

Ю. В. Тихомиров

# **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**

по курсу физики

**С КОМПЬЮТЕРНЫМИ МОДЕЛЯМИ**

(КВАНТОВАЯ ОПТИКА. АТОМНАЯ ФИЗИКА. ФИЗИКА АТОМНОГО  
ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ)

*для студентов всех специальностей  
всех форм обучения*

**МОСКВА - 2010**

Ю. В.Тихомиров

Лабораторные работы по курсу физики с компьютерными моделями (Квантовая оптика. Атомная физика. Физика атомного ядра и элементарных частиц).

Учебное пособие для студентов высших технических учебных заведений дневной, вечерней и заочной (дистанционной) форм обучения. М., 2010. 52 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<u>ВВЕДЕНИЕ.....</u>	<u>4</u>
<u>ДОПУСК К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....</u>	<u>5</u>
<u>ОФОРМЛЕНИЕ КОНСПЕКТА ДЛЯ ДОПУСКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....</u>	<u>5</u>
<u>ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ К ЗАЧЕТУ.....</u>	<u>6</u>
<u>КВАНТОВАЯ ОПТИКА. АТОМНАЯ ФИЗИКА. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ .....</u>	<u>8</u>
<u>3_1. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ.....</u>	<u>8</u>
<u>3_2. СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА.....</u>	<u>13</u>
<u>3_3. ЭФФЕКТ КОМПТОНА.....</u>	<u>19</u>
<u>3_4. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ.....</u>	<u>25</u>
<u>3_5. ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО.....</u>	<u>32</u>
<u>3_6. ЯДРА АТОМОВ.....</u>	<u>43</u>
<u>НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ.....</u>	<u>52</u>

## ВВЕДЕНИЕ

Данный сборник содержит описания к лабораторным работам, в которых используются компьютерные модели, разработанные компанией «Физикон».

Для начала работы необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, когда ее маркер расположен над эмблемой сборника компьютерных моделей. После этого появится начальная картинка, имеющая следующий вид:

The screenshot shows a software interface with a table of contents on the left and a green sidebar on the right containing physics formulas.

**Глава 5. Квантовая физика**

- 5.1. [Фотозффект](#)
- 5.2. [Комптоновское рассеяние](#)
- 5.3. [Волновые свойства частиц](#)
- 5.4. [Дифракция электронов](#)
- 5.5. [Излучение абсолютно черного тела](#)

**Глава 6. Физика атома и атомного ядра**

- 6.1. [Постулаты Бора](#)
- 6.2. [Квантование электронных орбит](#)
- 6.3. [Атом водорода](#)
- 6.4. [Частица в потенциальной яме](#)
- 6.5. [Лазер, двухуровневая модель](#)
- 6.6. [Энергия связи ядер](#)
- 6.7. [Ядерные превращения](#)
- 6.8. [Ядерный реактор](#)
- 6.9. [Синтез гелия](#)

**Formulas in the sidebar:**

$$W_n = \frac{Ll^2}{2}$$
$$E = h\nu$$
$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$
$$\alpha = \frac{\lambda}{D}$$
$$h\nu = E_2 - E_1$$
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$
$$E_0 = mc^2$$

Чтобы просмотреть дальнейшие пункты содержания данного раздела, надо щелкать левой кнопкой мыши, установив ее маркер на кнопку со стрелкой вниз, расположенную в правом нижнем углу окна.

Прочитав названия, установите маркер мыши над названием требуемой компьютерной модели и дважды быстро щелкните левой кнопкой мыши. Перемещать окна можно, зацепив мышью заголовок окна (имеющий синий фон). Для закрытия окна надо нажать мышью кнопку с крестом в верхнем правом углу данного окна.

## ДОПУСК К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Проводится преподавателем побригадно с персональным опросом каждого студента. Для допуска:

- Каждый студент предварительно оформляет свой персональный конспект данной ЛР (см. соответствующие требования);
- Преподаватель индивидуально проверяет оформление конспекта и задает вопросы по теории, методике измерений, установке и обработке результатов;
- Студент отвечает на заданные вопросы (письменно в черновике конспекта или устно);
- Преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на обложке).

## ОФОРМЛЕНИЕ КОНСПЕКТА ДЛЯ ДОПУСКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Конспект для допуска к ЛР готовится заранее на двойных листах из школьной тетради в клетку (4-5 двойных листов в зависимости от почерка).

Первая страница (обложка):

Допуск	Измерения	Установка	Зачет

Лабораторная работа N\_\_  
Название:

Выполнил:  
студент группы \_\_\_\_\_  
ФИО \_\_\_\_\_  
Дата выполнения: \_\_\_\_\_  
Дата сдачи: \_\_\_\_\_

Следующие страницы:

<p><b>ЧЕРНОВИК</b></p> <p>(здесь и далее на этой стороне должны быть представлены все расчеты, включая расчетные формулы и подстановку числовых значений)</p>	<p><u>Цель работы:</u> (переписать полностью из описания).</p> <p><u>Краткая теория</u> (выписать основные формулы и пояснить каждый символ, входящий в формулу).</p> <p><u>Экспериментальная установка</u> (нарисовать чертеж и написать наименование деталей).</p> <p><u>Таблицы</u> (состав таблиц и их количество определить самостоятельно в соответствии с методикой измерений и обработкой их результатов).</p> <p><u>Оформление отчета</u> (переписать полностью из описания). Этот раздел в описании может иметь и другое название, например, «Обработка результатов и оформление отчета».</p>
---	---

## ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ К ЗАЧЕТУ

Полностью оформленная и подготовленная к зачету работа должна соответствовать следующим требованиям:

1. Выполнение всех **пунктов** раздела описания «Оформление отчета» (в черновике представлены все расчеты требуемых величин, заполнены чернилами все таблицы, построены все графики).
2. **Графики** должны удовлетворять всем требованиям, приведенным ниже.
3. Для всех величин в таблицах должна быть записана соответствующая единица измерения.
4. Записаны **выводы** по каждому графику (см. ниже шаблон).
5. Выписан **ответ** по установленной форме (см. ниже шаблон).
6. Записаны **выводы** по ответу (см. ниже шаблон).

### **ГРАФИК (требования):**

- на миллиметровке или листе в клетку, размер не менее 1/2 тетрадного листа;
- на графике: ОСИ декартовой системы, на концах осей – СТРЕЛКИ, СИМВОЛЫ характеристик, ЕДИНИЦЫ измерения,  $10^N$ ;
- на каждой оси – **РАВНОМЕРНЫЙ МАСШТАБ** (РИСКИ через равные промежутки, ЧИСЛА через равное количество рисок);
- под (или над) графиком – полное название графика **СЛОВАМИ**;
- на графике – экспериментальные и теоретические ТОЧКИ ярко;
- форма графика соответствует ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ зависимости (не ломаная).

### **ВЫВОД по ГРАФИКУ (шаблон):**

Полученный экспериментально график зависимости \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_  
название функции словами  
\_\_\_\_\_ имеет вид (прямой, прямой, проходящей через начало координат,  
название аргумента  
параболы, гиперболы, плавной кривой) и качественно совпадает с теоретической зависимостью между характеристиками, имеющей вид \_\_\_\_\_.  
формула

**ОТВЕТ:** По результатам измерений и расчетов получено значение \_\_\_\_\_,  
название физической характеристики  
равное \_\_\_\_\_ = ( \_\_\_\_\_  $\pm$  \_\_\_\_\_ )  $\cdot 10$  \_\_\_\_\_ .  
символ среднее ошибка степень ед. измер

### **ВЫВОД по ОТВЕТУ (шаблон):**

Полученное экспериментально значение \_\_\_\_\_,  
полное название характеристики словами  
равное \_\_\_\_\_, с точностью до ошибки измерений,  
число, единица измерения  
составляющей \_\_\_\_\_, (совпадает, не совпадает) с (табличным,  
число, единица измерения  
теоретическим) значением этой характеристики, равным \_\_\_\_\_ .  
число, единица измерения

# КВАНТОВАЯ ОПТИКА. АТОМНАЯ ФИЗИКА. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3\_1. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником [1,2]. Запустите программу. Выберите модель «5.1. Фотоэффект». Прочитайте краткие теоретические сведения. Оформите конспект.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с квантовой моделью внешнего фотоэффекта.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей внешнего фотоэффекта.
- Экспериментальное определение красной границы фотоэффекта, работы выхода фотокатода и постоянной Планка.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

ФОТОНЫ – это частицы (кванты), поток которых является одной из моделей электромагнитного излучения (ЭМИ).

ЭНЕРГИЯ ФОТОНА:  $E_{\phi} = h\nu$ ,

$\nu$  – частота излучения,  $h$  – постоянная Планка,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с).

ЭНЕРГИЯ часто измеряется во внесистемной единице «электрон-вольт».

1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

МАССА ФОТОНА связана с его энергией соотношением Эйнштейна

$$E_{\phi} = m_{\phi}c^2, \text{ отсюда } m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

$$\text{ИМПУЛЬС ФОТОНА } p = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{E_{\phi}}{c},$$

где  $\lambda$  – длина волны ЭМИ.

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ есть явление вылета электронов из вещества (металла, фотокатода) при его облучении электромагнитным излучением (ЭМИ), например, светом. Вылетевшие электроны называются ФОТОЭЛЕКТРОНАМИ. Далее для краткости указанное явление будем называть просто фотоэффектом.

Кинетическая энергия электрона внутри вещества увеличивается на  $h\nu$ , но при вылете фотоэлектрона из вещества им совершается работа  $A_{\text{ВЫХ}}$  (работа выхода) против сил электростатического притяжения к металлу. У фото-

электрона сообщенная ему фотоном порция энергии  $h\nu$  уменьшается на величину, равную работе выхода из металла (фотокатода), а оставшаяся часть имеет вид кинетической энергии фотоэлектрона вне металла (фотокатода):

$$E_{\text{КИН}}^{\text{ВНЕ}} = h\nu - A_{\text{ВЫХ}} .$$

Это соотношение называют формулой (законом) ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТА.

КРАСНАЯ ГРАНИЦА фотоэффекта есть минимальная частота ЭМИ, при которой еще наблюдается фотоэффект, то есть для которой энергия фотона равна работе выхода  $h\nu_{\text{КР}} = A_{\text{ВЫХ}}$ .

ФОТОЭЛЕМЕНТОМ называют устройство, в котором используется внешний фотоэффект. Это устройство как правило включает в себя два металлических электрода, впаянных в стеклянную колбу. Один из электродов называют анодом, а второй – фотокатодом, поскольку он облучается светом (электромагнитным излучением определенного диапазона длин волн) и на нем наблюдается фотоэффект.

Второй электрод называют анодом. Он обеспечивает поглощение фотоэлектронов и протекание тока во всей цепи.

Колба вакуумируется (из нее откачивается воздух до очень низких давлений, порядка  $10^{-7}$  мм.рт.ст.) с тем, чтобы фотоэлектроны могли без столкновений двигаться от катода до анода.

Если напряжение на аноде положительное по отношению к фотокатоду, то фотоэлектроны ускоряются и попадают на анод. Если напряжение анод – катод отрицательное, то фотоэлектроны тормозятся электрическим полем и могут не долетать до анода.

ЗАПИРАЮЩИМ (ЗАДЕРЖИВАЮЩИМ) НАПРЯЖЕНИЕМ называется минимальное тормозящее напряжение между анодом вакуумной лампы (фотоэлемента) и фотокатодом, при котором отсутствует ток в цепи этой лампы, то есть фотоэлектроны не долетают до анода. При таком напряжении кинетическая энергия электронов у катода равна потенциальной энергии электронов у анода, откуда следует выражение:

$$U_{\text{ЗАП}} = \frac{E_{\text{КИН}}^{\text{ВНЕ}}}{e} = \frac{h\nu - A_{\text{ВЫХ}}}{e} = \frac{hc}{e\lambda} - \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{e} ,$$

где  $e$  – заряд электрона.

## **МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ**

Внимательно рассмотрите рис.1 и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

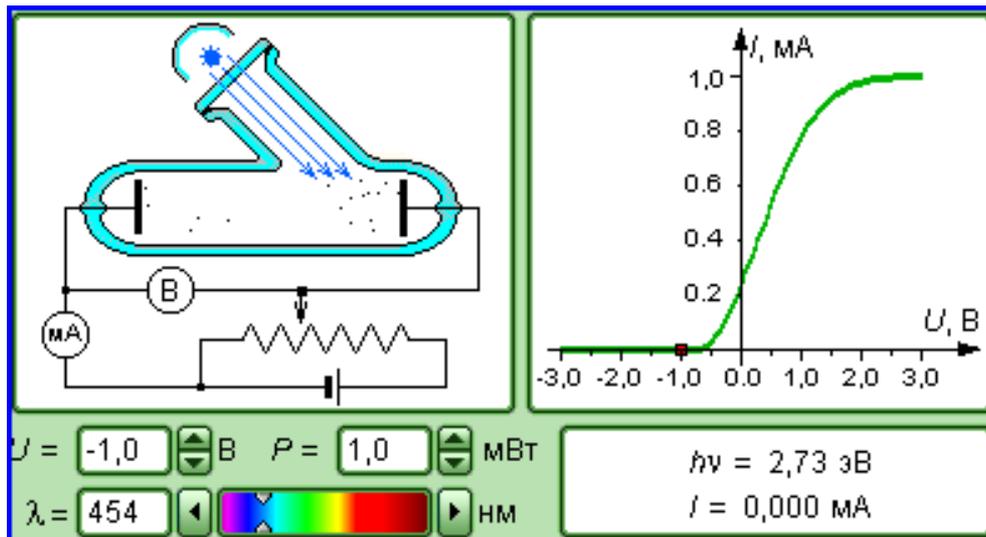


Рис.1. Компьютерная модель для исследования внешнего фотоэффекта.

Нажмите мышью кнопку регулятора интенсивности (мощности  $P$ ) облучения фотокатода и установите максимум интенсивности.

Зацепив мышью, перемещайте метку на спектре, постепенно уменьшая длину волны облучения фотокатода, установите минимальную длину волны ЭМИ ( $\lambda$ ). Изменяя напряжение до запирающего фототока, наблюдайте движение электронов в фотоэлементе.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

### ИЗМЕРЕНИЯ

1. Снова установите нулевое напряжение ( $U$ ) между анодом и фотокатодом. Зацепив мышью, перемещайте метку на спектре, постепенно увеличивая длину волны облучения фотокатода (или щелкайте кнопки регулятора длины волны). Добейтесь полного отсутствия фототока. Зафиксируйте самую большую длину волны (она будет равна  $\lambda_{кр}$ ), при которой фототок еще присутствует. Запишите в тетрадь значение длины волны красной границы фотоэффекта ( $\lambda_{кр}$ ).
2. Для более точного определения связи запирающего напряжения с длиной волны падающего излучения:
  - Сначала установите значение запирающего напряжения в соответствии с табл. 1.
  - Перемещая мышью вертикальную метку на спектре и щелкая кнопки регулятора длины волны, установите такое максимальное значение длины волны, при котором прекращается фототок (при визуальном наблюдении электронов вы видите, что электроны долетают практически до поверхности анода и после этого движутся обратно к катоду). При

этом напряжение между анодом и фотокатодом равно напряжению запирающего  $U_{\text{зап}}$ .

- Значения  $\lambda$  и  $U_{\text{зап}}$  занесите в табл. 2.

ТАБЛИЦА 1 (не перерисовывать). Значения запирающего напряжения

Бригады	$U_{\text{зап1}}$	$U_{\text{зап2}}$	$U_{\text{зап3}}$	$U_{\text{зап4}}$
1, 5	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8
2, 6	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9
3, 7	-0,3	-0,5	-0,7	-1,0
4, 8	-0,4	-0,7	-0,8	-1,1

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений и расчетов

$i =$	1	2	3	4
$U_{\text{зап}i}, \text{В}$				
$\lambda_i, \text{нм}$				
$1/\lambda_i, 10^6 \text{ м}^{-1}$				

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

1. Вычислите и запишите в таблицу обратные длины волн.
2. Постройте график зависимости напряжения запирающего ( $U_{\text{зап}}$ ) от обратной длины волны ( $1/\lambda$ ).
3. Определите постоянную Планка, используя график и формулу

$$h = \frac{e}{c} \frac{\Delta U_{\text{зап}}}{\Delta \left( \frac{1}{\lambda} \right)} .$$

4. Определите длину волны красной границы фотоэффекта, вычислите значение работы выхода материала фотокатода.
5. Запишите ответы и проанализируйте ответы и график.

ТАБЛИЦА 3. Значения работы выхода для некоторых материалов

Материал	калий	литий	платина	рубидий	серебро	цезий	цинк
$A_{\text{вых}}, \text{эВ}$	2,2	2,3	6,3	2,1	4,7	2,0	4,0

## Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое фотоны?
2. Назовите все модели электромагнитного излучения.
3. Какую модель надо применять для электромагнитного излучения, падающего на фотоэлемент?
4. Какую модель надо применять для электромагнитного излучения, проникшего в фотокатод и взаимодействующего со свободными электронами металла?
5. Какова модель металла, взаимодействующего с электромагнитным излучением при описании фотоэффекта?
6. Напишите формулу энергии фотона.
7. Какова скорость движения фотона в металле?
8. Напишите формулу, связывающую энергию фотона и его массу.
9. Напишите выражение энергии фотона через его импульс.
10. Дайте формулировку явления внешнего фотоэффекта.
11. Опишите по шагам, что происходит с фотоном, падающим на границу металла.
12. Опишите по шагам, что происходит со свободным электроном металла после его взаимодействия с фотоном.
13. Опишите, что происходит с электроном, входящим в состав атома металла после его взаимодействия с фотоном.
14. Что такое работа выхода? Чья это характеристика?
15. Напишите формулу Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
16. Дайте определение красной границы фотоэффекта.
17. Как устроен фотоэлемент?
18. Зачем в фотоэлементе применяют вакуумированный корпус?
19. Почему катод фотоэлемента называют фотокатодом?
20. Что такое запирающее напряжение для данного фотокатода?
21. Какие законы сохранения выполняются при движении электрона от фотокатода к аноду?
22. Как движется фотоэлектрон в фотоэлементе при потенциале анода ниже потенциала фотокатода?
23. Как движется фотоэлектрон в фотоэлементе при потенциале анода выше потенциала фотокатода?
24. Как связана кинетическая энергия электрона у катода с его потенциальной энергией у анода и почему?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.26, §§ 202-204.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 36, §§ 36.1, 36.2.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### 3\_2. СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике [1,2]. Запустите программу. Выберите «Модель 6.1. Постулаты Бора». Прочитайте краткие теоретические сведения. Оформите конспект.

#### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

- Знакомство с планетарной и квантовой моделями атома при моделировании процесса испускания электромагнитного излучения возбужденными атомами водорода.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей формирования линейчатого спектра излучения атомарного водорода при низких давлениях.
- Экспериментальное определение постоянной Ридберга.

#### **КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

СПЕКТРОМ электромагнитного излучения (ЭМИ) называется совокупность электромагнитных волн, излучаемых или поглощаемых атомами (молекулами) данного вещества.

ЛИНЕЙЧАТЫЙ спектр состоит из отдельных компонент (спектральных линий).

СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ называется электромагнитное излучение, испускаемое (или поглощаемое) атомом при переходе его электрона из одного стационарного квантового состояния в другое. МОДЕЛИ спектральной линии: гармоническая электромагнитная волна с частотой  $\nu$  или поток фотонов с одной и той же энергией  $E_{\text{ф}} = h\nu$ .

Расстояние между линиями (по шкале длин волн или частот) в линейчатом спектре много больше ширины линий. Такой спектр излучают атомарные газы.

Кроме линейчатого выделяют еще ПОЛОСАТЫЙ спектр, который излучают молекулярные газы, и СПЛОШНОЙ спектр, излучаемый нагретыми твердыми телами.

ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ атома (Бора): в центре атома расположено очень малое положительно заряженное ядро, вокруг которого по определенным (разрешенным) стационарным орбитам движутся электроны, масса которых во много раз меньше массы ядра. При движении по орбите электрон не испускает электромагнитного излучения (ЭМИ). При поглощении ЭМИ (фотона) электрон переходит на более «высокую» разрешенную орбиту, на которой его энергия становится больше на величину  $\Delta E_{\text{эл}}$ , равную энергии поглощенного фотона  $E_{\text{ф}}$ . При обратном переходе электрон испускает фотон

с такой же энергией  $E_{\Phi} = |\Delta E_{\text{эл}}|$ .

КВАНТОВАЯ модель атома отличается от планетарной в первую очередь тем, что в ней электрон не имеет точно определенного радиус-вектора (координаты) и вектора скорости, поэтому бессмысленно говорить о траектории его движения. Можно определить (и нарисовать) только границы области его преимущественного движения (орбитали).

УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА для движения электрона в кулоновском поле ядра атома водорода используется для анализа квантовой модели атома. В результате решения этого уравнения получается ВОЛНОВАЯ ФУНКЦИЯ, определяющая плотность вероятности нахождения электрона вблизи данной точки. Волновая функция зависит не только от координаты  $\vec{r}$  и времени  $t$ , но и от четырех параметров, имеющих дискретный набор значений и называемых квантовыми числами. Они имеют названия: главное, азимутальное, магнитное и магнитное спиновое.

ГЛАВНОЕ квантовое число  $n$  может принимать целочисленные значения 1, 2, ... Оно определяет величину энергии электрона в атоме:

$$E_n = -\frac{E_{iH}}{n^2},$$

где  $E_{iH}$  – энергия ионизации атома водорода (13,6 эВ).

АЗИМУТАЛЬНОЕ (ОРБИТАЛЬНОЕ) квантовое число  $l$  определяет модуль момента импульса электрона при его орбитальном движении  $|\vec{L}| = \hbar \sqrt{l(l+1)}$ . Оно принимает целочисленные значения  $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ .

МАГНИТНОЕ квантовое число  $m_l$  определяет проекцию вектора момента импульса орбитального движения электрона  $L_z$  на направление внешнего магнитного поля  $\vec{B}$ . Оно принимает положительные и отрицательные целочисленные значения, по модулю меньшие или равные  $l$ :

$$L_z = \hbar m_l,$$

где  $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ .

МАГНИТНОЕ спиновое квантовое число  $m_s$  определяет проекцию вектора собственного момента импульса электрона (СПИНА  $\vec{S}$ ) на направление внешнего магнитного поля  $\vec{B}$ :

$$S_z = \hbar m_s$$

и принимает только 2 значения:  $m_s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ .

Для модуля спина

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{s(s+1)},$$

где  $s$  – спиновое квантовое число, которое у каждой частицы имеет только

одно значение. Например, для электрона  $s = \frac{1}{2}$  (аналогично для протона и нейтрона). Для фотона  $s = 1$ .

**ВЫРОЖДЕННЫМИ** называются состояния электрона с одинаковой энергией.

**КРАТНОСТЬ ВЫРОЖДЕНИЯ** равна количеству состояний с одной и той же энергией.

**КРАТКАЯ** запись состояния электрона в атоме: **ЦИФРА**, равная главному квантовому числу, и **БУКВА**, определяющая азимутальное квантовое число:

Буква	s	p	d	e	f
Значение $l$	0	1	2	3	4

**ПРАВИЛО ОТБОРА** азимутального квантового числа:  $\Delta l = \pm 1$ . Электрон в атоме может переходить только между состояниями, удовлетворяющему указанному правилу.

**СПЕКТРАЛЬНОЙ СЕРИЕЙ** называется совокупность линий излучения, соответствующих переходу электрона в атоме на один и тот же нижний уровень энергии. Для атома водорода

Серия	Лаймана	Бальмера	Пашена	Брэкета
Переходы	$np \rightarrow 1s$	$ns \rightarrow 2p, nd \rightarrow 2p$	$nf \rightarrow 3d, np \rightarrow 3d$	$ng \rightarrow 4f, nd \rightarrow 4f$

## **МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ**

Внимательно рассмотрите рис.1.

Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

**Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

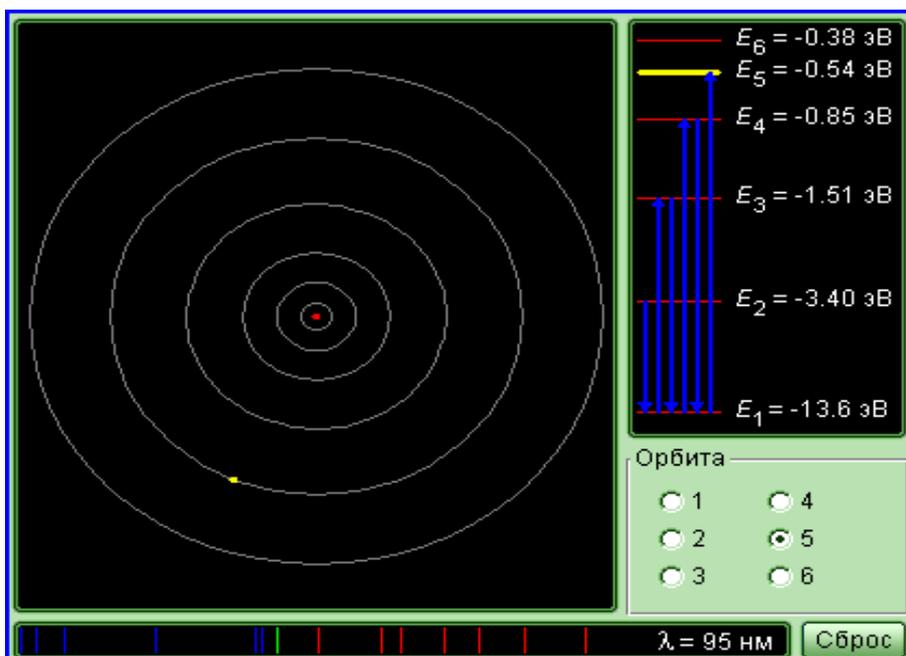


Рис.1. Модель (планетарная) атома водорода.

## ИЗМЕРЕНИЯ

1. Запишите в табл. 2 величину главного квантового числа  $n_0$  для нижнего уровня энергии данной серии, указанную в табл. 1 для вашей бригады. Запишите туда же название соответствующей серии.
2. Подведите маркер мыши к уровню энергии электрона с номером  $n_0$  и коротко нажмите левую кнопку мыши.
3. Подведите маркер мыши к уровню энергии электрона с номером  $n_1$ , большим, чем  $n_0$ , и нажмите коротко левую кнопку мыши.
4. Наблюдайте и зарисуйте мигающую стрелку на модели атома водорода (в левом поле), а также стрелки в правом верхнем поле и отметку в нижнем поле, соответствующие линии в данной серии.
5. Запишите в табл. 2 длину волны данной линии.
6. Повторите измерения, начиная с п.2, для всех возможных верхних уровней заданной серии.

ТАБЛИЦА 1 (не перерисовывать) для выбора начальных условий.

Номер бригады	Гл. кв. число ниж. уровня $n_0$
1,5	1
2,6	2
3,7	3
4,8	4

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений. Серия \_\_\_\_\_.  $n_0 = \_$ .

Номер линии $i$	$n$	$\lambda$ , мкм	$1/n^2$	$1/\lambda$ , мкм <sup>-1</sup>
1				
2				
3				
4				

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

1. Вычислите и запишите в табл. 2 обратные длины волн.
2. Определите, переходу между какими квантовыми состояниями электрона в атоме водорода соответствует каждая линия излучения. Запишите в таблицу значения  $n$ .
3. Постройте график зависимости обратной длины волны ( $\frac{1}{\lambda}$ ) от обратного квадрата главного квантового числа ( $\frac{1}{n^2}$ ) для данной спектральной серии.
4. Определите по наклону графика значение постоянной Ридберга

$$R = \frac{\Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right)}{\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)}.$$

5. Запишите ответ и проанализируйте ответ и графики.

*ТАБЛИЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ: Постоянная Ридберга  $R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ .*

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое спектр электромагнитного излучения (ЭМИ)?
2. Что такое линейчатый спектр ЭМИ?
3. Что является источником линейчатого спектра ЭМИ?
4. Что такое полосатый спектр ЭМИ и что является его источником?
5. При каких условиях излучается сплошной спектр ЭМИ?
6. Опишите планетарную модель атома.
7. При каких условиях электроны в атоме излучают или поглощают ЭМИ?
8. Как связаны друг с другом характеристики фотона и электрона, который излучает данный фотон?

9. Какое уравнение используется для анализа квантовой модели атома?
10. Что является решением этого уравнения?
11. Как описывается электрон и его движение в квантовой модели атома?
12. Что определяет квадрат модуля волновой функции?
13. Дайте определение орбитали электрона в атоме.
14. Что определяет главное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
15. Что определяет азимутальное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
16. Что определяет магнитное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
17. Что такое спин электрона?
18. Что определяет спиновое квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
19. Что определяет магнитное спиновое квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
20. Что такое вырожденные состояния?
21. Как определить кратность вырождения состояния?
22. Расшифруйте краткую запись состояния электрона в атоме ( $2s^2, 2p^3$ ).
23. Может ли электрон иметь состояние  $2d$  и почему?
24. Сформулируйте правило отбора.
25. Что такое спектральная серия?
26. Назовите названия спектральных серий излучения атомарного водорода. Запишите условия для их возникновения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.27, §§ 208-212.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 38, §§ 38.3-38.5.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### 3\_3. ЭФФЕКТ КОМПТОНА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике [1,2]. Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите модель «5.2. Комптоновское рассеяние». Прочитайте краткие теоретические сведения. Оформите конспект.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с моделями электромагнитного излучения и их использованием при анализе процесса рассеяния рентгеновского излучения в веществе.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей эффекта Комптона.
- Экспериментальное определение комптоновской длины волны электрона.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

МОДЕЛИ электромагнитного излучения (ЭМИ):

- луч – линия распространения ЭМИ (геометрическая оптика),
- волна – гармоническая волна, имеющая амплитуду и определенную длину волны или частоту (волновая оптика),
- поток частиц (фотонов) используется для объяснения многих эффектов, на которых основана квантовая теория строения вещества.

Характеристики всех моделей связаны друг с другом.

ЭФФЕКТОМ КОМПТОНА называется увеличение длины волны рассеянного излучения при облучении вещества монохроматическим рентгеновским излучением.

РЕНТГЕНОВСКИМ называется электромагнитное излучение, которое можно моделировать с помощью электромагнитной волны с длиной от  $10^{-8}$  до  $10^{-12}$  м или с помощью потока фотонов с энергией от 100 эВ до  $10^6$  эВ (границы условны).

Для описания рентгеновского излучения, распространяющегося от источника до вещества (см. рис.1), применяется волновая модель. Излучение представляется, как монохроматическая волна с длиной  $\lambda$ .

Волновая модель применяется и для описания рассеянного рентгеновского излучения, идущего под углом  $\vartheta$  от вещества (КР) до регистрирующего устройства (рентгеновского спектрометра РС).

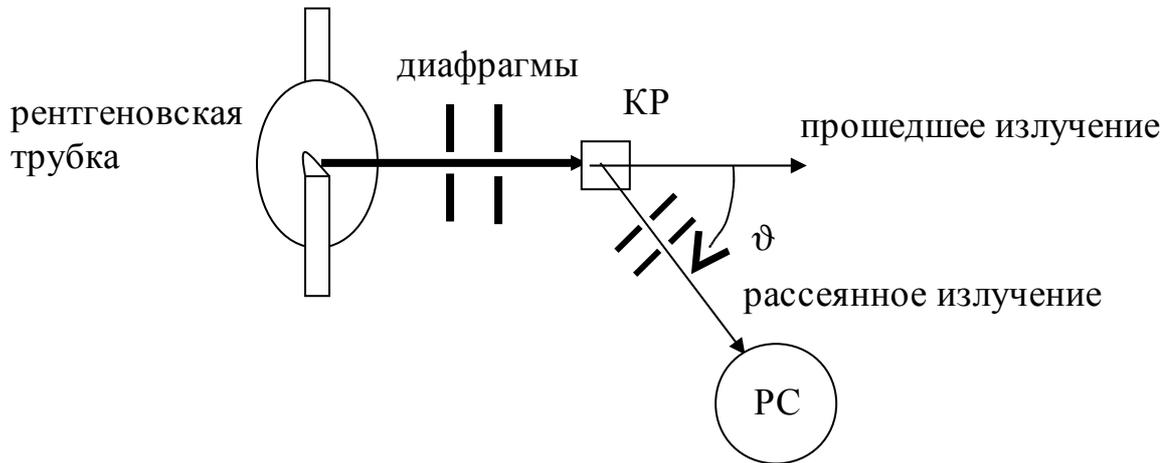


Рис.1. Схема установки для исследования процесса комптоновского рассеяния фотонов.

Рассмотрим процесс столкновения падающего рентгеновского фотона (энергия  $\hbar \omega$ , импульс  $\vec{p} = \hbar \vec{k}$ ) с покоящимся электроном вещества (рис.1). Энергия электрона до столкновения равна его энергии покоя  $mc^2$ , где  $m$  – масса покоя электрона. Импульс электрона равен 0.

После столкновения электрон будет обладать импульсом  $\vec{P}$  и энергией, равной

$$E_e = c \sqrt{p^2 + (mc)^2} .$$

Энергия фотона станет равной  $\hbar \omega'$ , а импульс  $\hbar \vec{k}'$ .

Из закона сохранения импульса и энергии вытекают два равенства:

$$\hbar \omega + mc^2 = \hbar \omega' + c \sqrt{p^2 + (mc)^2} \quad \text{и} \quad \hbar \vec{k} = \vec{p} + \hbar \vec{k}' .$$

Из второго следует  $(\hbar k)^2 = p^2 + (\hbar k')^2 + 2 \hbar p k' \cos \vartheta$ .

Разделив первое равенство на последнее и проведя некоторые преобразования (см. учебник), получим формулу Комптона:

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \vartheta),$$

где комптоновская длина волны

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} .$$

Для электрона  $m = 9 \cdot 10^{-31}$  кг,  $\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12}$  м.

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

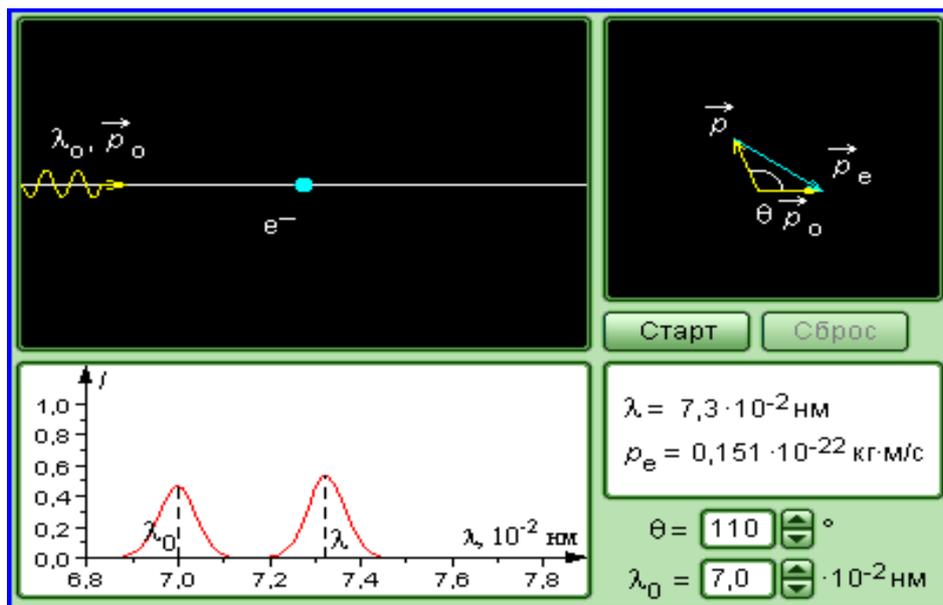


Рис.2. Модель комптоновского рассеяния (начальное состояние)

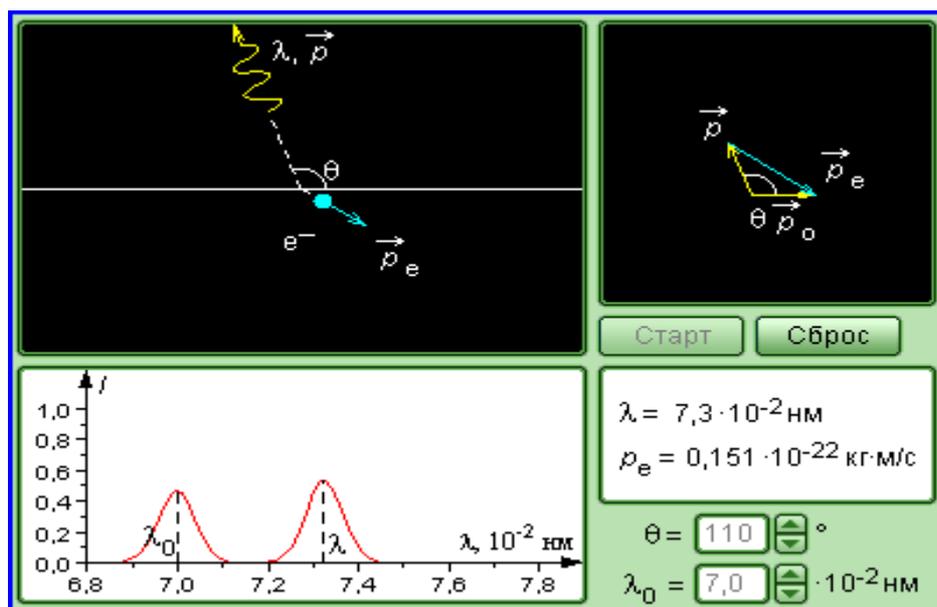


Рис.3. Модель комптоновского рассеяния (конечное состояние)

Внимательно рассмотрите рисунки.

Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

## ИЗМЕРЕНИЯ

1. Подведите маркер мыши к кнопке регулятора длины волны падающего

- ЭМИ и установите первое значение длины волны из табл. 1, соответствующее номеру вашей бригады.
2. Подведите маркер мыши к кнопке регулятора угла приема рассеянного ЭМИ и установите первое значение  $60^\circ$ .
  3. Определите длину волны  $\lambda'$  рассеянного ЭМИ и запишите в первую строку таблицы 2.
  4. Изменяйте угол наблюдения с шагом  $10^\circ$  и записывайте измеренные значения  $\lambda'$  в соответствующие строки табл. 2.
  5. Заполнив все строки табл. 2, измените значение длины волны падающего ЭМИ в соответствии со следующим значением для вашей бригады из табл. 1. Повторите измерения длины волны рассеянного ЭМИ, заполняя сначала табл. 3, а затем и табл. 4 (аналогичные табл. 2).

ТАБЛИЦА 1 (не перерисовывать) для выбора начальных значений.

Номер бригады	Длина волны падающего ЭМИ, пм		
	1, 5	30	50
2, 6	35	55	80
3, 7	40	60	90
4, 8	45	65	100

ТАБЛИЦЫ 2, 3, 4. Результаты измерений. Длина волны  $\lambda = \underline{\hspace{2cm}}$  пм.

Номер измер.	1	2	...	11
$\vartheta$ , град	60	70		160
$\lambda'$ , пм				
$1 - \cos\vartheta$				

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Вычислите и запишите в табл. 2, 3 и 4 величины  $1 - \cos\vartheta$ .
2. Постройте график зависимости изменения длины волны ( $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ ) от разности ( $1 - \cos\vartheta$ ) для каждой серии измерений.
3. Определите по наклону графика значение комптоновской длины волны электрона

$$\lambda_c = \frac{\Delta(\Delta\lambda)}{\Delta(1 - \cos\vartheta)}$$

4. Вычислите массу электрона, используя формулу для комптоновской длины волны.
5. Запишите ответ и проанализируйте ответ и графики.

## Вопросы и задания для самоконтроля

1. Назовите модели, с помощью которых описывается электромагнитное излучение.
2. Назовите области физики, в которых используются соответствующие модели ЭМИ.
3. Что такое луч?
4. Что такое гармоническая волна?
5. Сформулируйте связь между характеристиками ЭМИ в волновой и квантовой моделях.
6. Назовите эффекты, для описания которых надо использовать и волновую, и квантовую модели ЭМИ. Проиллюстрируйте один из эффектов.
7. Какова модель ЭМИ до падения на вещество?
8. Какова модель ЭМИ после выхода из вещества?
9. Как моделируется ЭМИ при взаимодействия падающего рентгеновского фотона и свободного электрона вещества?
10. Как моделируется процесс взаимодействия падающего ЭМИ и вещества?
11. Какие законы сохранения выполняются при взаимодействии фотона со свободным электроном в эффекте Комптона?
12. Сравните поведение фотонов после взаимодействия с электронами в эффекте Комптона и фотоэффекте.
13. Что такое комптоновская длина волны частицы?
14. Почему эффект Комптона не наблюдается при рассеянии фотонов на электронах, сильно связанных с ядром атома?
15. Как меняется энергия фотона при его комптоновском рассеянии?
16. Что происходит с электроном после рассеяния на нем фотона?
17. Чем отличается масса от массы покоя? Когда они совпадают?
18. Какова масса покоя фотона?
19. С какой скоростью движется фотон?
20. Напишите уравнение для импульса фотона.
21. Напишите формулу для эффекта Комптона.
22. Напишите формулу для комптоновской длины волны электрона.
23. Чему равно максимальное изменение длины волны рассеянного фотона и когда оно наблюдается?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.26, § 206.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 36, § 36.5.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### 3\_4. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Выберите в экранном меню модель «5.3 Волновые свойства частиц».

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В данной работе с использованием компьютерной модели

- исследуются процессы, возникающие при взаимодействии пучка электронов с непрозрачным для электронов экраном, имеющим узкую прямоугольную щель;
- определяются некоторые характеристики, связанные с их движением.

#### ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

Изучите литературу [1] - §§ 25.4, 29.2, 29.3, 30.1, [2] - §§139, 213, 214, 215. Подготовьте конспект теоретического материала. Внимательно рассмотрите и зарисуйте компьютерную модель (рис.1). Подготовьте таблицы, образцы которых приведены ниже. Ответьте на вопросы для самоподготовки.

**Получите у преподавателя допуск к данной лабораторной работе.**

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Для описания движения многих материальных объектов достаточно единственной модели. Например, автомобиль, самолет, камень и другие «крупные» объекты можно описывать, используя только модель «материальная точка» или «система материальных точек», которую можно называть корпускулярной. С другой стороны, электромагнитное излучение (ЭМИ) в классической физике рассматривают как волну (электромагнитную).

Тем не менее, в некоторых ситуациях (условиях) такой классический подход не работает. Например, рассматривая процессы, происходящие в фотоэлементе, мы должны электромагнитное излучение сначала моделировать, как волну (световую), распространяющуюся от источника до фотокатода (волновая модель), а потом, как поток фотонов (корпускулярная модель), каждый из которых взаимодействует с одним электроном.

Аналогичная ситуация возникает, в частности, при исследовании процессов, происходящих с участием микрочастиц.

Квантовая физика имеет дело с двойственностью описания любых материальных объектов (см. [1] стр. 81). **Это описание выглядит как совокупность двух моделей - волновой и корпускулярной.** Причем в одних условиях надо применять корпускулярную модель к данному объекту, а в других условиях к тому же объекту надо применять волновую модель. В начале прошлого века эту проблему называли «дуализм волна-частица».

Волновая часть квантового описания объекта имеет много общего с волновой моделью, которую мы применяли в электромагнетизме (оптике), когда рассматривали движение электромагнитного излучения (поля).

Простейшей волной является гармоническая волна, основными характеристиками которой являются амплитуда, частота и скорость распространения. Корпускулярная часть квантового описания объекта выглядит как частица, имеющая массу, положение, траекторию и другие характеристики движения.

При исследовании взаимодействия пучка электронов с отверстием в непрозрачном для них экране (в частности, с диафрагмой в электронно-лучевой трубке) в принципе можно наблюдать двойственный характер описания движения электрона. Такой эксперимент возможно реализовать с помощью компьютерного моделирования реальной ситуации.

Рассмотрим движение электрона в данном компьютерном эксперименте. При вылете из катода и движении до диафрагмы электрон можно моделировать, как частицу, имеющую определенные кинематические характеристики: координату, скорость и ускорение. При прохождении через диафрагму мы должны моделировать электрон, как гармоническую волну, имеющую определенную длину волны. При движении от диафрагмы до экрана электрон снова моделируем, как частицу, которая, попадая на экран, вызывает вспышку зерна люминофора, покрывающего экран. Эту вспышку мы наблюдаем.

Идеальный пучок электронов на языке корпускулярной модели есть совокупность параллельно движущихся частиц, имеющих одну и ту же скорость. Взаимодействие с непрозрачной для электронов диафрагмой, имеющей отверстие, анализируем, моделируя электроны, как волны, имеющие длину волны  $\lambda$ , определяемую соотношением де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

где  $h$  - постоянная Планка,  $p$  – импульс электрона, равный произведению массы  $m$  на скорость электрона  $v$ .

Поскольку скорость  $v$  всех электронов одна и та же, значит и импульсы равны и длина волны де Бройля одна и та же, т.е. волновое описание электрона есть гармоническая одномерная волна:

$$\psi(x, t) = \psi_0 \sin(\omega t - kx), \quad (2)$$

где циклическая частота  $\omega$  и волновое число  $k$  связаны с длиной волны известными соотношениями

$$\omega = \frac{2\pi v}{\lambda}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3)$$

а амплитуда  $\psi_0$  задается источником. Скорость распространения волны  $v$  равна скорости движения электрона:

$$v = \frac{p}{m} . \quad (4)$$

Задача о прохождении пучка электронов через щель решается так же, как и задача прохождения гармонической волны через прямоугольную щель (см. [2] стр.338). **Эффект проникновения волны в область геометрической тени называется дифракцией.** Можно ожидать, что прохождение электронов через отверстие в диафрагме, будет сопровождаться таким же явлением, которое можно называть **дифракцией электронов** (см. рис.1).

Угол, под которым наблюдается первый **минимум** волны после щели, имеющей ширину  $\Delta x$ , подчиняется соотношению

$$\sin(\vartheta_1^{min}) = \frac{\lambda}{\Delta x} . \quad (5)$$

Формула, определяющая направление **максимума** с номером  $n$ , выглядит так

$$\sin(\vartheta_n^{max}) = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{\Delta x} ,$$

где  $n = 1, 2, \dots$  – номер максимума.

Для первого максимума (не путать с нулевым при  $\vartheta = 0$ )

$$\sin(\vartheta_1^{max}) = \frac{3\lambda}{2\Delta x} . \quad (6)$$

Смещение первого максимума по вертикальной оси  $X_{m1}$  определяется из прямоугольного треугольника (рис.1) по известному расстоянию от диафрагмы до экрана  $L$ :

$$X_{m1} = L \cdot \operatorname{tg}(\vartheta_1^{max}) .$$

Учитывая малость величины угла  $\vartheta$ , можно использовать известное соотношение

$$\operatorname{tg}(\vartheta_1^{max}) = \sin(\vartheta_1^{max}) ,$$

и тогда

$$X_{m1} = L \cdot \sin(\vartheta_1^{max}) = \frac{3L\lambda}{2\Delta x} = \frac{3L\lambda}{2} \left(\frac{1}{\Delta x}\right) . \quad (7)$$

Используя эту формулу, можно получить выражение, позволяющее экспериментально определить длину волны де Бройля для электрона по графику зависимости положения первого максимума от обратной ширины щели

$$\lambda = \frac{2}{3L} \cdot \frac{\Delta(X_{m1})}{\Delta\left(\frac{1}{\Delta x}\right)}. \quad (8)$$

#### ЗАМЕЧАНИЕ

Движение электрона в области «геометрической тени» на языке корпускулярной модели говорит о том, что у электронов после щели появляется вертикальная составляющая импульса, обозначенная на рис. 1, как  $\Delta p_x$ . Эта составляющая называется **неопределенностью импульса**. Внутри щели координата электрона (в данном случае  $X$  - по вертикали внутри щели) имеет **неопределенность**, равную ширине щели  $\Delta x$ . При дальнейшем движении электрона от диафрагмы до экрана импульс сохраняется (на электрон ничего не действует).

Используя формулу (5) для первого минимума, получим неопределенность импульса

$$\Delta p_x = p_x \cdot \sin(\vartheta_1^{min}) = 1 \cdot \frac{\lambda}{\Delta x} p_x.$$

Подставив выражение для длины волны де Бройля (1), получим соотношение для проекций координаты и импульса на ось  $X$ :

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar.$$

Как известно, это соотношение называется **соотношением неопределенностей Гейзенберга**. Это доказывает справедливость моделей использованных при теоретическом анализе данного компьютерного эксперимента.

#### МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

На рис.1 представлено изображение экрана компьютера, на котором моделируется прохождение пучка электронов через диафрагму.

Слева на непрозрачный для электронов экран (рис.1) со щелью шириной  $\Delta x$  движется горизонтально поток электронов, имеющих одну и ту же скорость и импульс. При движении через щель электроны могут изменить направление своего движения, приобретя дополнительный импульс в вертикальном направлении.

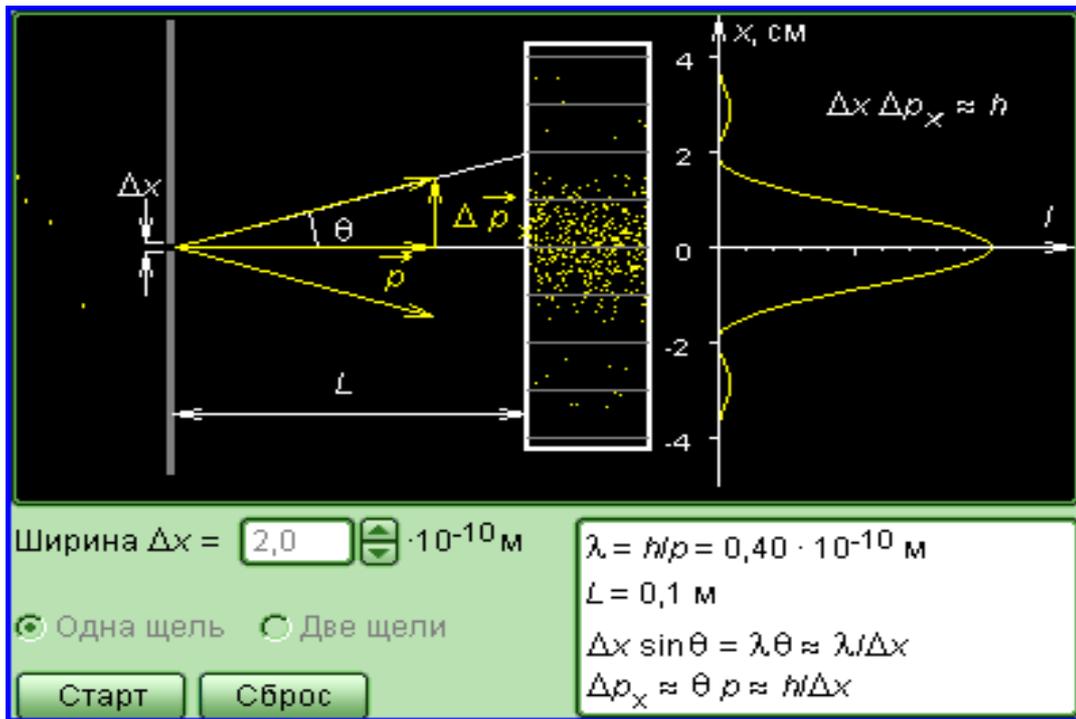


Рис.1 Компьютерный эксперимент по дифракции электронов на отверстии

При попадании электронов на приемный экран справа на нем будут наблюдаться вспышки. Количество вспышек на единице площади за единицу времени имеет вид кривой с несколькими максимумами и минимумами (на рисунке справа). Величина отклонения точек кривой по горизонтали ( $I$ ) пропорциональна количеству электронов, попадающих за единицу времени на экран в зону с близкими значениями вертикального отклонения  $X$ .

Действительно (см. [2] стр. 90), волна де Бройля, приписываемая электрону, при дальнейшем развитии квантовой механики была заменена Шредингером на волновую ( $\psi$ ) функцию (2), определяющую плотность вероятности попадания электрона в зону вблизи данной точки с координатой  $X$ , что и подтверждается в данном компьютерном эксперименте.

Щелкните мышью по кнопке «Старт». Через 10 сек снова щелкните мышью по кнопке (которая теперь называется «Стоп»).

Рассмотрите светящиеся точки. Они соответствуют электронам, попавшим на экран. Выделите на экране группу электронов, соответствующих первому максимуму дифракционной картины (выше нулевого максимума, но ниже второго). Нажмите кнопку «Сброс», затем кнопку «Старт» и остановите процесс, нажав «Стоп», когда количество вспышек электронов в зоне первого максимума составит 5 – 7. Если вспышек мало, можете продолжить процесс, снова нажав «Старт».

Закончив тренировку, подготовьте таблицы для измерений и получите у преподавателя допуск для выполнения лабораторной работы.

Таблица 1 (не перерисовывать). Значения ширины щели  $\Delta x \cdot 10^{-10}$  м для разных бригад

Номера бригад	1	2	3	4
1 и 5	2.0	2.5	3.0	3.5
2 и 6	2.1	2.6	3.1	3.6
3 и 7	2.2	2.7	3.2	3.7
4 и 8	2.3	2.8	3.3	3.8

Таблица 2. Координаты электронов первого дифракционного максимума. Ширина щели  $\Delta x_1 = \underline{\hspace{2cm}}$  м.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$X_i$												
$\langle X \rangle_1$												

Таблица 3. Координаты электронов первого дифракционного максимума. Ширина щели  $\Delta x_2 = \underline{\hspace{2cm}}$  м.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$X_i$												
$\langle X \rangle_2$												

Таблица 4. Координаты электронов первого дифракционного максимума. Ширина щели  $\Delta x_3 = \underline{\hspace{2cm}}$  м.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$X_i$												
$\langle X \rangle_3$												

Таблица 5. Координаты электронов первого дифракционного максимума. Ширина щели  $\Delta x_4 = \underline{\hspace{2cm}}$  м.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$X_i$												
$\langle X \rangle_4$												

## **ИЗМЕРЕНИЯ**

1. Установите для модели «вид экрана «Одна щель»» (кнопки слева внизу).
2. Щелкните кнопку «Сброс» (нижняя часть кнопки управления) для очистки поля модели.
3. Установите ширину щели по табл. 1 в соответствии с номером вашей бригады.
4. Щелкните мышью по кнопке «Старт». Снова щелкните мышью по кнопке (которая теперь называется «Стоп»), когда количество вспышек электронов в зоне первого максимума составит 5 - 7.
5. Прикладывая лист бумаги или линейку горизонтально, соедините электрон с вертикальной шкалой на экране и определите координаты  $X_i$  каждого электрона этой группы, начиная с верхнего ( $i$  – номер электрона по порядку). Запишите результаты в соответствующую строку табл. 2.
6. Закончив измерение и запись координат всех электронов первого максимума, щелкните кнопку «Сброс» и установите следующее значение ширины щели по табл. 1.
7. Повторите измерения по пп. 5 - 8, записывая результаты в табл. 3 - 5.

## **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

1. Вычислите средние значения координат электронов первого дифракционного максимума при каждом значении ширины щели  $\langle X \rangle_1 \div \langle X \rangle_4$  и запишите в соответствующие табл. 2 - 5.
2. Постройте график зависимости среднего значения координаты первого максимума от обратной ширины щели  $\langle X \rangle = f(1/\Delta x)$ .
3. Постройте прямоугольный треугольник максимальных размеров, в котором полученная прямая является гипотенузой.
4. Определите длины катетов и подставьте их в формулу (8) и вычислите длину волны электрона.
5. Сделайте вывод по полученному графику зависимости  $\langle X \rangle = f(1/\Delta x)$  в сравнении с формулой (6).
6. Сделайте вывод по полученному значению  $\lambda$ , сравнивая его с числом, приведенным на экране компьютера.

### **ПРИМЕЧАНИЕ**

Вместо пп. 3 - 5 по указанию преподавателя обработайте результаты измерений методом наименьших квадратов.

## **ВОПРОСЫ и ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ**

1. Сформулируйте модель, описывающую состояние движения микрообъекта, применяемую в квантовой физике?
2. Какая классическая модель ЭМИ применяется в электромагнетизме?
3. Назовите примеры классических моделей объектов, применяемых в механике.
4. Какую модель надо применять при исследовании движения самолета из Москвы в Сочи?
5. Какую модель надо применять при исследовании движения электронов в электронно-лучевой трубке?
6. Какова волновая модель электрона, если это частица, движущаяся с постоянной скоростью?
7. Напишите формулу для длины волны де Бройля.
8. Что такое явление дифракции?
9. Как выглядит волновая функция свободно движущейся частицы?
10. Почему у электрона, проходящего через щель, появляется вертикальная (в данной компьютерной установке) составляющая импульса?
11. Каков физический смысл волны (волновой функции) приписываемой электрону?
12. Сформулируйте соотношение для синуса угла минимума при дифракции на прямоугольной щели.
13. Сформулируйте соотношение для синуса угла максимума при дифракции на прямоугольной щели.
14. Чему прямо пропорционально смещение  $X$  первого максимума дифракционной картины на экране?
15. Какой формы график вы ожидаете при построении зависимости  $\langle X \rangle = f(1/\Delta x)$ ?
16. Как вы определите длину волны де Бройля электрона в данной работе?
17. С чем вы будете сравнивать полученное числовое значение длины волны электрона?
18. Какие выводы вы предполагаете сделать после исследования вида полученного графика  $\langle X \rangle = f(1/\Delta x)$ ?

## **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] – Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики, Т.2. М.: ООО «Дрофа», 2004.
- [2] – Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### 3\_5. ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Выберите модель «6.5. Лазер. Двухуровневая модель».

#### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Целью работы является исследование с помощью компьютерного эксперимента процессов и закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения (ЭМИ) с веществом, в частности, поглощения и усиления этого излучения при распространении в активной среде.

#### **ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ**

Прочитайте соответствующий материал в учебнике ([1] - § 38.2, [2] - §§ 232, 233). Прочитайте и законспектируйте краткую теорию. Ответьте на контрольные вопросы. Оформите конспект лабораторной работы и подготовьте таблицы в соответствии с требованиями по оформлению.

**Получите у преподавателя допуск к выполнению данной лабораторной работы.**

#### **КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

Распространение электромагнитного излучения (ЭМИ) внутри вещества сопровождается *различными процессами, основными из которых являются поглощение ЭМИ, а также спонтанное и индуцированное излучение.*

Для моделирования ЭМИ, участвующего в этих процессах, используется корпускулярная модель, имеющая вид потока фотонов. Если в волновой модели ЭМИ имеет вид гармонической одномерной волны, то в корпускулярной модели это же ЭМИ следует представлять, как поток фотонов, имеющих одну и ту же энергию  $E_\phi$ , равную произведению циклической частоты волны  $\omega$  на постоянную Планка  $\hbar$  :

$$E_\phi = \hbar \omega .$$

Для описания вещества, взаимодействующего с ЭМИ, используется модель, состоящая из одинаковых атомов, расположенных неподвижно. Каждый атом содержит один валентный электрон, который может находиться только в двух квантовых состояниях с энергией  $E_2$  (верхнее) и энергией  $E_1$  (нижнее). Такая модель называется **двухуровневой**.

**В соответствии с принципом минимальности энергии, в стационарном состоянии атома электрон находится в состоянии с наименьшей энергией.**

**нарном состоянии с нулевой температурой все валентные электроны во всех атомах должны находиться в нижнем состоянии**, т.е. должны обладать энергией  $E_1$ . Все остальные электроны атомов вещества с ЭМИ не взаимодействуют.

При распространении в веществе ЭМИ, у которого фотоны имеют энергию, недостаточную для обеспечения перехода валентных электронов в атомах с нижнего уровня энергии на верхний, происходит абсолютно упругое столкновение фотонов с атомами. При этих столкновениях **энергия фотона меняется крайне незначительно, но направление его движения меняется хаотически. Данное явление называется рассеянием ЭМИ веществом**, и в этой работе мы его не исследуем.

Если фотон имеет энергию, равную или большую, чем энергия возбуждения атома ( $\Delta E = E_2 - E_1$ ), то при взаимодействии с атомом вещества фотон поглощается валентным электроном атома. В результате **электрон переходит из квантового состояния с энергией  $E_1$  в другое квантовое состояние с энергией  $E_2$  (на верхний энергетический уровень)**. Данное явление называется резонансным поглощением ЭМИ веществом.

При попадании в вещество и резонансном поглощении ЭМИ, имеющего постоянную интенсивность на входе в вещество, концентрация электронов на нижних энергетических уровнях  $n_1(t)$  экспоненциально убывает со временем:

$$n_1(t) = n_1(0) \cdot \exp\left\{-\frac{t}{\tau_B}\right\}, \quad (1)$$

где  $\tau_B$  - **постоянная времени** переходов электронов в возбужденное состояние, равная промежутку времени, за которое концентрация электронов в веществе, находящихся на нижних энергетических уровнях, т.е. в стационарном состоянии, уменьшается в  $e = 2.73$  раза;

$n_1(0)$  – **начальное** (при  $t = 0$ ) значение концентрации электронов в веществе, находящихся на нижних энергетических уровнях.

После логарифмирования получим

$$-\ln\left(\frac{n_1(t)}{n_1(0)}\right) = \frac{t}{\tau_B}. \quad (1')$$

Электроны, перешедшие на верхний энергетический уровень (в возбужденное состояние с энергией  $E_2$ ), через (как правило) очень короткое время после прекращения воздействия ЭМИ снова возвращаются на свободный нижний уровень (в стационарное состояние с энергией  $E_1$ ). **Процесс перехода носит случайный характер и потому называется спонтанным излучением**. Направления движения спонтанно излучаемых фотонов имеют хаотический характер, а энергия каждого фотона равна разности энергий между

уровнями

$$E_{\phi} = \Delta E = E_2 - E_1.$$

Теоретический анализ показывает, что концентрация электронов в возбужденном состоянии  $n_2(t)$  экспоненциально убывает со временем:

$$n_2(t) = n_2(0) \cdot \exp\left\{-\frac{t}{\tau_{II}}\right\}, \quad (2)$$

где  $\tau_{II}$  - **постоянная времени** переходов электронов из возбужденного состояния в стационарное, равная промежутку времени, за которое концентрация электронов в возбужденном состоянии уменьшается в  $e = 2.73$  раза;

$n_2(0)$  – **начальное** (при  $t = 0$ ) значение концентрации электронов в возбужденном состоянии, обладающих энергией  $E_2$ .

После логарифмирования получим

$$-\ln\left(\frac{n_2(t)}{n_2(0)}\right) = \frac{t}{\tau_{II}}. \quad (2')$$

Индукцированным излучением называется **процесс перехода электрона из возбужденного в невозбужденное состояние, происходящий под действием фотона, пролетающего вблизи атома**. Данный процесс был предсказан Эйнштейном и исследован многими учеными (Басов, Прохоров и Таунс получили Нобелевскую премию за теоретические и экспериментальные работы по созданию новых приборов, и, в частности, лазеров, использующих этот эффект).

Концентрация электронов в возбужденном состоянии  $n_2(t)$  в этом случае также экспоненциально убывает со временем:

$$n_2(t) = n_2(0) \cdot \exp\left\{-\frac{t}{\tau_{III}}\right\}, \quad (3)$$

где  $\tau_{III}$  - постоянная времени индуцированных переходов электронов из возбужденного состояния в стационарное;

$n_2(0)$  – начальное (при  $t = 0$ ) значение концентрации электронов в возбужденном состоянии.

После логарифмирования получим

$$-\ln\left(\frac{n_2(t)}{n_2(0)}\right) = \frac{t}{\tau_{III}}. \quad (3')$$

При падении на вещество пучка ЭМИ (модель – поток фотонов) его ин-

тенсивность может убывать, оставаться постоянной или увеличиваться. Вариант зависит от соотношения заселенностей уровня с энергией  $E_1$  (количество атомов  $n_1$ ) и уровня с энергией  $E_2$  (количество атомов  $n_2$ ). Концентрация  $u(L)$  фотонов будет зависеть от расстояния  $L$ , пройденного ЭМИ в веществе, по экспоненциальному закону:

$$u(L) = u(0) \cdot \exp\{-\alpha L\}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  - коэффициент затухания, определяемый формулой

$$\alpha = \beta (B_{12}n_1 - B_{21}n_2) = \beta B_{12}(n_1 - n_2). \quad (5)$$

Здесь  $B_{12}$  и  $B_{21}$  – коэффициенты Эйнштейна, определяющие вероятность поглощения фотона веществом и вынужденного (индуцированного) перехода электрона с верхнего энергетического уровня на нижний,  $\beta$  - некоторая размерная константа. Можно доказать, что коэффициенты Эйнштейна по величине одинаковы, т.е.  $B_{12} = B_{21}$ .

***Коэффициент усиления  $k$  есть отношение концентрации фотонов на выходе из вещества к концентрации на входе или отношение количества фотонов за некоторый промежуток времени на выходе и на входе в среду.***

$$k = \frac{u(L)}{u(0)} = \frac{N_{\text{ВЫХ}}}{N_{\text{ВХ}}}, \quad (6)$$

$$\ln(k) = \ln \frac{N_{\text{ВЫХ}}}{N_{\text{ВХ}}} = -\alpha L = C(n_1 - n_2). \quad (7)$$

Состоянием заселенности уровней в веществе называется соотношение между  $n_2$  и  $n_1$ . Нормальной заселенностью называется состояние уровней когда  $n_2 < n_1$ . В этом случае  $\alpha > 0$  и излучение ослабевает (затухает) при распространении в веществе, т.е. на выходе из среды количество фотонов (за определенное время) будет меньше, чем на входе в нее ( $k < 1$ ).

Инверсной заселенностью уровней называется состояние, когда  $n_2 > n_1$ , а количество фотонов на выходе из среды будет больше, чем на входе ( $k > 1$ ). ***Среда с инверсной заселенностью уровней называется активной*** и должна быть создана искусственно. ***«Накачкой» называется процесс создания активной среды с инверсной заселенностью уровней.*** Примером подобного процесса является облучение среды дополнительным источником ЭМИ, например, импульсной газоразрядной лампой. Другим способом можно считать интенсивный нагрев (например, при взрыве) до очень высоких температур.

Устройство, содержащее активную среду, можно использовать как усилитель сигналов, которые переносит ЭМИ. Кроме того, на основе такого

устройства создаются генераторы соответствующего ЭМИ. Для возможности генерации подобный усилитель должен быть дополнен системой положительной обратной связи, которая компенсирует потери энергии, связанные с фотонами, вылетающими из среды. В диапазоне видимого света положительную обратную связь создают полупрозрачные зеркала, которые располагают в торцах цилиндров, заполненных активным веществом.

Для эффективного усиления ЭМИ атомы среды должны обладать энергетическим уровнем, для которого время жизни электрона на нем будет аномально продолжительным. Состояние, связанное с этим энергетическим уровнем получило название *метастабильного*.

***Метастабильным*** называется такое квантовое состояние, в котором электрон может находиться много дольше (примерно в 100000 раз), чем в обычном возбужденном состоянии. Такие уровни широко используют в реальных устройствах усиления и генерации ЭМИ (например, в лазерах, мазерах и т.д.).

В данной **компьютерной модели** эксперимента для создания активной среды используется некоторый внешний источник, имеющий определенную интенсивность (уровень) накачки. Чем больше интенсивность накачки (в некоторых относительных единицах), тем больше электронов «перебрасывается» с нижнего уровня на верхний. Обратите внимание, что инверсная заселенность уровней создается не сразу, а спустя некоторое время после включения генератора, создающего накачку с постоянной интенсивностью. Это время составляет 40-50 секунд. Только спустя это время в модели заканчивается переходной процесс и коэффициент усиления перестает существенно изменяться.

## **МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ**

В данной лабораторной работе (рис.1) используется компьютерная модель «двухуровневой среды», в которой предполагается, что

- все 20 атомов одинаковы и неподвижны,
- валентные электроны, по одному на каждый атом, могут иметь только 2 энергетических состояния: нижнее с энергией  $E_1$  и верхнее с энергией  $E_2$ .

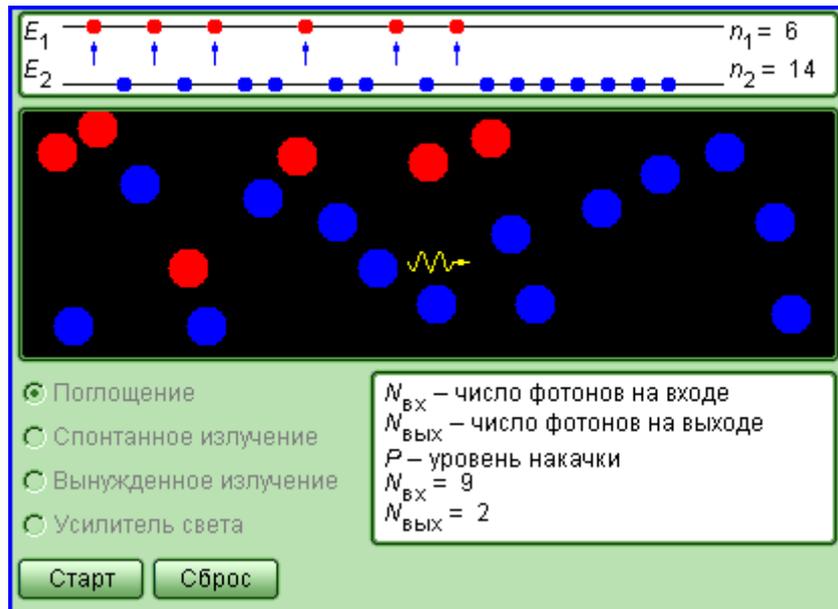


Рис.1 Модель для исследования процесса поглощения ЭМИ веществом

При этом можно моделировать

- процесс только поглощения падающего ЭМИ без реализации процессов спонтанного и индуцированного излучения;
- процесс только спонтанного излучения из состояния с полностью возбужденной средой;
- процесс только индуцированного (вынужденного) излучения (без спонтанного);
- процесс прохождения ЭМИ через активную среду с накачкой.

### ЗАМЕЧАНИЯ

1. В компьютерной модели течение времени сильно замедлено: 1 секунда в модели соответствует 1 наносекунде реального времени.
2. Интенсивность падающего на вещество излучения считается постоянной с момента включения.

Таблица 1 (не перерисовывать). Значения уровня накачки

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
p (отн. ед.)	30	40	50	60	70	80	90	100

Таблица 2. Количество заполненных состояний нижнего уровня  $n_1(t)$ .  
Только поглощение.

t(c)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
1	20													
2	20													
3	20													
4	20													
5	20													
6	20													
$\langle n_1 \rangle$	20													
$-\ln(\langle n_1 \rangle / 20)$	0													

Таблица 3. Количество заполненных состояний верхнего уровня  $n_2(t)$ .  
Только спонтанное излучение.

t(c)	0	5	10	15	20	25	30
1	20						
2	20						
3	20						
4	20						
5	20						
6	20						
$\langle n_2 \rangle$	20						
$-\ln(\langle n_2 \rangle / 20)$	0						

Таблица 4. Количество заполненных состояний верхнего уровня  $n_2(t)$ .  
Только индуцированное излучение.

t(c)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
1														
2														
3														
4														
5														
6														
$\langle n_2 \rangle$														
$-\ln(\langle n_2 \rangle / 20)$														

Таблица 5. Количество заполненных состояний обоих уровней и количество фотонов на входе  $N_{\text{ВХ}}$  и выходе  $N_{\text{ВЫХ}}$ .

Интенсивность (уровень) накачки  $p$  (отн.ед.) = \_\_\_\_\_

t(мин)	1	2	3	4	5	6	Среднее
$n_1$							
$n_2$							
$n_2/n_1$							
$N_{\text{ВХ}}$							
$N_{\text{ВЫХ}}$							
$K$							

## ИЗМЕРЕНИЯ

Эксперимент 1. Исследование резонансного поглощения ЭМИ веществом.

1. Выберите режим «Поглощение», щелкнув мышью на соответствующей кнопке слева внизу поля модели.

2. Включите часы Windows: Установите маркер мыши на указатель времени справа внизу экрана, нажмите правую кнопку мыши и выберите «Настройка даты/времени». Перенесите окно с часами в удобное место на экране.

3. При прохождении стрелки на часах через удобное деление (например, мимо длинного штриха) щелкните мышью по кнопке «Старт».

4. Через 5 секунд повторно щелкните по той же кнопке, что остановит процесс, происходящий в модели.

5. Запишите появившееся справа вверху значение количества заполненных состояний стационарного уровня энергии  $n_1$  в первой строке табл. 2.

6. Повторяйте действия по пп. 3 – 5, пока не заполнится вся строка таблицы.

7. Нажмите кнопку «Сброс» и повторите действия по пп. 3 – 6, заполняя вторую строку табл.2.

8. Измерив 6 раз значения  $n_2(t)$ , переходите к следующему эксперименту.

Эксперимент 2. Исследование спонтанного излучения ЭМИ.

1. Выберите режим «Спонтанное излучение» и нажмите кнопку «Сброс». Обратите внимание на то, что все доступные состояния на возбужденном уровне будут заняты.

2. При прохождении стрелки на часах через удобное деление (например, мимо длинного штриха) щелкните мышью по кнопке «Старт» слева внизу поля модели.

3. Через 5 секунд повторно щелкните по той же кнопке, что остановит процесс, происходящий в модели.

4. Запишите появившееся справа сверху значение количества заполненных состояний возбужденного уровня  $n_2$  в соответствующей строке табл. 3.

5. Повторяйте действия по пп. 2 – 4, пока не заполнится вся строка таблицы.

6. Нажмите кнопку «Сброс» и повторите действия по пп. 2 – 5, заполняя следующую строку таблицы.

7. Измерив 6 раз значения  $n_2(t)$ , переходите к следующему эксперименту.

### Эксперимент 3. Исследование индуцированного излучения ЭМИ.

1. Выберите режим «индуцированное излучение» и нажмите кнопку «Сброс». Обратите внимание на то, что все доступные состояния на возбужденном уровне будут заняты.

2. При прохождении стрелки на часах через удобное деление щелкните мышью по кнопке «Старт».

3. Через 5 секунд повторно щелкните по той же кнопке, что остановит процесс, происходящий в модели.

4. Запишите появившееся справа сверху значение количества заполненных состояний стационарного уровня  $n_1$  в первой строке табл. 4.

5. Повторяйте действия по пп. 3 – 5, пока не заполнится вся строка таблицы.

6. Нажмите кнопку «Сброс» и повторите действия по пп. 3 – 6, заполняя вторую строку табл.3.

7. Измерив 6 раз значения  $n_2(t)$ , переходите к следующему эксперименту.

Эксперимент 4. Исследование усиления ЭМИ при распространении в активной среде.

1. Выберите режим «Усилитель света» и нажмите кнопку «Выбор». Обратите внимание на то, что все доступные состояния на возбужденном уровне будут свободны. Установите интенсивность накачки в соответствии с величиной из табл.1 для вашей бригады.

2. Нажмите кнопку «Старт» (средняя часть круглой управляющей кнопки) при прохождении стрелки на часах через удобное деление, после чего начнется накачка. Надо подождать окончания процесса установления, который длится около 1 мин.

3. В момент времени, указанный первым в табл.6 , повторно щелкните по той же кнопке, что остановит процесс, происходящий в модели.

4. Запишите появившиеся на модели величины заселенностей уровней  $n_1$  и  $n_2$ , а также количества вошедших фотонов  $N_{вх}$ , вышедших фотонов  $N_{вых}$  и коэффициента усиления  $K$  в первом столбце табл. 5.

5. При прохождении стрелки на часах через удобное деление щелкните мышью по кнопке «Старт» и через 1 минуту повторно нажмите ту же кнопку.

6. Повторите действия по пп. 4 – 5, пока не заполнятся все столбцы табли-

цы.

## **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

1. Вычислите средние значения всех измеренных характеристик и заполните соответствующие строки в каждой таблице.
2. Вычислите логарифмы относительных концентраций и заполните соответствующие строки в табл. 2, 3 и 4.
3. По эксперименту 4 вычислите заселенность второго уровня, вычислите средние значения, заполните последний столбец табл. 5.
4. На одном чертеже постройте графики зависимости логарифма относительной заселенности уровня с обратным знаком от времени для экспериментов 1, 2, и 3. По заданию преподавателя обработайте полученные результаты методом наименьших квадратов.
5. Сделайте выводы по графикам для экспериментов 1, 2 и 3, сравнивая их с теоретическими зависимостями (1'), (2') и (3').
6. Используя графики (или результаты обработки по методу наименьших квадратов) определите постоянные времени процессов поглощения ( $\tau_B$ ), спонтанного излучения ( $\tau_{и}$ ) и индуцированного излучения ( $\tau_{ии}$ ). Используйте общую формулу

$$\tau = \frac{\Delta t}{\Delta(-\ln(...))},$$

где  $\Delta$  ... – длины соответствующих катетов из графиков.

7. Вычислите значение константы  $C$ , используя формулу (7).
8. Сформулируйте физический смысл этой константы.

## **ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. Назовите основные процессы, которыми сопровождается распространение электромагнитного излучения (ЭМИ) внутри вещества.
2. Что такое фотоны?
3. Как связана энергия фотона с характеристиками гармонической электромагнитной волны?
4. Опишите модель ЭМИ, используемую в данной лабораторной работе.
5. Опишите модель вещества, взаимодействующего с ЭМИ в данной лабораторной работе.
6. Что такое валентный электрон?
7. Что такое рассеяние и каково условие его появления?
8. Каково условие резонансного поглощения ЭМИ веществом?
9. Как меняется со временем количество электронов на нижнем энергетическом уровне при резонансном поглощении?

10. Что такое постоянная времени перехода электронов в возбужденное состояние?
11. Что такое спонтанное излучение?
12. Как меняется во времени количество электронов в возбужденном состоянии при спонтанном излучении?
13. Что такое постоянная времени перехода электронов из возбужденного в стационарное состояние?
14. Что такое индуцированное излучение?
15. Сформулируйте зависимость интенсивности  $u(L)$  потока фотонов от расстояния  $L$ , проходимого ЭМИ в веществе.
16. Нарисуйте график зависимости  $u(L)$ .
17. От чего зависит коэффициент затухания ЭМИ в данном эксперименте?
18. Каково условие усиления ЭМИ при его распространении в веществе?
19. Что такое активная среда?
20. Какой элемент, помимо активной среды, необходим для генерации ЭМИ?
21. Насколько замедлено течение времени в компьютерной модели?
22. Что такое метастабильное состояние электрона в атоме?
23. Что такое коэффициент усиления интенсивности ЭМИ в данной модели?
24. Сколько атомов входят в состав компьютерной модели? Как они себя ведут?

## **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] - Калашников Н. П., Смондырев М.А. Основы физики. ООО «Дрофа», 2004.
- [2] - Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3\_6. ЯДРА АТОМОВ

Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите модель «6.6. Энергия связи ядер».

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Знакомство с основными свойствами ядер атомов. Исследование состава ядер и его влияния на количество изотопов.

### ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Прочитайте по учебнику соответствующий материал [1] – §§41.1 – 41.4 [2] - §§ 251 - 254. Законспектируйте краткую теорию. Рассмотрите изображение на рис. 1 и зарисуйте основные элементы в отчет по лабораторной работе. Подготовьте таблицы для заполнения в процессе измерений.

**Получите допуск у преподавателя.**

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

***Ядром** называется центральная часть атома, которая имеет очень малый размер и в которой сосредоточена основная масса атома.* Оно в 2-4 тыс. раз массивнее, чем электроны, заполняющие основной объем атома.

***В состав ядра** входят частицы, называемые «нуклонами» (в переводе – ядерные частицы).*

A – массовое число ядра равно количеству нуклонов в данном ядре.

Нуклоны подразделяют на протоны и нейтроны.

***Протоном** называется нуклон, имеющий положительный заряд, равный элементарному.*

Z – зарядовое число ядра, равное количеству протонов в данном ядре. Оно же равно порядковому номеру данного химического элемента в таблице Менделеева.

Символ протона «p». Заряд протона  $Q_p = +e$ , где  $e$  – элементарный заряд, равный  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Масса протона  $m_p = 1839,7 m_e$ .

Протон обладает собственным моментом импульса - спином, модуль которого равен

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{s_p(s_p + 1)},$$

где  $s_p = \frac{1}{2}$  называется спиновым квантовым числом протона.

Протон – это фермион (подчиняется принципу Паули).

Протон имеет магнитный момент:  $M_p = 1,3 M_{\text{Б.яд}}$ , где ядерный магне-

тон Бора равен

$$M_{\text{Б.яд}} = \frac{e\hbar}{2m_p c}.$$

**Нейтроном называется нуклон, не имеющий заряда (нейтральный – отсюда и название).**

Его символ «n». Заряд нейтрона  $Q_n = 0$ . Количество нейтронов

$$N = A - Z.$$

Масса нейтрона чуть больше массы протона  $m_n = m_p + 2.5 m_e$ .

Нейтрон – это тоже фермион (подчиняется принципу Паули), т.к. его спиновое квантовое число  $s_n = 1/2$ .

Нейтрон имеет магнитный момент, несмотря на то, что он незаряжен.

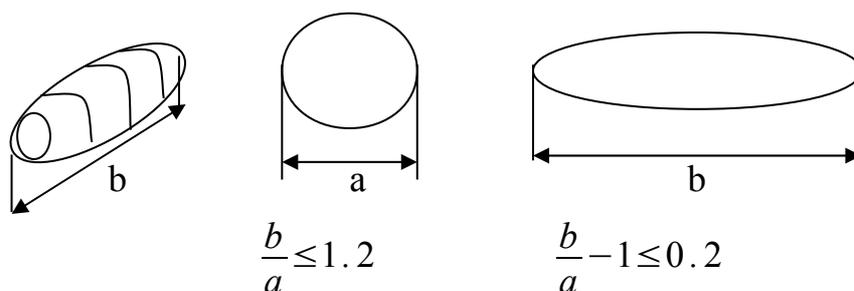
$$M_n = -1.91 M_{\text{Б.яд}}.$$

Отношение магнитных моментов нуклонов очень близко к отношению целых чисел:

$$\left| \frac{M_p}{M_n} \right| = \frac{2}{3}.$$

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДРА В ЦЕЛОМ

Форма ядра близка к сферической (точнее, эллипсоид вращения).



Несферичность ядра определяется отклонением  $b/a$  от 1, которое для всех известных ядер не превышает 20%.

Размер  $10^{-15}$  м. Эмпирическая формула для радиуса ядра, которая выполняется с достаточной точностью  $R = 1.3 \sqrt[3]{A} 10^{-15}$  м.

Такая зависимость является следствием того, что ядро состоит из частиц, которые плотно упакованы, т.е. расположены вплотную.

Плотность ядра практически однородна вплоть до его границ, т.е. вещество заполняет ядро без «пустот». В этом ядро коренным образом отличается от атома, у которого центральная часть (ядро) имеет плотность в  $10^{18}$  раз больше, чем плотность остальной части атомов (электронных облаков).

Любое ядро имеет электрический заряд (положительный и кратный элементарному заряду  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл).

$Q_{\text{яд}} = Ze$ , где  $Z$  – зарядовое число ядра (количество протонов в данном ядре).

Ядро имеет спин  $\vec{S}_{\text{яд}}$  и магнитный момент  $\vec{M}_{\text{яд}}$  .

Модуль спина ядра квантован:

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{S(S+1)},$$

где  $S$  – спиновое квантовое число ядра .

Проекция спина ядра на выделенную ось также квантуется.

Количество протонов  $Z$  в ядре может принимать любое целочисленное значение вплоть до наибольшего известного (104). **Количество протонов равно количеству электронов в атоме и, следовательно, определяет порядковый номер элемента в таблице Менделеева и химические свойства данного элемента.**

При фиксированном количестве протонов возможное количество нейтронов  $N$  в ядре не может быть любым! Количество нейтронов у легких ядер примерно равно количеству протонов, а у самых тяжелых – примерно на 60% больше. Только у одного элемента - водорода - в ядре отсутствуют нейтроны.

**Изотопами данного элемента называются вещества, ядра которых имеют одно и то же количество протонов, но разное количество нейтронов.**

Изотоп водорода, ядро которого содержит один нейтрон, называется дейтерием, а его ядро – дейтоном. ***Изотоп водорода, ядро которого содержит два нейтрона, называется тритием, а его ядро – тритоном.***

Самым необычным свойством ядер является наличие неустойчивых ядер, которые самопроизвольно превращаются в другие ядра и элементарные частицы.

**Стабильными (устойчивыми) называются ядра, которые могут существовать бесконечно долго, не превращаясь в другие.** У некоторых веществ имеется несколько стабильных изотопов, у которых наблюдается отличие на 1 – 10 нейтронов. Были обнаружены также и нестабильные ядра, которые, как и стабильные, могут иметь изотопы. К настоящему времени известно 104 химических элемента, около 300 устойчивых изотопов и свыше 1000 неустойчивых.

## МОДЕЛИ ЯДЕР

Наиболее теоретически разработанными моделями ядер являются капельная и оболочечная модели.

В КАПЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ядро моделируется, как капля жидкости, ча-

стицы которой (нуклоны) участвуют в ядерном взаимодействии (вне контакта нуклонов между ними действуют силы притяжения, при контакте и сжатии - отталкивания). Нуклоны несжимаемы, расположены почти вплотную, но обладают подвижностью. Эту модель мы не будем рассматривать.

Согласно ОБОЛОЧЕЧНОЙ модели ядра каждый нуклон ядра движется колебательно в общем поле ядерных сил, создаваемом всеми нуклонами ядра. Усредненный потенциал этого поля можно аппроксимировать потенциалом трехмерного осциллятора. Решение уравнения Шредингера дает доступные квантовые состояния колебательного движения, которое определяется как суперпозиция трех независимых одномерных колебаний по осям X, Y и Z, имеющих энергию

$$E_{x_n} = \hbar \omega \left( n_x + \frac{1}{2} \right), \quad E_{y_n} = \hbar \omega \left( n_y + \frac{1}{2} \right), \quad E_{z_n} = \hbar \omega \left( n_z + \frac{1}{2} \right),$$

где  $n_{x,y,z}$  - целые числа, принимающие значения 0, 1, 2, ..., есть квантовые числа для каждого одномерного колебания вдоль соответствующей оси декартовой системы координат. Произвольно движущийся нуклон имеет энергию, равную сумме этих энергий, которая квантована с помощью квантового числа  $n$ :

$$E_n = \hbar \omega \left( n + \frac{3}{2} \right),$$

где целое число  $n = n_x + n_y + n_z = 0, 1, 2, 3, \dots$  является квантовым числом, определяющим энергию движения нуклона. Таким образом, тройка целых чисел  $n_x, n_y, n_z$  совместно с  $m_s = \pm \frac{1}{2}$  (магнитное спиновое квантовое число нуклона) дают **четверку чисел, полностью определяющую состояние нуклона в ядре.**

Количество доступных состояний с фиксированным квантовым числом  $n$  можно вычислить по формуле

$$K_n = (n+1)(n+2).$$

*По аналогии с атомом, совокупность доступных состояний с фиксированным числом  $n$ , принято называть оболочкой.*

*Подоболочкой можно называть совокупность состояний, имеющих данную тройку чисел  $n_x, n_y, n_z$ . Любая подоболочка имеет 2 доступных квантовых состояния, отличающихся магнитным спиновым квантовым числом  $m_s$  (+1/2 и -1/2).*

Первая оболочка ( $n = 0$ ) имеет 2 доступных состояния (0,0,0,1/2) и (0,0,0,-1/2) и одну подоболочку и (0,0,0,±1/2);

вторая ( $n = 1$ ) имеет 6 доступных состояний и 3 подоболочки

$(1,0,0,\pm 1/2)$ ,  $(0,1,0,\pm 1/2)$ ,  $(0,0,1,\pm 1/2)$ ;

третья ( $n = 2$ ) имеет 12 доступных состояний и 6 подоболочек  $(2,0,0,\pm 1/2)$ ,  $(0,2,0,\pm 1/2)$ ,  $(0,0,2,\pm 1/2)$ ,  $(1,1,0,\pm 1/2)$ ,  $(1,0,1,\pm 1/2)$  и  $(0,1,1,\pm 1/2)$ .

Совокупность протонов и совокупность нейтронов в ядре являются самостоятельными квантовыми системами, поэтому доступные квантовые состояния заполняются нуклонами по отдельности: отдельно протонами, отдельно нейтронами. При этом выполняются известные основные принципы:

- **принцип минимальности энергии, т.е. сначала заполняются самые нижние уровни энергии (квантовые состояния с минимальной энергией), затем – расположенные выше, т.е. имеющие большую энергию;**
- **принцип Паули: в одной квантовой системе в одном квантовом состоянии может находиться не более одной частица с полуцелым спином.**

Подоболочка заполнена, если в ней находится 2 нуклона. Все сказанное относится как к протонам, так и к нейтронам, входящим в состав ядра.

Ядра с заполненными протонными подоболочками содержат четное количество протонов и будут иметь повышенную устойчивость и, следовательно, больше изотопов, чем ядра с нечетным количеством протонов. В лабораторной работе вы убедитесь в этом на опыте.

Для элемента, у которого 2 протона (гелий), первая оболочка полностью заполнена протонами (а остальные пусты).

Для элемента, у которого 8 протонов (кислород), заполнены первая (2 состояния) и вторая (6 состояний) оболочки.

Для элемента, имеющего 20 протонов (кальций), заполнены протонами первая, вторая и третья оболочки (12 состояний).

**Ядра данных химических элементов обладают особой устойчивостью, количество протонов в них называют «магическими числами», а сами ядра называют «магическими».** Химические элементы с магическими ядрами имеют особенно большое количество изотопов.

**Дважды магическими называют ядра, у которых и количество протонов и количество нейтронов равно магическому числу. У них полностью заполнены оболочки, как для протонов, так и для нейтронов.**

Экспериментальные значения магических чисел образуют следующий ряд: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 ...

В упрощенной модели магическими являются числа 2, 8, 20, 40, 70 и 112. Число 28 не предсказывается в упрощенной модели ядра, но получается в уточненной модели. Последующие числа хотя и отличаются, но довольно близки.

Дважды магическими ядрами обладают гелий  ${}^4_2\text{He}$ , кислород  ${}^{16}_8\text{O}$ , кальций  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$  и свинец  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ .

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

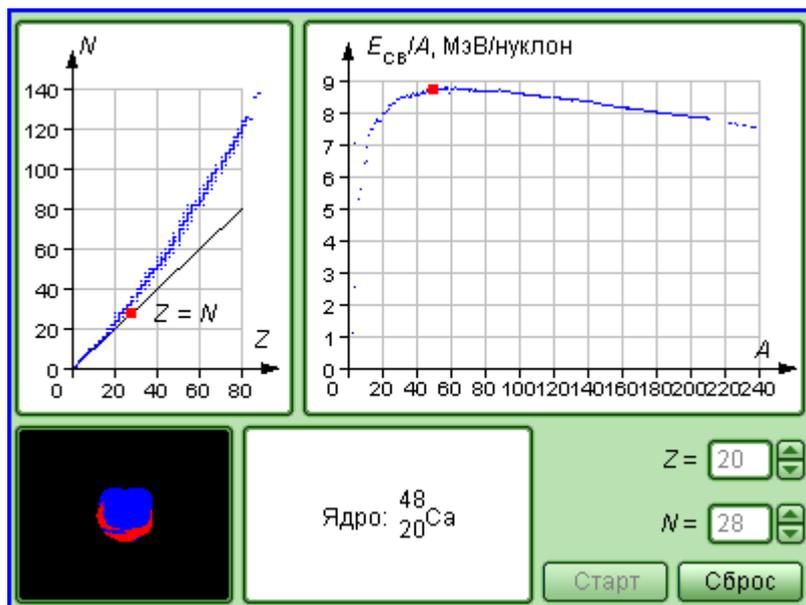


Рис.1. Модель для исследования устойчивости ядер.

На рис.1 представлено изображение экрана компьютера, на котором даны результаты экспериментальных исследований устойчивости ядер и удельной энергии связи нуклонов в ядре в зависимости от состава ядра.

На левом графике представлена совокупность точек, соответствующих составу ядер ( $Z$  и  $N$ ) всех химических элементов, встречающихся в природе (включая изотопы). Фиксируя количество протонов  $Z$ , входящих в состав ядра, мы задаем химические свойства вещества, состоящего из атомов с такими ядрами. Изменяя количество нейтронов  $N$  при фиксированном количестве протонов, получаем изотопы данного химического элемента. Ядра полученного изотопа могут быть как стабильными, так и нестабильными. Это свойство ядер можно наблюдать на изображении, помещенном в левом нижнем углу модели. Каждый стабильный изотоп при наведении маркера мыши изображается в виде красной точки.

При исследованиях на данной компьютерной модели требуется определить количество стабильных изотопов для химических элементов, заданных для каждой бригады студентов.

**ЗАМЕЧАНИЕ:** по графику, приведенному сверху справа на рис. 1, вы можете наблюдать, как зависит удельная энергия связи нуклонов в ядре  $E_{св}$  от его состава (количества нуклонов  $A$ ).

Таблица 1 (не перерисовывать). Исходные данные.

Номера бригад	Количество протонов в ядре - $Z$												
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1 и 5	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
2 и 6	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46
3 и 7	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
4 и 8	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14

Таблица 2. Результаты измерений и расчетов (14 строк).

Бригада № \_\_\_\_\_

Количество протонов в ядре $Z$	Количество нейтронов в ядре изотопа - $N$										Количество изотопов $N_{из}$

### **ИЗМЕРЕНИЯ**

1. С помощью регулировки справа установите количество протонов  $Z$ , заданное в строке для вашей бригады и первом столбце табл. 1.
2. Запишите значение  $Z$  в левом столбце табл. 2.
3. С помощью второго регулятора справа внизу установите количество нейтронов  $N$ , равное количеству протонов  $Z$ .
4. Нажмите кнопку «Старт». Если ядро неустойчиво, оно будет распадаться, и надо увеличить количество нейтронов на 1 и повторить действия по п.3.
5. Если ядро устойчиво, оно не будет распадаться. Запишите количество нейтронов  $N$  в табл. 2.
6. Увеличьте количество нейтронов на 1. Если ядро устойчиво, запишите количество нейтронов  $N$  в табл. 2.
7. Повторите п.5 пока не получите подряд несколько неустойчивых ядер. Тогда измените количество протонов, как указано в табл. 2 для вашей бригады.
8. Повторите действия, начиная с п.3 и записывая результаты в следующей строке табл. 2.

## **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

1. Подсчитайте количество изотопов для каждого химического элемента и внести в последний столбец табл.2.
2. Сделайте вывод по количеству изотопов химических элементов в заданном диапазоне порядковых номеров. Объяснить причину такого количества.
3. Постройте график зависимости количества изотопов  $N_{\text{из}}$  от количества протонов  $Z$  только для четных  $Z$ .
4. Сделайте вывод по форме графика  $N_{\text{из}}(Z)$ .
5. По положению максимума на графике оцените значение магического числа.
6. Сравните значение магического числа, полученное экспериментально, с теоретическим значением числа, расположенным в данном диапазоне изменения  $Z$ .
7. Сделайте вывод о количестве изотопов у веществ, ядра которых имеют нечетное количество протонов  $Z$ .

## **ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. Что называют ядром атома?
2. Что такое нуклон?
3. Что такое зарядовое число ядра и чему оно равно?
4. Что определяет порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева?
5. В чем состоит главное отличие нейтрона от протона?
6. Какие характеристики нейтрона точно совпадают с аналогичными характеристиками протона?
7. Что можно сказать о количестве протонов и нейтронов в ядрах?
8. У каких химических элементов количество протонов больше, чем количество нейтронов?
9. Что такое изотопы?
10. Назовите наиболее известные модели ядра атома.
11. Опишите особенности капельной модели ядра.
12. Опишите движение нуклона в ядре согласно оболочечной модели.
13. Запишите формулу энергии одномерного квантового осциллятора.
14. Запишите формулу энергии трехмерного квантового осциллятора.
15. Сколько квантовых чисел определяют доступное квантовое состояние нуклона в ядре? Назовите их и укажите их обозначения и числовые значения.
16. Перечислите принципы, которые выполняются при заполнении нуклонами доступных квантовых состояний в ядре.

17. Дайте определение оболочке для квантовых состояний нуклонов в ядре.
18. Дайте определение подоболочке для квантовых состояний нуклонов в ядре.
19. Какое свойство будут существенно разным у химических элементов, имеющих ядра с четным и нечетным количеством протонов?
20. Что такое магические ядра?
21. Что такое дважды магические ядра?
22. Напишите формулу для определения магических чисел.
23. Много или мало изотопов в среднем, как вы предполагаете, будут иметь химические элементы в заданном для вашей бригады диапазоне изменения  $Z$  и почему?
24. Как примерно должен выглядеть график  $N_{из}(Z)$  для четных и нечетных  $Z$  с учетом значений  $Z$  для вашей бригады, приведенных в табл. 1?

### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] - Калашников Н. П., Смондырев М.А. Основы физики. Т.2. М.: ООО «Дрофа», 2004.
- [2] - Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004.

## НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ

### ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Название	Символ	Значение	Размерность
Гравитационная постоянная	$\gamma$ или $G$	$6,67 \cdot 10^{-11}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 \text{кг}^{-2}$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	$g_0$	9,8	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	$c$	$3 \cdot 10^8$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02 \cdot 10^{26}$	$\text{кмоль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R$	$8,31 \cdot 10^3$	$\text{Дж кмоль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23}$	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Элементарный заряд	$e$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Масса электрона	$m_e$	$9,11 \cdot 10^{-31}$	кг
Постоянная Фарадея	$F$	$9,65 \cdot 10^4$	$\text{Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12}$	$\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{Гн} \cdot \text{м}^{-1}$
Постоянная Планка	$h$	$6,62 \cdot 10^{-34}$	$\text{Дж} \cdot \text{с}$

### ПРИСТАВКИ И МНОЖИТЕЛИ

для образования десятичных кратных и дольных единиц

Приставка	Символ	Множитель
дека	да	$10^1$
гекто	г	$10^2$
кило	к	$10^3$
мега	М	$10^6$
гига	Г	$10^9$
тера	Т	$10^{12}$

Приставка	Символ	Множитель
деци	д	$10^{-1}$
санتي	с	$10^{-2}$
милли	м	$10^{-3}$
микро	мк	$10^{-6}$
нано	н	$10^{-9}$
пико	п	$10^{-12}$