

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени П.Н. ЛЕБЕДЕВА**

на правах рукописи

УДК 539.172.17

ЩЕДРИНА

Татьяна Викторовна

**Исследование фрагментации релятивистских ядер ^{14}N
методом ядерной фотографической эмульсии**

специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва, 2008 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена систематическому исследованию фрагментации ядер ^{14}N с энергией 2.1 А ГэВ методом ядерной фотографической эмульсии. Формирование пучка релятивистских ядер азота и облучение эмульсии было осуществлено на нуклотроне ОИЯИ в 2003 г. Работа выполнена в рамках сотрудничества БЕККЕРЕЛЬ, экспериментальная программа которого ориентирована на изучение кластерных степеней свободы в возбужденных ядрах, в которых отдельные группы нуклонов проявляют себя как составляющие кластеры. Основными объектами кластеризации ядер рассматриваются малонуклонные системы, не имеющие возбужденных состояний, т.е. дейтроны, тритоны, ядра ^3He и ^4He .

Проблеме кластерных степеней свободы посвящены многочисленные исследования, начинающиеся с открытия расщепления легких ядер. В области релятивистских энергий выполнены циклы исследований ряда легких ядер эмульсионным методом и методикой пузырьковых пропановых и водородных камер. Однако, данные по ядру азота - одного из ключевых стабильных ядер - в условиях полного наблюдения и измерения характеристик заряженных фрагментов до настоящего момента отсутствовали.

Первоначальная цель настоящего исследования состояла в выявлении роли дейтронной кластеризации во взаимодействиях ядер ^{14}N , протекающих с наименьшей передачей возбуждения. Такой тип ядерной кластеризации был установлен при изучении диссоциации более легких ядер ^6Li и ^{10}B , которые также как и ^{14}N принадлежат к малочисленному классу нечетно-нечетных стабильных ядер. В процессе нашего изучения ^{14}N выявилась яркая роль 3α -частичной кластеризации, изучение которой позволило развить выводы более ранних исследований ядер ^{12}C и ^{16}O .

Значительная статистика, накопленная на предыдущих этапах, позволила отобрать интересующие нас редкие моды диссоциации, в которых произведена полная идентификация фрагментов, что составило третий этап данного исследования. Наблюдение достаточно редких событий может стать экспериментальным основанием для понимания перехода ядра ^{14}N в многочастичные состояния, что даст дополнительные аргументы в пользу развития исследований структуры ядер методами релятивистской ядерной физики.

Актуальность диссертационной работы состоит в изучении картины релятивистской фрагментации ядра ^{14}N как одной из принципиальных задач эмульсионного сотрудничества БЕККЕРЕЛЬ по исследованию легких ядер. Решение этой задачи имеет самостоятельную ценность для понимания кластерных степеней свободы в ядре ^{14}N и его роли в проблеме синтеза ядер. Новые данные по ядру ^{14}N расширяют физическую основу для понимания кластерных степеней свободы в соседних ядрах, в том числе радиоактивных.

Цель диссертационной работы состояла в получении экспериментальных сведений по кластерным особенностям диссоциации ядра ^{14}N во всем многообразии каналов фрагментации, доступных в ядерной фотографической эмульсии - измерение зарядов, плоских углов и углов погружения, определение импульсов релятивистских фрагментов.

Научная новизна и значимость диссертационной работы. Предшествующие работы по исследованию фрагментации ядра ^{14}N были выполнены с рядом принципиальных ограничений, как в угловых измерениях, так и классификации следов релятивистских фрагментов. В настоящей работе представлено исследование структурных особенностей ядра ^{14}N с максимально полным применением возможностей метода ядерной фотографической эмульсии.

Научно-практическая ценность работы. Исследования структурных особенностей релятивистских ядер ^{14}N выполнены с максимальной полнотой наблюдения заряженных фрагментов, высокой степенью детальности их идентификации и рекордным угловым разрешением. Такой подход создает экспериментальную основу для развития модельных представлений о механизмах взаимодействий ядер при высоких энергиях. Изучение фрагментации ^{14}N в удобных условиях, обеспечиваемых в обратной кинематике, может иметь приложения для решения проблемы распространенности изотопов.

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

1. Впервые получена детальная картина релятивистской диссоциации ядер ^{14}N в ядерной фотографической эмульсии, облученной на Нуклотроне ОИЯИ. Уникальные возможности эмульсионного метода позволили систематически представить зарядовую топологию, угловые распределения и изотопический состав релятивистских фрагментов ядер ^{14}N как в наиболее периферических взаи-

модействиях (“белых” звездах), так и в событиях с образованием фрагментов ядер мишени и мезонов.

2. Выявлен лидирующий вклад канала диссоциации $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$. Результаты анализа импульсных и азимутальных корреляций α -частиц из данного канала фрагментации свидетельствуют о том, что порядка 20% событий фрагментируют через образование промежуточного состояния $^8\text{Be} (0^+) \rightarrow 2\alpha$.

3. Исследована роль дейтронов как кластеров в канале $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$, приведено сравнение с ранее изученными случаями релятивистской фрагментации $^6\text{Li} \rightarrow \text{He} + \text{H}$ и $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$.

4. Впервые для ядра ^{14}N идентифицированы процессы релятивистской диссоциации $^{14}\text{N} \rightarrow ^{11}\text{C} + ^3\text{H}$, $^{14}\text{N} \rightarrow ^6\text{He} + ^4\text{He} + ^3\text{He} + p$, $^{14}\text{N} \rightarrow ^4\text{He} + 2\ ^3\text{He} + d$, для которых характерны глубокая перегруппировка α -частичной структуры ядра ^{14}N и преодоление высоких энергетических порогов.

Апробация работы. Результаты исследования, вошедшие в данную диссертационную работу, представлялись автором на следующих научных мероприятиях: 8-th International Workshop “Relativistic nuclear physics from hundreds of MeV to TeV”, Dubna, Russia, May 23-28, 2005; Рабочее совещание “Исследование процессов фрагментации релятивистских ядер на Нуклотроне методом ядерных фотоэмульсий. Сотрудничество БЕККЕРЕЛЬ”, 4–5 октября, 2005; Юбилейная научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН “Физика фундаментальных взаимодействий”, ИТЭФ, Москва, 5-9 декабря 2005; Совместный семинар ЛВЭ и ЛФЧ, Дубна, 20 января, 2006; International A.M. Baldin Seminar of High Energy Physics Problems “Relativistic Nuclear Physics & Quantum Chromodynamics”, Dubna, Russia, September 25-30, 2006; Fourth European Summer School on Experimental Nuclear Astrophysics, Santa Tecla, Sicily, Italy, 26 September – 3 October, 2007; Сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН “Физика фундаментальных взаимодействий”, ИТЭФ, Москва, 26-30 ноября, 2007; Специализированный научный семинар по релятивистской ядерной физике, 14 мая 2008; The 2-nd International Conference “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy”, NPAE, Kyiv, UKRAINE, June 9-15, 2008.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, приведенных в списке литературы (в том числе, в реферируемых научных журналах).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы, содержащего 49 наименований. Работа изложена на 99 страницах машинописного текста, включающих 28 рисунков, 6 таблиц и 25 микрофотографий взаимодействий легких релятивистских ядер с ядрами фотоэмульсии.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении представлен краткий обзор работ, посвященный изучению кластерных степеней свободы в периферических процессах при фрагментации легких релятивистских ядер в ядерных фотоэмульсиях в условиях полного наблюдения и измерения характеристик заряженных фрагментов; сформулирована задача экспериментального исследования, приведено краткое содержание диссертации по главам.

В параграфе В.1 подробно представлены результаты работ по изучению структуры ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$, принадлежащих, как и ${}^{14}\text{N}$, к редкому классу легких нечетно-нечетных ядер. Особое внимание уделяется вопросам, связанным с проявлением α -дейтронной кластеризации в данных ядрах.

В параграфе В.2 приводится обзор работ по изучению альфа – частичной кластеризации в диссоциации релятивистских ядер ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha + n$ как источника простейшей α -частичной системы; рассматриваются некоторые кинематические особенности процессов фрагментации ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$.

Параграф В.3 посвящен предшествующим исследованиям ядра ${}^{14}\text{N}$ и актуальным вопросам по изучению фрагментации этого ядра.

В **Главе I** представлен анализ периферических взаимодействий ядер ${}^{14}\text{N}$, найденных при поиске взаимодействий по первичным следам.

Параграф I.1 посвящен вопросам облучения эмульсии, первичному поиску и отбору событий, определению среднего пробега. Стопка, состоящая из 20 слоев ядерной фотоэмульсии типа БР-2 была облучена пучком ядер ${}^{14}\text{N}$ с импульсом 2.86 A ГэВ/с на нуклотороне ЛВЭ ОИЯИ. Эмульсионные слои толщиной около 600 мкм имели размер $10 \times 20 \text{ см}^2$. При облучении пучок был направлен параллельно плоскости эмульсии вдоль ее длинной стороны. Поиск событий осуществлялся просмотром по “следу”, что позволило зарегистрировать все типы взаимодействий без выборки и получить длину свободного пробега для разного типа взаимодействия с высокой точностью.

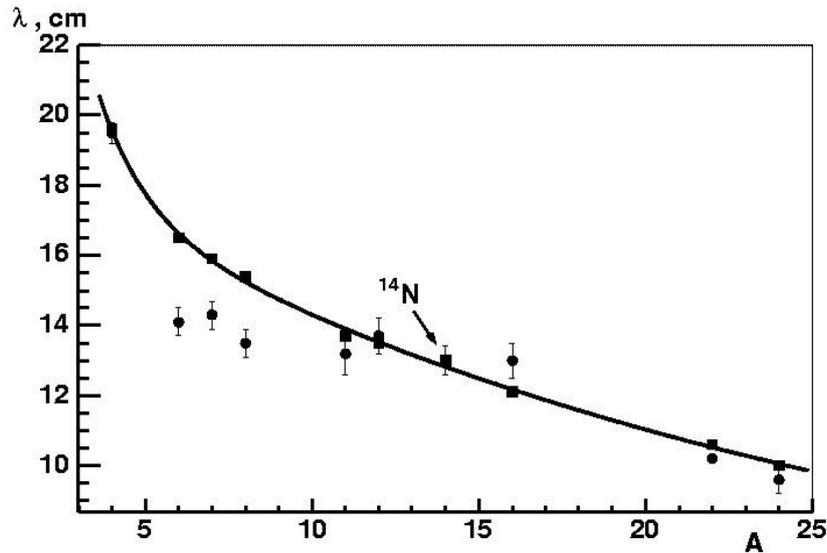


Рис. 1. Средняя величина свободного пробега λ для неупругих взаимодействий в ядерной фотоэмульсии в зависимости от массы налетающего ядра A . Квадратами обозначены значения λ_{th} , вычисленные по формуле Брэдта-Питерса, кружками – экспериментально полученные величины λ_{exp} . Стрелкой указано значение λ (^{14}N). Кривая – аппроксимация по геометрической модели.

Определенный таким образом средний свободный пробег ядра ^{14}N в фотоэмульсии составил $\lambda_N = (13.0 \pm 0.4)$ см на полной статистике 951 взаимодействие ядра ^{14}N с ядрами фотоэмульсии. Эта величина и полученные ранее значения λ_A для ряда других ядер-снарядов в фотоэмульсии, представлены на рис.1. На рисунке 1 представлены как экспериментально полученные величины λ_{exp} , так и значения λ_{th} , вычисленные по формуле Брэдта-Питерса. Из рисунка видно, что аппроксимация по данной модели удовлетворительно описывает экспериментальные данные для $A = 14$.

В параграфе I.2 описан зарядовый состав ядер пучка и релятивистских фрагментов. Определение заряда двух- и однозарядных частиц производилось визуально с высокой степенью достоверности, т.к. однократная ионизация (25 - 30 зерен на 100 мкм) однозарядных частиц надежно отличается от 4-х кратной ионизации (100 – 120 зерен на 100 мкм) двухзарядных частиц.

Для определения зарядов ядер пучка и релятивистских фрагментов с $Z \geq 3$, образующихся при развале ядра-снаряда ^{14}N использовался метод счета δ -электронов (N_δ) на единице длины исследуемого трека. Результаты определения зарядов на следах пучковых частиц дают следующий состав пучка - доля ядер ^{14}N составила 81%, остальные 15% и 4% приходятся на изотопы углерода и бора, соответственно.

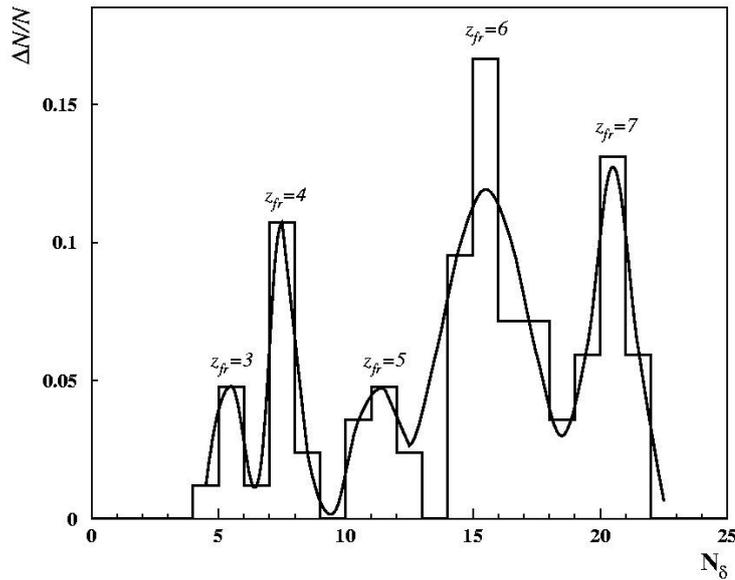


Рис. 2. Распределение по числу δ -электронов следов фрагментов-спектаторов ядра ^{14}N с зарядами $Z > 2$ (83 следа). Сплошная линия соответствует аппроксимации суммой функций Гаусса.

Результаты определения зарядов $Z_{fr} = 3 \div 7$ методом счета δ -электронов иллюстрируют его высокую надежность (см. рис.2). Измерения зарядов частиц первичного пучка и фрагментов ядер-снарядов позволяют проследить корреляцию между Z_{pr} и $\sum Z_{fr}$, т.е. выделить события с сохранением заряда в конусе фрагментации. Таким образом, найдены события, удовлетворяющие условию $Z_{pr} = \sum Z_{fr} = 7$.

В параграфе I.3 анализируются особенности зарядовой топологии найденных при просмотре по “следу” взаимодействий, см. таблицу 1. В верхней строке указан заряд фрагмента с $Z > 2$, во второй – число однозарядных фрагментов, в третьей - число двухзарядных, в четвертой, пятой и шестой строках – число найденных событий с данной топологией для ”белых” звезд, событий с возбуждением ядра-мишени и суммарное число взаимодействий для каждого канала соответственно. Величины в последних трех строках приведены как в абсолютных величинах, так и в процентном соотношении.

Из данных, приведенных в таблице 1 видно, что при фрагментации ядер ^{14}N реализуются 9 каналов с разной зарядовой конфигурацией, начиная от канала $C+H$ (25 %) до почти полного расщепления $He + 5H$ (5%). Основной вклад вносят каналы $3He + H$ (35%), $C + H$ (25 %) и $2He + 3H$ (17%), которые в сумме составляют 77 %. Для каждого канала фрагментации в Приложении представлена соответствующая микрофотография. Данные, приведенные в таблице 1, ука-

зывают на лидирующую роль канала с зарядовой конфигурацией $2+2+2+1$, детальному анализу которого посвящена Глава II настоящей работы.

Табл. 1. Распределение периферических взаимодействий ядер ^{14}N с импульсом 2.86 А ГэВ/с (N_{in}) по зарядовым модам с $\Sigma Z_{fr} = 7$ (161 событие), в том числе 61 “белая” звезда (N_{ws}), и 100 событий с фрагментами мишени (N_{if}) и без заряженных мезонов ($n_s = 0$). N_{z1} , N_{z2} , – число одно- и двухзарядных частиц соответственно. В процентах указаны доли событий данного типа.

Z_{fr}	6	5	5	4	3	3	-	-	-
N_{z1}	1	-	2	1	4	2	3	1	5
N_{z2}	-	1	-	1	-	1	2	3	1
N_{ws}	16 26%	5 8%	5 8%	2 3%	1 2%	-	6 10%	21 35%	5 8%
N_{if}	24 24%	4 4%	3 3%	5 5%	2 2%	3 3%	21 21%	35 35%	3 3%
N_{in}	40 25%	9 5%	8 5%	7 4%	3 2%	3 2%	27 17%	56 35%	8 5%

Методика и контроль качества угловых измерений в эмульсиях, облученных ядрами ^{14}N , подробно представлены в параграфе I.4. Стоит отметить, что в данном исследовании измерялись и анализировались как плоские углы ϕ , так и глубинные углы α на основе которых рассчитывались полярные углы ϑ и азимутальные углы ψ . В отличие от этого, в предшествующих работах по выполнялись измерения только проекций углов соответствующих фрагментов на плоскость эмульсии, что недостаточно для анализа внутренних характеристик многочастичных систем. Среднеквадратичные отклонения при измерении углов ϑ и ψ вторичных двухзарядных фрагментов ядер ^{14}N в данном эксперименте составили $\sigma_{\vartheta} = 0.10^{\circ} \pm 0.02^{\circ}$, $\sigma_{\psi} = 0.50^{\circ} \pm 0.06^{\circ}$.

Параграф I.5 посвящен вопросам использования метода многократного кулоновского рассеяния для идентификации фрагментов. Результаты разделения одно- и двухзарядных фрагментов по массовому числу $A_{fr} = p\beta c / p_0\beta$ (где $p\beta c$ – экспериментально полученное значение, $p_0 = 2.86 \text{ А ГэВ/с}$, $\beta = 0.9$), иллюстрирующие точность метода, приведены на рис. 3.

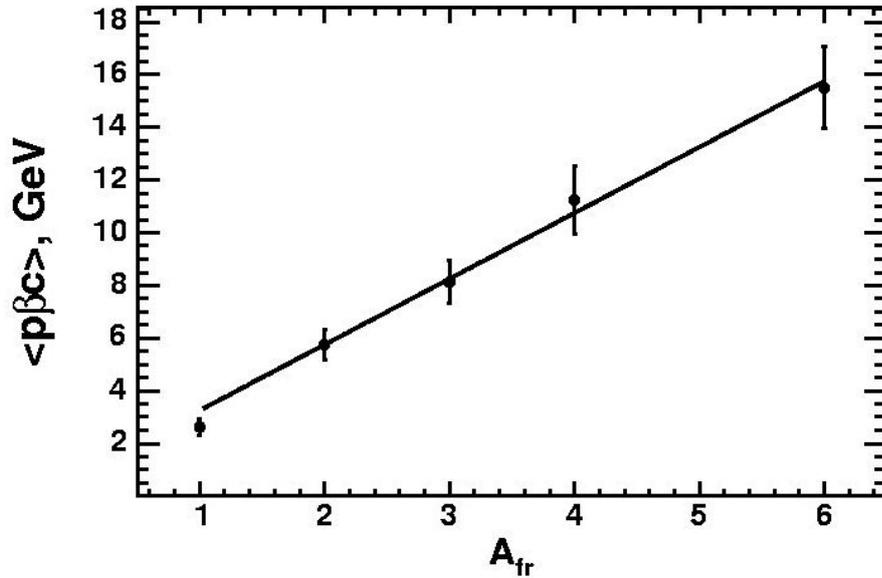


Рис. 3. Зависимость средней величины $\langle p\beta c \rangle$ для релятивистских фрагментов с $Z_{fr} = 1$ и $Z_{fr} = 2$ от идентифицированного (приписанного, предполагаемого) массового числа фрагмента A_{fr} для “белых” звезд $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$ и $^{14}\text{N} \rightarrow \text{C} + \text{H}$; линия – результат линейной аппроксимации.

В распределении наблюдается достаточно отчетливая группировка фрагментов по массе A_{fr} . Средние значения величины $p\beta c$ для различных изотопов водорода и гелия равны соответственно: $\langle p\beta c (A_{fr} = 1) \rangle = 2.6 \text{ ГэВ}$, $\langle p\beta c (A_{fr} = 2) \rangle = 5.8 \text{ ГэВ}$, $\langle p\beta c (A_{fr} = 3) \rangle = 8.2 \text{ ГэВ}$, $\langle p\beta c (A_{fr} = 4) \rangle = 11.4 \text{ ГэВ}$, $\langle p\beta c (A_{fr} = 6) \rangle = 15.6 \text{ ГэВ}$. На рисунке 3 приведены также ошибки измерения величины $p\beta c$ для различных фрагментов с $1 \leq A_{fr} \leq 6$.

Глава II посвящена исследованию событий лидирующего канала фрагментации $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + X$. Для увеличения статистики событий данного класса проводился специальный ускоренный просмотр по площади. Таким методом было найдено 132 события с тремя релятивистскими фрагментами с $Z = 2$, которые и составили предмет изучения второй главы.

При анализе основных кинематических характеристик релятивистских α -частиц – фрагментов ядра-снаряда из реакции $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + X$ делалось два допущения. Во-первых, предполагалось, что все двухзарядные фрагменты являются ^4He . Во-вторых, анализ делался только на основе данных He фрагментов. Двухзарядные фрагменты из реакции диссоциации $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + X$ вылетают в пределах узкого переднего конуса, средний угол раствора которого меньше 1° (параграф II.1).

При анализе поперечных импульсов *He* фрагментов, как уже было упомянуто выше, принималось предположение, что все двухзарядные фрагменты являются ${}^4\text{He}$. Однако, как известно из экспериментальных данных, примесь ${}^3\text{He}$ среди двухзарядных фрагментов при фрагментации ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + X$ составила 30%. Анализ p_t -распределений (параграф II.2) для событий, в которых было проведено разделение двухзарядных фрагментов на ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$, отдельно для каждой группы, а также для сравнения всех *He* вместе в предположении, что они являются ${}^4\text{He}$ показал, что влияние замены ${}^3\text{He}$ на ${}^4\text{He}$ приводит к незначительному изменению вида спектра.

Анализ дифференциальных распределений поперечных импульсов *He* фрагментов из реакции ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + X$ проводился как в лабораторной системе - p_t , так и в системе 3-х α -частиц - p_t^* . При описании импульсного распределения в системе 3-х α -частиц наибольшее согласие теории и эксперимента достигалось при аппроксимации экспериментальных данных суммой двух функций Рэлея. Подобная ситуация имела место и ранее при исследовании фрагментации ядер ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$.

Ожидаемое значение параметра распределения Рэлея для поперечных импульсов, испускаемых из ядра ${}^{14}\text{N}$ α -частиц, равно $\sigma(p_t) = 160 \text{ МэВ/с}$, что находится в удовлетворительном согласии с экспериментальным значением $\langle p_t \rangle = 151 \text{ МэВ/с}$, в предположении, что все двухзарядные фрагменты в инклюзивном распределении по величине p_t в л.с. являются ${}^4\text{He}$.

Одной из возможных причин возникновения двух функций Рэлея для описания распределения по величине p_t^* , может быть наличие последовательных распадов ядра азота на три α -частицы, т.е. образование нестабильного ядра ${}^8\text{Be}$. В частности, на это указывает асимметрия в распределении по парному азимутальному углу ε_{ij}^* между векторами поперечных импульсов α -частиц. На рис. 4

представлено распределение по парному азимутальному углу $\varepsilon_{ij}^* = \arccos \frac{p_{ti}^* p_{tj}^*}{p_{ti}^* p_{tj}^*}$

в системе покоя 3 α -частиц для процесса ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + X$.

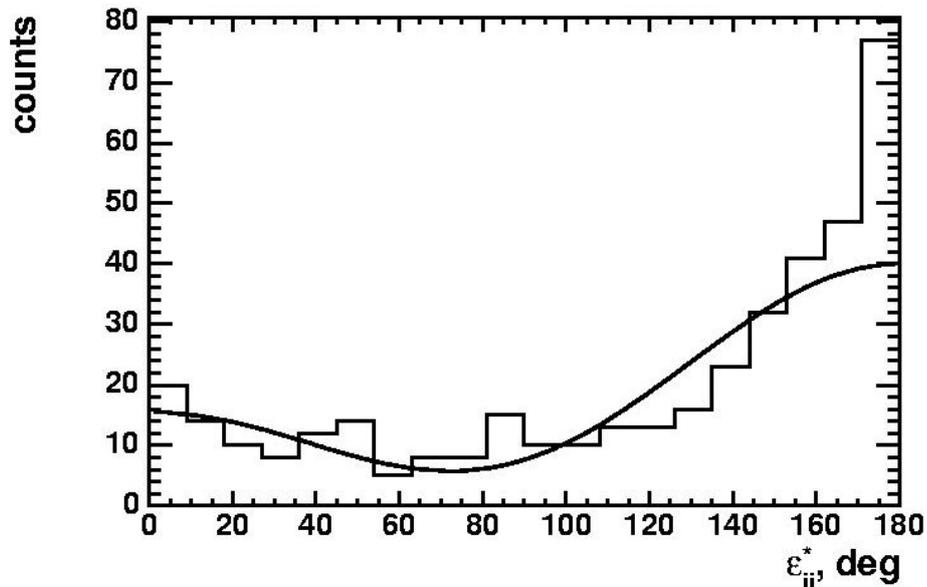


Рис. 4. Распределение по парному азимутальному углу ε_{ij}^* в системе покоя 3α -частиц для процесса $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + X$. Кривая – расчет по модели прямого статистического распада $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + X$.

Роль ^8Be ясно проявляется и в распределении событий фрагментации $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + X$ по величине энергии $Q_{2\alpha}$ пары α -частиц, образующихся в реакции, см. рис. 5. Первый пик распределения на рис. 5 соответствует значению, ожидаемому для продуктов распада нестабильного ядра ^8Be в основном состоянии 0^+ . Эта часть спектра представлена в 20-кратно увеличенном масштабе на вставке рис. 5. На ней видно хорошее совпадение центра распределения с энергией распада основного состояния ^8Be ($Q = 91.8$ кэВ). Получено, что доля α -частиц, являющихся продуктами распада ^8Be составляет – $(25 \div 30)\%$.

Для оценки энергетического масштаба образования 3α -систем в канале $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + X$ представлено распределение по инвариантной энергии возбуждения Q относительно основного состояния ядра ^{12}C (рис. 6). Основная часть событий на рис. 6 сконцентрирована в области Q от 8 до 14 МэВ, перекрывающей известные уровни ^{12}C . Смягчение условий отбора для событий $3\text{He} + \text{H}$, при котором разрешено образование фрагментов мишени, не ведет к смещению пика 3α -возбуждений. Это обстоятельство указывает на универсальность механизма заселения 3α -состояний.

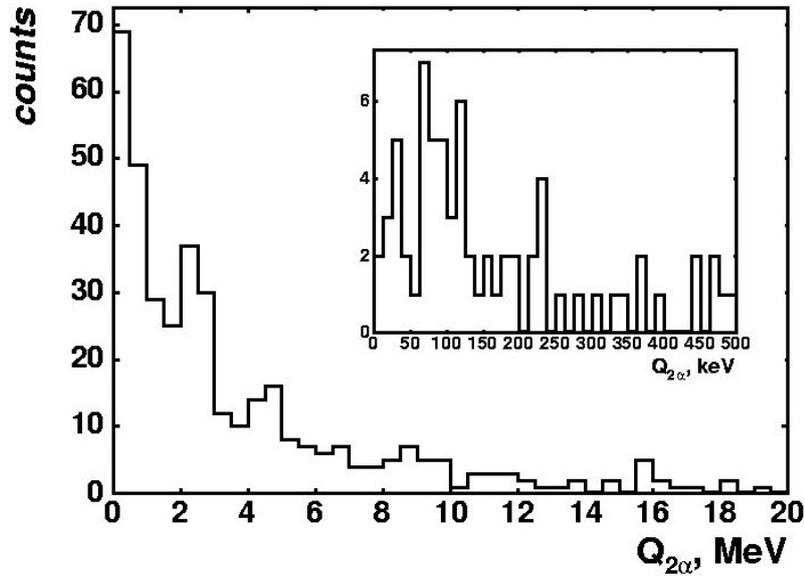


Рис. 5. Распределение событий фрагментации $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + X$ по величине энергии $Q_{2\alpha}$ пары α -частиц, образующихся в реакции. На вставке: часть распределения в интервале (0 – 500) кэВ.

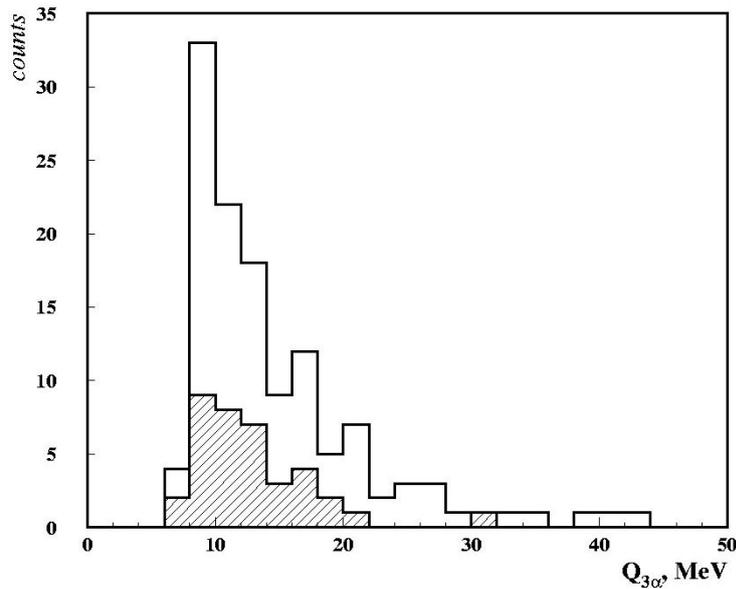


Рис. 6. Распределение по инвариантной энергии возбуждения $Q_{3\alpha}$ троек α -частиц относительно основного состояния ядра ^{12}C для процесса $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + X$. Незаштрихованная гистограмма соответствует всем двухзарядным фрагментам, с фрагментацией мишени и без (132 события); заштрихованная гистограмма соответствует “белым” звездам (41 событие).

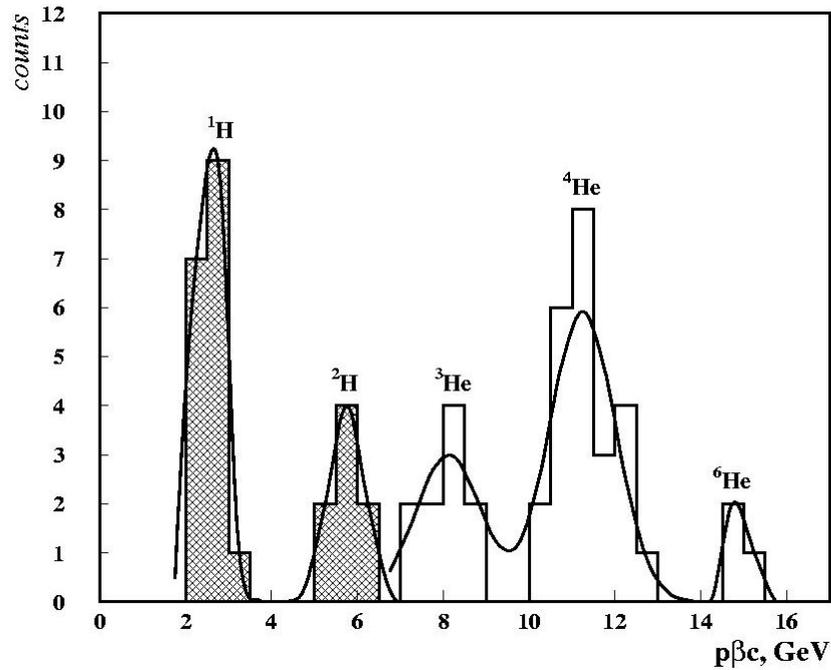


Рис. 7. Распределение одно- и двухзарядных фрагментов ядра ^{14}N по измеренным значениям $p\beta c$ в канале диссоциации $3\text{He} + \text{N}$ (37 следов для двухзарядных фрагментов, 25 следов для однозарядных фрагментов). Незаштрихованная часть гистограммы соответствует двухзарядным фрагментам, заштрихованная часть гистограммы - однозарядным фрагментам. Сплошная линия соответствует аппроксимации суммой двух функций Гаусса для однозарядных фрагментов, и трех функций Гаусса для двухзарядных фрагментов. Максимумы аппроксимирующих распределений расположены при значениях $p\beta c$, равных 2.6 ГэВ и 5.8 ГэВ; 8.2 ГэВ, 11.2 и 15.0 ГэВ и соответствуют изотопам водорода ^1H , ^2H и гелия: ^3He , ^4He , ^6He .

Разделение изотопов водорода и гелия в канале фрагментации $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + X$ проводилось по результатам измерения их импульсов ($p\beta c$), в предположении, что спектаторные фрагменты ядра-снаряда сохраняют импульс на нуклон, равный первичному (параграф II.3). На рис. 7 представлены результаты измерения многократного рассеяния для одно- и двухзарядных фрагментов событий типа “белая” звезда для исследуемого канала.

Для группы фрагментов с одинаковой скоростью и одинаковым зарядом, но разными массами распределение по $p\beta c$ должно представлять собой суперпозицию нескольких нормальных распределений. Измеренные значения импульсов для однозарядных фрагментов (заштрихованная часть гистограммы) удовлетворительно аппроксимируются суммой двух гауссианов, максимумы которых

Табл. 2. Распределение статистики из 109 событий $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + \text{H} + \text{X}$ в интервале $Q_{3\alpha} < 20$ МэВ для различных множественностей сопровождающих частиц ($n_s = 0$). В скобках указано число событий при $n_s > 0$. ΣP_t - суммарный поперечный импульс системы из 3α -частиц для “белых” звезд ($n_g = 0, n_b = 0$), фрагментации на водороде ($n_g = 1, n_b = 0$), фрагментации на тяжелых ядрах эмульсии ($n_g = 0, n_b = 1$ и $n_b = 2$).

	$n_g = 0,$ $n_b = 0$	$n_g = 1,$ $n_b = 0$	$n_g = 0,$ $n_b = 1$	$n_g = 0,$ $n_b = 2$	$n_g = 0,$ $n_b = 3$	$n_g = 0,$ $n_b = 4$	$n_g = 0,$ $n_b = 5$	$n_g = 0,$ $n_b = 6$	$n_g > 0,$ $n_b > 0$	$n_g > 1,$ $n_b = 0$	$n_g = 1,$ $n_b = 3$
$Q_{3\alpha} \leq 20$ МэВ	41 -	6 -	23 (6)	16 (7)	3 (3)	2 (1)	1 (1)	1 (1)	8 (2)	7 (1)	1 -
$\Sigma P_t, \text{МэВ}$	215.7 ± 20.6	166.7 ± 28.1	360.3 ± 28.5								

расположены при 2.6 ГэВ и 5.8 ГэВ и соответствуют изотопам ^1H и ^2H . Полученное таким образом отношение выхода изотопов ^1H к ^2H , примерно, равно 2 : 1. Это указывает на заметное снижение в нашем случае доли дейтронов среди однозарядных фрагментов по сравнению со случаями релятивистской фрагментации ядер ^6Li (канал $\text{He} + \text{H}$) и ^{10}B (канал $2\text{He} + \text{H}$), где выходы протонов и дейтронов примерно равны.

Выход фрагментов составляет для ^3He приблизительно (30 – 35)%, для ^4He – (65 – 70)%. Имеется также несколько изотопов гелия в районе $p\beta c$ от 14 до 16 ГэВ, которые были идентифицированы как ^6He (5% от общего числа взаимодействий). Значение $p\beta c$ (^6He) $\cong 15$ ГэВ несколько ниже ожидаемого, что связано с некоторыми методическими вопросами в определении данной величины.

В параграфе II.4 приведена оценка вероятности взаимодействий ядер ^{14}N на водороде эмульсии и на группе ядер $\text{CNO} + \text{AgBr}$. Для оценки сечения взаимодействий ядер ^{14}N на различных группах ядер, входящих в состав фотоэмульсии, проведен анализ событий $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + \text{H} + \text{X}$ для различных множественностей сопровождающих частиц. В табл. 2 представлено распределение для 109 событий исследуемого класса взаимодействий в интервале $Q_{3\alpha} < 20$ МэВ по числу и типу сопровождающих фрагментов ядра мишени. Там же представлено среднее значение суммарного поперечного импульса для системы из 3α -частиц для фрагментации на легких и тяжелых ядрах эмульсии.

Из данных, представленных в таблице видно, что среднее значение величины суммарного поперечного импульса системы из 3α -частиц для “белых” звезд ($n_g = 0, n_b = 0$) и взаимодействий на водороде эмульсии ($n_g = 1, n_b = 0$) в

пределах ошибок одинаковы. При образовании более тяжелых фрагментов мишени ($n_g = 0, n_b = 1, 2$) среднее значение суммарного поперечного импульса системы из 3α -частиц существенно увеличивается.

ГЛАВА III посвящена полностью идентифицированным и редким каналам диссоциации ядра ^{14}N . Несмотря на небольшую статистику представленных в данной главе мод диссоциации, сам факт их наблюдения полезен для понимания динамики релятивистской мультифрагментации. В параграфе III.1 обсуждаются следующие двухчастичные каналы фрагментации $^{14}\text{N} \rightarrow C + H, ^{14}\text{N} \rightarrow B + He, ^{14}\text{N} \rightarrow Li + Be$. Вероятность образования последней из выше перечисленных мод диссоциации крайне мала, из 61 взаимодействия типа “белая” звезда зарегистрировано только одно событие с развалом на два примерно равных по массе ядра. Поэтому, остановимся на более детальном представлении результатов для 2-хтельных мод $^{14}\text{N} \rightarrow C + H, ^{14}\text{N} \rightarrow B + He$ с более высокой статистической обеспеченностью.

Можно было бы ожидать, что значения вероятности каналов диссоциации будут снижаться по мере возрастания массового порога Q . Наибольшая вероятность могла бы соответствовать каналам $^{14}\text{N} \rightarrow ^{13,12}\text{C} + ^{1,2}\text{H}$ со значениями $Q \approx 7.6$ и 10.2 МэВ. Следующим по вероятности мог бы быть канал $^{14}\text{N} \rightarrow ^{10}\text{B} + ^4\text{He}$ ($Q \approx 11.6$ МэВ). Действительно, доля событий $^{14}\text{N} \rightarrow C + H$ оказалась достаточно значительной – 25%. Однако лидирующую роль в данном эксперименте надежно занимает множественный канал $^{14}\text{N} \rightarrow 3\ ^4\text{He} + p$ с массовым порогом $Q \approx 19$ МэВ. Доля событий $^{14}\text{N} \rightarrow B + He$, вопреки ожиданиям, оказалась малой - всего 8 %.

Результаты идентификации 11 однозарядных фрагментов методом многократного кулоновского рассеяния для событий $^{14}\text{N} \rightarrow C + H$ указывают на следующее соотношение изотопов $p : d : t = 6 : 4 : 1$. Среднее значение величины суммарного переданного системе поперечного импульса не зависит от изотопного состава фрагментов $C + H$ и приблизительно равно 160 ± 20 МэВ/с. Микрофотография данного канала фрагментации представлена на фото 1.



Фото 1. Фрагментация ядра $^{14}\text{N} \rightarrow \text{C} + \text{H}$ с импульсом 2.86 А ГэВ/с в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии. На фото отчетливо видна вершина взаимодействия -IV и узкая струя из двух фрагментов. Один из них, после определения заряда методом счета δ -электронов, идентифицирован как $Z = 6$ или углерод (C), второй является однозарядным фрагментом. Однозарядный фрагмент идентифицирован по измерениям $p\beta c$ как протон (p).

Для канала фрагментации $^{14}\text{N} \rightarrow \text{B} + \text{He}$ (фото 2) произведена идентификация двухзарядных фрагментов методом многократного кулоновского рассеяния. Все фрагменты с $Z = 2$ из $^{14}\text{N} \rightarrow \text{B} + \text{He}$ оказались ^4He .

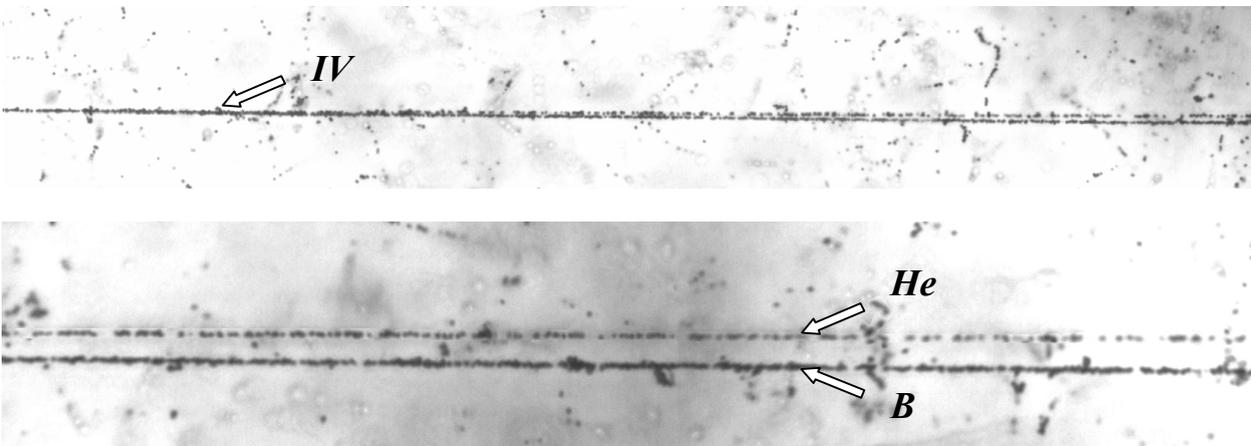


Фото 2. Фрагментация ядра $^{14}\text{N} \rightarrow \text{B} + \text{He}$ с импульсом 2.86 А ГэВ/с в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии. На верхнем фото видна вершина взаимодействия -IV и узкая струя, состоящая из двух фрагментов. При смещении по направлению движения струи фрагментов (нижнее фото) можно различить один фрагмент бора и один двухзарядный фрагмент.

Для данной группы событий произведен анализ угловых и импульсных характеристик образующихся фрагментов. Интересной особенностью данной

2-хтельной моды является указание на корреляцию азимутального угла разлета фрагментов $\varepsilon_{Вне}$ с суммарным переданным системе фрагментов $^{10}B + ^4He$ поперечным импульсом.

Параграф III.2 посвящен полностью идентифицированным модам диссоциации $^{14}N \rightarrow 3\alpha + H$, для которых необходима перегруппировка нуклонов за пределы α -частичных связей, а, значит, и преодоление высоких энергетических порогов Q . Пример одного из таких взаимодействий представлен на фото 3.

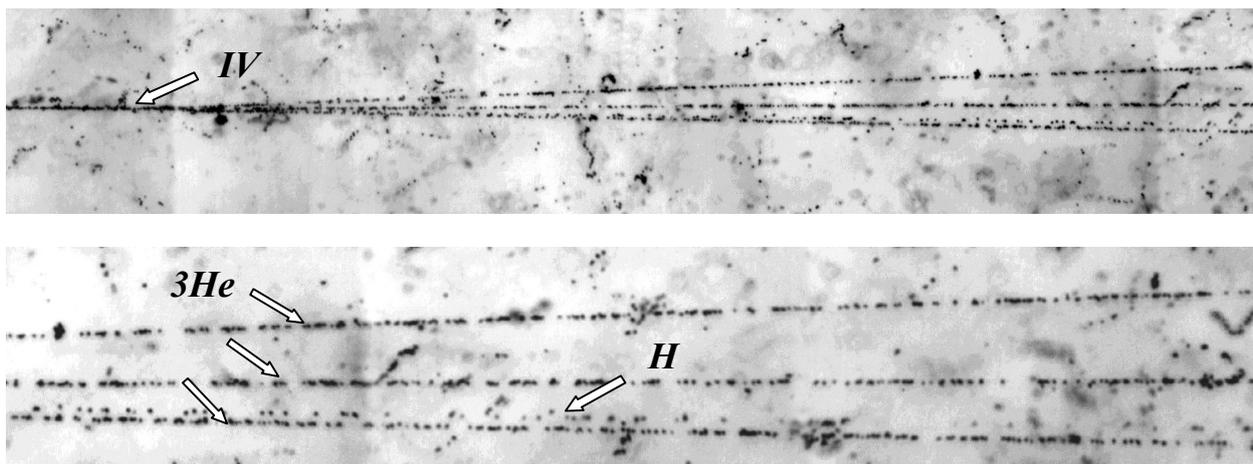


Фото 3. Фрагментация ядра $^{14}N \rightarrow 3He + H$ с импульсом 2.86 А ГэВ/с в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия - IV и струя фрагментов. При смещении вдоль струи фрагментов (см. нижнее фото), можно выделить три двухзарядных (He) и один однозарядный фрагмент (H). В результате измерения импульса методом многократного кулоновского рассеяния определены массы всех фрагментов данного взаимодействия, а именно двухзарядные фрагменты в данном событии являются 4He , а однозарядный фрагмент – дейтрон.

Всего идентифицировано 36 одно- и двухзарядных фрагментов из множества каналов фрагментации $^{14}N \rightarrow 3He + H$, из них четыре события $3 ^4He + ^2H$, $Q \approx 18 \text{ МэВ}$; три события $^6He + ^4He + ^3He + p$, $Q \approx 39 \text{ МэВ}$; два события $^4He + 2 ^3He + ^2H$, $Q \approx 59 \text{ МэВ}$. Для протекания последнего из вышперечисленных процессов необходимо разрушение двух α -кластеров и эмиссия пары нейтронов.

Полнота идентификации позволяет оценить средний поперечный импульс, переданный системе фрагментов. Величина суммарного переданного системе импульса в случае $^{14}N \rightarrow ^6He + ^4He + ^3He + ^1H$ равна $\langle \Sigma p_t \rangle = (431 \pm 43) \text{ МэВ/с}$.

Аналогичная величина для канала фрагментации $^{14}\text{N} \rightarrow 3^4\text{He} + ^2\text{H}$ составила $\langle \Sigma p_t \rangle = (182 \pm 90) \text{ МэВ/с}$. Даже при такой малой статистике отчетливо видна тенденция увеличения суммарного переданного системе импульса в случае разрушения одного из α -кластеров.

Параграф III.3 содержит описание процессов неупругой перезарядки, имевших место в данном эксперименте. К событиям неупругой перезарядки относились события, в которых первичный трек имел заряд 7, а суммарный заряд во фрагментационном конусе равнялся 7 ± 1 . Распределение событий неупругой перезарядки по зарядовым модам с $\Sigma Z_{fr} = 8$ и $\Sigma Z_{fr} = 6$ представлены в таблице 3.

Табл. 3. Распределение событий неупругой перезарядки ядер ^{14}N с импульсом 2.86 А ГэВ/с по зарядовым модам с $\Sigma Z_{fr} = 8$ и $\Sigma Z_{fr} = 6$. Обозначения как в табл. 1.

	$\Sigma Z_{fr}=6$	$\Sigma Z_{fr}=6$	$\Sigma Z_{fr}=8$
N_{z1}	2	-	2
N_{z2}	2	3	3
N_{ws}	3	5	9
N_{tf}	2	7	1
N_{in}	5	12	10

Доля событий, представленных в таблице 3 не превышает 3% от всех найденных при первичном просмотре взаимодействий. Интересной особенностью событий неупругой перезарядки является тот факт, что во всех случаях распад происходит на фрагменты с зарядами 1 и 2. Неупругой перезарядки ядра ^{14}N с распадами по другим каналам найдено не было.

По аналогии с фрагментацией $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$ была произведена оценка вероятности образования промежуточного нестабильного ядра ^8Be в процессах неупругой перезарядки ядра ^{14}N . Из пяти событий $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He}$ нет ни одной пары α -частиц с указанием на формирование нестабильного ядра ^8Be . Распределение событий неупругой перезарядки $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + 2\text{H}$ по величине энергии пары α -частиц указывает на $\approx 20\%$ вероятность образования ^8Be из данной конфигурации. Согласно имеющейся статистике, две пары α -частиц из девяти фрагментируют через образование $^8\text{Be} (0^+)$.

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

Впервые детально изучена картина релятивистской диссоциации ядер ^{14}N в ядерной фотографической эмульсии, облученной на нуклотроне ОИЯИ. Уникальные возможности эмульсионного метода позволили систематически изучить зарядовую топологию, угловые распределения и изотопический состав релятивистских фрагментов ядер ^{14}N как в наиболее периферических взаимодействиях (“белых” звездах), так и в событиях с образованием фрагментов ядер мишени и мезонов. Основные выводы выполненного исследования состоят в следующем:

1. Установлено, что множественный канал диссоциации $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$ лидирует в распределении по зарядовой топологии фрагментов. Он дает вклад примерно 50%, как для “белых” звезд, так и для событий с образованием фрагментов мишени и мезонов. Таким образом, ядро ^{14}N оказывается эффективным источником образования 3α -частичных систем.
2. Получена значительная статистика для канала диссоциации $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$, позволившая оценить по угловым измерениям энергетический масштаб образующихся в периферической фрагментации 3α -частичных систем. Установлено, что 80% взаимодействий соответствуют кластерным возбуждениям ядра ^{12}C с энергиями от порога диссоциации до 14 МэВ.
3. Выполнена оценка образования ядра ^8Be для канала фрагментации $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$. Из анализа угловых корреляций следует, что ядро ^{14}N с вероятностью не менее 20% фрагментируют через образование промежуточного состояния $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$.
4. Установлено заметное снижение доли дейтронов по отношению к протонам в канале $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$ по сравнению с ранее изученными случаями релятивистской фрагментации более легких ядер.
5. Впервые изучены спектры по суммарному поперечному импульсу α -фрагментов в событиях $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{X}$. Среднее значение величины суммарного переданного системе из 3α -частиц поперечного импульса для “белых” звезд существенно меньше, чем для полупериферических взаимодействий, сопровождающихся образованием одного или нескольких фрагментов ядра-мишени.

6. Впервые для ядра ^{14}N были идентифицированы процессы релятивистской диссоциации $^{11}\text{C} + ^3\text{H}$, $^6\text{He} + ^4\text{He} + ^3\text{He} + p$, $^4\text{He} + 2\ ^3\text{He} + d$, для которых характерны глубокая перегруппировка α -частичной структуры этого ядра и преодоление высоких энергетических порогов. Кроме того, обнаружены процессы неупругой перезарядки $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + 2\text{H}$, $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He}$, $^{14}\text{N} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$.

Полученные результаты указывают на перспективность дальнейших исследований многочастичных систем легчайших ядер методом релятивистской фрагментации в экспериментах с более высокой статистической обеспеченностью.

Диссертацию дополняет ПРИЛОЖЕНИЕ, содержащее микрофотографии взаимодействий релятивистских ядер ^{14}N с ядрами фотоэмульсии. Задача данного приложения состоит в наглядной демонстрации полноты и доказательного характера наблюдений в эмульсии.

Список работ опубликованных по теме диссертации

1. D.A. Artemenkov, ... T.V.Shchedrina et al., «*Invariant analysis of the fragmentation of relativistic nuclei in emulsion*», In: Proceedings of the 26th International A.M. Baldin seminar on high energy physics problems, 339-346, Dubna, September 27 – October 2, (2004) 339-346.
2. N.P. Andreeva, ... T.V.Shchedrina et al., «*Light nuclei clustering in fragmentation above 1 A GeV*», In: Proceedings of the 8th International workshop «Relativistic nuclear physics from hundreds of MeV to TeV», 203-213, Dubna, May 23-28, (2005) 203-213.
3. D.A. Artemenkov ... T.V.Shchedrina et al., «*Clustering features of ^{11}B , ^7Be , ^8B , ^9Be , and ^{14}N nuclei in relativistic fragmentation*», In: Proceedings of the 9th International workshop «Relativistic nuclear physics from hundreds of MeV to TeV», 48-65, Modra-Harmonia, Slovakia, May 22-27, (2006) 48-65.
4. D.A. Artemenkov ... T.V.Shchedrina et al., «*Experimental studies of clustering features of some light nuclei in peripheral fragmentation above 1 A GeV*», In: Proceedings of 25th International workshop «Nuclear theory/25», Rila Mountains, Bulgaria, June 26 – July 1, (2006) 139-147.
5. N.P. Andreeva, ... T.V.Shchedrina et al., «*Clustering in light nuclei in fragmen-*

- tation above 1 A GeV», Eur.Phys.J. A 27S1 (2006) 295-300.*
6. 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*», In Proceedings of the International Symposium on Exotic Nuclei «EXON06», Khanty-Mansiysk, Russia, July 17-22, (2006), AIP conference proceedings vol. 912 (2007) 78-87.
 7. Т.В. Щедрина и др., «*Периферические взаимодействия релятивистских ядер ^{14}N с ядрами фотозмульсии*», ЯФ 70 (2007) 1271-1275.
 8. T.V. Shchedrina and P.I. Zarubin, «*Clustering features of ^{14}N in relativistic multifragmentation process*», In Proceedings of the 2nd International Conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy «NPAE08», Kyiv, Ukraine, June 9-15, (2008).