

СОДЕРЖАНИЕ

3.1. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ.....	5
3.3. СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА	10
3.4. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ	17
3.5. ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО.....	24
3.6. ЯДРА АТОМОВ.....	35
3.7. ЭФФЕКТ КОМПТОНА.....	43

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 изображение, имеющее следующий вид:

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](#)

$W_1 = \frac{L^2}{2}$

$E = h\nu$

$\nu = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$

$\alpha = \frac{\lambda}{D}$

$h\nu = E_2 - E_1$

$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$

$E_0 = mc^2$

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.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

3.1. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Изучение явления внешнего фотоэффекта.
- Исследование с помощью компьютерной модели закономерностей внешнего фотоэффекта.
- Определение в данной модели красной границы фотоэффекта, работы выхода материала фотокатода и постоянной Планка.

ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником. Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите «Модель 5.1. Фотоэффект».

Прочитайте по учебнику соответствующий материал [1 – §§202 – 204]. Кратко законспектируйте теорию. Рассмотрите изображение на рис. 1 и зарисуйте его в отчет по лабораторной работе. Подготовьте таблицы. Подготовьте ответы на вопросы и выполните задания для самоконтроля.

Получите допуск у преподавателя.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

ФОТОНЫ – это *частицы (кванты), поток которых описывает электромагнитное излучение (ЭМИ) в квантовой физике*. Частоту ЭМИ обозначим как ν , а длину волны как λ , тогда [1, с.381]:

ЭНЕРГИЯ ФОТОНА будет определяться соотношением $E_{\Phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$,

где h – постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

МАССА ФОТОНА связана с его энергией соотношением Эйнштейна

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

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

ЭНЕРГИЯ в физике микрочастиц часто измеряется во внесистемных единицах «электрон-Вольтах», $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ это явление вылета электронов из вещества (например, металла) при его облучении электромагнитным излучением, например, светом. Вылетевшие из вещества электроны при фотоэффекте назы-

ваются ФОТОЭЛЕКТРОНАМИ. Далее указанное явление называем «*фотоэффект*».

По Эйнштейну, каждый фотон с энергией $E_{\phi} = h\nu$ поглощается только одним электроном [1, стр.378]. Энергия падающего фотона частично расходуется на совершение электроном работы выхода из металла и частично на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии $E_{КИН}^{ВНЕ}$. По закону сохранения энергии

$$h\nu = A_{ВЫХ} + E_{КИН}^{ВНЕ} . \quad (1)$$

Это соотношение называют формулой (законом) ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТА.

КРАСНАЯ ГРАНИЦА фотоэффекта *есть минимальная частота $\nu_{КР}$ (максимальная длина волны $\lambda_{КР}$) ЭМИ, при которой еще наблюдается фотоэффект.* Для красной границы фотоэффекта $E_{КИН}^{ВНЕ} = 0$, а энергия фотона равна работе выхода

$$h\nu_{КР} = \frac{hc}{\lambda_{КР}} = A_{ВЫХ} . \quad (2)$$

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, второй – фотокатодом. Между электродами включают источник с определенной ЭДС.

На фотокатод падает электромагнитное излучение, а анод при определенных условиях обеспечивает направленное движение фотоэлектронов от катода к аноду и протекание тока в цепи (рис.1).

Внутренность колбы вакуумируется (из нее откачивается воздух, чтобы его давление было очень низким, порядка 10^{-7} мм.рт.ст.). В этом случае фотоэлектроны могут практически без столкновений с атомами или молекулами газа двигаться от катода до анода.

Если напряжение на аноде положительное относительно фотокатода, 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 и фотокатодом, при котором прекращается ток в цепи фотоэлемента,* то есть фотоэлектроны не долетают до анода. При таком напряжении кинетическая энергия электронов у катода $E_{КИН}^{ВНЕ}$ равна потенциальной энергии электронов у анода $eU_{ЗАП}$, откуда следует выражение:

$$U_{\text{зап}} = \frac{E_{\text{КИН}}^{\text{ВНЕ}}}{e} = \frac{h\nu - A_{\text{ВЫЛ}}}{e} = \frac{hc}{e\lambda} - \frac{A_{\text{ВЫЛ}}}{e}, \quad (3)$$

где e – заряд электрона.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рис.1 и зарисуйте его левую часть в свой конспект лабораторной работы.

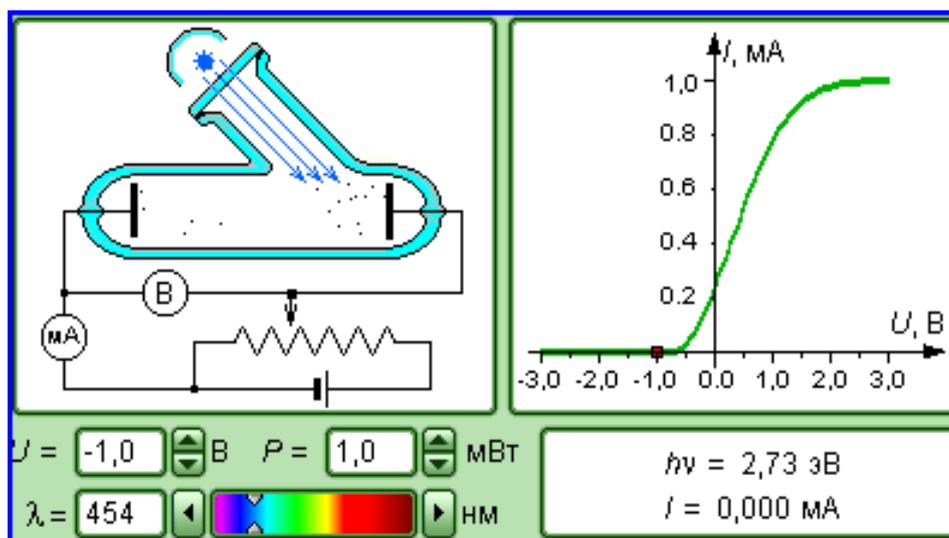


Рис.1. Компьютерная модель для исследования внешнего фотоэффекта

Щелкните мышью кнопку регулятора мощности P облучения фотокатода и установите максимум P .

Зацепив мышью, перемещайте метку на спектре, постепенно уменьшая длину волны ЭМИ, установите минимальную длину волны ЭМИ (λ). Изменяя напряжение до исчезновения фототока, наблюдайте движение электронов в фотоэлементе.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Установите нулевое напряжение (U) между анодом и фотокатодом. Зацепив мышью, перемещайте метку на спектре и установите минимальную длину волны.
2. Постепенно увеличивая длину волны облучения фотокатода (или щелкайте кнопку регулятора длины волны), добейтесь полного отсутствия фототока.
3. Установите первое значение запирающего напряжения в соответствии с

табл.1 для вашей бригады.

4. Перемещая мышью вертикальную метку на спектре или щелкая кнопку регулятора длины волны, установите такое максимальное значение длины волны, при котором прекращается фототок (при визуальном наблюдении электронов вы видите, что электроны почти долетают до поверхности анода, не касаются его и движутся обратно к катоду). При этом напряжение между анодом и фотокатодом становится равным напряжению запираения $U_{\text{ЗАП}}$.
5. Значения λ_1 и $U_{\text{ЗАП}1}$ занесите в табл. 2.
6. Повторите измерения по пп. 3 – 5, используя следующие значения запирающего напряжения из табл.1.

Таблица 1

Запирающее напряжение (В) (не перерисовывать)

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

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Вычислите и запишите в таблицу обратные длины волн $1/\lambda_i$.
2. Постройте график зависимости напряжения запираения ($U_{\text{ЗАП}}$) от обратной длины волны ($1/\lambda$). Масштаб выберите так, чтобы иметь начало отсчета по горизонтальной оси и точку -3 В на вертикальной оси.
3. Определите постоянную Планка, используя график и формулу (или обработав результаты по методу наименьших квадратов)

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

4. Используя точку пересечения графика с вертикальной осью и формулу (3), вычислите значение работы выхода для материала фотокатода.
5. Определите длину волны красной границы фотоэффекта $\lambda_{\text{КР}}$, используя по-

лученную выше работу выхода и формулу (2).

6. Запишите ответы. Проанализируйте график и ответы, используя табличные значения, приведенные в табл.3.

Таблица 3

Значения работы выхода для некоторых материалов

Материал	калий	литий	платина	рубидий	серебро	цезий	цинк
$A_{\text{ВЫХ}}$, 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. Как описывается электромагнитное излучение, взаимодействующее при фотоэффекте со свободными электронами металла фотокатода?
3. Напишите формулу для энергии фотона.
4. Напишите формулу, связывающую энергию фотона и его массу.
5. Напишите выражение энергии фотона через его импульс.
6. Поясните явление внешнего фотоэффекта.
7. Что происходит с фотоном, взаимодействующим со свободным электроном металла фотокатода?
8. Что происходит со свободным электроном металла после его взаимодействия с фотоном?
9. Что такое работа выхода?
10. Напишите формулу Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
11. Дайте определение красной границы фотоэффекта.
12. Каково устройство фотоэлемента?
14. Почему катод фотоэлемента называют фотокатодом?
15. Что такое запирающее напряжение для данного фотокатода?
16. Какие законы сохранения выполняются при движении электрона от фотокатода к аноду?
17. Как движется фотоэлектрон в фотоэлементе при потенциале анода ниже потенциала фотокатода?
18. Как движется фотоэлектрон в фотоэлементе при потенциале анода выше потенциала фотокатода?
19. Как связана кинетическая энергия электрона у катода с его потенциальной энергией у анода?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высшая школа, 2004. (Гл.26, §§ 202-204).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

3.3. СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Изучение планетарной и квантовой моделей атома при моделировании процесса испускания электромагнитного излучения возбужденными атомами водорода.
- Исследование на компьютерной модели закономерностей формирования линейчатого спектра излучения атомарного водорода.
- Определение величины постоянной Ридберга.

ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Прочитайте по учебнику соответствующий материал [1 – §§202 – 204]. Кратко законспектируйте теорию. Рассмотрите изображение на рис. 1 и зарисуйте основное в отчет по лабораторной работе. Подготовьте таблицы. Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите «Модель 6.1.». Подготовьте ответы на вопросы и выполните задания для самоконтроля.

Получите допуск у преподавателя.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

ЛИНЕЙЧАТЫЙ спектр состоит из спектральных линий.

СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ называется *электромагнитное излучение, испускаемое (или поглощаемое) атомом (или другой квантовой системой) при переходе из одного стационарного квантового состояния в другое.*

Спектральная линия (идеальная, бесконечно тонкая) является гармонической электромагнитной волной с частотой ν (с длиной волны λ). Кроме того, такое излучение можно представить как поток фотонов с одной и той же энергией $E_{\phi} = h\nu$.

Расстояния 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 (модель Бора):

- В центре атома расположено положительно заряженное ядро, имеющее размер, примерно в 100 тысяч раз меньше размера атома.
- Вокруг ядра по определенным (разрешенным) стационарным орбитам дви-

жуются электроны. Форма орбиты близка к круговой.

- 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 электрона атом испускает фотон с такой же энергией $E_{\text{ф}} = |\Delta E_{\text{эл}}|$.

КВАНТОВАЯ модель атома отличается от планетарной в первую очередь тем, что в ней состояние движения электрона описывается с помощью волновой функции. Он не имеет точно определенного радиус-вектора (координаты) и вектора скорости, поэтому бессмысленно говорить о траектории его движения. Можно определить только границы области его преимущественного пребывания (орбитали).

Для анализа движения электрона в кулоновском поле ядра атома в квантовой механике применяется УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА. В результате решения этого уравнения получается ВОЛНОВАЯ ФУНКЦИЯ, квадрат которой равен плотности вероятности нахождения электрона вблизи данной точки. Волновая функция зависит не только от координаты \vec{r} и времени t , но и от трех параметров с дискретным набором значений, называемых квантовыми числами. Эти числа имеют названия: *главное, азимутальное, магнитное*.

Релятивистское уравнение Дирака показывает наличие у электрона собственного момента импульса, называемого *спином*, и спинового *магнитного момента*.

Для модуля вектора *спинового* момента импульса \vec{S} имеет место соотношение

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

где s – спиновое квантовое число, которое у каждой частицы имеет только одно значение. Например, *спиновое квантовое число* электрона (также часто называемое коротко «спин электрона»)

$$s_{\text{эл}} = \frac{1}{2}.$$

Аналогичные значения имеют спиновые квантовые числа протона и нейтрона. Но у фотона $s_{\text{фот}} = 1$.

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

$$E_n = -\frac{E_{\text{иВ}}}{n^2},$$

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

АЗИМУТАЛЬНОЕ (ОРБИТАЛЬНОЕ) квантовое число l определяет модуль орбитального момента импульса электрона:

$$|\vec{L}| = \hbar \sqrt{l(l+1)}.$$

Оно принимает целочисленные значения $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$.

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

$$L_z = m_l \hbar,$$

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 два значения: $m_s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$.

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 n , и БУКВА, определяющая азимутальное квантовое число l . Буквенное обозначение для этого числа приведено в таблице:

Буква	s	p	d	e	f
Значение l	0	1	2	3	4

ПРИМЕР: Электрон в атоме имеет главное квантовое число $n = 3$, а азимутальное $l = 2$. Тогда краткая запись его состояния такова: «3d».

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

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

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

Изменение энергии электрона в атоме водорода при его переходе из состояния с главным квантовым числом n_2 в состояние с главным квантовым числом n_1

$$\Delta E_{\text{эл}} = E_{\text{эл}}^{\text{кон}} - E_{\text{эл}}^{\text{нач}} = -\frac{E_{iH}}{n_1^2} - \left(-\frac{E_{iH}}{n_2^2}\right) = E_{iH} \left(-\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_2^2}\right).$$

По закону сохранения энергии $\Delta E_{\text{эл}} + \Delta E_{\text{фот}} = 0$. Тогда энергия фотона равна

$$E_{\text{фот}} = -\Delta E_{\text{эл}} = E_{iH} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

Отсюда

$$\nu = \frac{E_{iH}}{h} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) - \text{формула Ридберга,}$$

Где R - постоянная Ридберга, определяемая соотношением $R = \frac{E_{iH}}{h}$.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

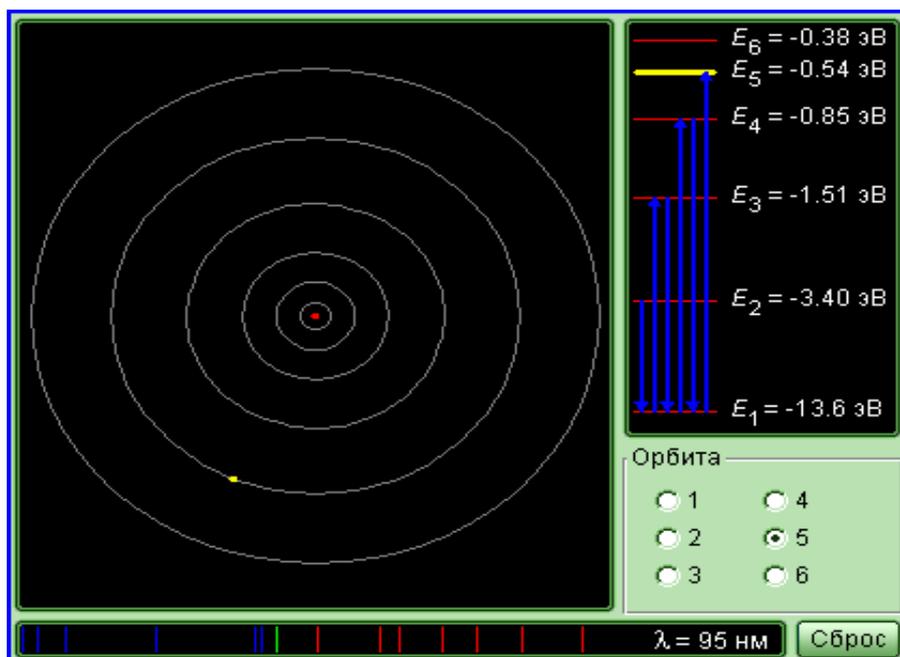


Рис.1. Орбитальная (планетарная) модель атома водорода

Найдите на рис.1 изображения всех орбит электрона в атоме водорода. Рассмотрите внимательно спектральный состав излучения.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Запишите в заголовок табл. 2 величину главного квантового числа n_0 для нижнего уровня энергии данной серии, указанную в табл. 1 для вашей бригады. Запишите туда же наименование соответствующей серии.
2. Подведите маркер мыши к уровню энергии электрона с номером n_0 и щелкните левой кнопкой мыши.
3. Подведите маркер мыши к уровню энергии электрона с номером $n_1 = n_0 + 1$ и щелкните левой кнопкой 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 спектральной линии λ_1 в данной серии.
5. Запишите в табл. 2 главное квантовое число и длину волны данной линии.
6. Повторите измерения, начиная с п.2, для всех возможных верхних уровней заданной серии ($n_2 = n_0 + 2$ и λ_2 , $n_3 = n_0 + 3$ и λ_3 , ...).

Таблица 1

Начальные условия (не перерисовывать)

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_i	λ_i , мкм	$\frac{1}{n_i^2}$	$1/\lambda_i$, мкм ⁻¹
1				
2				
3				
4				

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Вычислите и запишите в табл. 2 величины, обратные квадратам главного

квантового числа.

2. Вычислите и запишите в табл. 2 величины, обратные длинам волн.
3. Постройте график зависимости величины, обратной длине волны $\left(\frac{1}{\lambda_i}\right)$, от величины, обратной квадрату главного квантового числа $\left(\frac{1}{n_i^2}\right)$, 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?
6. Опишите планетарную модель атома.
7. В каких случаях атомы излучают и в каких поглощают ЭМИ?
8. Как связаны друг с другом характеристики электрона в атоме и фотона, излучаемого данным атомом?
9. Какое уравнение используется для анализа квантовой модели атома?
10. Что является решением этого уравнения?
11. Как описывается электрон и его состояние в квантовой модели атома?
12. Что определяет квадрат модуля волновой функции?
13. Дайте определение орбитали электрона в атоме.
14. Что определяет главное квантовое число?
15. Что определяет азимутальное (орбитальное) квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
16. Что определяет магнитное квантовое число?
17. Что такое спин электрона?
18. Что определяет спиновое квантовое число?

19. Что определяет магнитное спиновое квантовое число?
20. Что такое вырожденные состояния?
21. Как определить кратность вырождения состояния?
22. Расшифруйте краткую запись состояний электрона в атоме $2s$ и $2p$.
23. Может ли электрон иметь состояние $2d$ и почему?
24. Сформулируйте правило отбора.
25. Что такое спектральная серия?
26. Каковы наименования 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).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

3.4. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В данной работе с использованием компьютерной модели

- изучаются волновые свойства электронов;
- исследуются процессы, возникающие при взаимодействии пучка электронов с диафрагмой;
- определяются некоторые характеристики, связанные с их движением.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

Изучите литературу [1 - §§139, 213, 214, 215]. Запишите в отчете краткий конспект теоретического материала. Внимательно рассмотрите и зарисуйте компьютерную модель (рис.1). Подготовьте таблицы, образцы которых приведены ниже. Запустите с экрана монитора сборник компьютерных моделей. Выберите в экранном меню модель «5.3 Волновые свойства частиц». Подготовьте ответы на вопросы и выполните задания для самоконтроля.

Получите у преподавателя допуск к данной лабораторной работе.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Для описания движения в конкретных условиях многих материальных объектов применяются различные модели. Например, автомобиль, самолет, камень и другие «крупные» (макроскопические) объекты можно описывать, используя модели «материальная точка», «система материальных точек», «абсолютно твердое тело» и т.д.

Квантовая физика имеет дело с необходимостью двойственного описания любых материальных объектов [1, с. 81]. **Это описание выглядит, как совокупность двух моделей - волновой и корпускулярной.** Причем в условиях одних экспериментов надо данный объект описывать как частицу (корпускулу), а в условиях других экспериментов такой же объект надо характеризовать с помощью волны. В начале прошлого века эту проблему называли «дуализм волна-частица».

Как известно, простейшей волной является гармоническая волна, основными характеристиками которой являются амплитуда, частота и скорость распространения.

При корпускулярном описании объект выглядит как частица, имеющая массу, положение, траекторию и другие характеристики движения.

При исследовании прохождения пучка электронов через щель в непрозрачном для них экране (диафрагму) в принципе можно наблюдать волновые

свойства электрона. Данный эксперимент можно моделировать с помощью компьютера.

В данной лабораторной работе в компьютерном эксперименте (рис.1) исследуется прохождение потока электронов через диафрагму. *Идеальный пучок электронов есть совокупность параллельно движущихся частиц, имеющих одну и ту же скорость и импульс.* После взаимодействия пучка с диафрагмой на флюоресцирующем экране (рис.1) наблюдается *дифракционная картина в виде нескольких светящихся полос.* Таким образом, в эксперименте проявляются волновые свойства электронов. Эти свойства анализируем, используя соотношение де Бройля для длины волны λ :

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

где h - постоянная Планка; p – импульс электрона, равный произведению его массы m на скорость V .

Поскольку скорость у всех электронов одна и та же, импульсы равны и длины волн де Бройля одни и те же. Для простоты предположим, что узкая щель в диафрагме имеет прямоугольную форму. Тогда задача о прохождении пучка электронов через эту щель может решаться так же, как и задача прохождения через такую же щель гармонической волны [1, с.338]. В частности, будет наблюдаться явление дифракции.

ДИФРАКЦИЕЙ называют явления, возникающие при распространении волны в присутствии неоднородностей (препятствий), в частности, когда их размеры соизмеримы с длиной волны. При этом нарушаются законы геометрической оптики, в частности, волна проникает в область геометрической тени.

Опыт показывает, что прохождение электронов через отверстие в диафрагме будет сопровождаться таким же явлением, которое можно называть **дифракцией электронов** (рис.1).

Как и в решении задачи о дифракции волны, синус угла, под которым наблюдается **минимум** волны с номером k после щели шириной Δx равен

$$\sin(\vartheta_k^{\min}) = k \frac{\lambda}{\Delta x}. \quad (2)$$

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

$$\sin(\vartheta_n^{\max}) = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{\Delta x}. \quad (3)$$

Для первого максимума (не путать с нулевым, у которого $\vartheta = 0$):

$$\sin(\vartheta_1^{max}) = \frac{3\lambda}{2\Delta x}. \quad (4)$$

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

$$x_{m1} = L \cdot \operatorname{tg}(\vartheta_1^{max}). \quad (5)$$

Учитывая малость величины угла ϑ , можно использовать известное соотношение

$$\operatorname{tg}(\vartheta_1^{max}) = \sin(\vartheta_1^{max}), \quad (6)$$

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 коэффициенту наклона графика зависимости координаты первого максимума от величины, обратной ширине щели

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

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

Применив формулу (2) для первого минимума, получим неопределенность проекции импульса

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

Подставив в это выражение длину волны де Бройля из (1), получим соотношение для проекций координаты и импульса на ось X :

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar. \quad (9)$$

Соотношение (9), а также аналогичные соотношения для проекций на другие оси, называются *соотношениями неопределенностей Гейзенберга для проекций импульса и координаты*.

Волна де Бройля, приписываемая электрону, при дальнейшем развитии квантовой механики [1, с. 90] была заменена Шредингером на волновую (ψ) функцию, квадрат модуля которой равен *плотности вероятности* попадания электрона в зону вблизи данной точки с координатой x .

МЕТОДИКА и ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

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

Слева на непрозрачную для электронов диафрагму (рис.1) со щелью шириной Δx движется горизонтально поток электронов, имеющих одну и ту же скорость и импульс.

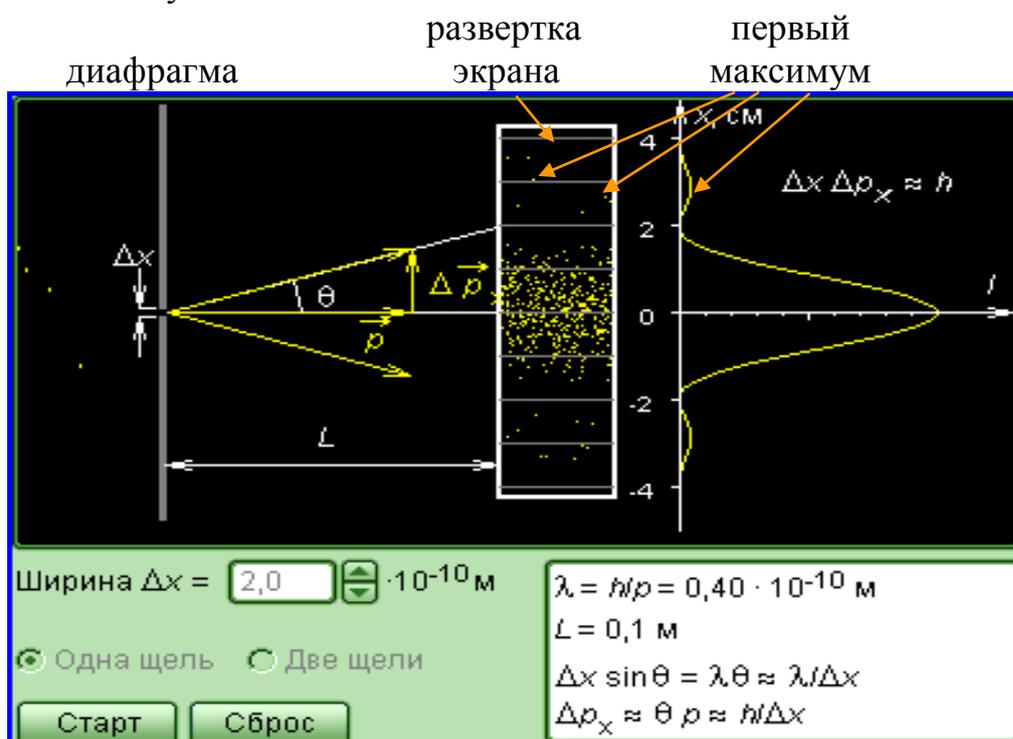


Рис.1 Компьютерный эксперимент по дифракции электронов на щели

При попадании электронов на флуоресцирующий экран на нем будут наблюдаться вспышки. Количество вспышек на единице площади за единицу времени имеет вид кривой с несколькими максимумами и минимумами (на рисунке справа). Горизонтальная координата точек кривой (I) пропорциональна относительному количеству электронов, обнаруживаемых за единицу времени

Таблица 4

Координаты электронов первого дифракционного максимума. Ширина щели $\Delta x_3 =$ _____ 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 $\Delta x_4 =$ _____ 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» для очистки поля модели.
3. Установите ширину щели по табл. 1 в соответствии с номером вашей бригады.
4. Щелкните мышью по кнопке «Старт». Когда количество вспышек электронов в зоне ПЕРВОГО МАКСИМУМА дифракционной картины составит 5 – 7, снова щелкните мышью по этой кнопке (которая теперь называется «Стоп»).
5. Прикладывая горизонтально лист бумаги или линейку, соедините положение каждого электрона первого максимума с вертикальной шкалой на экране и определите координаты x_i всех электронов 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. 4 - 6, 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 $\langle x \rangle_1 \dots \langle x \rangle_4$ и запишите в соответствующие табл. 2 - 5.
2. Постройте график зависимости среднего значения координаты первого максимума от величины, обратной ширине щели $\langle x \rangle = f(1/\Delta x)$.
3. По графику или обработав точки методом наименьших квадратов, опреде-

лите наклон прямой и, подставив его в формулу (8), вычислите длину волны электрона.

4. Сделайте вывод по полученному графику зависимости $\langle x \rangle = f(1/\Delta x)$ в сравнении с формулой (7).
5. Сделайте вывод по полученному значению λ , сравнивая его с числом, приведенным на экране компьютера.

ВОПРОСЫ и ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

1. Какую волну можно назвать простейшей?
2. Назовите примеры классических моделей объектов, применяемых в механике.
3. Напишите формулу для длины волны де Бройля.
4. Что такое явление дифракции?
5. Почему у электрона, проходящего через щель, появляется вертикальная (в данной компьютерной установке) неопределенность импульса?
6. Каков физический смысл волновой функции?
7. Напишите соотношение для синуса угла минимума при дифракции на прямоугольной щели.
8. Напишите соотношение для синуса угла максимума при дифракции на прямоугольной щели.
9. Чему прямо пропорциональна координата x_{m1} первого максимума дифракционной картины на экране?
10. Какой формы график вы ожидаете получить при построении зависимости $\langle x \rangle = f(1/\Delta x)$?
11. Как вы определите длину волны де Бройля для электрона в данной работе?
12. С чем вы будете сравнивать полученное числовое значение длины волны де Бройля для электрона?
13. Какие выводы вы предполагаете сделать после исследования вида полученного графика $\langle x \rangle = f(1/\Delta x)$?
14. Сформулируйте соотношение неопределенностей для координаты x и проекции импульса на ось X .

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высшая школа, 2004.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

3.5. ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО**ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Целью работы является исследование с помощью компьютерной модели 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 - §§ 232, 233]. Кратко законспектируйте теорию. Ответьте на контрольные вопросы. Оформите отчет по лабораторной работе, подготовьте таблицы в соответствии с требованиями по оформлению.

Запустите с экрана монитора сборник компьютерных моделей. Выберите модель «6.5 Лазер. Двухуровневая модель».

Получите у преподавателя допуск к выполнению данной лабораторной работы.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Распространение электромагнитного излучения (ЭМИ) внутри вещества сопровождается *различными процессами*, например, *поглощением ЭМИ*, а также *спонтанным и индуцированным (вынужденным) излучением*.

Для описания этих процессов используется представление ЭМИ в виде *потока фотонов*. Фотоны в случае монохроматического ЭМИ имеют одну и ту же энергию E_ϕ , равную произведению циклической частоты ω на постоянную Планка \hbar :

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

Для описания вещества, взаимодействующего с ЭМИ, в данной лабораторной работе используется компьютерная модель, включающая одинаковые атомы, расположенные неподвижно. Каждый атом содержит один валентный электрон, и 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 с нулевой температурой все валентные электроны во всех атомах должны находиться в нижнем состоянии, т.е. с энергией E_1 . При этом будем считать, что все остальные электроны, входящие в состав ато-

мов вещества, с ЭМИ не взаимодействуют.

При распространении в веществе ЭМИ, у которого фотоны имеют энергию, недостаточную для обеспечения перехода валентных электронов 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 энергии возбуждения атома ($\Delta E = E_2 - E_1$), то при взаимодействии фотона с атомом вещества валентный 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 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 τ_B - **постоянная времени** переходов электронов в возбужденное состояние, равная промежутку времени, за которое концентрация электронов, находящихся на нижних энергетических уровнях (в стационарном состоянии), уменьшается в $e = 2.73$ раза;

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

После логарифмирования получим

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

Электрон, перешедший на верхний энергетический уровень (в возбужденное состояние с энергией E_2), через (как правило) очень короткое время после прекращения воздействия ЭМИ снова возвращается на свободный нижний уровень (в стационарное состояние с энергией E_1), излучая фотон. *Процесс такого излучения фотонов 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_2 и E_1

$$E_\phi = E_2 - E_1.$$

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 τ_{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 (с энергией E_2).

После логарифмирования получим

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

ИНДУЦИРОВАННЫМ (вынужденным) излучением называется *процесс перехода электрона из возбужденного в невозбужденное состояние с излучением фотона, происходящий под воздействием фотона, движущегося **вблизи атома***. Данный процесс был предсказан Эйнштейном и нашел подтверждение в экспериментах.

Концентрация электронов в возбужденном состоянии $n_3(t)$ в этом случае также экспоненциально убывает со временем:

$$n_3(t) = n_3(0) \cdot \exp\left\{-\frac{t}{\tau_{III}}\right\}, \quad (3)$$

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

$n_3(0)$ – начальное (при $t = 0$) значение концентрации электронов в возбужденном состоянии.

После логарифмирования получим

$$-\ln\left(\frac{n_3(t)}{n_3(0)}\right) = \frac{t}{\tau_{III}}. \quad (3')$$

При распространении в веществе пучка ЭМИ его интенсивность может **убывать, оставаться постоянной или увеличиваться**. Вариант этих измене-

ний зависит от соотношения количества атомов n_1 с энергией E_1 и количества атомов n_2 с энергией E_2 . Концентрация фотонов $u(L)$ зависит от расстояния L , проходимого ЭМИ в веществе, по экспоненциальному закону:

$$u(L) = u(0) \cdot \exp \left[-\alpha L \right], \quad (4)$$

где α - 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 (B_{12}) и вынужденного (индуцированного) перехода электрона с верхнего энергетического уровня на нижний (B_{21}), β - 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 $u(L)$ к концентрации на входе $u(0)$ или отношение количества фотонов за некоторый промежуток времени на выходе и на входе в среду.

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

$$\ln(k) = \ln \frac{N_{\text{ВЫХ}}}{N_{\text{ВХ}}} = -\alpha L = -\beta B_{12} (n_1 - n_2) L = C (n_1 - n_2), \quad (7)$$

где C – константа, связанная с L соотношением

$$C = -\beta B_{12} L.$$

СОСТОЯНИЕМ ЗАСЕЛЕННОСТИ уровней в веществе называется отношение 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 за то же время 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 про-

цесса 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 (часть сигнала с выхода устройства с нужной фазой подается на его вход). 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 пребывания 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 значительно более долгое время (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 переходный 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 .

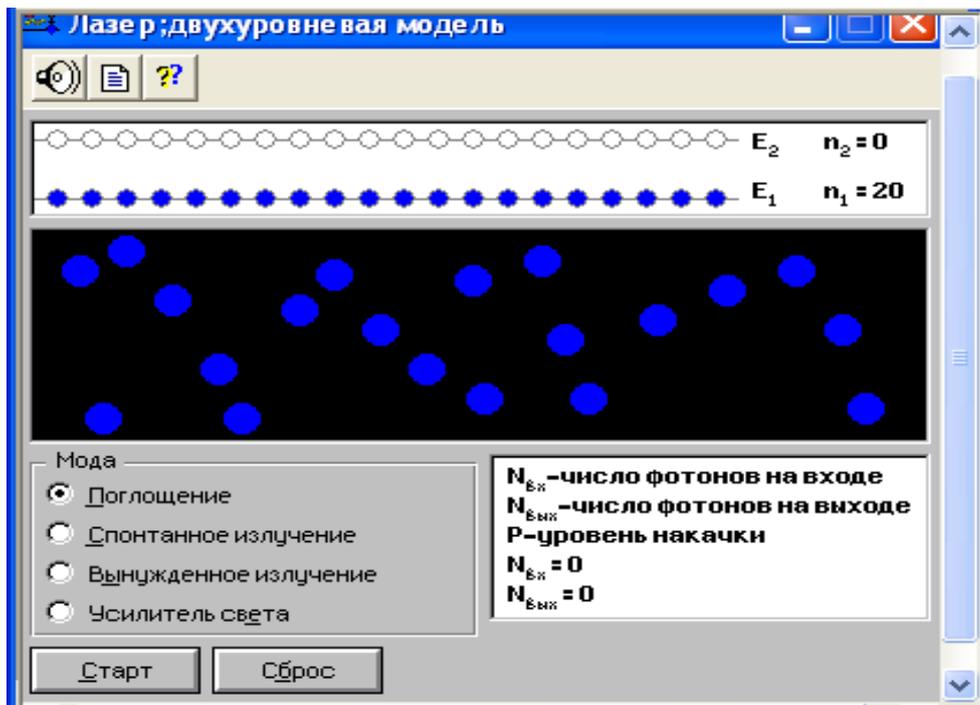


Рис.1 Модель для исследования процесса поглощения ЭМИ веществом

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

Значения уровня накачки (не перерисовывать)

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

Количество заполненных состояний обоих уровней и количество фотонов на входе $N_{ВХ}$ и выходе $N_{ВЫХ}$.
Интенсивность (уровень) накачки p (отн.ед.) = _____

t (мин)	1	2	3	4	5	6	Сред- нее
n_1							
n_2							
n_2/n_1							
$N_{ВХ}$							
$N_{ВЫХ}$							
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 сверху 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 $n_1(t)$, 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 про-

цесс, 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 верхнего уровня n_2 в первой строке табл. 4.

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 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» при прохождении стрелки на часах через удобное деление, после чего начнется накачка.

3. В момент времени, указанный первым в табл. 5 , 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. 2 – 5, пока не заполнятся все столбцы табл. 5.

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 $\frac{n_2}{n_1}$, 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.

5. По заданию преподавателя обработайте полученные результаты методом наименьших квадратов.

6. Сделайте выводы по графикам для экспериментов 1, 2 и 3, сравнивая их с теоретическими зависимостями (1'), (2') и (3').

7. Используя графики (или результаты обработки по методу наименьших квадратов), определите постоянные времени процессов поглощения (τ_B), спонтанного излучения ($\tau_{и}$) и индуцированного излучения ($\tau_{ии}$). Используйте общую формулу

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

8. Вычислите значение константы С, используя формулу (7).

9. 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 ЭМИ?
4. Опишите модель вещества, взаимодействующего с ЭМИ в данной лабораторной работе.
5. Сколько атомов входят в состав компьютерной модели? Что с ними происходит?
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 состо-

яние?

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 концентрации фотонов $n(L)$ от расстояния L , проходимого ЭМИ в веществе.
16. Нарисуйте график зависимости $n(L)$.
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?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высшая школа, 2004 (§§ 232, 233).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

3.6. ЯДРА АТОМОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение основных свойств ядер атомов. Исследование с помощью компьютерной модели состава ядер и его влияния на количество и стабильность изотопов.

ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Прочитайте по учебнику соответствующий материал [1 – §254]. Кратко законспектируйте теорию. Рассмотрите внимательно рис. 1 и зарисуйте основное в отчет по лабораторной работе. Подготовьте таблицы для заполнения в процессе измерений.

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

Получите допуск у преподавателя.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

ЯДРОМ называется центральная часть атома, которая имеет очень малый размер и в которой сосредоточена основная масса атома. Масса ядра в 2-4 тыс. раз больше, чем масса электронов, входящих в состав того же атома.

В СОСТАВ ЯДРА входят частицы, называемые «нуклонами» (от слова «ядерные»).

A – МАССОВОЕ ЧИСЛО ядра, равное 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. Символ протона «р». ЗАРЯД протона $Q_p = +e$, где e – элементарный заряд, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. МАССА протона $m_p = 1836 m_e$, где масса электрона $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг.

Протон обладает собственным моментом импульса - СПИНОМ, модуль которого равен

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

где $s_p = \frac{1}{2}$ называется СПИНОВЫМ КВАНТОВЫМ ЧИСЛОМ протона.

Протон имеет МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ: $M_p = 2.79 M_{\text{Б.яд}}$, где ядерный магнетон Бора равен

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

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

Его символ «n». ЗАРЯД нейтрона $Q_n = 0$. Количество нейтронов в ядре

$$N = A - Z.$$

МАССА нейтрона чуть больше массы протона $m_n \approx m_p + 2.5 m_e$.

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 не заряжен

$$M_n = -1.91 M_{\text{Б.ЯД}}.$$

Отношение магнитных моментов нуклонов очень близко к отношению целых чисел:

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

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДРА В ЦЕЛОМ

ФОРМА ЯДРА близка к сферической (точнее, эллипсоид).

Несферичность ядра не превышает 20%.

Эмпирическая формула для расчета размера ядра, которая выполняется с достаточной точностью:

$$R \approx 1.3 \sqrt[3]{A} \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

Такая зависимость является следствием того, что ядро состоит из частиц (нуклонов), которые плотно упакованы, т.е. заполняют ядро без «пустот», поэтому плотность ядра практически однородна вплоть до его границ. В этом ядро коренным образом отличается от атома, у которого центральная часть (ядро) имеет плотность в 10^{18} раз больше, чем плотность остальной части атома («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:

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

где S – спиновое квантовое число ядра.

Проекция спина ядра на выделенную ось также квантуется.

Количество протонов Z в ядре может принимать любое значение, максимальная граница которого наукой пока не установлена. *Количество протонов равно количеству электронов в атоме. Оно определяет порядковый номер элемента в таблице Менделеева и, следовательно, 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.

ИЗОТОПОМ данного химического элемента называется элемент, состоящий из атомов, ядра которых имеют то же количество протонов, что и ядра атомов данного элемента, но разное количество нейтронов.

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

Особым свойством ядер некоторых атомов является их неустойчивость, т.е. самопроизвольное превращение 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 состав ядра отличается на 1 – 10 нейтронов. Были обнаружены и исследованы также и нестабильные ядра, входящие в состав неустойчивых изотопов. К настоящему времени известно более сотни химических элементов, 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, частицы которой (нуклоны) участвуют в ядерном взаимодействии (вне контакта нуклонов между ними действуют силы притяжения, а при сжатии - отталкивания). Нуклоны практически несжимаемы, расположены почти вплотную, но обладают подвижностью. Особенностью модели является наличие поверхностного натяжения. Эту модель мы не будем рассматривать.

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

Z , имеющих энергию

$$E_{Xn} = \hbar\omega\left(n_X + \frac{1}{2}\right), E_{Yn} = \hbar\omega\left(n_Y + \frac{1}{2}\right), E_{Zn} = \hbar\omega\left(n_Z + \frac{1}{2}\right),$$

где $n_{X,Y,Z}$ - целые числа, принимающие значения $0, 1, 2, \dots$, есть квантовые числа для каждого одномерного колебания вдоль соответствующей оси декартовой системы координат. Энергия нуклона, колеблющегося в произвольном направлении, равна сумме этих энергий, которая квантуется согласно формуле:

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

где квантовое число $n = n_X + n_Y + n_Z = 0, 1, 2, 3, \dots$. Таким образом, тройка целых чисел n_X, n_Y, n_Z совместно с $m_s = \pm \frac{1}{2}$ (магнитное спиновое квантовое число нуклона) образуют **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 $n_X n_Y n_Z$.

Поскольку все нуклоны обладают собственным магнитным моментом, имеет место квантование проекции этого момента на выделенную ось

$$M_Z = m_s \hbar,$$

где магнитное спиновое квантовое число m_s принимает значения $\frac{1}{2}$ и $-\frac{1}{2}$.

Следовательно, любая подоболочка имеет 2 квантовых состояния, отличающихся магнитным спиновым квантовым числом m_s .

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

вторая ($n = 1$) имеет 6 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 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 квантовые состояния заполняются нуклонами по отдельности: отдельно протонами, отдельно нейтронами.

При этом выполняются основные принципы:

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

Подоболочка заполнена, если в ней находятся 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 имеют повышенную устойчивость: в такое ядро можно добавлять дополнительное количество нейтронов, но при этом оно останется стабильным. Следовательно, вещество с такими ядрами атомов будет иметь больше изотопов, чем вещество, у которого ядра имеют нечетное количество протонов. В лабораторной работе вы убедитесь в этом на опыте.

Но особо выделяются по устойчивости ядра с заполненными оболочками.

«МАГИЧЕСКИМ ЧИСЛОМ» называют количество протонов в ядре с заполненной оболочкой, которое обладает особой устойчивостью. Само такое ядро называют «магическим».

Первая оболочка ядра полностью заполнена протонами (а остальные пусты) для элемента, у которого в ядре 2 протона (гелий).

Полностью заполнены первая (2 состояния) и вторая (6 состояний) оболочки для элемента, у которого в ядре 8 протонов (кислород).

Полностью заполнены протонами первая, вторая и третья оболочки (12 состояний) для элемента, имеющего в ядре 20 протонов (кальций).

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.

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

В рассмотренной модели магическими являются числа 2, 8, 20, 40, 70 и 112. Экспериментальные значения магических чисел образуют следующий ряд: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 ...

Число 28, полученное в эксперименте, не предсказывается в данной упрощенной модели ядра, но получается в уточненной модели. Последующие числа модели, хотя и отличаются, но довольно близки к экспериментальным. В уточненной модели, которую мы здесь не рассматриваем, соответствие теоретических и экспериментальных значений магических чисел для тяжелых ядер оказывается более точным.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

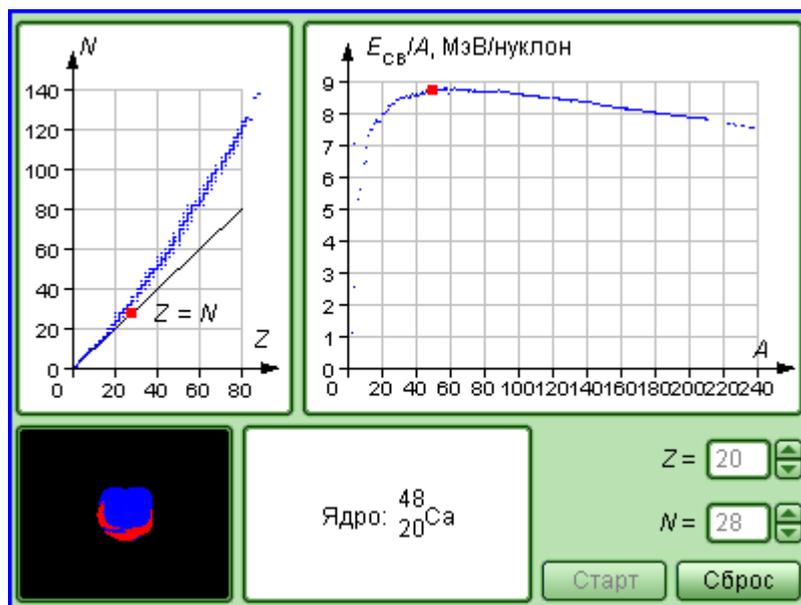


Рис.1. Модель для исследования устойчивости ядер.

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 можно 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 $E_{св}/A$ от его состава (количества нуклонов A).

Исходные данные (не перерисовывать)

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

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Подсчитайте количество стабильных изотопов для каждого химического элемента и внесите в последний столбец табл.2.
2. Сделайте вывод по количеству изотопов химических элементов в заданном диапазоне порядковых номеров. Объяснить причину такого количества.
3. Постройте графики зависимости количества стабильных изотопов $N_{из}$ от

количества протонов Z отдельно для четных и нечетных Z .

4. Сделайте вывод по форме графиков $N_{\text{из}}(Z)$.
5. По положению максимума на одном из графиков 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. Что такое изотопы?
9. Назовите наиболее известные модели ядра атома.
10. Опишите особенности капельной модели ядра.
11. Опишите движение нуклона в ядре согласно оболочечной модели.
12. Запишите формулу энергии одномерного квантового осциллятора.
13. Запишите формулу энергии трехмерного квантового осциллятора.
14. Сколько квантовых чисел определяют доступное квантовое состояние нуклона в ядре? Назовите их и укажите их обозначения и числовые значения.
15. Какие свойства будут существенно разными у химических элементов, имеющих ядра с четным и нечетным количеством протонов?
16. Что такое магические ядра?
17. Что такое дважды магические ядра?
18. Напишите формулу для определения магических чисел.
19. Много или мало изотопов в среднем, как вы предполагаете, будут иметь химические элементы в заданном для вашей бригады диапазоне изменения Z и почему?
20. Как примерно должен выглядеть график $N_{\text{из}}(Z)$ для четных и нечетных Z с учетом значений Z для вашей бригады, приведенных в табл.1?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высшая школа, 2001. (§254).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

3.7. ЭФФЕКТ КОМПТОНА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Изучение на компьютерной модели характеристик рентгеновского излучения и процесса его рассеяния в веществе.
- Исследование закономерностей эффекта Комптона.
- Определение комптоновской длины волны электрона.

ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Прочитайте по учебнику соответствующий материал [1 – §206]. Законспектируйте краткую теорию. Внимательно рассмотрите рис. 1 и зарисуйте основное в отчет по лабораторной работе. Подготовьте таблицы для заполнения в процессе измерений.

Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите «Модель 5.3. Комптоновское рассеяние».

Получите допуск у преподавателя.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

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

РЕНТГЕНОВСКИМ называется электромагнитное излучение, имеющее длины волн от 10^{-8} до 10^{-12} м. Рентгеновское излучение в некоторых экспериментах проявляет корпускулярные свойства и ведет себя как поток фотонов с энергией от 100 эВ до 10^6 эВ (границы приблизительны).

В компьютерной модели установки (рис.1), применяемой в данной лабораторной работе, в качестве источника излучения используется рентгеновская трубка. Это рентгеновское излучение проходит через диафрагму, формирующую тонкий пучок, и попадает на исследуемое рассеивающее вещество (РВ). Часть излучения проходит напрямую без взаимодействия, а часть рассеивается и попадает на регистрирующий прибор (РС – рентгеновский спектрометр).

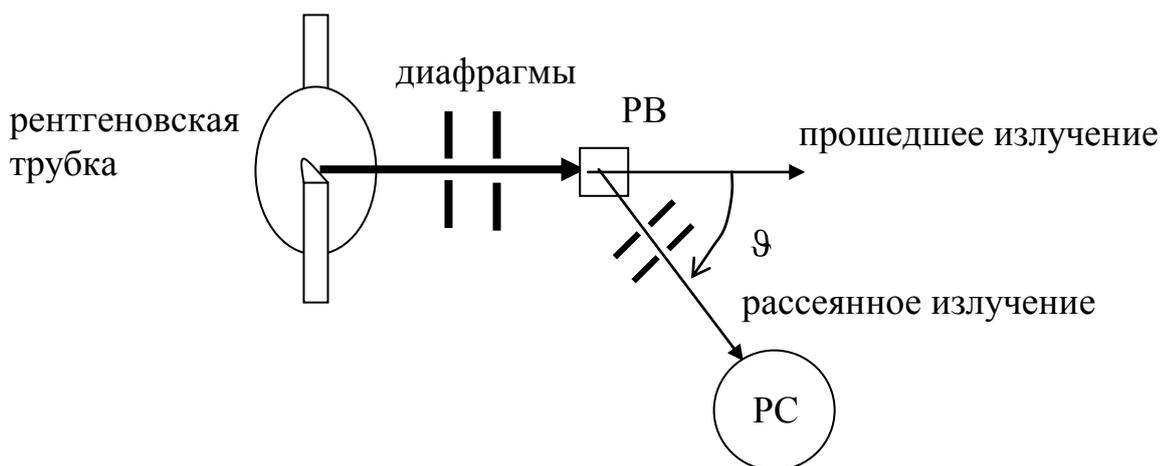


Рис.1. Схема установки для исследования комптоновского рассеяния

Пусть рентгеновское излучение, распространяющееся от рентгеновской трубки до вещества (рис.1), имеет длину волны λ .

Как показали эксперименты, часть излучения, идущего под углом ϑ от рассеивающего вещества (РВ) до регистрирующего устройства (рентгеновского спектрометра РС), имеет другую длину волны λ' . Теория электромагнитных волн этого объяснить не может.

Для анализа взаимодействия рентгеновского излучения с веществом используется представление излучения, как потока рентгеновских фотонов. Процесс столкновения рентгеновского фотона (энергия $\hbar\omega$, импульс $\vec{p} = \hbar\vec{k}$) со свободным электроном вещества (рис.1) рассматривается, как абсолютно упругое столкновение.

Энергия электрона до столкновения равна его энергии покоя mc^2 , где m – масса покоя электрона. Импульс электрона до столкновения равен нулю.

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 законов сохранения импульса и энергии вытекают два равенства:

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

$$\hbar\vec{k} = \vec{p} + \hbar\vec{k}'.$$

Из второго равенства следует

$$(\hbar k)^2 = p^2 + (\hbar k')^2 + 2\hbar p k' \cos \vartheta,$$

где угол ϑ называется углом рассеяния (рис.3).

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

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

где комptonовской длиной волны называется

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

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

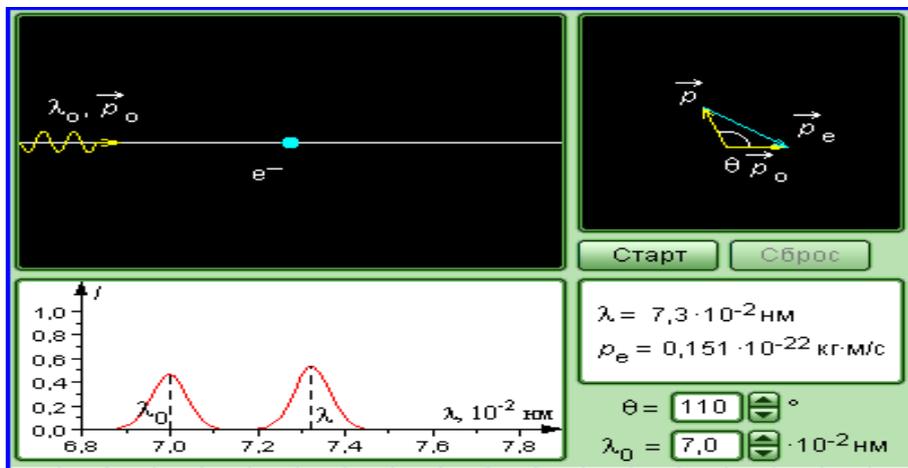


Рис.2. Модель комptonовского рассеяния (начальное состояние)

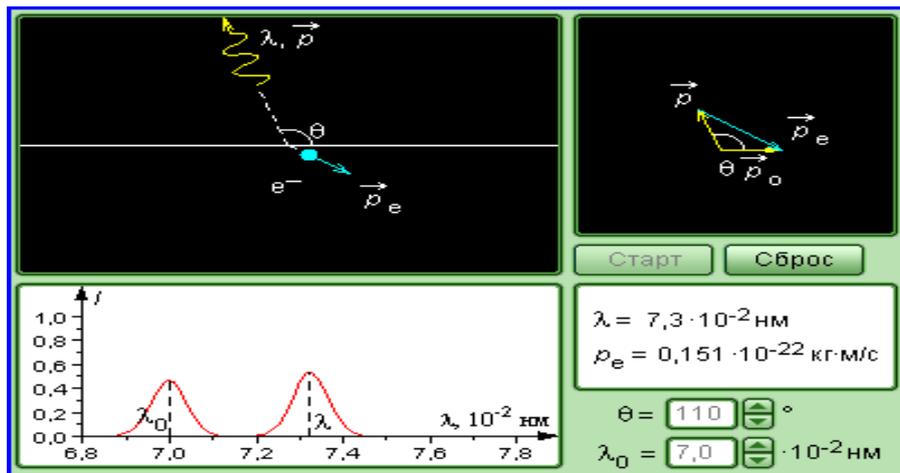


Рис.3. Модель комptonовского рассеяния (конечное состояние)

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Подведите маркер мыши к кнопке регулятора длины волны λ_0 падающего рентгеновского излучения и установите первое значение длины волны из табл. 1, соответствующее номеру вашей бригады.
2. Подведите маркер мыши к кнопке регулятора угла θ , под которым распространяется рассеянное рентгеновское излучение, и установите первое значение 60° .
3. Определите длину волны λ' рассеянного рентгеновского излучения и запишите в первую строку таблицы 2.
4. Изменяйте угол наблюдения с шагом 10° и записывайте измеренные значения λ' 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.
6. Повторите измерения длины волны рассеянного рентгеновского излучения, заполняя сначала табл. 3, а затем и табл. 4 (аналогичные табл. 2).

Таблица 1

Начальные значения (не перерисовывать)

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 $\lambda = __ \text{ пм}$

Номер измер.	1	2	...	11
ϑ , град	60	70		160
λ' , 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 коэффициенту наклона 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 эффекты, для исследования которых надо использовать модель рентгеновского излучения, как потока фотонов.
2. Каковы характеристики рентгеновского излучения до падения на вещество?
3. Каковы характеристики рассеянного рентгеновского излучения?
4. Как описывается рентгеновское излучение при его взаимодействии со свободными электронами вещества?
5. Какова модель процесса взаимодействия рентгеновского фотона со свободным электроном вещества?
6. Какие законы сохранения выполняются при взаимодействии фотона со свободным электроном в эффекте Комптона?
7. Чем отличается взаимодействие фотонов с электронами в эффекте Комптона и фотоэффекте?
8. Что такое комптоновская длина волны частицы?
9. Почему эффект Комптона не наблюдается при рассеянии фотонов на электронах, сильно связанных с ядром атома?
10. Как меняется энергия фотона при его комптоновском рассеянии?
11. Какова масса фотона?
12. С какой скоростью движется фотон?
13. Напишите уравнение для импульса фотона.
14. Напишите формулу для эффекта Комптона.
15. Напишите формулу для комптоновской длины волны электрона.
16. 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).