

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Лаборатория ядерных взаимодействий и радиационной безопасности

Казахстан, 050012, Алматы, ул. Толе би, 96а, Факс: (3272)924465, Тел.: (3272)925920; (3272)927075

(Computer Simulation) № CS-01-004

В.В. Дьячков и др.

ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ

ПРОЕКТ

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ «МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ» НА БАЗЕ НЯЦ РК

Ι

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИЙ РАСЩЕПЛЕНИЯ ЛЕГКИХ ЯДЕР НЕЙТРОНАМИ



Алматы 2006

1.1. Цель работы

Изучение и кинематический анализ реакций расщепления ядер ${}^{12}_{6}C$ и ${}^{16}_{8}O$ на α -частицы под действием нейтронов на основе модели фотоэмульсионного метода регистрации.

1.2. Краткое теоретическое введение

1.2.1. Фотоэмульсионный метод регистрации ядерных излучений

Метод регистрации ядерных излучений с помощью специальных фотоэмульсий имеет широкое применение в ядерной физике благодаря наглядности. Изучая фотопластинку под микроскопом, можно непосредственно наблюдать поведение заряженной частицы при прохождении через слой эмульсии: ионизационное торможение, рассеяние, ядерный захват с выделением продуктов деления, спонтанный распад ядер и т. д.

Регистрация заряженных частиц с помощью фотоэмульсий происходит подобно регистрации фотоэлектронов при воздействии света. Ядерные фотоэмульсии, как и обычные светочувствительные, состоят из желатина и взвешенных частиц бромистого серебра размером до 0,3 мкм. Заряженные частицы, проходя через слой эмульсии, ионизируют атомы, лежащие на их пути, и вызывают некоторые фотохимические процессы в кристаллах AgBr. При проявлении эмульсии на месте кристаллов, которые подверглись ионизации, образуются мельчайшие зерна металлического серебра, которые наблюдаются под микроскопом в виде черных зерен. След частицы представляется цепочкой зерен.

В настоящее время имеются ядерные эмульсии различных типов, позволяющие использовать фотометод для регистрации самых разнообразных частиц: от быстрых электронов, создающих минимальную ионизацию, до осколков деления ядер, образующих плотный след ионов.

Отличительной особенностью фотометода является возможность регистрировать отдельные следы частиц в широком интервале энергий, с большой точностью определять пространственное распределение следов и ионизирующую способность частиц. Все это дает возможность надежно различать частицы: определять их массу, заряд и энергию. Для экспозиции ядерных явлений не требуется ни источников питания, ни другой вспомогательной аппаратуры. Небольшой вес, малые размеры, механическая прочность и длительность экспозиции обеспечивают такие преимущества фотоэмульсий, каких не имеет в совокупности никакой другой метод.

К недостаткам метода ядерных эмульсий нужно отнести трудоемкость обработки материала, что, кстати говоря, является общим недостатком всех других методов, имеющих дело с анализом отдельных следов частиц. В значительной степени ограничивает область применения фотометода малая толщина эмульсий. Правда, за последнее время разработаны методы обработки больших стопок эмульсий (до нескольких десятков метров).

Кроме того, сложный атомный состав эмульсии создает значительные трудности при использовании фотометода для исследования ядерных реакций, так как не всегда удается определить, с какими ядрами произошла данная реакция. Поэтому часто для увеличения вероятности определенного вида реакции (с определенным ядром) эмульсию перед экспозицией пропитывают соответствующими веществами.

Как отмечалось выше, в кристаллах AgBr, через которые проходит ионизирующая частица, происходят некоторые фотохимические процессы, приводящие к образованию группы ионов металлического серебра – центров скрытого изображения. При рассмотрении механизма образования скрытого изображения заряженными частицами обычно считают, что он подобен механизму образования скрытого изображения под действием света. Однако в первом случае это ионизация атомов под действием кулоновского поля заряженной частицы, во втором – фотоэффект.

В процессе проявления происходит отложение атомов серебра на центрах проявления. Зерна металлического серебра вырастают до видимых под микроскопом размеров (0,3 – 0,8 мкм), и скрытое изображение превращается в видимое изображение следа. В процессе фиксирования эмульсии непроявленные зерна AgBr растворяются и вымываются из желатина.

Для регистрации частиц с различной плотностью ионизации используют эмульсии разных типов, обладающих различной чувствительностью. Для регистрации быстрых (релятивистских) частиц, обладающих минимальной ионизацией, необходима эмульсия с самой высокой чувствительностью и большим содержанием AgBr. Для медленных и сильно ионизирующих частиц нужны эмульсии с меньшей чувствительностью.

Отличительной чертой ядерных эмульсий по отношению к оптическим является не только большое содержание бромистого серебра (80 – 85% общего веса эмульсии), но и величина его зерен. В световой фотографии имеет значение общее почернение пластинки при воздействии определенного количества света, которое зависит от величины зерен. Наибольшей чувствительностью к почернению обладают эмульсии с крупными зернами AgBr. При определении чувствительности ядерных эмульсий исходят из других требований. Наибольшей чувствительностью обладает та эмульсия, которая создает след ядерной частицы с максимальной плотностью зерен с тем, чтобы на фоне «вуали» пластинки в виде отдельных спонтанно проявленных зерен легко просматривалась цепочка зерен следа частицы. Поэтому чувствительность ядерных эмульсий определяется плотностью зерен на длине следа в 100 мкм. Для релятивистских частиц с минимальной удельной ионизацией плотность зерен на 100 мкм пути в эмульсии составляет около 30.

При обычном просмотре на свет ядерные фотоэмульсии прозрачны, и только под микроскопом можно наблюдать следы отдельных частиц.

Раньше были наиболее употребительны эмульсии (НИКФИ) и эмульсии английской фирмы «Ильфорд». В таблице 1 приводится перечень наиболее распространенных типов эмульсий, позволяющих регистрировать любые следы, начиная от осколков деления тяжелых элементов до релятивистских электронов, обладающих минимальной ионизирующей способностью.

Таблица 1.

Изготовитель эмульсий	Тип	Объект регистрации						
HSI OTOBATCHB SMYHDEAN	эмульсий	obbekt perhetpadin						
	D-1	осколки деления						
$\Phi_{\mu\nu\nu\sigma}$	E-1	α-частицы, протоны (Е _{р max} = 20 МэВ)						
Фирма «пльфорд»	C-2	протоны (Е _{р max} = 70 МэВ)						
	C-5	любые частицы, в том числе релятивистские						
	0	осколки деления						
	А	α-частицы, протоны (Е _{р max} = 10 МэВ)						
НИКФИ	Т	протоны (Е _{р max} = 20 МэВ)						
Πηκψη	R	протоны с энергией 40—50 МэВ						
	K	протоны (Е _{р max} = 70 МэВ)						
	Р	любые частицы, в том числе релятивистские						

Наиболее распространенные типы ядерных эмульсий

Фотопластинки чаще всего изготовляют с толщиной эмульсии 100–200 мкм. Высокочувствительные пластинки, как правило, изготовляют с толщиной эмульсии 400 и 600 мкм. Концентрация AgBr в эмульсиях НИКФИ и фирмы «Иль-форд» одинакова и равна 83% полного веса. Диаметр зерен бромистого серебра равен ~ 0,3 мкм, диаметр проявленных зерен – 0,3–0,8 мкм. Желатин состоит из легких элементов H, C, N, O. Удельный вес эмульсий всех типов ~3,8 г/см³. Так как желатин гигроскопичен, удельный вес и состав

эмульсии зависят от влажности. Поэтому рекомендуется хранить эмульсию в помещении с относительной влажностью 60%. При высыхании эмульсия становится хрупкой и может отстать от стеклянной подложки. Коэффициент усадки эмульсии также зависит от ее влажности и только при правильном хранении сохраняет свою среднюю величину, равную приблизительно 2–2,5.

1.2.2. Идентификация следов частиц в фотоэмульсии

Заряженные частицы при прохождении через фотоэмульсию непрерывно теряют энергию на возбуждение и ионизацию. Средняя энергия, которую частицы теряют на единице пути:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{uou} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} ZNB, \qquad (1)$$

где *E* – кинетическая энергия частицы, *ze* – заряд частицы, *v* – скорость первичной частицы, *N* – число атомов в 1 см³ поглотителя, *Z* – атомный номер поглотителя, *e* – заряд электрона, m_0 – масса электрона; $B = \left[ln \frac{2m_0 v^2}{I_0} - ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$ – коэффициент торможения.

Существенно, что ионизационные потери пропорциональны *е* квадрату заряда частицы z уменьшаются с ростом скорости как $1/v^2$ и не зависят от массы частицы. Зависимость от среды определяется количеством электронов в 1 см³ (*NZ*) и потенциалом ионизации *I*₀. Так как *NZ* примерно пропорционально плотности вещества, а зависимость от *I*₀ слабая (логарифмическая), то потери энергии, отнесенные к единице пути в граммах на 1 см², слабо зависят от среды. Поэтому ионизационные потери при переходе от воздуха к свинцу изменяются всего в 1,5 – 2 раза.

Связь между числом проявленных зерен на единицу пути и удельными потерями энергии сложна и зависит от типа эмульсии и условий проявления. Обычно различные типы эмульсий калибруются (при одинаковом режиме обработки) по известным частицам. Плотность зерен в следе частицы данного заряда является функцией только ее скорости. Поэтому по мере уменьшения скорости частицы плотность зерен возрастает. У мезонов и протонов это явление можно наблюдать визуально. Однако с уменьшением скорости частицы увеличивается многократное рассеяние, и след частицы искривляется. Изменение плотности ионизации (плотности зерен) следа и величина многократного рассеяния дают возможность надежно идентифицировать частицы.

В настоящее время разработан ряд методов для определения энергии и массы заряженной частицы, зарегистрированной в фотоэмульсии. Эти методы основаны на измерении трех независимых величин: остаточного пробега частицы, плотности зерен и многократного рассеяния. В тех случаях, когда заряд частицы известен, для ее идентификации достаточно двух независимых измерений. Наиболее часто применяют следующие сочетания методов: пробег — плотность ионизации, пробег—многократное рассеяние.

Мы не будем описывать все методы идентификации частиц, остановимся только на одном из них, который имеет наибольшее распространение.

Определение массы по остаточному пробегу и числу зерен. Если две частицы с массами M и m имеют в какой-то точке равные скорости, то их пробеги от этой точки до других точек, где их скорости снова будут равны (например, до остановки, где D = 0), относятся как

$$\frac{R}{r} = \frac{M}{m},$$
(2)

где *R* и *r* – остаточные пробеги частиц с массами *M* и *m*.

Действительно, пробег частиц определяется как

$$R = \int_{0}^{E} \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx}\right)},\tag{3}$$

но так как ионизационные потери могут быть представлены в виде некоторой функции скорости

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{uon} = z^2 f(v), \tag{4}$$

то пробег частицы может быть выражен следующей зависимостью:

$$R = \int_{0}^{E} \frac{vMdv}{z^{2}f(v)} = \frac{M}{z^{2}}\varphi(v).$$
 (5)

Таким образом, пробег частицы зависит от ее массы, деленной на квадрат заряда, и некоторой функции скорости $\varphi(v)$, одинаковой для всех частиц.

И если мы сравниваем остаточный пробег R частицы с неизвестной массой M с остаточным пробегом r частицы с известной массой m при условии равенства их скоростей, когда $\varphi_{\rm R}(v) = \varphi_{\rm r}(v)$, то получим

$$\frac{R}{r} = \frac{M}{m} \left(\frac{z_m}{z_M}\right)^2.$$
(6)

В том случае, когда заряды обеих частиц известны и равны, отношение остаточных пробегов этих частиц будет равно отношению их масс.

Очень часто следы ядерных частиц можно отличить визуально, так как их плотности резко отличаются друг от друга. Так, плотность ионизации α -частицы с энергией около 1 МэВ в 10⁴ раз больше, чем плотность ионизации электрона с той же энергией. Путь α -частицы в эмульсии поэтому представляется в виде широкого черного следа, где отдельные зерна сливаются в сплошные сгустки (конгломераты), в то время как след релятивистского электрона выглядит в виде цепочки зерен с плотностью 30—35 зерен на 100 мкм пути.

На рисунке 1 представлены кривые плотности зерен для разных сортов частиц в зависимости от остаточного пробега *R*.



Рисунок 1 – Зависимость плотности зерен следов различных частиц от остаточного пробега

Кроме того, идентифицировать частицы можно визуально, пользуясь различными типами эмульсий, каждый из которых обладает селективной чувствительностью к определенному сорту (и энергии) частиц.

Определение энергии частиц по пробегу. Если масса частицы известна и частица останавливается в эмульсии, то наиболее простым и надежным способом определения ее энергии является измерение полного пробега *R*. Для этой цели используют калибровочные

кривые зависимости пробега частиц в эмульсии до полной остановки от ее начальной энергии. На рисунке 2 представлены такие кривые для различного сорта частиц.



Рисунок 2 – Зависимость пробега в эмульсии от энергии частиц

Для протонов при пробеге в фотоэмульсии больше чем 100 мкм можно пользоваться полуэмпирическим соотношением

$$E = 0,251 \cdot R^{0,581},\tag{7}$$

где энергия измерена в МэВ, а пробег в микронах. Так как пробеги частиц в фотоэмульсии могут быть измерены с достаточной точностью, то и определение их энергии с высокой степенью точности не представляет трудности. В оценку точности метода входят: статистический разброс длины следа, точность измерения длины следа и точность построения графиков зависимости R(E) для различного типа эмульсий.



Рисунок 3 – Общий вид микроскопа МБИ-9. 1 – основание микроскопа; 2 – предметный столик; 3 – тубусодержатель; 4 – тубус; 5 – трансформатор; 6 – гнездо светофильтров; 7 – барашек грубого перемещения тубуса; 8 – отсчетный барашек микроподачи; 9 – зеркало; 10 – тормоз тубуса; 11 – переключатель обмоток трансформатора (регулятор яркости); 12 – зеркало.



Рисунок 4 – Схема оптики микроскопа МБИ-9. 1 – электролампа; 2 – коллектор; 3 – теплозащитное стекло; 4– призма;5 – ирисовая диафрагма; 6,7 – линзы апланатического конденсатора; 8 – светофильтр; 9 – объектив; 10– линзы оборачивающей системы; 11– призма; 12 – стереоскопическая насадка; 13– окуляр; 14,15 – сменные линзы стереоскопической насадки;

Для работы с фотопластинками рассмотрим микроскоп МБИ-9, общий вид которого представлен на рисунке 3. Оптическая схема показана на рисунке 4. Лучше всего при этом использовать окуляры 15Х и объективы 8Х и 20Х, рассчитанные на работу без иммерсионного масла. Режимы увеличения микроскопа приведены в таблице 2. Подробное описание можно найти в [1].

Таблица 2.

1	сжимы убсличспи	а микроскопа при	і визуальномі наолі	юдспии			
	У	величение стереос	скопической насад	ки			
Увеличение		1Х с окулярами					
объектива							
	7X	10X	15X	с окулярам 15л			
10X	70X	100X	150X	300X			
20X	140X	200X	300X	600X			
60X	420X	600X	900X	1800X			
90X	630X	900X	1350X	2700X			

Режимы увеличения микроскопа при визуальном наблюдении

Фотопластинку укладывают на предметный столик эмульсией к объективу.

Для того чтобы сфокусировать микроскоп (с объективом 20Х) на слой эмульсии, следует, пользуясь винтом грубой наводки, опустить тубус так, чтобы между пластинкой и объективом оставался зазор в несколько миллиметров. При этом необходимо соблюдать крайнюю осторожность, чтобы тубусом микроскопа не продавить пластинку. Далее, при постоянном наблюдении за полем зрения, произвести фокусировку изображения в

фотоэмульсии передвижением (грубым) вверх тубуса на 1–2 мм. Если при этом изображение не появится, следует повторить поиск, стараясь опустить тубус пониже (но не касаясь объективом пластинки).

Систематический поиск в эмульсии интересующего события обычно производят полосами, ширина которых соответствует полю зрения, для чего пластинку передвигают справа налево или наоборот.

При идентификации следов по их образцам для известных частиц в данной эмульсии необходимо иметь в виду, что наклонные следы, идущие в глубь эмульсии, выглядят более плотными вследствие того, что видна только проекция этого следа, а также за счет усадки эмульсии. Поэтому для измерения рекомендуется отбирать следы частиц, направление которых почти параллельно плоскости пластинки, или проводить сравнения со следами, идущими под одинаковым углом к ее плоскости.

Измерения на микроскопе сводятся к определению длины следа R, угла θ между следами или угла рассеяния φ и определению плотности зерен на 100 мкм пути.

Измерение длины проекции следа на плоскость пластинки производят с помощью шкалы, вставленной в окуляр. Цена деления шкалы при данном увеличении микроскопа определяется с помощью объект-микрометра. При увеличении 20x1,5x15 цена деления шкалы объект-микрометра 0–100 равна приблизительно 3,5 мкм. Измерение проекции следа h, перпендикулярной к плоскости эмульсии, производят с помощью микрометрического винта путем последовательного фокусирования микроскопа на концы следа. Поскольку у винта всегда имеется мертвый ход (люфт), то при фокусировке микроскопа на концы следа необходимо поворачивать барабан в одну сторону. Разница показаний барабана микрометрического винта дает величину h. Полная длина следа

$$R = \sqrt{l^2 + h^2 s^2} , (8)$$

где s – коэффициент усадки эмульсии, равный 2,4–2,5; l – проекция следа частицы в плоскости пластинки. При определении h с сухим (без иммерсионной жидкости) объективом разница показаний микрометрического винта должна быть умножена на показатель преломления эмульсии, равный 1,54. Углы между проекциями следов измеряют с помощью окулярного лимба по разнице его показаний при последовательной установке окулярной шкалы вдоль исследуемых следов.

1.2.4. Взаимодействие нейтронов с веществом

Поведение нейтронов при прохождении через вещество определяется почти исключительно взаимодействием их с ядрами атомов, обусловленным ядерными силами. Относительно ядерных сил известно прежде всего, что они действуют на очень малых расстояниях, порядка 10^{-13} см. Зависимость силы от расстояния до настоящего времени неизвестна. Однако для многих явлений существенна средняя величина ядерного потенциала. Поэтому для описания ядерного потенциала часто пользуются произвольной функцией U(r), имеющей вид потенциальной ямы с более или менее резко очерченными краями, в частности, в виде прямоугольной ямы, или так называемого потенциала Юкавы

$$U(r) = \frac{A}{r} l^{-\frac{r}{a}}.$$
(9)

Среднее значение ядерного потенциала примерно равно 20–30 МэВ. Из экспериментов известно, что ядерные силы между парами нуклонов *n*–*n* и *p*–*p* приблизительно равны, т. е. не зависят от зарядового состояния нуклона. Кроме того, ядерные силы, участвующие в формировании ядра, являются силами насыщения.

Кроме ядерных нуклоны испытывают и электромагнитные взаимодействия, которые обусловлены, во-первых, кулоновскими зарядами протонов и, во-вторых, магнитными моментами протонов и нейтронов. Существует электромагнитное взаимодействие и между нейтроном и электроном, поскольку обе частицы обладают магнитными моментами. Однако

эффективное сечение таких взаимодействий мало (порядка 10^{-22} см²) по сравнению с эффективным сечением заряженных частиц с электронами атома, приблизительно равным «геометрическим» размерам атома $(10^{-8})^2 = 10^{-16}$ см². Поэтому взаимодействие нейтрона с веществом практически не приводит к ионизации атомов среды.

Таким образом, взаимодействие нейтрона с веществом определяется главным образом столкновением нейтрона с ядром и может привести либо к простому отклонению нейтрона в поле ядерных сил от первоначального направления, т. е. рассеянию, либо захвату нейтрона ядром.

Потенциальное рассеяние является простейшим процессом взаимодействия нейтрона с ядром. Изменение энергии нейтрона однозначно связано с углом рассеяния:

$$E = E' + E_M,$$

$$p_M^2 = p^2 + {p'}^2 - 2pp'\cos\varphi,$$
(10)

где E и p – энергия и импульс нейтрона до столкновения, E' и p' – энергия и импульс нейтрона после столкновения, E_M и p_M – энергия и импульс ядра после столкновения, φ – угол рассеяния нейтрона.

Если рассматривать E_M как функцию угла ядра отдачи θ и исключить E' и p', можно получить зависимость энергии отдачи ядра от энергии первичного нейтрона:

Перейдем к описанию процесса, когда под действием ядерных сил притяжения нейтрон захватывается ядром. В результате образуется составное ядро или «компаунд» – ядро в возбужденном состоянии за счет энергии связи нейтрона ε и за счет его кинетической энергии *E*.

Энергия возбуждения ядра E^* близка к сумме $\varepsilon + E$. Более точно она определяется выражением

$$E^* = \frac{M}{M+m}E + \varepsilon \,. \tag{11}$$

Возбужденное составное ядро существует довольно долго – 10^{-12} – 10^{-16} с (по сравнение с характерным ядерным временем 10^{-22} с).

Переход возбужденного составного ядра в более низкое энергетическое состояние может совершиться или путем испускания γ-квантов, или путем распада с испусканием каких-либо частиц, а именно: протонов, нейтронов, α-частиц или еще более тяжелых ядерных осколков (например, в случае деления ядер).

Захват нейтрона, сопровождающийся испусканием у-квантов, называется радиационным захватом. Захват нейтрона, сопровождающийся испусканием какой-либо частицы, представляет собой ядерное превращение. Если такой частицей является нейтрон, то собственно превращения ядра не будет. Очевидно, что внешне такой процесс представляет собой рассеяние, отличающееся от потенциального только тем, что оно идет через образование составного возбужденного ядра.

С точки зрения динамики рассеяние нейтрона ядром можно считать упругим или неупругим, отличающимся сохранением или несохранением кинетической энергии.

Захват нейтрона с последующим испусканием частиц, очевидно, возможен только в том случае, если энергия связи испускаемой частицы ε_x меньше энергии возбуждения составного ядра, т. е.

или

$$E^* = \frac{M}{M+m}E + \varepsilon_n > \varepsilon_x$$
(12)
$$\frac{M}{M-k} > \varepsilon_n - \varepsilon_n = 0$$

$$\frac{M}{M+m}E > \varepsilon_x - \varepsilon_n = Q,$$

где Q – энергия реакции. Отсюда видно, что процессы γ -излучения при упругом и неупругом рассеянии нейтронов всегда возможны.

Энергия связи протонов и α -частиц (ε_p и ε_α) могут быть больше и меньше энергии связи нейтрона ε_n , т. е. реакции (n, p) и (n, α) могут быть эндотермическими (Q<0) и экзотермическими (Q>0). Экзотермические реакции возможны при любой энергии нейтрона, в то время как эндотермические — только при энергии нейтрона, превышающей порог

$$\pi = \frac{M+m}{M}Q = \frac{M+m}{M}(\varepsilon_x - \varepsilon_n).$$
(13)

После образования составного ядра последнее может распадаться большим числом способов, каждому из которых соответствует своя вероятность распада. При этом важно отметить, что соотношение вероятности распада составного ядра по тому или иному каналу не зависит от того, в какой реакции получено данное ядро. Из квантовомеханических представлений известно, что вероятность распада связана с энергетической шириной уровня **Г** соотношением

$$\Gamma = \frac{h}{\tau},\tag{14}$$

где τ – среднее время жизни. Вероятность распада ядра по данному каналу *x* связана с парциальной шириной уровня Γ следующим образом:

$$W_x = \frac{\Gamma_x}{\sum_i \Gamma_i},\tag{15}$$

где полная ширина уровня распада ядра равна сумме парциальных ширин $\Gamma = \sum \Gamma_i$.

Поскольку полная вероятность распада данного ядра является величиной постоянной, то вероятности парциальных распадов конкурируют между собой. С увеличением энергии реакции над порогом, отвечающей испусканию новой частицы, соответствующая величина Γ_i , возрастает от нуля за счет уменьшения ширин уровней других видов распада. Рассмотрим, например, реакции, возникающие на ⁸¹Вг под действием нейтронов. Наблюдаются четыре вида реакции:

⁸¹Br(n,
$$\gamma$$
)⁸²Br,
⁸¹Br(n, p)⁸¹Sr,
⁸¹Br(n, α)⁷⁶As,
⁸¹Br(n, 2n)⁸⁰Br. (16)

При малых энергиях (тепловые нейтроны) отлично от нуля только Γ_{γ} , и происходит исключительно первая реакция. При увеличении энергии до 2 МэВ достигается порог второй реакции. При еще больших энергиях возможны две последние реакции.

1.2.5. Кинематический анализ реакций расщепления

В настоящей работе производится анализ реакции расщепления легких ядер 12 С и 16 О на α -частицы под действием быстрых нейтронов (углерод и кислород входят в состав желатина):

$${}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n \to 3 \cdot {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + Q_{1}, \qquad (17)$$

$${}^{16}_{6}O + {}^{1}_{0}n \to 4 \cdot {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + Q_{2},$$
 (18)

В работе смоделированы пластинки с эмульсией типа Е-1 или А, чувствительные к α -частицам и протонам (с энергией до 10—20 МэВ). Как уже отмечалось выше, следы α -частиц и протонов на этих пластинках легко различаются визуально по плотности следа. На рисунке 5 приведены микрофотографии трех- и четырехлучевых звезд α -частиц, соответствующих расщеплению ядер ¹²С и ¹⁶О. На микрофотографии видны также следы протонов отдачи.



Рисунок 5 – Микрофотографии трех-(слева) и четырехлучевых звезд (справа) α-частиц

	1.3. Описание программы
E_{a2} E_{a2} E_{a2} E_{a3}	Плоскость фотопластинки E_{a2} E_{a2} E_{a3} E_{a3}

Рисунок 6 – Образование звезды в плоскости фотопластинки.

На рисунке 6 показано образование звезды при взаимодействии нейтрона с ядром углерода. Где E_{n0} – энергия первичного нейтрона (нейтрона до взаимодействия с ядром); E_{n1} – энергия вторичного нейтрона (нейтрона после взаимодействия с ядром); E_{a1} - E_{a3} – энергии альфа-частиц.

Структура (блок-схема) программы приведена на рис. 7.



Рисунок 7 – Блок-схема программы.

Используя зависимости прохождения заряженных частиц в веществе моделируется поле фотоядерной пластинки, в котором расположены треки от соответствующих частиц. На рис. 8 приведено окно ввода всех необходимых параметров.

1.3.1. Ввод параметров эксперимента

Моделирование ядерных физических про	цессов методом динамики частиц	x
Задание Микроскоп Отчет		
Основные данные		
Входные данные лаборанта	Mure I	0
тамилия		
Группа	Дата и время начала выполнения работы: 3	0.12.1899 (0:00:00)
Выберите лабораторную работу: Компьютерное моделирование реакций расш	епления легких ядер нейтронами	О Моделирование ядерных реакций по ядрам отдачи
 Настройка исходных данных и начальных услови 	й лабораторной работы №1	☐ Настройка исходных данных и начальных условий лабораторной работы №2
Компьютерное моделирование реакций р	асщепления легких ядер нейтронами	Моделирование ядерных реакций по ядрам отдачи
Общая плотность образовавшихся звезд к Плотность трехлучевых звезд к плот Разброс переоначальной энергии нейтронов Разброс глубины Формировани СS-01-004 type plate E	 сплощади исследуемой пластинки, Ps 50 % 50 % сости четырехлучевых, Ps1/Ps2 0 % участе уощих в образовании звеза, dEn 0 % я звезды в пластинке, dDs 0 % 	Uбщая плотность образовавшихся ядер отдачи к площади исследуемой пластинки, Ps Разброс первоначальной энергии нейтронов участвующих в образовании ядер отдачи, dEn Разброс глубины формирования ядраотдачи в пластинке, dDs ↓
Спенерировано всего звезд: О реакция (12C+n) - С), реакция (160+n) - 0	Сгенерировано всего звезд: 0
	Применить начальные усло	вия и сгенерировать пластинку

Рисунок 8 – Параметры начальных условий для генерации пластинки.

• Общая плотность образовавшихся звезд к площади исследуемой пластинки, Ps Число сгенерированных звезд. Максимальное значение приближенно лежит в пределах 300-310 шт.

- Плотность трехлучевых звезд к плотности четырехлучевых, Ps1/Ps2 Ps1/Ps2 = 0 % – сгенерированные звезды являются трехлучевыми Ps1/Ps2 = 100 % – сгенерированные звезды являются четырехлучевыми
- Разброс первоначальной энергии нейтронов участвующих в образовании звезд, dEn Диапазон первоначальной энергии нейтронов – 10,1-18,1 МэВ
- Разброс глубины формирования звезды в пластинке, dDs dDs = 0 % – звезда сформировалась на поверхности пластинки dDs = 100 % – звезда сформировалась на поверхности пластинки оборотной стороны.

1.3.2. Поиск и анализ звезд

После генерации пластинки поиски и анализ звезд осуществляется на вкладке «Микроскоп» (см. рис.9).



Рисунок 9 – Параметры начальных условий для генерации пластинки.

Рабочее окно условно разделено на две части: первая (верхняя) – органы управления микроскопом поле зрения для поиска и анализа звезд; вторая (нижняя) – координатная сетка ядерной фотопластинки с расположением на ней центров образовавшихся звезд.

- Фокальная плоскость показывает уровень текущей глубины фокуса в пластинке
- Яркость интенсивность лампы микроскопа (насыщенность цвета светофильтра)
- Светофильтр задает цвет одного из пяти цветов поля зрения
- Поле зрения рабочая область поиска и анализа звезд
- Панель управления содержит органы навигации по пластинке и кнопки определения размеров треков лучей



Рисунок 10 – Поле зрения и панель управления микроскопом.

Подробнее рассмотрим процесс определения параметров лучей и тип звезды (см. рис.10).

Выбрав область для поиска звезд, в данном примере эта область – G3 (левый верхний угол поля зрения), необходимо настроить фокальную плоскость и позицию исследуемой звезды. **Фокус** изменяет фокальную плоскость в пределах толщины пластинки (толщина пластинки 600 мкм). **Поз.Х** и **Поз.У** – перемещают столик пластинки относительно поля зрения по горизонтали и вертикали соответственно. Показания значений координат относительные в пределах выбранной области. **х** – увеличение изображения картинки (x150, x300, x600, x1200).

После идентификации звезды необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши в районе центра звезды, чтобы определить ее центр. Далее кнопки с цифрами от1 до 4 определяют лучи звезды. Щелкнув по кнопке 1 и по концу луча программа автоматически определит его длину и угол. Для второго третьего и четвертого лучей необходимо повторить процедуру нажав на соответствующую кнопку.

Программа полуавтоматически идентифицирует тип звезды, для этого лаборант должен использовать первые три кнопки 1-3 для определения лучей, если звезда трех лучевая.

Для корректировки лучей необходимо выбрать звезду, для этого удерживая Ctrl целкнуть в центр звезды (выбранная звезда обозначена двойным кругом, невыбранная - одинарным).

Для удаления звезды необходимо щелкнуть в центр звезды удерживая Shift.

Кнопка С удаляет все найденные звезды.

1.3.3. Вывод результатов

` ∭ Mo∤	целировани	е ядерні	ых физиче	ских проце	ессов ме	тодом дин	амики ча	стиц										×
Задан	ие 🛛 Микроск	оп Отче	r															
модел СS-01	ИРОВАНИЕ -004	яд в рных	ФИЗИЧЕСІ	ких проце	CCOB ME	годом дин	іамики ча	стиц									-	
Входн	ше данные	лаборал	 ma:															
•a	миллия: Ив	анов																
0 74	ество: Ив	ан анович																
П	pynna: 4-	401															-	
Дата	и время н	ачала ві	полнения	т работы:	21.11.3	2006 (10:	55:26)											
Лабот	аторная р	абота №																
"Комп	ьютерное :	моделир	ование ре	акций ра	сщеплени	ия легких	ядер не	йтронам										
14																		
Исход	ные данны	е и нач: 	альные ус	2ЛОВИЯ 														
Общая	плотност	ь образо	вавшихся	і звезд к	площади	и исследу	емой пла	стинки,	Ps = 100									
Плотн	юсть трех.	лучевых	звезд к	плотности	и четыр	ехлучевых	, Psl/Ps											
Разбр	ос первон	ачальної и форма	і энергиз	и нейтрон	ов учас	гвующих в	: образов : 100 %	ahun 3B	езд, dEn	= 100 %								
			пвания -															
				звезды в і														
n N	Зона	x0	у0 у0	EnO	тип Тип	Enl WoP	al	Ll	El MoR	a2	L2	E2 NoR	a3	L3	E3 WoR	a4	L4	
n 	Зона Х: Ү	х0 мкм	у0 мкм	En0 M3B	Тип	Enl M9B	аl град	L1 MRM	El N9B	а2 град	L2 MRM	E2 N9B	а3 град	ГЗ МКМ	E3 N9B	а4 град	L4 MRM	
n n 1	Зона Х: Ү ?:?	х0 мкм	у0 мкм	En0 M3B 16,60	Тип	En1 M9B 1,58	аl град ?	L1 мкм ?	В1 МэВ ?	а2 град ?	L2 мкм ?	В2 МэВ ?	а3 град ?	L3 мжм ?	E3 M9B ?	а4 град ?	L4 мкм ?	
1 2	Вона X: Y ?:? ?:? 2:2	ж0 ыясы	у0 мкм	En0 M9B 16,60 10,70	Тип 4 4	En1 M9B 1,58 0,96	аl град ? ?	L1 мкм ? ?	E1 M9B ? ?	а2 град ? ?	L2 MRM ? ? ?	E2 N5B ? ?	а3 прад ? ?	L3 мкм ? ? ?	E3 NoB ? ?	а4 град ? ?	L4 мкм ? ?	
1 2 3 4	Зона X: Y ?:? ?:? ?:? ?:? ?:?	х0 ыкм	у0 мкм	En0 MaB 16,60 10,70 17,90 18.00	Тип 4 4 3 4	En1 M9B 1,58 0,96 0,95 1.08	аl град ? ? ? ?	L1 мкм ? ? ? ?	E1 N9B ? ? ? ?	а2 град ? ? ? ?	L2 MRM ? ? ? ? ?	E2 H9B ? ? ? ?	аЗ град ? ? ? ?	LЗ мжм ? ? ? ? ?	E3 M9B ? ? ? ? ?	а4 град ? ? ?	L4 мжм ? ? ?	
1 2 3 4 5	Зона X: Y ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:?	х0 мжм	у0 ыкы	En0 MsB 16,60 10,70 17,90 18,00 14,20	Тип 4 4 3 4 3	Enl MeB 1,58 0,96 0,95 1,08 0,24	аl прад ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L1 billebil ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E1 M3B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а2 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 мкм ? ? ? ? ? ?	E2 M3B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а3 град ? ? ? ? ?	L3 MRM ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 HaB ? ? ? ? ? ?	а4 град ? ? ?	L4 MRM ? ? ?	
1 2 3 4 5 6	Вона X: Y ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:?	хО	у0 мкм	En0 MaB 16,60 10,70 17,90 18,00 14,20 10,90	Тип 4 4 3 4 3 4	En1 MoB 1,58 0,96 0,95 1,08 0,24 0,97	аl град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L1 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E1 MoB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а2 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E2 M9B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а3 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 H5B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а4 град ? ? ?	L4 MRM ? ? ? ?	
1 2 3 4 5 6 7	Вона X:Y ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:?	x0 MRM	у0 у0 мкм	En0 MsB 16,60 10,70 17,90 18,00 14,20 10,90 17,10	Тип 4 4 3 4 3 4 4 4	Enl M9B 1,58 0,96 0,95 1,08 0,24 0,97 1,13	аl град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L1 MREM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E1 MoB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а2 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E2 M9B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а3 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MREM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 N∋E ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а4 град ? ? ? ? ?	L4 MRM ? ? ? ? ? ?	
1 2 3 4 5 6 7 8	Зона X: Y ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:	х0 мюм	уО макы	En0 MsB 16,60 10,70 17,90 18,00 14,20 10,90 17,10 13,90	Тип Тип 4 4 3 4 3 4 4 4 4	En1 MaB 1,58 0,96 0,95 1,08 0,24 0,97 1,13 0,45	аl град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L1 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E1 H3B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а2 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E2 H9B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а3 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 NoB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а4 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 200000 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	
1 2 3 4 5 6 7 8 9	Вона X: Y ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:	х0 ыкм	у0 мем	En0 MaB 16,60 10,70 17,90 18,00 14,20 10,90 17,10 13,90 15,20	Тип 4 4 3 4 3 4 4 4 4 4 4 4	Enl NoB 1,58 0,95 1,08 0,24 0,97 1,13 0,45 0,59	al rpan ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L1 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E1 MoB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a2 rpan ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E2 H9B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a3 rpan ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 MoB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а4 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 200000 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Вонка X: Y ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:	х0 ыяғы	уО макы	En0 H9B 16,60 10,70 17,90 18,00 14,20 10,90 17,10 13,90 15,20 13,50	Тип 4 4 3 4 4 4 4 4 4 3	En1 MpB 1,58 0,95 1,08 0,24 0,97 1,13 0,45 0,59 0,15	al rpan ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L1 MEM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E1 M=B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а2 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E2 H9B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a3 rpan ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MEM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 MoB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а4 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 308533 ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	Soma X:Y 2:2 2:2 2:2 2:2 2:2 2:2 2:2 2:2 2:2 2	хО	у0 ыкы	En0 MaB 16,60 10,70 17,90 18,00 14,20 10,90 17,10 13,90 15,20 13,50 11,30	Trm 4 4 3 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4	Enl H5B 1,58 0,96 0,95 1,08 0,24 0,97 1,13 0,45 0,59 0,15 1,04	20000 21 7923 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	L1 Michol ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E1 MaB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а2 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 MRM	E2 M=B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а3 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 H2B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	а4 град ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 MRN4 ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	
m 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	Зона X:Y ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?	x0 MRM	у0 ыкм	En0 MaB 16,60 10,70 17,90 18,00 14,20 10,90 14,20 10,90 15,20 13,50 11,30 16,10	Tim 4 3 4 3 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 4 4	Enl H3B 1,58 0,95 1,08 0,24 0,27 1,13 0,45 0,59 0,15 1,04 0,97	al rpan ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L1 200355 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	E1 M5B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a 2 rpat ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 MKM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E2 M5B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a3 rpan ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 10818 ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 H9B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a4 rpan ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 MOUS ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	
m 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	Borra X: Y ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:	XO MRM	уорания , уо	En0 H9B 16,60 10,70 17,90 18,00 14,20 10,90 17,10 13,90 15,20 13,50 11,30 16,10 12,40	Типт 4 4 3 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 3 4 3 4	En1 M3B 1,58 0,96 0,95 1,08 0,24 0,97 1,13 0,45 0,59 0,15 1,04 0,97 0,26	al rpan ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L1 30834 ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E1 MSB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a 2 rpan ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 bitNM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E2 M5B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	m3 rpan ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MPM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 H5B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a4 rpa1 ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 MPM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	
m 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	Зона У: У 7: ? 7: ?	ж0 жем	уо хосы	En0 H9E 16,60 10,70 17,90 14,20 14,20 17,10 17,10 17,10 17,10 17,10 17,10 17,10 17,10 17,10 12,40 12,40 10,20	Trm 4 4 3 4 4 4 4 3 4 4 3 4 3 4 3 3 4 3 3 4 3	En1 H5B 1,58 0,96 1,08 0,24 0,95 1,13 0,45 0,59 1,13 0,45 0,15 1,04 0,26 0,20	al ppag	L1 MRM 2 2 2 2 2 2 2 2 2	E1 HoB 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	a2 rpat ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 hotst ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E2 HoB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a3 rpar ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 H9E ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a4 rpax ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L-4 Minute ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	
m 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15	20008 X:Y 2:7 2:7 2:7 2:7 2:7 2:7 2:7 2:7 2:7 2:7	ж0 мжи	уо мам	En0 H=B 16,60 17,90 17,90 18,00 14,20 10,90 17,10 13,50 15,20 15,50 11,30 16,10 16,10 12,40 10,20	Terr 4 4 3 4 4 4 4 3 4 4 3 4 4 3 3 4 3 3 4 4 3 3 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 4	En1 H3B 1,58 0,96 0,24 0,97 1,13 0,45 0,59 0,15 1,04 0,97 0,20 0,49	al ppag	L1 MRM	El MsD ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a2 rpat ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 MRM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E2 MoB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	83 19 65 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	L3 MRM	E3 H5B 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	a4 rpa1 ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L-4 MEM	
m 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16	Botta X:Y ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?	ж0 мкм	мани 240	En0 H=B 16,60 17,90 18,00 14,20 17,10 13,20 13,50 13,50 13,50 14,20 15,20 12,40 12,20 13,60	Tran 4 4 3 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 4 4 3 3 4 4 4 3 3 4 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 4 4 3 3 4 4 3 4 3 4 4 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 4 4 3 4 4 4 4 3 4	Rn1 HoB 1,58 0,95 1,08 0,97 1,13 0,45 0,15 1,97 0,26 0,26 0,49 1,31	al rpar	L1 MRM	E1 H=P ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a2 rp a1 ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 MRM 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	E2 H∋E ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	83 npss ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MRM	E3 HoB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a4 rpax ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 MEM ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	
m 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17	Some X:Y 2:? 2:? 2:? 2:? 2:? 2:? 2:? 2:? 2:? 2:?	х0 1973	у0 3034	En0 H=B 16,60 10,70 17,90 14,20 10,90 17,10 13,90 15,20 13,50 11,30 16,10 12,40 10,20 10,20 12,60 12,60	Tran 4 4 3 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 5 4 4 5 5 5 5	Rn1 H>B 0,96 0,95 1,08 0,24 0,97 1,13 0,45 0,59 0,15 1,04 0,97 0,20 0,20 0,20 0,49 1,31 0,28	al rpax ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L1 MEM	E1 ₩⇒E ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	82 rp at ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 MRM	E2 H⇒E ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	m3 rpm ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MEM	E3 MbB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a4 rpax ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 bross ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	
m 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18	30H8 X:Y 2:2 2:2 2:2 2:2 2:2 2:2 2:2 2:2 2:2 2	хо	ую	En0 H=B 16,60 17,90 14,20 10,90 17,10 13,90 15,20 13,50 11,30 16,10 12,40 10,20 12,00 13,50 11,30	Tran 4 4 3 4 4 4 4 4 4 3 3 4 3 3 3 3 3 3 3	Rn1 HoB 1,58 0,95 1,08 0,24 0,97 1,13 0,45 0,59 0,15 1,04 0,97 0,26 0,20 0,49 1,31 0,28 0,23	al rpan	L1 Mitted 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	E1. N⇒E ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	#2 rp #1 ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 Minut ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E2 HoE ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	83 19 64 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	L3 Mitter ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 Hbb 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	a4 rpax ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 xmeat ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	
m 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 9 0 0	Botta X:Y ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?	х0 1001	лали 240	En0 H=B 16,60 17,90 18,00 14,20 10,90 17,10 13,90 15,20 13,50 16,10 12,40 10,20 12,00 13,60 17,30 15,50 17,70	Tran 4 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	Rn1 HoB 1,58 0,95 1,08 0,97 1,13 0,45 0,97 1,13 0,15 1,04 0,97 1,31 0,23 0,23	al rpar	L1 Jarra 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	E1 H=E ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	2 pp sa ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 JUTM 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	E2 H⇒E ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	83 npex ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MPM 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	E3 Map ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	ad rpan ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 kans ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	
m 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	Some X: 7 7:7 7:7 7:7 7:7 7:7 7:7 7:7 7:7 7:7	хо	ую маны	En0 H=B 16,60 10,70 17,90 14,20 10,90 17,10 13,90 15,20 13,50 11,30 16,10 12,40 10,20 12,00 13,50 17,30 17,30 17,70 12,10	Trm 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 4 4 3	Rn1 HbB 0,96 0,95 1,08 0,24 0,97 1,13 0,24 0,97 0,26 0,29 0,20 0,49 0,20 0,49 0,20 0,49 1,31 0,28 0,23 0,71 0,26	al rpan	LL MENN 2 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	E1 ₩⇒E ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	#2 Pp #4 ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 MENN ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E2 H>B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	m3 rpm ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MBN ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 MbB ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a4 rpax ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 2005 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	
<pre>p 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21</pre>	30H8 X Y 2:7 2:7 2:7 2:7 2:7 2:7 2:7 2:7 2:7 2:7	x0 xxxx	ую	En0 H>B 16,60 17,90 14,20 10,90 17,10 12,90 15,20 13,50 11,30 16,10 12,40 10,20 12,40 10,20 12,00 13,50 17,30 12,10 12,10 17,70	Trm 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 4 3 3 4 4 5 3 4 4 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	Rn1 HoB 1,58 0,95 1,08 0,24 0,97 1,13 0,45 0,59 0,15 1,04 0,97 0,20 0,49 1,31 0,20 0,49 1,31 0,23 0,23 0,58	al rpax 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	LL MENS 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	E1 ₩⇒B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	82 rp at ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L2 Mitta ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E2 ₩⇒E ? ? ? ? ? ? ? ? ?	83 Ppax 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	L3 MEN ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E3 The ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	a4 rpa ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 kdbak ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	
n n 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 21 10 21 10 21 10 11 12 20 21 1	Botha X:Y ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?:? ?	ж0 мени	урания Ур	En0 H=B 16,60 17,30 17,30 18,00 17,10 13,90 15,20 13,50 15,20 15,10 12,40 10,20 12,00 13,60 12,00 13,50 17,70 15,50 17,70	Tran 4 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 4 3 3 3 3 4	Rn1 H9B 1,58 0,95 1,08 0,27 1,13 0,45 0,59 0,15 1,04 0,97 0,26 0,20 0,49 1,31 0,23 0,71 0,87	al rpan	L1 barnet ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	E1 N⇒E ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	2 pp an 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	L2 34744	E2 H∋B ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	83 npas ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L3 MRM 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	E3 Mbp ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	ad Fpag ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	L4 kdons ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?	•

Рисунок 11 – Отчет.

После выполнения лабораторной работы программа формирует полный отчет (рис. 11), в котором отражаются все входные параметры эксперимента и все величины, которые были измерены в ходе виртуальных экспериментов. При необходимости отчет можно сохранить на жесткий диск виде текстового файла и открыть, например, в электронной таблице Microsoft Ехсеl для дальнейших дополнительных вычислений или построения графиков.

1.4. Методика выполнения работы

- Найти на пластинке звезду, характерную для данного вида реакции: трехлучевую, соответствующую реакции (17), и четырехлучевую, соответствующую реакции (18);
- Измерить проекции следов (треков) лучей звезды (соответствующих частиц) по методике описанной выше;
- Считая известными массы ядер ¹²С и ¹⁶О, а также массы нейтрона и α-частицы определить энергию. выделяемую (или поглощаемую) Q₁ и Q₂ соответственно в реакциях (17) и (18);
- Определить энергии α-частиц, образующихся при исследуемых реакциях по данным измерения проекций следов в плоскости пластинки;
- На основании законов сохранения определить энергию и импульс первичного и вторичного нейтронов, участвующих в радиации, следы которых в эмульсии не видны.

1.5. Контрольные вопросы и задачи

- 1. Во сколько раз число зерен, образованных на единице пути α-частицей в эмульсии, больше числа зерен, образованных протонами той же кинетической энергией (порядка МэВ);
- 2. Сравнить ионизационные потери в воздухе электронов и протонов с кинетической энергией порядка 100 кэВ;
- 3. Определить энергию связи нейтрона в ядрах ${}^{2}_{1}$ H, ${}^{12}_{6}$ C, ${}^{4}_{2}$ He, ${}^{7}_{3}$ Li, ${}^{16}_{8}$ O и ${}^{17}_{8}$ O, используя табличные данные масс изотопов;
- 4. Определить пороги реакций (17) и (18) и соответственно энергии связи α-частиц в ядрах ${}^{12}_{6}$ С и ${}^{16}_{8}$ О, используя данные об энергии связи нейтронов в этих ядрах из задачи 3;
- 5. Какая энергия выделяется в реакции синтеза при образовании ядра ⁴/₂ Не из двух дейтронов, если энергия связи на один нуклон в дейтроне равна 1,9 МэВ, а в ядре гелия 7,06 МэВ?
- 6. Для регистрации медленных нейтронов используется реакция ${}_{5}^{10}B(n, \alpha){}_{3}^{7}Li$. Найти кинетические энергии α -частицы и ядра отдачи ${}_{3}^{7}Li$.

1.6. Рекомендуемая литература

- 1. Техническое описание МБИ-9
- 2. К.Н. Мухин. Введение в ядерную физику. М.: Атомиздат, 1963, 588 с.
- 3. О.Ф. Немец, Ю.В. Гофман. Справочник по ядерной физике. Киев "Наукова думка", 1975, 415 с.
- 4. Ю.М. Широков, Н.П. Юдин. Ядерная физика. М.: Наука, 1972, 671 с.
- 5. А.В. Юшков, В.И. Канашевич, М.А. Жусупов. Ядерная физика. Понятийный аппарат. Алматы: Казахский университет, 2002, 151 с.

Энергия альфа-частиц Е, МэВ

Зависимость длины пробега в эмульсии от энергии α-частиц

ПРИЛОЖЕНИЕ А



0,1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Определение линейных размеров при соответствующем увеличении.