

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

СТАНОЕВА

Ралица Желязкова

**Исследование релятивистской фрагментации ядер ${}^8\text{B}$ методом ядерной
фотографической эмульсии**

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 2007

**Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина
Объединенного института ядерных исследований**

Научный руководитель

кандидат физико-математических наук

ЗАРУБИН

Павел Игоревич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

БАТУСОВ

профессор

Юрий Александрович

кандидат физико-математических наук,

САДОВСКИЙ

ведущий научный сотрудник

Сергей Анатольевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

**Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета**

**Защита состоится "....."..... 2008 года в "....." часов на заседании
Диссертационного совета при Лаборатории высоких энергий Объединенного
института ядерных исследований, г. Дубна Московской области, ЛВЭ ОИЯИ**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "....."..... 2008 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

В.А. Арэфьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящее исследование посвящено изучению фрагментации ядер ${}^8\text{B}$ с энергией 1.2 А ГэВ в ядерной фотографической эмульсии. Работа опирается на возможности нуклотрона ОИЯИ по формированию пучков легких релятивистских ядер, включая радиоактивные, а также на многолетний опыт использования методики ядерных фотографических эмульсий в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ имени В. И. Векслера и А. М. Балдина.

Создание пучков стабильных и радиоактивных ядер открывает качественно новые возможности для изучения структурных особенностей атомных ядер и их возбужденных состояний. Особый интерес вызывают периферические взаимодействия ядер при энергии несколько выше 1 А ГэВ как оптимальные для измерения и интерпретации. В наиболее периферических соударениях ядра взаимодействуют между собой через зависящие от времени электромагнитные поля, ими же и создаваемые. С ростом энергии пучка кулоновским взаимодействием могут возбуждаться все более высоколежащие по энергии состояния, что ведет к новым каналам диссоциации ядер в добавление к возбуждениям с сохранением связи нуклонов. Такие исследования структуры ядер становятся практически единственными возможными во вторичных пучках радиоактивных ядер. В этом случае процесс кулоновской диссоциации является особенно простым и в то же время ценным механизмом, так как возмущение, вносимое полем ядра-мишени, известно достаточно точно. Ядро ${}^8\text{B}$ является наиболее чувствительным пробником для электромагнитных взаимодействий с тяжелыми ядрами благодаря рекордно малой энергии связи протона.

Актуальность работы состоит в решении одной из задач проекта БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ, посвященному систематическому изучению кластерных степеней свободы в легких ядрах путем их релятивистской фрагментации в ядерной эмульсии. Несмотря на несомненный интерес к полной картине релятивистской фрагментации ядер, эксперименты в этой области прогрессируют достаточно медленно, а эксклюзивные наблюдения пока отсутствуют из-за экспериментальных трудностей объективного характера. Использование метода ядерной эмульсии для изучения релятивистской фрагментации радиоактивных ядер с протонным избытком имеет особые преимущества благодаря наибольшей полноте наблюдения конечных состояний. Одно из этих ядер ${}^8\text{B}$ впервые исследуется таким методом, что делает возможным извлечение информации о закономерностях его периферических

взаимодействий, структурных особенностей, новых каналах диссоциации на легчайшие ядра He и H .

Цель диссертационной работы состоит в максимально полном исследовании автором картины периферической фрагментации ядра 8B в ядерной эмульсии, включая поиск взаимодействий, характерных для электромагнитной диссоциации.

Научная новизна и значимость диссертационной работы состоит в применении автором метода ядерной эмульсии для исследования одного из ключевых ядер на границе протонной стабильности путем его релятивистской фрагментации. Такой подход, основанный на применении классической методики на специально созданном пучке ядер 8B , позволил изучить периферическую фрагментацию радиоактивного релятивистского ядра 8B с полнотой наблюдения заряженных фрагментов и угловым разрешением, которые можно считать уникальными.

Научно-практическая ценность работы состоит в том, что результаты, впервые полученные автором, могут составить основу для планирования будущих эмульсионных экспериментов с радиоактивными релятивистскими ядрами с более высокой статистикой и детальностью идентификации фрагментов, а также электронных экспериментов с высокой сложностью детекторов. Выводы работы используются для сравнения с одновременно получаемыми результатами по облучению эмульсии ядрами 7Be , а также на основе выполненного недавно облучения большим интегральным потоком пучкового «коктейля» релятивистских ядер 9C и 8B .

Основные положения, выносимые автором на защиту, состоят в следующем.

1. При анализе ядерных взаимодействий в эмульсии впервые подтверждено формирование вторичного пучка на нуклотроне ОИЯИ с доминированием ядер 8B .
2. Впервые получена систематическая картина зарядовой топологии фрагментов в периферических взаимодействиях ядер 8B и выявлен лидирующий вклад канала диссоциации ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$ в наиболее периферических взаимодействиях.
3. Анализ угловых корреляций фрагментов ядра 8B , выполненный с рекордным пространственным разрешением, впервые позволил определить кинематические условия для наблюдения электромагнитной диссоциации в релятивистской области энергии.
4. Впервые наблюдались и детально описаны события периферической диссоциации ядра ${}^{10}C$, образованных в реакции перезарядки при формировании вторичного пучка с близкой магнитной жесткостью ядер 8B .

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных форумах: XVII International School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Application, Varna, Bulgaria, 24 - 30 September 2007; ISHEPP XVIII Relativistic nuclear physics and Quantum Chromodynamics, JINR, Dubna, September 25 - 30, 2006; Nuclear Physics in Astrophysics – III XXI International Nuclear Physics Divisional Conference of the European Physical Society, Dresden, Germany, 26 – 31 March 2007; 25th International Workshop on Nuclear Theory, Bulgaria, June 26 to July 1, 2006; FMNS2007 Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Blagoevgrad, Bulgaria, 6-10 June 2007; X Научная конференция молодых ученых и специалистов, ОИЯИ, Дубна Россия 6-11 февраля 2006; Регулярно представляются доклады на совещаниях сотрудничества БЕККЕРЕЛЬ в ОИЯИ, Дубна, Россия.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе, в реферируемых научных журналах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений и списка литературы, содержащего 31 наименование. Работа изложена на 94 страницах машинописного текста, включающих 32 рисунка, 13 таблиц и 9 фотографий.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение начинается кратким вступлением, в котором упоминаются предшествующие исследования периферической диссоциации в ядерной эмульсии нескольких стабильных ядер ^{12}C , ^{16}O , ^{22}Ne , ^{24}Mg , ^{32}S , и сравнительно недавние ядра $^{6,7}\text{Li}$, $^{10,11}\text{B}$, ^9Be , ^{14}N .

В параграфе В.1 описаны практические особенности и достоинства широко известного метода ядерной эмульсии для исследования периферических взаимодействий релятивистских ядер. Особый интерес для анализа представляют события, в которых отсутствуют следы фрагментов ядер мишени и не наблюдаются заряженные мезоны ($n_b=0$, $n_g=0$, $n_s=0$). Они получили наименование «белых» звезд и составляют начальную основу для изучения электромагнитной диссоциации. Далее упомянуты известные структурные особенности ядра ^8B как «лаборатории» для изучения протонного гало окружающего кор в виде ядра ^7Be . Вызывает интерес изучение свойств основного и более высоковозбужденных состояний ^8B из малонуклонных кластеров $^{1,2}\text{H}$, $^{3,4}\text{He}$ и ^6Li .

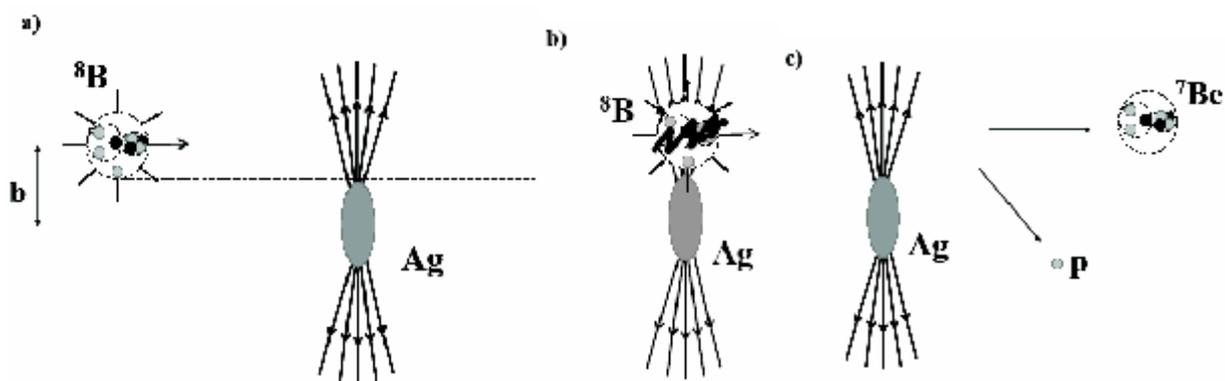


Рис. 1. Схема электромагнитного процесса диссоциации релятивистского ядра ${}^8\text{B}$ в поле тяжелого ядра: сближение ядер с прицельным параметром b (а), поглощение ядром ${}^8\text{B}$ квазиреального фотона (б), диссоциация на пару фрагментов $p + {}^7\text{Be}$.

В параграфе В.2 даны представления об электромагнитном взаимодействии ядер, составляющем центральную тему в данном исследовании (см. рис. 1). Представлены основные электронные эксперименты на пучках релятивистских ядер, которые указали на важную роль электромагнитной диссоциации, указаны их практические ограничения. По результатам теоретических работ приведены оценки сечений диссоциации ядра ${}^8\text{B}$ в электромагнитных, ядерных дифракционных взаимодействиях и реакциях срыва нуклонов.

В параграфе В.3 сформулирована как проблема эксклюзивного подхода к исследованию диссоциации ${}^8\text{B}$ в ядерной эмульсии, так и практический план работы. Приводятся краткое содержание диссертации по главам.

В Главе I представлен анализ взаимодействий ядер ${}^8\text{B}$, позволивший дать описание их зарядовой топологии. В параграфе 1.1 даны подробности облучения эмульсии во вторичном пучке релятивистских ядер ${}^8\text{B}$ с импульсом 2.0 A ГэВ/с .

В параграфе 1.2 описан первичный поиск и отбор событий, определен средний пробег ядер ${}^8\text{B}$, описан зарядовый состав пучка. Было найдено около 1070 различного типа взаимодействий ядер пучка с зарядами $Z_{pr} \geq 3$ (визуальное определение) на общей длине просмотренных следов $L = 143.996 \text{ м}$. Средний пробег до взаимодействия составил $l = (13.5 \pm 0.4) \text{ см}$, что вполне соответствует оценкам сечения для легких кластерных ядер.

Для отбора периферических взаимодействий были выбраны достаточно мягкие условия для того, чтобы не потерять периферические события и не исказить картину фрагментации. Было отобрано 434 звезды, в которых суммарный заряд релятивистских фрагментов в конусе фрагментации до 8° удовлетворяет условию $\Sigma Z_{fr} > 2$. Такие звезды были отнесены к числу событий периферической

фрагментации N_{pf} , которые далее были разделены на два класса: N_{ff} – событий, сопровождающихся фрагментами ядра мишени и N_{ws} – событий, которые не содержат ни фрагментов ядра мишени, ни рожденных мезонов (т. н. «белые» звезды). Наибольший интерес среди периферических событий представляет статистика «белых» звезд N_{ws} . Сравнение этих групп событий позволяет более ярко выявить особенности образования «белых» звезд.

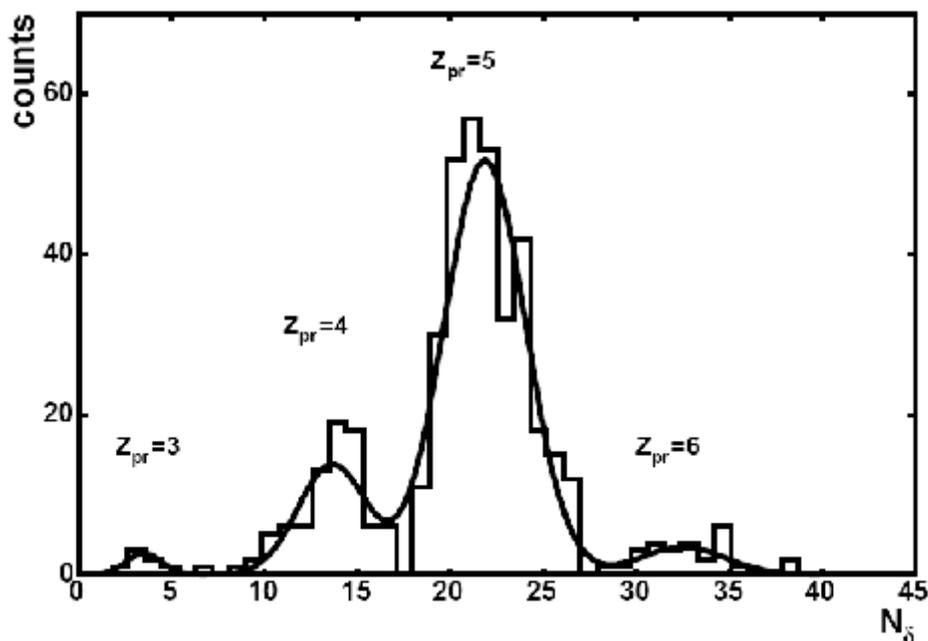


Рис. 2. Распределение по числу δ -электронов на 1 мм следов пучковых частиц, давших изучаемые взаимодействия. Сплошная кривая – сумма четырех функций Гаусса.

Сложный зарядовый состав ядер пучка и мягкое условие на отбор по ΣZ_{fr} не позволяют визуально идентифицировать заряд первичного ядра Z_{pr} . Поэтому на всех следах пучковых ядер, вызывавших периферические события $\Sigma Z_{fr} > 2$ были выполнены достаточно трудоемкие измерения зарядов Z_{pr} методом подсчета δ -электронов на 1 мм длины следа. Результаты определения зарядов на следах пучковых частиц, иллюстрирующие его точность приведены на рис. 2. В распределении наблюдается достаточно отчетливая группировка ядер по зарядам и можно извлечь соотношение изотопов Li, Be, B и C — $0.01 / 0.19 / 0.76 / 0.04$. Эти результаты, полученные в эмульсии, дают то же содержание ядер B , как и данные со сцинтилляционного монитора пучка.

Тем же методом было получено распределение зарядов вторичных фрагментов Z_{fr} . Измерения зарядов сильноионизирующих релятивистских фрагментов и визуальное определение релятивистских фрагментов H и He позволяет проследить корреляцию между Z_{pr} и ΣZ_{fr} . Основной результат состоит в том, что наблюдается

заметная статистика событий удовлетворяющих условию $Z_{pr} = \Sigma Z_{fr} = 5$, т. е. событий с сохранением заряда в конусе фрагментации, как среди общей статистики периферических взаимодействий, так и среди «белых» звезд.

Табл. 1. Распределение по зарядовой топологии взаимодействий периферического типа N_{pf} , с $Z_{pr} = 5$, наблюдавшихся в эмульсии, облученной во вторичном пучке ядер 8B .

ΣZ_{fr}	N_z					N_{ws}	N_{tf}
	5	4	3	2	1		
7	-	-	-	3	1	-	1
7	-	-	-	2	3	-	1
6	-	-	-	2	2	1	12
6	-	-	-	1	4	4	7
6	-	-	-	-	6	1	2
6	-	1	-	1	-	-	1
6	-	1	-	-	2	-	4
6	1	-	-	-	1	1	2
5	-	-	-	1	3	12	42
5	-	-	-	2	1	14	44
5	-	-	1	-	2	-	5
5	-	-	1	1	-	-	2
5	-	1	-	-	1	25	16
5	1	-	-	-	-	1	13
5	-	-	-	-	5	-	2
4	-	-	-	-	4	-	17
4	-	-	-	2	-	-	16
4	-	-	-	1	2	1	45
4	-	1	-	-	-	-	8
4	-	-	1	-	1	-	1
3	-	-	-	1	1	-	11
3	-	-	-	-	3	-	5

В параграфах 1.3 и 1.4 дано описание зарядовой топологии периферической фрагментации ядра 8B . Среди отобранных событий N_{pf} содержится около 320 взаимодействий соответствующих первичному заряду $Z_{pr} = 5$ при суммарном заряде $\Sigma Z_{fr} > 2$ релятивистских частиц с углами вылета внутри конуса 8° . Для событий, удовлетворяющих перечисленным условиям, распределение по зарядовой топологии фрагментации представлено в таблице 1. Основной ветвью диссоциации являются события с $\Sigma Z_{fr} = 5$. Главное отличие в статистике N_{tf} и N_{ws} для этой группы событий проявляется в 2-частичной моде $\Sigma Z_{fr} = 4 + 1$. Эта мода однозначно интерпретируется как диссоциация ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$. Ее доля резко возрастает при отборе «белых» звезд - с 13 % в случае наличия фрагментов мишени до 48 % для «белых» звезд. Она соответствует самому низкому порогу диссоциации, что может объяснить ее

доминирование среди наиболее периферических событий. Для иллюстрации на фото 1 приведена микрофотография событий периферической фрагментации ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$.

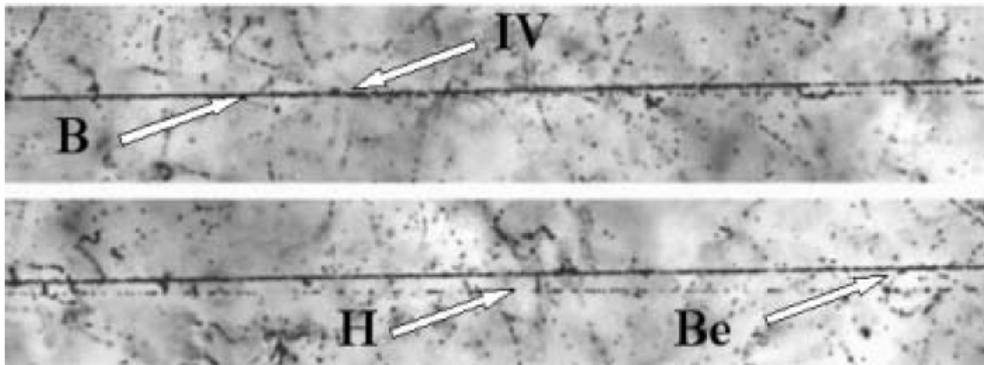


Фото 1. Фрагментация ядра ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$ с энергией 1.2 А ГэВ в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия и струя фрагментов в узком угловом конусе. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить 1 фрагмент Be и 1 фрагмент H .

Наличие «белых» звезд с более чем двумя фрагментами может быть обусловлено диссоциацией ядра-основы ${}^7\text{Be}$. Для проверки этого предположения сравниваются распределения по зарядам релятивистских фрагментов в «белых» звездах для ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$. События ${}^8\text{B}$ представлены за вычетом одного 1-зарядного релятивистского фрагмента – предполагаемого протона гало. Наблюдается одинаковая доля двух основных каналов диссоциации 2He и $\text{He} + 2\text{H}$ для ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$, что указывает на независимость развала ядра-основы ${}^7\text{Be}$ от дополнительного слабосвязанного протона в ядре ${}^8\text{B}$.

В параграфе 1.5 подробно рассматривается диссоциация с образованием фрагментов ядер мишени. Прослежено распределение событий дезинтеграции $\Sigma Z_{fr} = 5$ ядер ${}^8\text{B}$ типа N_{pf} по числу сопровождающих фрагментов ядер мишени n_g и n_b , определяемых согласно эмульсионной классификации. Наблюдается «рассыпание» статистики по многим возможным для ядер мишени каналам. Несмотря, на незначительность статистики при $n_g=1$ и $n_b=0$, отнесенной к взаимодействиям на ядрах водорода, можно утверждать, что вероятность 2-лучевой моды ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + {}^1\text{H}$ становится весьма малой. Соотношение мод ${}^8\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ и $\text{He} + 3\text{H}$ в пределах ошибок не изменяется (можно и суммировать каналы фрагментации мишени). Оба эти наблюдения указывают на то, что события N_{pf} с $\Sigma Z_{fr} = 5$ вызваны выбиванием нейтрона из ${}^8\text{B}$.

Табл. 2. Распределение по зарядовой топологии числа взаимодействий периферического типа N_{pf} , с $Z_{pr} = 6$, наблюдавшихся в эмульсии, облученной во вторичном пучке ядер 8B .

ΣZ_{fr}	N_z					N_{ws}	N_{tf}
	5	4	3	2	1		
7	-	-	-	1	5	-	1
7	-	-	-	2	3	1	-
6	-	-	-	2	2	3	5
6	-	-	-	1	4	-	10
6	-	-	-	-	6	-	2
5	-	-	-	2	1	-	5

В параграфе 1.6 рассматривается топология фрагментации сопровождающих ядер ${}^{10}C$ и 7Be . Образование части звезд с $\Sigma Z_{fr} > 5$ (табл. 1) могло быть связано с примесью ядер ${}^{10}C$ в составе использованного пучка. Ядра ${}^{10}C$ могли рождаться путем перезарядки ${}^{10}B \rightarrow {}^{10}C$ в мишени, предназначенной для генерации 8B , и захватываться во вторичный пучок из-за малой разницы по магнитной жесткости с 8B (около 4 %) и разброса ядер по их импульсу. Идентификация зарядов первичных следов позволила выделить события с $Z_{pr} = 6$. Их зарядовая топология представлена в табл. 2. «Белые» звезды с $\Sigma Z_{fr} = 6$ не содержат фрагментов с $Z > 2$. Их топология соответствует диссоциации ядра ${}^{10}C$, имеющего основу в виде 8Be , по наиболее вероятному каналу ${}^{10}C \rightarrow {}^8Be + 2p$. Наличие в событии фрагментов мишени ведет к росту степени дезинтеграции изотопа углерода. Идентификация изотопа ${}^{10}C$ указывает на возможность формирования пучка ${}^{10}C$ в реакции перезарядки ${}^{10}B \rightarrow {}^{10}C$ в условиях, удобных для исследований в эмульсии.

Глава II содержит описание угловых характеристик релятивистских фрагментов 8B и их особенности в канале ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$.

В параграфах 2.1 и 2.2 представлены условия угловых измерений и их результаты для релятивистских фрагментов в примерно 241 событиях с $Z_{pr} > 4$ и $\Sigma Z_{fr} > 3$ (см. рис. 3). В параграфе 2.3 рассматривается изотопический состав однозарядных и двухзарядных релятивистских фрагментов. Представленные результаты измерения $p\beta c$ убеждают в идентификации первичного изотопа как ядра 8B , а также демонстрируют возможности метода для полной идентификации систем фрагментов H и He , зарегистрированных в условиях, приемлемых для измерений.

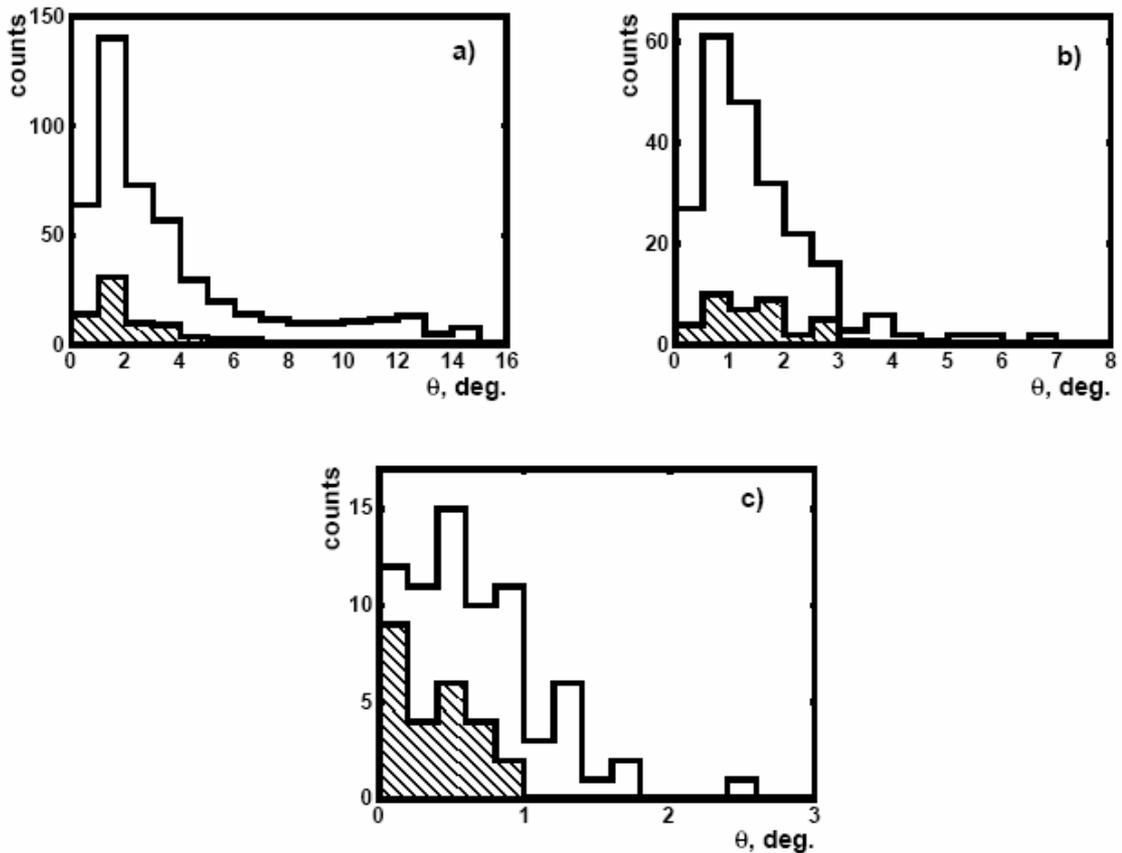


Рис. 3. Распределения по полярному углу θ (градус) для фрагментов с $Z_{fr} = 1$ (а, 479 следов), $Z_{fr} = 2$ (б, 224 следа) и $Z_{fr} > 2$ (с, 72 следа). Заштрихованная часть гистограммы соответствует вкладу «белых» звезд.

В параграфе 2.4 приводятся распределения по полярному углу θ (рис. 4) фрагментов ядра-снаряда в 8B с зарядами $Z_{fr} = 1$ (а) и $Z_{fr} = 4$ (б). Угловые распределения фрагментов $Z_{fr} = 1$ и 4 имеют выраженный пик в области малых значений θ с последующим спадом с ростом θ . Положение этого пика смещается в сторону меньших значений при увеличении заряда фрагмента, и средние значения $\langle\theta\rangle$ фрагментов уменьшаются при увеличении заряда фрагмента. Так значение $\langle\theta\rangle$ однозарядных фрагментов в ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$ событиях типа «белая» звезда, которые доминируют в статистике, равно $\langle\theta_p\rangle = (32.8 \pm 6) \cdot 10^{-3} \text{ рад}$, для 4-зарядных фрагментов - $\langle\theta_{Be}\rangle = (6.9 \pm 1.0) \cdot 10^{-3} \text{ рад}$. Такое резкое отличие в значениях $\langle\theta\rangle$ очевидным образом связано с разницей масс фрагментов.

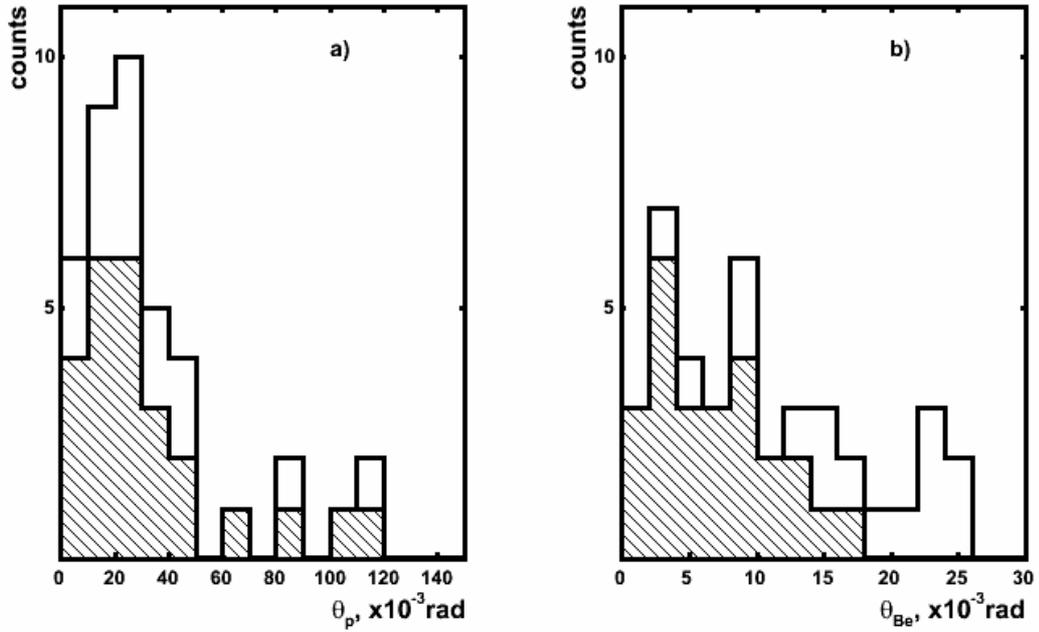


Рис. 4. Распределение по полярному углу θ (rad) во взаимодействиях ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$ (40 событий): а) для фрагментов с $Z = 1$; б) для фрагментов с $Z = 4$. Заштрихованная часть гистограммы соответствует «белым» звездам (25 событий).

Угловые измерения позволяют с большой точностью восстановить спектры поперечных импульсов фрагментов P_T (параграф 2.4) согласно формуле $P_T = A_{fr} P_0 \sin \theta$, где A_{fr} – массовое число фрагмента, θ – угол его вылета, P_0 – импульс на нуклон ${}^8\text{B}$ ($P_0 = 2.0 \text{ A ГэВ/с}$). Величина среднего поперечного импульса для протонов в лабораторной системе в событиях типа «белая» звезда составила $\langle P_{Tp} \rangle = 66 \pm 12 \text{ МэВ/с}$, а для ядер Be $\langle P_{TBe} \rangle = 97 \pm 13 \text{ МэВ/с}$. Переход в систему центра масс ${}^7\text{Be} + p$ позволяет компенсировать поперечный импульс, переданный паре, что ведет к распределению P_T^* со средним значением $\langle P_T^* \rangle = 62 \pm 11 \text{ МэВ/с}$. Таким образом, в распределении P_T слабая связь протона и ядра-основы проявляется при наиболее ясных условиях наблюдения.

Распределение векторной суммы поперечных импульсов фрагментов $P_T({}^8\text{B}^*)$ системы ${}^7\text{Be} + p$ может отражать механизмы ее генерации (параграф 2.5). На рис. 5 представлены распределения по $P_T({}^8\text{B}^*)$ для событий сопровождаемых фрагментами ядер - мишени и без них для того, чтобы отметить их резкое различие. Сплошная гистограмма соответствует «белым» звездам ($n_s = 0, n_g = 0, n_b = 0$), для которых среднее значение $\langle P_T({}^8\text{B}^*) \rangle = 95 \pm 15 \text{ МэВ/с}$, а максимум распределения при $P_T({}^8\text{B}) \approx 50 \text{ МэВ/с}$. Такая асимметрия распределения $P_T({}^8\text{B})$ может быть связана с вкладами электромагнитной диссоциации, ядерной дифракции, а также с испусканием ненаблюдаемых нейтронов ядрами мишени и возбуждением ядра-основы ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be}^* +$

$p \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma + p$. Штриховая гистограмма, имеющая существенно большее значение $\langle P_T({}^8\text{B}^*) \rangle = 251 \pm 29 \text{ МэВ/с}$, соответствует взаимодействиям, которые сопровождаются фрагментами мишени и рожденными мезонами ($n_s + n_g + n_b \neq 0$). Из сравнения этих распределений можно сделать вывод, что условие $P_T({}^8\text{B}^*) < 150 \text{ МэВ/с}$ само по себе позволяет достаточно эффективно выделить область «белых» звезд типа ${}^7\text{Be} + p$.

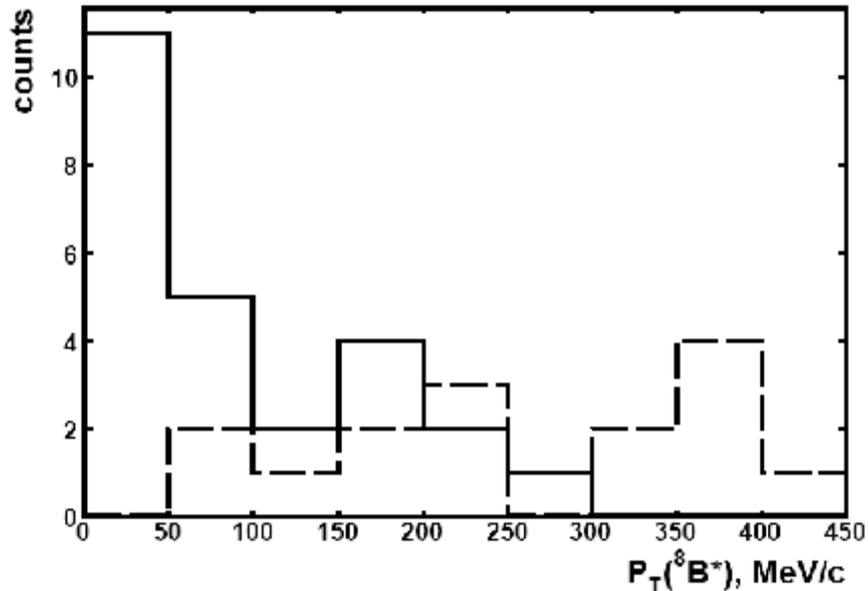


Рис. 5. Распределение по суммарному поперечному импульсу $P_T({}^8\text{B}^*)$ пар ${}^7\text{Be} + p$, рожденных во взаимодействиях ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$. Сплошная гистограмма соответствует «белым» звездам (25 событий); штриховая гистограмма – взаимодействиям, которые сопровождаются фрагментами мишени и рожденными частицами ($n_s + n_g + n_b \neq 0$, 15 событий).

В параграфе 2.6 описаны события рассеяния ядра ${}^8\text{B}$ без его диссоциации. Отмечается, что в «белых» звездах ${}^7\text{Be} + p$ соответствует меньшая передача импульса по сравнению с рассеянием ядра ${}^8\text{B}$.

Продукты развала ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + {}^1\text{H}$ под действием виртуального фотона ядра – мишени должны приобретать наименьшие значения суммарного поперечного импульса. Поэтому в этих событиях должна проявляться корреляция по азимутальному углу между ними $\varepsilon_{p\text{Be}}$ (параграф 2.7). На рис. 6 представлено распределение $\varepsilon_{p\text{Be}}$ с условием отбора событий $P_T({}^8\text{B}^*) < 150 \text{ МэВ/с}$. Можно отметить, что в распределении наблюдается явная асимметрия относительно угла $\pi/2$ равная величине $A \approx 0.7$, что указывает на высокую степень коллинеарности импульсов фрагментов ядра ${}^8\text{B}$ при распадах с малыми передачами поперечного импульса. Снятие критерия отбора по $P_T({}^8\text{B}^*)$ ведет к $A \approx 0.5$. Для усиления отбора событий электромагнитной природы может быть принят достаточно мягкий критерий $\varepsilon_{p\text{Be}} > \pi/2$.

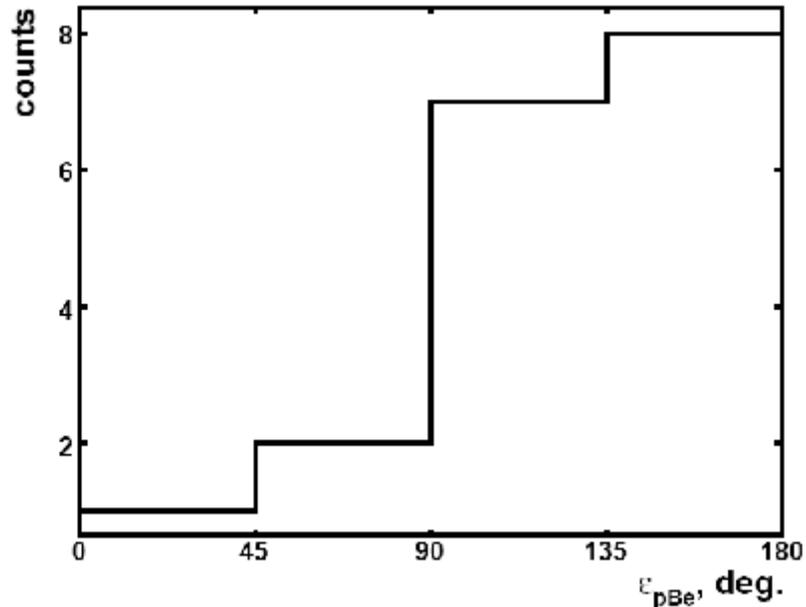


Рис. 6. Распределение по азимутальному углу ε_{pBe} между 7Be и p в «белых» звездах ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$ в событиях с $P_T({}^8B^*) < 150$ МэВ/с (18 событий).

В параграфе 2.8 приводятся спектры парных углов и инвариантных масс системы ${}^7Be + p$. Для оценки энергии возбуждения ядра 8B рассмотрено распределение разности инвариантной массы системы ${}^7Be + p$ (M^*) и суммы масс покоя 7Be и протона (M). Его среднее значение равно $\langle Q_{pBe} \rangle = 4.3 \pm 1.5$ МэВ. В интервале $Q_{pBe} < 2$ МэВ наблюдается группировка событий (64 %) со средним значением $\langle Q_{pBe} \rangle = 0.9 \pm 0.1$ МэВ. Можно отметить, что это значение не противоречит распаду 8B через первое возбужденное состояние над порогом ${}^7Be + p$.

В Главе III анализируются угловые корреляции фрагментов в 3-хтельной фрагментации ядра ${}^8B \rightarrow 2He + p$, приводятся спектры возбужденных состояний, даются оценки сечений электромагнитной диссоциации и формулируются предложения для дальнейших исследований.

Заметный вклад в статистику «белых» звезд составляют события более глубокой фрагментации ${}^8B \rightarrow 2He + p$ и $He + 3H$ (параграф 3.1). Статистика этих взаимодействий приведена в таблице 1. Представлено распределение по углу между фрагментами He $\Theta_{2\alpha}$ в диссоциации ${}^8B \rightarrow 2He + p$ со средним значением $\langle \Theta_{2\alpha} \rangle = (43 \pm 6) \cdot 10^{-3}$ рад и $\langle \Theta_{2\alpha} \rangle = (33 \pm 3) \cdot 10^{-3}$ рад для события типа «белая» звезда и для всех взаимодействий, соответственно. Доступная точность измерения достаточна для углового анализа узких пар $2He$ как продуктов диссоциации 7Be .

Представлены распределения по поперечному импульсу P_T протонов, рожденных во всех периферических взаимодействиях ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$ и $2He + p$. По существу, эти распределения схожи, что может указывать на независимость

фрагментации протона от сердцевины в виде ядра ${}^7\text{Be}$. Для «белых» звезд ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$ и ${}^8\text{B} \rightarrow 2\text{He} + p$ полученные средние значения поперечных импульсов соответственно равны $\langle P_T \rangle = 66 \pm 12 \text{ МэВ/с}$ и $101 \pm 16 \text{ МэВ/с}$. Отличие в средних величинах заметно, и оно может указывать на наличие вторичных электромагнитных взаимодействий в канале $2\text{He} + p$.

Для определенности один из фрагментов He в событии, имеющий меньший угол, можно сопоставить с ядром ${}^4\text{He}$ (более тяжелый изотоп), а другой, с большим углом, с ${}^3\text{He}$. Для «белых» звезд точность такого предположения составляет $\approx 25\%$. Такое предположение позволяет выполнить оценочную реконструкцию спектров по суммарному поперечному импульсу $P_T({}^8\text{B})$ в канале диссоциации ${}^4\text{He} + {}^3\text{He} + p$. Можно считать, что приведенные оценки $\langle P_T({}^8\text{B}^*) \rangle$ смещены в меньшую сторону. Для 37 событий с фрагментами ядер мишени или рожденными мезонами среднее значение равно $\langle P_T({}^8\text{B}^*) \rangle = 171 \pm 19 \text{ МэВ/с}$.

Отличие от статистики ${}^7\text{Be} + p$ проявляет статистика «белых» звезд $2\text{He} + p$, имеющая $\langle P_T({}^8\text{B}^*) \rangle = 231 \pm 41 \text{ МэВ/с}$, что указывает на явно большую передачу поперечного импульса ${}^8\text{B}$. Таким образом, «белые» звезды ${}^7\text{Be} + p$ определенно «мягче», чем $2\text{He} + p$.

Проведенный анализ углов эмиссии фрагментов позволяет перейти в параграфе 3.2 к оценке числа событий ${}^7\text{Be} + p$ и ${}^8\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He} + p$ электромагнитного типа, составляющих основной интерес данного исследования. Их особенностью должна быть минимальная передача импульса фрагментирующей системе и отсутствие признаков фрагментации ядра-мишени, так как диссоциация такого типа происходит на квазиреальном, т. е. почти безмассовом фотоне. Как следует из распределения, этому требованию наилучшим образом соответствует условие $P_T({}^8\text{B}^*) < 150 \text{ МэВ/с}$.

Дальнейшее ужесточение условий отбора системы ${}^7\text{Be} + p$ может быть сделано путем ограничения инвариантной массы (возбуждения) $Q_{p\text{Be}}$. Соответствующее распределение, имеющее среднее значение $\langle Q_{p\text{Be}} \rangle = 1.4 \pm 0.3 \text{ МэВ}$, представлено на рис. 7 в достаточно широком интервале. В области первого возбужденного уровня над порогом диссоциации обнаруживаются события, которые также удовлетворяют мягким условиям по энергии $Q_{p\text{Be}} < 5 \text{ МэВ}$ и азимутальному углу разлета фрагментов ${}^7\text{Be}$ и p $\varepsilon_{p\text{Be}} > \pi/2$.

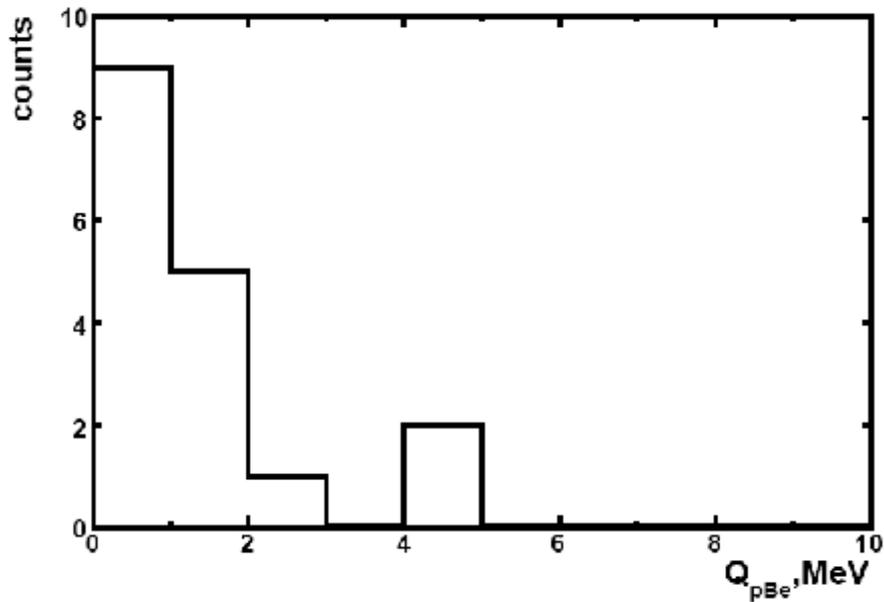


Рис. 7. Распределение по инвариантной энергии возбуждения для канала ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$ при условии $P_T({}^8B^*) < 150 \text{ МэВ/с}$ (17 событий).

Приводится распределение по суммарному поперечному импульсу для этой части статистики $Q_{pBe} < 5 \text{ МэВ}$ и $\varepsilon_{pBe} > \pi/2$ со средним значением $\langle P_T({}^8B^*) \rangle = 50 \pm 8 \text{ МэВ/с}$. Именно эти 14 событий стали основой для оценки сечения электромагнитной диссоциации по каналу ${}^7Be + p$. Для «белых» звезд ${}^8B \rightarrow {}^4He + {}^3He + p$ выделена группа из 5 событий, которая удовлетворяет условиям по переменным $P_T({}^7Be^* \rightarrow {}^4He + {}^3He) < 150 \text{ МэВ/с}$ и $P_T(p) < 150 \text{ МэВ/с}$ (рис. 8). Этой части распределения соответствует значение $\langle P_T(p)^* \rangle = 51 \pm 10 \text{ МэВ/с}$, которое характерно и для канала ${}^7Be + p$. Отобранные события отвечают предполагаемым критериям электромагнитного характера их образования.

В параграфе 3.3 дана оценка сечения их образования на ядрах серебра и брома. Получены значения $\sigma_{Ag} = 81 \pm 21 \text{ мб}$ и $\sigma_{Br} = 44 \pm 12 \text{ мб}$, и при экстраполяции для ядра свинца $\sigma_{Pb} = 230 \pm 60 \text{ мб}$. Значение σ_{Pb} близко к теоретическому значению $\approx 210 \text{ мб}$ и соответствует предположению о чисто электромагнитном характере обнаруженных событий диссоциации. Однако, статистическая ошибка σ_{Pb} приблизительно равна расчетному вкладу дифракционной диссоциации, что лишает возможности ее оценки. Для электромагнитной диссоциации ${}^4He + {}^3He + p$ число событий, а значит, и величина парциального сечения примерно в 3 раза меньше чем для ${}^7Be + p$. Констатируется только уровень их генерации по сравнению с другими.

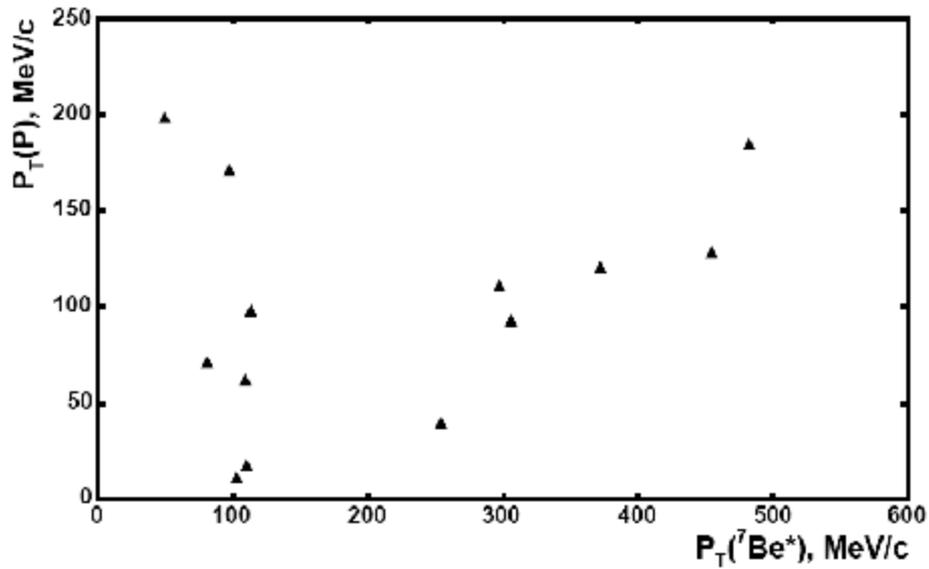


Рис. 8. Распределение поперечных импульсов фрагментов в моде ${}^8\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He} + p$. Абсцисса соответствует суммарному поперечному импульсу $P_T({}^7\text{Be}^* \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He})$ в событии, ордината - поперечному импульсу $P_T(P)$.

В параграфе 3.4 описаны наблюдавшиеся события периферической диссоциации ядра ${}^{10}\text{C}$ по наиболее ожидаемому каналу ${}^{10}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$. Статистика этих событий приведена в таблице 2. Поскольку это первые столь полные наблюдения событий диссоциации ${}^{10}\text{C}$, описываются характеристики некоторых из них. Для иллюстрации на фото 2 представлено событие фрагментации ядра ${}^{10}\text{C}$, сопровождаемое парой b -частиц. Угол между следами He равен $\Theta_{2\text{He}} = 0.36^\circ$, что в предположении тождественности их ${}^4\text{He}$ ведет к разности эффективной массы и суммы $Q_{2\text{He}} = 0.17 \text{ МэВ}$. Эта величина удовлетворяет условию образования несвязанного ядра ${}^8\text{Be}$. Вблизи пары He присутствует однозарядный трек, который соответствует протону. Парные углы между первой α -частицей и протоном, а также между второй α -частицей и протоном равны $\Theta_{\text{HeH}} = 0.82^\circ$ и $\Theta_{\text{He}2\text{H}} = 0.52^\circ$, соответственно. Тогда разность эффективной массы He , He и H и суммы масс покоя He , He и H равняется $Q_{2\text{HeH}} = 0.438 \text{ МэВ}$. Таким образом, эта группа треков может соответствовать распаду несвязанного ядра ${}^9\text{B} \rightarrow p + {}^8\text{Be}$, образовавшемуся при выбивании протона с большим углом из ядра ${}^{10}\text{C}$ с образованием пары фрагментов мишени. Поэтому для всей системы энергия возбуждения составляет значительную величину $Q_{2\text{He}2\text{H}} = 12.87 \text{ МэВ}$ и $P_T({}^{10}\text{C}^*) = 214 \text{ МэВ/с}$. Одна из релятивистских α -частиц произвела вторичную звезду с большой множественностью.

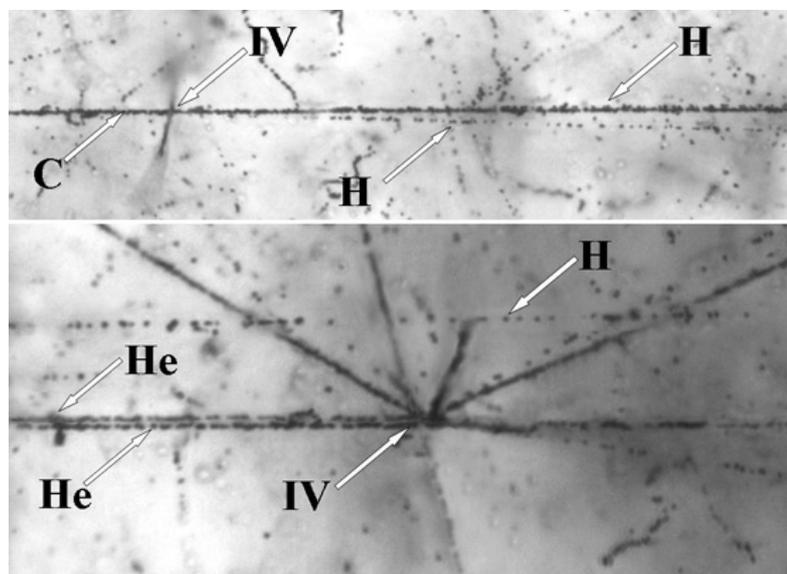


Фото 2. Фрагментация ядра ^{10}C с энергией 1.2 А ГэВ в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия и струя фрагментов в узком угловом конусе. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить 2 фрагмента He и 2 фрагмента H .

В ЗАКЛЮЧЕНИИ сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые состоят в следующем

1. Совокупность данных по измерению зарядов пучковых следов, зарядовой топологии периферических столкновений, угловым характеристикам, а также по идентификации релятивистских фрагментов ^1H , ^3He и ^4He , указывает на то, что в использованной эмульсии доминируют пучковые следы именно ядер ^8B . Таким образом, получено подтверждение, что впервые задача облучения эмульсии ядрами ^8B решена успешно на нуклотроне ОИЯИ.
2. Впервые получена систематическая картина распределения по зарядовым комбинациям фрагментов в периферических взаимодействиях ядер ^8B в ядерной эмульсии. Главный вывод состоит в том, что в событиях без образования фрагментов ядер мишени и мезонов канал диссоциации $^8\text{B} \rightarrow ^7\text{Be} + p$ имеет лидирующий вклад.
3. Впервые получены распределения по поперечным импульсам релятивистских фрагментов $^8\text{B} \rightarrow ^7\text{Be} + p$. Показано, что их малые величины отражают слабую связь внешнего протона в ядре ^8B .
4. Впервые получены спектры по суммарному поперечному импульсу фрагментов $P_T(^8\text{B})$ в событиях $^8\text{B} \rightarrow ^7\text{Be} + p$. В этих событиях обнаружена

- сильная корреляция по азимутальному углу разлета фрагментов, возрастающая при уменьшении переданного поперечного импульса.
5. Анализ угловых корреляций в событиях с фрагментами мишени и без них позволил обосновать отбор событий электромагнитной диссоциации ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$ по суммарному поперечному импульсу фрагментов $P_T({}^8\text{B}^*) < 150 \text{ МэВ/с}$, энергии возбуждения $Q_{p\text{Be}} < 5 \text{ МэВ}$ и азимутальному углу разлета фрагментов ${}^7\text{Be}$ и p $\varepsilon_{p\text{Be}} > \pi/2$.
 6. Для событий ${}^7\text{Be} + p$ без образования фрагментов мишени и рожденных мезонов впервые получена оценка сечения электромагнитной диссоциации на ядре серебра $\sigma_{\text{Ag}} = 81 \pm 21 \text{ мб}$. Экстраполяция этого значения для ядра свинца указывает на согласие с теоретическими расчетами.
 7. Впервые получена информация об относительной вероятности каналов диссоциации с большей множественностью – ${}^8\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ и $\text{He} + 3\text{H}$. Соотношение фрагментов He и H при диссоциации ядра-основы ${}^7\text{Be}$ в ${}^8\text{B}$ проявляет сходство с диссоциацией свободного ядра ${}^7\text{Be}$.
 8. Впервые сделаны оценки импульсов фрагментов в канале ${}^8\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$. Среднее значение поперечного импульса, переданного ядру ${}^8\text{B}$, указывает на большую передачу поперечного импульса по сравнению с каналом ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$.
 9. Впервые наблюдались события периферической диссоциации ядра ${}^{10}\text{C}$. Получено указание на то, что канал диссоциации ${}^{10}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ преобладает в событиях без образования фрагментов ядер мишени и заряженных мезонов.

Диссертацию дополняют два приложения. Приложение I содержит микрофотографии периферических взаимодействий. Его задача продемонстрировать полноту и доказательный характер наблюдений в эмульсии. Приложение II содержит описание принятых методов поиска событий и их измерений, основные характеристики ядерной эмульсии как детектора заряженных частиц.

Список работ опубликованных по теме диссертации

- [1] Н. П. Андреева, ..., Р. Станоева, ..., «Топология «белых» звезд в релятивистской фрагментации легких ядер», ЯФ 68, №3, 484 (2005); перевод на англ. яз. N. P. Andreeva et al., Phys. At. Nucl. 68, 455 (2005); arXiv:nucl-ex/0605015v2

- [2] N. P. Andreeva, ..., R. Stanoeva, ..., «*Clustering in light nuclei in fragmentation above 1 A GeV*», Eur. Phys. J. A27, s01, 295 (2006); arXiv: nucl-ex/0604003.
- [3] Р. Станоева и др., «*Периферическая фрагментация ядер ^8B с энергией 1.2A ГэВ в ядерной эмульсии*», ЯФ 70, №7, 1255 (2007); перевод на англ. яз. R. Stanoeva et al., Phys. At. Nucl. 70, 1216 (2007); arXiv:nucl-ex/0605013v3.
- [4] D. A. Artemenkov, T. V. Shchedrina, R. Stanoeva, and P. I. Zarubin, «*Clustering features of ^9Be , ^{14}N , ^7Be , and ^8B nuclei in relativistic fragmentation*», International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2006), Khanty-Mansiysk, Russia, 17-24 July 2006, Published in AIP Conf. Proc. 912, 78 (2007); arXiv: 0704.0384.
- [5] D. A. Artemenkov, ..., R. Stanoeva, ..., «*Особенности фрагментации $^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ в ядерной эмульсии при энергии 1.2 A ГэВ*», ЯФ 70, №7, 1261 (2007); перевод на англ. яз. D. A. Artemenkov, ..., R. Stanoeva, ..., Phys. At. Nucl. 70, 1222 (2007); arXiv:nucl-ex/0605018v1.