

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Смоленский государственный университет»

Кафедра физики и технических дисциплин

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДЕР ${}^9\text{Be}$ НА ЯДРАХ
ФОТОЭМУЛЬСИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GEANT4

Выполнил:

студент 5 курса физико-
математического факультета
направления подготовки 44.03.05
Педагогическое образование

(профиль «Физика, информатика»)

АНТОНОВ Семён Сергеевич

Научный руководитель:

Старший научный сотрудник
ОИЯИ, кандидат физико-
математических наук
АРТЕМЕНКОВ Денис
Александрович

Смоленск

2022

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Моделирования ядро-ядерных взаимодействий.	6
§1. Моделирование и подобие в научно-технических исследованиях.....	6
§ 2. Математическое моделирование. Понятие математического моделирования.....	7
§ 3. Моделирование в физике ядра и частиц.....	10
§ 4 Метод Монте-Карло.....	11
§ 5. Описание пакета Geant4	13
§ 6. Управление программой моделирования	19
§ 7. Ядерные модели	21
§ 8. Ядерные реакции.....	22
§ 9. Ядро-ядерные взаимодействия	25
§10. Ядро ${}^8\text{Be}$ в исследованиях структурных свойств Na -ядер.....	28
§ 11. Проект Беккерель на Нуклотроне ОИЯИ	29
Глава 2. Моделирование фрагментации ядер ${}^9\text{Be}$ на ядрах фотоэмульсии в Geant4	33
§1. Ядро ${}^9\text{Be}$ как источник простейших Na систем	33
§2. Облучение релятивистскими ядрами ${}^9\text{Be}$ эмульсий на Нуклотроне ОИЯИ и моделирование прохождения ядер ${}^9\text{Be}$ через объем эмульсии в Geant4.....	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	41
Список литературы	42

Введение

В настоящее время, в физике частиц эксперименты являются совокупностью неоднократного измерения взаимодействия и прохождения частиц сквозь детектор. Многообразие физических моделей позволяет комбинировать различные процессы и эффекты с учетом геометрии детектора, его элементного состава и набора процессов (рождения частиц и образования возбужденных состояний) в зависимости от энергии частиц. Метод Монте-Карло предоставляет хороший способ обработки результатов, полученных при измерениях [29]. Самым большим недостатком является то, что требуется внушительная вычислительная мощность, однако, данная задача вполне решаема, если использовать современную аппаратуру, такую как системы распределённых вычислений, отказоустойчивые и вычислительные кластеры.

Для задач компьютерного моделирования в различных областях человеческого знания разработаны и разрабатываются инструменты, позволяющие правильно подобрать параметры процессов под условия задачи. Проведение тысяч тестовых запусков осуществляется для подбора подходящего оборудования и материалов. При создании установки для исследования учитывается оптимальное сочетание материалов, что требует мощной вычислительной техники, например, как кластеры и системы, способные воссоздать в деталях ход эксперимента. Программный комплекс GEANT4 как раз и разработан исследовательской организацией ЦЕРН для решения подобных задач.

Актуальность темы

Возможность обнаружить необычные свойства объектов в экстремальных условиях и новые явления всегда привлекает внимание ученых. Однако, современные исследования в фундаментальной науке требуют для получения новых знаний, гораздо более сложных и, соответственно, дорогих установок – интегрирующих различные группы сложных детекторов. Каждый запуск установки потребляет огромное

количество времени и материальных средств, отчего следует просчитать эксперимент заранее, свести простой до минимума, предварительно оценить кинематические параметры реакции в геометрии установки.

Особый интерес представляет непрерывно растущий спрос на проведение больших и сложных симуляций физических процессов в детекторах, применяемых в этих установках, что обусловлено увеличением объема, сложности и чувствительности детектора. А самим исследователям необходимы дополнительные навыки в сфере информационных технологий, для применения инструментов моделирования.

Цели исследования

Целью данной работы является моделирование фрагментации ядер ${}^9\text{Be}$ с использованием возможностей Geant4 для создания модели транспорта заряженных частиц через вещество. Объектом исследования является программный комплекс Geant4, а предметом – его функциональные возможности для моделирования реакций фрагментации легких ядер при энергиях Нуклотрона ОИЯИ.

Работа подразумевает решение следующих задач:

- Обзор понятия и описание процесса математического моделирования в физике ядра и элементарных частиц.
- Программный комплекс Geant4 и анализ его функциональных особенностей.
- Моделирование фрагментации ядер ${}^9\text{Be}$ на ядрах фотоэмульсии и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Содержание выпускной квалификационной работы: анализ понятий «моделирование» и «модель», приведение классификаций моделей, понятие и этапы математического моделирования, метод Монте-Карло, история создания Geant3,4, описание пакета Geant4, описание ядерных реакций, их

классификация, описание модели бинарных каскадов (BinaryLightIonReaction), моделирования фрагментации ядер ${}^9\text{Be}$ на ядрах фотоэмульсии, сравнение с экспериментом.

Глава 1. Моделирования ядро-ядерных взаимодействий.

§1. Моделирование и подобие в научно-технических исследованиях

Модель – это естественный или искусственный объект, отражающий немаловажные стороны исследуемой проблемы. В общем смысле моделирование – это метод, используемый при воссоздании действительности для анализа присущих ей объективных закономерностей. В целом оно является методом косвенного познания, где исследуемый, оригинальный объект пребывает в некотором согласовании с вторым объектом, являющимся моделью, кроме того, она может заменять оригинал на отдельных стадиях изучения. Этапы этого познания и то, как модель, соответствующая оригиналу, проявляется в своей первоначальной форме, могут различаться. Говоря о моделировании, можно выделить два характерных вида:

- построение модели как процесс изучения, включающий обработку информации, о происходящих во внешнем мире явлениях. Используя эту информацию в познании возникают образы, обладающие явным сходством с изучаемыми объектами. Совокупность полученных образов даёт возможность обнаружить характеристики взаимодействия исследуемых объектов и свойственные им характеристики. Из чего следует, что модель является математической записью, построенной из суммы образов и описания динамики закономерностей;
- Моделирование представляет собой создание некой системы-модели, обладающей явным сходством с системой оригиналом. Обе эти реализованные системы объединены соотношениями схожести. Сопоставление одной системы с другой не является следствием прямого изучения поступающей информации, а есть результат раскрытия непростых связей между двумя системами, участвующих в соотношении подобия [10].

Моделирование, на первый взгляд, имеет мысленный характер, во-вторых – материальный, так как его осуществление требует формирования особых установок, воссоздающих изучаемую систему. Многообразие

исследуемых объектов и процессов, целей и задач породило множество типов моделей. При построении модели важным фактором является выбор аппаратов, которые могут отличаться в зависимости от решаемой задачи, или от природы и свойств моделируемого объекта.

§ 2. Математическое моделирование. Понятие математического моделирования

Математическое моделирование – описание реальных объектов с помощью математических объектов (чисел, геометрических образов, уравнений, преобразований математической логики). Математические модели отличаются тем, что средством описания моделей и изучения их поведения является формальный аппарат математики. Математическое моделирование – это метод исследования объекта, базирующийся на разработке и применении математической модели для последующего извлечения новых знаний, а также для улучшения или управления изучаемого объекта. Математическое моделирование делится на аналитическое и компьютерное. В аналитическом методе модель обычно строится на основе точного математического описания изучаемого объекта. Компьютерная модель представляет собой компьютерную программу, разработанная на одном из языков программирования.

Компьютерная симуляция применяет любую информацию, для получения новых знаний. Достижения по созданию моделей сопряжены с развитием компьютерных систем моделирования, а прогресс в области информационной технологии связаны с формированием библиотеки моделей, позволяющей составлять новые из уже имеющихся [10].

Эксперимент, проводимый исследователем над изучаемой системой или процессом при помощи компьютерных технологий, является видом компьютерного испытания. Машинный эксперимент стал новым средством академического исследования ввиду увеличивающейся потребности перехода от изучения прямых математических моделей-систем к изучению более сложных, анализ которых проводится намного труднее.

Новые эксперименты требуется для того, чтобы изучить современные гипотезы или применить новые технические решения в производстве, посредством внедрения новых разработок. А еще совсем недавно, такие испытания могли проводиться только на лабораторных установках, или на реальном экземпляре изделия, подвергая его множеству проверок. Математическая симуляция – это метод исследования реальных объектов, процессов или систем посредством их замещения более практичных для компьютерных исследований математических моделей [12].

Математическая модель является примерным представлением реальных объектов с сохранением исходных характеристик, которая описывает его внутренние и внешние связи. Для построения математической модели требуется разработка математического аппарата, позволяющего количественно и качественно описать связь между любым процессом и явлением, влияющим на итоговый результат.

Обычно модель-система реального объекта является совокупностью функционалов:

$$\varphi(X, Y, Z, t) = 0, \quad (1)$$

$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_1}]$, множество входных данных,

$Y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_{N_2}]$, множество выходных данных,

$Z = [z_1, z_2, z_3, \dots, z_{N_3}]$, вектор внешних воздействий,

t – координата времени [12].

Наиболее очевидную роль математическое моделирование сыграло в физике. После того, как Ньютон создал основы теоретической механики, последняя превратилась в строгую систему математических моделей. Через теоретическую механику математика пришла в технику.

С помощью математической машинной имитации можно быстро и свободно оценить влияние любого элемента рабочего процесса, включая объекты, которые трудно воспроизвести при естественном моделировании. Такой подход позволяет быстро обрести сравнительные расчёты для машин разных конструкций, что сложно получить при реальных испытаниях. Благодаря чему становится целесообразным применение математического

моделирования при формировании характеристик оборудования и поиске причин расхождения реальных характеристик от эталонных, при определении максимальных нагрузок и изучении вариантов модернизации установок.

На данный момент:

- Математическая симуляция выступает как осознанный специальный метод исследования, а во многих дисциплинах (например, экономике, экологии) как один из основных методов;
- осознание математического моделирования как метода привело к постановке вопроса об адекватности моделей целям исследования. Вошло в практику создание системы моделей разной степени точности и сложности;
- использование вычислительной техники развило методы создания и исследования математических моделей. Машинный эксперимент постепенно утвердился как метод исследования математических моделей.

Основные трудности при применении метода математического моделирования возникают с написанием компьютерной программы и её дальнейшим изменением для увеличения ряда решаемых задач, или при замене программы на другую из-за изменения структуры изучаемого объекта. Данные проблемы усложняются еще тем, что нередко разработчики либо исследователи встречаются с машинами, имеющими различное строение и устройствами с различными характеристиками. Для определения правильного уравнения динамики рабочих процессов необходимы серьезные теоретические знания в определенной сфере. Необходимо также учитывать увеличивающуюся сложность программ [6].

В этом случае целесообразен переход на проблемно-ориентированные программы, каждая из которых предназначена для определенного класса машин или устройств и создается объединенными усилиями специалистов в области рабочих процессов машин и программистов. Программы должны быть универсальными, чтобы охватить весь класс исследуемых машин, и

вместе с тем достаточно простыми в применении, доступными для использования широкому кругу специалистов.

Создание математической модели при решении прикладных задач – важнейший этап работы. Исследования выявили, что точность в подборе модели в большинстве случаев решает больше половины задачи. Проблема этого этапа заключается в требовании объединения математических и специальных знаний. Следовательно, математикам занимающимся решением прикладных задач, принципиально иметь особые познания об объекте, а экспериментаторы обязаны владеть опытом исследования в своей области, а также владеть навыками программирования [10,12].

§ 3. Моделирование в физике ядра и частиц

В настоящий момент, опыты в физике элементарных частиц, зачастую, являются многократным измерением взаимодействия частиц и прохождения их сквозь сенсор. Аналитическое решение вопроса о прохождении частиц сквозь вещество описывается дифференциальными уравнениями, однако при учете дополнительных процессов возникают новые интегралы рассеяния, из-за чего решение этих уравнений становится более трудоемким. Метод Монте-Карло в свою очередь упрощает расчеты результатов подобных измерений. Главная проблема такого подхода заключается в том, что для этого нужна большая вычислительная мощность, но используя современную технику эта задача может быть решена.

В наше время изучения ориентированы на еще более полное освоение устройства Вселенной. Для извлечения новых знаний сейчас необходимы всё более сложные и ресурсозатратные установки – коллайдеры, синхротроны, и др. Началу работы установки предшествует подготовительный процесс (например, охлаждение сверхпроводящих магнитов ионопровода), а рабочее время установки является ценным ресурсом, на который претендуют, обычно, несколько групп экспериментаторов. Поэтому к эксперименту принято готовиться предварительно. Повышение сложности и чувствительности детекторов привело к росту спроса на крупномасштабные симуляции прохождения частиц сквозь детекторы, которые используются в

этих установках. К тому же высокий спрос поддерживается появлением эффективных и недорогих компьютерных систем, способных выполнять большие и сложные испытания.

Именно для таких задач были разработаны инструменты для компьютерного моделирования. Geant4 является одним из таких инструментов. Комплекс разработан специалистами исследовательской организации ЦЕРН, Женева, Швейцария.

§ 4 Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло является лучшим при исследовании процесса транспортировки частиц через вещество, проводя большое число выборок, в связи с чем данный метод значительно увеличивает нагрузку на вычислительную технику. При осуществлении испытаний методом Монте-Карло устройство моделирует данные из исследуемой генеральной совокупности, а затем генерирует псевдослучайные числа. Достоверная имитация исходного выборочного распределения происходит только после многократного повторения [10].

Этот метод используется для расчета диапазона и частоты измеренных значений, полученных в этом интервале для количественных переменных, а также, когда результаты не получаются аналитическим способом.

Для осуществления симуляции методом Монте-Карло требуются начальные значения, представленные в виде продуманной модель-системы, сведения о виде начальных значений, о источниках выходных данных. Начальные значения и соответствующую им неопределенность рассматривается как набор случайных чисел, и для этого зачастую применяют нормальные распределения.

Процесс создания симуляции имеет два этапа:

1. Нахождение модели, позволяющей достоверно дать описание поведения изучаемой системы.
2. Неоднократная проверка модели-системы с применением генератора случайных чисел для извлечения выходных значений. При желании имитируют воздействие неопределенности. Модель представляют в

виде уравнения, показывающего связь начальных и результирующих характеристик. Выбранные начальные значения берутся из соответствующих распределений вероятностей, которые указывают на неопределенность данных.

При помощи вычислительной техники реализованная в коде модель может быть запущена на выполнение, часто, с различными значениями исходных данных. Результаты симуляции проверяются статистическим методом получения стандартного отклонения в доверительном интервале.

В качестве выходных значений можно принимать характеристики оборудования либо плотность распределения вероятности.

При решении задач транспортировки частиц через вещество метод Монте-Карло представляет собой вычисление координат ($x, y, z, t, p_x, p_y, p_z$) перемещения частицы сквозь заранее подготовленные объемы. С помощью распределений вероятности, описываемых дифференциальными уравнениями, проводится расчёт свободного пробега частиц, определяются направление движения после рассеяния и потери энергии [29]. Для определения желаемых параметров происходит обработка результатов, полученных из заданного числа конфигураций.

Метод Монте-Карло зачастую применяют, чтобы дать оценку распределения входных и выходных данных, а также для оценки:

- вероятности установленных состояний;
- Выходных значений с заданным пределом в некотором доверительном интервале, которые не должны нарушаться [6].

Изучение взаимосвязи между входными и выходными значениями может подчеркнуть важность идентификации системы и определить способы снижения неэффективности выходных величин.

Достоинства:

1. Способ возможно адаптировать к любому входному распределению.
2. Модели могут расширяться при желании, и к тому же они просты в управлении.

3. Такой подход позволяет учитывать все аспекты взаимодействия для достижения требуемой точности результатов.
4. Имеется возможность изучать чувствительность устройств для определения сильных и слабых влияний.
5. Метод позволяет использовать модели высокого качества для изучения многокомпонентных систем [6].

Недостатки:

1. Точность получаемых результатов зависит от количества выполняемых повторений, однако, этот дефект становится незначительным с увеличением производительности компьютерной техники.
2. Неопределенность данных нельзя описать известным распределением, однако, метод подразумевает обратное.
3. Процесс создания симуляции могут затруднять крупномасштабные проекты.
4. Метод ограничивает его использования при анализе рисков, поскольку при очень низкой или очень высокой вероятностью появления практически невозможно оценить или предсказать симуляцию событий.

От развития методов, способствующих уменьшению дисперсии расчётов и от производительных компьютерных систем, напрямую зависит успех применения метода Монте-Карло [10].

§ 5. Описание пакета Geant4

Инструменты, встроенные в GEANT4, позволяют дать достоверное описание эксперименту в физике частиц: физические процессы, управляющие взаимодействием частиц, типы исследуемых частиц, задействованных в эксперименте химический состав материалов, геометрию системы.

GEANT4 – это бесплатный программный пакет, включающий компоненты, используемые для описания физических процессов в физике элементарных частиц, ядерной физике и т.д. [4].

Сложные методы объектно-ориентированного программирования обеспечивают высокую прозрачность при описании отдельных модулей в проектировании модели. Например, вычисление сечения взаимодействия определяется отдельно от способа, где оно используется, что упрощает модификацию или расширение взаимодействий, происходящих в эксперименте.

GEANT4 представляет собой набор библиотек и классов, с помощью которых можно описать следующие характеристики компьютерной модели:

1. Вид и характеристики задействованных в эксперименте частиц. Например, свойства частиц, такие как масса, спин и т.д. можно задать классом `G4ParticleDefinition`, а при помощи класса `G4DynamicParticle` можно задать динамические свойства частиц (энергию, поляризацию, момент импульса и т.д.) [7].

2. Генерация первичных частиц. Класс `G4PrimaryGeneratorAction` отвечает за создание первичных компонентов, при помощи которого можно задать характеристики и форму вылетающего пучка.

3. Класс `G4PhysicsList` отвечает за физические процессы, определяющие взаимодействия частиц. Он описывает все процессы для частиц, реализованных в симуляции. Чаще всего используют уже готовые модели, созданные для определенных целей, так как при моделировании нужно учитывать массу деталей, на что уходит много рабочего времени. [4].

4. За извлечение информации о каждом событии отвечает класс `G4Event`. В нём хранятся данные о каждом событии, треке, построенном моделью. А за каждый шаг моделирования отвечает класс `G4Step`.

5. Задание геометрии системы. Классом, отвечающим за геометрию эксперимента, является `G4DetectorConstruction`. Классом, отвечающим за геометрию эксперимента, является `G4DetectorConstruction`, который позволяет разработать точную модель реального объекта, со всеми имеющимися характеристиками, такими как материал, расположение частиц и т.д.

6. Материалы, из которых состоит геометрия системы. Класс G4Element предоставляет большой набор материалов, используемых для эксперимента, так как GEANT4 позволяет создавать инструменты путем создания объектов. Затем из разработанных элементов создается нужный материал. Способов создания множество, например, из элементов создать молекулы или смесь нескольких элементов с определённым весовым коэффициентом [4].

7. Класс G4SensitiveDetector определяет чувствительность детекторов моделируемой системы, при попадании частиц в которые будет проводиться анализ характеристик и взаимодействия.

8. Визуализация. Одним из основных достоинств программного комплекса GEANT4 является возможность проведения визуализации эксперимента посредством графических систем OpenGL, OpenInventor, HerRep, DAWN, VRML, RayTracer, ASCII Tree. И это лишь основные классы, используемые при моделировании.

Весь набор классов для модели Geant4 реализуют описание используемых объектов и их функциональность. Что разрешает разработчикам, использующим пакет Geant4, повышать эффективность классов, не подходящих своей исходной функциональностью для решения задачи. Из чего следует, что при описании явления в сущностях модели GEANT4, происходит их формализация, детализация и наполнение функциональностью.

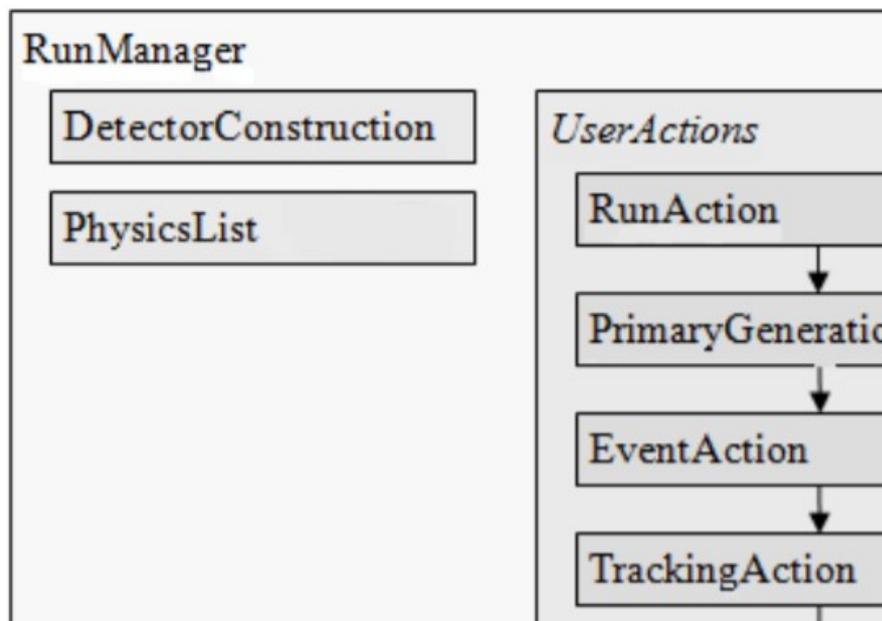


Рис. 1. Основные классы Geant4 используемые при моделировании.

За конфигурацию симуляции отвечает класс RunManager. Класс DetectorConstruction используется при описании геометрии системы и используемых материалов мишени и детектора. Задействованные части и их взаимодействия берутся из класса PhysicsList. На каждом этапе используются множество классов из библиотеки UserActions для понимания процесса проектирования, такие как:

RunAction – первый шаг, на котором рассчитывается геометрия системы, определяются используемые элементы и рассчитывается эффективное сечение реакции;

EventAction – отвечает за запуск, остановку и количество вылетаемых частиц.

TrackingAction – этап начала/конца создания трека частицы, позволяет получить информацию о треке частицы, например длину [4].

PrimaryGenerationAction – процесс создания начальной частицы. Здесь определяется тип частицы, начальная энергия и направление движения;

В GEANT 4 учитываются следующие физические процессы:

1. Электромагнитные взаимодействия:

- «Процессы с участием электрон-позитронных пар: ионизация (G4eIonization), тормозное излучение (G4eBremsstrahlung), аннигиляция позитронов в гамма-кванты (G4eplusAnnihilation),

аннигиляция в мюоны (G4eplusAnnihiToMuPair), синхротронное излучение (G4SynchrotronRadiation)» [4];

- «Процессы с участием гамма-квантов: фотоэффект (G4PhotoElectricEffect), комптоновское рассеяние (G4ComptonScaterring), образование электрон-позитронных пар (G4GammaConversation), образование мюонных пар (G4GammaConversationToMuons), комптоновское рассеяние линейно поляризованных гамма-квантов (G4PolarizedCompton), рэлеевское рассеяние» [4];
- «Процессы, общие для всех заряженных частиц: многократное рассеяние (G4MultipleScattering), переходное излучение (G4TransitionRadiation), сцинтилляционный эффект (G4Scintillation), эффект Черенкова (G4Cerenkov), фотоабсорбционная ионизационная модель (G4PAIModel)» [4];
- «Процессы с участием заряженных адронов: ионизация (G4hIonisation)» [4].

2. Сильные взаимодействия (процессы с участием адронов) [4].

Компиляция программ осуществляется посредством утилиты-программы `stake` в соответствии с правилами синтаксиса языка C++, а сборка осуществляется линковщиком из объектных файлов, предварительно скомпилированных посредством программного комплекса `Geant4`. Происходит это по следующему сценарию: Сначала дается описание геометрии системы-модели, определяется эффективное сечение реакции используемых частиц с материалами, при котором происходят взаимодействия. Затем происходит запуск частиц, количество которых определяет пользователь. Создается трек, который разделяется на множество событий (шаги). Используя созданную таблицу сечений в каждом событии происходит выбор и реализация заданного заранее процесса взаимодействия. Движение продолжается до тех пор, пока частица полностью не потеряет свою энергию или, пока не произойдет взаимодействие, после которого программист задал полную остановку. В процессе симуляции при

образовании вторичных частиц, аналогично, создается её трек, а затем программа возвращается к начальной частице. Моделирование завершается в том случае, когда обработаны данные по всем частицам, или в случае возникновения ошибки. Исследователь может привязать к модели добавочный функционал, в следствии чего появится новая информация о частицах. Данная информация используется для построения закономерностей.

Симуляция состоит из множества событий, каждое из которых заключается в испускании начальных частиц и их последующее движение сквозь заданное вещество или детектор, вплоть до полной остановки частицы. Трек частицы – параметр, который показывает её перемещение от начала взаимодействия до полной остановки. Запуском симуляции называется совокупность всех испусканий частиц в одной и той же установке.

```
#include "G4RunManager.hh"
#include "DetectorConstruction.hh"
#include "PhysicsList.hh"
#include "PrimaryGeneratorAction.hh"
#include "EventAction.hh"
#include "RunAction.hh"
#include "SteppingAction.hh"
int main()
{/(1)G4RunManager * runManager = new G4RunManager;
/(2)
runManager -> SetUserInitialization (new CectorConstruction);
runManager -> SetUserInitialization (new PhysicsList);
xunManager -> SetUserAction (new PrimaryGeneratorAction);
// (3)
runManager -> SetUserAction (new RunAction);
runManager -> SetUserAction (new EventAction);
runManager -> SetUserAction (new SteppingAction) ;
// (4)
runManager -> Initialize();
// (5)
runManager ->BeamOn (10);
// (6)
```

```
delete runManager;  
return 0;}
```

Приведенный листинг является главной частью программы, в которой собираются (инициализируются) все сущности моделирования. Объем кода этой части программы составляет весьма малую долю от всего программного кода.

§ 6. Управление программой моделирования

Исследователь может использовать средства визуализации в четырех режимах:

- Пакетный режим
- Пакетный режим, управляемый сценарием
- Интерактивный режим с командной строкой
- Интерактивный режим с графическим интерфейсом

Главным отличием между этими режимами является их функционал и способы управления. Например, в пакетный режим запускает моделирование благодаря тас-файлу, в который заранее внесены нужные параметры частиц, а также характеристики детектора или вещества. Меняя содержимое тас-файла, можно менять симуляцию, в зависимости от требований исследования. Geant4 имеет заготовленный набор команд, в связи с чем в режиме командной строки можно менять характеристики установки симуляции, геометрические параметры модели, набор участвующих в моделировании процессов и т.д. В зависимости от поставленных задач список команд меняется, однако, стандартный набор можно разделить на следующие категории:

- /control – управление интерфейсом
- /units – система единиц
- /geometry – навигация и проверка перекрытий объемов
- /tracking – управление объектами (TrackingManager, SteppingManager)
- /event – управление параметрами запуска EventManager
- /cuts – управление пороговой энергией для деления частиц

- /run – управление запуском
- /random – генерация случайных значений
- /material – просмотр доступных материалов и их свойств
- /particle – изменение списков и характеристик частиц
- /process – изменение списка активных процессов
- /vis – визуализация
- /gun – управление генератором начальной вершины
- /hits – управление детекторами
- /score – управление счетчиками

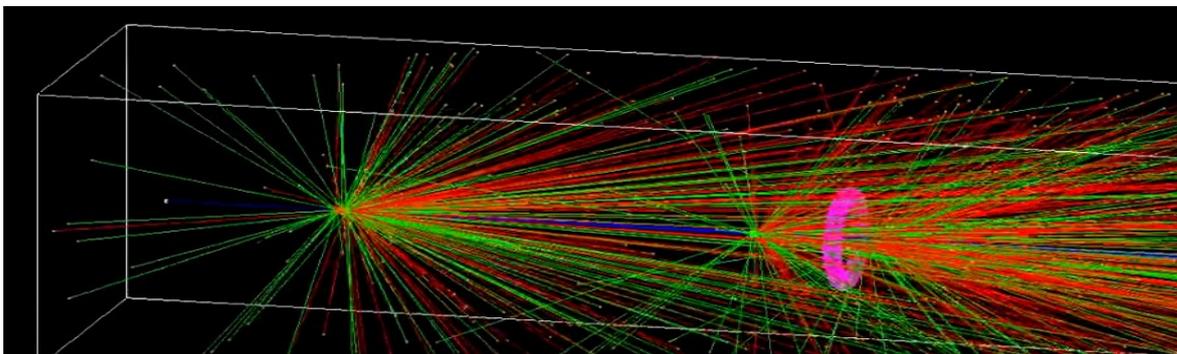


Рис. 2. Прохождение частиц через мишени и Тор-детектор.

В Geant4 доступна визуализация объемов детектора или отдельно взятых подсистем, траекторию движения частиц, взаимодействия с веществом. А также, имеется возможность добавить оси координат, маркеры, текст и масштабные линейки [4].

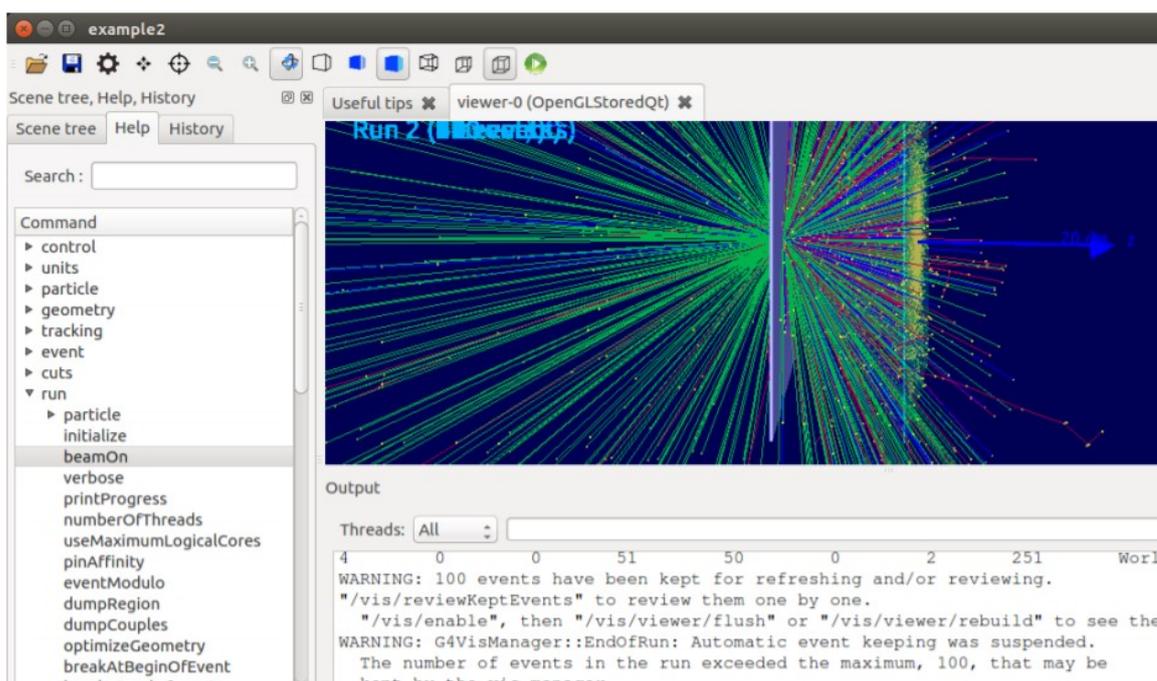


Рис. 3. Процесс визуализация прохождения частиц через вещество.

К тому же стоит заметить, что проект GEANT4 постоянно совершенствуется, из-за того, что большинство типовых задач можно решить с его помощью. Например, в CERN проводятся симуляции многих узлов большого адронного коллайдера при помощи библиотек GEANT4. Поэтому создание программ для построения моделей является перспективным способом моделирования.

§ 7. Ядерные модели

Ядерная модель – это простое представление атомных ядер, основанное на представлении ядра с предварительно известными характеристиками. Необходимость в использовании таких моделей-систем состоит в том, что не существует точной теории атомного ядра. Теоретически описать эти системы очень сложно, например, потому что к неполным знаниям о свойствах ядерных сил еще добавляется тот факт, что сами нуклоны являются составными частицами, из-за чего увеличивается число степеней свободы, учитываемых в теории ядра. Пользуясь ядерными моделями можно получить понимание процессов, происходящих внутри и с участием атомных ядер [5].

При построении модели атомных ядер, их представляют в форме некоторого объекта с характерными свойствами, которые впоследствии объясняют поведение ядра в разных условиях (распадах, реакциях). Модель зачастую представляется в виде уравнений с учетом квантово-механического состояния ядра, а затем модель используют для предсказания результатов ядерного эксперимента.

Существует множество различных ядерных моделей, каждая из которых способна дать описание ограниченному числу ядерных свойств. Некоторые даже являются взаимоисключающими.

Формально такие модели разбиваются на два типа – микроскопические и коллективные. Микроскопические модели объясняют поведение отдельно взятых нуклонов ядра, в то время как коллективные учитывают общее движение больших групп нуклонов (кластеров, конгломератов).

Самой распространённой микроскопической моделью считается оболочечная модель, предполагающая, что после взаимодействия нуклонов друг с другом в ядре образуется общая потенциальная яма, внутри которой заполнение нуклонов происходит по определенным орбитам с заданными квантовыми свойствами и определенной энергией. Орбиты имеют ограничения по количеству расположенных на них нуклонов, а также группируются в оболочки со схожими энергиями. В случае если оболочка полностью заполнена нуклонами, возникают устойчивые магические ядра. Подобным образом атомы благородных газов, обладающие заполненными электронными оболочками, характеризуются повышенной устойчивостью [11].

Коллективной моделью считается ротационная модель ядра, которая описывает деформированные ядра. В данной модели низко расположенные состояния появляются из-за вращений ядер вокруг центральной оси с разными угловыми скоростями.

Разновидность моделей отображает разницу в поведении ядер при различных ситуациях, т.е. ядро может вести себя и как модель Ферми-газа, и как модель жидкой капли и т.д. Холодная ядерная жидкость имеет свойство сверхтекучести.

§ 8. Ядерные реакции

«Основную роль в развитии теории ядер стало изучение ядерных реакций, что расширило представление о спинах, четности возбужденных ядер, а также дало толчок в развитии модели оболочек. Исследование реакций с обменом несколькими нуклонов между соударяющимися частицами позволило изучить динамику ядер с большими угловыми моментами. В результате чего были открыты длинные ротационные полосы, что стало основой создания оболочечной модели. При столкновении тяжелых ядер образуются новые, не существующие в природе. Синтез трансурановых элементов в значительной мере основывается на физике взаимодействия тяжелых ядер. В реакциях с тяжелыми ионами образуются ядра, удаленные от полосы β -стабильности. Ядра, удаленные от полосы β -стабильности,

отличаются от стабильных ядер иным соотношением числа протонов и нейтронов, сильным различием в энергиях связи, что проявляется в новых видах радиоактивного распада – протонной и нейтронной радиоактивности и рядом других особенностей атомных ядер.» [11].

При анализе ядерных реакций важно учитывать волновую природу частиц, с которыми сталкиваются ядра. При взаимодействии частиц с ядрами волновой характер легко определяется при упругом рассеянии. Например, для нуклонов с энергией 10 МэВ радиус ядра больше приведенной дебройлевской длины волны λ и при рассеянии нуклонов получается изображение дифракционных максимумов и минимумов. Для нуклонов с энергией 0.1 МэВ дифракции нет, из-за того, что радиус ядра меньше длины волны λ . Для нейтронов с энергией $\ll 0.1$ МэВ сечение реакции $\sim \frac{\pi\lambda}{2}$, что намного больше, чем соответствующий размер площади ядра πR^2 .

Ядерные реакции считаются действенным способом изучения ядерной динамики. В процессе ядерной реакции между участвующими частицами совершается активное перераспределение энергии, в следствии чего появляется одна или несколько частиц, разлетающихся от места взаимодействия. В результате ядерной реакции происходит процесс изменения атомного ядра. При объяснении ядерных реакция сложно получить точное решение задачи в связи с нехваткой знаний в теория атомного ядра. В связи с чем процесс ядерной реакции можно описать множеством различных механизмов реакций. Этот механизм от ряда факторов: типа и энергии налетающей частицы, типа мишени и других.

«В случае прямой ядерной реакции, налетающая частица отдаёт свою энергию одному или нескольким нуклонам, вследствие чего которые покидают ядро без взаимодействия с другими нуклонами в ядре. Прямая ядерная реакция протекает в течении 10^{-23} с. Такие реакции происходят с налетающими частицами любой энергии и используются для исследования одночастичных состояний ядер, потому что продукты реакции несут в себе информацию о расположении уровней, из которых вырывается нуклон. При помощи прямых ядерных реакций была получена полная информация о

энергиях и заполнении одночастичных состояний ядер, которая вошла в основу оболочечной модели ядра. Еще одним действенным способом изучения ядерной динамики являются реакции, идущие посредством образования составного ядра.» [11].



Рис. 4. Описание механизма ядерных реакций.

Классификация ядерных реакций.

Строение атомных ядер весьма эффективно изучать посредством использования метода ядерных реакций. Информацию из сечения реакции о плотности распределения ядерной материи, извлекают в случае, когда длина волны меньше размеров ядра, а информация о ядре в целом получается в случае, когда размер ядер меньше длины волны налетающей частицы λ .

- Возможность изучения ядер далеких от стабильности с необычным соотношением числа протонов и нейтронов возможны при реакциях, происходящих на радиоактивных ядрах.
- При взаимодействии с ядрами γ -квантов и электронов с энергией $E > 10$ МэВ проходят фотоядерные и электроядерные реакции.
- При исследовании низколежащих вращательных уровней тяжёлых ядер используется кулоновское возбуждение ядер под действием протонов или α -частиц.
- Главным способом получения сверхтяжелых ядер считается реакция на тяжелых ядрах с тяжелыми ионами, которые приводят к слиянию ядер, участвующих при столкновении.

- Полное изменение ядра происходит при реакции деления тяжелых ядер.
- Термоядерные реакции проходят с легкими ядрами при низкой энергии столкновения и температурах 10^7-10^{10} К за счет квантово-механического туннелирования сквозь кулоновский барьер, и считаются главным источником энергии звезд.

Ядерные реакции зачастую классифицируют по энергии налетающей частицы и типу мишени [5].

§ 9. Ядро-ядерные взаимодействия

Внутриядерный каскад

Модель внутриядерных каскадов (Binary Cascade Model) используемая для моделирования взаимодействия релятивистских ядер ${}^9\text{Be}$ с ядрами фотоэмульсии подробно описана в статье [36]. Модель бинарных каскадов в Geant4 представляет собой гибрид классического внутриядерного каскада и модели QMD (квантовой молекулярной динамики) для симуляции неупругого рассеяния пионов, протонов, нейтронов и легких ионов при промежуточных энергиях на ядрах. Ядро в данной модели представляется собой в виде трехмерной изотропной сферически симметричной системы нуклонов. Плотность нуклонов для ядер с $A \leq 16$ используется в виде:

$$\rho(r) = (\pi R^2)^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{r^2}{R^2}\right), \text{ где } R \sim A^{1/3}. \quad (2)$$

Для более тяжелых ядер описывается соотношением Вудса-Саксона [36]. Импульс нуклону в составе ядра задается случайным образом в диапазоне от нуля до импульса Ферми $p_F(r)$ в виде приближения Томаса-Ферми как функция плотности и радиуса: $p_F(r) = \hbar c(3\pi^2\rho(r))^{1/3}$. Суммарный импульс всех нуклонов при этом должен быть равен 0. Влияние ядерных сил на нуклоны внутри ядра описывается независимым от времени ядерным потенциалом, зависящим от Ферми импульса для конкретного ядра

$$V(r) = -\frac{p_F^2(r)}{2m}, \quad (3)$$

где m -масса нуклона (протона или нейтрона). Как функция от плотности нуклонов наиболее простой вид потенциал приобретает для случая каскада, инициируемого пионом [36]. В модели учитывается рождение ряда нуклонных резонансов при достижении соответствующих энергий взаимодействующих частиц.

В модели внутриядерных каскадов частица, быстро налетающая начинает движение внутри ядра по классической траектории, соударяется с нуклонами, передавая им энергию. Затем эти нуклоны начинают сталкиваться с другими нуклонами в ядре, в результате чего образуется цепная реакция, на различных этапах которой некоторые нуклоны могут покинуть ядро. В этом случае вблизи поверхности ядра вылетевшие нуклоны могут собраться в составную частицу (рис.6). В качестве бомбардирующей частицы может выступать другое ядро (состоящее из нуклонов). В этом случае ядро-ядерное взаимодействие редуцируется до отдельных нуклон-нуклонных столкновений с развитием последующих каскадов. Рассеяние легких ионов (ядер) на ядрах вещества описывается как распространением нуклонов ядра-снаряда как свободных частиц через ядро мишени. Образующиеся в результате взаимодействия с ядром мишени фрагменты первичного ядра (ядра-снаряда) формируются из первичных нуклонов, не испытывающих никакого взаимодействия. Энергия возбуждения фрагмента определяется исходя из параметров взаимодействующих нуклонов и исходных данных моделирования [35].

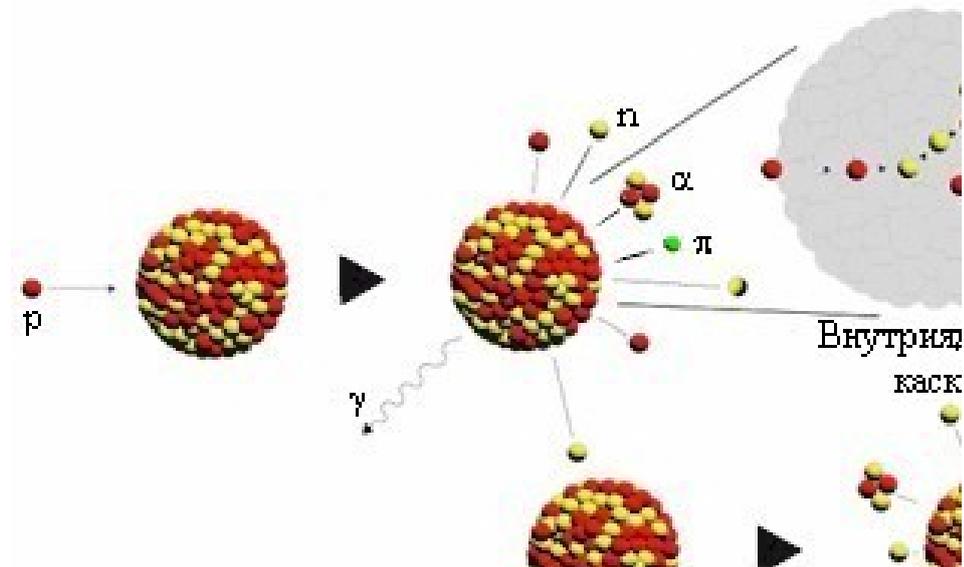


Рисунок 5. Иллюстрация внутриядерного каскада при попадании протона в ядро мишень с последующим испусканием набора вторичных частиц.

Модель бинарных каскадов (BinaryLightIonReaction), которая используется для симуляции ядро-ядерных взаимодействий релятивистских ядер ${}^9\text{Be}$ с ядрами фотоэмульсии, является расширением модели бинарных каскадов в Geant4 (Binary Cascade) в диапазоне энергий от 80 МэВ/нуклон до 10 ГэВ/нуклон.

Проводя частицу через объем мишени-детектора, которым является ядерная фотографическая эмульсия, Geant4 случайным образом разыгрывает величину прицельного параметра d (расстояние наименьшего сближения между нуклонами ядра снаряда и нуклонами ядра мишени). При этом относительное движение нуклонов внутри ядра мишени не учитывается. Для взаимодействия выбираются те ядра, нуклоны которых, расположены ближе ядру-снаряду. Если $d < \frac{\sqrt{\sigma_i}}{\pi}$, где σ_i – инклюзивное сечение взаимодействия, то дальше идет расчет внутриядерного каскада и формирование в результате симуляции набора вторичных частиц и ядер-фрагментов первичного ядра, рассчитываются их импульсы, определяющие в конечном итоге направление вылета и их кинетическую энергию, иначе процесс розыгрыша прицельного параметра d повторяется. Развитие каскада ограничивается первичными параметрами моделирования, при определении перечня частиц учитывается

принцип Паули, ядро-снаряд вводится в модель в виде набора нуклонов [35]. Образующийся в результате моделирования спектр фрагментов и их параметров записывался в выходной файл.

Реакции с легкими ядрами

При моделировании реакций между легкими ядрами начальное состояние каскада готовится в виде двух ядер.

В качестве снаряда выбирается более легкий из партнеров по столкновению. Затем нуклоны вводятся в снаряд, с положением и импульсом, в начальное состояние каскада. До первого рассеяния отдельного нуклона, ферми-импульс нуклона-снаряда не учитывается. Распределение нуклонов внутри ядра снаряда считается репрезентативным распределением его нуклонов в конфигурационном пространстве. Учитываются фермиевский импульс и локальное поле при расчете вероятностей столкновений и конечных состояний бинарного столкновения.

§10. Ядро ${}^8\text{Be}$ в исследованиях структурных свойств $N\alpha$ -ядер

Первые статьи, посвященные изучению описания изотопа ${}^8\text{Be}$ появились еще в начале 30-х годов 20-го века и относятся к работам Д. Уиллера, Е. Теллера и Л. Хавштадтера. В работах [2, 22] характерные свойства ${}^8\text{Be}$ связаны с α -частичной моделью. Ядра ${}^8\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$ и т.д., содержащие $2N$ – нейтронов и $2N$ – протонов рассматриваются как ядра $N\alpha$ -системы, состоящей из α -частиц. То есть в данной системе имеется особая устойчивость α -частицы, как подсистемы или строительного блока в таких ядрах. Аналогично периодической системе элементов в химии, $N\alpha$ -ядра должны иметь схожие структурные характеристики с точностью до количества содержащихся α -частиц. Изучение характеристик изотопа ${}^8\text{Be}$ доставляет интерес в сфере исследования свойств низко лежащих энергетических уровней, других легких ядер ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$, которые могут содержать ${}^8\text{Be}$. Значения энергий и времени жизни первых двух состояний (0^+ и 2^+) для ядра ${}^8\text{Be}$ впервые предоставлялось в работе [2]. Ядро ${}^8\text{Be}$ представляет собой несвязным образованием, которое состоит из двух α -частиц, являющееся, при отсутствии кулоновского взаимодействия, слабо

связанными. Более подробно в [18, 23] дается описание нескольких вариантов α -частичных моделей.

В оболочечной модели ядро ${}^8\text{Be}$ в основном состоянии имеет конфигурацию $(1s_{1/2})^4(1p_{3/2})^4$ [30]. Изотоп ${}^8\text{Be}$ является единственным ядром, в основном состоянии которого проявляется ярко выраженная α -частичная структура.

В настоящее время широко обсуждается проблема поиска α -частичного Бозе-конденсата. Гипотеза образования α -частичного Бозе-конденсата представляет собой следующее предположение, что легкие Na -ядра при пороговой энергии развала на α -частицы способны переходить в газоподобное резонансное состояние α -частиц в s -состояниях относительно центра масс системы, образуя Бозе-конденсатное состояние [13, 30]. Считается, что этот переход обусловлен отсутствием фермионов анализируемой системе и некоторыми дополнительными условиями. Введение нейтрона в Бозе-конденсат ухудшает свойства сверхтекучей жидкости и создает эффект связывания. Изотоп ${}^8\text{Be}$ считается единственным представителем α -конденсатных ядер. Добавление нейтронов к двум α -частицам приводит к образованию связанных состояний ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$. Больше информации о статусе ${}^8\text{Be}$ и его роли в развитии Na -систем можно найти в работах [31, 32, 33].

§ 11. Проект Беккерель на Нуклотроне ОИЯИ

Источником группы самых легких ядер является процесс фрагментации релятивистских ядер, наблюдаемый в ядерных эмульсиях (ЯЭ). Этот процесс весьма интересен для исследователей в области современной ядерной физики и ядерной астрофизики. Ядерные эмульсии способствуют изучению образования таких групп по всей полноте с рекордным угловым разрешением и позволяют идентифицировать изотопы ядер He и H . В 1940-х годах состоялись первые исследования по взаимодействию релятивистских ядер при изучении слоёв ядерных эмульсий, облучившихся в стратосфере. События космического происхождения, при которых происходил развал ядер

были также обнаружены в то время. Они содержали ряд следов релятивистских α -частиц, сконцентрированных в узком угловом конусе. Такие события по настоящее время являются объектом изучения, проявляя себя как природное явление и отражая α -частичную кластеризацию в ядерной структуре.

В 70-х годах прошлого века начались облучения стопок ядерных эмульсий легкими ядрами на синхрофазотроне (ОИЯИ) и Bevalac (LBL), а в 1990-х гг. — средними и тяжелыми ядрами на AGS (BNL) и SPS (ЦЕРН). В конусе предельной фрагментации замечалось появления ядерной структуры. Однако, электронные эксперименты по этому направлению приводят к определённой сложности, связанной с квадратичной зависимостью ионизации от заряда ядра, а также весьма малой угловой расходимостью фрагментов. В следствии чего сохранившиеся файлы данных и результаты в аспекте состава релятивистской фрагментации от легких до самых тяжелых ядер, полученные в 1970–1990-х годах методом ядерных эмульсий, не утратили актуальности, а облученные слои могут применяться при углубленного изучения [35].

Начиная с 2000-х годов в ОИЯИ на Нуклотроне в эксперименте BECQUEREL по исследованию в релятивистском подходе кластеризации легких стабильных и радиоактивных ядер используется метод ЯЭ. Отличительные черты изотопов $^{7,9}\text{Be}$, $^{8,10,11}\text{B}$, $^{10,11}\text{C}$, $^{12,14}\text{N}$ обнаружили в вероятностях каналов их диссоциации. Распознавание релятивистских распадов ^8Be и ^9B дало возможность проводить поиск троек α -частиц в состоянии Хойла (HS) в релятивистской диссоциации.

Простейшим состоянием α -частичного конденсата Бозе–Эйнштейна является ^8Be и HS. Шестое возбужденное состояние ядра ^{16}O при энергии 660 кэВ (0^+_6) считается 4α -конденсат. К тому же ядра ^9B и HS могут использоваться в качестве основы для ядерных молекул ^9Bp , ^9Ba и ^{12}C (0^+_2). Случаи с нечетным количеством протонов могут иметь соответствующую ширину электромагнитных распадов.

Все эти состояния можно изучать и в качестве периферических взаимодействиях релятивистских ядер. Благодаря размерам ядер ${}^8\text{Be}$, ${}^9\text{B}$ и NS являются полноценными фрагментами релятивистской диссоциации. Продукты распада таких ядер при длине пробега от нескольких десятков (${}^9\text{B}$) до нескольких тысяч (${}^8\text{Be}$ и NS) размеров атомных ядер. То есть время возникновения таких фрагментов на несколько порядков больше времени возникновения других ядер [34].

Метод инвариантной массы легко распределить на идентификацию релятивистских распадов состояния Хойла, благодаря использованию имеющихся угловых измерений событий когерентной диссоциации ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$. В этом случае распады NS могут оказаться в диссоциации ${}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{12}\text{C}^* (\rightarrow 3\alpha) + \alpha$. Оба распределения проявляют сходство по инвариантной массе 3α -троек $Q_{3\alpha}$ (рис. 6), и в них наблюдаются пики распределений в области $Q_{3\alpha} < 0,7$ МэВ, где ожидается сигнал NS. На этой основе вклад распада NS в ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ составляет $(11 \pm 3)\%$, а в случае ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ — $(22 \pm 2)\%$.

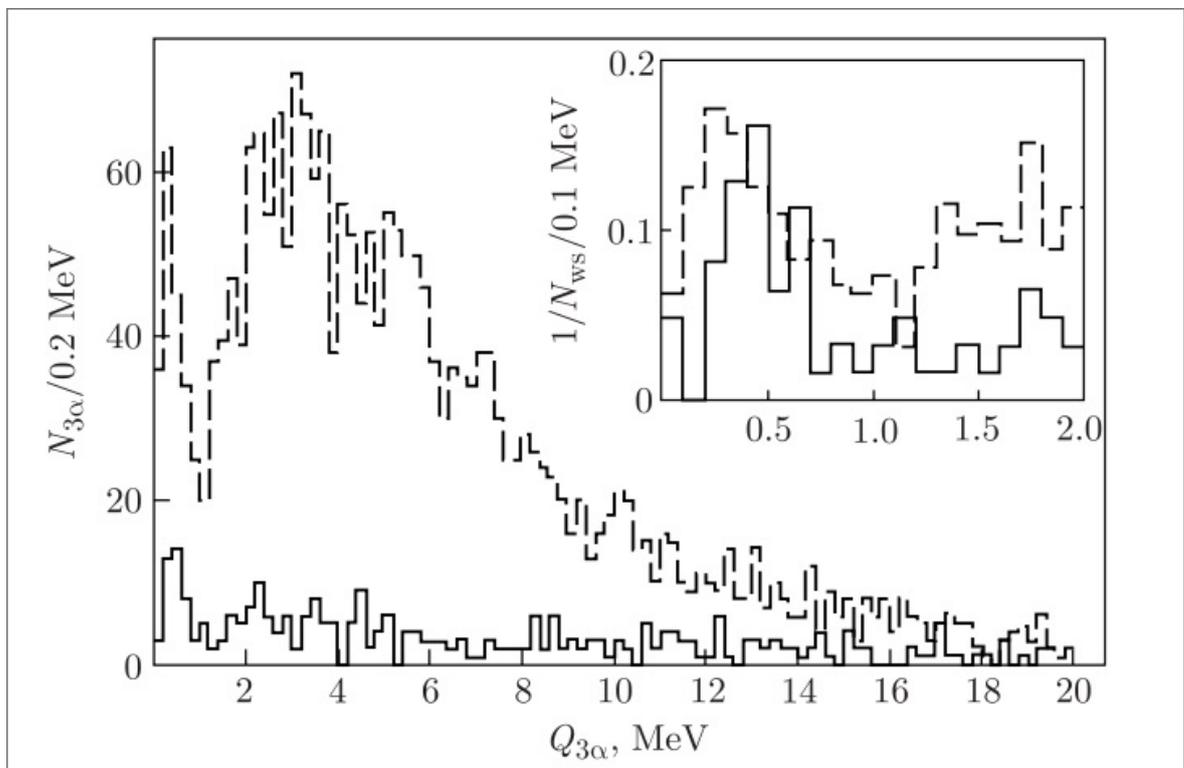


Рис 6. Распределение числа 3α -троек $N_{3\alpha}$ по инвариантной массе $Q_{3\alpha}$ в 316 «белых» Звездах ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (сплошная линия) и в 641 «белой» звезде ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ (штриховая линия) при 3,65А ГэВ; на вставке — увеличенная часть $Q_{3\alpha} < 2$ МэВ, нормированная на числа «белых» звезд N_{ws}

При изучении легких ядер метод апробирования применяется для разделения тяжелых ядер, что исследования более сложных состояний. Продуктами α -частичного распада таких состояний могут быть состояния Хойла или ${}^9\text{B}$, а потом и ${}^8\text{Be}$. Существует возможность распада с возникновением больше одного состояния. Начальным этапом поиска должен быть отбор событий, содержащих релятивистские распады ${}^8\text{Be}$. Используя уже собранную статистику для ядер Si и Au определены десятки распадов ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$. В то время как найдено всего несколько 3α -троек, путем распада состояния Хойла, из чего следует, что требуется наращивать статистику до показателей ${}^8\text{Be}$, и тогда можно будет осуществить поиск возбужденного состояния ${}^{16}\text{O}(0^+_6)$. Явных проблем для решения этой проблемы нет, из-за имеющегося большого количества уже облученных слоёв ядерных эмульсий, при сканировании которых можно достичь повышения статистики таких α -групп.

Проблемы такого подхода в ядерной физике можно оценить, используя полученные результаты. Важнейшей из них является проверка теоретического представления о материи, представляющей возбужденные состояния до порога связи в результате соединения нуклонов в кластере (это легчайшие ядра ${}^4\text{He}$, d, t и h). При ядерной плотности меньше нормальной и температуре в несколько МэВ предсказывается эволюция состава легчайших ядер. При синтезе тяжелых ядер может стать необходимым прохождения такой фазы. Расширение анализа кластерных состояний в определении свойств материи можно достигнуть благодаря идентификации изотопов ${}^{1,2,3}\text{H}$ и ${}^{3,4}\text{He}$.

Учёные надеются, что стремительный прогресс анализа изображений сможет придать большой размах в использовании ядерных эмульсий при изучении структуры релятивистских ядер. Для решения имеющихся задач требуется проводить инвестиции в современные микроскопы, а также развить технологии ядерных эмульсий. Улучшенная технология должна основываться на классическом методе, который был заложен еще в 50-х годах прошлого века в физике космических лучей. В январе 2019 года в рамках

тематики ОИЯИ были рассмотрены методы развития эксперимента BECQUEREL по физике релятивистских ионов на новом ускорительном комплексе NICA [35].

Глава 2. Моделирование фрагментации ядер ${}^9\text{Be}$ на ядрах фотоэмульсии в Geant4

§1. Ядро ${}^9\text{Be}$ как источник простейших $N\alpha$ систем

В физике легких частиц в области кластерных степеней свободы большой интерес представляет изотоп ${}^9\text{Be}$, демонстрирующий характеристики слабосвязанной $2\alpha+n$ системы. Благодаря низкому энергетическому порогу развала ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha+n$, составляющему всего 1.57 МэВ, можно получить исключительные данные о кластерной структуре ядра. Конфигурация ${}^9\text{Be}$ в основном состоянии в оболочечной модели имеет вид $(1s_{1/2})^4(1p_{3/2})^5$. Спин и четность J^π ядра ${}^9\text{Be}$ соответственно $-3/2^-$.

Сопоставление теоретических описаний характеристик ${}^9\text{Be}$ на базе использования двухчастичной (${}^8\text{Be}+n$) и трехкластерной ($\alpha+\alpha+n$) моделей приводятся в работах [14,28]. Получить вклад различных состояний системы $2\alpha+n$ в структуру ${}^9\text{Be}$, оценить среднее расстояние между ${}^8\text{Be}$ и нейтроном, узнать значения магнитного и электрического квадрупольного моментов становится возможным на основе этих модельных описаний.

В двухчастичной ($\text{core}+n$) модели [28] ядро ${}^9\text{Be}$ можно представить, как систему нейтрона в состоянии и кора ${}^8\text{Be}$ в состояниях $0^+(\text{g.s.})$ и 2^+ с порогами отделения нейтрона 1.67 и 4.71 МэВ, соответственно. Эта модель отличается незначительным вкладом 4^+ состояния ${}^8\text{Be}$ [28]. В основном состоянии волновую функцию ${}^9\text{Be}$ представляют в виде:

$$|{}^9\text{Be}(3/2^-)\rangle = \varpi_{0^+} | [{}^8\text{Be}(0^+) \otimes n_{p(3/2)}]_{3/2^-} \rangle + \varpi_{2^+} | [{}^8\text{Be}(2^+) \otimes n_{p(3/2)}]_{3/2^-} \rangle$$

(4)

где $\omega_0^+=0.535$ и $\omega_2^+=0.465$ – весовые коэффициенты [14]. В источниках [14,26] можно более детально ознакомиться с описанием трехкластерной $(\alpha+\alpha+n)$ модели ${}^9\text{Be}$.

Предположение о том, что ${}^8\text{Be}$ можно наблюдать в состояниях 0^+ и 2^+ при «мягком удалении» нейтрона из $2\alpha+n$ системы ${}^9\text{Be}$, вызывает большой интерес для проверки. В конечном состоянии наблюдаемая система $2\alpha+n$ должна проходить в периферических процессах фрагментации, для получения изотопа ${}^9\text{Be}$ в состояниях 0^+ и 2^+ [15,16]. Кроме образования ядра ${}^8\text{Be}$ возможно получение промежуточного ядра ${}^5\text{He}$ [15,25]. Энергетический порог, соответственно, равен 2.44 МэВ. В конечном состоянии продуктом диссоциации ${}^5\text{He}+\alpha$ будет выступать $2\alpha+n$ система [29]. Для состояний обладающих высоким спином ${}^9\text{Be}$ ($J \geq \frac{7}{2}$) конфигурация ${}^5\text{He}+\alpha$ отмечается как энергетически наиболее выгодная [17]. Однако, в работах [19,20,21,22] отмечается низкий вклад в развал ${}^9\text{Be}$ при энергиях порядка сотен МэВ, канала ${}^5\text{He}+\alpha$, по сравнению с каналом ${}^8\text{Be}+n$. Для такого исследования существенным является возможность наблюдения и измерения всех трех частиц образующейся $2\alpha+n$ системы.

§2. Облучение релятивистскими ядрами ${}^9\text{Be}$ эмульсий на Нуклотроне ОИЯИ и моделирование прохождения ядер ${}^9\text{Be}$ через объем эмульсии в Geant4.

Эмульсионная стопка облучалась на нуклотроне ОИЯИ релятивистскими ядрами ${}^9\text{Be}$, и представляла собой 15 эмульсионных слоёв типа БР-2, размеры которой $10 \times 20 \text{ см}^2$ при толщине 600 мкм. Пучок ядер ${}^9\text{Be}$ получили в результате фрагментации ${}^{10}\text{B} \rightarrow {}^9\text{Be}$ [1]. В пучке доля ядер ${}^9\text{Be}$ составляла 67%, когда оставшиеся 33% пришлись на изотопы He, Li.

На рис. 7 предоставлено схематичное положение эмульсионной камеры при облучении её ядрами ${}^9\text{Be}$ с энергией 1.2 ГэВ.

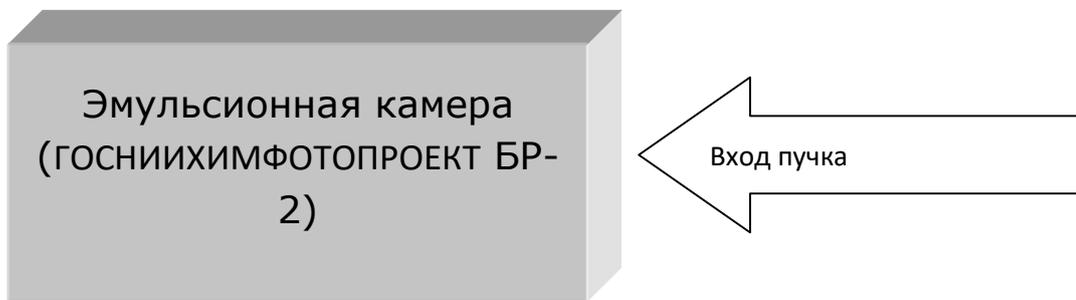


Рисунок 7. Вид сбоку на расположение эмульсионной камеры во время облучения

В ЛФВЭ ОИЯИ была проведена подготовка и последующая постэкспозиционная химическая обработка стопки ядерных эмульсий.

Через Объем $20 \times 20 \times 10 \text{ см}^3$ заполненный Ilford G5 (близок по химическому составу и плотности к ГОСНИИХИМФОТОПРОЕКТ БР-2, материал входит в базу данных материалов Geant4) было проведено $2 \cdot 10^4$ ядер ${}^9\text{Be}$ с такой же энергией 1.2 А ГэВ.

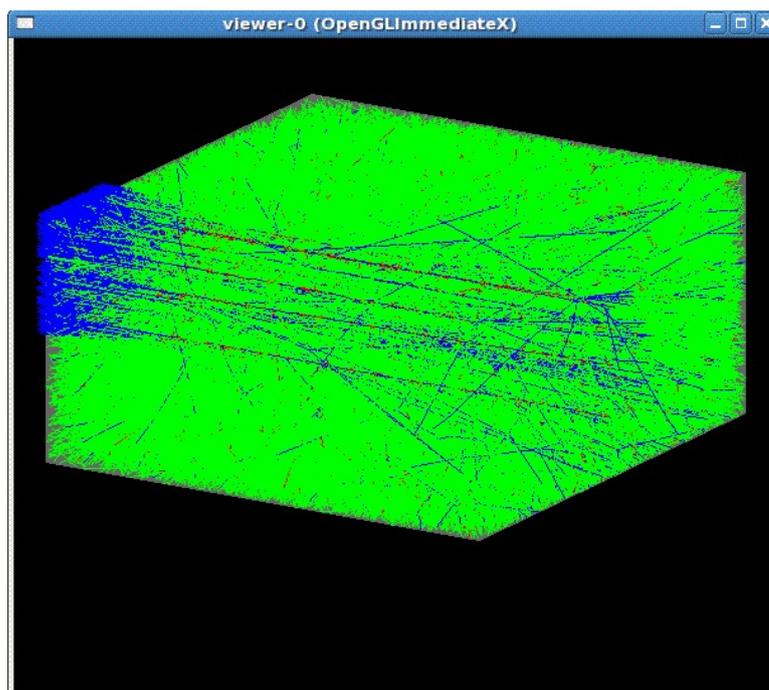


Рисунок 8. Изображение проведенных треков через объем фотоэмульсий в Geant4 (средствами библиотеки OpenGL). Синий цвет – треки принадлежащие ионам (ядра ${}^9\text{Be}$, α -частицы и др.), серый – нейтроны, красный – рожденные частицы (электроны, гипероны и т.п.), зеленый – треки γ -квантов.

Осуществление отбора событий фрагментации ${}^9\text{Be}$ на две α -частицы (2He) проводилась путем просмотра «по полоскам». В результате поиска

взаимодействий, проведенного при помощи Микроскоп МБИ-9, было выявлено 362 события, при которых проходила фрагментация ядра ${}^9\text{Be}$ с образованием двух фрагментов He в переднем конусе фрагментации. А затем проводилось изучение событий, угол отклонения которых при такой фрагментации составлял примерно 6° . Основание по вводу ограничений для величины полярного угла даются в работе [3] и связано с отношением величины $\sin \theta = \frac{p_F}{p_0}$, где p_F – импульс Ферми для ядра ${}^9\text{Be}$, а $p_0 = 1,9 \text{ А ГэВ/с}$. В переднем конусе фрагментации должны находиться треки фрагментов ядра ${}^9\text{Be}$. При моделировании применялись такие же критерии отбора. При работе с моделью было обнаружено 352 события ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He} + n$. Из-за отсутствия электрического заряда у нейтрона – он не оставляет свой след в эмульсии, однако, в отличие от реального эксперимента, при моделировании можно извлечь его характеристики для дальнейшего анализа. В статистике анализируемых взаимодействий представлены события фрагментации на различных ядрах эмульсии – групп H, CNO, AgBr [8]. В работе анализировался канал ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$, где под He подразумеваются фрагменты: α -частицы, ${}^3\text{He}$.

Ядерная фотографическая эмульсия является непревзойденным детектором для регистрации заряженных частиц в широком диапазоне энергий [9]. Идентифицировать частицу и определить её углы вылета можно при помощи измерения характеристик оставленных треков. Измерение энергии (импульса) в данной постановке без использования магнитного поля с приемлемой точностью затруднено. Фактически образующимся в эксперименте, преимущественно, α -частицам в канале ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ приписывался импульс на нуклон первичного ядра – $1,9 \text{ А ГэВ}$, что является хорошим приближением, а весь последующий анализ и интерпретация строились на угловых измерениях и данном предположении (относительная разность $\sim 9\%$).

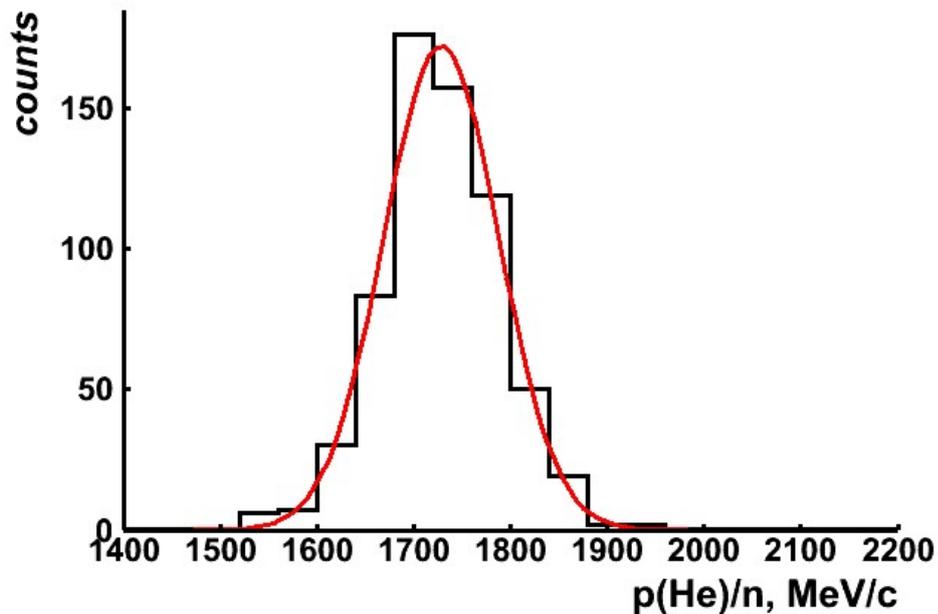


Рисунок 9. Распределение α -частиц в модельных данных по величине импульса на нуклон. Среднее значение составляет 1728 ± 2 А МэВ/с, а $\sigma=60$ МэВ/с (относительная разность 9%).

Измерению углов в ядерных эмульсиях в задаче, связанной с фрагментацией ${}^9\text{Be}$ посвящена глава в [8]. Одним из основных результатов, обнаруженных в экспериментальных данных, было разделение $\sim 80\%$ статистики событий на два интервала по величине относительного пространственного угла Θ с интервалами значений Θ (0, 10.5), (15.0, 45.0) мрад. соответственно, что интерпретировалось как фрагментация первичного ${}^9\text{Be}$ на две α -частицы двумя путями: ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+) \rightarrow 2\alpha$ и ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}(2^+) \rightarrow 2\alpha$. Данное обстоятельство хорошо согласуется с представлением о ${}^9\text{Be}$ как системы из основы (кора) в виде ${}^8\text{Be}$ в (0^+ и 2^+ состояниях) и оболочечного нейтрона в рамках Core-shell model (коллективная модель). С модельными данными хорошего совпадения не наблюдается и пики несколько смещены (рис 10).

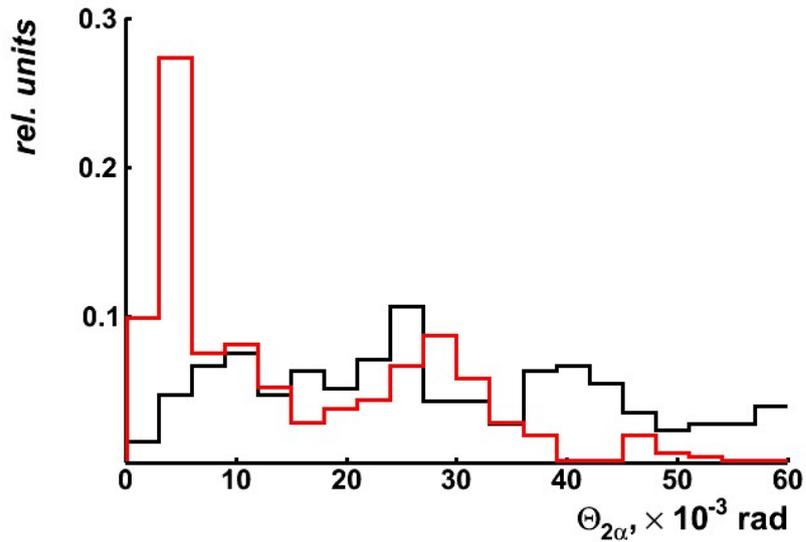


Рисунок 10. Распределение для событий ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ по величине относительного пространственного угла Θ для моделирование - черный, эксперимент – красный.

Распределения событий по относительным пространственным углам Θ может быть преобразовано к распределению по энергиям возбуждения. В Беккерель для оценки энергии возбуждения Q системы используют величину инвариантной массы M (системы из n фрагментов) за вычетом суммы масс покоя образующихся фрагментов. Для случая ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ данная величина $Q_{2\alpha}$ будет рассчитываться по формуле:

$$M_{2\alpha} = \left[2(m_\alpha^2 + E_{\alpha 1}E_{\alpha 2} - p_{\alpha 1}p_{\alpha 2} \cos(\Theta_{12})) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad Q_{2\alpha} = M_{2\alpha} - 2 \cdot m_\alpha, \quad (5)$$

где m_α , $E_{\alpha i}$, $p_{\alpha i}$ – масса, полная энергия и импульс для образующейся i -й α -частицы, соответственно. Распределение приведено на рисунке 11.

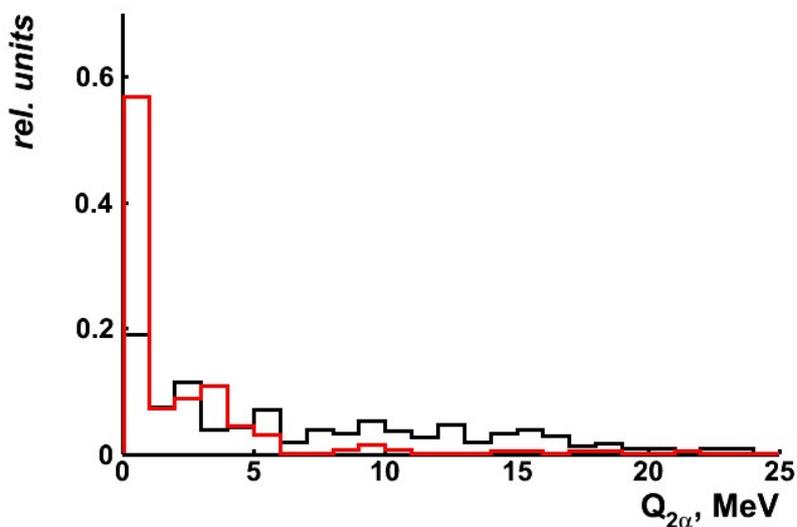


Рисунок 11. Распределение для событий ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ по величине энергии возбуждения системы $Q_{2\alpha}$ для моделирование - черный, эксперимент – красный.

Методика ядерных эмульсий обладая высоким пространственным разрешением, позволяет проводить сепарацию изотопов He (гелия) по массовому числу A методом измерения многократного кулоновского рассеяния [8]. В эксперименте было установлено, что доля событий с образованием пары α -частиц во взаимодействиях ${}^9\text{Be} + \text{Em} \rightarrow 2\text{He}$ должна быть не менее 77-80%, а примесь ${}^3\text{He}$ скорее вызвана низкой точностью метода оценки массового числа A по многократному рассеянию. Данное обстоятельство объясняется возможностью сформироваться двум α -частицам в составе ядра ${}^9\text{Be}$. Моделирование с использованием модели бинарных каскадов позволяет утверждать, что доля событий с образованием α -пары должна быть $\sim 85\%$, что не противоречит эксперименту.

Результаты работы показывают, что модель бинарных каскадов дает близкие значения по величинам углов и энергий возбуждения, однако, пропорции пиков не соответствуют экспериментальным данным. В настоящее время данная модель в большей степени подходит для каскадов, инициированных частицами (пионами и нуклонами), а для моделирования ядро-ядерных взаимодействий модель бинарных каскадов может быть использована ограничено. В последнее время разработчики Geant4 для задач

по фрагментации рекомендуют использовать более точную QMD (квантовая молекулярная динамика), но использование данной модели требует вычислительных мощностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечислим основные результаты данной работы:

1. Дан обзор понятий математическое моделирование, метод Монте-Карло, обсуждается их содержание.
2. На примере программного комплекса Geant4 продемонстрирован уровень развития средств моделирования в одном из направлений физики.
3. Дано описание ряда сущностей (классов) объектной модели Geant4, отражающих идеологию построения модели эксперимента, связанного с трекингом частиц. Рассмотрены основные моменты, связанные с построением модели ядро-ядерных взаимодействий.
4. На практическом примере моделирования фрагментации ядер ${}^9\text{Be}$ на ядрах фотоэмульсии продемонстрированы возможности Geant4. Модель бинарных каскадов даёт близкие к экспериментальным данным значения распределения энергий возбуждения и значения по величинам углов, позволяет утверждать, что доля событий с образованием α -пары должна быть $\sim 85\%$, что не противоречит эксперименту. Но при этом, пропорции пиков не соответствуют экспериментам, что ограничивает использование модели бинарных каскадов для ядро-ядерных взаимодействий. Данное заключение приводит к тому, что в настоящее время данная модель в большей степени подходит для каскадов, инициированных частицами (пионами и нуклонами). Для решения полученной проблемы следует большое внимание уделить улучшению уже имеющейся модели.

Список литературы

1. Андреева Н.П. Топология «белых звезд» в релятивистской фрагментации легких ядер // ЯФ. - 2004. - №3. – С. 1-11.
2. Бак М.А. Определение абсолютного выхода нейтронных источников / М.А. Бак, К.А. Петржак, Ю.Ф. Романов // УФН. - 1956.- Т. 18, № 4. С. 667-684
3. Боровиков В.П. Statistica. Статистический анализ данных в среде Windows / В.П. Боровиков, И.П. Боровиков. – Информационно-издательский дом «Филин», М., 1997. – 608 с.
4. Братченко М. И. Применение программного комплекса Geant4 к задачам радиационно-технологического моделирования / М.И. Братченко, С.В. Дюльдя // Вопросы атомной науки и техники. - 2001.- № 4. С. 184.
5. Браун, А.Г. Атомная и ядерная физика. Элементы квантовой механики. Практикум: Учебное пособие / А.Г. Браун, И.Г. Левитина. - М.: Инфра-М, 2019. - 352 с.
6. Козин Р.Г. Математическое моделирование: примеры решения задач: Учебно-методическое пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 176 с.
7. Леонтьев В.В. Задачи раздела «Информационные методы в физике высоких энергий» / В.В. Леонтьев, И.И. Белотелов. – Ч.2. – М.: Университетская книга, 2011. – 50 с.
8. Особенности фрагментации ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ в ядерной эмульсии при энергии 1,2 А ГэВ / Д.А. Артеменков, В. Браднова и др. // ЯФ. - 2004. - №70. – С. 1261-1265.
9. Пауэлл С. Исследование элементарных частиц фотографическим методом / С. Пауэлл, П. Фаулер, Д. Перкинс. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 420 с.
10. Подлипнов В.В. Моделирование взаимодействия электронного пучка с веществом методом Монте-Карло / В.В. Подлипнов, А.С. Шабека, А.В. Куприянов // Информационные технологии и нанотехнологии. - Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, С. 153-157.
11. Ракобольская, И.В. Ядерная физика. – М.: Красанд, 2014. - 248 с.

12. Самарский А.А. Математическое моделирование / А.А. Самарский, А.П. Михайлов – М.: Физматлит, 2001. 320 с.
13. Формирование гигантских резонансов в легких ядрах / Ишханов Б.С., Капитонов И.М. и др. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. - 2000. - №6. - С. 1343-1397.
14. Чавчанидзе В. К теории ядра бериллия // УФН. - 1951. – Т.29, №1. - С. 106-119.
15. ${}^9\text{Be}(p, p\alpha){}^5\text{He}$ cluster knockout reaction with 150 MeV polarized protons / C.W. Wang, P.G. Roos et al. // Physical Review C. - 1985. - №31. - P. 1662-1672.
16. Andreeva N.P., et al., «Light nuclei clustering in fragmentation above 1 A GeV», In: Proceedings of the 8th International workshop «Relativistic nuclear physics from hundreds of MeV to TeV», 203-213, Dubna, May 23-28, (2005).
17. Arai K. Resonance structure of ${}^9\text{Be}$ and ${}^9\text{B}$ in a microscopic cluster model // Nuclear Physics A. - 2004. - №738. - P. 342-346.
18. Chang F.C. Study of the low-lying states of ${}^8\text{Be}$ // Physical Review C. - 1974. - №9. - P. 1-3.
19. Descouvemont P. Microscopic three-cluster study of the low-energy ${}^9\text{Be}$ photodisintegration // The European Physical Journal A. – 2001. - №12, - P. 413-419.
20. Elastic scattering and fusion of ${}^9\text{Be}+{}^{208}\text{Pb}$: Density function dependence of the double folding renormalization / W.J. Woolliscroft, B.R. Fulton et al. // Physical Review C. - 2004. - №69. - P. 044612.
21. Exclusive breakup measurements for ${}^9\text{Be}$ / B.R. Fulton, R.L. Cowin et al. // Physical Review C. - 2004. - №70. – P. 047602.
22. Grigorenko L.V. Three-body resonant radiative capture in astrophysics / L.V. Grigorenko, M.V. Zhukov // Physical Review C. – 2005. - №72. - P. 015803.
23. Hafstad L.R. The alpha-particle model of the nucleus / L.R. Hafstad, E. Teller // Physical Review. - 1938. - №54. - P. 681-692.

24. Hiura J. Typical realization of alpha-particle model aspects in beryllium region / J. Hiura, R. Tamagaki // Supplement of the Progress of Theoretical Physics. - 1972. - №52. - P. 25-88.
25. Keeley N. $^5\text{He}+\alpha$ cluster model of ^9Be breakup / N. Keeley, K.W. Kemper, K. Rusek // Physical Review C. - 2001. - №64. - P. 031602.
26. Lepekhin F.G. The formation of ^8Be nuclei and their role in the fragmentation of light nuclei // Physics of Particles and Nuclei. - 2005. - № 36. - P. 233-245.
27. Monopole and quadrupole polarization effects on the α -particle description of ^8Be / A. Sytcheva, F. Arickx et al. // Physical Review C. - 2005. - №71. - P. 044322.
28. Parfenova Y.L. and Ch. Leclercq-Willain, «Hyperfine anomaly in Be isotopes in the cluster model and the neutron spatial distribution », arXiv: nucl-th/0502032v4.
29. Parfenova Y.L. Hyperfine anomaly in Be isotopes and neutron spatial distribution: A three-cluster model for ^9Be / Y.L. Parfenova, Ch. Leclercq-Willain // Physical Review C. - 2005. - №72. - P. 054304.
30. Resonance states in ^{12}C and α -particle condensation / Y. Funaki, A. Tohsaki et al. // The European Physical Journal A. – 2005. - №24. - P. 341-342.
31. Structure of the Hoyle state in ^{12}C / M. Chernykh, H. Feldmeier et al. // Physical Review Letters. – 2007. - №98. - P. 032501.
32. Three-alpha structures in ^{12}C / R. Pichler, H. Oberhummer et al. // Nuclear Physics A. - 1997. - №618. - P. 55-64.
33. α -decaying excited states in carbon and boron isotopes / N. Soic, M. Freer et al. // Nuclear Physics A. - 2004. - №738. - P. 347-351.
34. <http://www.jinr.ru/posts/eksperiment-becquerel-status-i-perspektivnyye-zadachi/>
35. <https://geant4userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/fo/PhysicsReferenceManual.pdf>
36. <https://indico.cern.ch/event/0/contributions/1294414/attachments/701/1272/paper.pdf>