

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального  
образования

“ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ”

Факультет естественных наук и математики

Кафедра общей физики

Направление: физика

**Отчет**

по научно-исследовательской работе

**Изучение взаимодействий релятивистских ядер  ${}^9\text{Be}$  в ядерной  
фотографической эмульсии**

Выполнил студент гр. 13М230 \_\_\_\_\_ Корнегруца Н. К.

**Научный руководитель:**

Кандидат физико – математических

наук \_\_\_\_\_ Зарубин П. И. (г. Дубна, ОИЯИ)

**Проверил:**

Кандидат физико-математических

наук \_\_\_\_\_ Лидер А. М.

Томск 2008

## Содержание

Введение .....	3
Метод ядерных фотоэмульсий .....	5
Состав фотоэмульсии.....	5
Типы ядерных фотоэмульсий.....	6
Свойства фотоэмульсии как трекового детектора .....	7
Механизм образования следов .....	9
Кластеры.....	10
Класс событий типа «белая» звезда. ....	11
Ядро ${}^9\text{Be}$ как источник простейшей $\text{Na}$ системы .....	12
Процедура сканирования эмульсий облученных релятивистскими ядрами ${}^9\text{Be}$ .....	14
Измерение углов в эмульсиях облученных релятивистскими ядрами ${}^9\text{Be}$ .....	16
Средства анализа экспериментальных данных .....	19
Спектр парных углов и инвариантных масса двух альфа фрагментов .....	21
Заключение .....	24
Литература.....	25

## Введение

Одним из актуальных направлений исследования в области современной ядерной физики является изучение структурных особенностей легких ядер при высоких энергиях. Исследования такого уровня в лабораторных условиях стали возможны благодаря развитию новых технологий, в частности, появлению пучков легких релятивистских ядер. Проект Беккерель, реализуемый на Нуклотроне ОИЯИ, направлен на изучение коллективных степеней свободы в возбужденных ядрах, в которых отдельные группы нуклонов ведут себя как составляющие кластеры.

Цель научно-исследовательской работы состояла в получении экспериментальных данных о структурных особенностях релятивистских ядер  ${}^9\text{Be}$ , проявляющихся в периферических процессах при фрагментации на ядрах фотоэмульсии и сопровождающиеся образованием двух  $\alpha$ -частиц. Среди всего разнообразия ядерных взаимодействий периферические процессы позволяют получать уникальную по полноте информацию о возбужденных состояниях ядер над порогами распадов на нуклоны. В этом отношении особый интерес вызывают взаимодействия ядер с энергией выше 1 А ГэВ. Периферические взаимодействия отличает образование узких (по углу) струй фрагментов ядра-снаряда с суммарным зарядом и барионным числом близким к их значениям для первичного ядра. Несмотря на релятивистскую скорость движения, относительные скорости фрагментов в струе являются нерелятивистскими [1]. В таких взаимодействиях исследуемые ядра получают весьма малые значения энергии возбуждения вблизи энергетических порогов развала с образованием различных конфигураций ядерных фрагментов. Данные о генерации таких фрагментных ансамблей могут быть востребованы в непрямых подходах ядерной астрофизики, а также в сценариях нуклеосинтеза на основе многочастичного слияния. Важной особенностью исследуемых периферических процессов при фрагментации релятивистских ядер в эмульсии, является их нетривиальная природа, включающая электромагнитные и ядерные механизмы реакций. В дальнейшем, употребляя понятия «периферические процессы, фрагментация» будем подразумевать вышеописанный класс явлений, включающий ядерные и электромагнитные взаимодействия.

Возможность наблюдения и спектроскопии конечных состояний струй ядерных фрагментов в исследованиях фрагментации легких ядер при релятивистских энергиях определяется точностью угловых измерений. Благодаря наилучшему пространственному разрешению ( $\sim 0,5$  мкм), ядерная эмульсия может обеспечить угловое разрешение следов релятивистских фрагментов  $\sim 10^{-4} - 10^{-3}$  рад. Точность измерения импульсов при релятивистском подходе, в данном случае, не столь критична - достаточно предположить сохранение фрагментами первичного импульса на нуклон [2-4]. Данное допущение позволяет свести рассмотрение исследуемых процессов к анализу угловых распределений частиц-фрагментов первичного ядра. Рассмотрим подробнее применяемой фотоэмульсионной методики применительно к тематике исследования.

Для достижения поставленной цели, необходимо было решить следующие задачи:

1. освоение методики ядерных фотоэмульсий, применяемых в эксперименте;
2. поиск событий периферической фрагментации релятивистских ядер  ${}^9\text{Be}$ ;
3. проведение идентификационных и измерительных процедур для выделения канала  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  реакции фрагментации;
4. набор статистики угловых измерений.

## Метод ядерных фотоэмульсий

### Состав фотоэмульсии

Ядерные фотоэмульсии представляют собой высококонцентрированные и высокодисперсные эмульсии из бромистого серебра. Концентрация  $ArBr$ , который находится в форме микрокристаллов почти сферической формы. В качестве среды, в которой распределены микрокристаллы  $ArBr$ , 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 и другие. Удельная плотность всех эмульсий с нормальным составом находится в пределах 3,8 – 4,0 г/см<sup>3</sup>.

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.

Основными компонентами ядерной эмульсии является:

1. галоидное серебро – главным образом бромистым, обладающее плотностью 6,47 г/см<sup>3</sup>;
2. желатина и пластификатор (например, глицерин);
3. вода.

Галоидное серебро находится в эмульсии в виде микрокристаллов кубической или почти сферической формы. Желатина и пластификатор содержат такие элементы как: углерод, азот, кислород, водород и серу. Желатина представляет собой сложное вещество. Глицерин вводится в эмульсию в качестве пластифицирующего вещества. Он уменьшает хрупкость эмульсии и способствует появлению пластических деформаций при возникновении напряжения в слое.

## Типы ядерных фотоэмульсий

По своим фотографическим характеристикам все ядерные эмульсии разделяются на три основных типа:

1. Эмульсии низкой чувствительности, предназначенные для регистрации сильноионизирующих частиц с потерями энергии  $> 50$  кэВ на 1 мкм пробега.
2. Эмульсии средней чувствительности, способные регистрировать следы частиц с ионизацией  $> 2$  кэВ на 1 мкм пробега.
3. Эмульсии высокой чувствительности, регистрирующие следы частиц с минимальной ионизацией.

## **Свойства фотоэмульсии как трекового детектора**

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 $\pi$ -геометрии эксперимента, сравнительной легкости измерения зарядов фрагментов и возможности регистрации весьма малых возбуждений ядра мишени. Это важно для изучения корреляции между продуктами фрагментации снаряда и мишени.

Методика ядерных фотоэмульсий всегда обеспечивала обзорные наблюдения по физике микромира благодаря высокой достоверности наблюдаемых событий, прекрасному пространственному расширению и максимально полной наблюдаемости следов заряженных частиц. В ряде важных случаев она позволяет измерять импульсы, идентифицировать частицы. Поэтому именно она представляется эффективным способом изучать процессы 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.

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.



## Механизм образования следов

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 проявляются следы частиц в виде цепочки проявленных зерен, хорошо видных под микроскопом.

В процессе образования следов заряженных частиц в эмульсии решающую роль играет возникновение  $\delta$  – 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 выделяться 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 700 кэВ/мм. При равномерных потерях максимальное количество энергии, которое может быть поглощено зернами диаметром 0,3 $\mu$ , должно быть порядка 300 эВ. С другой стороны, пробег  $\delta$  – электрона с энергией меньше 5000 эВ оказывается настолько коротким, а его траектория настолько искривленной вследствие рассеивания, 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.

## 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 (рисунок 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.

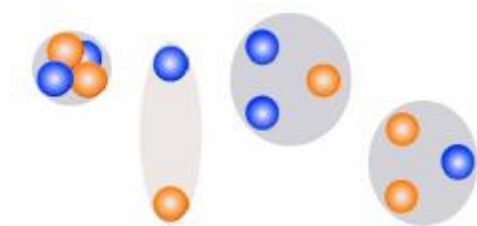


Рисунок 1 Кластерные структуры:  ${}^4\text{He}$ , дейтрон, тритон и  ${}^3\text{He}$ .

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.

### **Класс событий типа «белая» звезда.**

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. 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 электромагнитных взаимодействиях с виртуальными фотонами ядер мишени и при дифракционном рассеянии на периферических нейтронах мишени.

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.

## Ядро ${}^9\text{Be}$ как источник простейшей $2\alpha+n$ системы

Изотоп  ${}^9\text{Be}$  представляет огромный интерес для исследований в области кластерных степеней свободы в физике легких ядер. Отличаясь по составу нуклонов от  ${}^8\text{Be}$  на один нейтрон, ядро  ${}^9\text{Be}$  демонстрирует свойства слабосвязанной  $2\alpha+n$  системы. Энергетический порог развала  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha+n$  составляет 1,57 МэВ. Конфигурация  ${}^9\text{Be}$  в основном состоянии в оболочечной модели имеет вид  $(1s_{1/2})^4(1p_{3/2})^5$ . Спин и четность  $J^\pi$  ядра  ${}^9\text{Be}$   $-3/2^-$ .

Низкий порог отделения нейтрона для изотопа  ${}^9\text{Be}$  позволяет получить уникальную информацию о кластерной структуре ядра. В работах [5, 6] приводится сравнение теоретических описаний свойств изотопа  ${}^9\text{Be}$  на основе использования двухчастичной ( ${}^8\text{Be}+n$ ) и трехкластерной ( $\alpha+\alpha+n$ ) моделей. Опираясь на данные модельные описания, можно получить вклад различных состояний  $2\alpha+n$  системы в структуру  ${}^9\text{Be}$ , оценить среднее расстояние между  ${}^8\text{Be}$  и нейтроном, получить значения магнитного и электрического квадрупольного моментов. В двухчастичной ( $\text{core}+n$ ) модели [6-7] ядро  ${}^9\text{Be}$  может быть представлено в виде системы нейтрона в состоянии  $p_{3/2}$  и кора  ${}^8\text{Be}$  в состояниях  $0^+(\text{g.s.})$  и  $2^+$  с порогом отделения нейтрона 1,67 и 4,71 МэВ, соответственно. Отличительной особенностью модели является незначительный вклад  $4^+$  состояния  ${}^8\text{Be}$  [6]. Волновая функция  ${}^9\text{Be}$  в основном состоянии (1) может быть представлена в виде,

$$\frac{1}{2}{}^9\text{Be}(3/2^-)\tilde{n} = \omega_{0^+} \frac{1}{2} [{}^8\text{Be}(0^+) \ddot{A} n_{p(3/2)}]_{3/2^-} \tilde{n} + \omega_{2^+} \frac{1}{2} [{}^8\text{Be}(2^+) \ddot{A} n_{p(3/2)}]_{3/2^-} \tilde{n} \quad (1)$$

где  $\omega_{0^+}=0.535$  и  $\omega_{2^+}=0.465$  - весовые коэффициенты [5].

Интересным для проверки, является предположение о возможности наблюдения  ${}^8\text{Be}$  в состояниях  $0^+$  и  $2^+$ , при «мягком удалении» нейтрона из  $2\alpha+n$  системы  ${}^9\text{Be}$ . Образование изотопа  ${}^8\text{Be}$  в состояниях  $0^+$  и  $2^+$  может происходить в периферических процессах при фрагментации релятивистского ядра  ${}^9\text{Be}$  в  $2\alpha+n$

систему, наблюдаемую в конечном состоянии [4, 8]. Наряду с образованием не связанного  ${}^8\text{Be}$  существует возможность образования промежуточного ядра  ${}^5\text{He}$  [9, 10].

Соответствующий энергетический порог равен 2,44 МэВ. Продуктом диссоциации  ${}^5\text{He}+\alpha$  в конечном состоянии также будет являться  $2\alpha+n$  система [11]. Для высокоспиновых состояний  ${}^9\text{Be}$  ( $J \geq 7/2$ ) конфигурация  ${}^5\text{He}+\alpha$  в работе [12] отмечена как энергетически более выгодная. Однако, в работах [13-16] отмечается незначительный вклад канала  ${}^5\text{He}+\alpha$  в развал  ${}^9\text{Be}$ , при энергиях порядка сотен МэВ, по сравнению с каналом  ${}^8\text{Be}+n$ .

Существенным для подобных исследований является возможность наблюдения и измерения всех трех частиц образующейся  $2\alpha+n$  системы [13, 16].

## Процедура сканирования эмульсий облученных релятивистскими ядрами

<sup>9</sup>Be

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 просмотрных 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 работе [3] для увеличения скорости набора статистики взаимодействий  $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$  использовался метод просмотра «по полоскам». Расстояние между полосками составляло 0,5 см, при сканировании искались группы из трех-четырех близких треков с небольшим углом расхождения и, примерно, 4-х кратной ионизацией. После обнаружения такой группы ее треки протягивались в направлении входа пучка с целью поиска вершины взаимодействия.

Современные автоматические микроскопные комплексы позволяют существенно ускорить процесс сканирования [17, 18].

Поиск событий фрагментации  $^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  осуществлялся просмотром «по полоскам». Для поиска взаимодействий в эмульсиях использовался микроскоп МБИ-9. В результате сканирования найдено около 500 событий фрагментации ядра  $^9\text{Be}$ , идущих с образованием двух фрагментов He в переднем конусе фрагментации. Изучались события, идущие с образованием двух  $\alpha$ -частиц в переднем конусе фрагментации с полярным углом до 0.1 рад ( $\approx 6^\circ$ ). В статистике анализируемых взаимодействий представлены события фрагментации на различных ядрах эмульсии - групп H, CNO, AgBr. Подробное обсуждение сопровождения фрагментами мишени периферических процессов при фрагментации  $^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  в эмульсии.

## Измерение углов в эмульсиях облученных релятивистскими ядрами ${}^9\text{Be}$

Задача измерения пространственных углов между следами частиц в фотоэмульсии возникла еще на ранних этапах развития методики [19]. Традиционно, выбор метода и процедур измерения зависят от физической задачи, и задается условиями эксперимента. Определения и обозначения углов вылета вторичных частиц, измеряемых в эмульсиях, приведены на рисунке 2.

Для измерения углов треков, в эмульсиях облученных релятивистскими ядрами  ${}^9\text{Be}$ , использовался измерительный микроскоп KSM – 1. Процедура измерения углов состоит в следующем. Эмульсию, наклеенную на стекло закрепляют на столике микроскопа. Пластика разворачивается таким образом, чтобы направление трека первичной частицы наилучшим образом совпадало с осью OX столика микроскопа (с точностью  $(0,1 - 0,2)$  мкм отклонения на 1 мм длины трека). Все измерения проводятся в стандартной трехмерной геометрии в правой декартовой системе координат. Ось OX системы совпадает с направлением проекции первичного следа на плоскость эмульсии. Ось OZ направлена от стекла к поверхности перпендикулярно плоскости эмульсии, ось OY – таким образом, чтобы получилась «правая» система координат (рисунок 1). За начало координат выбирается «вершина» события. В описанной координатной системе последовательно измеряются координаты точек трека первичной частицы и треков образующихся  $\alpha$ -частиц. На основании измеренных координат  $(x, y, z)$  точки трека в эмульсии, вычисляются углы. Данный способ измерения углов именуется координатным методом.

При ручных измерениях на микроскопе количество измеряемых точек на треках определяются количеством треков и необходимостью обеспечения приемлемой точности измерений.



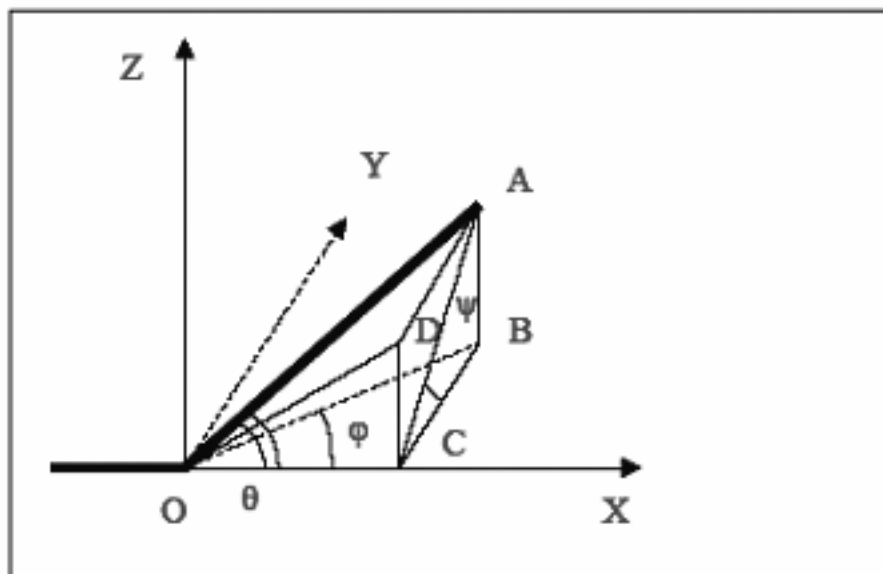


Рисунок 2 Определение углов вторичных частиц. OX – направление первичной частицы,  $\angle AOC$  – полярный угол  $\theta$ ,  $\angle ACB$  – азимутальный угол  $\psi$ ,  $\angle BOC$  – угол в плоскости эмульсии (плоский угол)  $\phi$ ,  $\angle DOC$  – глубинный угол  $\alpha$  (Все углы приведены в системе координат связанной с первичной частицей).

Для перехода в систему координат, связанную с первичной частицей, производится вычисление глубинного ( $\alpha_0$ ) угла и угла в плоскости эмульсии ( $\phi_0$ ) первичного трека. Переход в систему координат, связанную с первичным ядром производится по формулам (2)

$$\begin{aligned}
 x &= x' \cdot \cos(\alpha_0) \cdot \cos(\phi_0) + y' \cdot \cos(\alpha_0) \cdot \sin(\phi_0) + z' \cdot \sin(\alpha_0) \\
 y &= -x' \cdot \sin(\phi_0) + y' \cdot \cos(\phi_0) \\
 z &= -x' \cdot \sin(\alpha_0) \cdot \cos(\phi_0) - y' \cdot \sin(\alpha_0) \cdot \sin(\phi_0) + z' \cdot \cos(\alpha_0)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Штрихованные координаты относятся к системе координат, связанной с микроскопом, без штриха – к системе координат, связанной с первичным ядром. Выражение (2) представляет собой поворот системы координат на угол  $\alpha_0$  вокруг оси OY и на угол  $\phi_0$  вокруг оси OZ. Вычисление углов  $\phi$ ,  $\alpha$ ,  $\theta$  и  $\psi$  проводится, опираясь на соотношения (3).

$$\begin{aligned}
\operatorname{tg}(q) &= \frac{\sqrt{z^2 + y^2}}{x}, & \cos(q) &= \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \\
\operatorname{tg}(y) &= \frac{z}{y}, & \cos(y) &= \frac{y}{\sqrt{z^2 + y^2}} \\
\cos(f) &= \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, & \sin(f) &= \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\
\cos(a) &= \frac{x}{\sqrt{x^2 + z^2}}, & \sin(a) &= \frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}}
\end{aligned} \tag{3}$$

При измерении углов необходимо учитывать изменения первоначальной толщины эмульсионного слоя вследствие его усадки во время проявки. При определении  $z$  координат точек следов учитывается коэффициент усадки эмульсии  $\Delta = h_0/h$ , который представляет собой отношение начальной толщины эмульсионного слоя  $h_0$  к ее толщине во время проведения измерений  $h$ .

Измерение координат точек треков проводилось последовательно в одном направлении (слева направо и от поверхности слоя к стеклу) по ходу пучка начиная с первичного трека и далее для всех треков фрагментов одновременно. На треке первичного ядра  ${}^9\text{Be}$  и треках фрагментов измерялись по 10 троек  $(x, y, z)$  координат точек. Шаг измерений составлял 100 мкм, при общей длине трека, используемой для измерения 1 мм. Предполагая линейную зависимость ( $y = a_y x + b_y$  и  $z = a_z x + b_z$ ) координат точек трека, методом наименьших квадратов находились коэффициенты  $a$  и  $b$  аппроксимирующего полинома первой степени зависимостей координат  $z(x)$ ,  $y(x)$ . По найденным коэффициентам  $a_y$ ,  $a_z$ , определялись углы  $(\alpha, \phi)$  для трека ядра  ${}^9\text{Be}$  и треков  $\alpha$ -частиц. На рисунке 3 приведен пример восстановленных направлений вылета (углов  $\alpha, \phi$ ) пары  $\alpha$ -частиц при фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  по измеренным точкам на треках.

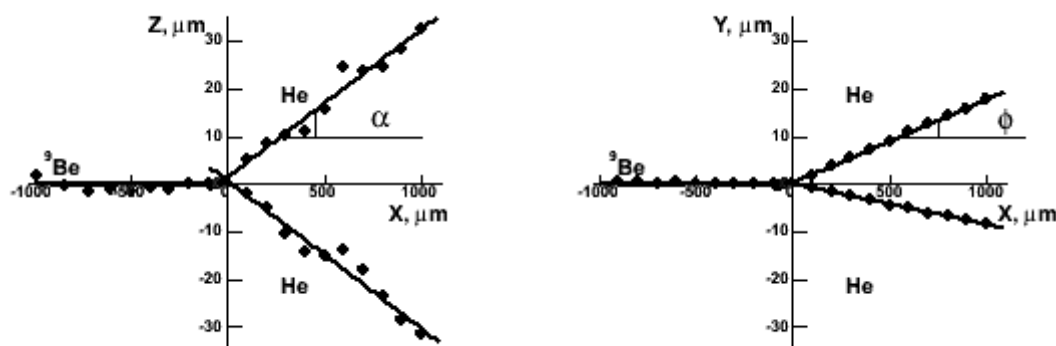


Рисунок 3 Пример восстановленных направлений вылета (углов  $\alpha$ ,  $\phi$ )  $\alpha$ -частиц, образующихся при фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ , по измеренным точкам на треках.

### Средства анализа экспериментальных данных

**Root** – современное средство анализа данных используемое в физике высоких энергий, разработанное и поддерживаемое в ЦЕРНе - европейском научно-физическом центре. Первоначально ROOT развивался в контексте ЦЕРН-го эксперимента NA49. Данный проект хорошей платформой для создания современного объектно-ориентированного средства для анализа данных, базирующегося на использовании CINT. CINT – C++ интерпретатор используемый для работы в командной строке ROOT и исполнения скриптов. Подробное описание и дистрибутивы ROOT доступны на сайте проекта (<http://root.cern.ch>). Имея развитую систему классов, интерфейсов, реализованных статистических методов ROOT предоставляет широкие возможности для анализа данных, построения графиков, гистограмм. Являясь развивающейся системой с постоянно развивающимися возможностями, ROOT обеспечивает единый интерфейс для работы пользователя в операционных системах: Windows, Unix/Linux, MacOS (скрипты платформу-независимые). Обладая и форумом проекта богатой базой примеров, данное средство анализа не сложно в освоении, не требовательно к строгости используемого синтаксиса (C/C++).

**Mathcad** — программа для выполнения и документации инженерных и научных расчётов. Появившись в 1986 году для платформы MS-DOS, Mathcad впервые среди программ подобного рода использовал наборную математическую нотацию, совмещённую с автоматической системой вычислений. Кроме того, впервые было реализовано автоматическое вычисление и проверка единиц измерения. Например, СИ. На сегодняшний день Mathcad включает некоторые возможности алгебраических систем для ЭВМ, но при этом сохраняет ориентацию на инженерные приложения. Изначально Mathcad был создан Алэном Рэздуо из Массачусетского технологического института (MIT), который впоследствии стал одним из основателей фирмы Mathsoft, ныне являющейся частью корпорации Parametric Technology. Рабочая область программы представляется как обыкновенный лист, на котором уравнения и выражения отображаются графически, а не в текстовом виде. Mathcad создавался как мощный микрокалькулятор, позволяющий легко справляться с рутинными задачами инженерной практики, ежедневно встречающимися в работе. Главными достоинствами пакета Mathcad и его колоссальным преимуществом перед подобными системами, являются: лёгкость и наглядность программирования задач; запись сложных математических выражений в том виде, в котором они обычно записываются инженерами на листе бумаги (т.е. отсутствие специального языка программирования); простота в использовании; возможность создания встроенными средствами высококачественных технических отчетов с таблицами, графиками и текстом. Несмотря на то, что данная программа ориентирована на пользователей, мало знакомых с программированием, она всё же находит применение в достаточно сложных проектах для визуализации результатов математического моделирования с использованием распределённых вычислений и традиционных языков программирования. Также Mathcad часто используется в крупных инженерных проектах, где большое значение имеет трассируемость и соответствие стандартам.

Распределения  $\alpha$ -частиц в реакциях фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  по углам  $\alpha$ ,  $\phi$  представлены на рисунке 4.

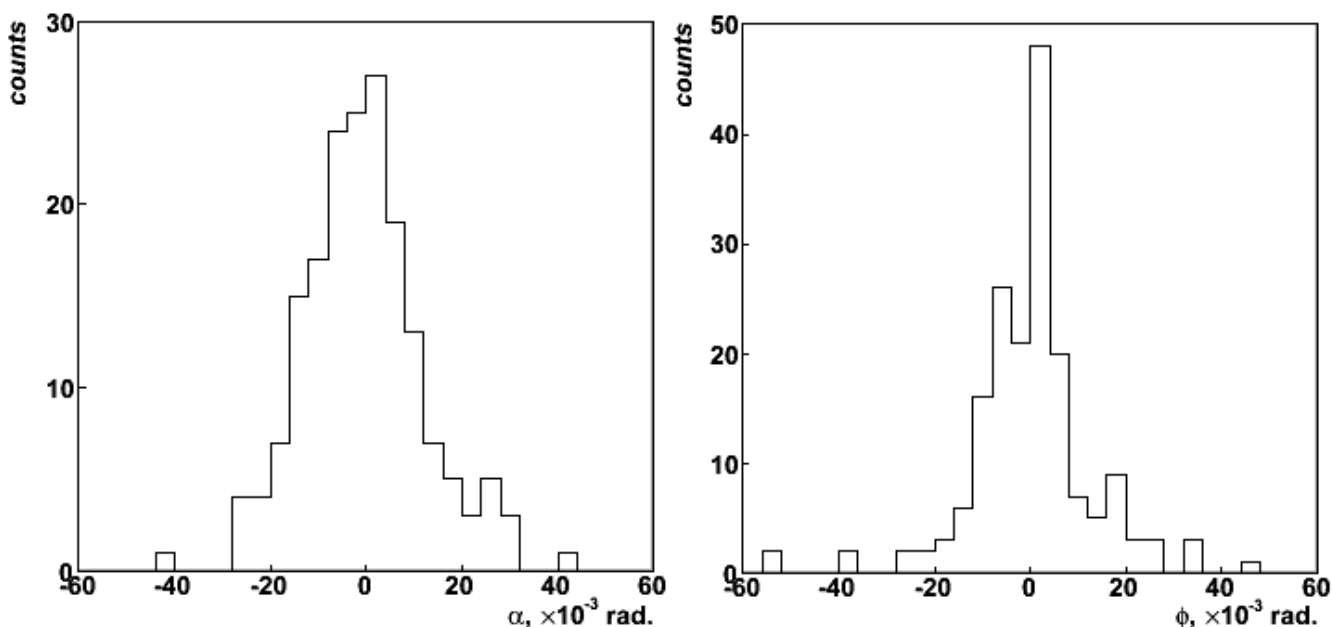


Рисунок 4 Распределения  $\alpha$ -частиц по «глубинному углу»  $\alpha$  и «плоскому углу»  $\phi$  в событиях фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ .

### Спектр парных углов и инвариантных масса двух альфа фрагментов

В работе получены спектры парных углов двух  $\alpha$ -частиц, рисунок (5). Рассматривались только события, в которых в конусе фрагментации только две  $\alpha$ -частицы. Суммарный заряд треков в конусе фрагментации равен заряду первичного трека. Приблизительно 80% из измеренных 90 событий характеризуются величиной пространственного угла  $\Theta$  принадлежащего интервалам (0, 10) мрад и (15, 45) мрад, что косвенно свидетельствует о наличии различных в путей в образовании  $\alpha$ -фрагментов. Данная особенность может означать, что канал периферической фрагментации релятивистского ядра  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha + n$  сопровождается образованием промежуточного нестабильного изотопа  ${}^8\text{Be}$  в состояниях  $0^+$  и  $2^+$  с последующим испусканием  $\alpha$ -пары [4, 8]. В пользу данного предположения свидетельствует форма спектра по энергии возбуждения  $Q_{2\alpha}$ , приведенная ниже.

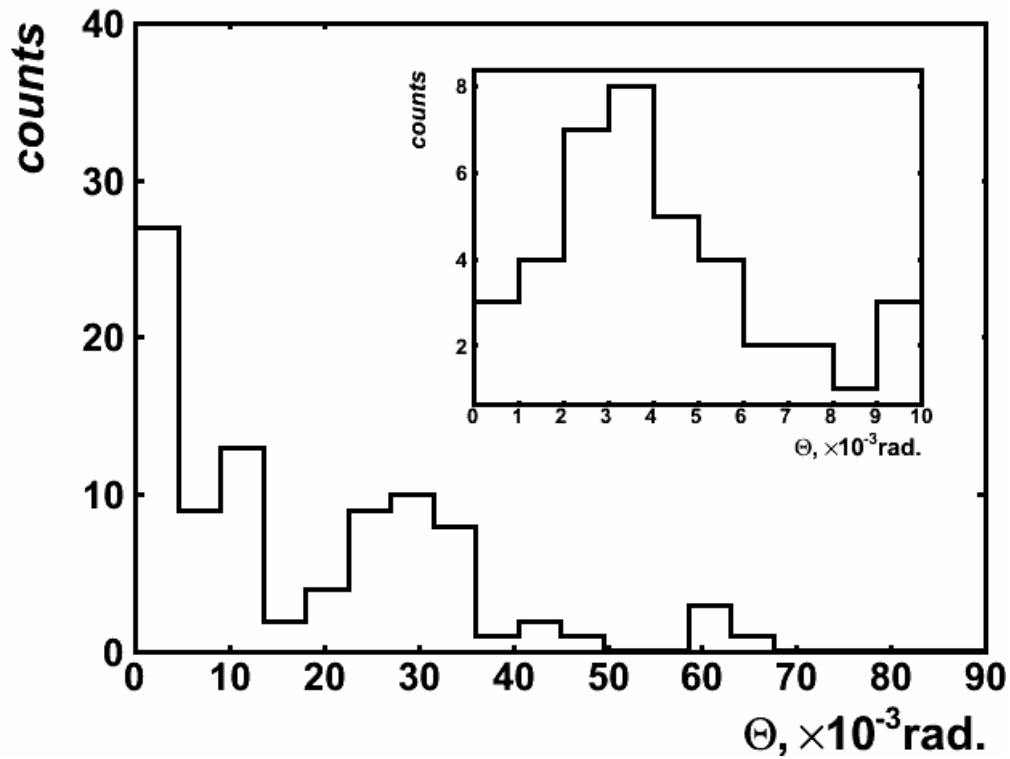


Рисунок 5 Распределение по углу между парой  $\alpha$ -частиц.

Для оценки масштабов энергии возбуждения приведено распределение событий по величине  $Q_{2\alpha}$ , разности эффективной инвариантной массы  $M_{2\alpha}$   $\alpha$ -пары и удвоенной массы  $\alpha$ -частицы  $2m_\alpha$ . В формулах (4), указанная разность обозначена как  $Q_{2\alpha}$ , символами  $E_{\alpha i}$ ,  $p_{\alpha i}$  – полная энергия и импульс  $\alpha$ -частицы.

$$M_{2\alpha} = \left[ 2(m_\alpha^2 + E_{\alpha 1}E_{\alpha 2} - p_{\alpha 1}p_{\alpha 2} \cos(\Theta_{12})) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$Q_{2\alpha} = M_{2\alpha} - 2 \cdot m_\alpha$$

На рисунке (6) представлено распределение событий  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ , по величине  $Q_{2\alpha}$ . В выражениях (4) величина  $M_{2\alpha}$ , а, следовательно, и  $Q_{2\alpha}$  являются лишь функциями от относительного пространственного угла  $\Theta$ .

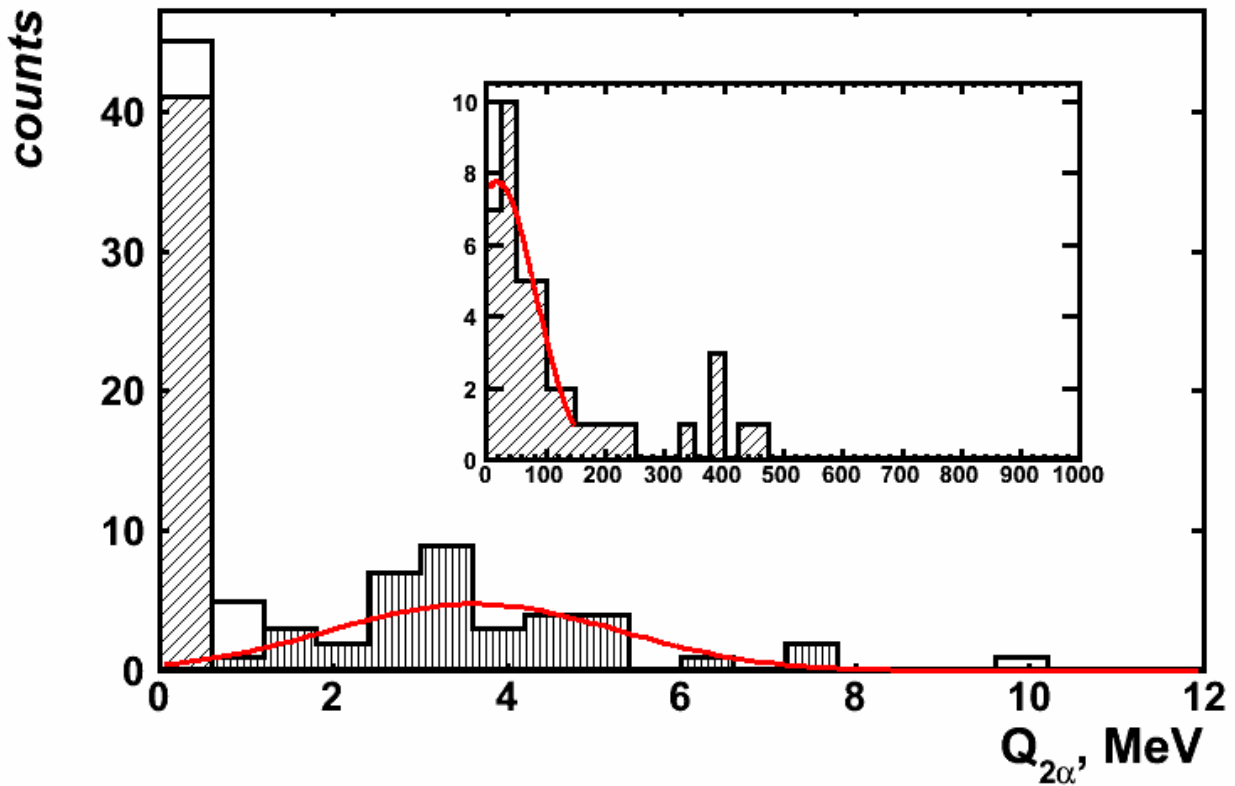


Рисунок 6 Распределение событий фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  по величине энергии  $Q_{2\alpha}$  пары  $\alpha$ -частиц, образующихся в реакции.

Дальнейшая исследовательская работа будет посвящена исследованию особенностей кинематических характеристик канала фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ , в зависимости от типа ядра мишени (H, CNO, AgBr), поскольку данная задача является основной в анализе результатов облучения эмульсий ядрами  ${}^9\text{Be}$  в настоящий момент.

## Заключение

В заключении приведем основные результаты проделанной научно-исследовательской работы

1. Изучена проблемно-тематическая часть исследовательского проекта Беккерель, (цели, задачи эксперимента, область физики).
2. Изучены основы применения методики ядерных эмульсий к задаче исследования периферической фрагментации ядер  ${}^9\text{Be}$  на ядрах фотоэмульсии.
3. Получены практические навыки сканирования ядерных эмульсий с целью нахождения событий, соответствующих искомым типам взаимодействия.
4. Подробно изучена методика измерения углов треков частиц в эмульсии. Получены практические навыки измерения треков в событиях фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ .
5. Самостоятельно полностью проведены угловые измерения 90 событий фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ , что составляет приблизительно 20% от всей имеющейся статистики угловых измерений по задаче исследования фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$
6. Приведены некоторые характеристические спектры для событий фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ .



## Литература

1. N.P. Andreeva et al., «Clustering in light nuclei in fragmentation above 1 A GeV», Eur.Phys.J. A **27S1** (2006), 295-300.
2. В.В. Белага и др., «Когерентная диссоциация  $^{12}\text{C}\rightarrow 3\alpha$  при 4.5 А ГэВ/с на ядрах эмульсии, обогащенной свинцом», ЯФ 58 (1995), 2014-2020.
3. Ф.А. Аветян и др., «Когерентная диссоциация  $^{16}\text{O}\rightarrow 4\alpha$  в фотоэмульсии при импульсе 4.5 ГэВ/с на нуклон», ЯФ 59 (1996), 110-116.
4. В.В. Белага и др., «Эффективные массы и относительные углы пар альфа-частиц из реакции когерентной диссоциации  $^{12}\text{C}\rightarrow 3\alpha$  при импульсе 4.5 ГэВ/с/нуклон», Препринт ОИЯИ Р1-95-40, Дубна (1995).
5. Y.L. Parfenova and Ch. Leclercq-Willain, «Hyperfine anomaly in Be isotopes and neutron spatial distribution: A three-cluster model for  $^9\text{Be}$ », Phys. Rev. C **72**, 054304 (2005).
6. Y.L. Parfenova and Ch. Leclercq-Willain, «Hyperfine anomaly in Be isotopes in the cluster model and the neutron spatial distribution », arXiv: nucl-th/0502032v4.
7. В. Чавчанидзе, «К теории ядра бериллия», УФН, Т. XLIII, вып. 1 (1951), 106-119.
8. F.G. Lepekhn, «The formation of  $^8\text{Be}$  nuclei and their role in the fragmentation of light nuclei», Physics of Particles and Nuclei vol. 36 №2. (2005), 233-245.
9. C.W. Wang et al., « $^9\text{Be}(p,\alpha)^5\text{He}$  cluster knockout reaction with 150 MeV polarized protons», Phys.Rev. C **31** (1985), 1662-1672.
10. K. Arai, «Resonance structure of  $^9\text{Be}$  and  $^{10}\text{Be}$  in microscopic cluster model», Nuclear Physics A738 (2004), 342-346.

11. N. Keeley et al, « $5\text{He}+\alpha$  cluster model of  $9\text{Be}$  breakup», Phys. Rev. C 64 031602(R) (2001).
12. P. Descouvemont, «Microscopic three-cluster study of the low-energy  $9\text{Be}$  photodisintegration», Eur. Phys. J. A 12 (2001), 413-419.
13. B.R. Fulton et al., «Exclusive breakup measurements for  $9\text{Be}$ », Phys. Rev. C 70, 047602 (2004).
14. W.J. Woolliscroft et al., «Elastic scattering and fusion of  $9\text{Be}+208\text{Pb}$ : Density function dependence of the double folding renormalization», Phys. Rev. C 69, 044612 (2004).
15. L.V. Grigorenko and M.V. Zhukov, «Three-body resonant radiative capture in astrophysics», Phys. Rev. C 72, 015803 (2005).
16. P. Papka et al., «Decay path measurements for the 2.429 MeV state in  $9\text{Be}$ : Implications for the astrophysical  $\alpha+\alpha+n$  reaction», Phys.Rev. C 75, 045803 (2007).
17. М.И. Адамович и др., «Взаимодействие релятивистских ядер  ${}^6\text{Li}$  с ядрами фотоэмульсии», ЯФ 62 (1999), 1461-1471.
18. A.B. Aleksandrov et al., «Completely automated measurement facility (PAVICOM) for track-detector data processing» Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 535 (2004), 542-545.
19. С. Пауэлл, П. Фаулер, Д. Перкинс «Исследование элементарных частиц фотографическим методом» Издательство иностранной литературы М. (1962).