

## **Раздел 5. Основы квантовой физики**

### **Тема 31: Физика и свойства атомов и молекул**

#### **Лекция 1: Теория Бора для атома водорода**

**Цель лекции** – познакомиться физическими свойствами и строением атома, выяснить природу линейчатых спектров излучения.

## **Вопросы лекции:**

- 1. Линейчатый спектр атома водорода**
- 2. Ядерная модель атома Резерфорда. Постулаты Бора**
- 3. Теория Бора для водородоподобных систем**

## **Литература:**

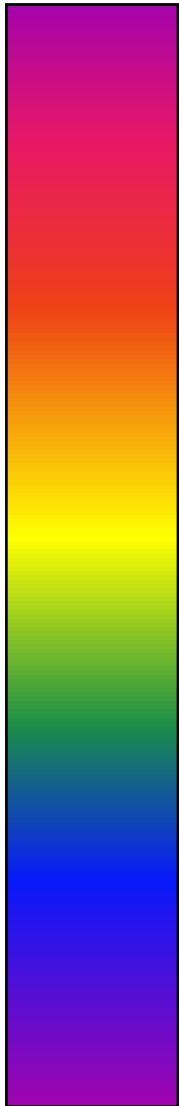
**БЭУ п. 31.1 – 31.4; Доп. [1, стр. 390-398]; [2, стр. 335-344].**

Техническое обеспечение:

Комплект мультимедийных средств обучения.  
База данных анимаций физических процессов.

# Введение

Н



Газ при нагревании начинает излучать.

Но излучение происходит только на определенных частотах, своих для каждого газа!

Атомы каждого химического элемента имеют строго определенный индивидуальный линейчатый спектр.

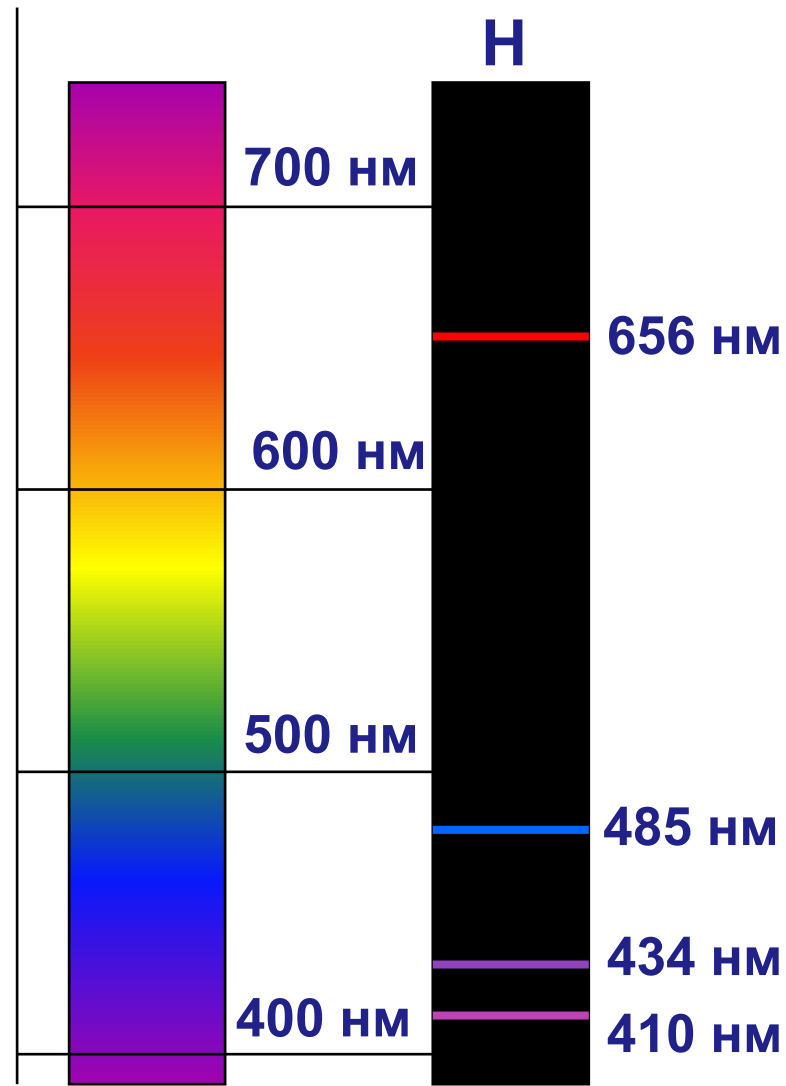
*Почему частоты излучения атомами имеют дискретные значения?*

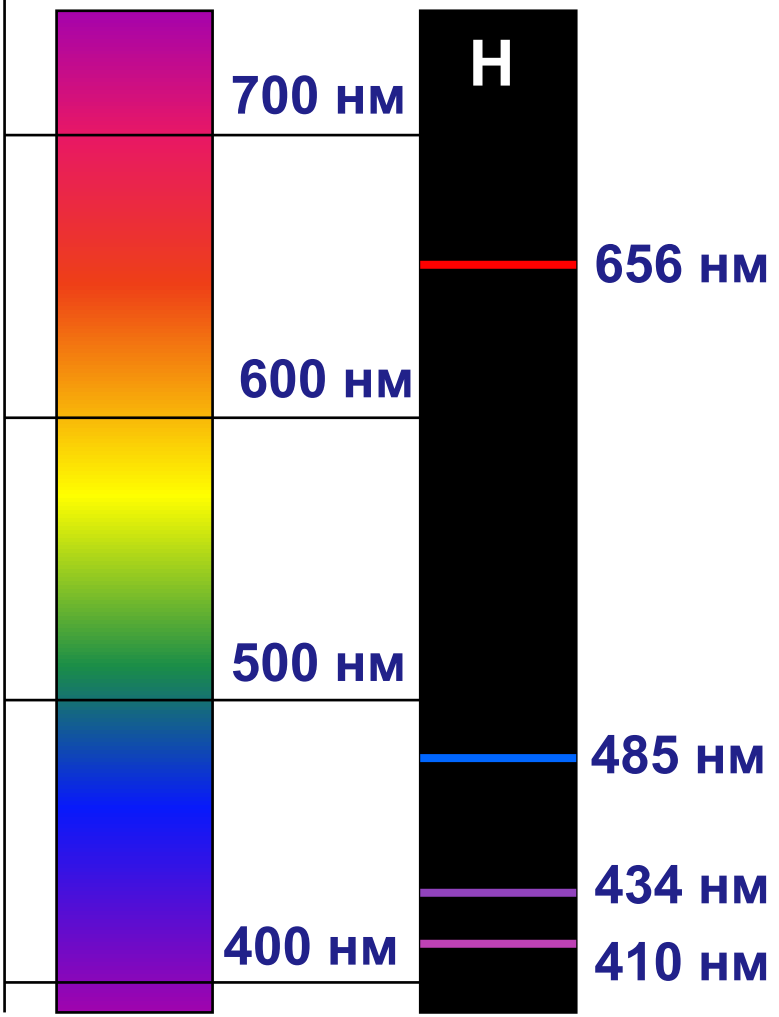
## **Вопрос №1**

**Линейчатый спектр атомов водорода**

Имеем разреженный газ, состоящий из атомов Н.  
Нагреваем газ – начинается излучение.

## Спектр излучения (испускания) водорода





## Спектр излучения (испускания) водорода

### *Выводы:*

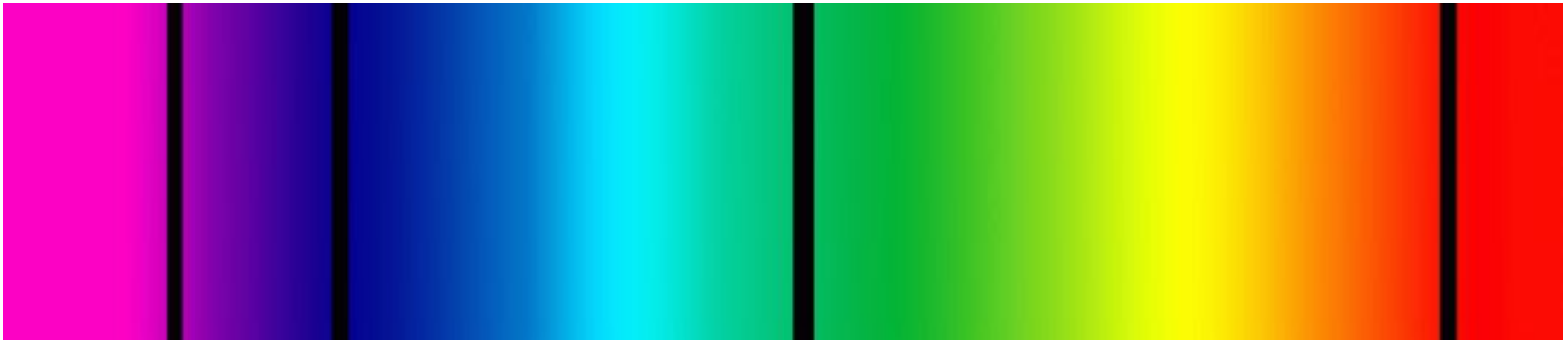
1. Атомы имеют дискретный спектр излучения.
2. По набору линий спектра испускания можно определить химический элемент (спектральный анализ).

# Спектр поглощения водорода

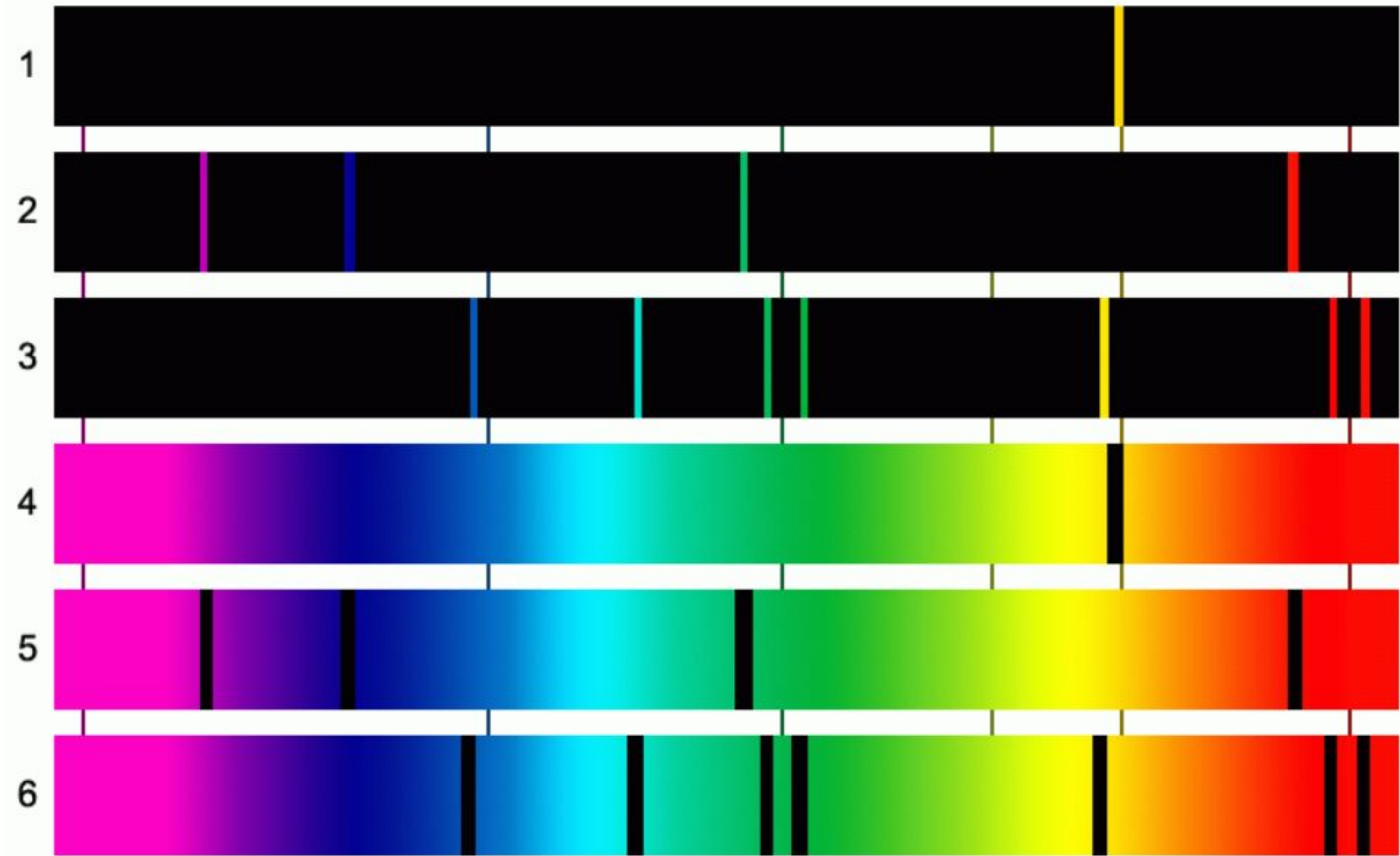
Имеем разреженный атомарный газ в холодном состоянии. Свечения нет.

Пропустим сквозь газ свет с непрерывным спектром.

На выходе в непрерывном спектре увидим узкие черные полосы.



Для перевода атомов газа в возбужденное состояние годятся строго определенные длины волн для данного газа. Эти длины волн газ и «забирает себе» из проходящего света.



Спектры испускания: 1 - натрия; 2 - водорода; 3 - гелия.  
Спектры поглощения: 4 - натрия; 5 - водорода; 6 - гелия.



Темные линии в спектре поглощения газа соответствуют ярким линиям его спектра испускания.

**Вывод:** при прямом и обратном переходах между дискретными энергетическими состояниями атомы излучают и поглощают ЭМВ одинаковой частоты.

Закономерности в спектре излучения атома водорода

**Формула И. Бальмера (1885 г.)**

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4} \text{ нм}, \lambda_0 = 364,613 \quad (1)$$

где  $n = 3, 4, \dots, 11$ .

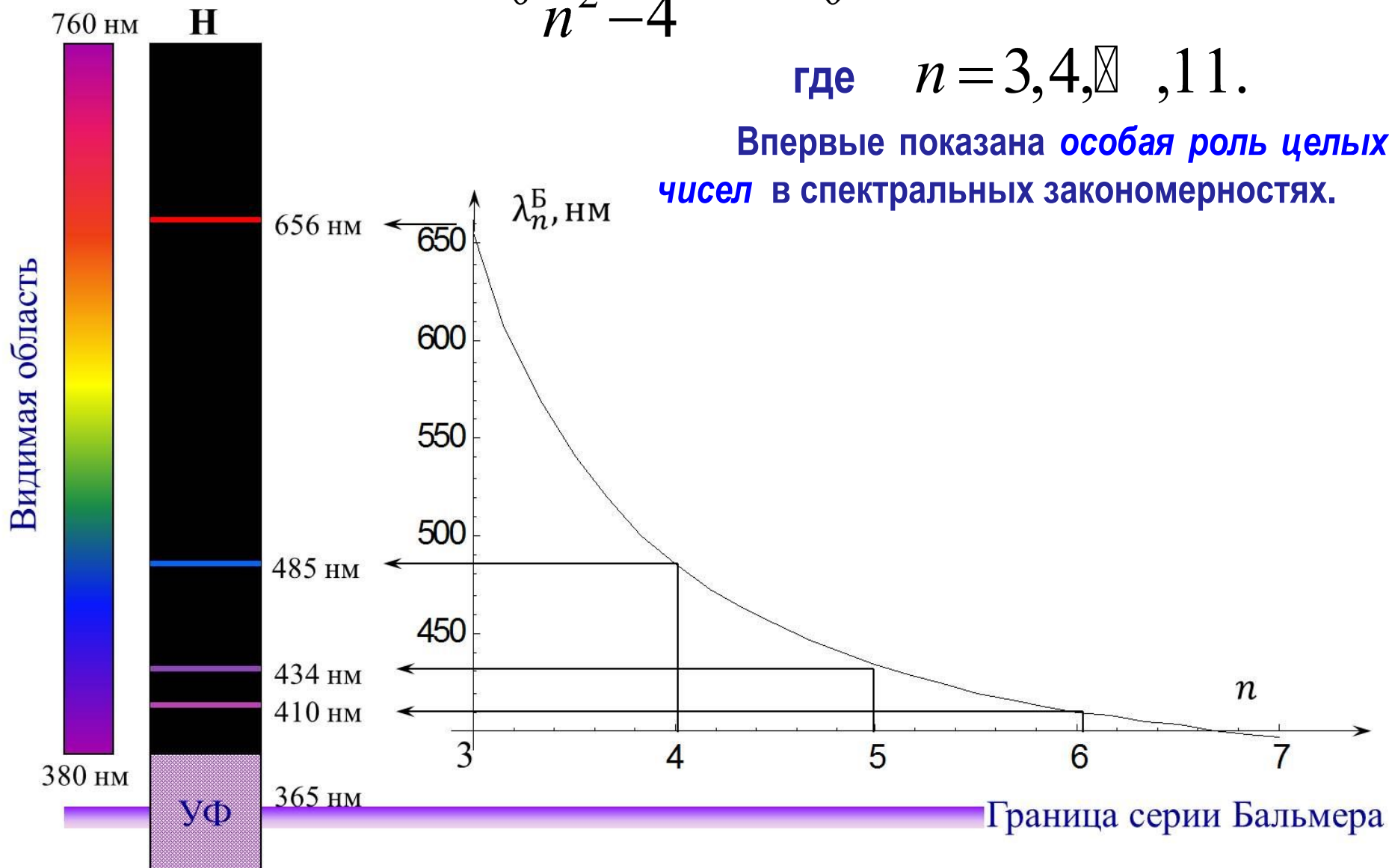
Впервые показана особая роль целых чисел в спектральных закономерностях.

# Формула Бальмера (1885 г.)

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4} \text{ нм}, \lambda_0 = 364,613 \quad (1)$$

где  $n = 3, 4, 5, \dots, 11$ .

Впервые показана особая роль целых чисел в спектральных закономерностях.



# Формула Ридберга

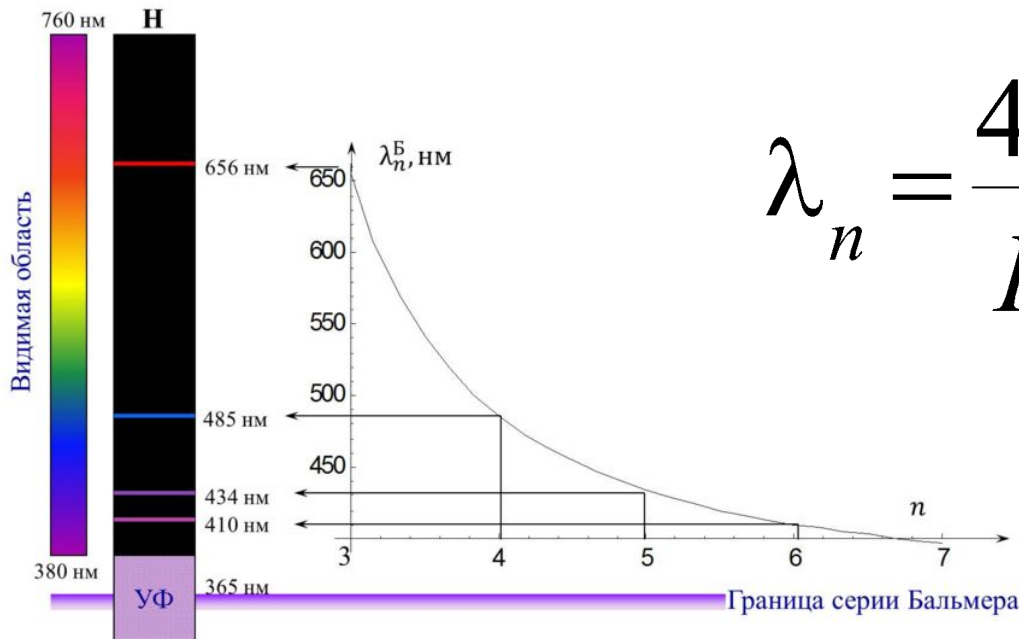
$$\nu_n^B = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, \dots \quad (2)$$

где  $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  – постоянная Ридберга.

Формула Ридберга для длины волны:

$$\lambda_n = \frac{4c}{R} \cdot \frac{n^2 - 4}{n^2}, \quad (3)$$

$$n = 3, 4, \dots$$



## Обобщенная формула Бальмера – Ридберга (для всех линий)

$$\nu_n = R \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = k + 1, k + 2, \dots \quad (4)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$  – целое число.

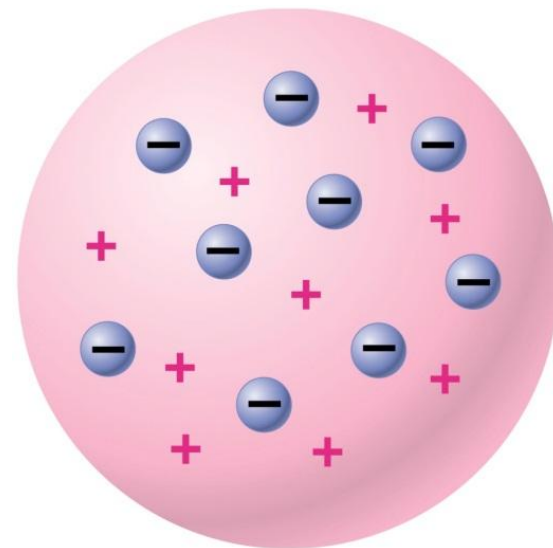
### **Выводы:**

1. Спектр излучения газа – «паспорт» химического элемента (спектральный анализ – метод исследования вещества по его спектру).
2. Наличие спектра свидетельствует о том, что атом – не есть неделимая частица, он имеет собственную структуру.
3. Уникальность атомных спектров свидетельствует о том, что атомы разных элементов устроены по-разному.

## **Вопрос №2**

# **Ядерная модель атома Резерфорда**

# Модель Томсона (1898 г.)



Атом – шар диаметром  $10^{-10}$  м.

Положительный заряд равномерно распределен по шару.

Внутри шара находятся электроны («булочка с изюмом»).

Атом электрически нейтрален.

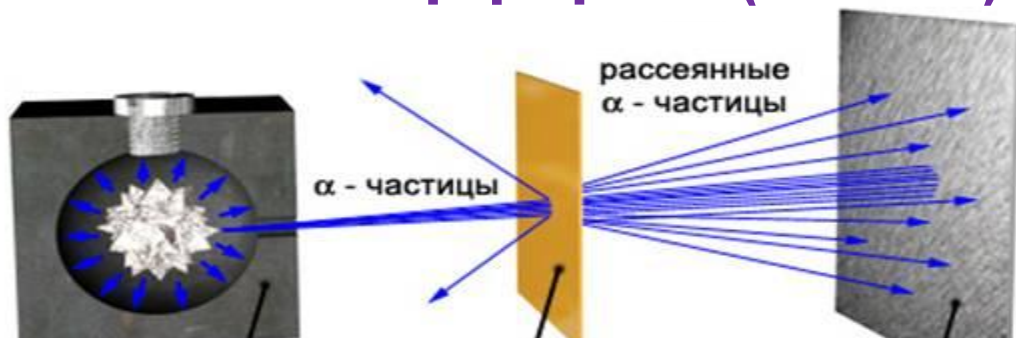
Излучение вызвано колебаниями электронов около положения равновесия.

*Но почему тогда спектр линейчатый?*

# Опыт Резерфорда (1912 г.)

**Почему ???**

**Что-то есть внутри атома такое, что стоит на пути частиц.**

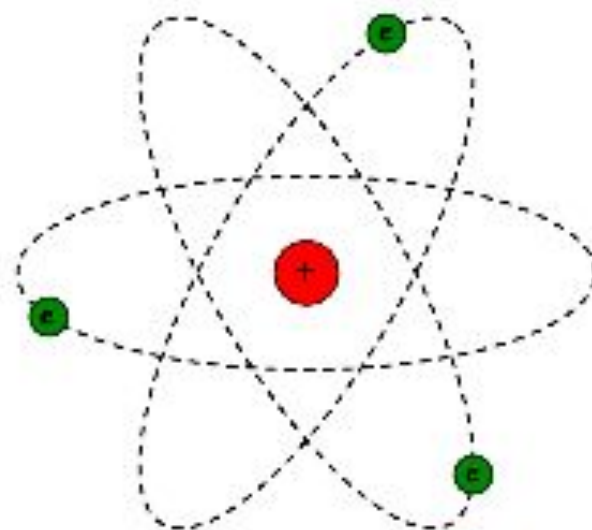
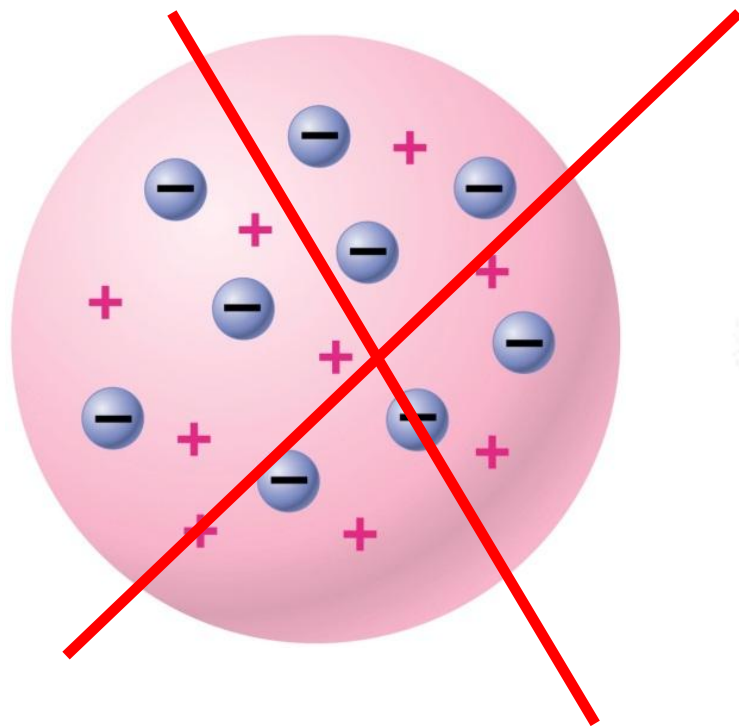


$d = 0,5 \text{ м}$

Радиоа  
источни

α - ча

0



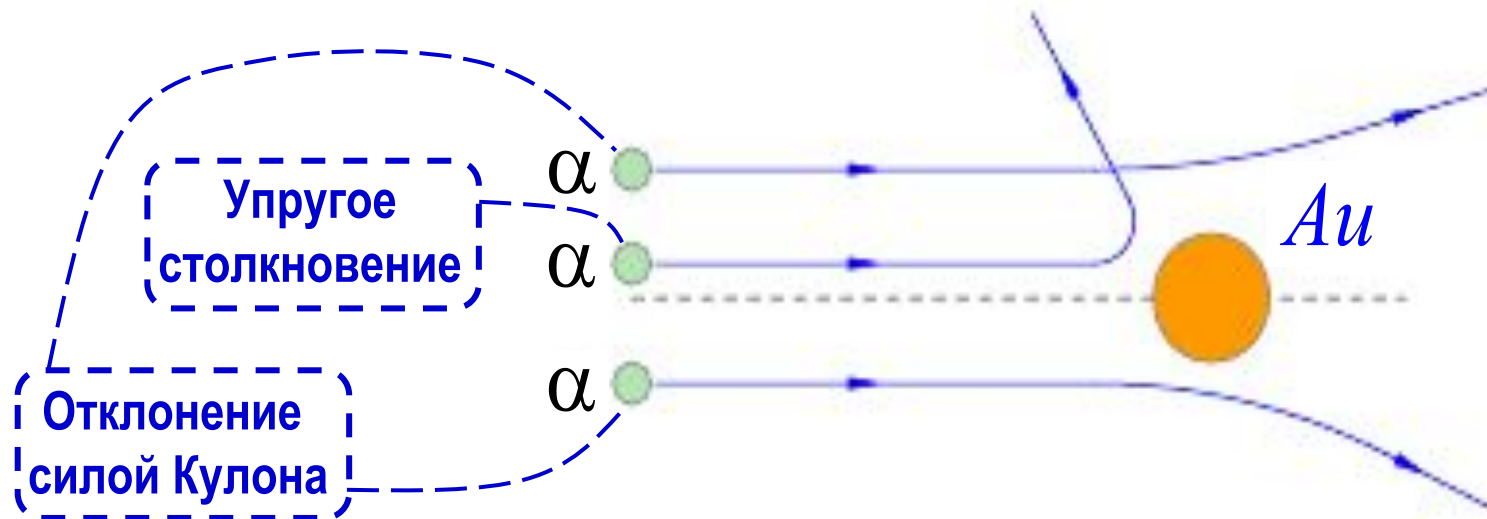
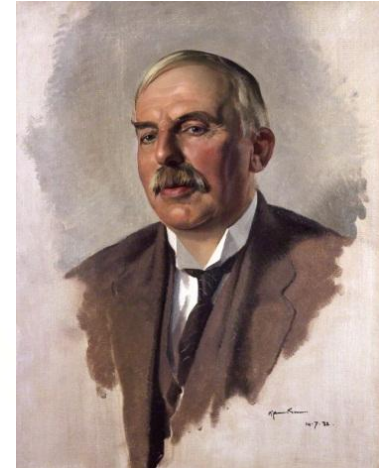
есцирующего  
вию золотой  
α - частиц  
и в поток

вызывается  
ы об экран

**Результат – небольшая часть α – частиц (одна из нескольких тысяч) отклонялась на угол больший чем 90 градусов.**

# Опыт Резерфорда (1912 г.)

Суть эксперимента – бомбардировка атома  $\alpha$ -частицами.



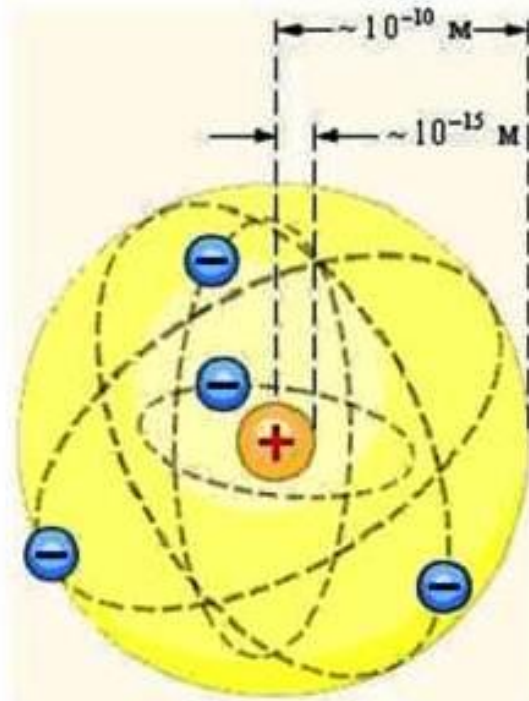
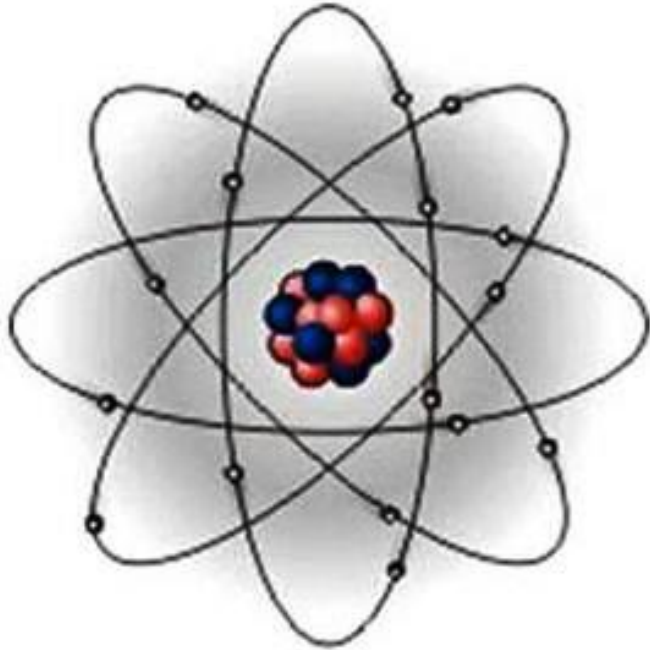
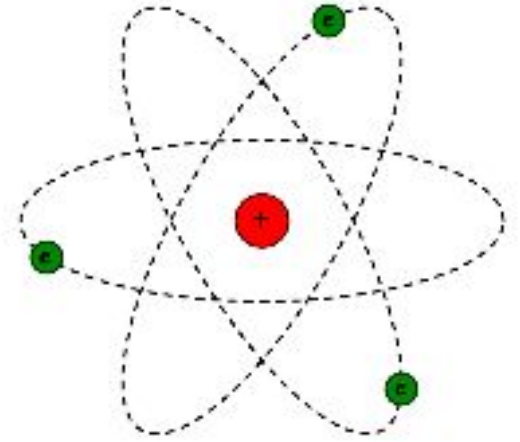
$\alpha$ -частица имеет положительный заряд, равный  $2e$  и массу, в 8000 раз большую, чем масса электрона ( $\alpha_2^4$  – 2 протона + 2 нейтрона).

Результат опыта – помимо рассеяния небольшая часть  $\alpha$ -частиц отклонялась на угол свыше 90 градусов.

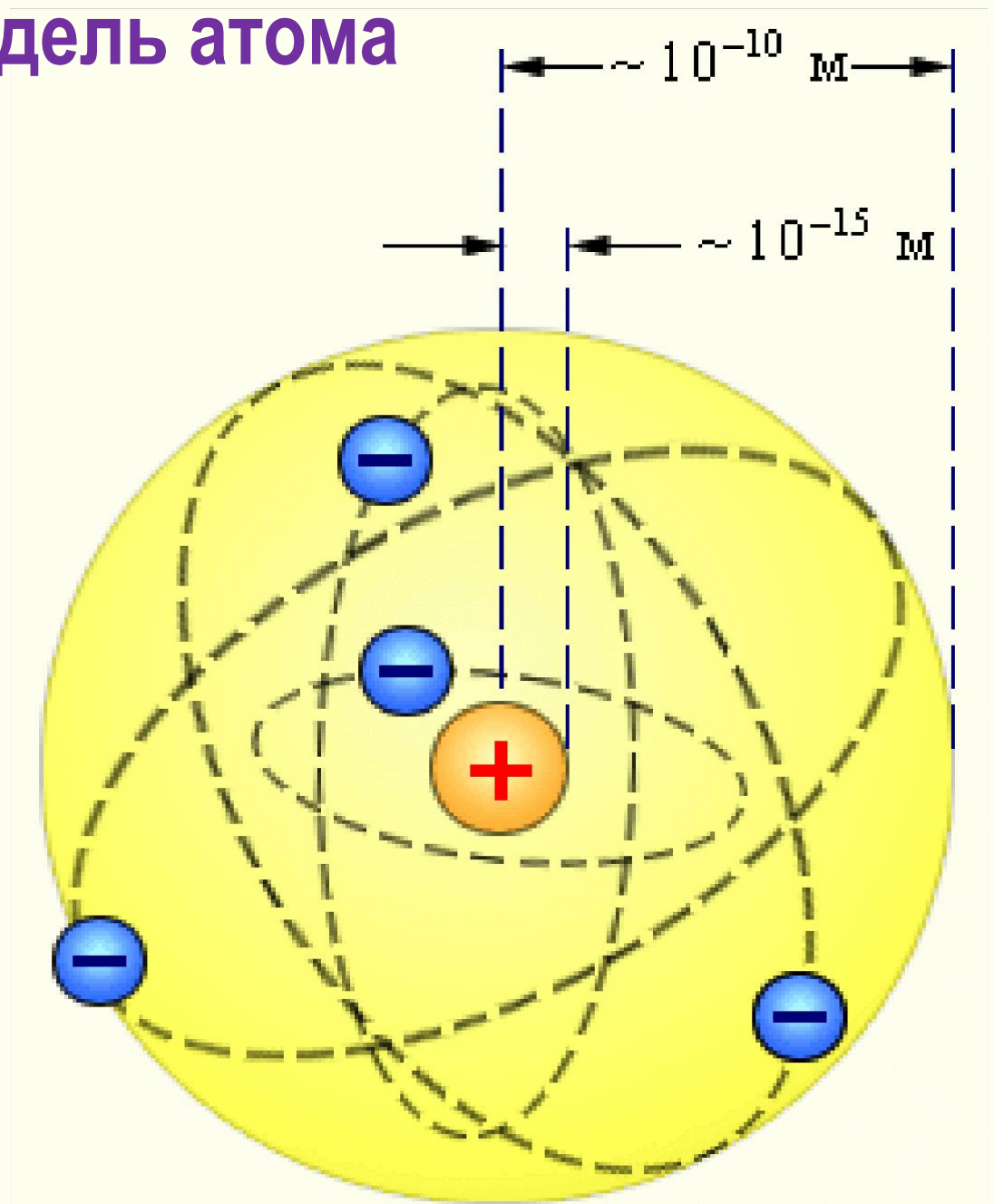
**Причина** - что-то есть такое внутри атома, что стоит на пути  $\alpha$ -частиц.



# Планетарная модель атома

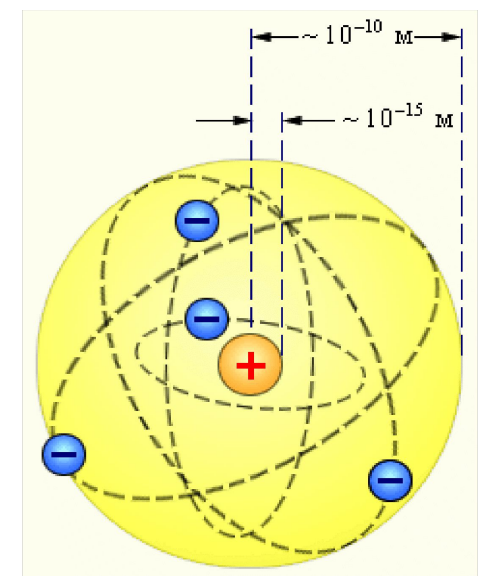


# Планетарная модель атома



# Планетарная модель атома

Между ядром и электронами действуют силы кулоновского притяжения.



Практически вся масса атома сосредоточена в небольшом в ядре !!!

*Если бы атом имел размер 500 м, то размер ядра был бы 5 мм.*

Рассеяние  $\alpha$ -частиц – есть результат их отклонения от ядра силой Кулона.

Отражение  $\alpha$ -частиц – результат их упругого столкновения с ядром.

**Основной недостаток планетарной модели атома – невозможность объяснить линейчатый спектр и устойчивость атома.**

На электрон, вращающийся вокруг ядра атома водорода, действует нормальное (центростремительное) ускорение  $a_B = \vartheta^2 / r$  .

**Сила Кулона**  $k \frac{e^2}{r_B^2} = m \frac{\vartheta^2}{r_B}, \Rightarrow \vartheta^2 = k \frac{e^2}{mr_B}$ .

**Всякий ускоренно движущийся заряд излучает ЭМВ, т.е. теряет энергию. Полная энергия электрона**

$$W = W_K + W_{II} = \frac{m\vartheta^2}{2} - k \frac{e^2}{r_B} = k \frac{e^2}{2r_B} - k \frac{e^2}{r_B} = -k \frac{e^2}{2r_B}.$$

**Сила Кулона**  $k \frac{e^2}{r_B^2} = m \frac{\vartheta^2}{r_B}, \Rightarrow \vartheta^2 = k \frac{e^2}{mr_B}$ .

**Всякий ускоренно движущийся заряд излучает ЭМВ, т.е. теряет энергию. Полная энергия электрона**

$$W = W_K + W_{II} = \frac{m\vartheta^2}{2} - k \frac{e^2}{r_B} = k \frac{e^2}{2r_B} - k \frac{e^2}{r_B} = -k \frac{e^2}{2r_B}.$$

**Если  $W \downarrow$ , то  $|W| \uparrow$ ,  $\Rightarrow r_B \downarrow$ .**

**В итоге электрон должен упасть на атом (через  $t = 10^{-10}$  с).**

**Атом прекратит свое существование.**

**Вывод:** внутри атомов действуют другие законы – законы квантовой физики.



# Постулаты Бора

## *Первый постулат*

(постулат стационарных состояний)

**Существуют стационарные состояния атома, находясь в которых он не излучает энергию.**

**Каждое из этих состояний характеризуется определенным уровнем энергии:**

$$W_n, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

**Первый постулат** (постулат стационарных состояний)

Существуют стационарные состояния атома, находясь в которых он не излучает энергию.

Каждое из этих состояний характеризуется определенным уровнем энергии:  $W_n$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  .

**Второй постулат**

(правило квантования Бора)

В стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь квантованные значения момента импульса, кратные постоянной Планка:

$$m_e \vartheta_n r_n = n \hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

**Второй постулат** (правило квантования Бора)

В стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь квантованные значения момента импульса, кратные постоянной Планка:

$$m_e \vartheta_n r_n = n \hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

**Третий постулат**  
(правило частот)

При переходе электрона из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается один фотон:

$$m_e \vartheta_n r_n = n \hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

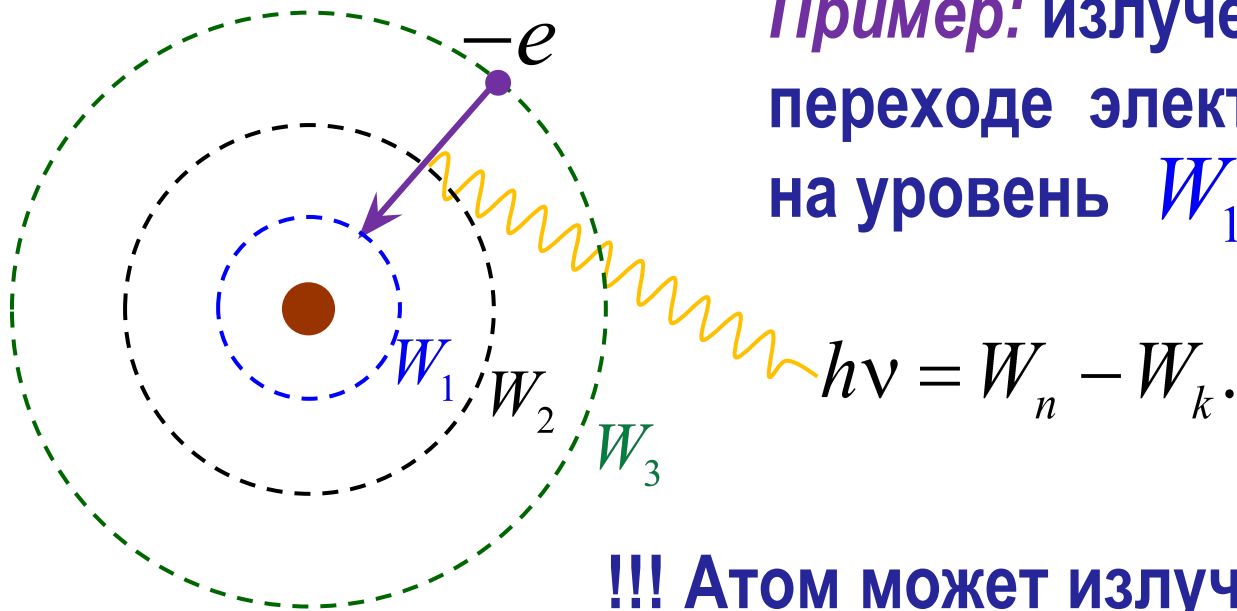


## Третий постулат (правило частот)

При переходе электрона из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается один фотон:

$$h\nu = W_n - W_k. \quad (6)$$

Пример: излучение фотона при переходе электрона с уровня  $W_3$  на уровень  $W_1$ .

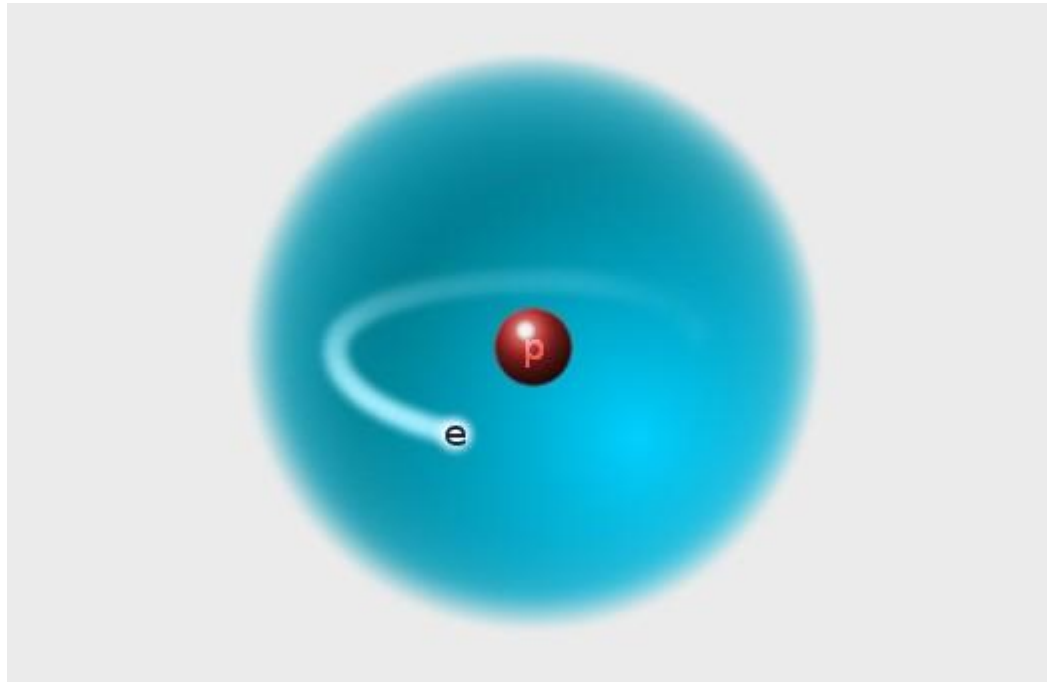


!!! Атом может излучать волны только тех частот, которые соответствуют разностям значений энергии разрешенных уровней:  $W_n - W_k$ .

Это объясняет линейчатый спектр излучения, полученный опытным путем.

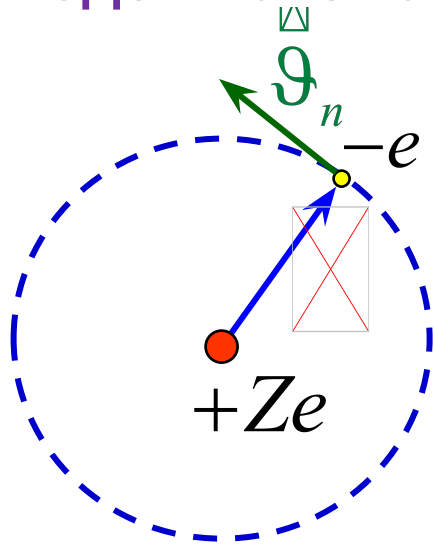
## Вопрос №3

# Теория Бора для водородоподобных систем



# Модель атома водорода

## Уравнение движения электрона:



$$F_{\kappa} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}.$$

$$a_{\text{ц}} = \frac{F_{\kappa}}{m_e}.$$

$$a_{\text{ц}} = \frac{v_n^2}{r_n} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r_n^2}.$$

$$v_n^2 = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r_n}. \quad (7)$$

С учетом (5):

$$m_e v_n r_n = n\hbar, \quad \Rightarrow \quad v_n^2 = \frac{n^2 \hbar^2}{4\pi^2 m_e^2 r_n^2}. \quad (8)$$

$$\frac{n^2 \hbar^2}{4\pi^2 m_e^2 r_n^2} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r_n}.$$

С учетом (5):  $m_e \mathfrak{G}_n r_n = n \hbar, \Rightarrow \mathfrak{G}_n^2 = \frac{n^2 \hbar^2}{4\pi^2 m_e^2 r_n^2}.$

$$\frac{n^2 \hbar^2}{4\pi^2 m_e^2 r_n^2} = \frac{Ze^2}{4\pi \epsilon_0 m_e r_n}.$$

$$r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 \hbar^2}{\pi m_e Z e^2}. \quad (9)$$

Для атома водорода ( $Z=1$ ) (первый Боровский радиус):

$$r_1 = 0,528 \cdot 10^{-10}$$

# Уровни энергий в атоме водорода ( $Z = 1$ ) (энергетические уровни)

Полная энергия электрона:  $W_n = W_n^K + W_n^П = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$ .

$$W_n^K = \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \quad (9)$$

$$W_n^П = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}$$

С учетом (9):

$$W_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e Z^2 e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \quad (10)$$

Минимальной энергией атом обладает при  $n = 1$   
– основное (нормальное) состояние атома:

$$W_1 = -13,6$$

Придавая  $n$  различные целые значения, получим для атома водорода ( $Z = 1$ ) согласно (10) возможные уровни энергии.



## Спектральные серии

(10)

$$h\nu = W_k - W_n = \frac{me^4}{8h^2\varepsilon_0^2} \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

$$\nu = \frac{me^4}{8h^3\varepsilon_0^2} \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = k + 1, k + 2, \dots$$

$R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-1}$  — постоянная Ридберга.

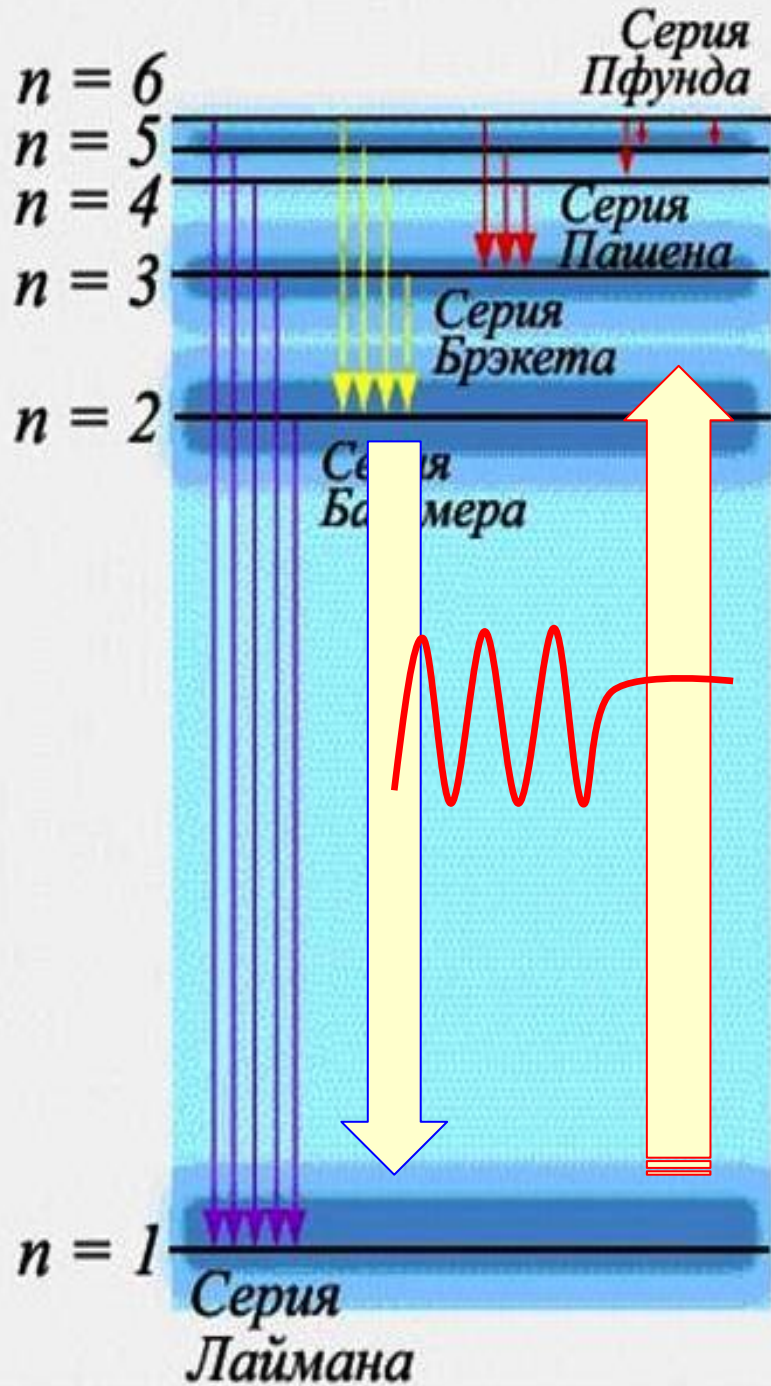
## Обобщенная формула Бальмера

$$\nu = R \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = k + 1, k + 2, \dots \quad (11)$$

Выражение (11) соответствует эмпирической формуле (2).

***Физическая трактовка серий  
спектральных линий для атома водорода,  
наблюдаемых экспериментально***





## Причины возбуждения атома водорода:

- *нагревание;*
- *электроразряд;*
- *поглощение света.*

1. Атом водорода поглощает определённые порции — кванты энергии, соответствующие разности энергетических уровней электронов.

2. Обратный переход электрона сопровождается выделением точно такой же порции энергии.

Для атома H **серия Лаймана**: переход электрона на первую (основную) орбиту с любой другой орбиты, начиная со второй, (атом переходит из возбужденного состояния в основное).

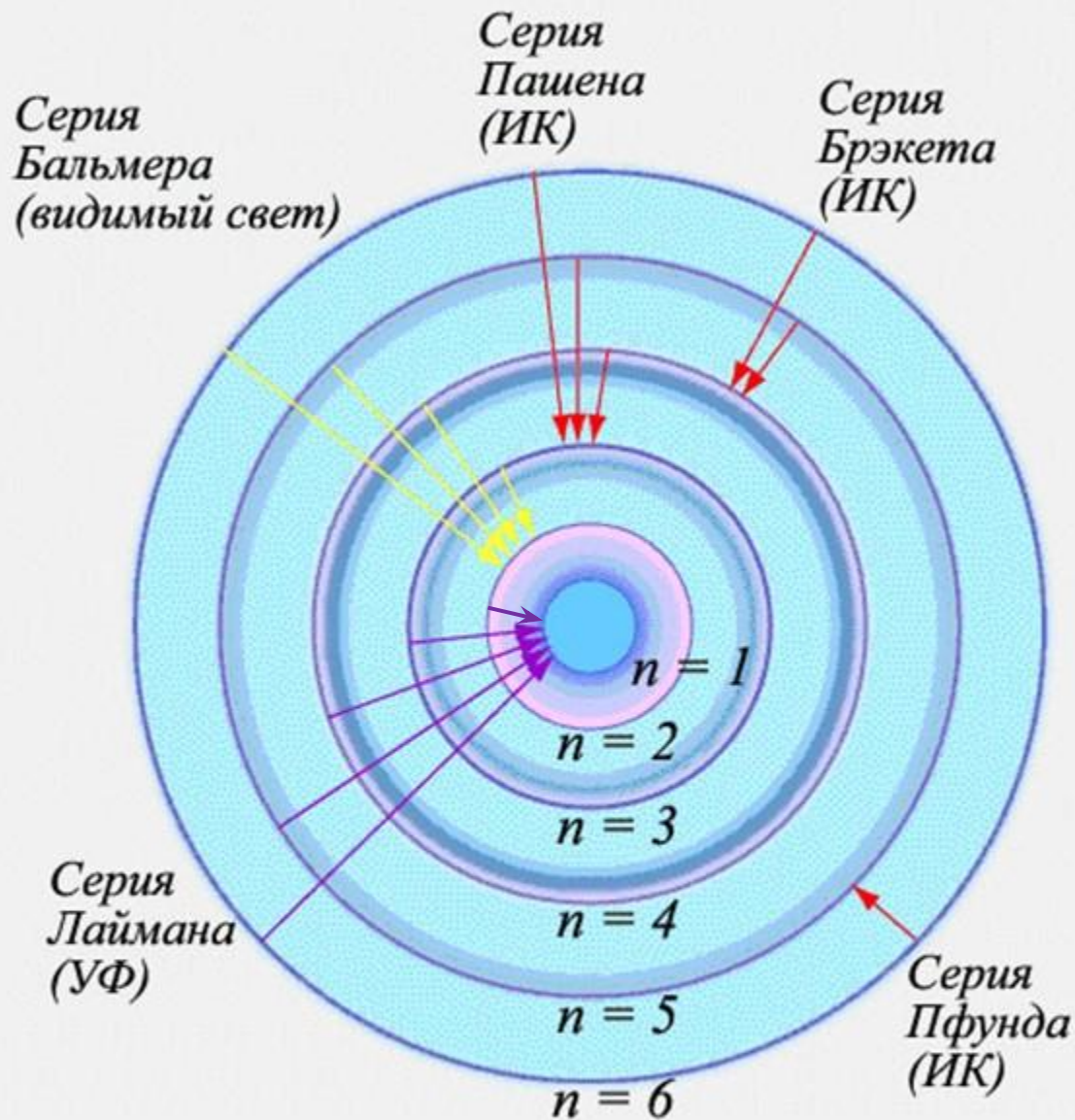
Серию Лаймана получим, подставляя в (11)

$$k = 1, \quad n = 2, 3, \dots$$

$$\nu = R \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Вторая серия – **серия Бальмера** соответствует переходу электрона на вторую орбиту с любой более высокой орбиты.

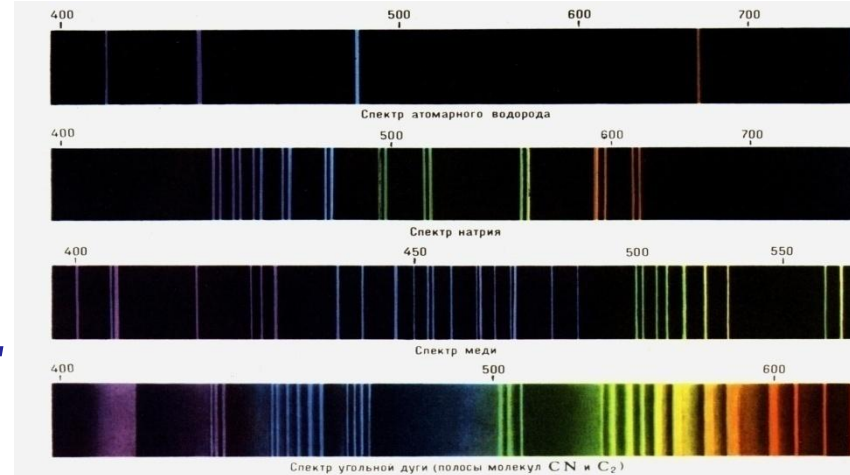




**Орбитальная траектория серий спектральных линий атома водорода.**

# Заключение

Теория Бора объясняет наличие линейчатых спектров.



1. Каждая спектральная линия – результат перехода электрона из одного стационарного состояния в другое.
2. Разность энергий между энергетическими уровнями определяет частоту излучения (положение линии в спектре).

$$h\nu = W_k - W_n \quad \rightarrow$$

$$\rightarrow \nu = \frac{me^4}{8h^3 \varepsilon_0^2} \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

# Заключение

## *Недостатки теории Бора:*

- опирается одновременно как на классические (орбитальная модель), так и на квантовые представления (квантование энергии и момента импульса) о движении электронов, которые противоречат друг другу;
- полностью объясняет спектр водорода, но более сложные атомы (гелия, лития) описывает плохо.

# **Заключение**

## **Недостатки теории Бора:**

- опирается одновременно как на классические (*орбитальная модель*), так и на квантовые представления (*квантование энергии и момента импульса*) о движении электронов, которые противоречат друг другу;
- полностью объясняет спектр водорода, но более сложные атомы (*гелия, лития*) описывает плохо.

## **Достоинства теории Бора:**

- явилась переходным звеном между классической физикой и современной квантовой механикой;
- впервые введено понятие квантового числа, как характеристики состояния атома.

## Задание на самоподготовку

1. Повторить тему лекции с использованием конспекта и рекомендованной литературы.
2. Ответить на контрольные вопросы в электронном учебнике по теме лекции.
3. Решить задачи в электронном учебнике по теме лекции.

Лекция окончена!