

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Факультет физики и информационных технологий
Кафедра теоретической физики

**Анализ измерений направлений вторичных
следов во фрагментации релятивистских ^{14}N
ядер в ядерной эмульсии**

Курсовая работа

Исполнитель
студентка группы КФ-47

О.Н. Кашанская

Научные руководители
кандидат физ.-мат. наук, доцент
зав. кафедрой

Г.Ю. Тюменков

научный сотрудник ОИЯИ
кандидат физ.-мат. наук



А.А. Зайцев

Гомель 2021

Реферат

Курсовая работа содержит 32 страницу, 12 рисунков, 11 источников.

Ключевые слова: ядерная фотографическая эмульсия, диссоциация, релятивистские фрагменты, плоский угол, глубинный угол.

Объект исследования: фрагментация ядер ^{14}N , распределения относительных углов разлета одно- и двухзарядных фрагментов налетающего ядра, плоский угол, глубинный угол.

Цель работы: на основе экспериментальных данных по диссоциации релятивистских ядер ^{14}N на ядрах из состава ядерной эмульсии построить распределения относительных углов разлета одно- и двухзарядных фрагментов налетающего ядра. Получить основные параметры угловых распределений и оценить вклад событий с предельно узкими группами треков вторичных фрагментов.

Задачи курсовой работы: с помощью измерительных микроскопов МВИ-9 выполнить измерения пространственных координат XYZ первичных и вторичных треков He и H в объеме ядерной эмульсии. На основе полученного массива данных рассчитать плоский (φ) и глубинный (α) углы вторичных фрагментов He и H. Определить относительные парные углы (Θ) двухзарядных фрагментов. Проведенный анализ представить в графическом виде, подготовленный с помощью программного пакета ROOT.

Область применения: В диссоциации релятивистских ядер особенно ценными являются события с множественным образованием ядер-фрагментов He и H без наблюдения фрагментов ядра мишени. Источником образования легчайших фрагментов налетающего ядра могут служить распады нестабильных ядер $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ ($\tau = 6.7 \cdot 10^{-17}$ с) и $^9\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}(2\alpha)p$ ($\tau = 8 \cdot 10^{-16}$ с). Распады нестабильных релятивистских ядер проявляются в предельно узких струях вторичных фрагментов, угол разворота которого определяется энергией первичного ядра. Такой вид событий накладывает особые ограничения в выборе трекового детектора. Методика ядерных фотоэмульсий, обладающая наилучшим пространственным разрешением (~ 0.5 мкм), позволяет с точностью порядка $10^{-4} - 10^{-3}$ радиан реконструировать углы эмиссии фрагментов в ультра узких струях на базе 1 мм от вершины события. Выполненный в настоящей работе анализ угловых корреляций фрагментов He и H станет неотъемлемой частью исследовательской программы эксперимента БЕККЕРЕЛЬ на ускорительном комплексе Нуклотрон-НИКА, одна из задач которой изучение образования нестабильных состояний в распаде релятивистских ядер ^{14}N . Полученная таким образом информация представляет огромный интерес для ядерной физики и астрофизики, в том числе для решения проблемы распространенности изотопов во Вселенной.

Вывод: В работе выполнен анализ измерений направлений вторичных следов во фрагментации релятивистских ^{14}N ядер в ядерной эмульсии. Определен критерий отбора треков, исключающий рассеяние на большие углы. Проведен расчет пространственных углов испускания фрагментов налетающего ядра. Обнаружены события с предельно узкими струями фрагментов He.

Содержание

Реферат	2
Содержание	3
Перечень условных обозначений	4
Введение	5
§1. Методика	6
§1.1 Общая характеристика ядерной фотоэмульсии	6
§1.2. Метод ядерных фотографических эмульсий	9
§1.3. Механизм образования следов	11
§2. Эксперимент	13
§2.1 Облучение ядерной эмульсии	13
§2.2 Сканирование слоев	13
§2.3 Процедура измерения пространственных координат	15
§2.4 Расчет пространственных углов эмиссии вторичных фрагментов	18
§3 Описание результатов	20
§3.1 Анализ данных и графическое представление результатов с помощью пакета ROOT	21
§3.2 Одночастичные угловые распределения вторичных фрагментов	22
§3.3 Наблюдение предельно узких пар двухзарядных фрагментов	23
Заключение	26
Список литературы	27
Приложения	28

Перечень условных обозначений

μ - микро, 10^{-6} ;

кэВ - килоэлектронвольт;

МэВ - мегаэлектронвольт;

ГэВ - гигаэлектронвольт;

ОИЯИ - Объединенный институт ядерных исследований;

мрад - милли(10^{-3}) радиан;

Введение

Одним из 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 том числе, 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.

Целью данной работы является на основе экспериментальных данных по диссоциации релятивистских ядер ^{14}N на ядрах из состава ядерной эмульсии построить распределения относительных углов разлета одно- и двухзарядных фрагментов налетающего ядра. Получить основные параметры угловых распределений и оценить вклад событий с предельно узкими группами треков вторичных фрагментов. Провести анализ, представить его в графическом виде, подготовленном с помощью программного пакета ROOT.

§1. Методика

§1.1 Общая характеристика ядерной фотоэмульсии

Ядерные эмульсии это высококонцентрированные и высокодисперсные эмульсии из бромистого серебра. Концентрация AgBr, который находится в форме микрокристаллов почти сферической формы (Рисунок 1.1), в большинстве изготавливаемых в настоящее время эмульсий составляет около 83% по весу. Наиболее широко используется желатин с пластификатором в качестве среды, в которой находятся микрокристаллы AgBr. Средние размеры микрокристаллов бромистого серебра для большинства ядерных эмульсий находятся в пределах 0,12-0,3мкм, эмульсии НИКФИ, Илфорд, Кодак, Агфа, Истмен и др.

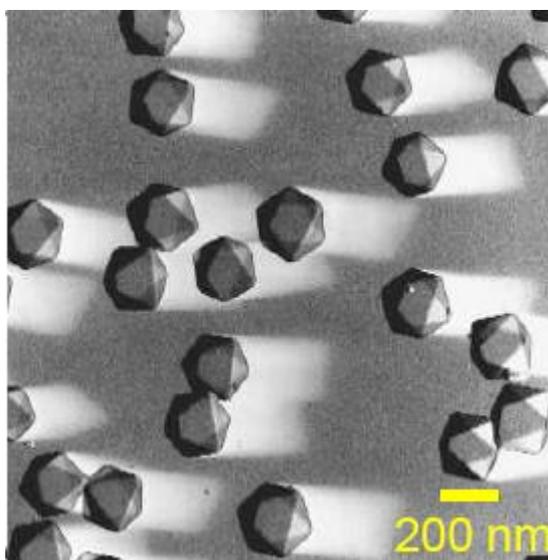


Рисунок 1.1 Фотография микрокристаллов галогенида серебра под микроскопом.

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

Ядерные эмульсии делаются либо без подложки с толщиной слоя 400-600 мкм, либо на стеклянной подложке с толщиной эмульсионного слоя от 50 до 400 мкм.

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

Основными составляющими ядерной эмульсии являются:

а) галогидное серебро – в основном бромистое, обладающее плотностью 6,47 г/см³;

б) желатин и пластификатор (например, глицерин);

в) вода.

У галоидного серебра, находящегося в эмульсии, форма кубическая или почти сферическая в зависимости от метода приготовления.

Желатин и пластификатор заключают следующие элементы: углерод, азот, кислород, водород и серу. Желатин представляет собой сложное вещество, поэтому неизбежно существует небольшая разница в химическом составе желатина, поставляемой различными изготовителями.

Глицерин уменьшает хрупкость эмульсии и содействует появлению пластических деформаций при возникновении напряжений в слое. Это имеет достаточно 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.

По своим фотографическим характеристикам все ядерные эмульсии делятся на три основных типа эмульсий [1].

- а) Низкой чувствительности, специализированные для регистрации сильноионизирующих частиц с потерями энергии ≥ 50 кэВ на 1мкм пробега (осколков деления, многозарядных ионов, медленных α -частиц).
- б) Средней чувствительности, способные регистрировать следы частиц с ионизацией ≥ 2 кэВ на 1мкм пробега (протоны с энергией 50-100МэВ).
- с) Высокой чувствительности, регистрирующие следы частиц с минимальной ионизацией (0,55кэВ на 1мкм).

Эмульсии, используемые 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 данный момент ядерные эмульсии часто применяются в виде отдельных слоев, лишенных стеклянной подложки.

Одной из основных используемых ядерных фотографических эмульсий является эмульсия типа БР-2, обеспечивающая чувствительность вплоть до релятивистских однозарядных частиц и дающих минимум ионизационных потерь. Основные характеристики этой эмульсии представлены в табл. 1.1

Таблица 1.1 – Химический состав эмульсии (литературные данные по составу ядерной фотоэмульсии БР-2; отн. влажность 58%)

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

Выбор типа эмульсии зависит от ее предполагаемого применения. Чтобы обеспечить плотность зерен, необходимую для регистрации следа частицы, чувствительность эмульсии должна быть достаточно велика. 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 фотографических эмульсий является вполне адекватным для изучения глобальных характеристик явления фрагментации ядра-снаряда благодаря весьма высокой пространственной разрешающей способности, наблюдаемости акта соударения в 4π-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. Достоинства данного метода 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 дает возможность получить характеристики ядер, далеко отстоящих по атомному весу.

Вследствие высокой достоверности наблюдаемых событий, превосходному пространственному разрешению и максимально полной наблюдаемости следов заряженных частиц методика ядерных эмульсий всегда обеспечивала обзорные наблюдения по физике микромира. В ряде важных случаев она позволяет измерять импульсы, идентифицировать частицы. Поэтому именно она представляется результативным 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.

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. Объем накопленной информации в слое ядерной эмульсии площадью 125 см^2 оценивается на уровне 10 ТВ. Для сравнения, dvd диск площадью 111 см^2 вмещает в себя 9 Гб информации.

Также не последней по значимости положительной чертой эмульсии является ее дешевизна. Эмульсия имеет огромное преимущество в экономическом плане по сравнению с другими методами.

§1.2. Метод ядерных фотографических эмульсий

Значительную роль в развитии нынешних представлений о механизме этих взаимодействий сыграло применение ядерных фотоэмульсий при изучении взаимодействия частиц большой энергии с ядрами.

Возможность визуального наблюдения единичных актов ядерного взаимодействия в виде так называемых «звезд» в ядерной эмульсии дает возможность получить большое число непосредственных данных о характеристиках ядерных реакций: о числе и природе возникающих 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 том, что заряженная частица, проходя через фотоэмульсию, задевает на своем пути кристаллы галоидного серебра и делает их способными к проявлению. После обработки эмульсионных слоев в них появляются следы частиц в виде цепочки зерен, хорошо различимых под микроскопом. Огромную роль в развитии сыграли такие физики, как С. Пауэл, Л.В. Мысовский, Д. Перкинс, А.П. Жданов, П. Фаулер.

При остаточной влажности порядка 2,5% средняя плотность эмульсии составляет порядка 3,5 – 4 г/см³. Ядерные фотографические эмульсии применяются для регистрации и анализа следов заряженных частиц практически любой энергии. По измерениям характеристик этих следов можно определить частицу и ее кинематические характеристики.

Временем чувствительности ядерных эмульсий называется время их экспозиции, которое может быть порядка нескольких недель. В течение этого времени ядерная эмульсия регистрирует все заряженные частицы, проходящие через нее. Благодаря рекордному пространственному разрешению фотометод с успехом применяется для определения углов разлета частиц и ядер, образующихся в результате ядерного взаимодействия. Метод ядерных эмульсий не имеет себе равных по точности измерения малых углов. При проведении экспериментов на ускорителях фотометод не требует большой затраты времени работы ускорителя. Также относительно малы расходы на аппаратуру. Имеется и ряд недостатков.

Сложность состава вещества фотоэмульсии не позволяет точно ответить на вопрос, с каким ядром произошло взаимодействие налетающей частицы. Его устраняют введением дополнительных элементов и введением критериев отбора обрабатываемых событий. Невысокая скорость обработки слоев ядерной эмульсии также является значительным недостатком. И как следствие необходимость длительного времени для набора статистики. Это компенсируется получаемым результатом. Тем самым, позволяя проводить планирование электронных экспериментов. Стоит отметить, что в последнее время ведутся разработки полностью автоматизированных считывающих комплексов, с целью ускорения процедуры сканирования слоев ядерных эмульсий. Например, в Нагойском университете разработана система Nucleon Track Selector (NTS), способная сканировать слои ядерных эмульсий со скоростью 4000 см²/ч [2], в то время как ручной метод сканирования ограничен скоростью в несколько мм² в час.

Точное определение состава эмульсии существенно влияет на точность измерений, которая может быть достигнута при помощи метода и которая требуется при точном определении энергии однородной группы частиц по их средним пробегам. По этой причине необходимо знать состав эмульсии в реальных условиях ее облучения.

Желатина может быстро обмениваться водой с находящейся с ней в контакте газообразной или жидкой средой это является одним из затруднений, встречающихся при определении химического состава эмульсий. 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; появляющаяся вследствие этого слабая деформация поверхности быстро исчезает, как только пластинка снова приходит в равновесие с окружающей ее атмосферой.

Все это затрудняет определение плотности при помощи обычного метода, основанного на взвешивании образца сначала в воздухе, а затем в жидкости с известной плотностью.

§1.3. Механизм образования следов

В процессе образования следов заряженных частиц в эмульсии решающую роль играет возникновение δ -электронов, при наличии которых в данном зерне может выделиться количество энергии, намного превышающее то максимальное значение, которое оказалось бы возможным, если бы энергетические потери были равномерно распределены вдоль ее пути (рисунок 1.2). Например, в минимуме ионизации удельная ионизация частицы с зарядом составляет около 700 кэВ/мм. При равномерных потерях максимальное количество энергии, которое может быть поглощено зернами диаметром 0,3 μ , должно быть порядка 300 эВ (при прохождении частицы по диаметру зерна). С другой стороны, пробег δ -электрона с энергией меньше 5 кэВ является настолько коротким, а его траектория настолько искривленной вследствие рассеяния, что при возникновении такого электрона внутри зерна он может остановиться, не выходя за пределы последнего. Следовательно, 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». Изображения событий множественной фрагментации релятивистских ядер были получены еще в 40х годах в слоях ядерной эмульсии при воздействии космических лучей в стратосфере [3]. С коллекцией фотографий ядерных взаимодействий в ядерной эмульсии и их полным описанием можно ознакомиться в труде С. Пауэлла, П. Фаулера и Д. Перкинса [4].

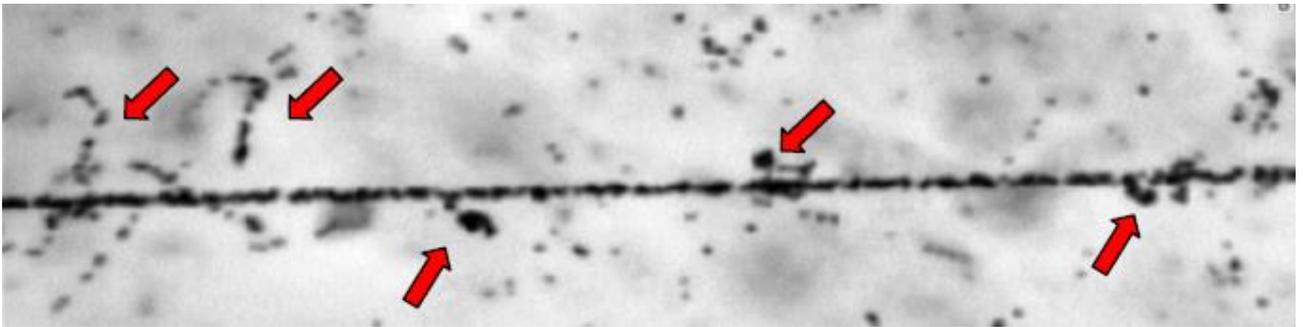


Рисунок 1.2. Первичный трек релятивистского ядра ^{14}N в ядерной эмульсии. Вдоль следа стрелками указаны треки δ -электронов.

При анализе данных в методике ядерной фотоэмульсии заряженные частицы принято делить на 4 типа, в зависимости от их относительной ионизации I/I_0 и скорости β :

- “черные” (b -частицы) - следы фрагментов ядра-мишени с относительной ионизацией $I/I_0 \geq 7.0$ и $\beta < 0.23$, где I_0 - ионизация на треках релятивистских частиц с зарядом $Z = 1$. Однако в практическом плане, b -частицы зачастую удобно идентифицировать по величине их пробега в объеме ядерной фотоэмульсии - $L \leq 0.3$ см;
- “серые” (g - частицы) - в основном это протоны, выбитые из ядра-мишени, с относительной ионизацией $6.8 > I/I_0 \geq 1.4$ и $\beta < 0.7$, с остаточным пробегом ≥ 0.3 мм. Также к этому типу частиц относится небольшая примесь π -мезонов, зависящая от начальной энергии взаимодействия;
- “релятивистские” (ливневые или s - частицы) - провзаимодействовавшие протоны налетающего ядра и однозарядные ($Z=1$) непровзаимодействовавшие фрагменты налетающего ядра с относительной ионизацией $I/I_0 < 1.4$ и $\beta > 0.7$.
- “фрагменты” (f - частицы) - многозарядные фрагменты налетающего ядра с зарядом $Z \geq 2$. Они не входят в число b - и g - частиц которым соответствует по производимой ими ионизации. Треки релятивистских однозарядных частиц и фрагменты ядра-снаряда с $Z=2$ легко узнаваемы под микроскопом числом проявленных зерен на единицу длины трека (представлены на рисунке 1.3).

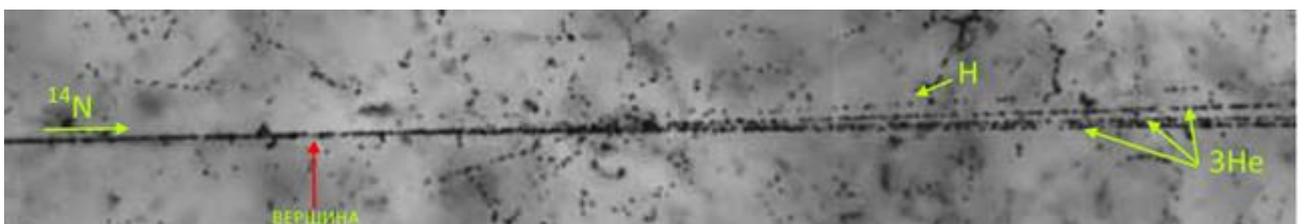


Рисунок 1.3. Фотография события фрагментации ядра ^{14}N с образованием трех фрагментов He и одного H без наблюдения следов ядра-мишени.

§2. Эксперимент

§2.1 Облучение ядерной эмульсии

Для облучения была собрана стопка из 20 слоев ядерных фотоэмульсий типа БР-2 ГОСНИИХИМФОТОПРОЕКТА размером $10 \times 20 \text{ см}^2$ и толщиной 600 мкм. Данный тип эмульсий имеет высокую чувствительность к релятивистским частицам. Собранная таким образом стопка упаковывалась в светонепроницаемую упаковку и располагалась перед выводом пучка на юстируемой подставке. Стопка была облучена ядрами $^{14}\text{N}^{+7}$ с импульсом 2.86 А ГэВ/с на Нуклотроне ОИЯИ в 2004 г. При облучении пучок был направлен параллельно плоскости эмульсии вдоль ее длинной стороны.

§2.2 Сканирование слоев

Поиск и отбор событий неупругого соударения ядер ^{14}N производился просмотром по следам первичных треков на микроскопах МБИ-9 представлен на рисунке 2.1. Этот способ заключается в прослеживании пучковых треков исследуемых ядер от места входа в эмульсионный слой до взаимодействия или до места выхода трека из эмульсии. Данный метод просмотра дает возможность зарегистрировать все типы взаимодействий без выборки, что позволяет получить длину свободного пробега для разного типа взаимодействия с высокой точностью.



Рисунок 2.1 Микроскоп МБИ-9.

В данной работе для анализа были отобраны события $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$, которые являются доминирующими (35%) [5] в зарядовой топологии диссоциации. Необходимо заметить, что фрагменты налетающего ядра сосредоточены в переднем конусе, угол разворота которого определяется отношением $\sin\theta_{\text{fr}} = P_{\text{fr}}/P_0$, где $P_{\text{fr}} = 0.2$ ГэВ/с – величина, характеризующая Ферми-импульс нуклонов в ядре-снаряде, а P_0 – импульс на нуклон ядра-снаряда. В случае диссоциации ядер ^{14}N с импульсом 2.86 ГэВ/с/нуклон угол фрагментационного конуса составляет 4° .

Данные представляют из себя .txt файлы в количестве 80 штук. Каждый файл содержит в себе событие, которое включает в себя: номер события, число измеренных вторичных треков, числа (nb, ng, ns, fb, fg, fs), первичную толщину эмульсии, число измеренных точек для определения толщины эмульсии после усадки, координаты этих точек (Z стекла, Z поверхности), число измеренных точек на первичном треке и их координаты (x трека, z трека, z поверхности эмульсии, y трека), число измеренных точек на вторичном треке и их координаты (x трека, z трека, z поверхности эмульсии, y трека), а также тип частицы. Пример представлен на рисунке 2.2.

2208006	4	5	0	0	0	3	1	(номер события, число измеренных вторичных треков, nb, ng, ns, fb, fg, fs (первичная толщина эмульсии))
610.0								(число измеренных точек для определения толщины эмульсии после усадки)
3								(координаты Z стекла, Z поверхности)
2538.40	2760.20							
2536.80	2759.00							
2534.70	2757.70							
5								(число измеренных точек на первичном треке)
22868	2586.20	2760.20	17.10					(координаты i-й точки: x трека, z трека, z поверхности эмульсии, y трека)
23068	2581.30	2760.00	17.10					
23268	2577.30	2759.70	17.10					
23468	2573.20	2759.40	17.04					
23668	2569.90	2759.00	17.03					
6	5							(тип частицы, число измеренных точек на вторичном треке)
23868	2564.90	2758.70	16.52					(координаты i-й точки: x трека, z трека, z поверхности эмульсии, y трека)
24068	2560.80	2758.40	16.72					
24268	2558.20	2758.20	16.52					
24468	2555.10	2758.00	16.79					
24668	2552.00	2757.70	16.73					
4	5							(тип частицы, число измеренных точек на вторичном треке)
23868	2565.10	2758.70	17.09					(координаты i-й точки: x трека, z трека, z поверхности эмульсии, y трека)
24068	2560.30	2758.40	17.22					
24268	2556.00	2758.20	17.51					
24468	2552.70	2758.00	17.79					
24668	2548.90	2757.70	18.14					
4	5							(тип частицы, число измеренных точек на вторичном треке)
23868	2563.10	2758.70	17.42					(координаты i-й точки: x трека, z трека, z поверхности эмульсии, y трека)
24068	2561.60	2758.40	17.98					
24268	2556.90	2758.20	18.61					
24568	2553.60	2758.00	19.49					
24668	2549.70	2757.70	20.29					
4	5							(тип частицы, число измеренных точек на вторичном треке)
23868	2564.70	2758.70	17.70					(координаты i-й точки: x трека, z трека, z поверхности эмульсии, y трека)
24068	2560.90	2757.40	18.32					
24268	2558.10	2758.20	19.12					
24468	2554.90	2758.00	20.06					
24668	2551.60	2757.70	21.19					

Рисунок 2.2 Пример файла с событием.

§2.3 Процедура измерения пространственных координат

При исследовании диссоциации быстрых частиц с ядрами, входящими в состав фотоэмульсии, в первую очередь измеряются и анализируются плоские углы - φ и глубинные углы - α , и азимутальные углы - ψ . Для измерения углов вылета вторичных фрагментов ядер ^{14}N использовался координатный метод. Все измерения велись в системе координат микроскопа (правая система координат), окончательные результаты приводятся в системе координат события, где продолжение первичного следа совпадает с положительным направлением оси X, а все оси образуют правую систему координат. В этой системе (представлена на рисунке 2.3): ψ ($0^\circ, 360^\circ$) – угол между осью Y и проекцией следа на плоскость ZOY; φ ($-180^\circ, 180^\circ$) – плоский угол между положительным направлением оси X и проекцией следа на плоскость XOY; α ($-180^\circ, 180^\circ$) – глубинный угол между положительным направлением оси X и проекцией следа на плоскость XOZ.

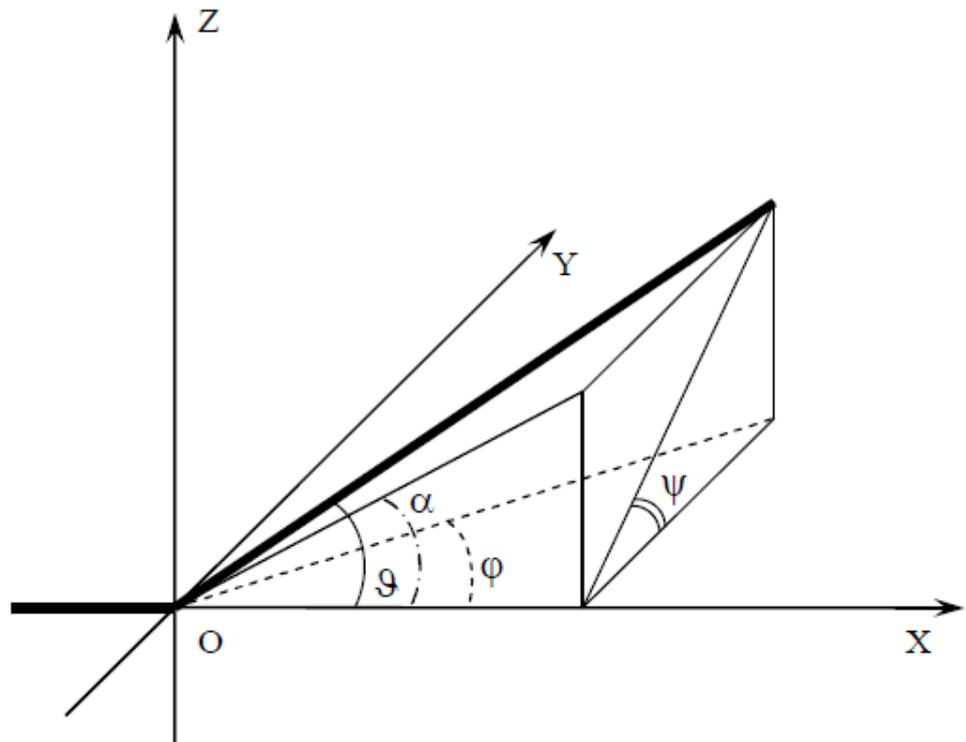


Рисунок 2.3. Определение углов вторичных частиц. OX – направление первичной частицы. Все углы приведены в системе координат, связанной с первичной частицей.

Для первичного трека и треков фрагментов измерялись координаты x, Z_{tr}, Z_s, y - соответственно координаты x трека, z трека, z поверхности эмульсии, y трека.

Переход в систему координат, связанную с первичным треком, производится вычислением плоского угла (φ_0) и угла погружения (α_0) первичного трека. Переход в систему координат, связанную с первичным углом производится по следующим формулам:

$$X_{1_{k1}} = X_{1_{k1}'} \cdot \cos(\varphi_0) \cdot \cos(\alpha_0) + Y_{1_{k1}'} \cdot \cos(\alpha_0) \cdot \sin(\varphi_0) + z_{1_{k1}'} \cdot \sin(\alpha_0);$$

$$Y_{1_{k1}} = -X_{1_{k1}'} \cdot \sin(\varphi_0) + Y_{1_{k1}'} \cdot \cos(\varphi_0); \quad (1)$$

$$z_{1_{k1}} = -X_{1_{k1}'} \cdot \sin(\alpha_0) \cdot \cos(\varphi_0) - Y_{1_{k1}'} \cdot \sin(\alpha_0) \cdot \sin(\varphi_0) + z_{1_{k1}'} \cdot \cos(\alpha_0);$$

Но прежде чем переходить в систему координат, связанную с первичным треком, необходимо исключить возможные ошибки. Нужно было учесть изменение толщины эмульсии:

$$tol1 = \begin{pmatrix} Zc_{1,1} & Zп_{1,2} \\ Zc_{2,1} & Zп_{2,2} \\ \dots & \dots \\ Zc_{i,1} & Zп_{i,2} \end{pmatrix}; \quad i = 3; \quad tol2 = \frac{\sum_i (Zп_{i,2} - Zc_{i,1})}{i} \quad (2)$$

, где $tol1$ - координаты точек для определения толщины эмульсии после усадки, Zc - координата стекла, $Zп$ -координата поверхности, i -количество измеренных точек, $tol2$ -толщина эмульсии после усадки.

После этого следовало учесть усадку эмульсии и произвести перерасчет координат, как первичного трека, так и вторичных треков с помощью следующих формул:

$$primaryTr = \begin{pmatrix} x_1 & Ztr_1 & Zs_1 & y_1 \\ x_2 & Ztr_2 & Zs_2 & y_2 \\ x_3 & Ztr_3 & Zs_3 & y_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n & Ztr_n & Zs_n & y_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$X_j' = x_j - x_n; \quad Y_j' = -(y_j - y_n); \quad z_j'$$

$$= ([Ztr_j - Zs_j] - [Ztr_n - Zs_n]) * \frac{tol}{tol2};$$

$$j = 1..n;$$

,где $primaryTr$ -матрица координат точек первичного трека, n - количество этих точек.

Аналогичным способом проводим перерасчет для координат точек вторичного трека:

$$secTr1 = \begin{pmatrix} x1_1 & Z1tr_1 & Z1s_1 & y1_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x1_{m1} & Z1tr_{m1} & Z1s_{m1} & y1_{m1} \end{pmatrix}$$

$$X1_{k1}' = x1_{k1} - x_n; \quad Y1_{k1}' = -(y1_{k1} - y_n); \quad (4)$$

$$z1_{k1}' = ([Z1tr_{k1} - Z1s_{k1}] - [Ztr_n - Zs_n]) * \frac{tol}{tol2};$$

$$k1 = 1..m1;$$

,где $secTr1$ -матрица координат точек вторичного трека, $m1$ - количество этих точек, tol -изначальная толщина эмульсии.

§2.4 Расчет пространственных углов эмиссии вторичных фрагментов

После всех проделанных операций, был рассчитан плоский угол- φ_0 и глубинный угол- α_0 для первичного трека.

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \arctan \left[\frac{\frac{\sum_j (X_j' * Y_j')}{n} - \frac{\sum_j X_j'}{n} * \frac{\sum_j Y_j'}{n}}{\frac{\sum_j (X_j')^2}{n} - \left(\frac{\sum_j X_j'}{n}\right)^2} \right] \\ \alpha_0 &= \arctan \left[\frac{\frac{\sum_j (X_j' * z_j')}{n} - \frac{\sum_j X_j'}{n} * \frac{\sum_j z_j'}{n}}{\frac{\sum_j (X_j')^2}{n} - \left(\frac{\sum_j X_j'}{n}\right)^2} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

С помощью значений этих углов был совершен переход в систему координат, связанную с первичным треком по формулам (1). После получения новых координат, вычислили плоский угол- φ_1 и глубинный угол- α_1 для вторичного трека.

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \arctan \left[\frac{\frac{\sum_{k1} (X_{1k1} * Y_{1k1})}{m1} - \frac{\sum_{k1} X_{1k1}}{m1} * \frac{\sum_{k1} Y_{1k1}}{m1}}{\frac{\sum_{k1} (X_{1k1})^2}{m1} - \left(\frac{\sum_{k1} X_{1k1}}{m1}\right)^2} \right] \\ \alpha_1 &= \arctan \left[\frac{\frac{\sum_{k1} (X_{1k1} * z_{1k1})}{m1} - \frac{\sum_{k1} X_{1k1}}{m1} * \frac{\sum_{k1} z_{1k1}}{m1}}{\frac{\sum_{k1} (X_{1k1})^2}{m1} - \left(\frac{\sum_{k1} X_{1k1}}{m1}\right)^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Для полного анализа нам так же были необходимы отклонения плоских и глубинных углов вторичных треков (φ и α). Расчет отклонений производился по следующим формулам:

$$\begin{aligned} b\alpha &= \frac{\sum_{k1} z_{1k1}}{m1} - \tan(\alpha_1) \cdot \frac{\sum_{k1} X_{1k1}}{m1} \\ b\varphi &= \frac{\sum_{k1} Y_{1k1}}{m1} - \tan(\varphi_1) \cdot \frac{\sum_{k1} X_{1k1}}{m1} \end{aligned} \quad (7)$$

Все вычисления выполнялись с помощью инженерного математического программного обеспечения **Mathcad**.

Mathcad — программа для реализации и документации инженерных и научных расчётов. Была основана в 1986 году для платформы MS-DOS. Mathcad впервые среди программ подобного рода использовал наборную математическую нотацию, совмещенную с автоматической системой вычислений. Впервые была реализована проверка единиц измерения и автоматическое вычисление, например, СИ. На сегодняшний день сохраняет ориентацию на инженерные приложения, но при этом включает некоторые возможности алгебраических систем для ЭВМ. Первоначально пакет был создан Алэном Рэддоу из Массачусетского технологического института (MIT), который по итогу стал одним из основателей фирмы Mathsoft, ныне являющейся корпорации Parametric Technology. Главными достоинствами пакета Mathcad и его преимуществом перед подобными системами, являются: легкость 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); возможность создания встроенными средствами высококачественных технических отчетов с таблицами, графиками текстом; простота в использовании. Mathcad находит применение в достаточно сложных проектах для визуализации результатов математического моделирования с использованием распределенных вычислений и традиционных языков программирования, несмотря на то, что данная программа ориентирована на пользователей, мало знакомых с программированием. Также программа часто используется в крупных инженерных проектах, где большое значение имеет трассируемость и соответствие стандартам.

§3 Описание результатов

Предполагая линейную зависимость ($F\alpha = a_yx + b_y$ и $F\varphi = a_zx + b_z$) координат точек трека, методом наименьших квадратов были найдены коэффициенты a и b аппроксимирующего полинома первой степени зависимостей координат $F\alpha$, $F\varphi$. По найденным коэффициентам a_y , a_z определялись углы (α , φ) для следов пучковых ядер ^{14}N и вторичных фрагментов. Соответственно b_y и b_z – это отклонения углов α и φ ($b\alpha$, $b\varphi$). Согласно этим предположениям были реконструированы вершины событий представлены на рисунке 3.1. Всего событий 81, реконструировано 302 трека.

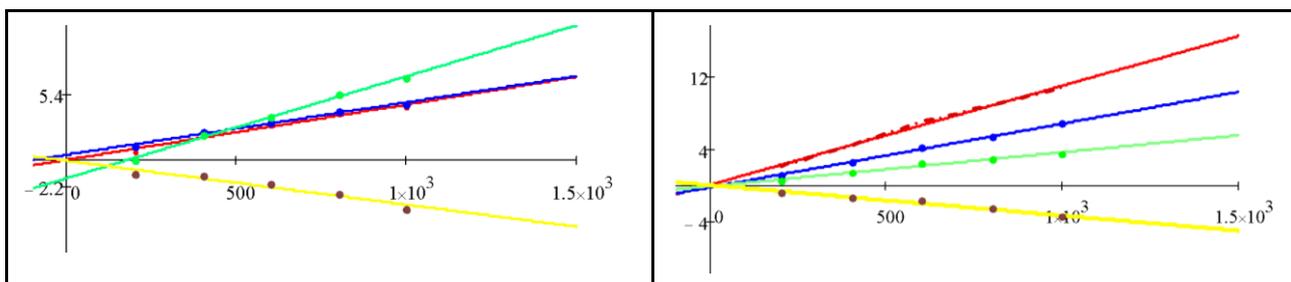


Рисунок 3.1 Пример реконструированных направлений вылетов заряженных фрагментов He и H в событиях $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$ в плоскости ZOx (б, слева) и в плоскости YOx (а, справа).

Согласно анализу удовлетворительно реконструированных треков (57 ± 9) % (171 из 302). Удовлетворительной реконструкцией считается трек пересекающий ось OZ и OY в пределах ± 2 мкм от точки (0,0) (рисунок 3.1, рисунок 3.2). Всего таких треков было найдено 178. Причина такого результата в том, что фрагменты H больше рассеиваются и точность восстановления треков будет меньше, чем для фрагментов He (рисунок 3.3)(Приложение 2). Также заметно преобладание в основном α -частиц.

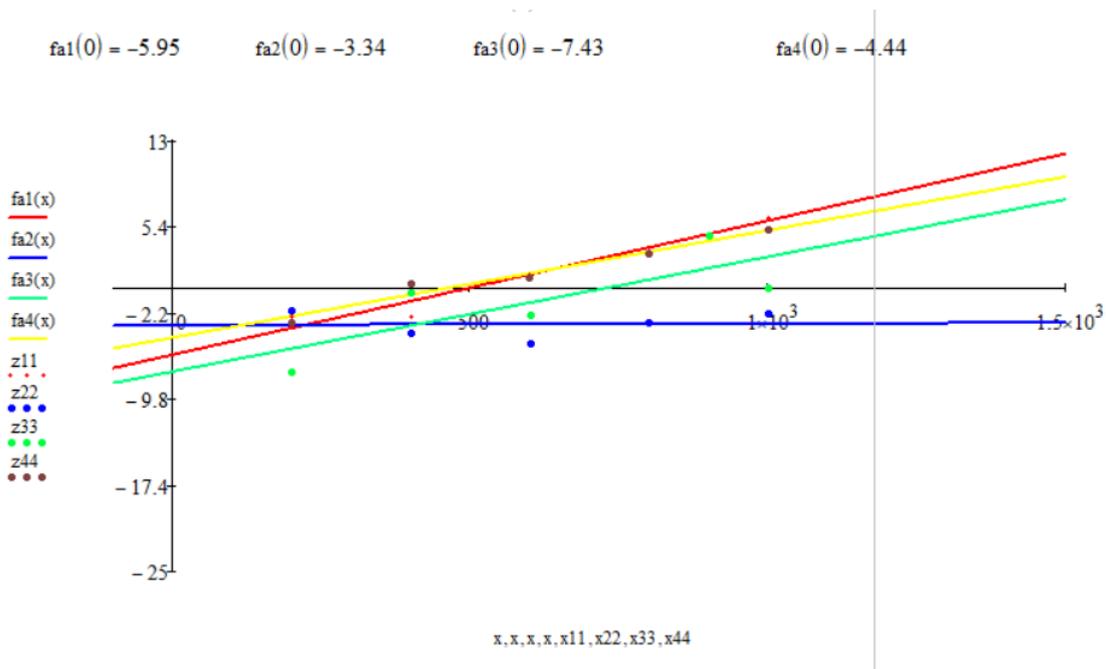


Рисунок 3.2 Пример неудовлетворительной реконструкции треков.

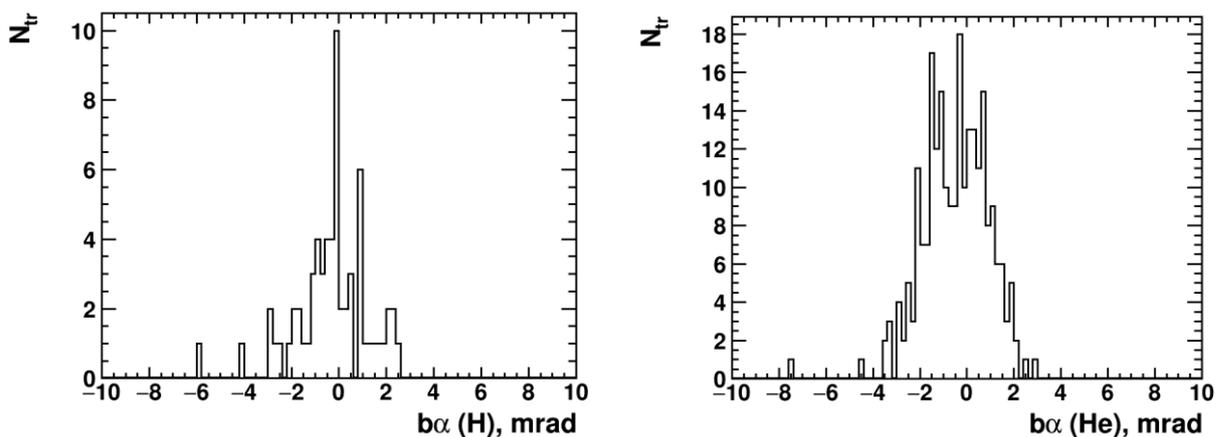


Рисунок 3.3 Распределение $b\alpha$ для частицы H и для частицы He.

Также был оценен разброс измеренных точек от линейной зависимости на возможность рассеяния на большой угол в удовлетворительно реконструированных треках, таких случаев оказалось 7. Рассеяние на большой угол считается в том случае, если есть выпадающая точка (отстает от прямой на расстоянии 5 мкм).

§3.1 Анализ данных и графическое представление результатов с помощью пакета ROOT

ROOT — это пакет объектно-ориентированных программ и библиотек, разработанных в Европейском центре ядерных исследований. Он был разработан

специально для обработки экспериментальных данных физики высоких энергий и включает специфичные для этой области продукты, однако также может быть применены для анализа других данных, например, в астрономии. Среди его характерных особенностей - интерпретатор для языка программирования C++, который позволяет быстро создавать коды анализа на основе классов C++, предоставляемых ROOT, а также усовершенствованный графический пользовательский интерфейс для визуализации и интерактивного анализа данных.

ROOT разрабатывался как высокопроизводительная вычислительная библиотека, необходимая для обработки данных Большого Адронного Коллайдера, поток которых достигает нескольких петабайт в год. С 2009 года ROOT используется в подавляющем большинстве экспериментов физики высоких энергий; абсолютное большинство современных результатов в этой области науки получено именно с использованием ROOT.

Одним из преимуществ использования ROOT простота в создании и обработке гистограмм (1D, 2D и 3D) большим количеством включенных функций и методов [6].

Включение в пакет интерпретатора C++ CINT ощутимо увеличило гибкость пакета, так как позволило использовать средства ROOT в интерактивном режиме или посредством написания скриптов, что сделало его похожим на MATLAB.

§3.2 Одночастичные угловые распределения вторичных фрагментов

Данные обрабатывались с помощью пакета ROOT. Для этого потребовались знания языка C, C++ и непосредственно пакета ROOT. В результате чего была написана программы, задачей которой было считывание данных из файла, построение гистограмм и фитирование с получением параметров (**Приложение 1**).

Основную информацию в фотоэмульсионном эксперименте получают из угловых измерений образовавшихся фрагментов. Результатами программы (**Приложение 1**) являются распределения по глубинному углу α (мрад) и по углу в плоскости эмульсии φ (мрад) для фрагментов He из взаимодействий $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$.

Распределения глубинного (α) и плоского (φ) углов частиц (представлены на рисунке 3.4) характеризуются средними значениями $\langle\alpha\rangle = 1.9245$ мрад и $\langle\varphi\rangle = -0.1932$ мрад, близкими к нулю. Величины среднеквадратичных отклонений равны $\sigma_\alpha = 10.82$ мрад, $\sigma_\varphi = 9.399$ мрад, соответственно (рисунок 3.5). По определению величины углов α и φ являются независимыми. В данных измерениях также не наблюдается корреляций между указанными величинами.

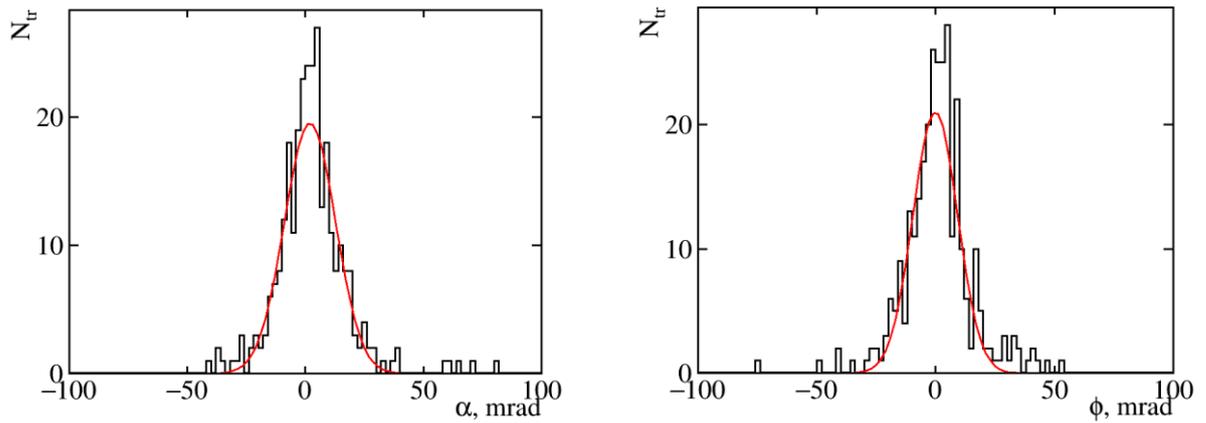


Рисунок 3.4 Распределение по глубинному углу α (мрад) и по углу в плоскости эмульсии ϕ (мрад) для фрагментов He из взаимодействий $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$ (81 событие). Сплошная линия в обоих случаях соответствует аппроксимации функцией Гаусса.

```

Processing alpha_phi.cxx...
FCN=32.8024 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 79 CALLS 80 TOTAL
EDM=4.01198e-10 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 Constant 1.95326e+01 1.70908e+00 3.41773e-03 -5.32245e-06
2 Mean 1.92452e+00 6.83315e-01 1.93682e-03 3.47452e-05
3 Sigma 1.08242e+01 7.02469e-01 3.61386e-05 -1.20965e-03
FCN=56.8273 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 82 CALLS 83 TOTAL
EDM=1.91934e-08 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER STEP FIRST
NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
1 Constant 2.09951e+01 2.05357e+00 4.96114e-03 1.43115e-04
2 Mean -1.93200e-01 6.11654e-01 2.22824e-03 -4.28810e-05
3 Sigma 9.39988e+00 7.03522e-01 4.74604e-05 9.28156e-03
Info in <TCanvas::Print>: file alpha_phi1.png has been created
Info in <TCanvas::Print>: file alpha_phi2.png has been created

```

Рисунок 3.5 Параметры функции Гаусса.

§3.3 Наблюдение предельно узких пар двухзарядных фрагментов

Рассмотрим особенности распределений относительных парных углов Θ между направлениями вылета двухзарядных вторичных фрагментов He в событиях $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$. Угол Θ вычислялся по измеренному плоскому (ϕ) и глубинному (α) углам:

$$\begin{aligned}
 P_x &= P_0 A \cos(\alpha) \cos(\phi) \\
 P_y &= P_0 A \cos(\alpha) \sin(\phi) \\
 P_z &= P_0 A \sin(\alpha) \\
 P_{tot} &= \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}
 \end{aligned}$$

$$\Theta_{2\text{He}} = \frac{P_{x1}P_{x2} + P_{y1}P_{y2} + P_{z1}P_{z2}}{P_{tot1}P_{tot2}}$$

, где P_0 - импульс на нуклон первичного ядра ^{14}N , A - массовое число фрагмента.

На рисунке 3.6 представлено распределение комбинаций пар He по величине относительного пространственного угла $\Theta_{2\text{He}}$. Число входов в гистограмму определяется комбинаторным перебором всех пар из возможных трех фрагментов He в событии ($C_n^m = \frac{n!}{(n-m)!m!} = \frac{3!}{2!} = 3$). В начале спектра в области $\Theta_{2\text{He}} < 7$ мрад наблюдается группа пар с предельно узкими углами между направлениями вылетов заряженных фрагментов He. Доля измеренных событий, удовлетворяющих условию $\Theta_{2\text{He}} < 7$ мрад, составляет $(52 \pm 4)\%$. В этой области распределение описывается параметрами $\langle \Theta_{2\text{He}} \rangle = (3.2 \pm 0.4)$ мрад и $\sigma_\Theta = 2.1$ мрад. Механизмом образования столь узких пар могут являться распады нестабильного ядра $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$. Ранее в диссоциации релятивистских ядер ^9Be , $^{10,11,12}\text{C}$, $^{10,11}\text{B}$ были установлены группы событий с малыми углами $\Theta_{2\text{He}} < 10.5$ мрад. Такие события были интерпретированы как распад нестабильного ядра ^8Be из основного состояния 0^+ [7]. Стоит отметить, что относительный пространственный угол $\Theta_{2\text{He}}$ в событиях распада релятивистского ядра ^8Be тем меньше, чем больше энергия родительского ядра. Поэтому для систематического анализа такого рода событий необходимо перейти к инвариантной переменной, которая не зависит от начальных условий. Однако такой анализ требует дополнительной информации об изотопном составе фрагментов He (требование α -частиц) в узких струях, что выходит за рамки настоящей работы. Проведенный анализ парных углов He представляет собой целеуказание для последующей исследовательской работы.

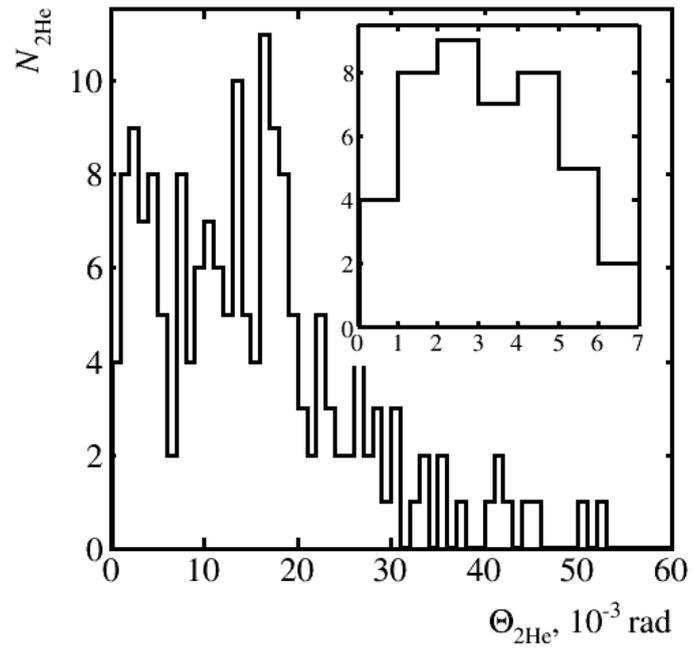


Рисунок 3.6 Распределение по относительному пространственному углу между двухзарядными фрагментами He, образующихся в реакции. На вставке увеличенная область распределения.

Заключение

В процессе работы был изучен и описан метод ядерной фотографической эмульсии, его возможности и перспективы. Кроме того он был применен для исследования фрагментации релятивистских ядер ^{14}N . Была изучена детальная картина релятивистской диссоциации ядер ^{14}N в ядерной фотографической эмульсии, облученной на нуклотроне ОИЯИ. Уникальные возможности эмульсионного метода позволили систематически изучить одночастичные угловые распределения, определить критерии отбора треков, провести анализ парных углов, дать оценку событиям с установленными узкими парами He для релятивистских фрагментов ядер ^{14}N в событиях с образованием фрагментов ядер мишени.

Для анализа данных в работе был освоен пакет ROOT и его возможности в обработке экспериментальных данных физики высоких энергий. На основе экспериментальных данных по диссоциации релятивистских ядер ^{14}N на ядрах из состава ядерной эмульсии были построены распределения относительных углов разлета одно- и двухзарядных фрагментов налетающего ядра, получены основные параметры угловых распределений и оценен вклад событий с предельно узкими группами треков вторичных фрагментов. Для исследования событий диссоциации релятивистских ядер ^{14}N с импульсом 2.86 А ГэВ/с (Нуклотрон ОИЯИ) угловой анализ испускания He частиц указал на возможный вклад распада ядер ^8Be во фрагментацию ядер на уровне $(52 \pm 4) \%$ событий.

Полученные результаты указывают на перспективность дальнейших исследований многочастичных систем легчайших ядер методом релятивистской фрагментации.

Хочу выразить огромную благодарность Зайцеву А.А. за вклад в данную работу.

Список литературы

- 1 Перфилов, Н. А. Ядерные реакции под действием частиц высоких энергий/ О. В. Ложкин, В. И. Остроумов – АН СССР. Ленинградское отделение, 1962.
- 2 Latest nuclear emulsion technology/ Н. Rokujo, Н. Kawahara, R. Komatani, M. Morishita и Т. Nakano – 2017.
- 3 Bradt, H. L. The Heavy Nuclei of the Primary Cosmic Radiation/ H. L Bradt, B. Peters// *Physical Review Journal Archive*. – 1950. – т. 77, p. 54.
- 4 Powel, C. F. The Study of Elementary Particles by the Photographic Method/ C. F. Powel, P. H. Fowler, D. H. Perkins – Pergamon Press, 1959.
- 5 Peripheral interactions of relativistic ^{14}N nuclei with emulsion nuclei/ Т. V. Shchedrina, V. Bradnova, M.M. Chernyavsky, S.P. Kharlamov, A.D. Kovalenko, M. Haiduc, A.I. Malakhov, G.I. Orlova, P.A. Rukoyatkin, V.V. Rusakova, S. Vokal, A. Vokalova, P.I. Zarubin, I.G. Zarubina// *Phys.Atom.Nucl.* – 2007– № 70 :1230-1234.
- 6 Гистограммы/Root.Cern.
- 7 Unstable states in dissociation of relativistic nuclei. Recent findings and prospects of researches /D.A. Artemenkov, V. Bradnova, M.M. Chernyavsky, E. Firu, M. Haiduc, N.K. Kornegrutsa, A.I. Malakhov, E. Mitsova, A. Neagu, N.G. Peresadko, V.V. Rusakova, R. Stanoeva, A.A. Zaitsev, I.G. Zarubina, P.I. Zarubin// *Eur. Phys. J. A* – 2020 –№ 56:1-11.
- 8 Rene Brun. *ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework*/ Rene Brun, Fons Rademakers, 1996.
- 9 Балдин, А. М. Кинематика ядерных реакций/ А. М. Балдин, В. И. Гольданский, В. М. Максименко, И. Л. Розенталь – Атомиздат, 1968.
- 10 Соловьев, Т. Введение в объектно-ориентированный анализ на примере пакета ROOT/ Соловьев Т. – Дубна: ОИЯИ, 2003.
- 11 Т. Щедрина, Исследование фрагментации релятивистских ядер ^{14}N методом ядерной фотографической эмульсии – Дубна, 2008.

Приложения

Приложение 1. Код программы, строящий гистограммы по углам α и ϕ .

```
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <iomanip>
#include <stdlib.h>
using namespace std;
int alpha_phi()
{
    gROOT->SetStyle("Pub");
    fstream F;
    F.open("alphaphi.dat",ios::in);
    double ntrek,name,type,alpha,phi,a,p;
    TH1F* hist1 = new TH1F("alpha","Angle alpha",100,-100,100);
    TH1F* hist2 = new TH1F("phi","Angle phi",100,-100,100);
    if (F)
    {
        while(true)
        {
            F >> ntrek;
            F >> name;
            F.ignore(1024,'\n');
            if(!F) break;
            for(Int_t i=0; i<ntrek; i++){
                F >> type >> alpha >> phi;
                F.ignore(1024,'\n');
                a=alpha*1000;
                p=phi*1000;
                hist1->Fill(a);
                hist2->Fill(p);
                //cout<<alpha<<" "<<phi<<endl;
            }
        }
    }
}
```

```

    F.close();
} else cout<<"No file"<<endl;

TCanvas* c = new TCanvas("c","c",1000,800);
hist1->Fit("gaus");
c->cd(1);hist1->Draw();
hist1->SetLineColor(kBlack);
hist1->GetFunction("gaus")->SetLineColor(kRed);
hist1->GetXaxis()->SetTitle("#alpha, mrad");
hist1->GetYaxis()->SetTitle("N_{tr}");
hist1->GetYaxis()->SetNdivisions(5);
hist1->GetXaxis()->SetNdivisions(5);

hist1->GetYaxis()->SetLabelFont(132);
hist1->GetXaxis()->SetLabelFont(132);

hist1->GetYaxis()->SetLabelSize(0.06);
hist1->GetXaxis()->SetLabelSize(0.06);

hist1->GetYaxis()->SetTitleSize(0.06);
hist1->GetXaxis()->SetTitleSize(0.06);

hist1->GetYaxis()->SetTickLength(0.02);
hist1->GetXaxis()->SetTickLength(0.02);

hist1->GetYaxis()->SetTitleOffset(0.75);
hist1->GetXaxis()->SetTitleOffset(0.75);

hist1->GetYaxis()->SetTitleFont(132);
hist1->GetXaxis()->SetTitleFont(132);

TCanvas* c2 = new TCanvas("c2","c2",1000,800);
hist2->Fit("gaus");
hist2->GetFunction("gaus")->SetLineColor(kRed);
c2->cd(1); hist2->Draw();

```

```

hist2->SetLineColor(kBlack);
hist2->GetXaxis()->SetTitle("#phi, mrad");
hist2->GetYaxis()->SetTitle("N_{tr}");
hist2->GetYaxis()->SetNdivisions(5);
hist2->GetXaxis()->SetNdivisions(5);

hist2->GetYaxis()->SetLabelFont(132);
hist2->GetXaxis()->SetLabelFont(132);

hist2->GetYaxis()->SetLabelSize(0.06);
hist2->GetXaxis()->SetLabelSize(0.06);

hist2->GetYaxis()->SetTitleSize(0.06);
hist2->GetXaxis()->SetTitleSize(0.06);

hist2->GetYaxis()->SetTickLength(0.02);
hist2->GetXaxis()->SetTickLength(0.02);

hist2->GetYaxis()->SetTitleOffset(0.75);
hist2->GetXaxis()->SetTitleOffset(0.75);

hist2->GetYaxis()->SetTitleFont(132);
hist2->GetXaxis()->SetTitleFont(132);

c->Print("alpha_phi1.png");
c2->Print("alpha_phi2.png");
return 0;
}

```

Приложение 2. Код программы, строящий гистограммы отклонения углов α и ϕ .

```

#include <iostream>
#include <fstream>
#include <iomanip>
#include <stdlib.h>
using namespace std;

```

```

int ba2()
{
    fstream F;
    F.open("alphaphi.dat",ios::in);
        int n=0;
    double ntrek,name,type,alpha,phi,a,p;
        TH1D*hist1=newTH1D("ba","ba",100,-10,10);
        TH1D*hist3=newTH1D("ba","ba",100,-10,10);
        TH1F*hist2=newTH1F("bf","bf",100,-6,6);
        TH1F* hist4 = new TH1F("bf","bf",100,-6,6);
    if (F)
    {
        while(true)
        {
            F >>ntrek;
            F >>name;
            F.ignore(1024,'\n');
            if(!F) break;
            for(Int_t i=0; i<ntrek; i++){
                F >>type;
                F.ignore(1024,'\n');
                if(type==6){
                    F>>a>>p;
                    F.ignore(1024,'\n');
                    hist1->Fill(a);
                    hist2->Fill(p);
                }else
                if(type==4){
                    F>>a2>>p2;
                    F.ignore(1024,'\n');
                    hist3->Fill(a2);
                    hist4->Fill(p2);
                }
            }
        }
    }
    F.close();
}

```

```

}else cout<<"No file"<<endl;

TCanvas* c = new TCanvas("c","c",1000,800);
//hist1->Fit("gaus");
c->cd(1);hist1->Draw();
hist1->GetXaxis()->SetTitle("b#alpha (H), mrad");
hist1->GetYaxis()->SetTitle("N_{tr}");
hist1->SetLineColor(kBlack);

TCanvas* c1 = new TCanvas("c1","c1",1000,800);
c1->cd(1);
hist3->Draw();
hist3->SetLineColor(kBlack);
hist3->GetXaxis()->SetTitle("b#alpha (He), mrad");
hist3->GetYaxis()->SetTitle("N_{tr}");

TCanvas* c2 = new TCanvas("c2","c2",1000,900);
hist2->Fit("gaus");
c2->cd(1); hist2->Draw();hist4->Draw("same");
hist2->GetFunction("gaus")->SetLineColor(kRed);
hist2->SetLineColor(kBlack);
hist4->SetLineColor(kBlue);

c->Print("ba6.png");
c1->Print("ba4.png");
//c2->Print("bp2.png");
return 0;
}

```