

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**

ДУЛОВ Е.Н., ГАЙНОВ Р.Р., ИВОЙЛОВ Н.Г.

РАССЕЯНИЕ РЕЗЕРФОРДА

2013

Печатается по решению
Редакционно-издательского совета
ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Учебно-методической комиссии Института физики
Протокол № 4 от 17 июня 2013 г.
Заседания кафедры физики твердого тела
Протокол № 16 от июня 2013 г.

Авторы:

канд. физ.-мат. наук, ассистент Дулов Е.Н.
канд. физ.-мат. наук, ассистент Гайнов Р.Р.
канд. физ.-мат. наук, доцент Ивойлов Н.Г.

Рецензент:

канд. физ.-мат. наук Манапов Р.А.

РАССЕЯНИЕ РЕЗЕРФОРДА. Учебно-методическое пособие / Е.Н. Дулов, Р.Р. Гайнов Н.Г. Ивойлов // Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2013. – 15 с.

Аннотация

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов Института физики дневного отделения, изучающих общий физический практикум по курсам «Физика атомного ядра и частиц» и «Ядерная физика». В пособии содержится описание лабораторной работы и ход ее выполнения с целью практического закрепления теоретического материала. Самостоятельная работа студентов основана на оборудовании фирмы Leybold Didactic GmbH (Германия).

© Казанский федеральный университет, 2013
© Дулов Е.Н., Гайнов Р.Р., Ивойлов Н.Г., 2013

Введение.....	4
1. Рассеяние Резерфорда.....	4
2. Сечение взаимодействия. Дифференциальное сечение.....	7
3. Схема экспериментальной установки.....	9
4. Порядок выполнения работы	10
5. Анализ и представление результатов	12
6. Вопросы для самоподготовки	14
Литература.....	15

Введение

Цель настоящей работы - знакомство с современным аналогом эксперимента Резерфорда, Гейгера и Марсдена 1911 года по рассеянию альфа-частиц на тонкой золотой фольге, благодаря которому было открыто атомное ядро.

Практическая часть работы включает знакомство с техникой и методикой экспериментов по рассеянию альфа-частиц препарата ^{241}Am в вакуумной камере с регистрацией альфа-частиц полупроводниковым детектором. Предполагается экспериментальная проверка формулы Резерфорда.

1. Рассеяние Резерфорда

В 1911 году Резерфорд открыл атомное ядро и определил верхнюю границу для его размера, анализируя экспериментальные данные Гейгера и Марсдена по рассеянию альфа-частиц тонкими фольгами золота. Этот год можно считать годом основания экспериментальных методов рассеяния в физике ядра и частиц.

При рассмотрении процесса рассеяния Резерфорд использовал следующие допущения:

- Атом содержит ядро – область, в которой заключён положительный заряд Ze , где Z это порядковый номер атома в таблице Менделеева.
- Ядро и альфа-частица могут рассматриваться как точечные.
- Ядро достаточно массивно по сравнению с альфа-частицей, отдачей ядра можно пренебречь. Столкновение альфа-частицы и ядра упругое.
- Законы классической механики и закон Кулона применимы в субатомных масштабах расстояний и нет других сил, действующих на альфа-частицу.

Если столкновение лобовое (вектор скорости альфа-частицы нацелен точно на ядро с зарядом Z), максимальное сближение альфа-частицы с ядром D может быть найдено:

$$T = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{D}, \quad (1)$$

или

$$D = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{T}. \quad (2)$$

Здесь T - кинетическая энергия альфа-частицы. После такого столкновения альфа-частица изменит направление своего движения на противоположное, т.е. угол рассеяния равен π (рис.1).



Рисунок 1. Лобовое столкновение альфа-частицы и ядра.

Рассмотрим частный случай, когда продолжение траектории альфа-частицы проходит на расстоянии b от ядра. Это величина – перпендикуляр, опущенный из точки ядра на продолжение траектории, называется прицельным параметром или прицельным расстоянием.

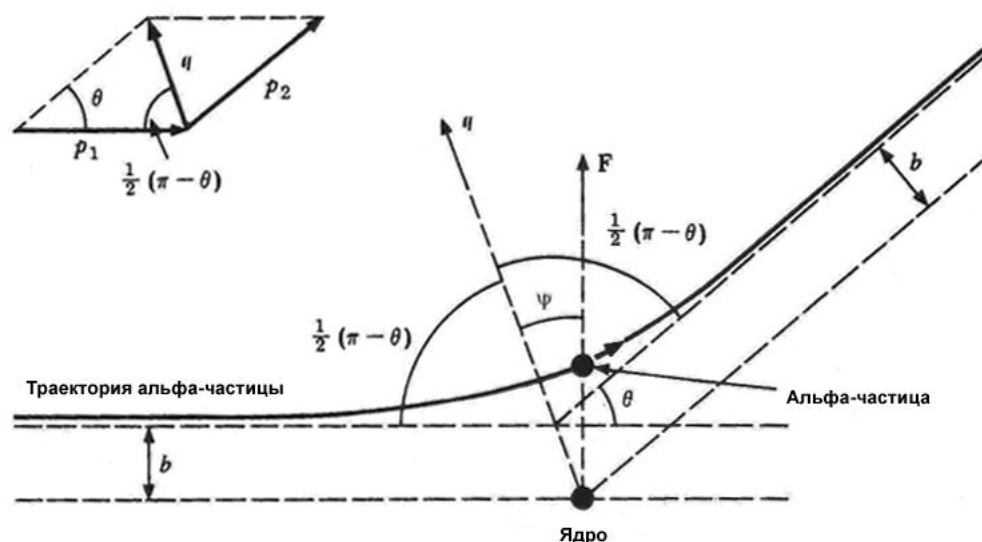


Рисунок 2. Рассеяние альфа-частицы неподвижным ядром.

Импульсы \vec{p}_1 , \vec{p}_2 альфа-частицы до и после рассеяния, соответственно, имеют разную ориентацию, но одинаковый модуль P (рассеяние упругое). Обозначим вектор изменения импульса $\vec{q} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$. Из геометрического построения на рис. 2 можно заметить, что:

$$\frac{q}{p} = \frac{\sin \theta}{\sin\left(\frac{1}{2}(\pi - \theta)\right)} = 2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (3)$$

Направление вектора \vec{q} проходит через точку максимального сближения альфа-частицы и ядра (рис.2).

Релятивистские эффекты для альфа-частицы в опыте Резерфорда можно не рассматривать, поскольку её кинетическая энергия на 3 порядка меньше её энергии покоя.

Введём для описания альфа-частицы полярные координаты, r и φ так, что угол φ отсчитывается от направления \bar{q} . Сила кулоновского отталкивания, действующая на альфа-частицу со стороны ядра:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2}. \quad (4)$$

или, используя введенные в рассмотрение величины (1) и (2),

$$F = \frac{DT}{r^2}. \quad (5)$$

Компонента этой силы вдоль направления \bar{q} ,

$$F_q(t) = \frac{DT}{r^2} \cos\varphi(t). \quad (6)$$

Записывая второй закон Ньютона в дифференциальной форме, находим переданный альфа-частице импульс:

$$q = \int_{-\infty}^{+\infty} F_q(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2} \cos\varphi dt = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2} \cos\varphi \left(\frac{dt}{d\varphi} \right) d\varphi. \quad (7)$$

Здесь $\dot{\varphi} = d\varphi/dt$ может быть найдено из закона сохранения момента количества движения:

$$L = m_\alpha r^2 \dot{\varphi}. \quad (8)$$

Так как начальный момент:

$$L = bp, \quad (9)$$

получаем:

$$\dot{\varphi} = \frac{bp}{m_\alpha r^2},$$

$$q = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2} \cos\varphi \frac{m_\alpha r^2}{bp} d\varphi = \int TD \cos\varphi \frac{m_\alpha}{bp} d\varphi = \int \frac{pD \cos\varphi}{2b} d\varphi. \quad (10)$$

Из диаграммы импульсов можно видеть, что углы входа и выхода альфа-частицы из области рассеяния равны:

$$\varphi = \pm \frac{1}{2}(\pi - \theta), \quad (11)$$

Подставляя пределы интегрирования, из (10) получим:

$$q = \int_{-\frac{\pi-\theta}{2}}^{+\frac{\pi-\theta}{2}} \frac{pD \cos\varphi}{2b} d\varphi = \frac{pD}{2b} 2 \sin \frac{\pi-\theta}{2} = \frac{pD}{2b} 2 \cos \frac{\theta}{2}. \quad (12)$$

Используя (3), получаем:

$$2p \sin \frac{\theta}{2} = \frac{pD}{2b} 2 \cos \frac{\theta}{2}, \quad (13)$$

откуда следует:

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{D}{2b}. \quad (14)$$

Мы получили связь между углом рассеяния и большинством физических параметров из условий эксперимента (заряд ядра, кинетическая энергия альфа-частицы). Однако, прицельным расстоянием b невозможно управлять в эксперименте Резерфорда, в котором альфа-частицы случайным образом попадают на рассеиватель.

2. Сечение взаимодействия. Дифференциальное сечение

Поскольку альфа-частицы попадают на образец неконтролируемо, самое большее, на что можно опираться при описании эксперимента по рассеянию, это равная вероятность попадания на разные участки образца. Обозначим через F поток альфа-частиц, число частиц, попадающих на единичную площадь поверхности рассеивателя в единицу времени.

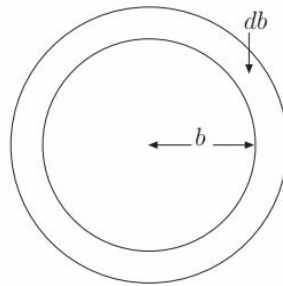


Рисунок 3. Интервал прицельных расстояний для одного ядра.

Число частиц $dN(b)$ – это число частиц, попадающих в единицу времени в кольцо $(b, b + db)$ на рис.3. Оно может быть найдено умножением потока частиц на площадь кольца:

$$dN(b) = 2F\pi b db. \quad (15)$$

Вводя кольцо на рис.3, мы сталкиваемся с термином «сечение», поскольку заменяем процесс рассеяния в интервал углов моделью попадания в некоторую площадку, т.е. само ядро заменяется в отношении рассматриваемой реакции абстрактной плоской фигурой с некоторой площадью. Сечение взаимодействия или сечение реакции – широко распространённая в ядерной физике характеристика, с помощью которой характеризуют вероятность протекания реакций. Внесистемная единица для сечения – барн, 10^{-24} см^2 , что приблизительно равно геометрическому сечению тяжёлых ядер. Используются также производные единицы, например, мбарн, равный 10^{-3} барн. Геометрическое сечение нуклона составляет 1 Фм^2 или 10 мбарн . Кроме этого, барн применяется как внесистемная единица измерения квадрупольных моментов ядер.

Дифференцируя (14), получаем интервал углов, соответствующий интервалу прицельных параметров:

$$db = -\frac{D}{4\sin^2(\theta/2)}d\theta, \quad (16)$$

откуда, выражая b из (14),

$$dN(\theta) = F\pi \frac{D^2 \cos(\theta/2)}{4 \sin^3(\theta/2)}d\theta. \quad (17)$$

Отрицательный знак здесь опущен, поскольку он говорит лишь о том, что при уменьшении прицельного параметра угол рассеяния увеличивается. Для описания эксперимента требуется соотношение между модулями интервалов.

Дифференциальное сечение рассеяния – это число частиц, рассеянных при единичном потоке частиц в единичный интервал углов:

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = \frac{dN(\theta)}{Fd\theta} = \pi \frac{D^2 \cos(\theta/2)}{4 \sin^3(\theta/2)}. \quad (18)$$

Интервалу плоских углов $d\theta$ можно поставить в соответствие элемент телесного угла. Численно, это площадь, соответствующая на единичной сфере интервалу углов $(\theta, \theta + d\theta)$:

$$d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta = 4\pi \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} d\theta. \quad (19)$$

С использованием $\frac{d\Omega}{d\theta}$, полученного из (19),

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{d\theta} = \frac{d\sigma}{d\Omega} 4\pi \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} = \pi \frac{D^2 \cos(\theta/2)}{4 \sin^3(\theta/2)},$$

что дает, в конце концов:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{D^2}{16 \sin^4(\theta/2)}. \quad (20)$$

Такое представление дифференциального сечения рассеяния имеет преимущества перед (18), поскольку для регистрации частиц обычно используется некоторое устройство, имеющее конечную площадь чувствительной части. В опытах Гейгера и Марсдена это был небольшой экран, покрытый сернистым цинком, при попадании на который альфа-частицы возникала видимая в микроскоп световая вспышка. Зная площадь видимой в микроскоп области и расстояние до рассеивателя, можно легко найти значение $d\Omega$. Построив схему эксперимента таким образом, что расстояние детектор – рассеиватель фиксировано, можно считать $d\Omega$ постоянной величиной. Тогда экспериментальные данные должны будут описываться формулой (20) с точностью до коэффициента, даже если не определено значение $d\Omega$.

Рассмотрим фольгу единичной площади толщиной d . Полагая массу атомов приближенно равной Am_p , где A это массовое число атомов поглотителя, m_p - масса протона, получаем общее число рассеивающих ядер:

$$\frac{\rho d}{Am_p} \cdot \quad (21)$$

Доля альфа-частиц, рассеянных в элемент телесного угла $d\Omega$:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\rho d}{Am_p} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \cdot \quad (22)$$

В свою очередь, элемент телесного угла:

$$d\Omega = \frac{S}{r^2}, \quad (23)$$

здесь S - рабочая площадь детектора, r - расстояние от детектора до рассеивателя.

3. Схема экспериментальной установки

Основные узлы экспериментальной установки показаны на рис. 4. В работе используется универсальный узел 1 сбора данных Cassy-Lab2 с модулем многоканального анализатора МСА 2 и соответствующее программное обеспечение. Источник альфа-частиц 3 и полупроводниковый детектор 4 размещены в герметичной вакуумной камере 5, которая откачивается форвакуумным насосом 6. На форвакуумном насосе 6 размещен клапан 7, позволяющий сбрасывать давления в вакуумной магистрали в камере 5. Кроме того, камера 5 соединена с магистралью через клапан 10.

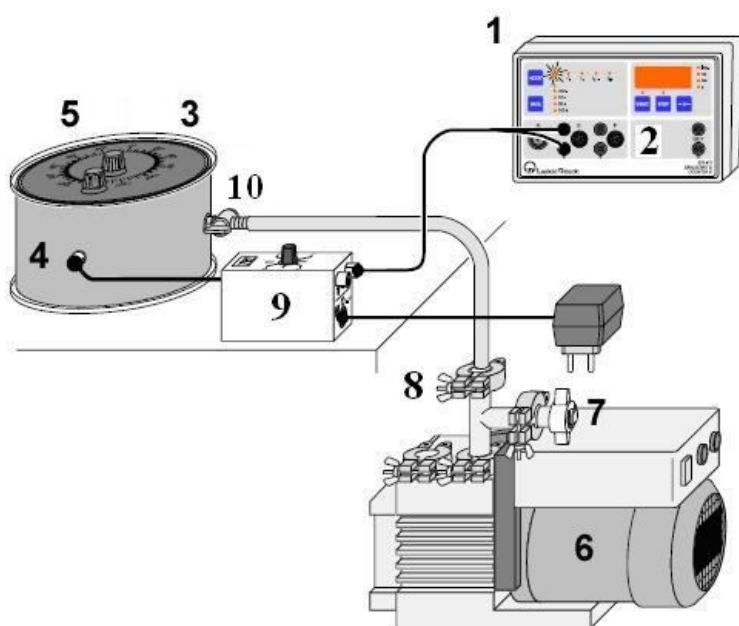


Рисунок 4. Схема экспериментальной установки.

В работе по рассеянию Резерфорда манометр для контроля вакуума отсутствует, но в случае необходимости может быть присоединен через дополнительный соединительный тройник в месте сочленения 8. Детектор подключён кабелем с малой ёмкостью к предварительному усилителю 9, формирующему сигнал с амплитудой порядка 1 В для многоканального анализатора 2.

Вакуумная камера позволяет в процессе работы, при откачанной камере, устанавливать источник альфа-частиц под разными углами, а также крепить сменный рассеиватель и поглотитель. В данной работе поглощение альфа-частиц не затрагивается, соответствующая ручка управления на верхней крышке не используется.

4. Порядок выполнения работы

Общие замечания

- Перед началом работы убедитесь в наличии всех необходимых узлов установки и соединений между ними в соответствии с предыдущим разделом и рис. 4.
- Убедитесь, что источник располагается точно напротив детектора, о чём свидетельствует значение указателя угла отклонения 0 на верхней крышке вакуумной камеры. В случае бóльшего угла отклонения скорость счета альфа-частиц сильно уменьшается и, как следствие, время эксперимента резко возрастает.
- *Внимание!* Описываемое в данном пособии оборудование может использоваться в нескольких лабораторных работах, например, в изучении поглощения альфа-частиц в алюминии и золоте, или в альфа-спектроскопии. При наличии в вакуумной камере кассеты с поглотителем, вращением соответствующей ручки добейтесь того, чтобы он не мешал попаданию альфа-частиц в детектор.
- *Внимание!* При отсутствии в вакуумной камере рассеивателя обратитесь к лаборанту, который установит его в камеру.

Внимание! Самостоятельное вскрытие вакуумной камеры запрещено и является нарушением законодательства РФ в области радиационной безопасности. Доступ к содержимому камеры, включающему альфа-радиоактивный источник, имеет только персонал лаборатории, относящийся к группе А.

Об эксплуатации масляных насосов в лабораторной работе

- В лабораторной работе используются масляные насосы, поэтому предварительно убедитесь в понимании правил эксплуатации данных насосов. В случае возникновения вопросов, обратитесь к лаборанту.
- Неукоснительно и последовательно выполняйте все этапы лабораторной работы, описываемые ниже.

Внимание! В случае невыполнения указанных ниже инструкций, ответственность за возможные поломки оборудования (в том числе, масляных насосов) несет исполнитель лабораторной работы.

Ход выполнения работы.

Внимание! Строго соблюдайте последовательность пяти описанных ниже действий, до отключения насоса. Появление давлений ниже атмосферного в вакуумной магистрали при отключенном насосе может привести к выдавливанию вакуумного масла из насоса в камеру атмосферным давлением. В этом случае работа окажется выведенной из строя.

- Предварительно полностью изучите состав оборудования лабораторной работы (Рис. 4) и ход ее выполнения работы без включения приборов.
- Включите пересчётное устройство и установите на нём режим счёта импульсов.
- Убедитесь, что обычный клапан 7 на входе масляного форвакуумного насоса 6 закрыт, проверив его на свободное вращение по часовой стрелке. В случае открытого клапана без усилий вращайте его по часовой стрелке до появления незначительного сопротивления.
- Убедитесь, что вакуумная магистраль и соответствующие места сочленения герметичны, а насос исправен. Также необходимо убедиться в наличии достаточного количества масла в насосе, что обычно можно сделать через стеклянный уровнемер, встроенный в насос. Масло должно заполнять не менее половины объема уровнемера. В случае отсутствия достаточного количества масла, включать насос запрещено. Обратитесь к лаборанту.
- Включите масляный форвакуумный насос 6. Насос должен работать однообразно (без щелчков и других нетипичных звуков), следите за запахом, испускаемым насосом (с целью упреждения появления запаха гари в случае неисправного насоса). При обнаружении нетипичных звуков и запаха гари немедленно обратитесь к лаборанту.

- Не выключая насос 6, откройте клапан 10 на входе в вакуумную камеру 5 и откачайте объем камеры. При открытии клапана насос на короткое время может изменить ритм работы. Откачивание камеры должно продолжаться до появления импульсов с детектора. Ориентировочная длительность откачки составляет 1-3 минуты.
- Закройте клапан 10 на входе в вакуумную камеру 5.
- Откройте обычный клапан 7, плавно вращая его против часовой стрелки до появления характерного звука напуска воздуха. Это соответствует выравниванию атмосферного давления и давления в вакуумной магистрали.
- Сразу же после открытия клапана 7 отключите насос 6.
- Обратите внимание, что полупроводниковые детекторы, установленные в вакуумной камере, чувствительны к искусственным источникам освещения. При наличии в спектре артефактов, зависящих от прямого попадания света на детектор, выключите на время проведения эксперимента ряд ламп дневного освещения над альфа-спектроскопическими установками в лаборатории.
- Выполните регистрацию не менее 100 импульсов на пересчётном устройстве, запишите их, одновременно записав значение угла рассеяния и общее время регистрации 100 импульсов.
- Вращением ручки на вакуумной камере 5 изменяйте угол рассеяния с шагом не более 10 градусов и повторяйте вышеописанные измерения для различных углов. *Внимание!* В случае значений углов, отличных от 0° , скорость счета альфа-частиц сильно уменьшается по мере увеличения угла и, как следствие, время эксперимента существенно возрастает.
- По окончании измерений отведите источник в исходное положение.

5. Анализ и представление результатов

- При обработке результатов примите во внимание, что две основные спектральные линии ^{241}Am это $T=5486$ кэВ и $T=5443$ кэВ. Соотношение числа частиц, испускаемых в единицу времени в среднем и соответствующих этим двум спектральным линиям, примерно равно 84:13.
- Постройте экспериментальный график зависимости скорости счёта от угла рассеяния.
- Постройте теоретический график зависимости скорости счёта от угла рассеяния с использованием формул (20) и (22).

- Оформить в письменном виде полученные результаты с указанием постановки задачи, кратким описанием выполнения работы, сделанными выводами.
- *Внимание:* в письменные отчеты необходимо включить все экспериментальные значения в виде таблиц, графиков и теоретические оценки. Письменные отчеты, составленные на нескольких страницах, должны быть надежно скреплены скобами (не скрепками). Письменные отчеты должны также содержать информацию об исполнителе (ФИО, номер группы, дата выполнения и сдачи работы).

6. Вопросы для самоподготовки

1. Почему альфа распад встречается в природе только для тяжелых ядер?
2. Почему испускается альфа-частица, а не ядро дейтерия, например?
3. Что произойдет, если рассеиватель из золотой фольги в работе заменить рассеивателем из алюминиевой фольги?
4. Оцените минимальное расстояние, на которое сближаются альфа-частица и ядро в настоящей работе.
5. Что такое сечение взаимодействия?
6. Что такое дифференциальное сечение рассеяния?
7. Почему полупроводниковые детекторы выгодны для использования в альфа-спектроскопии?
8. Опишите процессы, происходящие в полупроводниковом детекторе на базе p-n перехода при регистрации ионизирующей частицы.
9. Для чего требовалось вакуумирование камеры спектрометра?
10. Каков был элемент телесного угла в настоящей работе?

Литература

1. Капитонов, И.М. Введение в физику ядра и частиц [Текст]: учебное пособие / И.М. Капитонов // Москва: УРСС, 2002. – 383 с.
2. Мухин, К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Кн. 1. Физика атомного ядра [Текст]: Учеб. для вузов / К.Н. Мухин // 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1993. – 408 с.
3. Колпаков, П.Е. Основы ядерной физики [Текст]: учебное пособие для пед. инс-тов / П.Е. Колпаков // Москва: Просвещение, 2001. – 401 с.
4. Ишханов, Б.С. Модели атомных ядер [Текст] / Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, В.Н. Орлин // Москва: изд-во Моск. гос. ун-та, 1997. – 155 с.
5. Широков, Ю.М. Ядерная физика [Текст]: учебное пособие / Ю.М. Широков, Н.П. Юдин // Москва: Наука, 1980. – 729 с.
6. Povh, B. Particles and nuclei: an introduction to the physical concepts [Text] / B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche, M. Lavelle // 5th Edition. – Berlin: Springer-Verlag, 2006. – 391 p.

ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА № 4

от 17 июня 2013

заседания Учебно-методической комиссии Института физики КФУ

ПРИСУТСТВОВАЛИ: проф. Таюрский Д.А. (председатель комиссии), доц. Шерстюков О.Н. (зам. председателя комиссии), Хуснутдинов Н.Р., Ильясов К.А., Воронина Е.В., Тюрин В.А., Корчагин П.А., Дуглав А.В., Мокшин А.В., Гарнаева Г.И., Шиманская Н.Н., Соколова М.Г.

СЛУШАЛИ: рекомендацию в печать учебно-методического пособия «Рассеяние Резерфорда» (авторы: Дулов Е.Н., Гайнов Р.Р., Ивойлов Н.Г.)

ПОСТАНОВИЛИ: на основании положительной рецензии к.ф.-м.н., с.н.с. КИББ КНЦ РАН Манапова Р.А. рекомендовать вышеуказанное учебно-методическое пособие к опубликованию в электронном виде на сайте Института физики.

Председатель Учебно-методической комиссии
Института физики, профессор



Таюрский Д.А.