P. 1224); arXiv:1309.4241.
4. *Артеменков Д. А. и др.* Зарядовая топология когерентной диссоциации релятивистских ядер ^{11}C и ^{12}N // *ЯФ.* 2015. Т.78. С.845 (*Artemenkov D. A. et al.* Charge Topology of Coherent Dissociation of ^{11}C and ^{12}N Relativistic Nuclei // *Phys. At. Nucl.* 2015. V. 78. P. 794); arXiv:1411.5806.
5. *Toshito T. et al.* Measurements of Projectile-Like ^8Be and ^9B Production in 200–400 MeV/nucleon ^{12}C on Water // *Phys. Rev. C.* 2008. V. 78. P.067602.