

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

РЕФЕРАТ

тема:

**Анализ и калибровка результатов облучения ядерной
эмульсии во вторичном пучке ядер ^{12}C на нуклотроне
ОИЯИ**

Выполнил:

Кривенков Д. О.

Научный руководитель:

Кандидат физико-математических наук

Зарубин П. И.

Дубна 2008

Содержание

Введение	3
Глава 1. Кластеризация в легких ядрах.....	5
§ 1.1. Типы кластеризации в легких ядрах	5
§ 1.2. Периферические взаимодействия.	9
Глава 2. Особенности применения методики ядерных эмульсий к исследованию периферической фрагментации релятивистских ядер ${}^9\text{C}$	11
§ 2.1. Облучение ядерных фотоэмульсий.....	11
§ 2.2. Получение профиля пучка.....	13
§ 2.3. Процедура сканирования эмульсий, облученных релятивистскими ядрами ${}^9\text{C}$ и классификация треков.....	16
Глава 3. Идентификация двухзарядных частиц вторичного пучка ядер ${}^9\text{C}$ в эмульсии.....	20
§ 3.1. Применение метода многократного кулоновского рассеяния для идентификации двухзарядных частиц во вторичном пучке ${}^9\text{C}$	20
§ 3.2. Распределение величины $r_{\text{вс}}$ для двухзарядных частиц вторичного пучка.....	23
§ 3.3. Разделение одно- и двухзарядных частиц по величине $r_{\text{вс}}$	26
§ 3.4. Перспективы исследования реакций диссоциации ядра ${}^9\text{C}$	27
Заключение	30
Литература	31

Введение

Настоящее исследование посвящено первичному анализу результатов облучения ядерной эмульсии в пучке ядер ${}^9\text{C}$ на Нуклотроне. Работа опирается на возможности нуклотрона ОИЯИ по формированию пучков легких релятивистских ядер, включая радиоактивные, а также на традиции использования методики ядерных эмульсий в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ имени В. И. Векслера и А. М. Балдина.

Приведенные далее экспериментальные данные получены в рамках исследовательской программы эмульсионного сотрудничества БЕККЕРЕЛЬ [1]. Физической тематикой исследований проекта БЕККЕРЕЛЬ является изучение кластерных степеней свободы в легких ядрах. Так, например, в работах [2],[23], приведены детальные описания особенностей периферической фрагментации некоторых легких ядер (${}^6,7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10,11}\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{22}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{32}\text{S}$) на ядрах фотоэмульсии. Использование ядерной эмульсии для изучения релятивистской фрагментации легких нейтронодефицитных ядер имеет особые преимущества благодаря возможности наблюдения заряженной компоненты канала фрагментации в конечном состоянии.

Во Введении обсуждается актуальность использования метода ядерных эмульсий для исследований периферических взаимодействий релятивистских ядер с ядрами входящими в состав эмульсии, приводится краткое описание представлений о физической картине взаимодействий ядер при периферической фрагментации. В первой главе дан обзор литературных данных, связанных с изучением кластеризации легких ядер и исследованием периферических взаимодействий. Вторая глава посвящена особенностям применения ядерных фотоэмульсий к исследованию периферической фрагментации ядер ${}^9\text{C}$. В третьей главе рассматривается описание методик идентификации частиц первичного пучка, приводятся результаты исследования.

Создание пучков стабильных и радиоактивных ядер на ускорителях высоких энергий открывает качественно новые возможности для изучения структурных особенностей атомных ядер и их возбужденных состояний (обзор перспектив в [3]). Среди всего разнообразия ядерных взаимодействий события периферической диссоциации несут уникальную по полноте информацию о возбужденных состояниях над порогами распадов на нуклоны. Возможно, что понимание динамики возбуждения и развала легких ядер может расширить основу и для создания картины множественной фрагментации в периферических столкновениях и более тяжелых ядер.

Описание периферических взаимодействий при фрагментации релятивистских ядер является весьма сложной задачей из-за возможного комбинированного действия различных физических механизмов. Эти механизмы включают в себя электромагнитные и ядерные дифракционные взаимодействия, а также, реакции срыва нуклонов (стриппинга) [4].

Обеспечивая рекордное пространственное разрешение, метод ядерной эмульсии решает проблемы детектирования релятивистских фрагментов и идентификации возбужденного состояния по вычислению суммарной инвариантной массы релятивистской струи фрагментов и позволяет весьма эффективно вести обзорные исследования на вновь формируемых пучках.

Особый интерес представляют события, в которых отсутствуют следы фрагментов ядер мишени и не наблюдаются заряженные мезоны. Они получили наименование «белых» звезд. Предположительно, данный тип событий соответствует фрагментации на ядрах Ag, Wг эмульсии.

Целью настоящего исследования является проверка настройки пучка на канал ${}^9\text{C}$. Для достижения цели решается задача идентификации двухзарядных частиц первичного пучка, обладающих такой же магнитной жесткостью, как и ядра ${}^9\text{C}$. Такими частицами в первичном пучке с $Z=2$ должны быть ядра ${}^3\text{He}$.

Глава 1. Кластеризация в легких ядрах

§ 1.1. Типы кластеризации в легких ядрах

Прогресс в исследованиях на пучках релятивистских ядер открывает новые подходы к решению актуальных проблем структуры ядра. Одной из таких проблем 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.

Кластеры. Естественными компонентами такой картины являются малонуклонные системы, не имеющие собственных возбужденных состояний. Прежде всего, это ядра ^4He и ^3He , а также дейтроны, тритоны, и, кроме того, парные состояния протонов и нейтронов (см. рис.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.

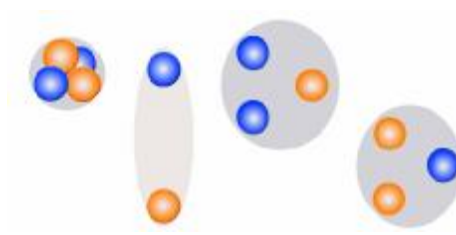


Рис. 1. Элементы кластерной структуры ядер: ^4He , дейтрон, тритон и ^3He

Характеристики событий в диссоциации легких ядер в периферических взаимодействиях были исследованы методом фотоэмульсии для ядер ^{12}C (3α) [5-10], ^{16}O (4α) [11,12], ^6Li ($\alpha+d$) [13-16] и ^{10}B ($2\alpha+d$) [17-19] 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. В этом отношении среди всего разнообразия ядерных взаимодействий особый интерес вызывает периферическая диссоциация легких ядер с энергией порядка 1 А ГэВ , как представляющая оптимум между сложностью измерения и глубиной интерпретации.

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. 2 представлено событие мультифрагментации ядра кремния с импульсом 4.5 А ГэВ/с . Основной интерес 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 3-мерного образа этой группы треков.

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

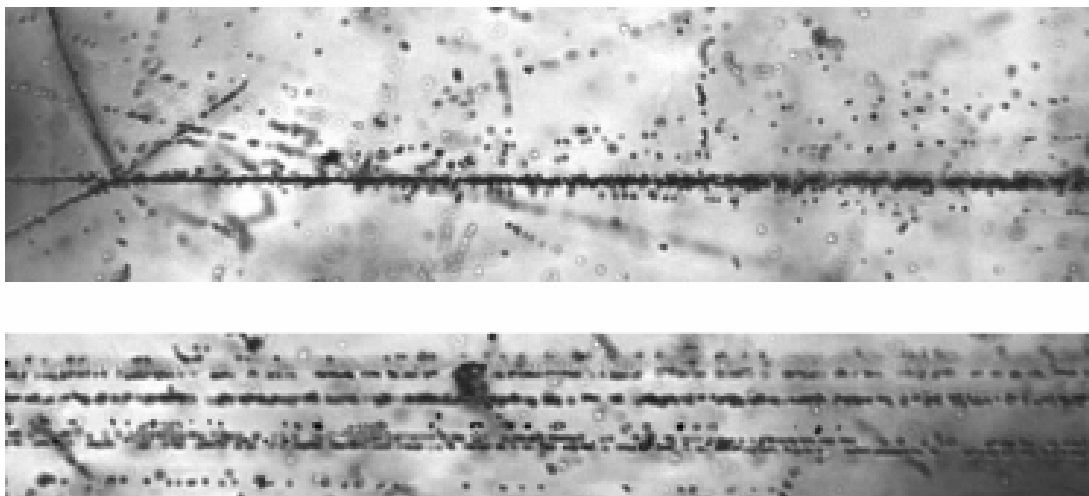


Рис. 2. Фотография события фрагментации ядра ^{28}Si с энергией 3.65 А ГэВ в периферическом взаимодействии в фотоэмульсии. На верхней фотографии видны: вершина взаимодействия, струя фрагментов ядра-снаряда в узком угловом конусе, четыре сопровождающие однозарядные частицы в широком конусе и фрагменты ядра мишени, вылетающие под большими углами. При смещении по направлению струи фрагментов ядра-снаряда (нижняя фотография) можно различить 3 фрагмента Н и 5 фрагментов He. Интенсивный след на нижней фотографии (с минимальным углом вылета) идентифицирован как очень узкая по углу пара фрагментов с $Z=2$, соответствующая распаду ядра ^8Be . Трехмерный образ события реконструирован как плоская проекция с помощью автоматического микроскопа ФИАН комплекса ПАВИКОМ.

Кластеризация с участием тритонов. В ядерной фотоэмульсии, облученной в пучке ядер ^7Li с импульсом 3.0 А ГэВ/с, найдено 1274 неупругих взаимодействия. Около 7% от всех неупругих взаимодействий ядер ^7Li составляют периферические взаимодействия (80 события), 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 ^7Li в виде кластеров α -частицы и тритона. Представляет интерес продолжить

поиск возможной роли тритонов как кластерных элементов в диссоциации ядер ^{11}B , ^{15}N и ^{19}F (рис. 3). Изучение «белых» звезд легких нечетно-четных стабильных ядер может дать основание для включения в общую картину и тритонов.

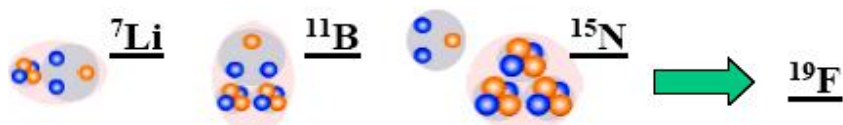


Рис. 3. Кластеризация в легких ядрах на основе α -частиц и тритонов.

Кластеризация с участием ^3He . Ядро ^3He является естественным элементом кластерной картины возбуждения легких ядер с дефицитом нейтронов, таких как ^6Be , ^7Be , ^8B , ^9C , ^{10}C , ^{11}C , ^{12}N , и более тяжелых (рис. 4).

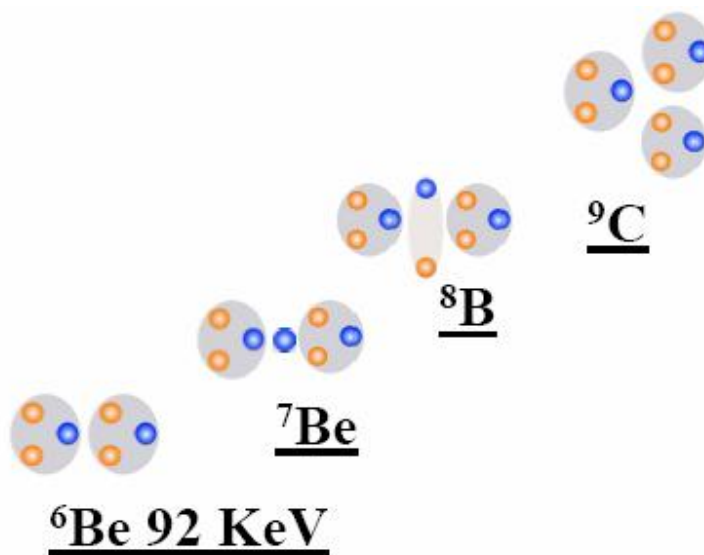


Рис. 4. ^3He кластеризация.

Если заменить α -частичные кластеры в ядрах ^8Be , ^9Be , ^{10}B , ^{12}C , ^{14}N на ^3He -кластеры, то можно получить аналогичные кластерные состояния. ^6Be 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 возбуждения $n-{}^6\text{Be}$ и ${}^3\text{He}-n-{}^3\text{He}$, в дополнение к состоянию $\alpha-{}^3\text{He}$. Представляет интерес выявить состояние ${}^3\text{He}-{}^3\text{He}-{}^3\text{He}$ в ядре ${}^9\text{C}$, $\alpha-{}^3\text{He}-{}^3\text{He}$ в ядре ${}^{10}\text{C}$ и $\alpha-\alpha-{}^3\text{He}$ в ядре ${}^{11}\text{C}$.

§ 1.2. Периферические взаимодействия

Среди всего разнообразия ядерных взаимодействий события периферической диссоциации несут уникальную по полноте информацию о возбужденных состояниях над порогами распадов на нуклоны.

Периферическая диссоциация инициируется в электромагнитных и дифракционных взаимодействиях, а также в реакциях срыва нуклонов. В наиболее периферических соударениях ядра взаимодействуют между собой по средствам электромагнитных полей ими же и создаваемых. С ростом энергии пучка кулоновским взаимодействием могут возбуждаться все более высоколежащие состояния, что ведет к новым каналам диссоциации ядер в добавление к возбуждениям с сохранением связи нуклонов. Такие исследования особенно хорошо подходят для вторичных (радиоактивных) пучков, в которых может быть изучено взаимодействие нестабильного ядра с квазиреальными фотонами ядра мишени.

Наблюдаемым результатом периферического столкновения является образование узкой струи, состоящей из ядерных фрагментов с суммарным зарядом равным начальному значению [4]. Ядро получает возбуждение в энергетическом диапазоне, перекрывающем пороги диссоциации в различные конфигурации фрагментов. Несмотря на релятивистскую скорость движения, относительные скорости фрагментов в струе нерелятивистские. В этом случае релятивистский масштаб энергии соударения не только не препятствует

исследованиям ядерных взаимодействий вплоть до масштабов энергии характерных для ядерной астрофизики, но, напротив, дает особые методические преимущества. Главным из них является принципиальная возможность наблюдения и исследования многочастичных ансамблей, состоящих из фрагментов релятивистского ядра. Систематические представления о генерации таких ансамблей могут быть востребованы в непрямых подходах ядерной астрофизики, а также в сценариях нуклеосинтеза на основе многочастичного слияния.

Глава 2. Особенности применения методики ядерных эмульсий к исследованию периферической фрагментации релятивистских ядер ${}^9\text{C}$

Ядро ${}^9\text{C}$ имеет наибольшее отношение числа протонов к числу нейтронов. Это ядро имеет один дополнительный протон относительно ядра ${}^8\text{B}$. Энергия связи этого протона значительно больше энергии связи внешнего протона в ядре ${}^8\text{B}$ ($1.3 \text{ МэВ} > 0.14 \text{ МэВ}$). Это может быть проявлением взаимодействия двух протонов, аналогичного взаимодействию внешних нейтронов в ядре ${}^6\text{He}$. Следует отметить, что преимущества эмульсионной методики для изучения «белых звезд» проявляются тем полнее, чем больше отношение Z/N в исследуемом ядре, благодаря более полной наблюдаемости нуклонов от фрагментирующего ядра.

§ 2.1. Облучение ядерных фотоэмульсий

Ядерные фотоэмульсии один из первых экспериментальных методов в физике высоких энергий активно применяющийся и в настоящее время [21]. Заряженная частица, проходя через фотоэмульсию, активирует на своем пути кристаллы галоида серебра и делает их способными к проявлению. После специальной обработки эмульсионных слоев в них появляются следы частиц в виде цепочки проявленных зерен, хорошо различаемых под микроскопом. Ядерные фотоэмульсии используются для регистрации и анализа следов заряженных частиц в широком диапазоне энергий [22]. По измерениям характеристик этих следов можно идентифицировать частицу и определить ее кинематические характеристики. Применение методов идентификации к задаче исследования будет рассмотрено подробно. Время чувствительности ядерных

эмульсий 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 мкм) эмульсии с успехом применяются для определения углов разлета частиц и ядер, образующихся в результате ядерных взаимодействий. Метод ядерных эмульсий обеспечивает рекордную точность измерения малых углов - до 10^{-4} рад [23]. Используя методику ядерных эмульсий можно изучать частицы с малым временем жизни (10-10 сек. и меньше), когерентное рождение мезонов во взаимодействиях частиц с ядрами, измерять сечения фрагментации и т.д. [22]. При проведении экспериментов на ускорителях эмульсионная методика не требует больших затрат времени работы ускорителя, которое определяется в основном характеристиками пучка используемого для облучения, и особенностями исследуемых явлений. Кроме многочисленных достоинств метода отмечается и ряд недостатков. Сложность состава вещества фотоэмульсии [22] не позволяет однозначно ответить на вопрос, с каким ядром произошло взаимодействие налетающей частицы. Данное затруднение устраняется введением дополнительных химических элементов в состав эмульсии и использованием критериев отбора обрабатываемых событий. Существенным недостатком является невысокая скорость обработки облученных эмульсионных стопок и, как следствие, необходимость длительного времени для набора статистики. Как правило, это компенсируется получаемым результатом. В последнее время методика ядерных эмульсий широко используется как трековый детектор совместно с электронными методами детектирования событий.

Примером может служить эксперимент по изучению нейтринных осцилляций OPERA [24, 25]. В работе использовались толстослойные ядерные фотоэмульсии ГОСНИИХИМФОТОПРОЕКТ БР-2.

§ 2.2. Получение профиля пучка

В настоящее время, фотоэмульсионной группой обрабатывается 19 пластинок, облученных в пучке ядер ${}^9\text{C}$ с небольшой примесью ядер ${}^8\text{B}$. Одним из результатов анализа является полученное распределение профиля пучка для ядер с различным зарядом (рис. 5 - 8). Для построения профиля пучка область просмотра была выбрана следующим образом. От левого края пластинки отступили 14 мм (или 14 квадратов); от правого края пластинки не просмотрено 10 мм (или 10 квадратов). Между этими краевыми областями фиксировались все входящие в эмульсионную пластину следы частиц. Наблюдается доминирование следов ядер He. Профиль отражает влияние магнитного поля последнего отклоняющего магнита.

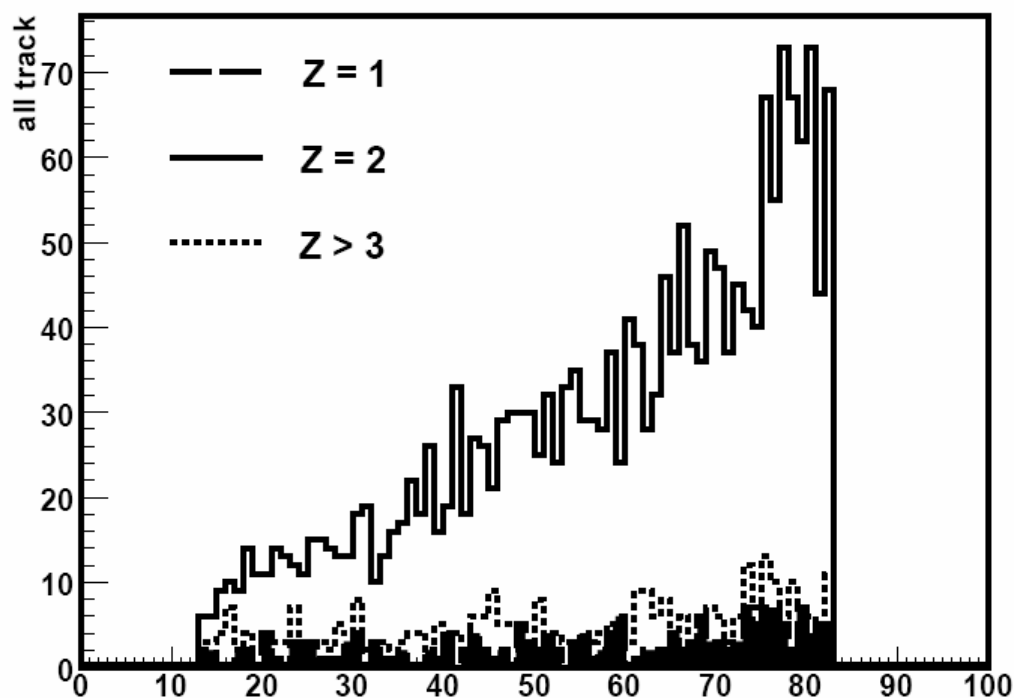


Рис. 5. Горизонтальный профиль вторичного пучка на входе в эмульсионную стопку при настройке на отношение $Z_{pr}/A_{pr} = 2/3$. Представлены распределения для частиц с $Z_{pr} = 2$, $Z_{pr} = 1$ и $Z_{pr} > 2$. По оси абсцисс указаны номера ячеек соответствующие шагу разбиения 1 мм.

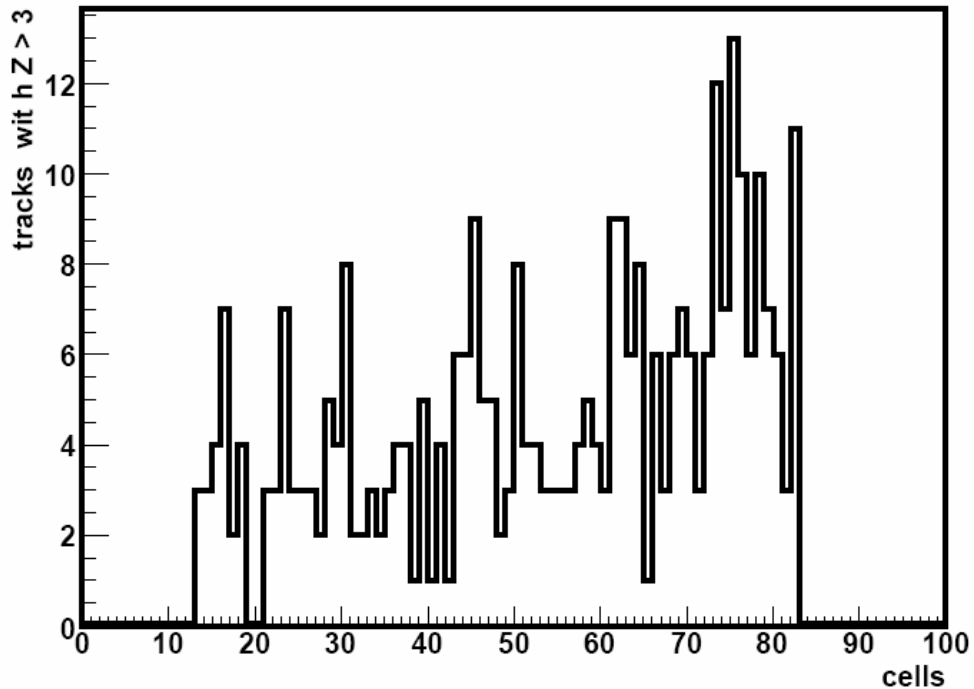


Рис. 6. Горизонтальный профиль вторичного пучка на входе в эмульсионную стопку при настройке на отношение $Z_{pr}/A_{pr} = 2/3$. Представлены распределения для частиц с $Z_{pr} > 2$. По оси абсцисс указаны номера ячеек соответствующие шагу разбиения 1 мм.

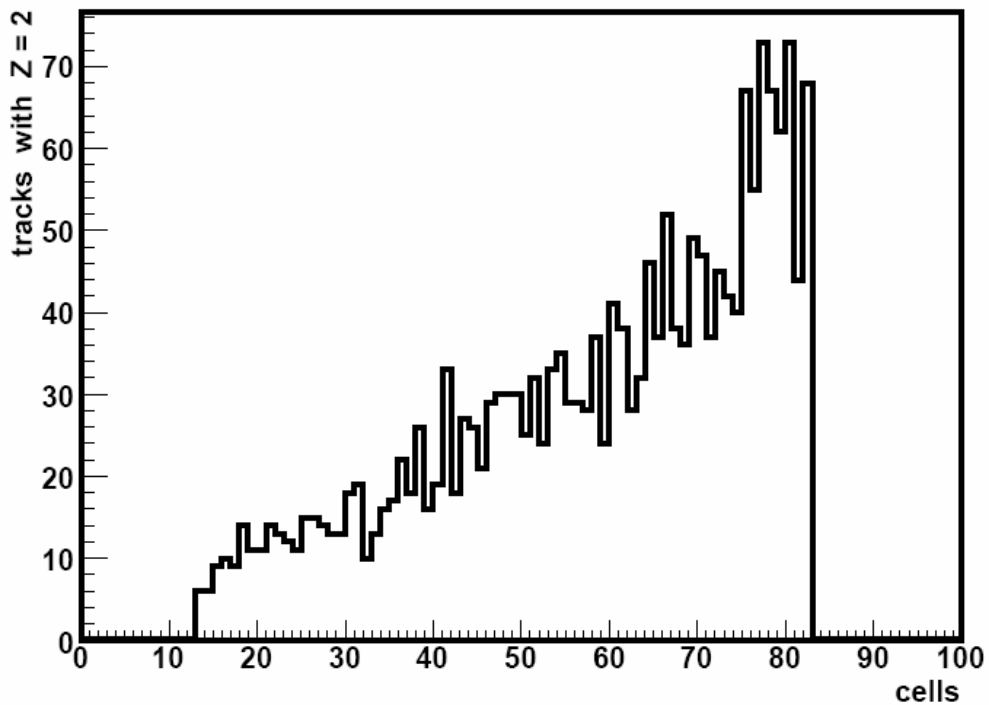


Рис. 7. Горизонтальный профиль вторичного пучка на входе в эмульсионную стопку при настройке на отношение $Z_{pr}/A_{pr} = 2/3$. Представлены распределения для частиц с $Z_{pr} = 2$. По оси абсцисс указаны номера ячеек соответствующие шагу разбиения 1 мм.

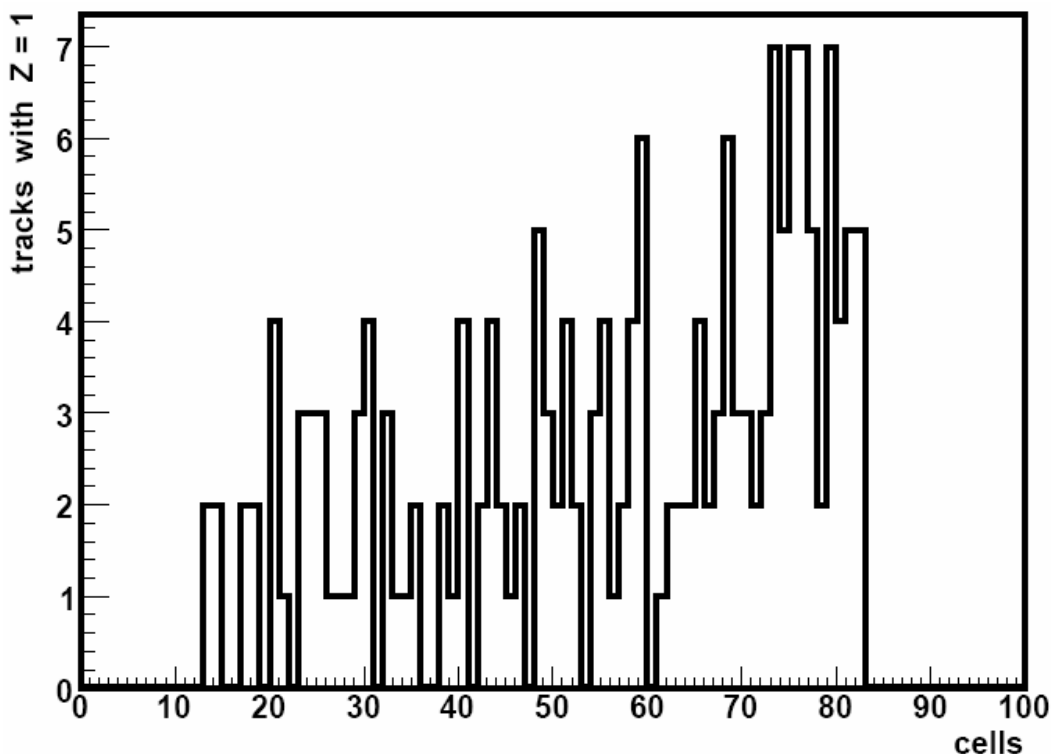


Рис. 8. Горизонтальный профиль вторичного пучка на входе в эмульсионную стопку при настройке на отношение $Z_{pr}/A_{pr} = 2/3$. Представлены распределения для частиц с $Z_{pr} = 2$. По оси абсцисс указаны номера ячеек соответствующие шагу разбиения 1 мм.

Приведем в качестве примера данные по отдельным пластинам. В пластине № 7 было зафиксировано 103 следа частиц с зарядом $Z = 1$, 2235 следов частиц с зарядом $Z = 2$, 338 следов частиц с зарядом $Z > 3$; в № 9 - 194 следа частиц с зарядом $Z = 1$, 2210 следов частиц с зарядом $Z = 2$, 340 следов частиц с зарядом $Z > 3$; в № 11 - 173 следа частиц с зарядом $Z = 1$, 1966 следов частиц с зарядом $Z = 2$, 319 следов частиц с зарядом $Z > 3$.

Для получения пучка релятивистских ядер ${}^9\text{C}$ был использован процесс фрагментации ядер первичного пучка ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^9\text{C}$ в мишени из полиэтилена. На рис. 9. представлен спектр ядер вторичного пучка со сцинтилляционного монитора при настройке магнитного канала $3v$ на селекцию с $Z_{pr}/A_{pr} = 2/3$. Наблюдается значительные пики от ядер углерода и гелия. Так и должно быть в случае изотопов ${}^9\text{C}$ и ${}^3\text{He}$, обладающих одинаковыми значениями Z_{pr}/A_{pr} .

Остается открытым вопрос о возможной примеси ядер ^{10}C . Вклады изотопов бора, бериллия и лития с большей магнитной жесткостью, подавлены. Эти особенности спектра указывают на правильность настройки канала и хорошие перспективы идентификации наиболее периферических взаимодействий ^9C в эмульсии по характерным структурным особенностям этого ядра. Возможно, при этом удастся оценить вклад изотопа ^{10}C , картина периферической диссоциации должна сильно отличаться.

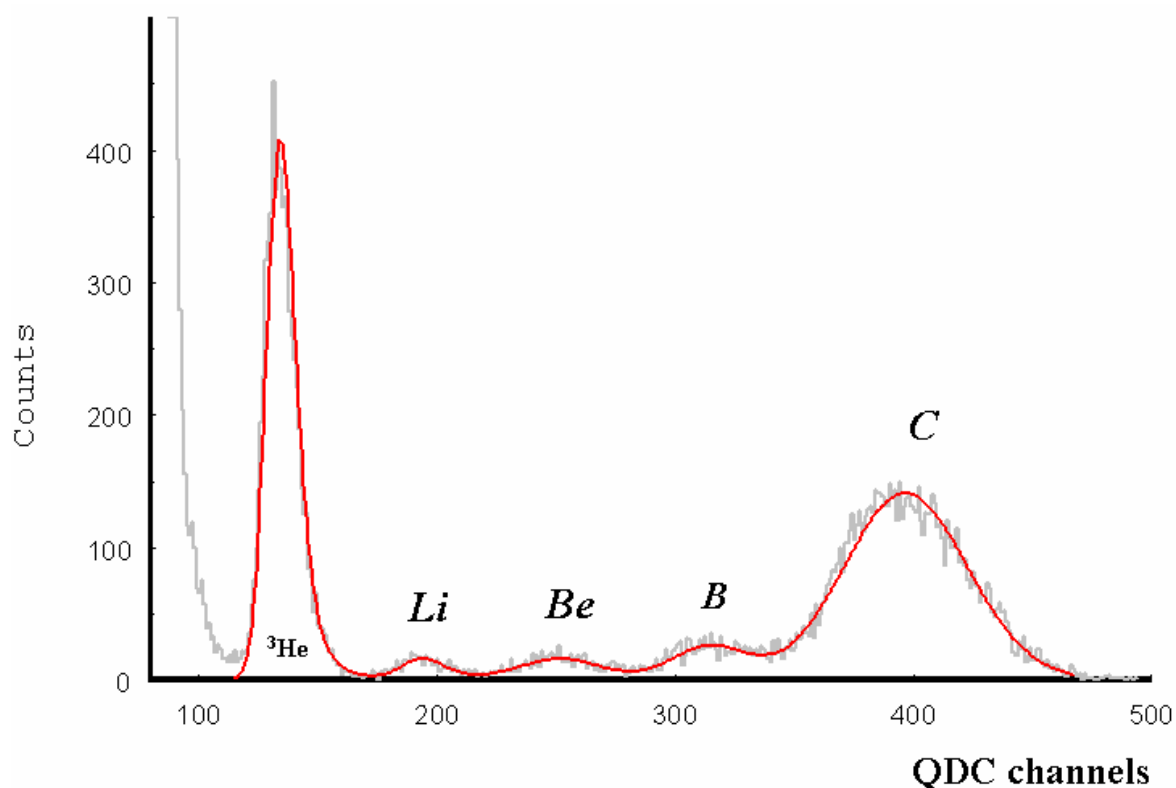


Рис. 9. Зарядовые спектры со сцинтиляционного монитора при формировании вторичного пучка с кратностью $Z_{pr}/A_{pr} = 2/3$ в реакции фрагментации $^{12}\text{C} \rightarrow ^9\text{C}$ на канале 3ν .

§ 2.3. Процедура сканирования эмульсий, облученных релятивистскими ядрами ^9C и классификация треков

В зависимости от задачи эксперимента, сканирование облученных ядерных эмульсий может осуществляться методами «по следу», «по площади»

или «по полоскам». Способ просмотра «по следу» реализуется в прослеживании пучковых треков исследуемых ядер от места входа в эмульсионный слой, до взаимодействия либо до места выходы трека из эмульсии. Просмотр «по следу» дает возможность зарегистрировать все типы взаимодействия без дискриминации, что позволяет определить длину свободного пробега для определенного типа взаимодействия с высокой точностью. Способ просмотра «по следу» значительно увеличивает время просмотра.

Суть метода просмотра «по площади» заключается в поиске событий из интересующих каналов реакций последовательно во всем объеме эмульсионного слоя. Объективы просмотровых микроскопов обеспечивают относительно узкое поле зрения, поэтому просмотр «по площади» эффективен при использовании объективов с невысоким увеличением ($\times 10$), при поиске событий с большой множественностью образующихся треков.

Этот метод позволяет существенно увеличить статистику интересующих событий, т.к. при нем регистрируются события не только от пучковых треков, вошедших в эмульсионный слой с его торца, но и появившихся в любом месте из соседних слоев.

Более быстрый набор статистики (по сравнению с просмотром «по следу») дает так же метод просмотра «по полоскам». Процедура поиска «по полоскам» отличается от просмотра «по площади» тем, что просмотр осуществляется в определенных частях эмульсионного слоя отстоящих друг от друга на некотором расстоянии (шаге) так, что сканированные области напоминают полосы. Ширина шага подбирается в зависимости от условий облучения (тип ядра, энергия) и исследуемого процесса. Поиск событий данным методом опирается на особенности в расположении треков идущих от вершины взаимодействия. Взаимная конфигурация группы вторичных треков, сохраняющаяся на достаточно большом расстоянии от вершины взаимодействия

и наблюдаемая в соседних по отношению к вершине полях зрения, позволяет быстро находить взаимодействия исследуемых типов.

Длина вторичных треков должна быть много больше шага (ширины полосы). Метод обладает высокой надежностью и позволяет ускорить набор статистики для определенных каналов реакций. Существенными недостатками метода просмотра «по полоскам» являются трудности в определении значения величины свободного пробега до взаимодействия, а так же меньшая, по сравнению с методами просмотра «по следу» и «по площади», эффективность нахождения событий.

В данном исследовании треки вторичных заряженных частиц подразделялись согласно принятым в методе ядерных фотоэмульсий критериям на следующие типы:

1. **релятивистские** или ***s*-частицы** (ионизация $J < 1.4J_0$, где J_0 -ионизация на следах однозарядных релятивистских частиц) – это вновь рожденные частицы, в основном π -мезоны;

2. **серые** или ***g*-частицы** ($J \geq 1.4J_0$, остаточный пробег ≥ 3000 мкм) – это легкие фрагменты мишени, главным образом - протоны;

3. **черные** или ***b*-частицы** (остаточный пробег ≤ 3000 мкм.) – это более тяжелые фрагменты мишени;

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 частицы ($R_b \leq 3000$ мкм.). Из-за высокого пространственного разрешения фотоэмульсии регистрируются также ядра отдачи и *d*-электроны [20].

4. однозарядные фрагменты ядра-снаряда ($Z=1$);

5. двухзарядные фрагменты ядра-снаряда ($Z=2$) – частицы с ионизацией $J \approx 4J_0$, не изменяющейся на длине ≥ 2 см (эти частицы легко отличить от других фрагментов визуально), вылетают под небольшими углами θ с продолжением направления трека первичного ядра (θ – пространственный угол в лабораторная система);

6. многозарядные ($Z \geq 3$) фрагменты ядра-снаряда – частицы с ионизацией $J > 7J_0$, эти фрагменты разделялись по заряду с помощью методики подсчета d -электронов, и характеризуется небольшими пространственными углами $\theta \leq 3^\circ$, вылетая в направлении первичного трека.

Глава 3. Идентификация двухзарядных частиц вторичного пучка ядер ${}^9\text{C}$ в эмульсии

§ 3.1. Применение метода многократного кулоновского рассеяния для идентификации двухзарядных частиц во вторичном пучке ${}^9\text{C}$

Одной из задач исследования было определение величины $\rho\beta c$ методом многократного кулоновского рассеяния (ММКР). Многократными измерениями в ядерных эмульсиях установлено, что релятивистские фрагменты ядра-снаряда с $Z=1$ отделяются от фрагментов с $Z=2$ визуально, с высокой степенью точности (так как однократная ионизация для следов с $Z=1$ надежно отличается от четырехкратной ионизации для следов с $Z=2$). Вследствие чего группа частиц с $Z=1$ и $Z=2$ разделялась с точностью 99,9 %. Для разделения изотопов с одинаковым зарядом используется ММКР. Формула для определения этой величины:

$$Pbc = \frac{Z_f K t^{3/2}}{573D}$$

В ней Z_f – заряд фрагмента, βc – скорость частицы, K – постоянная рассеяния, t – длина ячейки, D – среднее отклонение частицы.

При прохождении заряженной частицы через материальную среду направление ее движения непрерывно изменяется вследствие большого числа малых отклонений, возникающих в результате кулоновского рассеяния атомными ядрами, расположенными вдоль траектории движения частицы.

Чтобы измерить рассеяние след выставляется приблизительно параллельно оси, совпадающей с направлением движения столика микроскопа так, чтобы при перемещении он не выходил из поля зрения. Через равные участки длины величиной t (которые обычно называют ячейками) измеряется

величина смещения следа по отношению к оси x (обозначим ее как S_i , называемая первой разностью):

$$S_i = y_i - y_{i+1}$$

Первые разности дают для заданной ячейки t наклоны хорд (см. рис.10), которые обусловлены различными шумами, зависящими как от микроскопа, так и от наблюдателя: шум отсчета, шум зерен, шум перефокусировки, шум столика, тепловой шум и т.д [22].

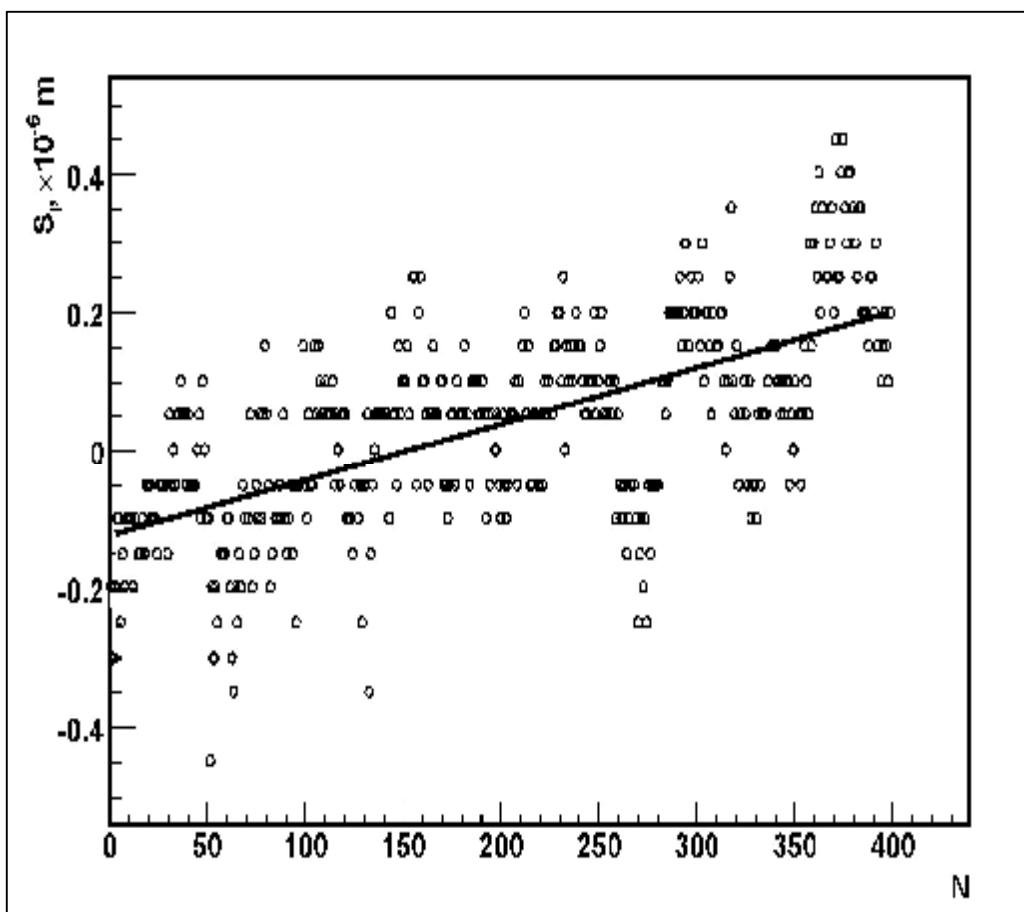


Рис. 10. Зависимость значений первых разностей от числа отсчетов. Измерения S_i сделаны с шагом 100 мкм. Прямая линия – аппроксимации методом наименьших квадратов.

При пересчете второй разности вклад шумов значительно уменьшается, следствием чего является отсутствие наклона прямой, при аппроксимации экспериментальных величин (рис. 11.).

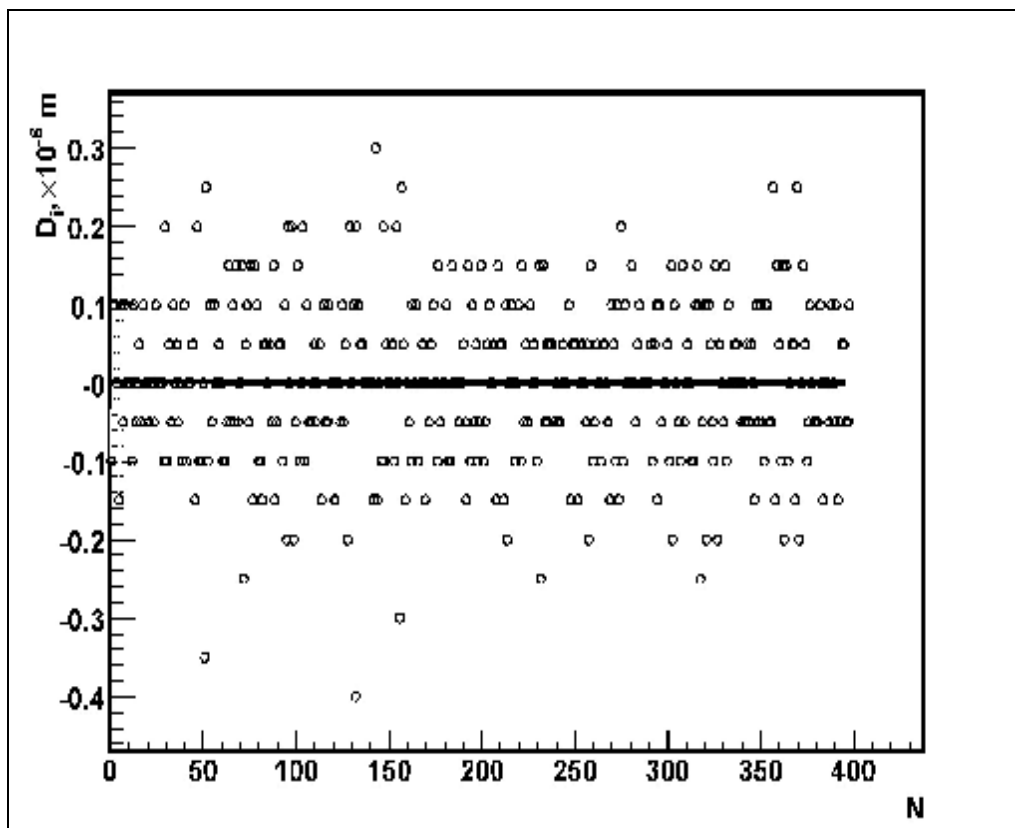


Рис. 11. Зависимость значений вторых разностей от числа отсчетов. Значения D_i определялись по первым разностям. Прямая линия – аппроксимации методом наименьших квадратов.

На рис. 12 представлено распределение величины $\rho_{\text{вс}}$ от размера ячейки t . Квадратным маркером обозначены величины $\rho_{\text{вс}}$ с поправкой на различные шумы, круглым – без соответствующей корректировки. Из рисунка легко видеть, что без учета соответствующих поправок, мы имеем несколько заниженные значения величины $\rho_{\text{вс}}$. При достаточной длине трека, начиная с некоторой ячейки t , величина $\rho_{\text{вс}}$ перестает увеличиваться и выходит на так называемое плато. Величина этого плато определяется средним импульсом исследуемого изотопа. В нашем эксперименте при $p_0 \approx 1,7$ ГэВ/с значение $\rho_{\text{вс}}$

для ${}^3\text{He} \approx 5$ ГэВ, что мы и видим на представленном рисунке. Значение $r\beta c$ выходит на плато в районе 5 ГэВ.

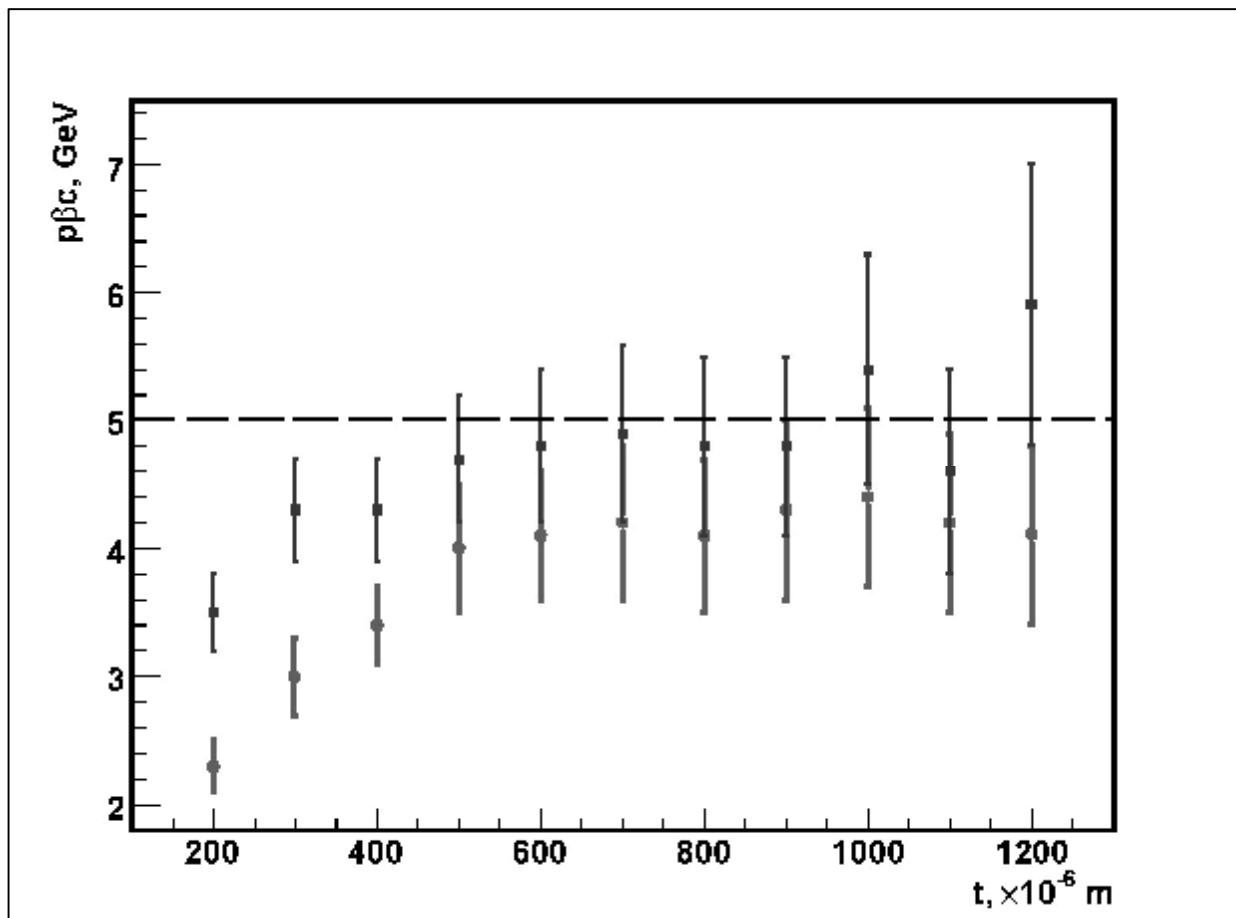


Рис.12. Распределение по величине $r\beta c$ для различных ячеек t .

§ 3.2. Распределение величины $r\beta c$ для двухзарядных частиц вторичного пучка

Чтобы с большей достоверностью идентифицировать частицу необходимо выбрать гистограмму с наиболее хорошим критерием достоверности χ^2 . Проанализировав параметры нормальных распределений на различных длинах ячеек t (рис. 13.), можно сделать вывод, что при данных условиях эксперимента рабочей является ячейка длиной 800 микрон (рис. 14.).

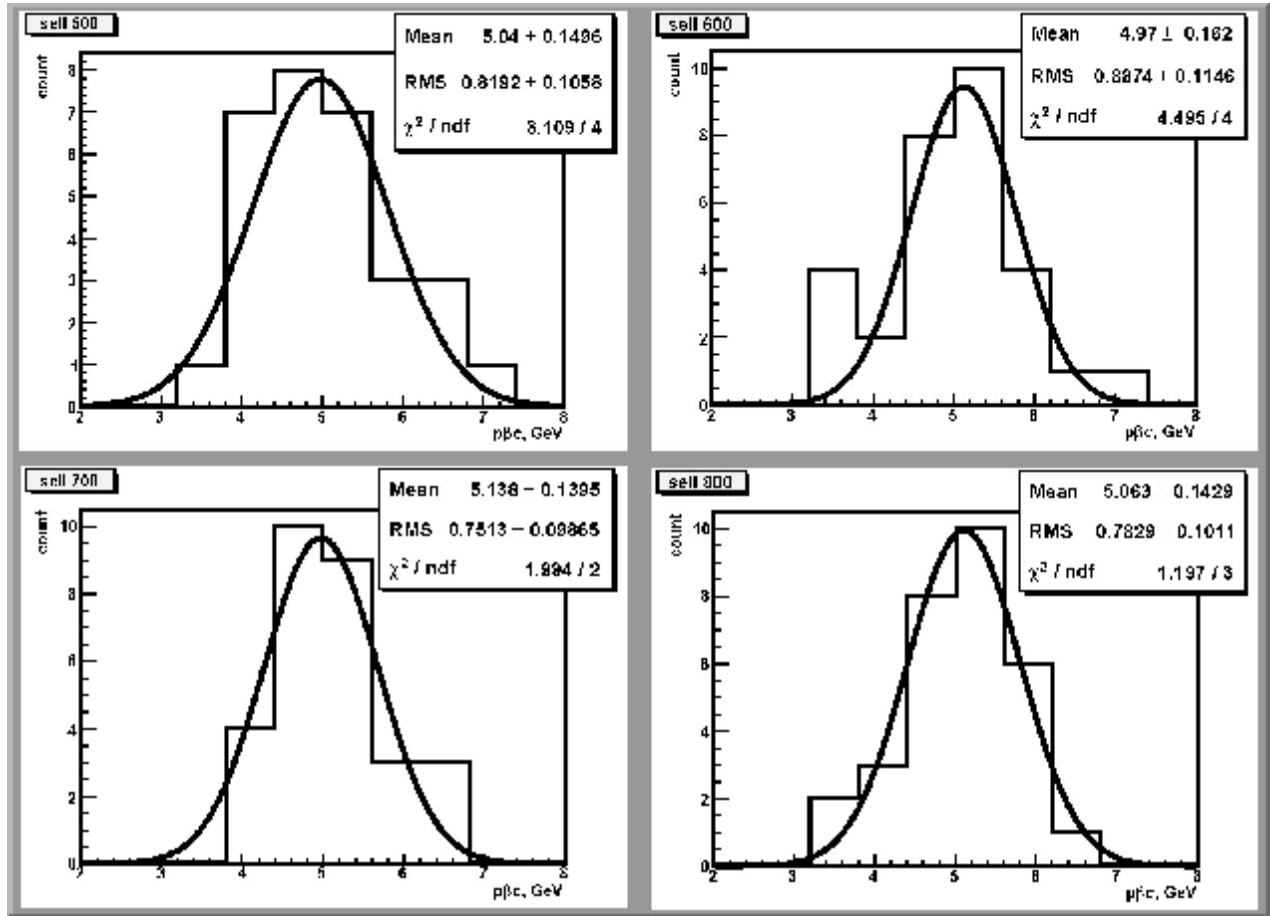


Рис. 13. Распределение величины $p\beta c$ на различных ячейках t .

Среднее значение величины $p\beta c$ при длине ячейки равной 800 мк равно 5.063 ГэВ. Как упоминалось ранее, в проведенном эксперименте $p_0 \approx 1,7$ ГэВ/с, что позволяет идентифицировать исследуемый изотоп как ядро с $Z = 2$ и $A = 3$, т.е. ${}^3\text{He}$.

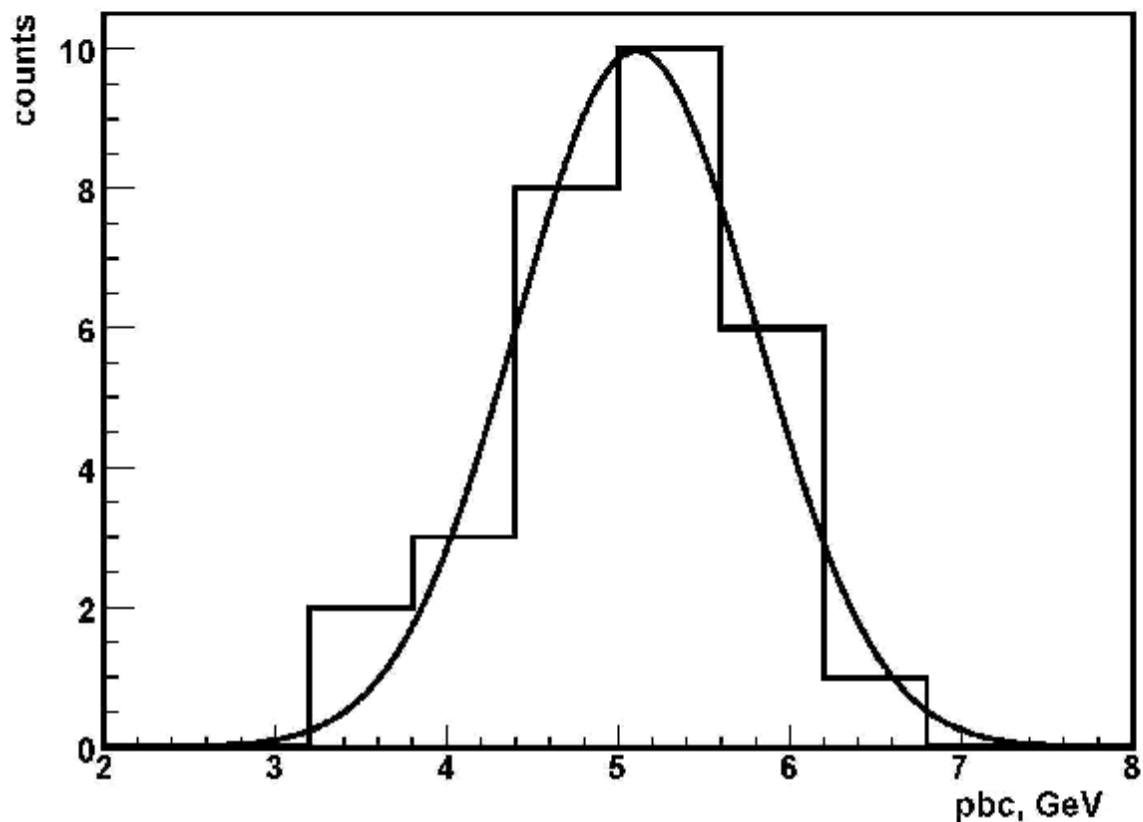


Рис. 14. Распределение двухзарядных фрагментов вторичного пучка ${}^9\text{C}$ по измеренным значениям $p\beta c$ (30 следов). Сплошная линия соответствует аппроксимации функцией Гаусса. Максимум аппроксимирующего распределений расположен при значении $p\beta c$, равном 5,1 ГэВ и соответствует изотопу ${}^3\text{He}$.

В каждой просмотренной пластинке из данной стопки эмульсий было обнаружено около 2000 следов таких частиц, что свидетельствует о качественной сепарации пучка для ядер с отношением заряда к атомной массе равным $2/3$. Кроме следов двухзарядных ядер, в каждой пластинке было зарегистрировано примерно 330 следов, оставленных частицами с зарядом $Z > 3$. Самым стабильным изотопом с $Z > 3$ и отношением заряда к массе равным $2/3$ является ${}^9\text{C}$. Таким образом, получаем, что многозарядные частицы вторичного

пучка были ядрами ^{12}C . Таким образом, была решена задача анализа и калибровки результатов облучения ядерной эмульсии ядрами ^{12}C .

§ 3.3. Разделение одно- и двухзарядных частиц по величине $p\beta c$

Заштрихованная часть гистограммы на рис. 15 соответствует нормированному на единицу распределению величины $p\beta c$ для двухзарядных частиц вторичного пучка ^{12}C . Максимум аппроксимирующей функции Гаусса для этого распределения расположен в области $p\beta c = (5,063 \pm 0,924)$ ГэВ.

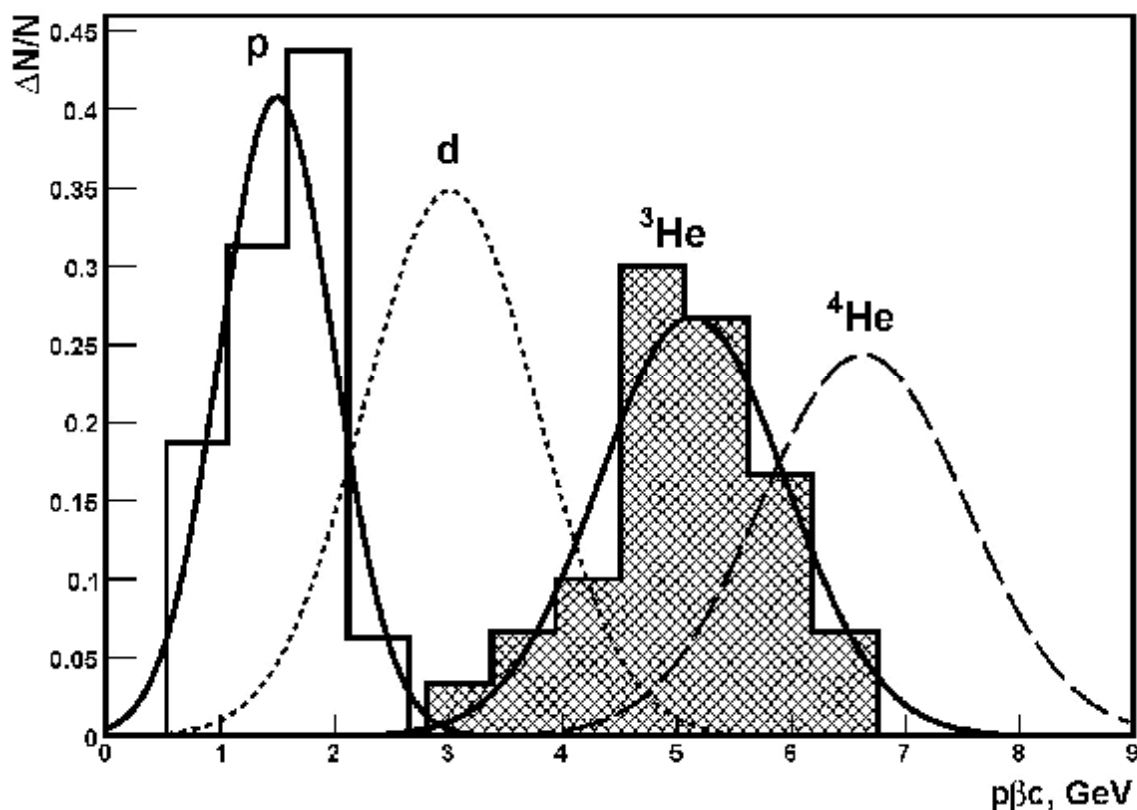


Рис. 15. Распределение одно- и двухзарядных частиц по измеренным значениям $p\beta c$. Линия, изображенная коротким пунктиром, соответствует предполагаемому распределению дейтронов. Максимум этой функции Гаусса равен 3,012 ГэВ. Линия, нарисованная широким пунктиром, соответствует предполагаемому распределению ядер ^4He . Максимум этой функции Гаусса равен 6.731 ГэВ.

Не заштрихованная часть гистограммы соответствует распределению величины $\rho_{\beta c}$ для протонов вторичного пучка ${}^9\text{C}$ в каналах фрагментации ${}^9\text{C} \rightarrow {}^8\text{B} + p$ и ${}^9\text{C} \rightarrow {}^7\text{Be} + 2p$. При идентификации однозарядных фрагментов вторичного пучка не обнаружено ни одного дейтрона, это отражено на гистограмме отсутствием пика в районе 3 ГэВ. Из рисунка видно, что однозарядные и двухзарядные фрагменты, идентифицированные ММКР разделяются с высокой надежностью. Исходя из данных о величине $\rho_{\beta c}$ для протонов и ${}^3\text{He}$ на ячейке $t = 800$ мк получено и приведено на рисунке коротким пунктиром предполагаемое распределение $\rho_{\beta c}$ для дейтронов и длинным пунктиром для α -частиц.

§ 3.4. Перспективы исследования реакций диссоциации ядра ${}^9\text{C}$

Несмотря на многолетний исследовательский интерес к картине периферической фрагментации релятивистских ядер, как способу расширения ядерно-физических исследований, эксперименты в этой области прогрессируют достаточно медленно, а эксклюзивные постановки просто отсутствуют по объективным причинам. Традиционная задача эмульсионного метода - на ограниченной статистике ядерных взаимодействий наметить основные контуры этой картины, которые могут сориентировать будущие эксперименты с высокой сложностью и разнообразием детекторов.

В перспективе исследования реакций диссоциации ядра ${}^9\text{C}$ ожидается проведение измерений зарядов вторичных треков-фрагментов с целью получения систематической картины распределения по зарядовым комбинациям фрагментов в найденных периферических взаимодействиях ядра ${}^9\text{C}$ с ядрами эмульсии. Проведение анализа зарядовой топологии каналов фрагментации. Выполнение работы по измерению углов треков фрагментов для получения распределения по поперечным импульсам в каналах фрагментации ${}^9\text{C} \rightarrow {}^8\text{B} + p$

и ${}^9\text{C} \rightarrow {}^7\text{Be} + 2p$. Угловые распределения фрагментов ядра-снаряда с разными зарядами вызывают значительный интерес, поскольку эти распределения и их характеристики (средние значения, стандарты и т.д.) чувствительными к выбору между различными теоретическими моделями. Анализ энергетических масштабов взаимодействий релятивистских ядер ${}^9\text{C}$ с ядрами эмульсии. Исследование сопровождения фрагментами мишени событий диссоциации ядер ${}^9\text{C}$, с целью статистического анализа вклада различных групп ядер эмульсии (N, CNO, AgBr) в наблюдаемые каналы фрагментации.

Метод ядерных эмульсий представляется наиболее адекватным к изучению множественной фрагментации релятивистских ядер вплоть до полного развала на однозарядные фрагменты (см. [26]). Отметим его ограничения при определении компонент 4-импульсов фрагментов. Во-первых, это ограниченная возможность определения величины пространственного импульса на нуклон фрагмента. Как правило, она предполагается равной с точностью несколько процентов значению для первичного ядра, что является вполне приемлемым приближением. Во-вторых, идентификация по массе возможна только для релятивистских изотопов водорода и с большими затруднениями для изотопов гелия. Поэтому за массу двухзарядных фрагментов принимается масса α частицы, что также является хорошим приближением при отборе фрагментов стабильных ядер в узком конусе фрагментации. Таким образом, благодаря рекордному пространственному разрешению метод ядерных эмульсий может дать уникальные сведения о характеристиках узких струй фрагментов с $Z=1,2$ с полной диссоциацией ядер. Интерес представляет получение соотношения вкладов каналов фрагментации ${}^9\text{C} \rightarrow {}^8\text{B} + p$ и ${}^9\text{C} \rightarrow {}^7\text{Be} + 2p$, при условии, что в свою очередь возможны конфигурации ${}^9\text{C} \rightarrow {}^8\text{B} + p \rightarrow {}^7\text{Be} + p + p$ и т.д. Указанные возможности необходимо учитывать при анализе угловых спектров образующихся фрагментов, чему могут способствовать ранее полученные результаты по фрагментации ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$ [27], полученных

сотрудничеством BECQUEREL. Не менее интересным, является возможность наблюдения канала фрагментации ${}^9\text{C} \rightarrow 3{}^3\text{He}$ имеющего порог порядка 16 МэВ. Однако для подобных исследований необходимо полная идентификация всех трех фрагментов He.

Заключение

В работе практически применен метод ядерных эмульсии для анализа предварительных результатов облучения ядерной эмульсии во вторичном пучке ядер ${}^9\text{C}$ на Нуклотроне ОИЯИ.

В процессе работы были освоены ключевые возможности этого метода в применении к исследованию релятивистской фрагментации:

- определение зарядов первичных и вторичных треков;
- измерение импульсов методом многократного кулоновского рассеяния;
- идентификация первичных следов от релятивистских ядер гелия.

В работе дан краткий обзор экспериментальных наблюдений процессов фрагментации легких релятивистских ядер полученных с помощью эмульсий и обоснована актуальность исследования ядер ${}^9\text{C}$.

Совокупность проанализированных данных указывает на то, что в использованной эмульсии доминируют пучковые следы именно ядер ${}^3\text{He}$ и ${}^9\text{C}$. Данный вывод основывается на измерении зарядов пучковых следов, зарядовой топологии наиболее периферических столкновений, измерении величины r_{FC} пучковых следов двухзарядных частиц, а также на идентификации релятивистских фрагментов ${}^1\text{H}$, ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$.

Получен профиль заполнения эмульсии пучковыми следами. Он отражает влияние последнего отклоняющего магнита канала формирования пучка.

Результаты настоящего исследования свидетельствуют, что задача формирования вторичного пучка ${}^9\text{C}$ на Нуклотроне ОИЯИ была решена успешно и в соответствии с требованиями эмульсионного метода. Таким образом, предстоящий физический анализ периферических взаимодействий ядер ${}^9\text{C}$ имеет необходимые предпосылки для успешной реализации.

Литература

- [1] Веб-сайт проекта БЕККЕРЕЛЬ <http://becquerel.jinr.ru/> или <http://becquerel.lhe.jinr.ru>.
- [2] Н. П. Андреева, ... Р. Станоева.... *Топология «белых» звезд в релятивистской фрагментации легких ядер ЯФ* 68 №3 484(2005); перевод на англ. яз. N. P. Andreeva et al., *Phys. At. Nucl.*, 68, 455 (2005); arXiv:nucl-ex/0605015v2
- [3] T. Aumann Reactions with fast radioactive beams of neutron-rich nuclei *Eur. J. Phys. A*26, 441(2005).
- [4] G. Baur, K. Hencken, A. Aste, D. Trautmann, and S. R. Klein *Multiphoton exchange processes in ultraperipheral relativistic heavy ion collisions* *Nucl. Phys. A*729, 787(2003); arXiv: nucl-th/0307031.
- [5] Adamovich M. I. et al. JINR Communication E1-10838, Dubna, 1977.
- [6] Марин А. и др.,// *Ядерная физика*. 1980. Т. 32. С. 1387.
- [7] Абдуразакова У. А., Бондаренко Р. А., Гулямов У. Г. , Чернов Г. М. // *Ядерная физика*. 1984. Т. 39. С. 272.
- [8] Белага В. В. и др.// *Ядерная физика*. 1995. Т. 58. С. 2014; Belaga V. V. et al // *Phys. At. Nucl.* 1995. V. 62. P. 1905.
- [9] Белага В. В. и др. // *Письма в ЖЭТФ*. 1995. Т. 62. С. 385; Belaga V. V. et al // *JETP Lett.* 1995. V. 47. P. 395.
- [10] Бондаренко А. И. и др.// *Ядерная физика*. 1998. Т. 61. С. 263; A. I. Bondarenko A. I. et al // *Phys. At. Nucl.* 1998. V. 61. P. 214.
- [11] Adamovich M. I. et al. // *Z. Phys. C*. 1992. V. 55. P. 235.
- [12] Андреева Н. П. и др. // *Ядерная физика*. 1996. Т. 59. С. 110; Andreeva N. P. et al. // *Phys. At. Nucl.* 1996. V. 59. P. 102.
- [13] Лепехин Ф. Г. и др. // *Ядерная физика*. 1995. Т. 58. С. 881; Lepikhin F. G. et al. // *Phys. At. Nucl.* 1995. V. 58. P. 816.
- [14] Lepikhin F. G. et al. // *Eur. Phys. J. A*. 1998. V. 1. P. 137.

- [15] Адамович М. И. и др. // Ядерная физика. 1999. Т. 62. С. 1461; Adamovich M. I. et al. // Phys. At. Nucl. 1999. V. 62. P. 1378.
- [16] Adamovich M. I. et al. // Part. Nucl., Lett. 2002. V. 110. P. 29; nucl-ex/0206013.
- [17] Bradnova V. et al. // Few-Body Systems Suppl. 2003. V. 14. P. 241.
- [18] Браднова В. и др. // Ядерная физика. 2003. Т. 66 С. 1694; Bradnova V. et al. // Phys. At. Nucl. 2003. V. 66. P. 1646.
- [19] Адамович М. И. и др. // Ядерная физика. 2004. Т.67. С. 533; Adamovich M. I. et al. // Phys. At. Nucl. 2004. V. 67. P. 514.
- [20] Адамович М. И. и др. // «Множественное рождение частиц при взаимодействии пионов и протонов с нуклонами и ядрами в области энергий 20-200 ГэВ» Труды ФИАН . Т.108. С. 65-149.
- [21] С. Пауэлл, П. Фаулер, Д. Перкинс «Исследование элементарных частиц фотографическим методом» Издательство иностранной литературы М. (1962).
- [22] В.Г. Воинов, И.Я. Часников «Множественное рассеяние частиц в ядерной фотоэмульсии», Издательство «Наука» Казахской ССР, Алма-Ата (1969).
- [23] D.A. Artemenkov 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.
- [24] V. Barger et al., «Neutrino oscillation parameters from MINOS, ICARUS, and OPERA combined» Phys. Rev. D 65 053016 (2002).
- [25] R. Acquafredda et al., «First events from CNGS neutrino beam detected in the OPERA experiment» New Journal of Physics 8 (2006).
- [26] V. Bradnova et al., Acta Physica Slovaca, 54, pp. 351-365.
- [27] R. Stanoeva et al. // Phys. At. Nucl. 2007. V. 70. P. 1216.