

Федеральное Агентство по Образованию
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет Естественных Наук и Математики
Направление – Физика
Кафедра Общей Физики

ТЕМА РАБОТЫ:

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДОВОЙ ТОПОЛОГИИ В ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ
ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДЕР ^{56}Fe С ЭНЕРГИЕЙ 1ГэВ/НУКЛОН В ЭМУЛЬСИИ

Студент _____ Т.С. Филатова

Руководитель
начальник сектора ОИЯИ, к.ф.-м.н. _____ П.И. Зарубин

(дата)

Допустить к защите
Заведующий кафедрой _____ И.П. Чернов

(дата)

Задание на выполнение выпускной квалификационной работы

Министерство образования Российской Федерации

Томский политехнический университет

Кафедра общей физики

УТВЕРЖДАЮ

Зав.кафедрой _____

(Подпись, дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Студентке Филатовой Татьяне Сергеевне

1. Тема выпускной квалификационной работы:

"Исследование зарядовой топологии ядер ^{56}Fe с энергией 1ГэВ/нуклон в периферической фрагментации в эмульсии"

утверждена приказом ректора (распоряжением декана) от **27 апреля 2006г. № 07**

2. Срок сдачи студентом готовой работы: 20 июня 2006г.

3. Исходные данные к работе: ядерная фотоэмульсия типа БР-2, облученная ядрами ^{56}Fe с энергией 1ГэВ/нуклон

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

Глава 1. Актуальные вопросы исследования кластеризации легких ядер при их фрагментации в фотоэмульсии

1.1. Типы кластеризации в легких ядрах

1.1.1. Кластеры

1.1.2. Кластеризация с участием тритонов

1.1.3. Кластеризация с участием ^3He

1.2. Класс событий типа белая звезда

1.3. Проявление α -кластеризации при фрагментации ядер ^{12}C и ^{16}O

1.4. Проявление α -d кластеризации при фрагментации ядер ^6Li и ^{10}B

1.5. Слабосвязанные кластерные системы

Глава 2. Ядерная фотоэмульсия

2.1. Общая характеристика ядерной фотоэмульсии

2.2. Метод ядерных фотоэмульсий

- 2.3. Механизм образования следов
- 2.4. Ионизационные потери заряженных частиц в эмульсии и классификация треков
- 2.5. Определение длины следа
- 2.6. Методика эксперимента
- 2.7. Поиск событий по следу и описание найденных событий
 - 2.7.1. Описание методики поиска событий
 - 2.7.2. Расчет среднего свободного пробега ядра ^{56}Fe
- Глава 3. Мультифрагментация ядер
 - 3.1. Мультифрагментация ядер
 - 3.2. Мультифрагментация в «белых» звездах
 - 3.3. Экспериментальный результат
- Глава 4. Анализ экспериментальных данных
 - 4.1. Сильноионизирующие частицы
 - 4.2. Анализ множественности ν - и g -частиц
 - 4.3. Периферические взаимодействия
 - 4.3.1. Множественность ядер гелия
 - 4.3.2. Множественность однозарядных фрагментов
 - 4.3.3. Ассоциированное образование одно- и двухзарядных ядер
 - 4.4. Эффективный заряд

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

- 5.1. Цель исследования
- 5.2. "Большая звезда" Схема взаимодействия
- 5.3. "Большие звезды"
- 5.4. Следы частиц в эмульсии
- 5.5. "Белые звезды"
- 5.6. Просмотр эмульсии
- 5.7. Частотное распределение ядер гелия и водорода
- 5.8. Распределение по эффективному заряду
- 5.9. Статистика "белых звезд"
- 6.0. Выводы

7. Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы

15 сентября 2005г.

Руководитель _____ 15.09.2005г.
(подпись)

Задание принял к исполнению (студент)

_____ 15.09.2005г.
(подпись)

Аннотация

Выпускная квалификационная работа содержит 58с., 28 рисунков, 27 источников, 4 таблицы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДОВОЙ ТОПОЛОГИИ В ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДЕР ^{56}Fe С ЭНЕРГИЕЙ 1ГЭВ/НУКЛОН В ЭМУЛЬСИИ

Цель работы: сделать максимально полное наблюдение каналов фрагментации ядра ^{56}Fe .

В работе представлен теоретический обзор по явлению фрагментации легких ядер и их кластеризации. Также дано подробное определение ядерной фотоэмульсии.

Представлены частотные гистограммы для различных фрагментов взаимодействия ядра ^{56}Fe с ядрами эмульсии и сделаны выводы о наиболее предпочтительных каналах фрагментации.

Результаты работы будут использованы в рамках проекта "Беккерель" (ОИЯИ, г.Дубна).

Содержание

Задание на выполнение выпускной квалификационной работы	2
Аннотация	4
Содержание	5
Введение	7
1 Актуальные вопросы исследования кластеризации легких ядер при их фрагментации в фотоэмульсии	9
1.1 Типы кластеризации в легких ядрах	9
1.1.1 Кластеры	9
1.1.2 Кластеризация с участием тритонов	11
1.1.3 Кластеризация с участием ^3He	12
1.2 Проявление альфа кластеризации при фрагментации ядер ^{12}C и ^{16}O	13
1.3 Проявления альфа-дейтрон кластеризации при фрагментации ядер ^6Li и ^{10}B	15
1.4 Слабосвязанные кластерные системы	18
2 Ядерная фотоэмульсия	20
2.1 Общая характеристика ядерной фотоэмульсии	20
2.2 Метод ядерных фотоэмульсий	24
2.3 Механизм образования следов	27
2.4 Ионизационные потери заряженных частиц в эмульсии и классификация треков	28
2.5 Определение длины следа	30
2.6 Методика эксперимента	30
2.7 Поиск событий по следу и описание найденных событий	31
2.7.1 Описание методики поиска событий	31
2.7.2 Расчет среднего свободного пробега ядра ^{56}Fe	33
3 Мультифрагментация релятивистских ядер	35
3.1 Мультифрагментация релятивистских ядер	35
3.2 Мультифрагментация в "белых звездах"	39

Рисунок 3.2 - Фотография события фрагментации ядра ^{16}O с энергией 4.5ГэВ/нуклон в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии на четыре α-частицы. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия и струя фрагментов в узком угловом конусе. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить два фрагмента He и очень узкую по углу пару фрагментов с $Z=2$, соответствующую распаду ядра ^8Be.	41
3.3 Экспериментальный результат	41
4 Анализ экспериментальных данных и обсуждение результатов	43
4.1 Сильноионизирующие частицы	44
4.2 Анализ множественности b- и g-частиц	45
4.3 Периферические взаимодействия	47
4.3.1 Множественность ядер гелия	48
4.3.2 Множественность однозарядных фрагментов	49
4.3.3 Ассоциированное образование одно- и двухзарядных ядер	50
4.4 Эффективный заряд. «Белые» звезды.	50
Заключение	54
Список использованных источников	57

Введение

Детальное исследование явления фрагментации релятивистских ядер-снарядов имеет важные преимущества по сравнению с классическими экспериментами по расщеплению ядер-мишеней. В частности, при расщеплении ядер-мишеней фрагменты проходят очень малый путь и трудно определить характеристики фрагментов (углы, импульс), в то время как фрагменты ядра-мишени летят в узкий конус фрагментации на достаточно большое расстояние, что очень облегчает идентификацию фрагментов. Причем возможно изучение ядерной структуры в условиях очень малых передач энергии-импульса. Знание характеристик фрагментации релятивистских ядер необходимо для решения ряда задач ядерной астрофизики и физики космических лучей.

В исследованиях взаимодействия ядер при высоких энергиях значительную роль играет обладающий уникальными возможностями метод ядерных фотоэмульсий. Благодаря наилучшему пространственному разрешению (0.5мкм), в ядерной эмульсии в зависимости от первичного импульса может быть получено угловое разрешение для следов релятивистских фрагментов до 10^{-5} рад. Это обеспечивает полную наблюдаемость всех возможных распадов релятивистских ядер на фрагменты. Кроме того, эмульсионная методика позволяет измерять импульсы и идентифицировать частицы. Поэтому, благодаря высокому разрешению эмульсий и возможности наблюдения реакции в 4 π -геометрии этот метод представляется эффективным средством для изучения процессов релятивистской фрагментации. Изучение фрагментации ядер железа, которое выполнено в настоящем исследовании, интересно тем, что дополняет общую картину ряда уже исследованных ядер и может служить новым источником информации о характеристиках многочастичных распадов ядер.

Цель настоящего исследования состояла в получении экспериментальных данных о проявлении структурных особенностей ядер железа в возбужденных состояниях выше порога распада на фрагменты в ядерной эмульсии.

1 Актуальные вопросы исследования кластеризации легких ядер при их фрагментации в фотоэмульсии

1.1 Типы кластеризации в легких ядрах

Одной из проблем структуры ядра является изучение коллективных степеней свободы в возбужденных ядрах, в которых отдельные группы нуклонов ведут себя как составляющие кластеры. Указанная структурная особенность – кластеризация в возбужденных ядрах – особенно отчетливо проявляется в легких ядрах, где возможное число кластерных конфигураций относительно невелико.

1.1.1 Кластеры

Естественными компонентами такой картины являются малонуклонные системы, не имеющие собственных возбужденных состояний. Прежде всего это ядра ${}^4\text{He}$ и ${}^3\text{He}$, а также дейтроны, тритоны, и, кроме того, парные состояния протонов и нейтронов (рис.1.1). Возможно, что изучение процессов фрагментации стабильных и радиоактивных ядер на кластерные фрагменты при релятивистских энергиях выявит новые особенности их возникновения и роль в процессах нуклеосинтеза.

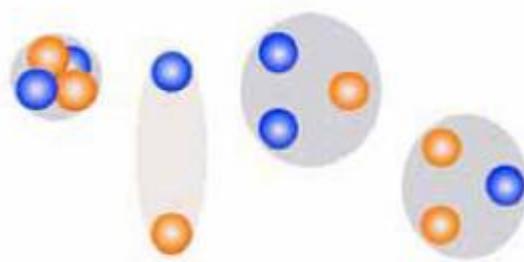


Рисунок 1.1 - Кластерные структуры: ${}^4\text{He}$, дейтрон, тритон и ${}^3\text{He}$

Характеристики событий в диссоциации легких ядер в периферических взаимодействиях были исследованы методом фотоэмульсии для ядер ^{12}C (3α) [1-6], ^{16}O (4α) [7,8], ^6Li ($\alpha + d$) [9-12] ^{10}B ($2\alpha + d$) [13-15] при энергиях порядка нескольких ГэВ на нуклон. Все эти результаты имеют уникальную полноту и достоверность, и могут оказаться полезными при планировании исследований по мультифрагментации ядер с высокой статистической обеспеченностью. Основным интересом представляет поиск и исследование фрагментации ядер ^{22}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si и ^{32}S при импульсе 4.5ГэВ/с на нуклон путем наблюдения конечных состояний, содержащих несколько α – частиц.

Наиболее выигрышными для исследования кластеризации являются взаимодействия релятивистских ядер, происходящие при минимальном взаимном возбуждении сталкивающихся ядер без образования заряженных мезонов. При этом достигается четкое разделение по импульсу продуктов фрагментации ядер снаряда и мишени. Основным критерием для отбора таких событий является требование сохранения электрического заряда и массового числа налетающего ядра в узком угловом конусе фрагментации.

Для иллюстрации критериев отбора событий на рис. 1.2 представлено событие мультифрагментации ядра кремния с импульсом 4.5ГэВ/с на нуклон. Основным интересом представляет группа фрагментов налетающего ядра в узком конусе углов порядка нескольких градусов с суммарным зарядом $z=13$. Величина угла раствора конуса определяется отношением поперечного импульса Ферми к импульсу на нуклон первичного ядра. Поскольку при первичных импульсах порядка нескольких ГэВ/с на нуклон этот угол достаточно мал, то следы релятивистских фрагментов ядра-снаряда долго остаются в одном эмульсионном слое, что достаточно для реконструкции непрерывного трехмерного образа этой группы треков.

Эмульсионный метод позволяет идентифицировать релятивистские изотопы водорода и гелия по массе используя возможность измерения импульса частицы методом многократного кулоновского рассеяния.

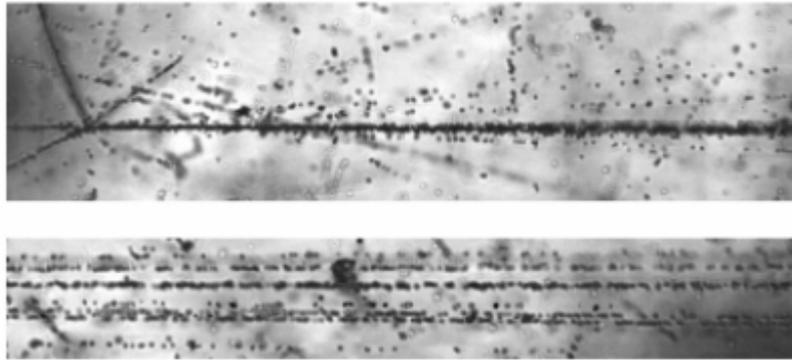


Рисунок 1.2 - Фотография события фрагментации ядра ^{28}Si с энергией 3.65ГэВ/нуклон в периферическом взаимодействии в фотоэмульсии. На верхней фотографии видны: вершина взаимодействия, струя фрагментов ядра-снаряда в узком угловом конусе, четыре сопровождающие однозарядные частицы в широком конусе и фрагменты ядра мишени, вылетающие под большими углами. При смещении по направлению струи фрагментов ядра-снаряда (нижняя фотография) можно различать три фрагмента Н и пять фрагментов He. Интенсивный след на нижней фотографии (с минимальным углом вылета) идентифицирован как очень узкая по углу пара фрагментов с $z=2$, соответствующая распаду ^8Be . Трехмерный образ события реконструирован как плоская проекция с помощью автоматического микроскопа ФИАН комплекса ПАВИКОМ.

Наиболее распространенная α -частичная и достаточно редкая дейтронная кластеризация будут обсуждены подробно в последующих параграфах этой главы. В качестве примера опишем выполненные и планируемые эксперименты по тритонной и ^3He кластеризации.

1.1.2 Кластеризация с участием тритонов

В ядерной фотоэмульсии, облученной в пучке ядер ^7Li с импульсом 3ГэВ/с на нуклон, найдено 1274 неупругих взаимодействия. Около 7% от всех неупругих взаимодействий ядер ^7Li составляют периферические взаимодействия (80 событий), которые содержат только заряженные фрагменты

релятивистского ядра. Половина из этих событий представляют распад на α -частицу и тритон (40) событий. Число распадов на α -частицу, дейтрон и нейтрон – 30%, а на α -частицу, протон и два нейтрона – 20%. Изотопный состав продуктов распада указывает на их связь со структурой ядра ${}^7\text{Li}$ в виде кластеров α -частицы и тритона. Представляет интерес продолжить поиск возможной роли тритонов как кластерных элементов в диссоциации ядер ${}^{11}\text{B}$, ${}^{15}\text{N}$ и ${}^{19}\text{F}$ (рис.1.3). Изучение «белых» звезд легких нечетно-четных стабильных ядер может дать основание для включения в общую картину и тритонов.

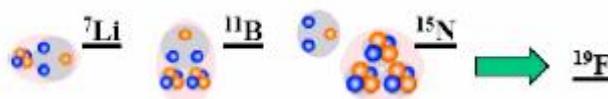


Рисунок 1.3 - Альфа-тритон кластеризация в легких ядрах

1.1.3 Кластеризация с участием ${}^3\text{He}$

Ядро ${}^3\text{He}$ является естественным элементом кластерной картины возбуждения легких ядер с дефицитом нейтронов, таких как ${}^8\text{Be}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, ${}^9\text{C}$, ${}^{10}\text{C}$, ${}^{11}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$ и более тяжелых ядер (рис.1.4).



Рисунок 1.4 - ${}^3\text{He}$ – частичная кластеризация

Если заменить α -частичные кластеры в ядрах ${}^8\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$ на ${}^3\text{He}$ -кластеры, то можно получить аналогичные кластерные состояния. ${}^6\text{Be}$ является слабосвязанным ${}^3\text{He}$ - ${}^3\text{He}$ – резонансным состоянием, близким по свойствам к α - α системе в ядре ${}^8\text{Be}$. По аналогии с ядром ${}^9\text{Be}$ в ядре ${}^7\text{Be}$ возможны возбужденные n - ${}^6\text{Be}$ и ${}^3\text{He}$ - n - ${}^3\text{He}$, в дополнение к состоянию α - ${}^3\text{He}$. Представляет интерес выявить состояние ${}^3\text{He}$ - ${}^3\text{He}$ - ${}^3\text{He}$ в ядре ${}^9\text{C}$, α - ${}^3\text{He}$ - ${}^3\text{He}$ в ядре ${}^{10}\text{C}$ и α - α - ${}^3\text{He}$ в ядре ${}^{11}\text{C}$.

1.2 Проявление альфа кластеризации при фрагментации ядер ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{16}\text{O}$

«Белые звезды» ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow 3\alpha$ при энергии 3.65ГэВ/нуклон изучались в работах [5-6] (рис. 1.5 и рис. 1.6). В частности, была продемонстрирована роль канала с промежуточным ядром ${}^8\text{Be}$ и сделан вывод о переходе к прямой мультифрагментации с ростом полной энергии системы из трех α -частиц.



Рисунок 1.5 - Кластеризация ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow 3\alpha$ и ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow {}^8\text{Be} + \alpha$

В работе [4] изучались распределения по поперечным импульсам и корреляционные характеристики релятивистских α -частиц из реакции когерентной диссоциации ядра углерода на три α -частицы при $p_0 = 4.5\text{ГэВ/с}$ на нуклон в эмульсии, обогащенной свинцом. Установлено что среднее поперечное сечение для диссоциации ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow 3\alpha$ увеличивается при разбавлении эмульсии ядрами Рб примерно вдвое. Кластеризация в распадах ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow 3\alpha$ отражает известный « 3α процесс» в звездах. В работе [16] на статистике 2757 неупругих взаимодействий не наблюдалось ни одного случая бинарного расщепления через единственно возможный канал ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow {}^6\text{Li} + {}^6\text{Li}$.



Рисунок 1.6 - Фотография события фрагментации ядра ^{12}C с энергией 4,5ГэВ/нуклон в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии на три α -частицы. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия и струя фрагментов в узком угловом конусе. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить три фрагмента He.

В работе [8] исследовались «белые звезды» $^{16}\text{O}^* \rightarrow 4\alpha$ при большом уровне статистики (641 событие) (рис.1.6). При анализе угловых корреляций было получено указание на передачу системам фрагментов углового момента, а также несущественную роль каскадных распадов через ^8Be и $^{12}\text{C}^*$ (рис.1.7 и рис.1.8).



Рисунок 1.7 - Кластеризация ^{16}O : а) $^{16}\text{O}^* \rightarrow ^{12}\text{C} + \alpha$

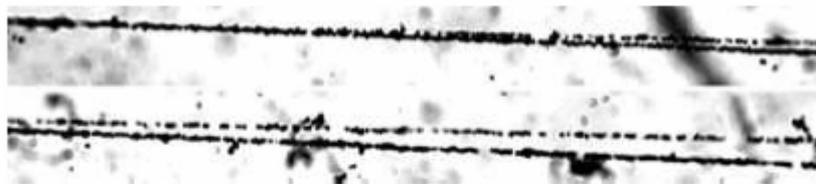
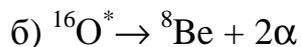


Рисунок – 1.8 Фотография несимметричного двойного распада ядра ^{16}O с энергией 4,5ГэВ/нуклон в периферическом взаимодействии. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия и струя фрагментов в узком

угловом конусе. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить один фрагмент ^{12}C и один фрагмент ^4He .

1.3 Проявления альфа-дейтрон кластеризации при фрагментации ядер ^6Li и ^{10}B

Уникальные свойства ядра ^6Li и их практическое использование хорошо известны [20]. Радиус ядра ^6Li сравнительно велик ($r_0 \approx 1.6\text{фм}$), что дает оценку величины $\sigma_0(r_0) = 70\text{МэВ/с}$. Заряженными фрагментами ядра ^6Li могут быть только изотопы водорода и гелия (рис. 1.9 и рис. 1.10).

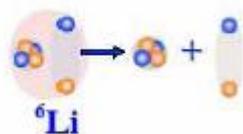


Рисунок 1.9 - Кластеризация $^6\text{Li} \rightarrow \alpha + d$

Относительное содержание изотопов водорода и гелия, образующихся при фрагментации релятивистских ядер, интересно не только для ядерной физики, но и для астрофизики, физики космических лучей. В эксперименте [9-10] по изучению особенностей фрагментации релятивистских ядер ^6Li в фотоэмульсии, классификация изотопов произведена по результатам измерения заряда частицы Z и величины $r_{\text{фс}}$, оцениваемой по измерениям многократного кулоновского рассеяния заряженной частицы в фотоэмульсии.

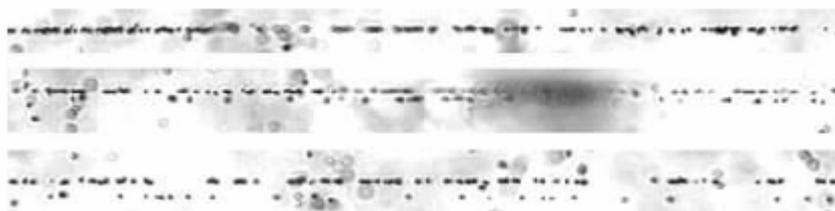


Рисунок – 1.10 Фотография события фрагментации ядра ^6Li с энергией $4,5\text{ГэВ/нуклон}$ в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии на фрагменты H и He. На верхней фотографии виден распад первичного ядра на

пару фрагментов с очень близкими углами. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить однозарядный и двухзарядный фрагменты.

В эксперименте [11] первой интригующей особенностью был обнаруженный тремя группами резко уменьшенный средний пробег ядер ${}^6\text{Li}$ по сравнению с ожидавшимся значением. Полученное значение соответствовало бы скорее ядру с массовым числом $A=11$. Это указывает на необычно большой радиус распределения нуклонов в ядре ${}^6\text{Li}$. С использованием геометрической модели перекрытия его значение было оценено как $2,7 \pm 0,1$ фм, что находится в разумном согласии с известными данными.

Другая отличительная особенность ядра ${}^6\text{Li}$ была получена посредством анализа многократного рассеяния треков. Во-первых, был установлен необычно высокий выход релятивистских дейтронов. Последующий анализ включал ядра ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$. Было показано, что фрагментация ядер ${}^6\text{Li}$ в форме кластеров ${}^3\text{He}$ и трития на порядок слабее, чем структура сформированная α -частицей и дейтроном. Это объясняет усиленный выход дейтронов, как отражение структуры из слабосвязанных кластеров α -частицы и дейтрона.

Канал фрагментации ${}^6\text{Li} \rightarrow \alpha$ указывает на пониженное значение среднего поперечного импульса α -частиц $\langle p_T^a \rangle = 0,13 \pm 0,01$ ГэВ/с. Известно, что для взаимодействия ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^{12}\text{C}$ в эмульсии это значение равно $\langle p_T^a \rangle = 0,24 \pm 0,01$ ГэВ/с. В духе соотношения неопределенностей этот факт является еще одним указанием на увеличенный размер ядер ${}^6\text{Li}$.

Как «золотые» можно рассматривать 31 событие когерентной диссоциации ядер ${}^6\text{Li}$ не сопровождаемые возбуждением ядра мишени. Среди них 23 события соответствуют каналу диссоциации $\alpha+d$, $4-{}^3\text{He}+t$, $4-t+d+p$; канал диссоциации – $d+d+d$ отсутствует. Эта топология демонстрирует кластерную структуру ${}^6\text{Li}$ наиболее очевидным образом. Более того, благодаря полностью восстановленной кинематике стало возможным восстановить уровни возбуждения ядра ${}^6\text{Li}$ 2,19 и 4,13 МэВ с изоспином $T=0$. Напротив, уровень 3,56 МэВ, имеющий изоспин $T=1$, отсутствует из-за изоспина системы $\alpha+d$ $T=0$.

Обсуждаемое изучение ядра ${}^6\text{Li}$ указало на высокую вероятность процесса обмена зарядом ${}^6\text{Li} \rightarrow {}^6\text{He}$ на ядрах фотоэмульсии [2], [3]. Как и ожидалось, он сопровождается рождением заряженного мезона. Этот результат стимулировал эксперимент в 1999г. По облучению эмульсий во вновь сформированном пучке ядер трития и ${}^6\text{He}$ синхрофазотрона ОИЯИ. Такой смешанный пучок является неизбежной особенностью регистрации, так как оба ядра имеют одинаковое отношение Z/A и не могут быть разделены при магнитном анализе. Полученная доля ядер ${}^6\text{He}$ в пучке составила величину около 0,01. Частицы с зарядом два легко отличимые при визуальном анализе облученной эмульсии.

Продолжением исследований мультифрагментации легких четно-четных ядер с диссоциацией только на α частицы является изучение вклада дейтронов в распады нечетно-нечетных ядер ${}^{10}\text{B}$ [13-15]. Топология «белых» звезд была исследована для ядер ${}^{10}\text{B}$ при энергии 1ГэВ/нуклон. Доля распадов ${}^{10}\text{B}^* \rightarrow d\alpha\alpha$ среди событий с зарядовой топологией 2+2+1 составила 40% (рис. 1.11). Вклад канала ${}^{10}\text{B}^* \rightarrow d {}^8\text{Be}^{(*)} \rightarrow d\alpha\alpha$ оценен на уровне $18 \pm 3\%$. Распад нестабильного ядра ${}^9\text{B}$ не является основным источником событий с такой топологией. На это указывает малая вероятность топологии 4+1 в распаде ${}^{10}\text{B}^* \rightarrow p {}^9\text{Be}$, а также небольшой вклад ${}^8\text{Be}$ в ${}^{10}\text{B} \rightarrow p {}^8\text{Be}$. Можно сделать вывод о решающей роли прямых 3-тельных распадов с конфигурацией «белых» звезд 2+2+1 (рис.1.12). Таким образом, топология распада ${}^{10}\text{B}^* \rightarrow d\alpha\alpha$ проявляет аналогию с распадом ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow 3\alpha$.

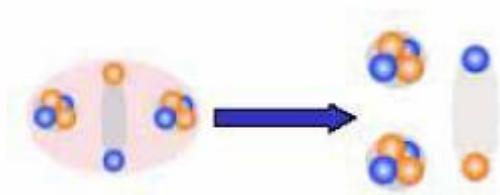


Рисунок 1.11 - Когерентная диссоциация ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\alpha + d$

Соотношение каналов $(2\text{He}+d)/(2\text{He}+p) \approx 1$ находит аналогию с фрагментацией ядра ${}^6\text{Li}$, где $(\text{He}+d)/(\text{He}+p) \approx 1$. На дейтронную кластеризацию

также указывает малое значение среднего поперечного импульса дейтронов $\langle p_t^d \rangle = 0,14 \pm 0,01 \text{ ГэВ/с}$ в этих событиях, как и в случае фрагментации ядра ${}^6\text{Li}$, где $\langle p_t^d \rangle = 0,13 \pm 0,02 \text{ ГэВ/с}$.

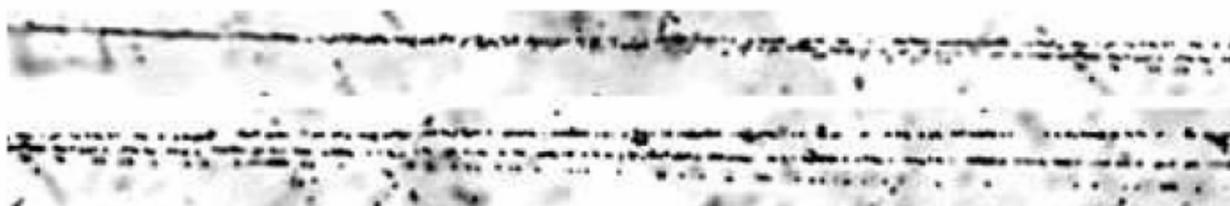


Рисунок 1.12 - Событие фрагментации ядра ${}^{10}\text{B}$ с энергией 1ГэВ/нуклон на два фрагмента He и один фрагмент H

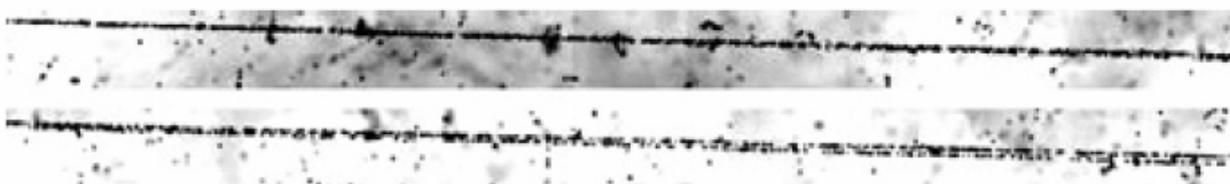


Рисунок 1.13 - Событие фрагментации ядра ${}^{10}\text{B}$ с энергией 1ГэВ/нуклон на фрагменты Li (наверху) и He (внизу)

Таким образом, можно сделать вывод, что эмульсионная методика может стать важным источником достаточно полной информации по проблемам кластеризации и протонного гало в ядрах. Информация по ядерной фрагментации может обеспечить ценные данные по свойствам несвязанных ядер типа ${}^5\text{He}$, ${}^5\text{Li}$, ${}^8\text{Be}$ являющихся важными «посредниками» в звездном нуклеосинтезе.

1.4 Слабосвязанные кластерные системы

Цель наших экспериментов состоит в изучении картины фазового перехода ядерной материи из состояния квантовой жидкости в состояние квантового газа, состоящего из большого числа нуклонов и легчайших ядер вблизи энергетических порогов таких реакций. Термин «легчайшие ядра»

включает дейтроны, тритоны, ядра ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$, т. е. стабильные системы, не имеющие возбужденных состояний ниже порога распада на нуклоны.

Современный интерес к исследованию таких фазовых переходов мотивирован предсказанием свойств таких состояний, как слабосвязанных кластерных систем [21]. Эти системы могут иметь пространственную протяженность, которая существенно превышает размер фрагментов. Процесс мультифрагментации, протекающий с адиабатической передачей возбуждения и без обмена нуклонами, может интерпретироваться как исчезновение кулоновского барьера вследствие одновременного увеличения расстояния между заряженными кластерами.

Изучение таких состояний в масштабах характерных для нуклонной и кластерной структуры ядра представляет интерес для ядерной астрофизики. Например, благодаря существенному уменьшению кулоновского отталкивания в таких протяженных системах, они могут играть роль промежуточных состояний в процессах ядерного синтеза в звездах. Установленные топологии могут оказаться полезными для прояснения вариантов синтеза ядер, как процессов обратных процессам их фрагментации [21].

2 Ядерная фотоэмульсия

2.1 Общая характеристика ядерной фотоэмульсии

Ядерные эмульсии представляют собой высококонцентрированные и высокодисперсные эмульсии из бромистого серебра. Концентрация AgBr, который находится в форме микрокристаллов почти сферической формы, в большинстве изготавливаемых в настоящее время эмульсий составляет около 83% по весу. В качестве среды, в которой распределены микрокристаллы AgBr, наиболее широко используется желатина с пластификатором. Средние размеры микрокристаллов бромистого серебра для большинства ядерных эмульсий находятся в пределах 0,12-0,3 мкм, эмульсии НИКФИ, Ильфорд, Кодак, Агфа, Истмен и др.

Удельная плотность всех эмульсий с нормальным составом находится в пределах 3,8 – 4, 0 г/см³.

Ядерные эмульсии изготавливаются либо на стеклянной подложке с толщиной эмульсионного слоя от 50 до 400 мкм, либо без подложки с толщиной слоя 400-600 мкм. Последние предназначены главным образом для собирания эмульсионных камер.

Анализ элементарного состава ядерных эмульсий показывает, что в эмульсии главным образом содержится две далеко отстоящих по атомному весу группы атомов: H, C, N, O и Ag, Br при весьма незначительном количестве атомов S, J, Au.

Основными компонентами ядерной эмульсии являются: а) галоидное серебро – главным образом бромистое, обладающее плотностью 6,47 г/см³; б) желатина и пластификатор (например, глицерин) и в) вода.

Галоидное серебро находится в эмульсии в виде микрокристаллов (или «зерен») кубической или почти сферической формы в зависимости от метода приготовления.

Желатина и пластификатор содержат следующие элементы: углерод, азот, кислород, водород и серу. Желатина представляет собой сложное вещество, вследствие чего неизбежно существует незначительная разница в химическом составе желатины, поставляемой различными изготовителями.

Глицерин вводится в эмульсию в качестве пластифицирующего вещества. Он уменьшает хрупкость эмульсии и способствует появлению пластических деформаций при возникновении напряжений в слое. Последнее имеет особенно большое значение в тех случаях, когда пластинки должны экспонироваться в вакууме, поскольку в подобных условиях эмульсия без пластификатора часто отрывается от стекла. Сцепление между эмульсией и стеклом настолько велико, что последнее часто разрушается под действием натяжений, появляющихся при высыхании эмульсии, причем из пластинок вырываются чешуйки стекла, прочно прилипшие к эмульсии.

По своим фотографическим, лучше сказать, ядерносенситометрическим, характеристикам все ядерные эмульсии разделяются на три основных типа.

1. Эмульсии низкой чувствительности, предназначенные для регистрации сильноионизирующих частиц с потерями энергии ≥ 50 кэВ на 1мкм пробега (осколков деления, многозарядных ионов, медленных α -частиц).
2. Эмульсии средней чувствительности, способные регистрировать следы частиц с ионизацией ≥ 2 кэВ на 1мкм пробега (протоны с энергией 50-100МэВ).
3. Эмульсии высокой чувствительности, регистрирующие следы частиц с минимальной ионизацией (0,55кэВ на 1мкм) [22].

В нашем случае использовались эмульсии высокой чувствительности (НИКФИ).

Эмульсии, применяемые в настоящее время для регистрации следов заряженных частиц, отличаются от обычных фотоэмульсий двумя особенностями:

- а) отношение количества галоидного серебра к желатине в ядерной эмульсии приблизительно в восемь раз больше, чем в обычной;
- б) толщина слоя ядерной эмульсии превышает, как правило, в 10-100 раз толщину обыкновенной эмульсии. Кроме того, в современных условиях ядерные эмульсии часто применяются в виде отдельных слоев, лишенных стеклянной подложки.

Одной из основных используемых ядерных фотоэмульсий является эмульсия типа БР-2, обеспечивающая чувствительность вплоть до релятивистских однозарядных частиц и дающих минимум ионизационных потерь. Основные характеристики ядерной эмульсии, применяемой в наших исследованиях приведены в табл. 2.1

Таблица 2.1 – Химический состав эмульсии (литературные данные по составу ядерной фотоэмульсии БР-2; отн. влажность 58% [7])

Элемент	Z	10^{22} атомов/см ³
Серебро/ Ag	47	1,02
Бром/ Br	35	1,01
Йод/ I	53	0,006
Углерод/ C	6	1,39
Водород/ H	1	3,19
Кислород/ O	8	0,94
Сера/ S	16	0,014
Азот/ N	14	0,32

Кроме основного вида эмульсии типа БР-2 в последние годы также широко использовались ее модификации с уменьшенным размером зерна (мелкозернистые) и уменьшенной концентрацией ядер AgBr (разбавленные). Добавление к эмульсии определенных веществ делает ее избирательно чувствительной к некоторым ядерным реакциям. (Например, добавление ¹⁰B делает эмульсию чрезвычайно чувствительным детектором нейтронов). Выбор типа эмульсии зависит от ее предполагаемого применения. Чувствительность

эмульсии должна быть достаточно велика, чтобы обеспечить плотность зерен, необходимую для регистрации следа частицы. При излишней чувствительности плотность зерен может оказаться настолько большой, что отдельные зерна станут неразличимыми и их нельзя будет сосчитать.

Фотоэмульсионная методика позволяет зарегистрировать все заряженные частицы в расщеплении, а также определить область, ответственную за их образование. Метод ядерных эмульсий является вполне адекватным для изучения глобальных характеристик явления фрагментации ядра-снаряда благодаря весьма высокой пространственной разрешающей способности, наблюдаемости акта соударения в 4 π -геометрии эксперимента, сравнительной легкости измерения зарядов фрагментов и возможности регистрации весьма малых возбуждений ядра-мишени, что важно для изучения корреляции между продуктами фрагментации снаряда и мишени. Эти достоинства фотометода тем ощутимей, чем выше первичная энергия столкновения. По своему атомному составу: водород H (~4% взаимодействий), группа легких ядер CNO (~26% взаимодействий), группа тяжелых ядер AgBr (~70% взаимодействий) фотоэмульсии позволяют получить характеристики ядер, далеко отстоящих по атомному весу.

Методика ядерных эмульсий всегда обеспечивала обзорные наблюдения по физике микромира благодаря высокой достоверности наблюдаемых событий, прекрасному пространственному разрешению и максимально полной наблюдаемости следов заряженных частиц. В ряде важных случаев она позволяет измерять импульсы, идентифицировать частицы. Поэтому именно она представляется эффективным способом для изучения процессов релятивистской фрагментации благодаря высокому разрешению эмульсий и возможности наблюдения реакций в полной геометрии. Особое преимущество имеет наблюдение в эмульсиях ядер с дефицитом нейтронов, благодаря более полной наблюдаемости продуктов реакции.

У скептиков есть два аргумента по поводу дальнейшего использования ядерных эмульсий – их стоимость и, главное, трудоемкость обработки. Однако и в этих вопросах жизнь, как говорится, не стоит на месте.

Расцвет использования эмульсий пришелся на пятидесятые годы, когда были получены пионерские результаты по физике элементарных частиц. Прежде всего была решена проблема получения толстых слоев эмульсии (600 мкм), позволивших получать объемные образы событий. А высокая однородность облучаемого материала открыла возможности спектрометрии и идентификации частиц. Советские специалисты решили эту проблему самостоятельно. По существу, достигнутый уровень не преодолен и поныне. Это сложившаяся культура.

Положительной чертой исследования процесса фрагментации ядер с помощью эмульсии является то, что следы частиц в желатине остаются навсегда и исследователь может изучать их снова и снова, чего не невозможно сделать машинным методом.

Также не последней по значимости положительной чертой эмульсии является ее дешевизна. Для изучения физики высоких энергий эмульсия имеет огромное преимущество в экономическом плане по сравнению с другими методами.

2.2 Метод ядерных фотоэмульсий

Использование ядерных фотографических эмульсий при изучении взаимодействия частиц большой энергии с ядрами сыграло значительную роль в развитии существующих представлений о механизме этих взаимодействий.

Возможность визуального наблюдения единичных актов ядерного взаимодействия в виде так называемых «звезд» в ядерной эмульсии позволяет получить большое число непосредственных данных о характеристиках ядерных реакций: о числе и природе образующихся при расщеплении ядра заряженных

частиц, об их угловом и энергетическом распределениях, о передаваемых ядру при столкновении энергии и импульса и т.д.

Суть метода ядерных фотографических эмульсий заключается в следующем. Заряженная частица, проходя через фотоэмульсию, активирует на своем пути кристаллы галоидного серебра и делает их способными к проявлению. После специальной обработки эмульсионных слоев в них появляются следы частиц в виде цепочки проявленных зерен, хорошо видных под микроскопом. Значительную роль в развитии этой методики сыграли советские ученые физики Л.В. Мысовский, А.П. Жданов, С. Пауэл, Д. Паркинс, П. Фаулер.

Средняя плотность эмульсии составляет порядка $3,5 - 4 \text{ г/см}^3$, при остаточной влажности порядка $2,5\%$. Ядерные фотографические эмульсии используются для регистрации и анализа следов заряженных частиц практически любой энергии. По измерениям характеристик этих следов можно идентифицировать частицу и определить ее кинематические характеристики.

Время чувствительности ядерных эмульсий практически определяется временем их экспозиции, которое может быть порядка нескольких недель. В течение этого времени ядерная эмульсия регистрирует все заряженные частицы, проходящие через нее. Благодаря высокому пространственному разрешению (до $0,5 \text{ мкм}$) фотометод с успехом применяется для определения углов разлета частиц и ядер, образующихся в результате ядерного взаимодействия. По точности измерения малых углов метод ядерных эмульсий не имеет себе равных (до 10^{-5} рад). При проведении экспериментов на ускорителях фотометод не требует большой затраты времени работы ускорителя. Расходы на аппаратуру также относительно малы. Среди многочисленных достоинств метода, однако, имеется и ряд недостатков.

Сложность состава вещества фотоэмульсии не позволяет однозначно ответить на вопрос, с каким ядром произошло взаимодействие налетающей частицы. Его устраняют введением дополнительных элементов и введением

критериев отбора обрабатываемых событий. Существенным недостатком является невысокая скорость обработки облачений. И как следствие необходимость длительного времени для набора статистики. Однако, как правило, это компенсируется получаемым результатом. Тем самым, позволяя проводить планирование электронных экспериментов.

Точное определение состава эмульсии существенно влияет на точность измерений, которая может быть достигнута при помощи фотометода и которая требуется при точном определении энергии однородной группы частиц по их средним пробегаем. По этой причине было бы весьма желательно точно знать состав эмульсии в реальных условиях ее облучения.

Одно из затруднений, встречающихся при определении химического состава эмульсий, состоит в том, что желатина может быстро обмениваться водой с находящейся с ней в контакте газообразной или жидкой средой. Так, например, если поместить на поверхность эмульсии каплю иммерсионного масла и оставить ее на несколько минут, а затем стереть то можно заметить набухание участка поверхности желатины, находившегося в контакте с маслом. Описанный эффект объясняется поглощением незначительного количества воды, содержащегося в масле; возникающая вследствие этого слабая деформация поверхности быстро исчезает, как только пластинка снова приходит в равновесие с окружающей ее атмосферой.

Подобным же образом эмульсия может поглощать воду из других веществ, как, например, из четыреххлористого углерода, в котором вода может содержаться в очень малом количестве. Все это затрудняет определение плотности при помощи обычного метода, основанного на взвешивании образца сначала в воздухе, а затем в жидкости с известной плотностью.

2.3 Механизм образования следов

В процессе образования следов заряженных частиц в эмульсии решающую роль играет возникновение δ -электронов (электроны, выбитые из атомов в процессе ионизации и в свою очередь способные ионизировать атомы среды, через которую они движутся), при наличии которых в данном зерне может выделиться количество энергии, намного превышающее то максимальное значение, которое оказалось бы возможным, если бы энергетические потери частиц были равномерно распределены вдоль ее пути. Так, например, в минимуме ионизации удельная ионизация частицы с зарядом $|e|$ составляет около 700кэВ/мм . При равномерных потерях максимальное количество энергии, которое может быть поглощено зернами диаметром $0,3\mu$, должно быть порядка 300эВ (при прохождении частицы по диаметру зерна). С другой стороны, пробег δ -электрона с энергией меньше 5000эВ оказывается настолько коротким, а его траектория настолько искривленной вследствие рассеяния, что при возникновении такого электрона внутри зерна он может остановиться, не выходя за пределы последнего. Таким образом, в отдельных зернах выделится значительно большее количество энергии, которое может быть затрачено на образование скрытого изображения. Вследствие описанного эффекта оказывается возможным, что почти во всех эмульсиях некоторые зерна станут способными к проявлению после прохождения через них одной частицы, удельная ионизация которой близка к минимальной; однако для образования следа, достаточно хорошо различимого под микроскопом, число таких зерен на единице длины траектории должно быть довольно велико по сравнению с общим «фоном».

2.4 Ионизационные потери заряженных частиц в эмульсии и классификация треков

Следы, оставляемые заряженными частицами в ядерной эмульсии, образуются в результате передачи энергии от движущейся частицы к атомам светочувствительных зерен. Заряженная частица, движущаяся в любой материальной среде, участвует в ряде взаимодействий с полями атомов и ядер, через которые она проходит; эмульсия сохраняет след каждой частицы и таким образом делает видимой «запись» этих взаимодействий. Характеристики следа зависят от сорта частицы и ее скорости. Поскольку эти характеристики можно измерять, появляется возможность идентификации частицы. Кроме ядерных реакций, которые могут иметь место при прохождении частицы в области действия ядерных сил, движущаяся заряженная частица теряет энергию на возбуждение или ионизацию атомов вдоль своего пути; при этом она вследствие кулоновского рассеяния много раз слегка меняет направление своего движения.

Когда частицы испытывают ядерные взаимодействия на лету со значительной потерей энергии, заряженные частицы останавливаются вследствие потерь энергии на ионизацию, и средний пробег частиц с энергией E_p равен:

$$I = \int_0^{E_p} -\frac{dE}{dE/dx} \text{ см}, \quad (2.1)$$

где соотношение для средней потери энергии на ионизацию для частицы с зарядом z и скоростью $v=\beta c$ имеет вид:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_e z^2 e^4}{m_e v^2} \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I_{em}(1-b^2)} - b^2 - \sum_i C_i - d \right] \text{ МэВ/см},$$

$$\text{где } N_e = \sum_i N_i Z_i \text{ и } N_e \ln I_{em} = \sum_i N_i Z_i \ln I_i,$$

а N_i – плотность в эмульсии атомов с порядковым номером Z_i и ионизационным потенциалом I_i ;

$\sum_i C_i$ - малый член, учитывающий то, что сильно связанные электроны не

участвуют в процессе замедления частиц;

δ – небольшая поправка, учитывающая влияние плотности среды.

Плотность следа также непосредственно связана с потерями энергии на ионизацию, но на образование зерен вдоль следа идет только часть полных ионизационных потерь. Чтобы участвовать в образовании первичного следа, атомный электрон образует свой собственный ответвленный след, называемый следом δ -электрона. Можно измерять как плотность зерен вдоль следа, так и плотность δ -электронов.

При анализе данных в фотоэмульсионных экспериментах, используется следующая классификация частиц. Все вторичные заряженные частицы делятся на три класса в зависимости от скорости β , которая определяется по ионизации или пробегу:

Релятивистские (ливневые или s-частицы) (ионизация $J < 1.4J_0$, где J_0 - ионизация на следах однозарядных релятивистских частиц, $\beta \geq 0,75$);

серые или g-частицы ($J \geq 1.4J_0$, остаточный пробег ≥ 3000 мкм, $0,23 \leq \beta < 0,75$);

черные или b-частицы (остаточный пробег ≤ 3000 мкм, $\beta < 0,23$).

Частицы с серыми и черными следами объединяются в группу h-частицы (группа всех фрагментов мишени, включающая в себя g- и b-частицы, т.е. $N_h = N_b + N_g$).

Следы релятивистских частиц отделяются от серых по счету зерен на изучаемом следе и на следе первичной частицы (на той же глубине в эмульсии). Черные следы отделяются от серых по длине остаточного пробега ($R_b \leq 3000$ мкм). Из-за высокого пространственного разрешения фотоэмульсии регистрируются также ядра отдачи и δ -электроны.

2.5 Определение длины следа

Заряженная частица, движущаяся в фотографической эмульсии, испытывает торможение вследствие взаимодействия с атомами, расположенными на ее пути. После того как энергия частицы станет меньше нескольких тысяч электронвольт, ее ионизирующие действия прекращаются, в связи с чем обрывается видимый в эмульсии след. Длина следа частицы R , представляющая расстояние, измеренное вдоль траектории от точки возникновения следа до последнего проявленного зерна, позволяет определить с достаточно высокой точностью истинный пробег частицы.

2.6 Методика эксперимента

В эксперименте слои ядерной фотоэмульсии НИИХИМФОТОПРОЕКТА типа БР-2 размером $(10 \times 20 \times 0,06) \text{ см}^3$ была облучена первичным пучком ядер с энергией 1ГэВ/нуклон на Нуклотроне ЛВЭ ОИЯИ, г.Дубна 12.06.2003г. Был сформирован пучок, соответствующий профилю стопки с достаточно равномерным распределением. Размеры пучка контролировались многопроволочными пропорциональными камерами, а полный поток – мониторным счетчиком.

Фотоэмульсионные слои имеют размер $10 \times 10 \text{ см}^2$, толщина каждого составляет порядка 600мкм. При облучении пучок был направлен параллельно плоскости эмульсии вдоль ее длинной стороны (рис. 2.1)

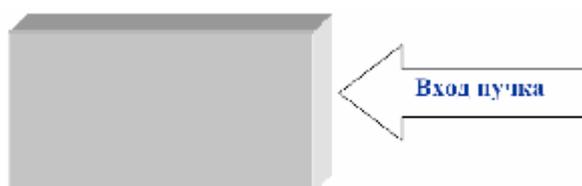


Рисунок 2.1 - Положение кассеты во время облучения (вид сверху). Расположение слоев в данном положении сверху вниз по ходу пучка, т.е.

переходы треков идущих к поверхности в пластине X, надо искать у стекла пластины X-1 и треки выходящие у стекла искать на поверхности в пластине X+1

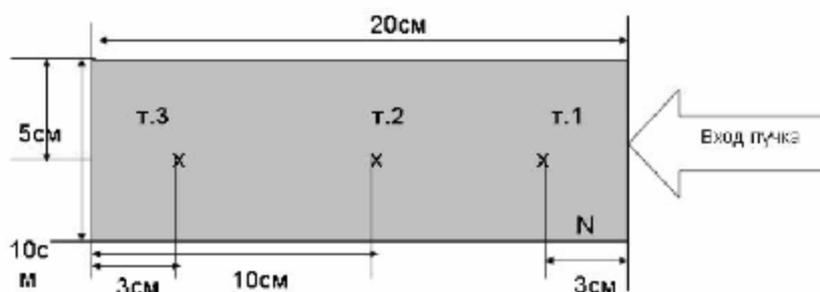


Рисунок 2.2 - Представлено схематическое изображение эмульсионного слоя, где N – номер пластинки, т.1, т.2, т.3 – точки, в которых измеряется толщина эмульсии до и после химической проявки

2.7 Поиск событий по следу и описание найденных событий

2.7.1 Описание методики поиска событий

Существует три метода поиска событий: просмотр по следу; по площади и по полоскам.

Для поиска событий использовался метод просмотра по следу. При использовании этого метода эмульсия сканируется со стороны входа пучка, при этом отобранные пучковые следы просматриваются от входа в пластинку до остановки, взаимодействия, распада на лету или выхода из слоя. Этот метод позволяет эффективно находить трудные для поиска при просмотре по площади ядерные взаимодействия. Таким методом получают полный набор взаимодействий без дискриминации. Кроме того, он позволяет определять сечения и относительные вероятности различного рода взаимодействий и распадов.

Просмотр слоев с целью поиска ядерных взаимодействий велся путем прослеживания вдоль следа на микроскопах типа МБИ-9 при увеличении 20×15 (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 - Внешний вид просмотрового микроскопа МБИ-9

Следует отметить, что скорость прослеживания вдоль следа зависит от угла наклона следов к плоскости слоя и от углового разброса пучка.

Для получения высокой эффективности регистрации событий с малым углом отклонения одного из вторичных следов относительно первичного необходимо следить за тем, чтобы центр тяжести пучка был все время параллелен точному перемещению столика микроскопа по оси ОХ.

Для фиксации положения следов в поле зрения и регистрации малых угловых отклонений используется специальная окулярная шкала (рис. 2.4).

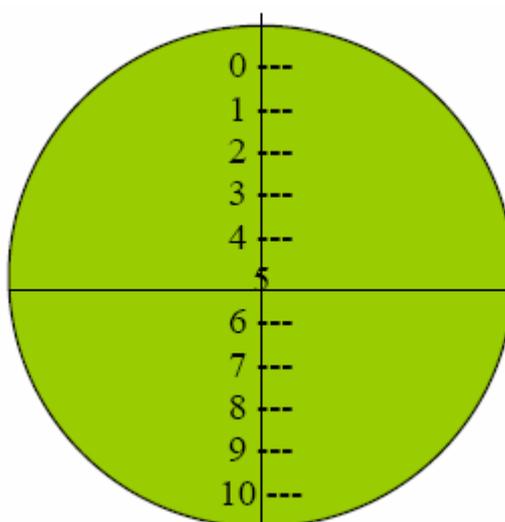


Рисунок 2.4 - Окулярная шкала

По всей пластинке нанесена миллиметровая сетка. Каждая клетка пронумерована. Для поиска треков выбирают левый столбец, отступив от края 0,5см. В соответствии с увеличением объектива 20*15 получают в каждой клетке два поля зрения по 10мм. В каждом поле зрения проходят от поверхности к стеклу, т.е. осуществляют поиск треков на разной глубине.

2.7.2 Расчет среднего свободного пробега ядра ^{56}Fe

Таблица 2.2 - Результаты просмотра пяти пластинок, облученных ядрами ^{56}Fe

Номер пластинки	Найденные звезды	Общий пробег, мм	λ_{exp} , см
24	16	1008,84	6,305
25	12	870,68	7,255
26	19	1750,50	9,213
27	12	1229,06	10,242
28	14	954,16	6,815

На просмотренной длине $L=5813,24\text{мм}$ было найдено $N=83$ взаимодействия ^{56}Fe с ядрами элементов, входящих в состав эмульсии. Для найденных событий измерялся пробег. Средний свободный пробег ядра ^{56}Fe в фотоэмульсии составляет $\lambda_{\text{exp}} = 7,10 \pm 0,79\text{см}$ (табл. 2.2).

Средний свободный пробег определяется как

$$\lambda = L/N, \quad (2.2)$$

$$\pm \Delta l = \frac{l}{\sqrt{N}}, \quad (2.3)$$

где L – суммарная прослеженная длина, N – число обнаруженных взаимодействий, $\pm\Delta\lambda$ – статистическая ошибка.

Таблица 2.3 - Средний свободный пробег λ_{exp} для взаимодействий ядер в ядерной фотоэмульсии

Ядро-снаряд	Импульс на нуклон, ГэВ/с	λ_{exp}	Литература
p	4,5	30,2±0,7	[28]
² H	9,4	26,9±0,6	[11]
³ He	2,67	23,7±0,7	[12]
⁴ He	4,5	19,5±0,3	[17]
⁶ Li	4,5	14,1±0,4	[11]
¹² C	4,5	13,7±0,5	[18]
¹⁴ N	2,9	13,04±0,6	[20]
¹⁶ O	4,5	13,0±0,5	[19]
⁵⁶ Fe	1	7,1±0,79	Настоящая работа

Такая аппроксимация удовлетворительно описывает экспериментальные данные в широком интервале массовых чисел ядер-снарядов.

Такой пробег для железа является нормальным, учитывая его атомный вес.

3 Мультифрагментация релятивистских ядер

3.1 Мультифрагментация релятивистских ядер

Физическое явление фрагментации ядер, открытое в фотоэмульсиях, облученных космическими лучами, первоначально определялось как испускание ядрами других, более легких ядер, под действием частиц высоких энергий. В настоящее время термин фрагментация употребляется в расширенном его понимании как испускание неких частей, партонов более сложной системой. Нуклоны, испускаемые ядрами при облучении их фотонами, адронами или лептонами в этом понимании также являются фрагментами [23].

Возбужденные («нагретые») атомные ядра снимают свое возбуждение, излучая различные частицы (протоны, нейтроны, γ -кванты) или целые осколки (фрагменты). Этот процесс – фрагментация возбужденных ядер изучается физикой ядра в течение многих десятилетий, являясь в сущности, основным источником информации о структуре ядер, волновых функциях различных его составляющих (нуклонов, кластеров и т.д.), уравнении состояния ядерного вещества и др. При числе фрагментов больше двух явление развала возбужденных ядер часто называют мультифрагментацией.

Действительного развития эти исследования достигли лишь, начиная с 70-х годов, когда стали доступными для проведения экспериментов ускорители релятивистских ядер в Беркли и Дубне. На самом деле экспериментальные исследования фрагментации релятивистских ядер оказались возможными благодаря появлению релятивистских ионов в Дубне (дейтоны, альфа-частицы, углерод, неон и т.д.), а затем в BNL (золото, уран), в CERN (золото, свинец) и в Дармштадте (литий-11 и другие радиоактивные изотопы). Результаты этих исследований в настоящее время позволяют утверждать, что фрагментация ядер - мишеней, фрагментация ядер - снарядов, множественное рождение частиц и деление ядер, имеют общую природу.

Дело в том, что изучение фрагментации релятивистских ядер-снарядов значительно облегчает получение информации о структуре ядра, благодаря отсутствию энергетического порога регистрации ядерных осколков, который, как правило, достаточно высок для случая диссоциации покоящихся в ЛСК ядер-мишеней. Например, в пропановой пузырьковой камере ЛВЭ ОИЯИ порог регистрации медленных протонов составляет величину около 150 МэВ/с, что почти полностью лишает возможности изучать, так называемые, «испарительные» частицы ядер-мишеней.

При взаимодействии релятивистских ядер может происходить расщепление как ядра-снаряда, так и ядра-мишени. В зависимости от параметра соударения возникают события с испусканием вторичных частиц различной природы и энергий в широком интервале множественности. Исходя из геометрических представлений о взаимодействии релятивистских ядер, можно выделить зону активного взаимодействия перекрытых частей ядра и их спектаторной части. В зоне взаимодействия происходит процесс рождения новых частиц и практически полное разрушение подструктур ядер-участников до нуклонов. Это релятивистские и серые частицы, образованные в основном протонами и пионами. Возбужденная спектаторная часть мишени распадается на фрагменты, образующие черные ν -частицы, энергия которых в лабораторной системе превышает 26 МэВ на нуклон. Спектаторная часть снаряда фрагментирует на частицы, которые наблюдаются внутри узкого конуса, ориентированного вдоль первичного направления фрагментирующего снаряда. Интерес исследования взаимодействия ядер с ядрами при высоких энергиях обусловлен возможностью наблюдения в этих взаимодействиях проявлений новых необычных свойств ядерной материи.

Наибольший интерес для нас представляют периферические взаимодействия ядер. Периферические столкновения ядер, протекающие при начальной энергии свыше 1 ГэВ/нуклон, составляют особый тип ядерных взаимодействий, в которых развал первичных ядер инициируется электромагнитным и дифракционным взаимодействиями (сильные

взаимодействия, т.е. частица, пролетая мимо ядра может возбудиться и вести себя как волна и от этого рассыпаться), а также соударениями нуклонов при малом перекрытии плотностей этих ядер. Ядерные эмульсии, облученные в пучках релятивистских ядер, позволяют получить информацию о заряженных продуктах таких столкновений, которая уникальна по детальности наблюдения треков частиц и точности их пространственной метрологии. Описанный тип взаимодействий может служить «лабораторией» для генерации нерелятивистских ансамблей из нескольких ядер. Определение «периферический» не передает в полной мере те драматические изменения, которые происходят на микроскопическом уровне. Степень диссоциации ядра может достигать его полного разрушения на отдельные нуклоны и легчайшие ядра, не имеющие возбужденных состояний, т. е. ядра ${}^{2,3}\text{H}$ и ${}^{3,4}\text{He}$. Относительная интенсивность их образования позволяет выявить значимость различных кластерных степеней свободы.

При периферических взаимодействиях ядрам передается спектр возбуждений вблизи порогов диссоциации. В кинематической области фрагментации релятивистского ядра возникают системы из ядерных фрагментов, имеющие суммарный заряд близкий к заряду родительского ядра. Угловой раствор конуса релятивистской фрагментации определяется фермиевским движением нуклонов. Таким образом, фрагменты оказываются на периферии распределения частиц по быстроте, полученного суммированием по всем каналам данной реакции. Величины импульсов фрагментов, нормированные на массовые числа, распределены около нормированного импульса первичного ядра с разбросом в несколько процентов. Поэтому распределение скоростей фрагментов в системе их центра масс должно быть нерелятивистским. В соответствии с установленной картиной предельной фрагментации ядер, вероятности заселения конечных состояний фрагментов проявляют высокую степень универсальности. Они оказываются в слабой зависимости от начальной энергии и свойств ядра мишени. При отборе событий с диссоциацией налетающего ядра в узкий конус фрагментации

нерелятивистские фрагменты либо отсутствуют, либо число их незначительно. Испускание этих фрагментов происходит по всему телесному углу. Поэтому их доля в угловом конусе релятивистской фрагментации незначительна. Фрагменты мишени имеют нерелятивистские импульсы, что позволяет отличить их от фрагментов ядра-снаряда в этом конусе.

Конечно, при релятивистском подходе к изучению фрагментации возникают и собственные методические трудности. Для первичного ядра с зарядом Z весьма желательно обеспечить детектирование вплоть до однозарядных частиц. Произведенная всеми фрагментами ионизация может снизиться вплоть до фактора Z , а ионизация, приходящаяся на один трек до фактора Z^2 по сравнению с ионизацией от первичного ядра. Поэтому экспериментальный метод должен обеспечить широчайший диапазон детектирования, учитывающий значение Z^2 . Для реконструкции события необходима полная кинематическая информация о вторичных частицах в конусе релятивистской фрагментации, что, например, позволяет вычислить инвариантную массу системы. Точность ее оценки в решающей степени зависит от точности углового разрешения треков. Поэтому для обеспечения наилучшего пространственного разрешения требуется детектирование релятивистских фрагментов с наилучшим пространственным разрешением.

Этим требованиям на начальном этапе удовлетворяет метод ядерных фотоэмульсий. Главной задачей этого метода является поиск доказательных наблюдений существования различных каналов фрагментации при статистической обеспеченности на уровне десятков событий и их метрология. Эмульсии обеспечивают рекордное пространственное разрешение (около 0.5мкм), которое позволит разделять следы заряженных частиц в трехмерном образе события в пределах толщины одного слоя (600мкм), а также обеспечить высокую точность измерения углов. Эмульсионный метод позволяет измерять заряды частиц, начиная с однозарядных вплоть до ядер с самыми большими зарядами при комбинировании способов ионизации (счет числа разрывов и числа δ -электронов на единицу длины следа). Следы релятивистских ядер H и

Не разделяются визуально. При периферической фрагментации легкого ядра его заряд зачастую может быть установлен по зарядовой топологии релятивистских фрагментов. Измерение многократного рассеяния на следах легких фрагментов позволяет разделять изотопы ${}^{2,3}\text{H}$ и ${}^{3,4}\text{He}$.

События полного разрушения составляют долю в несколько процентов от всего разнообразия конечных состояний тяжелых ядер, которое включает в себя парное деление, образование одиночных осколков в сопровождении множества легчайших ядер, образование групп легких ядер. Возбуждение, переданное ядру, в значительной степени определяется энергетическим порогом массы конечного состояния. Он растет с ростом множественности фрагментов. В этом смысле зарядовая топология конечного состояния уже характеризует возбуждение. В сложном процессе распределения по множеству степеней свободы передаваемой энергии ядерные фрагменты выходят на массовую поверхность и получают возможность реализовать кулоновскую энергию взаимного отталкивания в кинетическую энергию каждого из фрагментов. Происходит своего рода кулоновский «взрыв» ядра.

3.2 Мультифрагментация в "белых звездах"

В результате столкновения налетающего ядра с ядрами мишени образуются так называемые звезды, которые представляют из себя треки разлетающихся частиц. Звезды разделяют на «большие» и «белые». Чтобы определить тип звезды необходимо определить граничный угол для вылета фрагментов.

Граничный угол для вылета фрагментов ядра-снаряда звезд диссоциации определяется по формуле (1.1), где p_0 – импульс ядра-снаряда в расчете на нуклон. В данном эксперименте изучаем диссоциацию ядер железа с импульсом $p_0=1.9\text{ГэВ/с}$ на нуклон и фрагментационный угол составляет $6^{\circ}4'$.

$$\sin \Theta_f = \frac{0.2\text{Гэв} / c}{p_0} \quad (1.1)$$

Этот угол определяет узкий угловой конус фрагментации, т.е. «белую» звезду.

При наборе статистики для изучения мультифрагментации ядер отбираются события без вновь рожденных частиц, что визуально проявляется в отсутствии однозарядных треков в широком угловом конусе. Как правило, в таких событиях происходит полная передача заряда первичного ядра в узкий угловой конус фрагментации. Наиболее ясная интерпретация обеспечивается для событий, которые не содержат следов и от фрагментов ядер мишени. Они образуются в случае минимальной передачи энергии фрагментирующему ядру. События такого типа из-за их вида называются «белыми» звездами (рис. 1.5 и рис. 1.6). Их доля от общего числа неупругих событий составляет несколько процентов. Название отражает не только внешний вид события, но и резкое уменьшение потерь на ионизацию (в предельном случае в Z раз) при переходе от следа первичного ядра к узкому конусу вторичных следов. Образование «белых» звезд происходит при дифракционном рассеянии на периферических нейтронах мишени.

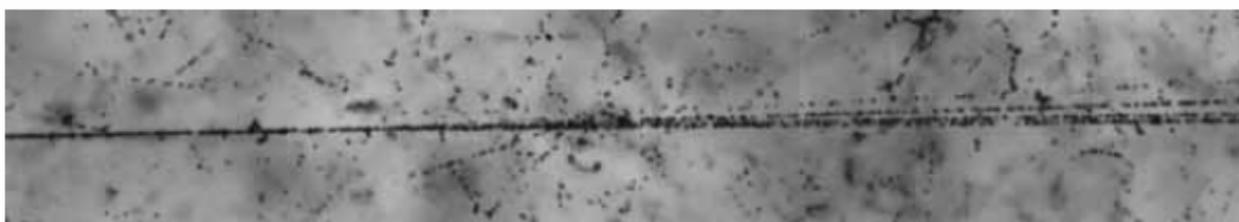


Рисунок 3.1 - Фотография события фрагментации ядра ^{14}N с энергией 2,1ГэВ/нуклон в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии. При смещении по направлению струи фрагментов можно различить один фрагмент Н и три фрагмента He. Трехмерный образ события реконструирован как плоская проекция с помощью автоматического микроскопа ФИАН комплекса ПАВИКОМ.

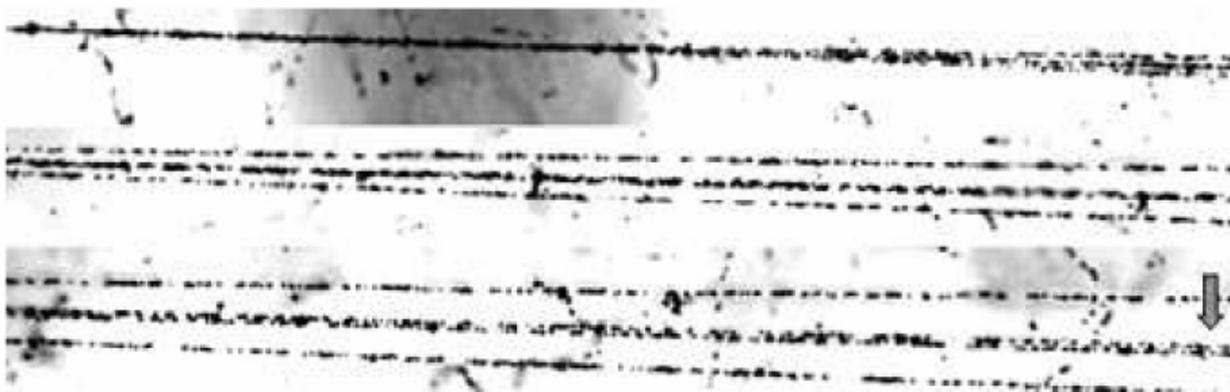


Рисунок 3.2 - Фотография события фрагментации ядра ^{16}O с энергией 4.5ГэВ/нуклон в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии на четыре α -частицы. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия и струя фрагментов в узком угловом конусе. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить два фрагмента He и очень узкую по углу пару фрагментов с $Z=2$, соответствующую распаду ядра ^8Be .

Важным практическим удобством при поиске событий такого типа является требование сохранения заряда, что позволяет исключить вклад в пучке от примеси более легких ядер с близким отношением заряда к массе. Это существенно при облучении эмульсии во вторичных пучках радиоактивных ядер, имеющих достаточно сложный состав. Описанные критерии отбора «белых» звезд совместно с условием сохранения потока энергии в конусе фрагментации могут быть использованы в будущем эксперименте по исследованию глобальных особенностей фрагментации тяжелых ядер в процессах периферической диссоциации.

3.3 Экспериментальный результат

В процессе просмотра пяти пластинок ядерной фотоэмульсии, облученных ядрами ^{56}Fe было найдено 83 события. Эти события можно классифицировать по виду взаимодействия на центральные и периферические. Центральные события – события полного расщепления. Когда в событии нет

треков π -мезонов (s -частиц), то говорят о периферических взаимодействиях ядер. В моей статистике 24 периферических события.

Далее эти 24 события можно подразделить на «большие» и «белые» звезды. Белые звезды – наиболее ценные для исследования события, так как при поиске событий такого типа налагается требование сохранения заряда, что позволяет исключить вклад от примеси в пучке более легких ядер с близким отношением заряда к массе.

Было обнаружено 6 белых звезд. Это составляет 7,4% от общего числа найденных событий.

4 Анализ экспериментальных данных и обсуждение результатов

Зарядовая топология фрагментов при периферических взаимодействиях легких ядер с начальной энергией выше 1ГэВ/нуклон может служить эффективной характеристикой явления мультифрагментации ядер. В этой области энергий достигается режим предельной фрагментации ядер, т. е. неизменность спектра фрагментов от энергии соударения и состава ядер мишени.

В данном исследовании треки вторичных заряженных частиц подразделялись согласно принятым в методе ядерных фотоэмульсий критериям на следующие типы: b-, g-, s-частицы (см. главу 2) и частицы с зарядами $Z > 2$, $Z = 2$ и $Z = 1$.

Анализ экспериментальных данных проводился по следующим пунктам. Во-первых, анализируются распределения сильноионизирующих ($h = b + g$) частиц, причем отдельно рассматриваются множественности b- и g-частиц. Проводится анализ корреляции распределений сильноионизирующих частиц для ядра ^{56}Fe и d, ^4He , ^{12}C , ^{22}Ne , ^{28}Si . Во-вторых, обсуждаются множественности одно- и двухзарядных фрагментов и рассматривается их ассоциированное образование. В-третьих, используется понятие «эффективный заряд» и анализируются распределения по эффективному заряду для одно- и двухзарядных частиц. Производится сравнение для этих распределений с распределениями для ядер ^{22}Ne и ^{28}Si . Завершает главу описание найденных «белых» звезд.

Наибольший интерес для исследования представляют так называемые «белые» звезды. «Белая» звезда - это условное название для взаимодействий, в которых отсутствуют фрагменты мишени и рожденные частицы. Они образуются в случае минимальной передачи энергии фрагментирующему ядру, при этом в ядре разрушаются межкластерные связи и, как правило, не затрагиваются внутри кластерные связи, из-за чего они представляют особый

интерес для изучения кластерной структуры ядер. Другой интересующий нас класс событий - одновременный развал обоих взаимодействующих ядер, в результате чего образуются осколки ядра-мишени. Фрагменты налетающего ядра в этих случаях вылетают, главным образом, в пределах узкого переднего конуса.

Далее приведен обзор экспериментальных наблюдений процессов мультифрагментации ядра ^{56}Fe , полученных с помощью ядерных фотоэмульсий. В настоящем исследовании используется совокупность неупругих взаимодействий ядра железа с ядрами фотоэмульсии, включающая 83 события.

4.1 Сильноионизирующие частицы

Органическая основа и светочувствительная компонента эмульсии имеют сложный химический состав. При этом практически значимыми по концентрации являются атомы Ag, Br, H, C, N, O. Сложный состав эмульсии является серьезным затруднением для идентификации типа ядра мишени при взаимодействии пучковых частиц. В связи с этим, всю совокупность наблюдаемых событий принято подразделять на:

- взаимодействия с тяжелыми (Ag, Br) ядрами со средними характеристиками $\langle A \rangle_{\text{Ag,Br}} = 94$ и $\langle Z \rangle_{\text{Ag,Br}} = 41$;
- взаимодействия с легкими (C, N, O) ядрами со средними характеристиками $\langle A \rangle_{\text{C,N,O}} = 14$ и $\langle Z \rangle_{\text{C,N,O}} = 7$;
- взаимодействия с ядрами водорода (H) с характеристиками $\langle A \rangle_{\text{H}} = 1$ и $\langle Z \rangle_{\text{H}} = 1$;

их разделение проводится по общепринятым критериям [24,25].

По количеству треков сильно ионизирующих частиц ($n_h = n_b + n_g$) можно предположить с каким ядром эмульсии столкнулось налетающее ядро ^{56}Fe (рис.4.1). В моем случае получилось, что железо в основном (49%)

проваимодействовало с тяжелыми ядрами Ag и Br, что является в принципе естественным, если учитывать сечения этих ядер. В 28% случаев ядро железа фрагментировало на ядрах C, N, O. И в 23% случаев с ядрами H.

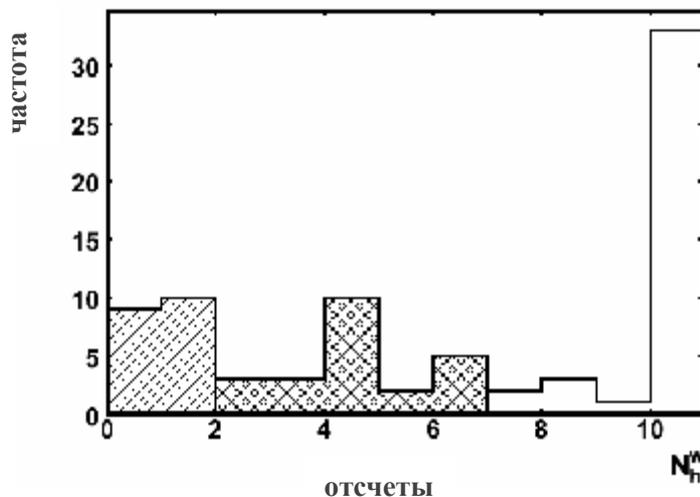


Рисунок 4.1 - Распределение по числу сильноионизирующих частиц в событиях взаимодействия ядер ^{56}Fe с энергией 1ГэВ/нуклон с ядрами эмульсии в диапазонах $0 \leq N_h^w \leq 1$, $2 \leq N_h^w \leq \text{C,N,O}$ и $N_h^w \geq 7$

4.2 Анализ множественности b- и g-частиц

Рассмотрим данные о множественностях «рожденных» релятивистских частиц и сильноионизирующих частиц – продуктов расщепления ядра-мишени.

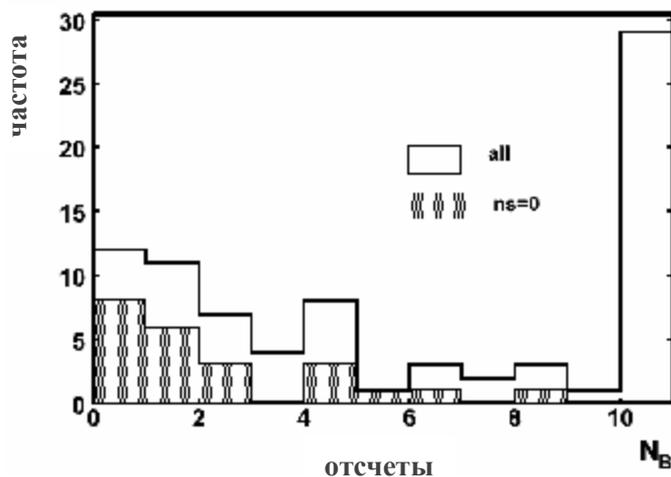


Рисунок 4.2 - Распределение событий взаимодействия ^{56}Fe с энергией 1ГэВ/нуклон в эмульсии по множественности образованных b-частиц

(фрагментов ядер эмульсии) без какого-либо отбора (верхняя гистограмма) и с отбором взаимодействий без релятивистских частиц в широком конусе (заштрихованная гистограмма)

Видно, что количество ν -частиц при периферических взаимодействиях резко сокращается. Это говорит о том, что вероятность распада ядра-мишени уменьшается. Особенно это заметно с уменьшением центральности, когда исчезает длинный столбец гистограммы, характеризующий центральные столкновения на тяжелых ядрах Ag, Br.

Кстати, интересно отметить, что с увеличением атомного веса налетающего ядра падает доля центральных взаимодействий [26].

На рис.4.3 используются те же обозначения. Распределение серых частиц. Если проанализировать множественность g -частиц, то обнаружим, что основная часть событий произошла на ядре-мишени водорода (когда вылетел один протон). Это возможно объясняется тем, что содержание водорода в эмульсии $3,19 \cdot 10^{22}$ атомов/см³ (самое большое среди всех атомов в эмульсии см. главу 1). События на водороде интересны тем, что атом водорода легкий и его след легко увидеть в эмульсии после столкновения. А остальные треки будут принадлежать ядру-снаряду (⁵⁶Fe). Следовательно, можно более точно проанализировать процесс фрагментации железа.

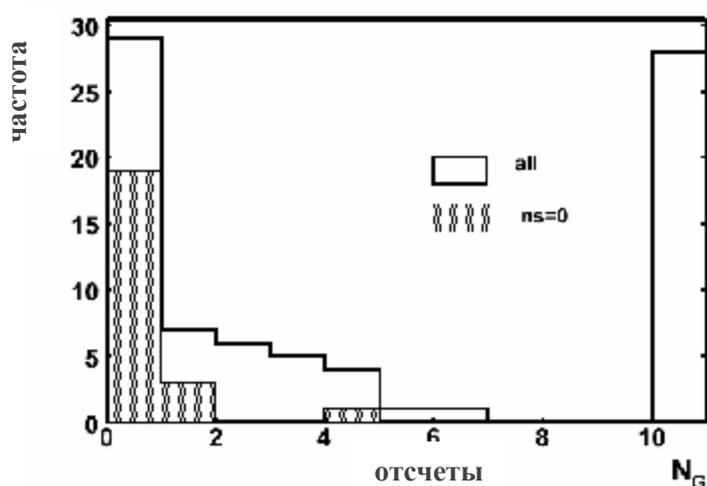


Рисунок 4.3 - Распределение событий взаимодействия ⁵⁶Fe с энергией 1ГэВ/нуклон в эмульсии по множественности образованных g -частиц

(фрагментов ядер эмульсии) без какого-либо отбора (верхняя гистограмма) и с отбором взаимодействий без релятивистских частиц в широком конусе (заштрихованная гистограмма)

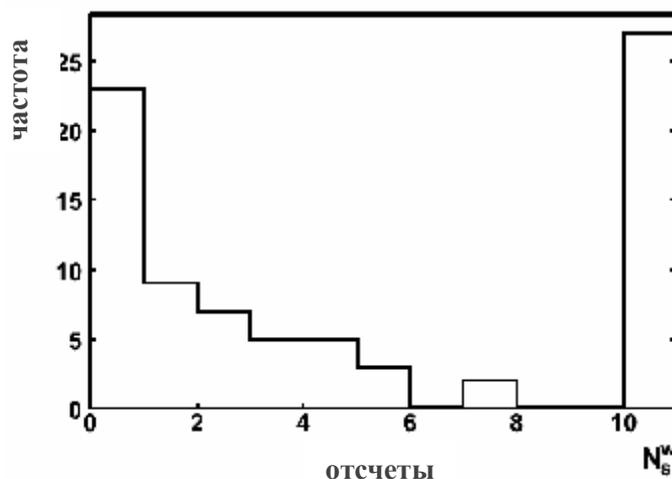


Рисунок 4.4 - Распределение событий взаимодействия ^{56}Fe с энергией 1ГэВ/нуклон в эмульсии по множественности рожденных s-частиц без какого-либо отбора

На рис.4.4. представлено распределение s-частиц. На отметке 10 очень много s-частиц. Такое их количество характеризует центральные столкновения, где энергии достаточно для рождения новых частиц (π -мезонов, парных протонов и т.д.).

4.3 Периферические взаимодействия

Перейдем к рассмотрению релятивистских фрагментов ядра-снаряда, вылетевших в узкий конус фрагментации. Возрастание степени фрагментации ядра проявляется в росте множественности фрагментов с зарядом $Z=1$ и $Z=2$ при уменьшении заряда основной невозбужденной части фрагментирующего ядра вплоть до полного разрушения ядра.

При исследовании частицы классифицировались следующим образом: частицы с зарядом $Z>2$, $Z=2$ и $Z=1$. Для исследования наиболее интересными

являются одно- и двухзарядные фрагменты, потому как они составляют так называемые ливни частиц при фрагментации ядра. Т.е. это наиболее мелкие ядра, на которые может распасться исходное ядро.

4.3.1 Множественность ядер гелия

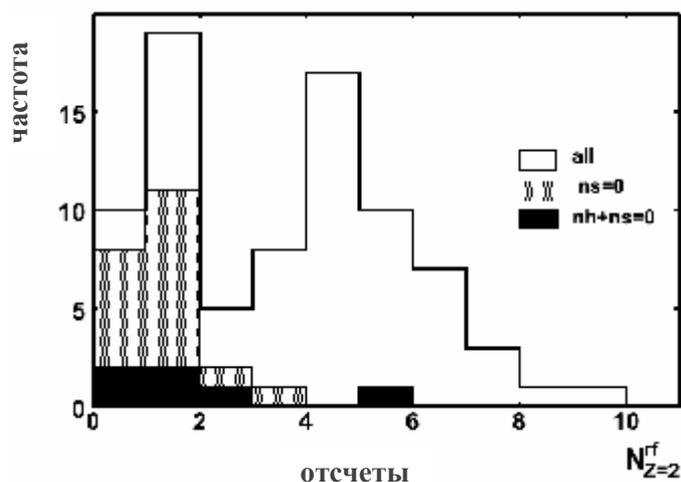


Рисунок 4.5 - Распределение событий взаимодействия ^{56}Fe с энергией 1ГэВ/нуклон в эмульсии по множественности образованных ядер гелия (фрагментов ядер эмульсии или железа) без какого-либо отбора (верхняя гистограмма), с отбором взаимодействий без релятивистских частиц в широком конусе (заштрихованная гистограмма) и без фрагментов ядра-мишени в широком конусе (черная гистограмма)

Наблюдается резкое уменьшение множественности при исключении релятивистских частиц. Это означает, что периферических столкновений было меньше, чем центральных. На гистограмме видны два пика. Первый - это явный максимум для одиночных фрагментов и второй пик для значения 4, т.е. когда вылетело 4 ядра гелия. Также из этой гистограммы следует, что количество «белых» звезд равняется 6.

4.3.2 Множественность однозарядных фрагментов

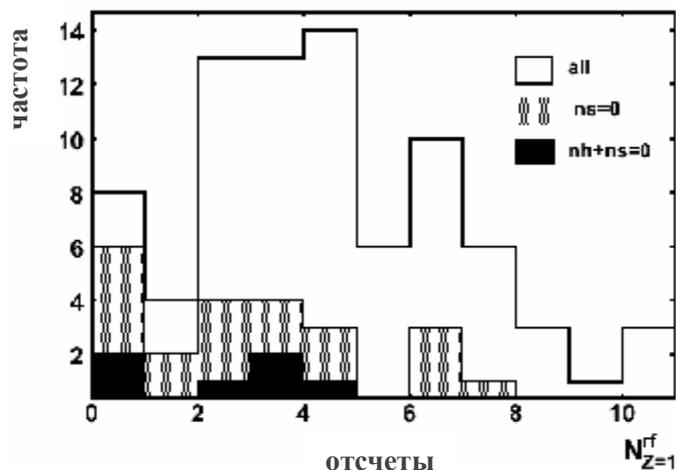


Рисунок 4.6 - Распределение событий взаимодействия ^{56}Fe с энергией 1ГэВ/нуклон в эмульсии по множественности образованных однозарядных частиц (фрагментов ядер эмульсии или железа) без какого-либо отбора (верхняя гистограмма), с отбором взаимодействий без релятивистских частиц в широком конусе (заштрихованная гистограмма) и без фрагментов ядра-мишени в широком конусе (черная гистограмма).

Также наблюдается резкое уменьшение множественности однозарядных треков при исключении релятивистских частиц. На гистограмме видны «белые» звезды (черные столбцы). Максимум распределения приходится на значение 4, т.е. на вылет одновременно четырех фрагментов с зарядом равным единице.

4.3.3 Ассоциированное образование одно- и двухзарядных ядер

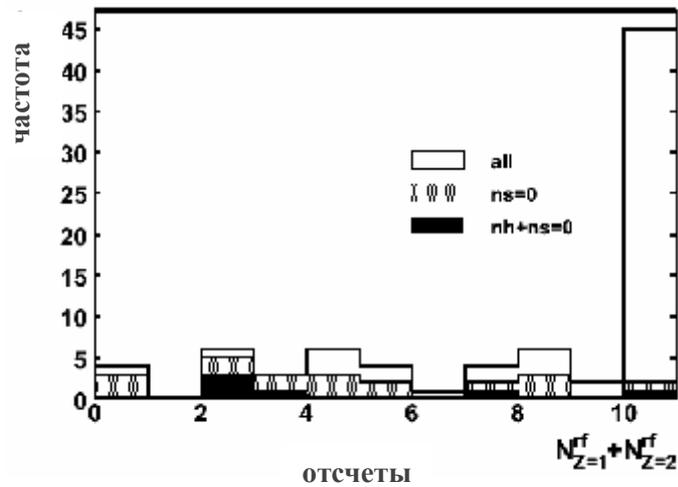


Рисунок 4.7 - Ассоциированное образование ядер с зарядом $z=1$ и $z=2$ при взаимодействии ядер ^{56}Fe с энергией 1ГэВ/нуклон в эмульсии без какого-либо отбора (верхняя гистограмма), с отбором взаимодействий без релятивистских частиц в широком конусе (заштрихованная гистограмма) и без фрагментов ядра-мишени в широком конусе (черная гистограмма)

4.4 Эффективный заряд. «Белые» звезды.

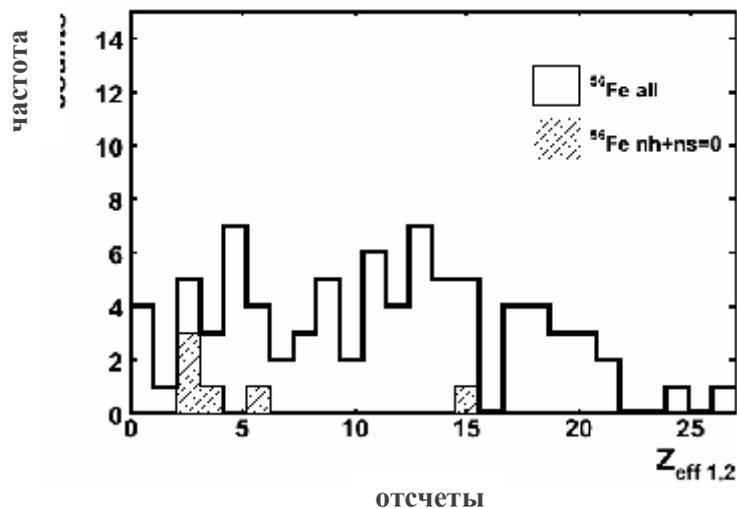


Рисунок 4.8 - Распределение событий взаимодействия ^{56}Fe с энергией 1ГэВ/нуклон в эмульсии по эффективному заряду одно- и двухзарядных частиц

(фрагментов ядер эмульсии или железа) без какого-либо отбора (верхняя гистограмма) и с отбором взаимодействий без релятивистских частиц в широком конусе (заштрихованная гистограмма)

На этой гистограмме видно, что в результате столкновения ядра железа с ядром эмульсии может произойти практически полное рассыпание этих ядер на одно- и двухзарядные фрагменты. Но такая статистика справедлива главным образом для центральных столкновений.

Здесь даже присутствует событие полного распада ядра железа на одно- и двухзарядные фрагменты.

К настоящему времени найдено одно событие распада ядра ^{56}Fe на пять ядер ^4He и четыре однозарядных ядра.

$$Z_{\text{eff}} = 1 \cdot n_{z=1} + 2 \cdot n_{z=2} \quad (4.1)$$

$$Z_{\text{eff}} = 14$$

Таблица 4.1 - Пример топологии распада ядра ^{56}Fe («Белые» звезды)

Номер звезды №	Узкий конус		
	Z > 2	Z = 2	Z = 1
1	3	5	4
2	1	0	3
3	1	2	3
4	1	0	2
5	1	1	0
6	1	1	0

Событие №1 сопровождается тремя осколками ядра-снаряда с зарядом больше 2 (табл.4.1).

События такого типа являются особенно интересными, так как ядро-снаряд распалось на большое число фрагментов. Образовался своего рода ливень из ядер.

В данном случае интересно то, что ядро железа предпочло разделиться на много фрагментов, хотя энергетически более выгодно поделиться пополам.

Для исследователей представляет особый интерес то, как именно фрагментирует ядро, на частицы с каким зарядом оно делится. Для легких ядер очевидной особенностью является отсутствие событий бинарного и тройного расщепления на фрагменты тяжелее α -частицы, что указывает на решающий вклад процесса мультифрагментации. Т.е. легкие ядра не любят делиться пополам. Вероятность расщепления легкого ядра на два равных фрагмента очень мала. Не обнаружено таких событий для железа. В то время как тяжелые ядра, например, Au и Pb [22] охотно делятся на два одинаково заряженных фрагмента.

Остальные «белые» звезды фрагментировали на одно и двухзарядные фрагменты с вылетом лишь одного тяжелого осколка ядра железа. Скорее всего произошла кулоновская диссоциация ядра. Произошло отщепление легких кластеров.

Интересным является сравнение распределения по эффективному заряду ядра железа с ядрами ^{28}Si и ^{22}Ne (рис. 4.9).

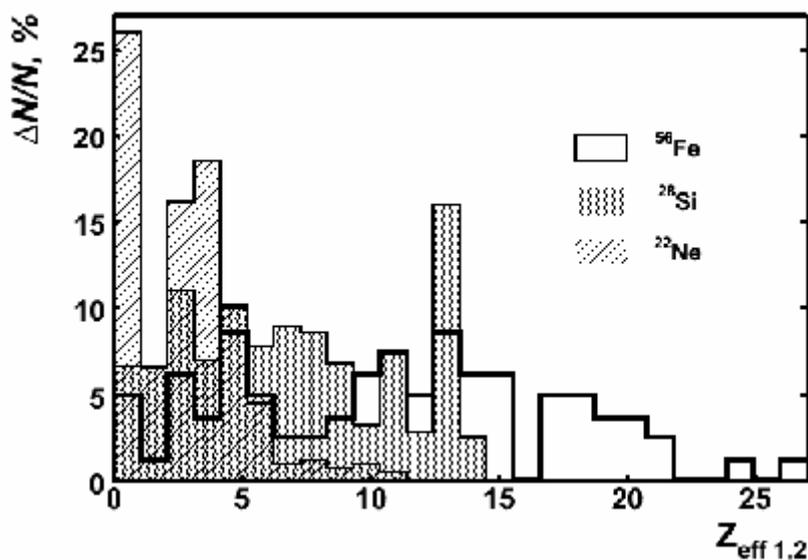


Рисунок 4.9 - Распределение событий взаимодействия ^{56}Fe с энергией 1ГэВ/нуклон в эмульсии по эффективному заряду сильноионизирующих частиц для ядер ^{56}Fe , ^{28}Si и ^{22}Ne с отбором взаимодействий $N_h^w=0-1$.

Как видно из гистограммы ядро железа имеет самый большой эффективный заряд, следом за ним идет кремний и потом неон. Эта картина является следствием значения заряда этих ядер.

Заключение

В работе для исследования множественной фрагментации ядер применен метод ядерных фотоэмульсий.

В работе дан обзор литературных данных по проблеме множественной фрагментации релятивистских ядер ^{56}Fe в эмульсии (обоснование актуальности работы и адекватности метода).

Для изучения фрагментации релятивистских ядер фотоэмульсия типа БР-2 была облучена на Нуклотроне ЛВЭ ОИЯИ ядрами ^{56}Fe с энергией пучка 1 ГэВ. Для систематичности анализа было просмотрено 5813,24 мм эмульсии. На этой длине было найдено 81 неупругое взаимодействие ядер ^{56}Fe с ядрами элементов, входящих в состав эмульсии. Средний свободный пробег ядра ^{56}Fe в фотоэмульсии составляет $\lambda_{\text{exp}} = 7,10 \pm 0,79$ см. Такая средняя длина находится в согласии с известной зависимостью, которая предполагает геометрический характер перекрытия ядер.

Проанализирован характер зарядовых состояний при фрагментации ядер эмульсии. На проанализированной статистике сделаны следующие выводы:

- Из анализа гистограммы для сильноионизирующих частиц следует, что железо в основном (49%) провзаимодействовало с тяжелыми ядрами Ag и Br, и это является естественным, если учитывать сечения этих ядер. В 28% случаев ядро железа фрагментировало на ядрах C, N, O. И в 23% случаев с ядрами H.

- Для ν - и g -частиц наблюдается резкое уменьшение множественности фрагментов при отсутствии релятивистских частиц.

- Доминируют процессы с отделением одиночных фрагментов протекающие при минимальных энергиях возбуждения. Возрастание степени фрагментации ядер проявляется в росте множественности фрагментов с зарядом 1 и 2 при уменьшении заряда основной невозбужденной части фрагментирующего ядра.
- Сравнение распределений по эффективному заряду для ^{28}Si , ^{22}Ne и ^{56}Fe позволяет сказать о том, что для одно- и двухзарядных фрагментов сохраняется очень похожий вид распределения.
- При сравнении множественности сильноионизирующих частиц для ядер ^{56}Fe и d , ^4He , ^{12}C , ^{22}Ne , ^{28}Si прослеживается корреляция этих распределений. Сделан вывод о том, что эти ядра имеют похожий характер фрагментации.

Внимание было сосредоточено на поиске периферических взаимодействий ядер железа с ядрами эмульсии. Была построена гистограмма по эффективному заряду ядер гелия и однозарядных частиц.

Особый интерес представляют найденные шесть событий, являющихся «белыми» звездами. Это составляет 7,4 %. Фрагменты ядра железа в этих событиях вылетели, главным образом, в пределах узкого переднего конуса, угол раствора которого для данного эксперимента равен $4^{\circ}2'$. Для всех событий рассмотрена топология мультифрагментации.

Периферических событий с расщеплением парных ядер железа в данной статистике найдено не было.

Среди найденных белых звезд выделяется одно событие с распадом на пять ядер гелия и четыре однозарядных фрагмента. События такого типа являются особенно интересными, так как ядро-снаряд распалось на большое число фрагментов. В данном случае интересно то, что ядро железа делится на

много фрагментов, хотя энергетически более выгодно разделиться пополам. Следовательно, очевидной особенностью фрагментации ядра железа, также как и легких ядер, является отсутствие фрагментации на два одинаковых осколка.

По результатам эксперимента построены гистограммы зарядовой топологии фрагментов ядра железа.

Таким образом, эмульсионным методом получена достаточно детальная и новая информация по фрагментации релятивистских ядер железа, которая полезна при планировании дальнейших исследований.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Зарубину П.И. за предложенную тему и постоянное руководство при выполнении настоящей работы.

Автор весьма благодарна к.ф.-м.н. Орловой Г.И. (ФИАН, коллаборация БЕККЕРЕЛЬ), Щедриной Т.В., Артеменкову Д.А. за помощь и консультации при обработке экспериментальных результатов.

В основе представленных результатов лежит кропотливый визуальный поиск и измерения, в которые особенный вклад внесла З.И. Гуммер студентка ТПУ. Марьин И.И. обеспечил обслуживание микроскопов. Проявка эмульсий была выполнена группой ЛВЭ ОИЯИ с высоким качеством.

Список использованных источников

1. Adamovich M.I. et.al. «Inelastic interactions of ^{12}C nuclei with emulsion nuclei at 50 GeV/c» JINR Communication E1-10838, Dubna, 1977.
2. Белага В.В. и др. //Ядерная физика. - 1995. - Т.58. - С. 2014.
3. Абдуразакова У.А., Бондаренко Р.А. Гулямов У.Г. //Ядерная физика. - 1984. - Т.39. - С.272.
4. Белага В.В. и др. //Ядерная физика. - 1995. - Т.58. - С.2014.
5. Белага В.В. и др. //Письма в ЖЭТФ. - 1995. - Т.62. - С.385.
6. Бондаренко А.И. и др. //Ядерная физика. - 1998. - Т.61. - С.263.
7. Adamovich M.I. et al. //Z.Phys. C. - 1992. - V.55. - P.235.
8. Андреева Н.П. и др. //Ядерная физика. 1996.Т.59.С.110.
9. Лепехин Ф.Г. и др.//Ядерная физика. - 1995. - Т.58. - С.881.
10. Lerekhin F.G. et. Al. //Eur.Phys. J.A. - 1998. - V.1. - P.137.
11. Адамович М.И. и др. //Ядерная физика. - 1999. - Т. 62. - С. 1461.
12. Adamovich M.I. et al. // Part. Nucl., Lett. - 2002. - V.110. - P.29;
nuclex/0206013.
13. Bradnova V. et al. //Few-Body Systems Suppl. - 2003. - V.14. - P.241.
14. Браднова В. И др. //Ядерная физика. - 2003. - Т.66. - С. 1694.
15. Адамович М.И. и др. //Ядерная физика. - 2004. - Т.6. - С.533.
16. Богданов В.Г. и др.//Письма в ЖЭТФ. - 1986. - Т.44. - С.306.
17. Толстов К.Д. и др. Препринт ОИЯИ Р1-8313.Дубна, 1974.
18. Банник Б.П. и др. Сообщения ОИЯИ 31-84-532.Дубна, 1984.
19. Банник Б.П. и др. //Письма в ЖЭТФ. - 1984. - Т.39. - С.184.
20. Давыдова А.С. Теория атомного ядра. – М.: ГИЗ физ-мат. литературы, 1958. – 607с.
21. Андреева Н.П. Топология белых звезд в релятивистской фрагментации легких ядер Препринт ОИЯИ Р1-8313.Дубна, 1974.

22. Перфилов Н.А., Ложкин О.В., Остроумов В.И. Ядерные реакции под действием частиц высоких энергий, Изд-во Академии Наук СССР, 1962. - 252с.
23. Лепехин Ф.Г. Фрагментация релятивистских ядер С-Петербургский институт ядерной физики РАН.
24. Марин А. и др. //Ядерная физика. - 1980. - Т. 32. - С.1387.
25. Абдуразакова У.А., Бондаренко Р.А. //Ядерная физика. 1984. т.39 с. 272.
26. Амеева Б.У. //Ядерная Физика. – 1990. - Т.51. - вып. 4.
27. <http://www.becquerel.jinr.ru>