



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

## **Виртуальный практикум**

Лабораторная работа №5-В

«Ядерная модель атома Резерфорда»

по дисциплине

**«Физика»**

Авторы

Жданова Т. П.,

Кудря А. П.,

Лемешко Г. Ф.,

Пруцакова Н. В.

Ростов-на-Дону, 2021

## Аннотация

Настоящая лабораторная позволяет познакомиться с первыми работами, приведшими к ядерной модели атома и теоретическим обоснованием Бором строения атома водорода, а также с демонстрацией на ЭВМ упрощенной модели процессов поглощения и излучения энергии атомом водорода.

Методические указания предназначены для самостоятельной работы студентов всех форм обучения, изучающих физику, при подготовке и проведении учебного виртуального эксперимента, особенно при дистанционном обучении.

## Авторы

к.ф.-м.н., доцент	кафедры	«Физика»
Жданова Т.П.,		
ст. преподаватель	кафедры	«Физика»
Кудря А.П.,		
к.ф.-м.н., профессор	кафедры	«Физика»
Лемешко Г.Ф.,		
к.ф.-м.н., доцент	кафедры	«Физика»
Пруцакова Н.В.		

## Оглавление

<b>Краткая теория .....</b>	<b>4</b>
<b>Подготовка к работе .....</b>	<b>8</b>
<b>Выполнение работы .....</b>	<b>9</b>
Задание 1. Демонстрация модели поглощения и излучения энергии атомом водорода. ....	9
Задание 2. Определение спектральной серии по характеристикам излученного цуга электромагнитной волны. ..	9
<b>Контрольные вопросы .....</b>	<b>11</b>
<b>Рекомендуемая литература .....</b>	<b>11</b>

Цель работы. Познакомиться: 1) с первыми работами, приведшими к ядерной модели атома и теоретическим обоснованием Бором строения атома водорода; 2) с демонстрацией на ЭВМ упрощенной модели процессов поглощения и излучения энергии атомом водорода.

## КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Исторически первой моделью атома была модель, предложенная в 1903 году английским физиком Д.Д.Томсоном. Он предположил, что атом представляет собой шар, равномерно заряженный по объему положительным зарядом. В этой «электрической жидкости» находятся электроны, суммарный заряд которых компенсируется положительным зарядом шара, поэтому атом электрически нейтрален. Электроны совершают гармонические колебания и в соответствии с теорией Максвелла излучают электромагнитные волны. Частота электромагнитных волн равна частоте колебаний электронов. Так Томсон объяснял природу линейчатых спектров атомов.

В 1911 году британский физик Э.Резерфорд, исследуя рассеяние  $\alpha$  - частиц тонкими металлическими фольгами пришел к выводу, что предложенная Томсоном модель атома неверна. Анализ полученных результатов привел Резерфорда к созданию ядерной модели атома. Согласно этой модели атом занимает область с линейными размерами  $d_{\text{атома}} \approx 10^{-10}$  м. В его центре находится ядро, диаметром  $d_{\text{ядра}} \approx 10^{-15}$  м, в котором сосредоточена почти вся масса атома. Ядро имеет положительный заряд  $Ze$ , где  $Z$  - порядковый номер в таблице Менделеева;  $e$  - заряд электрона. Вокруг ядра под действием кулоновских сил вращаются  $Z$  легких электронов. Атом электрически нейтрален.

Попытка объяснить с помощью классической теории простейшего атома водорода, состоящего из ядра с зарядом  $+e$  и электрона, привела к серьезным противоречиям.

Так как электрон в атоме движется с ускорением, то, согласно классической теории, атом должен непрерывно излучать энергию. Это означает, что электрон не может удержаться на круговой орбите – он должен по спирали приближаться к ядру и частота его обращения вокруг ядра, а, следовательно, и частота излучаемых им электромагнитных волн, должна непрерывно увеличиваться. Иными словами, электромагнитное излучение должно иметь непрерывный спектр, а сам атом является неустойчивой системой.

В действительности эксперименты показывают, что: а) атом является устойчивой системой; б) атом излучает при определенных условиях; в) излучение атома имеет линейчатый спектр.

## ФИЗИКА

Для разрешения противоречий датский ученый Н.Бор в 1913 году предложил теорию атома, основанную на следующих постулатах.

Первый постулат (постулат стационарных состояний). Существуют стационарные состояния атома, находясь в которых он не излучает энергию. Этим стационарным состояниям соответствуют вполне определенные стационарные орбиты, по которым движется электрон под действием кулоновской силы.

Второй постулат (правило квантования орбит). Из всех возможных орбит являются разрешенными те, для которых момент импульса электрона пропорционален главному квантовому числу  $n$  :

$$m_e v_n r_n = \hbar n, \quad (1)$$

где:  $m_e$  – масса электрона;  $\hbar = h / 2\pi$  – постоянная Планка;  $v_n$  и  $r_n$  – скорость и радиус  $n$ -й орбиты электрона ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

Третий постулат (правило частот) При переходе из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается один фотон. Энергия фотона равна разности энергий атома в двух его состояниях:

$$h\nu = E_m - E_n. \quad (2)$$

Если  $E_m > E_n$ , то происходит излучение фотона, если  $E_m < E_n$  – поглощение фотона.

Из первого постулата следует, что электрон движется по орбите с нормальным ускорением  $a_n$  под действием кулоновской силы, т.е.

$F_k = m_e a_n$ . Учитывая, что модуль вектора силы равен

$F_k = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ , а модуль вектора ускорения  $a_n = \frac{v^2}{r}$ , запишем второй закон Ньютона в окончательном виде:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r}. \quad (3)$$

Совместное решение уравнений (3) и (1) позволяет определить радиус стационарной орбиты:

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2. \quad (4)$$

Подставляя значения  $n = 1$ ,  $n = 2$  и т.д., можно вычислить радиусы первой, второй и всех последующих стационарных орбит.

Подставляя (4) в (1), можно получить линейную скорость электрона на  $n$ -й орбите:

## ФИЗИКА

$$v_n = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 h n}. \quad (5)$$

Энергия электрона на  $n$ -й орбите равна сумме потенциальной и кинетической энергий:

$$E_n = E_{p(n)} + E_{k(n)} = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n} + \frac{m_e v^2}{2}. \quad (6)$$

Потенциальная энергия электронов в атоме отрицательна, так как нулевой уровень отсчета берется на бесконечности, а по мере приближения к ядру его потенциальная энергия уменьшается. Подставив в (6) уравнения (4) и (5), можно получить:

$$E_n = -\frac{e^4 m_e}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}. \quad (7)$$

Анализ уравнений (4), (5) и (7) позволяет сделать вывод, что радиус орбиты, скорость электрона на орбите и его энергия могут принимать дискретный набор значений, то есть эти величины

квантованы. Так для основного состояния  $n=1$ :  $r_1 = 53 \text{ \AA}$ ;  $v_1 = 2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ;  $E_1 = -13,6 \text{ эВ}$ . Радиус первой орбиты  $r_1$  называют *боровским*, а радиусы остальных орбит кратны  $r_1$ , т.е.  $r_n = r_1 n^2$ .

В соответствии с 3-м постулатом Бора при переходе электрона с  $m$ -й орбиты на  $n$ -ю излучается фотон, энергия которого равна:

$$h\nu = E_m - E_n = \frac{e^4 m_e}{8\varepsilon_0 h^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

Учитывая связь частоты с длиной волны ( $\nu = c/\lambda$ ), где  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  - скорость света в вакууме и разделив последнее уравнение на  $hc$ , получим так называемую сериальную формулу:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{e^4 m_e}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right). \quad (8)$$

Формула (8) совпала с эмпирической формулой, которую получил еще в 1885 году швейцарский ученый И. Бальмер при изучении спектра атома водорода

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (9)$$

где  $R$  – постоянная Ридберга ( $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ ).

Набор констант, стоящих в уравнении (8) перед скобками, совпадает по величине с постоянной Ридберга.

Сопоставление уравнений (8) и (9) приводит к выводу, что

$$R = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^3 c}.$$

Бальмер изучал видимый участок спектра, для которого  $n = 2, m = 3, 4, 5, \dots$ . Набор спектральных линий *в видимой* части спектра называют серией Бальмера.

Тщательные исследования спектра атома водорода впоследствии позволили обнаружить еще несколько серий:

*в ультрафиолетовой* области спектра серия

Лаймана ( $n = 1, m = 2, 3, 4, \dots$ );

*в инфракрасной* области серии:

Пашена ( $n = 3, m = 4, 5, 6, \dots$ );

Брекетта ( $n = 4, m = 5, 6, 7, \dots$ );

Пфунда ( $n = 5, m = 6, 7, 8, \dots$ );

Хемфри ( $n = 6, m = 7, 8, 9, \dots$ ).

Во всех выражениях квантовое число  $n$  соответствует орбите электрона, на который происходит переход, а квантовое число  $m$  соответствует орбите, с которого происходит переход.

Каждая серия имеет свои границы, определяемые максимальными и минимальными значениями квантовых чисел  $n$  и  $m$ .

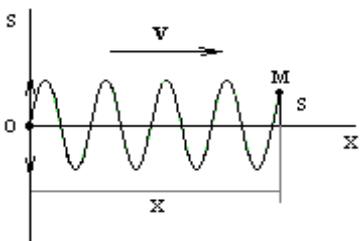


Рис. 1

Процесс излучения энергии атомом сопровождается выбросом в пространство цуга плоско поляризованной монохроматической электромагнитной волны (рис.1).

Длина цуга примерно равна трем метрам, а длина волны в вакууме связана с периодом электромагнитных колебаний соотношением:

$$\lambda = cT. \quad (10)$$

Теория Бора сыграла

огромную роль в создании атомной физики, она впервые в истории науки позволила удовлетворительно объяснить строение атома. В последующие годы ее неоднократно дополняли и уточняли, что привело к созданию современной квантово-механической модели атома.

*О программе*

Программа обеспечивает анимацию процессов поглощения и излучения фотонов в соответствии с теорией Бора.

Разработана студентами факультета «Автоматизация и информатика» Филатовым Д.Н. и Ивановым П.П.

## ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Открыть папку «Bor» и файл «Proect.exe».
2. В появившемся активном окне «Постулаты Бора» (рис.2) познакомиться с функциональными клавишами, расположенными на панели управления (назначение клавиш инициируется при установке на них указателя мыши).
3. Открыть последовательно окна «Краткая теория» и «Справка».  
Познакомиться с краткой теорией и с функциональными возможностями программы.
4. Перейти в режим демонстрации, нажатием клавиши «Начать сначала».
5. Вызвать панель «Настройка» и подобрать оптимальную скорость анимации иллюстрируемых процессов.

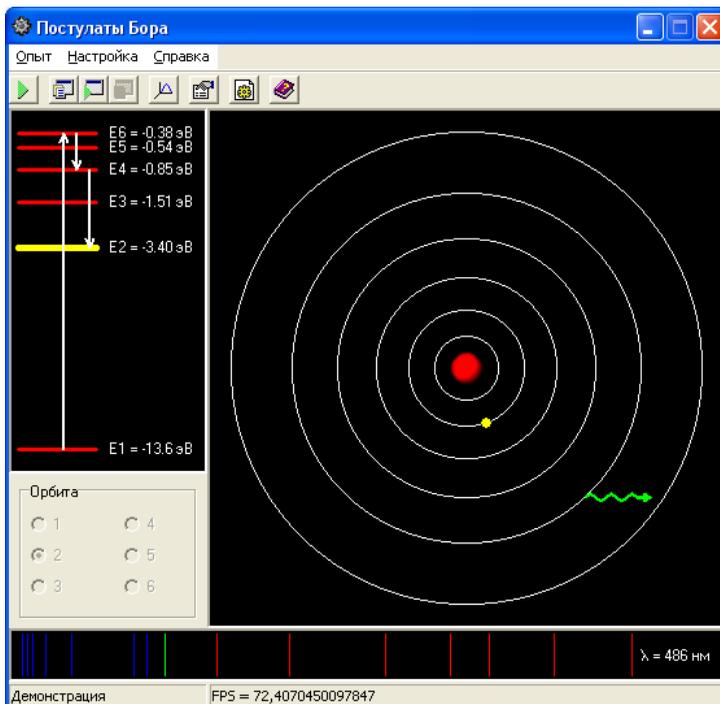


Рис.2

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### Задание 1. Демонстрация модели поглощения и излучения энергии атомом водорода.

1. Указывать по возрастающей номера орбит и наблюдать за процессом поглощения энергии атомом водорода.
2. Повторить пункт 1 в обратном порядке и наблюдать за процессом излучения энергии.
3. Вызвать панель «Ввод программы» нажатием клавиши «Выполнять по программе», и в произвольном порядке указать несколько номеров орбит, на которые будет переходить электрон.
4. Закрыть панель «Ввод программы» и нажать клавишу «Выполнять по программе».

Наблюдать за процессами поглощения и излучения фотонов атомом. Обратит внимание на иллюстрацию энергетических переходов электрона (в левой части главной панели), а также на спектральные линии, соответствующие этим переходам (в нижней части главной панели). Сделать вывод.

### Задание 2. Определение спектральной серии по характеристикам излученного цуга электромагнитной волны.

1. Нажатием клавиши «Излучение фотона»  на главной панели вызвать окно «Излучение фотона» (Рис.3).

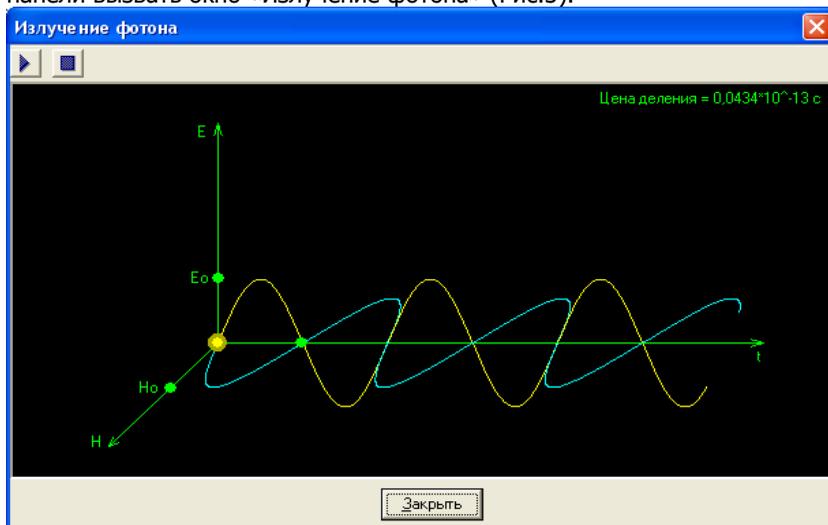


Рис. 3

## ФИЗИКА

3. После нажатия на клавишу «Старт»  в данном окне иллюстрируется процесс поглощения фотона атомом, возбуждение атома и излучение им цуга электромагнитной волны.

4. Зная цену деления (она равна половине периода), вычислить по формуле (10) длину волны излученного фотона  $\lambda$ . Занести в таблицу.

5. По серийной формуле (9) вычислить границы серий атома водорода, учитывая, что для серии Лаймана  $\lambda_{min}$  соответствует  $n = 1, m \rightarrow \infty$ ,  $\lambda_{max}$  соответствует  $n = 1, m = 2$ . Для серии Бальмера  $\lambda_{min}$  соответствует  $n = 2, m \rightarrow \infty$ ,  $\lambda_{max}$  соответствует  $n = 2, m = 3$ . Для серии Пашена  $\lambda_{min}$  соответствует  $n = 3, m \rightarrow \infty$ ,  $\lambda_{max}$  соответствует  $n = 3, m = 4$  и т.д.

**Это продолжать до тех пор, пока не получится интервал, в котором находится искомая длина волны  $\lambda$ .**

$\lambda =$	$n =$	$m =$			
	Серия Лаймана	Серия Бальмера	Серия Пашена	Серия Брекетта	Серия Пфунда
$\lambda_{min}$					
$\lambda_{max}$					

Результаты вычислений представить для каждой серии в виде:

$$\lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max}.$$

6. Установить серию, к которой относится излученный фотон и, таким образом, определить квантовое число  $n$ . Занести в таблицу.

7. По серийной формуле (9) определить главное квантовое число  $m$ . Занести в таблицу.

8. Вычислить для  $m$ -й и  $n$ -й орбит: радиусы орбит по формуле (4), скорость электрона по формуле (5), потенциальную, кинетическую и полную энергии электрона по формулам (6) и (7), энергию излученного фотона по формуле  $E = h\nu = hc/\lambda$ , где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - постоянная Планка,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с - скорость света в вакууме,  $\lambda$  - длина волны.

9. По проделанной работе сделать вывод.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоят принципиальные различия моделей атома Д.Томсона и Э.Резерфорда?
2. Какие причины побудили Н.Бора к разработке постулатов? Сформулируйте их.
3. Запишите обобщенную сериальную формулу И.Бальмера. Какой смысл имеют квантовые числа  $m$  и  $n$ ?
4. Как определить границы всех серий атома водорода?
5. Как в атоме водорода определить радиусы орбит электрона, его скорость и энергию; энергию излученного фотона?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. 2012 М.: Наука.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Высшая школа. 2015.