

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ В ДИССОЦИАЦИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР ^{10}C

Маматкулов Кахрамон Зиядуллаевич¹, Бекмирзаев Рахматулла Нурмурадович², Мустафоева Маржона Илхом кизи³, Курбанбеков Хасан Урол угли³

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия. e-mail: hero170184@mail.ru. ²Джизакский государственный педагогический институт, ³Студенты Джизакского государственного педагогического института Республика Узбекистан. e-mail: bekmirzaev@mail.ru

Аннотация. Представлены особенности периферической диссоциации релятивистских ядер ^{10}C с энергией 1.2 А ГэВ в ядерной фотозмульсии. Идентифицировано событие, которое в структуре ядра ^{10}C основной роль играет нестабильное ядро ^8Be , проявляющиеся в каскадной диссоциации $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{B} + p \rightarrow ^8\text{Be} + 2p$. Распады релятивистских ядер $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ через основное состояние 0^+ идентифицируются по энергии возбуждения α -частичных пар ($Q_{2\alpha}$).

Ключевые слова. Ядра, эмульсия, диссоциация, топология, протон, нейтрон, заряд, ускоритель, релятивистская ядра.

^{10}C релятивистик ядролар диссоциациясида кластеризация

Аннотация. 1.2 А ГэВ энергияли ядровий фотозмульсияларда ^{10}C релятивистик ядролар периферик диссоциацияси хусусиятлари келтирилган. $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{B} + p \rightarrow ^8\text{Be} + 2p$ каскадли диссоциацияларда ҳосил бўлувчи ^8Be нотурғун ядролар асосий роль ўйнавчи ^{10}C ядролар тузилишларидаги ҳодисалар идентификацияланган. Асосий 0^+ ҳолат орқали релятивистик ядролар $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ емирилиши α -зарралар жуфтлиги ($Q_{2\alpha}$) уйғониши энергияси бўйича идентификация қилинади.

Калит сузлар. Ядро, эмульсия, диссоциация, топология, протон, нейтрон, заряд, тезлатгич, релятивист ядро.

Clustering in relativistic dissociation of ^{10}C nuclei

Annotation. The dissociation features in nuclear track emulsion of ^{10}C nuclei of 1.2 A GeV energy are presented. The structure of the nucleus ^{10}C role foundations play an unstable nucleus ^8Be , which appear in the cascade of dissociation of $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{B} + p \rightarrow ^8\text{Be} + 2p$. Decays of relativistic nuclei $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ via the ground state 0^+ are identified by excitation energy α -particle pairs ($Q_{2\alpha}$).

Key words. Nucleus, emulsions, dissociation, topology, proton, neutron, charge, accelerator, relativistic nucleus.

ВВЕДЕНИЕ

Понятия барионной материи в холодной разбавленной фазе с кластеризации нуклонов в легких ядрах ^4He , ^3He , ^2H и ^3H были разработаны в последние десять лет. Теоретические разработки осуществляются в этом направлении ориентировать на изучение кластера

групп как целостных систем квантовой и дать мотивацию к новому поколению экспериментов на кластере спектроскопии. Поскольку макроскопических состояний кластера может играть роль промежуточной фазы в астрофизических процессах, эти исследования предположить значению, выходящих за рамки ядерной проблемы структуры.

Метод ядерной фотоэмульсии обеспечивает уникальную по полноте наблюдаемость множественных систем релятивистских фрагментов, образующихся при диссоциации с рекордным пространственным разрешением (0,5 мкм). Приблизительные сохранения начального импульса на нуклон релятивистских фрагментов, используется в кинематический анализ событий, чтобы компенсировать отсутствие импульса измерений. Физический смысл имеет энергия возбуждения α – пары $Q_{2\alpha} = M_{2\alpha}^* - M_{2\alpha}$, где $M_{2\alpha}^*$ – инвариантная масса системы фрагментов $M^{*2} = (\sum P_j)^2 = \sum (P_i \cdot P_k)$, а $P_{i,k}$ – 4-импульсы фрагментов i и k , определяемые в приближении сохранения значения первичного импульса на нуклон; $M_{2\alpha}$ – удвоенная масса α -частицы.

В узкие струи легких и легчайших ядер с суммарным зарядом, близким к заряду начального ядра, а наиболее периферические из них не сопровождаются образованием фрагментов мишени. События такого типа, так называемые «белые звезды», составляют несколько процентов среди наблюдаемых взаимодействий. Степень диссоциации легких O, Ne, Mg и Si, и, а также тяжелых Au, Pb и U ядер может достигать полного разрушения к легким и легчайшим ядрам и нуклонам, в результате приводит к кластерным системам беспрецедентной сложности. Динамики диссоциации тяжелых ядер может быть основано на особенностях диссоциации, установленных для легких ядер. Обширная коллекция фотографий таких взаимодействий собрано в сотрудничестве БЕККЕРЕЛЬ.

Несмотря на то, что потенциал релятивистского подхода к изучению ядерной кластеризации признано давно, электронные эксперименты не сможет приблизиться к необходимости детального наблюдения релятивистских ансамблей фрагмента.

КОГЕРЕНТНАЯ ДИССОЦИАЦИЯ ЯДЕР ^{10}C

Ядро ^{10}C является единственным примером системы, которая обладает супербороминскими свойствами (super-boromean), поскольку удаление из него одного из четырех кластеров в структуре $2\alpha + 2p$ (порог 3.8 МэВ) ведет к несвязанному состоянию. Двухкластерные структуры в ядре ^{10}C в виде ядер $^7\text{Be} + ^3\text{He}$ или в виде ядра $^8\text{B} + ^2\text{H}$ маловероятны из-за большой энергии связи. В случае одного внешнего протона центральной частью ядра должно служить нестабильное ядро ^9B . В другой возможной структуре с двумя внешними протонами центральная часть ядра представляет нестабильное

ядро ${}^8\text{Be}$. Такие структуры, по-видимому, по динамике должны быть сходны с бороминовскими структурами нейтроноизбыточных ядер. Диссоциация ядра ${}^{10}\text{C}$ может происходить путем каскадных распадов с образованием в промежуточном состоянии нестабильных промежуточных ядер ${}^9\text{B}$, ${}^8\text{Be}$ и ${}^6\text{Be}$. В таких распадах в конечном состоянии образуются по четыре заряженных фрагмента.

Генерация ядер ${}^{12}\text{N}$ и ${}^{10}\text{C}$ возможно в реакциях перезарядки и фрагментации ускоренных ядер ${}^{12}\text{C}$. Пучок ядер ${}^{12}\text{C}$ с импульсом 2 А ГэВ/с был ускорен на нуклотроне ОИЯИ и выведен на производящую мишень (2006 г.). Амплитудный спектр со сцинтилляционного счётчика, установленного на этом месте, указывает на преобладание изотопов ${}^3\text{He}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^{10}\text{C}$, а также на примесь ядер ${}^{12}\text{N}$, и практическое отсутствие ядер ${}^8\text{B}$ [12]. Вклад ядер ${}^{12}\text{N}$ мал по отношению к ядрам ${}^{10}\text{C}$, согласно отношению сечений перезарядки и фрагментации. В составе пучка присутствуют и ядра ${}^7\text{Be}$, у которых отличие по $Z_{\text{pr}}/A_{\text{pr}}$ от ${}^{12}\text{N}$ только 2%. Идентификация ядер ${}^{12}\text{N}$, ${}^{10}\text{C}$ и ${}^7\text{Be}$ в облученной эмульсии возможна по зарядам пучковых ядер, определяемых методом счёта дельта (δ) –электронов на пучковых следах. Начальный этап просмотра эмульсионных слоев состоял в визуальном поиске пучковых следов с зарядами $Z_{\text{pr}} = 1, 2$ и $Z_{\text{pr}} > 2$, которые отношение числа пучковых следов составило $\approx 1 : 3 : 18$. Для сравнения: в случае облучения ядрами ${}^9\text{C}$ это отношение составило $\approx 1 : 10 : 1$. Таким образом, в настоящем облучении вклад ядер ${}^3\text{He}$ резко снизился, что радикально подняло эффективность облучения и скорость поиска событий.

Таблица 1. Распределение по каналам диссоциации числа «белых» звезд N_{ws} и событий с фрагментами мишени или рожденными мезонами N_{tf} , для которых выполняется условие $\sum Z_{\text{fr}} = 6$.

Канал (${}^{10}\text{C}$)	$N_{\text{ws}}=227$	100%	$N_{\text{tf}}=627$	100%
B+H	1	0.4	12	1.9
Li+3H	1	0.4	2	0.3
Be + He	6	2.6	17	2.7
2He+2H	186	81.9	361	57.6
He+4H	12	5.3	160	25.5
3He	12	5.3	15	2.4
6H	9	4.0	30	4.8

В табл.1. приведено распределение по каналам диссоциации числа «белых» звезд N_{ws} , для которых выполняется условие $Z_{\text{pr}} = \sum Z_{\text{fr}}$ и $\sum Z_{\text{fr}} = 6$. Для случая $\sum Z_{\text{fr}} = 6$ такое условие проверено в 12 слоях при калибровке. Наиболее вероятный канал представлен 184 событиями $2\text{He} + 2\text{H}$, что и следовало ожидать для изотопа ${}^{10}\text{C}$. Канал $\text{He} + 4\text{H}$ оказался подавленным.

Действительно, для периферической диссоциации ^{10}C требуется преодоление высокого порога развала α – кластера.

УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

«Белые звезды» $^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 2p$ (табл. 1) дают пару наблюдаемых следов с малым угловым отклонением относительно следа первичного ядра. В результате измерений были получены средние значения полярных углов вылета : $\langle\theta_p\rangle \approx 45$ мрад – для протонов и $\langle\theta_\alpha\rangle \approx 15$ мрад – для α частиц. Угловые измерения позволяют с хорошей точностью восстановить спектры поперечных импульсов P_T по формуле $P_T = P_0 A \sin\theta$, где A – массовое число фрагмента, θ – угол его вылета, а P_0 – импульс на нуклон ^{10}C ($P_0 = 2.0 A$ ГэВ/с). На рис.1 представлено распределение по $\langle P_T(^9\text{B} \rightarrow 2\alpha + p) \rangle = 120.5 \pm 10.9$ МэВ/с, при RMS 83.78 МэВ/с. А среднее значение P_T для протонов в канале $^9\text{B} \rightarrow 2\alpha + p$, $\langle P_T(p) \rangle = 26.4 \pm 2.1$ МэВ/с, при RMS 16.2 МэВ/с.

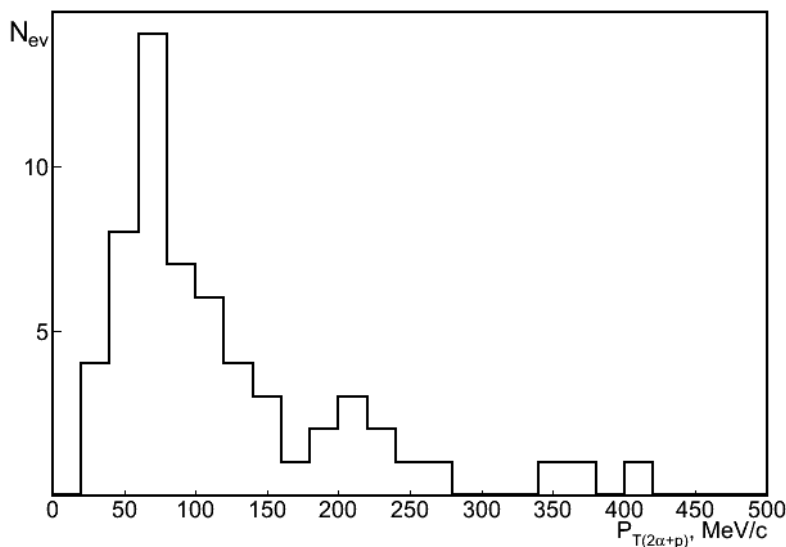


Рис.1.

Распределение по суммарному поперечному импульсу $P_T(^9\text{B})$ троек 2α

+ p , рожденных в «белых звездах» $^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 2p$.

РАСПАДЫ НЕСТАБИЛЬНЫХ ЯДЕР ^8Be И ^9Be

В структуре ядра ^{10}C роль основы играет нестабильное ядро ^8Be , что должно проявиться в диссоциации $^{10}\text{C} \rightarrow ^8\text{Be} + 2p$. Распады релятивистских ядер $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ через основное состояние 0^+ идентифицируются по принадлежности α – частичных пар к характерной области наименьших углов разлёта $\Theta_{2\alpha}$, ограниченной при импульсе 2 АГэВ/с условием $\Theta_{2\alpha} < 10.5$ мрад [4].

Распределение по энергии возбуждения α -частичных пар $Q_{2\alpha}$ 184 «белых» звезд $2\alpha+2p$ представлено на рис. 2(а). Из них для 59 событий $Q_{2\alpha}$ не превышает 1 МэВ (вставка на рис. 2(а)). Среднее значение $\langle Q_{2\alpha} \rangle$ составляет 86.7 ± 7.08 кэВ при среднеквадратичном рассеянии $\sigma \approx 52.4$ кэВ, что отвечает распадам основного состояния ядра ^8Be . Относительная доля этих распадов соответствует случаям соседних кластерных ядер.

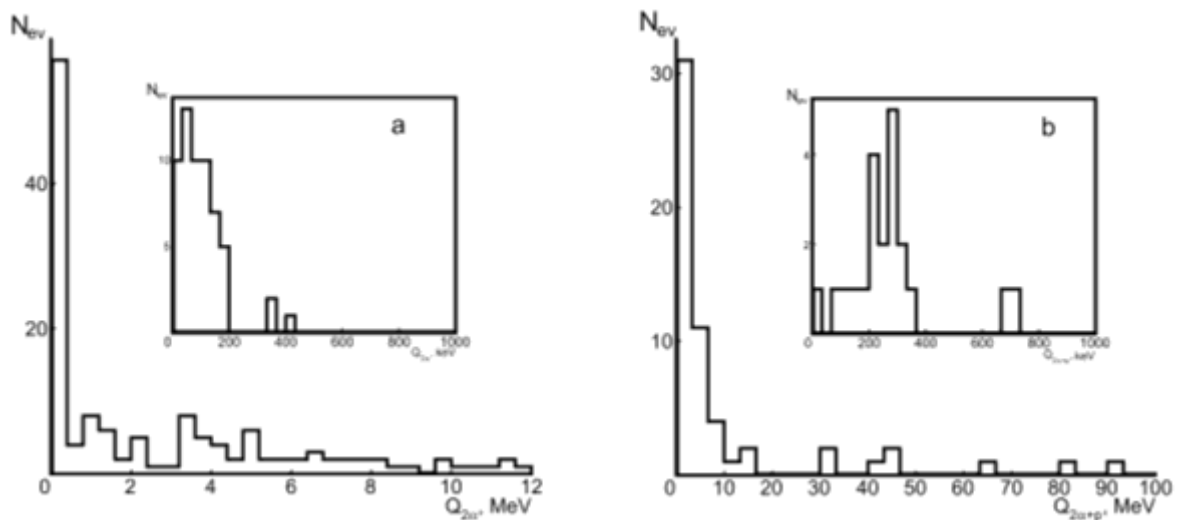


Рис. 2. Распределение числа «белых» звезд N_{ws} топологии $2\alpha + 2p$ по энергии возбуждения: $Q_{2\alpha}$ пар α -частиц; на вставке – увеличенное распределение $Q_{2\alpha}$ (a); $Q_{2\alpha+p}$ троек $2\alpha + p$; на вставке – увеличенное распределение $Q_{2\alpha+p}$ (b).

Другим продуктом когерентной диссоциации ядра ^{10}C должно быть нестабильное ядро ^9B . На рис. 2(b) представлено распределение 184 «белых» звезд $2\alpha + 2p$ по энергии возбуждения $Q_{2\alpha+p}$, определенной по разнице инвариантной массы тройки фрагментов $2\alpha+p$ и массой протона и удвоенной массой α -частицы. В 59 событиях величина $Q_{2\alpha}$ для одной из двух комбинаторно возможных троек $\alpha + \alpha + p$ также не превышает 1 МэВ (вставка на рис. 2(b)). Среднее значение $\langle Q_{2\alpha} \rangle$ составляет 254 ± 18 кэВ при среднеквадратичном рассеянии $\sigma \approx 96$ кэВ. Эти величины соответствуют распаду основного состояния ядра ^9B по каналу $p + ^8\text{Be} (0^+)$ с известными значениями энергии 185 кэВ и ширины (0.54 ± 0.21) кэВ. В распределении $Q_{2\alpha} < 1$ МэВ и $Q_{2\alpha+p} < 1$ МэВ имеется четкая корреляция в образования в основных состояниях ядер ^8Be и ^9B . Можно отметить образование одного события $2\alpha + 2p$ со значениями $Q_{2\alpha+p}$ равным 0.23 и 0.15 кэВ, т.е. обе тройки одновременно соответствуют распаду ядра ^9B . В качестве примера на рис.3 приведена микрофотография события фрагментации ядра в канале $^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 2p$. Во всех остальных случаях образования ядра ^9B второе из двух возможных значений $Q_{2\alpha+p}$ имеет величину больше 1 МэВ. Кроме того, был изучены возбуждения $\alpha + 2p$ на оставшейся статистике «белых» звезд $2\alpha + 2p$ без распадов ^9B . В спектре $Q_{\alpha+2p}$ не наблюдается явный сигнал от распадов основного и первого возбужденного состояния нестабильного ядра ^6Be , его оценке вклада не превышает 20%. Этот аспект заслуживает во внимание дальнейшего анализа угловых корреляций с протоном.

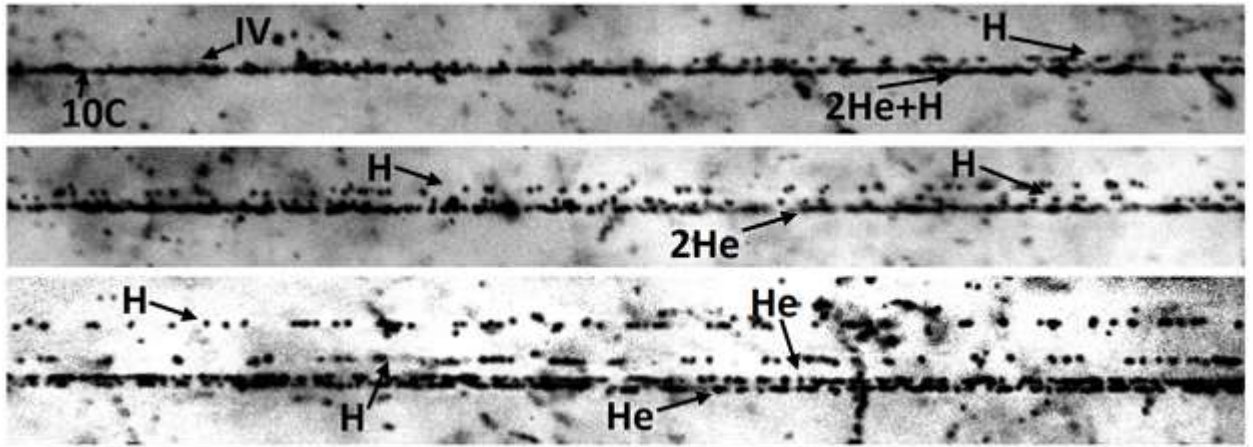


Рис. 3. Микрофотография «белой звезды» $^{10}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$. На верхней фотографии видна вершина диссоциации (IV) и струя фрагментов в узком конусе; при продвижении вдоль струи различаются релятивистских фрагменты He и H.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределение по зарядовой топологии указывает на лидирующую роль канала с зарядовой конфигурацией $^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 2p$ (184 события).

В практическом плане, анализ угловых корреляций подтверждает вывод о доминировании в пучке ядер ^{10}C . В образовании диссоциации ядер ^{10}C ядер ^8Be носит каскадный характер $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}$. Отсутствует заметный вклад от распадов $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ через возбужденное состояние 2^+ , что качественно отличает ядро ^{10}C от ^9Be . В случае ядра ^9B вклады состояний 0^+ и 2^+ ядра ^8Be в $^9\text{Be} \rightarrow ^8\text{Be}$ оказались близкими и соответствующими весам этих состояний магнитного момента ядра ^9Be .

Состояние 2^+ ядра ^8Be не дает вклада в основное состояние ядра ^{10}C , а его основу составляет только протяженное состояние 0^+ . Спаренные протоны могут иметь значение ковалентной пары в молекулярно-подобной системе ^{10}C с двуцентровым потенциалом $\alpha + 2p + \alpha$. Проверка таких предположений будет выполнена при анализе корреляций в парах $2p$, 2α и αp , а затем и для более сложных конфигураций с нестабильными ядрами $p + ^9\text{B}$, $2p + ^8\text{Be}$ и $\alpha + ^6\text{Be}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н. П. Андреева и др., ЯФ 68, 484 (2005) [N. P. Andreeva et al., Phys. Atom. Nucl. 68, 455(2005)]; N. P. Andreeva et al., nucl-ex/0605015.
2. The BECQUEREL Project, <http://becquerel.jinr.ru/>.
3. Н. Г. Пересадко и др., ЯФ 70, 1226 (2007) [N. G. Peresadko et al., Phys. Atom. Nucl. 70, 1266 (2007)]; nucl-ex/0605014.
4. Д. А. Артеменков и др., ЯФ 70, 1222 (2007) [D. A. Artemenkov et al., Phys. Atom. Nucl. 70, 1226 (2007)]; nucl-ex/0605018.

5. Р. Станоева и др., ЯФ 72, 731 (2009) [R. Stanoeva et al., Phys. of At. Nucl. 72, 690 (2009)]; arXiv: 0906.4220.
6. D. O. Krivenkov et al., NATO Science for Peace and Security, Series -B: Progress in High-Energy Physics and Nuclear Safety, Ed. By C. Begun et al. (Springer/2009), p. 149; arXiv: 0811.1880.
7. P. A. Rukoyatkin, L. N. Komolov, R. I. Kukushkina, V. N. Ramzhin, P. I. Zarubin, EPJ ST 162, 267(2008).
8. Т. В. Щедрина и др., ЯФ 70, 1271(2007) [Т. V. Shchedrina et al., Phys. Atom. Nucl. 70, 1230 (2007)]; arXiv: nucl-ex/0605022.
9. М. И. Адамович и др., ЯФ 62, 1461 (1999) [М. I. Adamovich et al., Phys. Atom. Nucl. 62, 1378 (1999)].
10. Р. Р. Каттабеков, К. З. Маматкулов и др. «Облучение ядерной эмульсии в смешанном пучке релятивистских ядер ^{12}N , ^{10}C и ^7Be », Ядерна физика, 73, 2166-2171 (2010).
11. Зайцев, А. А., Артеменков, Д. А., Браднова, В., Зарубин, П. И., Зарубина, И. Г., Каттабеков, Р. Р., ... & Фиру, Е. (2017). Диссоциация релятивистских ядер ^{10}B в ядерной эмульсии. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, 48(6), 919-924.
12. Якимчук, Д. В., Канюков, Е. Ю., Демьянов, С. Е., Бундюкова, В. Д., Дейнак, А. В., Макоед, И. И., ... & Сиваков, В. (2017). Зависимость сигнала гигантского комбинационного рассеяния света от формы серебряных наноструктур, выращенных в порах $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ -шаблона. *Приборы и методы измерений*, 8(3).
13. Рудных, С. К., Воробьева, М. Ю., Маматкулов, К. З., & Арзуманян, Г. М. (2019). Структурно-функциональные особенности и колебательная спектроскопия фосфолипидов. In *VI Международная конференция молодых ученых: биофизиков, биотехнологов, молекулярных биологов и вирусологов* (pp. 601-602).
14. Абдаминов, А. Б., Набиев, Б. Э. О., Бекмирзаев, Р. Н., Бекмирзаева, Х. У., & Маматкулов, К. З. (2019). Образование барионных резонансов в адрон-ядерных и ядро-ядерных соударениях при высоких энергиях. In *Труды конференции-конкурса молодых физиков* (Vol. 25, No. S2, pp. 5-7). Общество с ограниченной ответственностью Издательский дом Московского физического общества.
15. Синдоров, Б. А., Аликулов, С. С., Бекмирзаев, Р. Н., Зарубин, П. И., & Маматкулов, К. З. (2016). Фрагментация релятивистских радиоактивных ядер ^{10}C в ядерной фотоэмульсии. In *Труды конференции-конкурса молодых физиков* (Vol. 22, No. 1S, pp. 69-71). Общество с ограниченной

ответственностью Издательский дом Московского физического общества.

16. Каттабеков, Р. Р., Маматкулов, К. З., & Аликулов, С. С. (2013). Когерентная диссоциация релятивистских ядер ^{12}N . *Ядерная физика*, 76(10), 1281-1285.
17. Маматкулов, К. З. (2011). Диссоциация релятивистских ядер ^{10}C в ядерной фотоэмульсии. *Доклады Академии наук Республики Узбекистан*, (5), 43-47.