Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

Кафедра №112 (Физики)

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:

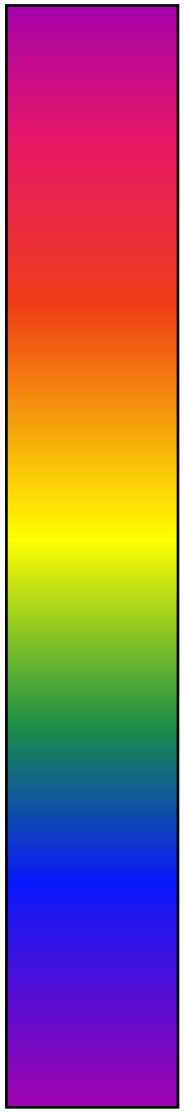
1. ***Линейчатый спектр атома водорода***
2. ***Ядерная модель атома Резерфорда. Постулаты Бора***
3. ***Теория Бора для водородоподобных систем***

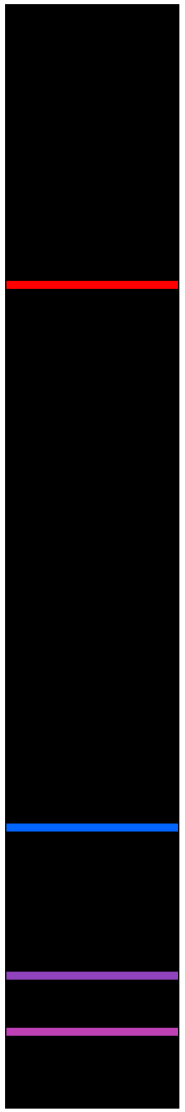
Литература:

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





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?

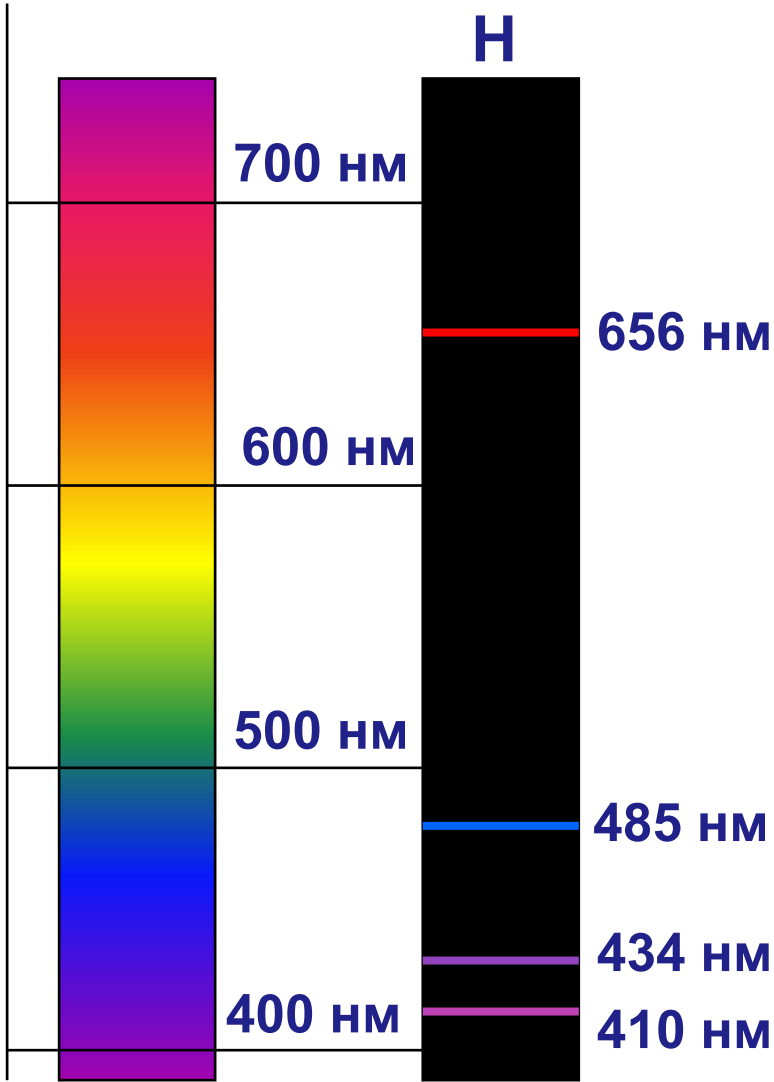
Вопрос №1

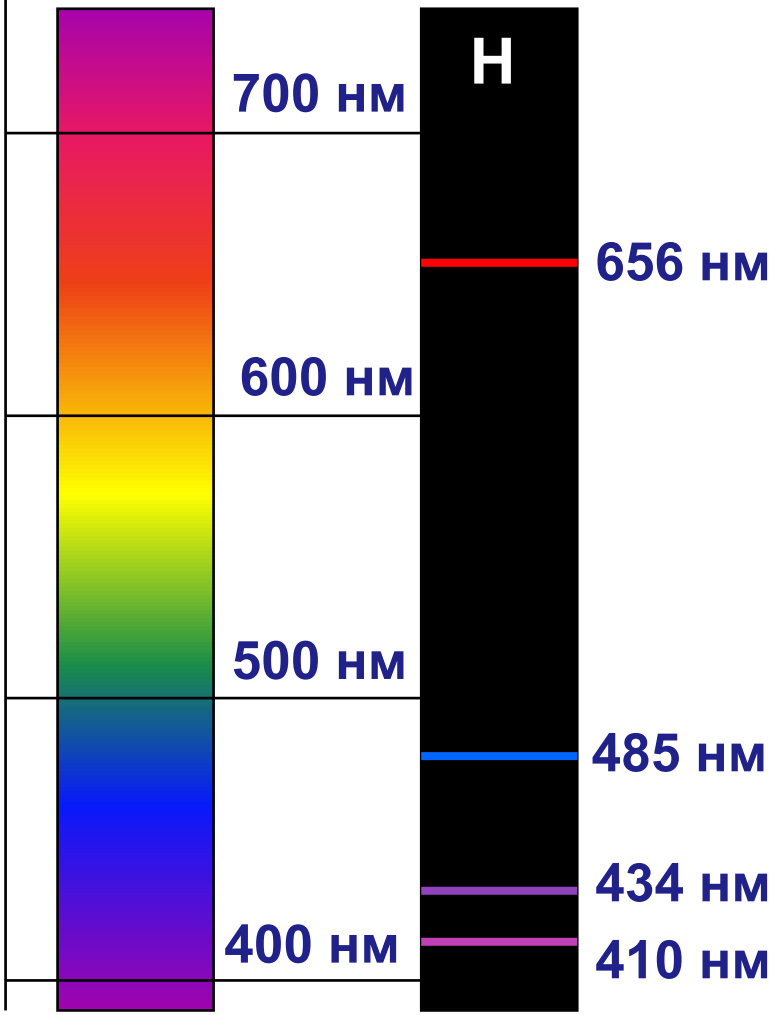
Линейчатый спектр атомов водорода

Имеем разреженный газ, состоящий из атомов H.

Нагреваем газ – начинается излучение.

Спектр излучения (испускания) водорода





Спектр излучения (испускания) водорода

Выводы:

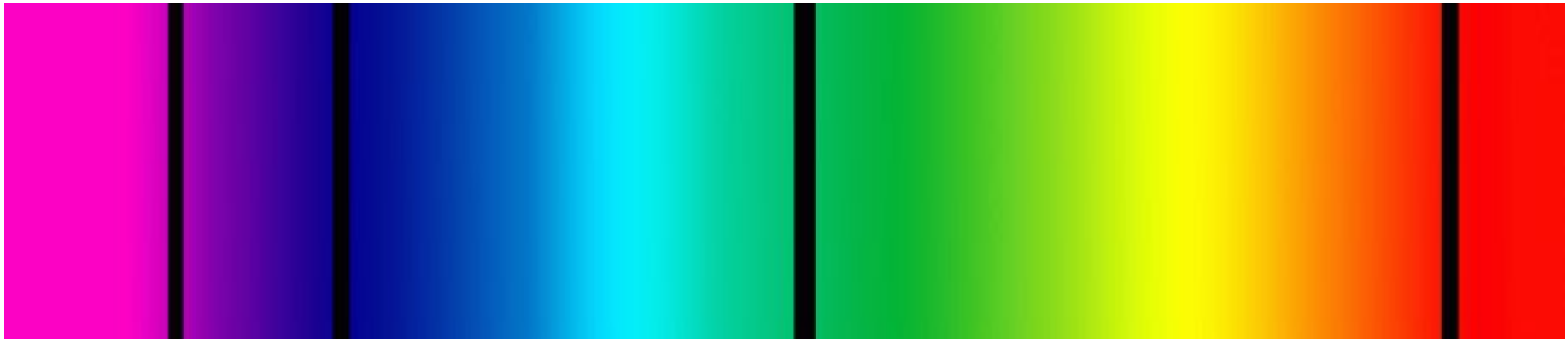
1. Атомы имеют дискретный спектр излучения.
2. По набору линий спектра испускания можно определить химический элемент (спектральный анализ).

Спектр поглощения водорода

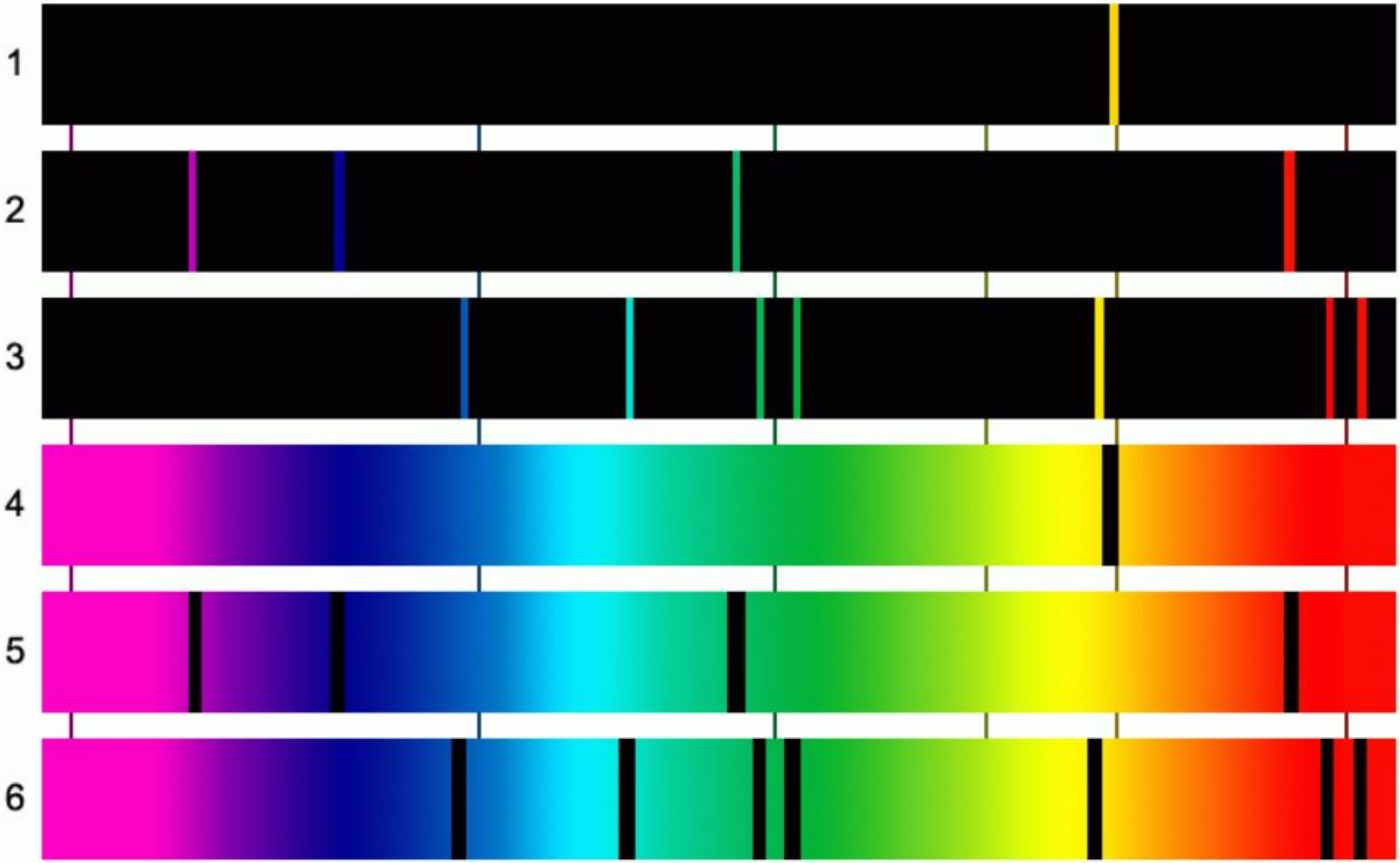
Имеем разреженный атомарный газ в холодном состоянии. Свечения нет.

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.)

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

где $n = 3, 4, \ldots, 11.$

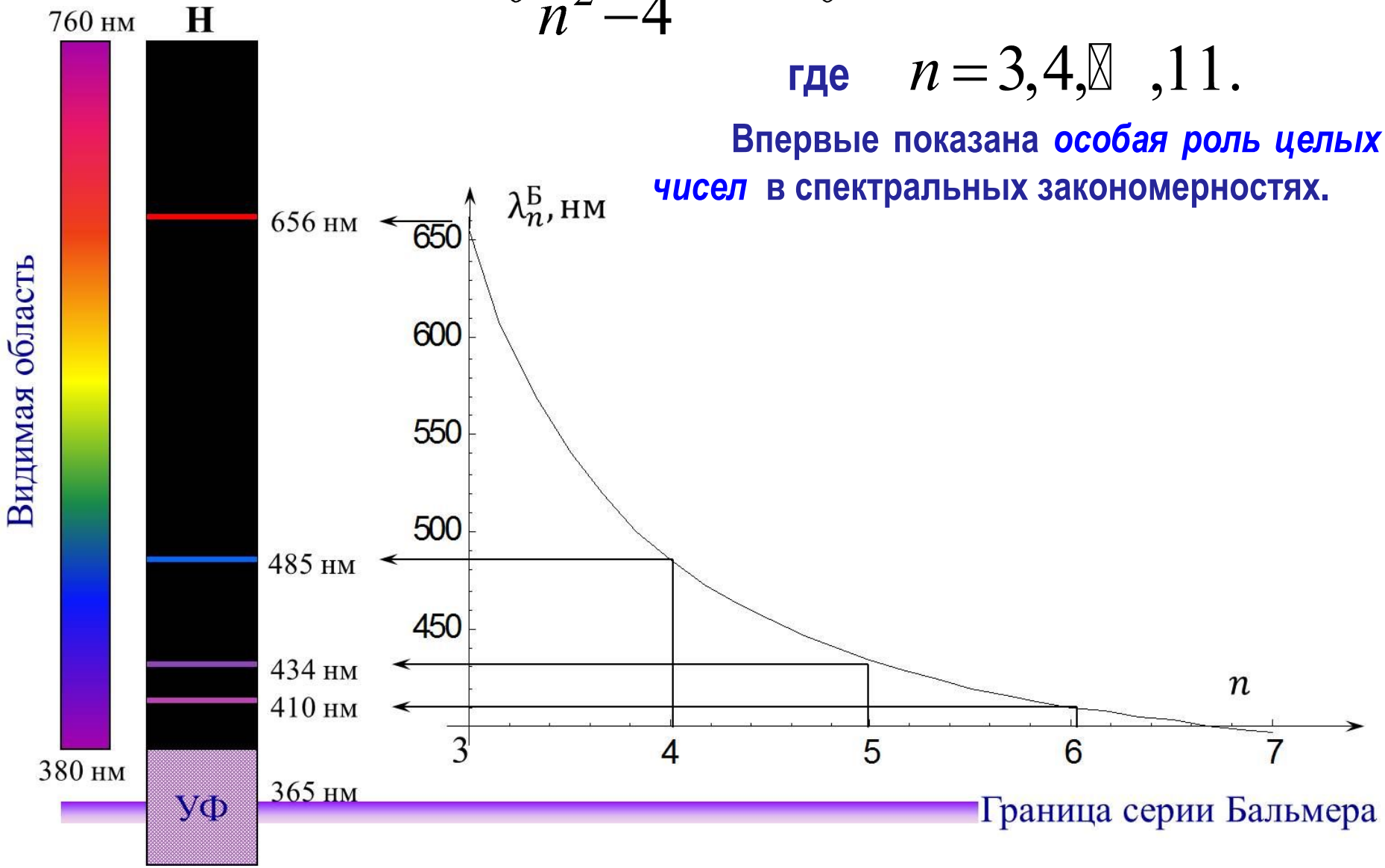
Впервые показана ***особая роль целых чисел*** в спектральных закономерностях.

Формула Бальмера (1885 г.)

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

где $n = 3, 4, \ldots, 11.$

Впервые показана *особая роль целых чисел* в спектральных закономерностях.

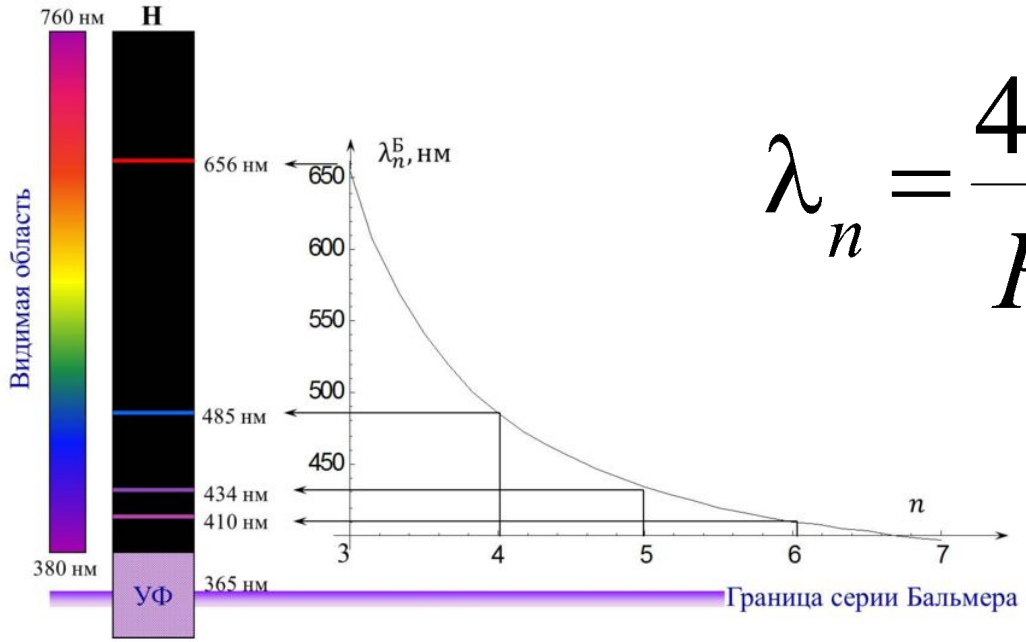


Формула Ридберга

$$\nu_n^{Б} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right), \qquad n = 3, 4, \ldots \quad . \qquad (2)$$

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

Формула Ридберга для длины волны:



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

$$n = 3, 4, \ldots \quad .$$

Обобщенная формула Бальмера – Ридберга (для всех линий)

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

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

Выводы:

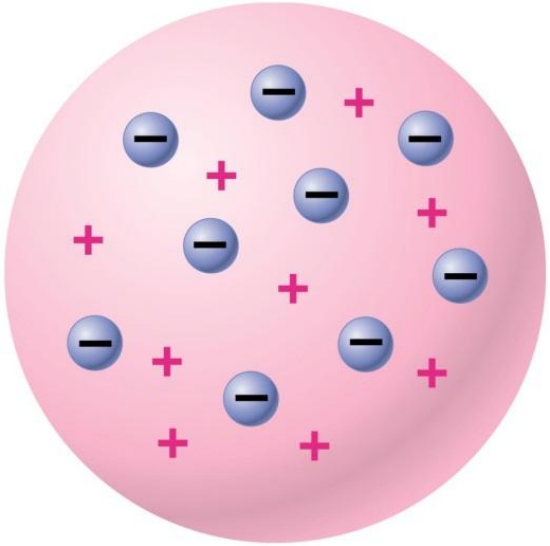
1. Спектр излучения газа – «паспорт» химического элемента (спектральный анализ – метод исследования вещества по его спектру).

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.

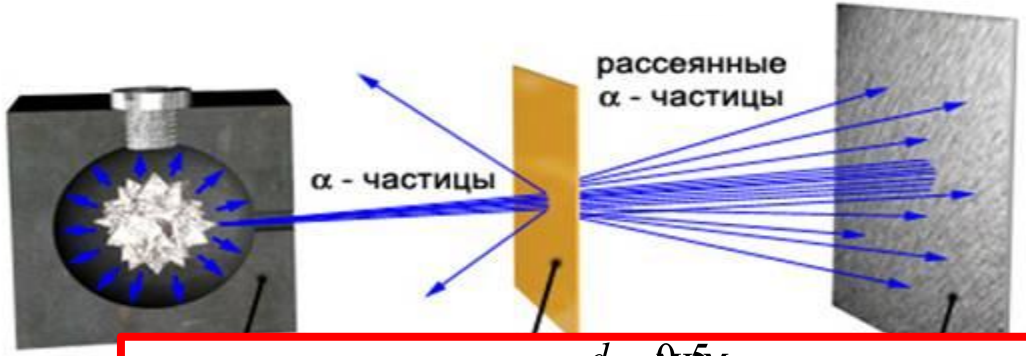
Излучение вызвано колебаниями электронов около положения равновесия.

Но почему тогда спектр линейчатый?

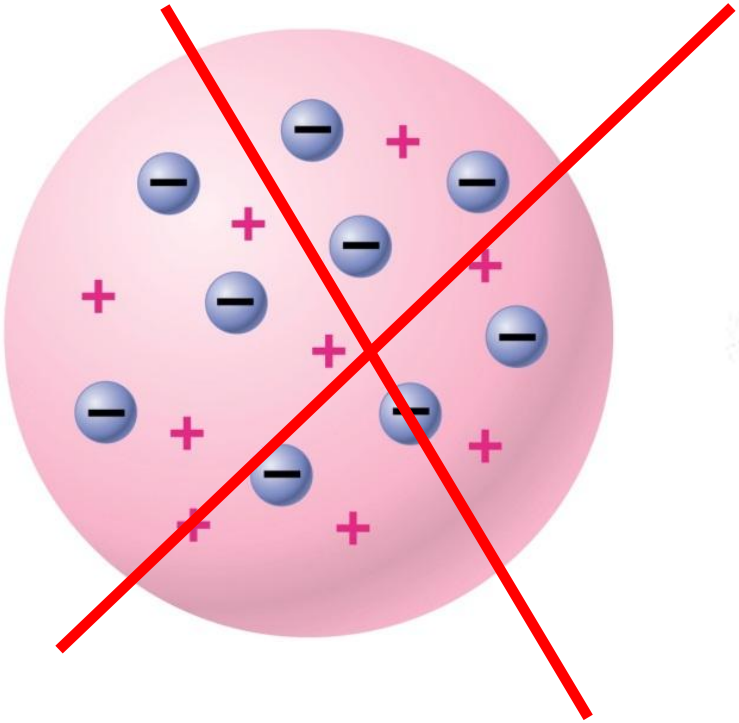
Опыт Резерфорда (1912 г.)

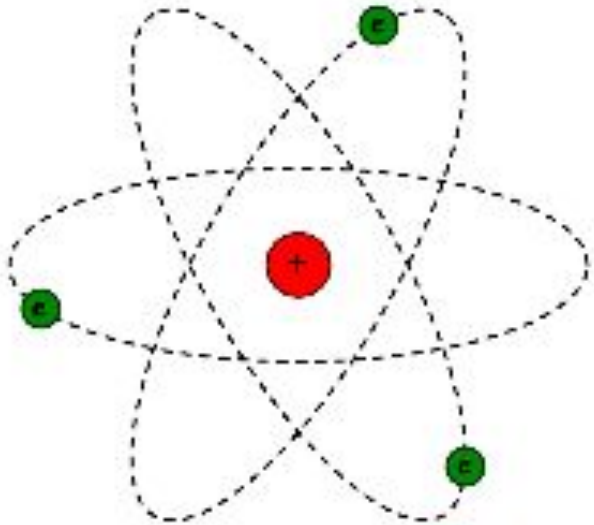
Почему ???

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



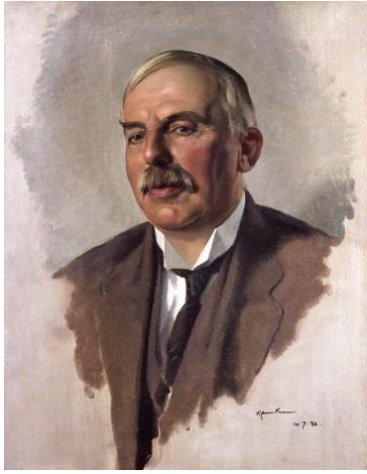
$d = 0{,}5$ м



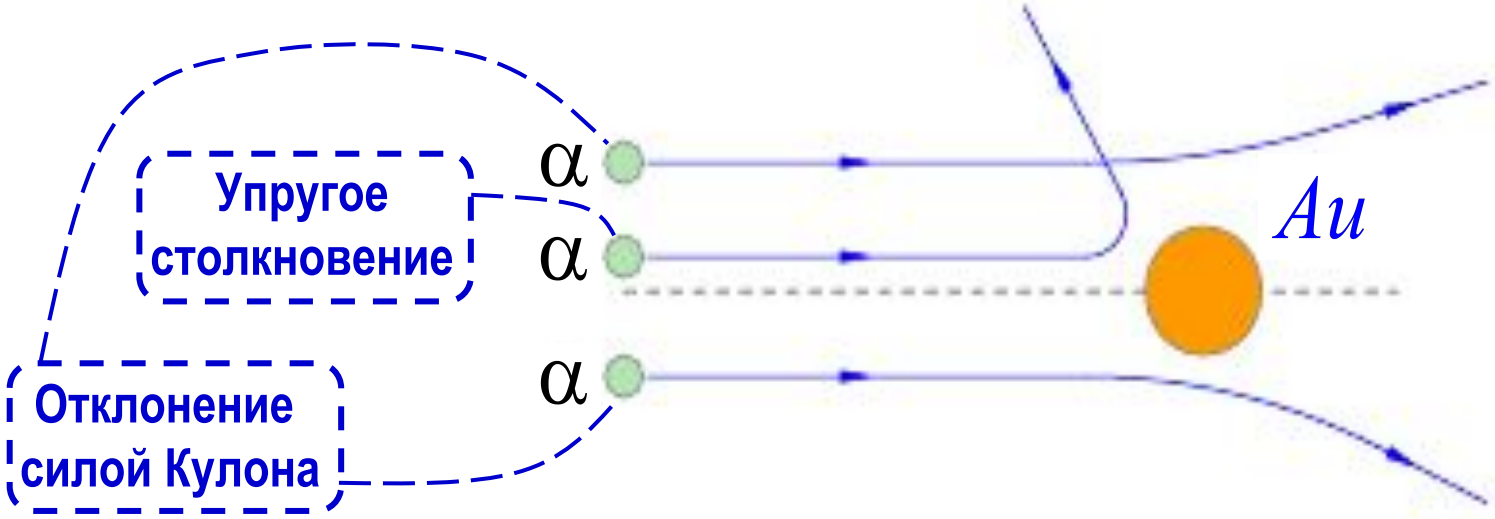


Результат – небольшая часть *α* – частиц (одна из нескольких тысяч) отклонялась на угол больший чем 90 градусов.

Опыт Резерфорда (1912 г.)



Суть эксперимента – бомбардировка атома α-частицами.

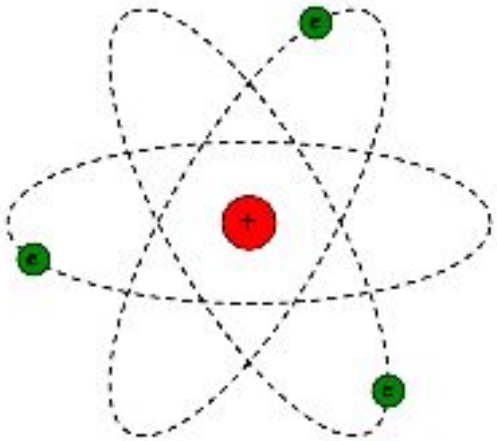


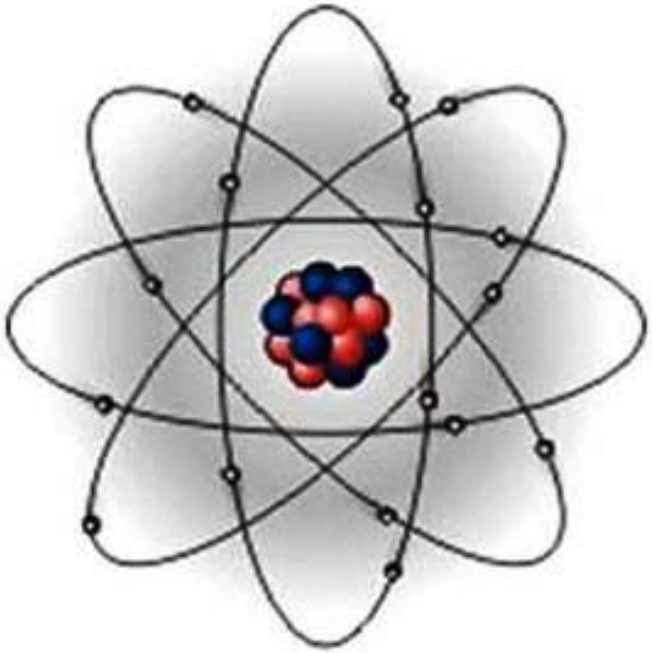
α-частица **имеет положительный заряд, равный 2e и массу, в 8000 раз большую, чем масса электрона (α_2^4 – 2 протона + 2 нейтрона).**

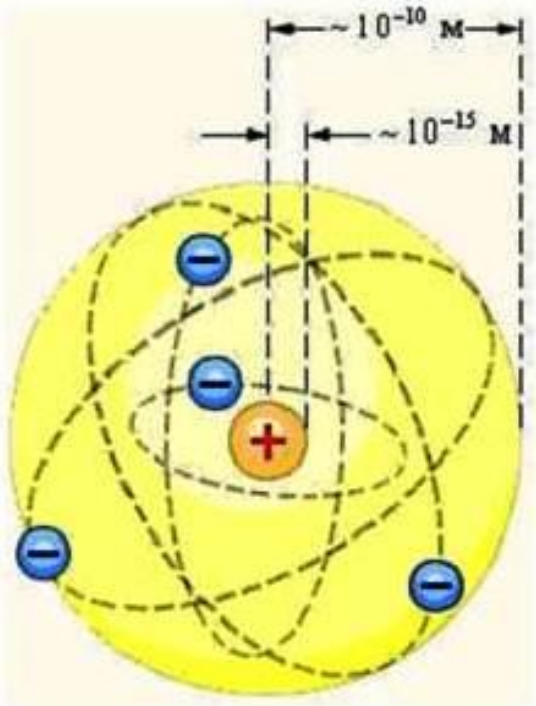
Результат опыта – помимо рассеяния небольшая часть α-частиц отклонялась на угол свыше 90 градусов.

Причина - что-то есть такое внутри атома, что стоит на пути α-частиц.

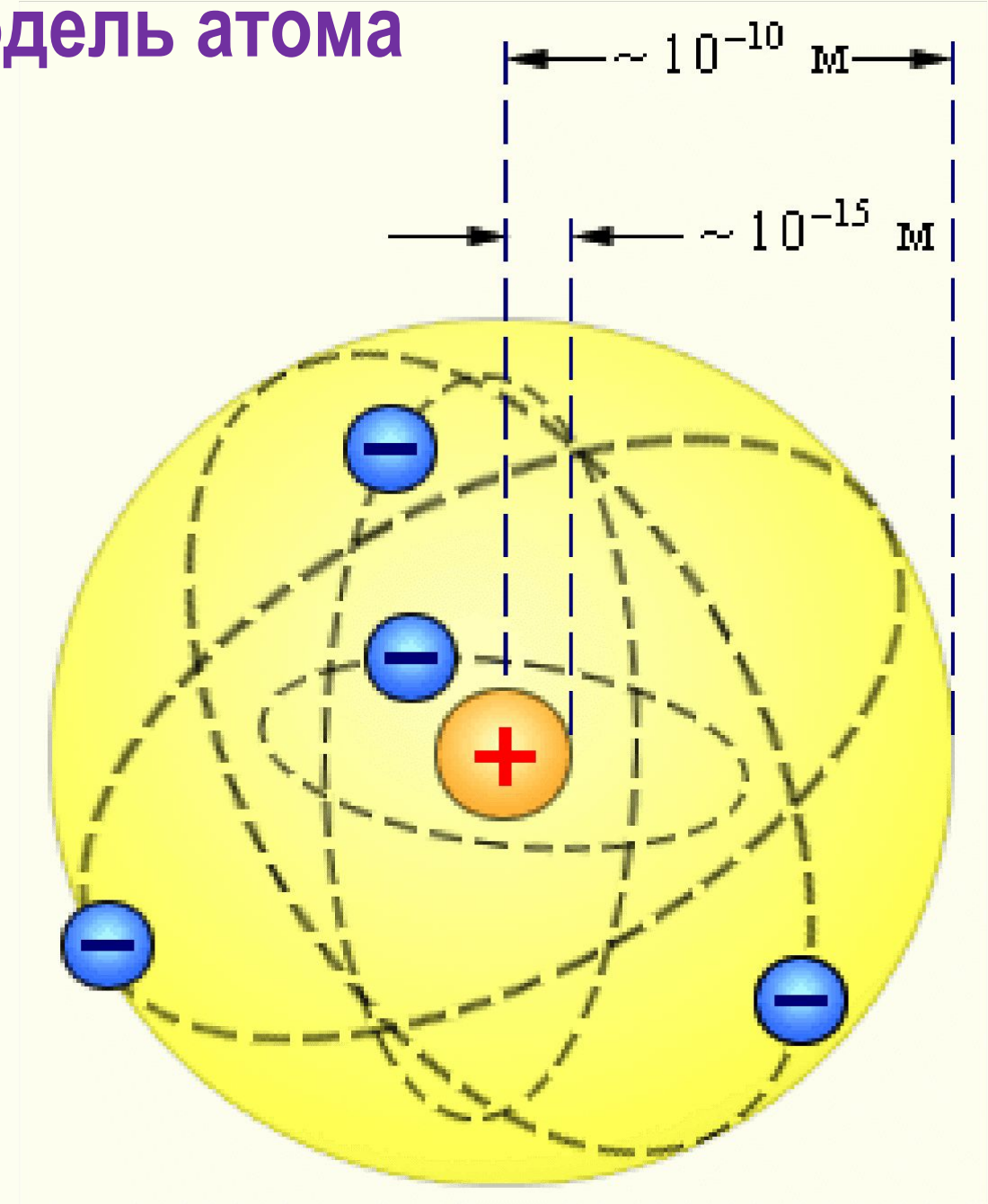
Планетарная модель атома



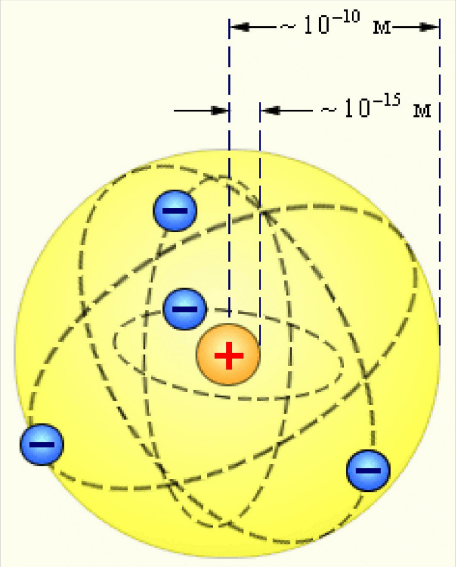




Планетарная модель атома



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 α-частиц – есть результат их отклонения от ядра силой Кулона.

Отражение α-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 $a_Б = \vartheta^2 / r$ **.**

Сила Кулона $$k\frac{e^2}{r_Б^2} = m\frac{\vartheta^2}{r_Б}, \quad \Rightarrow \quad \vartheta^2 = k\frac{e^2}{mr_Б}.$$

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

!

$$W = W_К + W_П = \frac{m\vartheta^2}{2} - k\frac{e^2}{r_Б} = k\frac{e^2}{2r_Б} - k\frac{e^2}{r_Б} = -k\frac{e^2}{2r_Б}.$$

Сила Кулона $k\dfrac{e^2}{r_Б^2} = m\dfrac{\vartheta^2}{r_Б}, \quad \Rightarrow \quad \vartheta^2 = k\dfrac{e^2}{mr_Б}.$

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

$$W = W_К + W_П = \frac{m\vartheta^2}{2} - k\frac{e^2}{r_Б} = k\frac{e^2}{2r_Б} - k\frac{e^2}{r_Б} = -k\frac{e^2}{2r_Б}.$$

!

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

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

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:

$$W_n, \quad n = 1, 2, 3, \ldots \; .$$

Первый постулат (постулат стационарных состояний)

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

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

Второй постулат

(правило квантования Бора)

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

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

Второй постулат (правило квантования Бора)

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

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

Третий постулат

(правило частот)

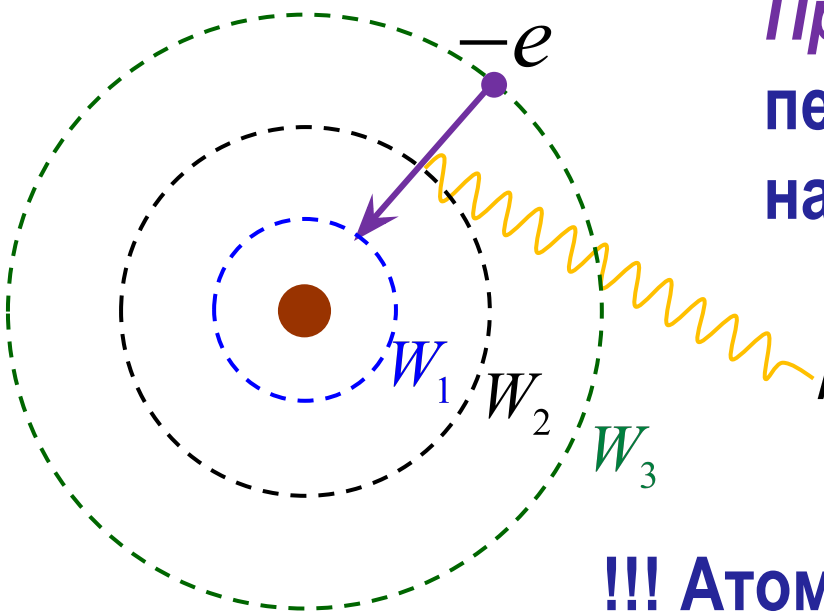
При переходе электрона из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается один фотон:

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

Третий постулат (правило частот)

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

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



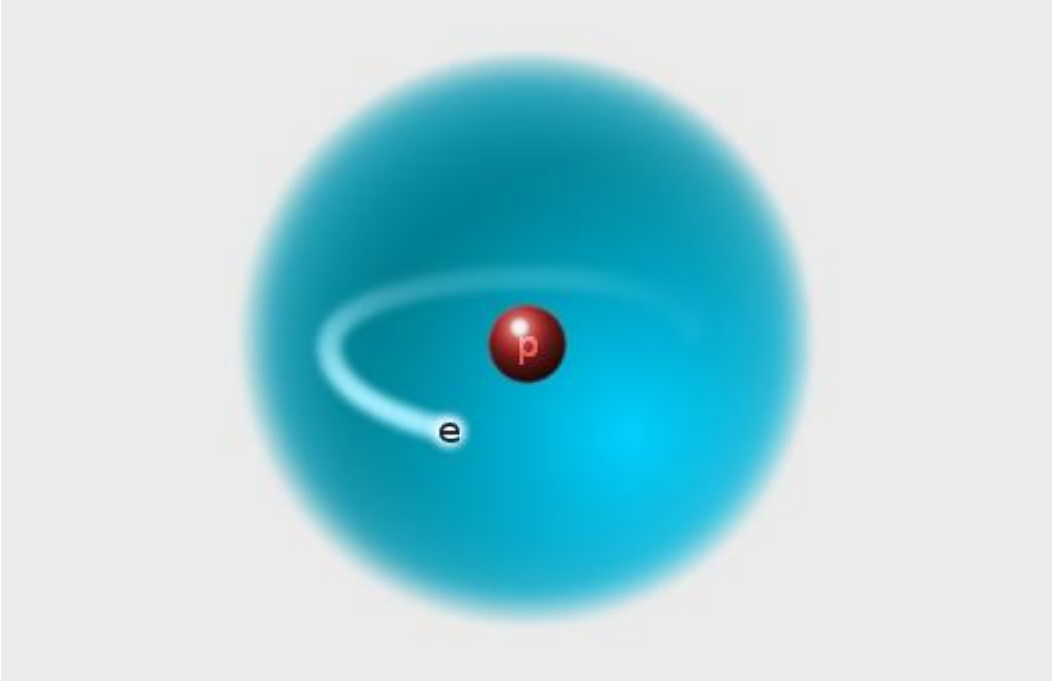
Пример: **излучение фотона при переходе электрона с уровня W_3 на уровень W_1.**

$$h\nu = W_n - W_k.$$

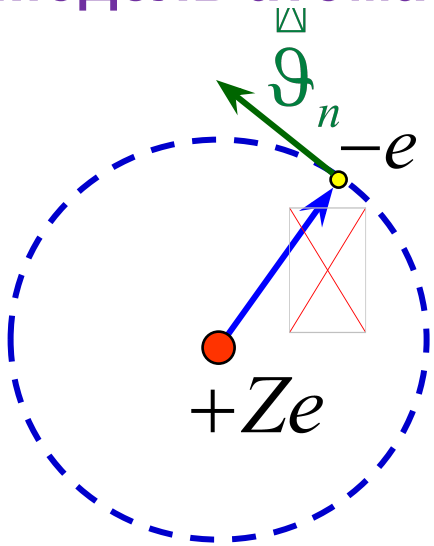
!!! Атом может излучать волны только тех частот, которые соответствуют разностям значений энергии разрешенных уровней: $W_n - W_k$.

Это объясняет линейчатый спектр излучения, полученный опытным путем.

Вопрос №3
Теория Бора для водородоподобных систем



Модель атома водорода



Уравнение движения электрона:

$$a_ц = \frac{F_к}{m_e}.$$

$$F_к = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n^2}.$$

Выразим

$$a_ц = \frac{\vartheta_n^2}{r_n} = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 m_e r_n^2}.$$

$$\vartheta_n^2 = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 m_e r_n}. \quad (7)$$

С учетом (5):

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

$$\frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m_e^2 r_n^2} = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 m_e r_n}.$$

С учетом (5): $m_e \vartheta_n r_n = n\hbar, \quad \Rightarrow \quad \vartheta_n^2 = \dfrac{n^2 h^2}{4\pi^2 m_e^2 r_n^2}.$

$$\frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m_e^2 r_n^2} = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 m_e r_n}.$$

$$\boxed{r_n = n^2 \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m_e Ze^2}.} \qquad (9)$$

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: $W_n = W_n^К + W_n^П = -\dfrac{Ze^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n}.$ (9)

$$W_n^К = \frac{m_e \vartheta_n^2}{2} = \frac{Ze^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n}.$$

$$W_n^П = -\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n}.$$

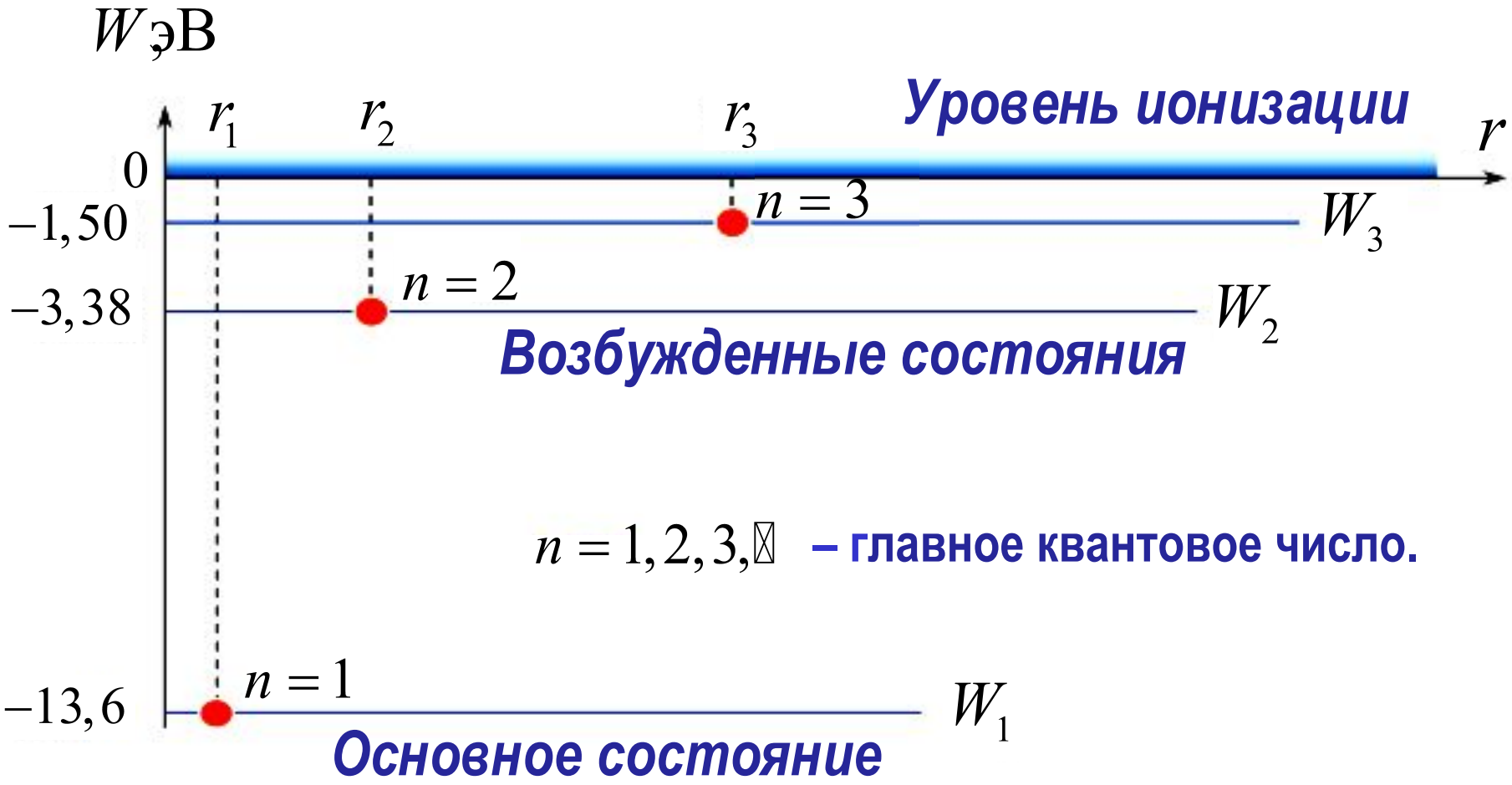
С учетом (9):

$$W_n = -\frac{1}{n^2}\frac{m_e Z^2 e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}. \qquad (10)$$

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

$$W_1 = -13{,}6\ \text{эВ}.$$

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



Спектральные серии

$$h\nu = W_k - W_n = \frac{me^4}{8h^2\varepsilon_0^2}\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right). \quad (10)$$

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

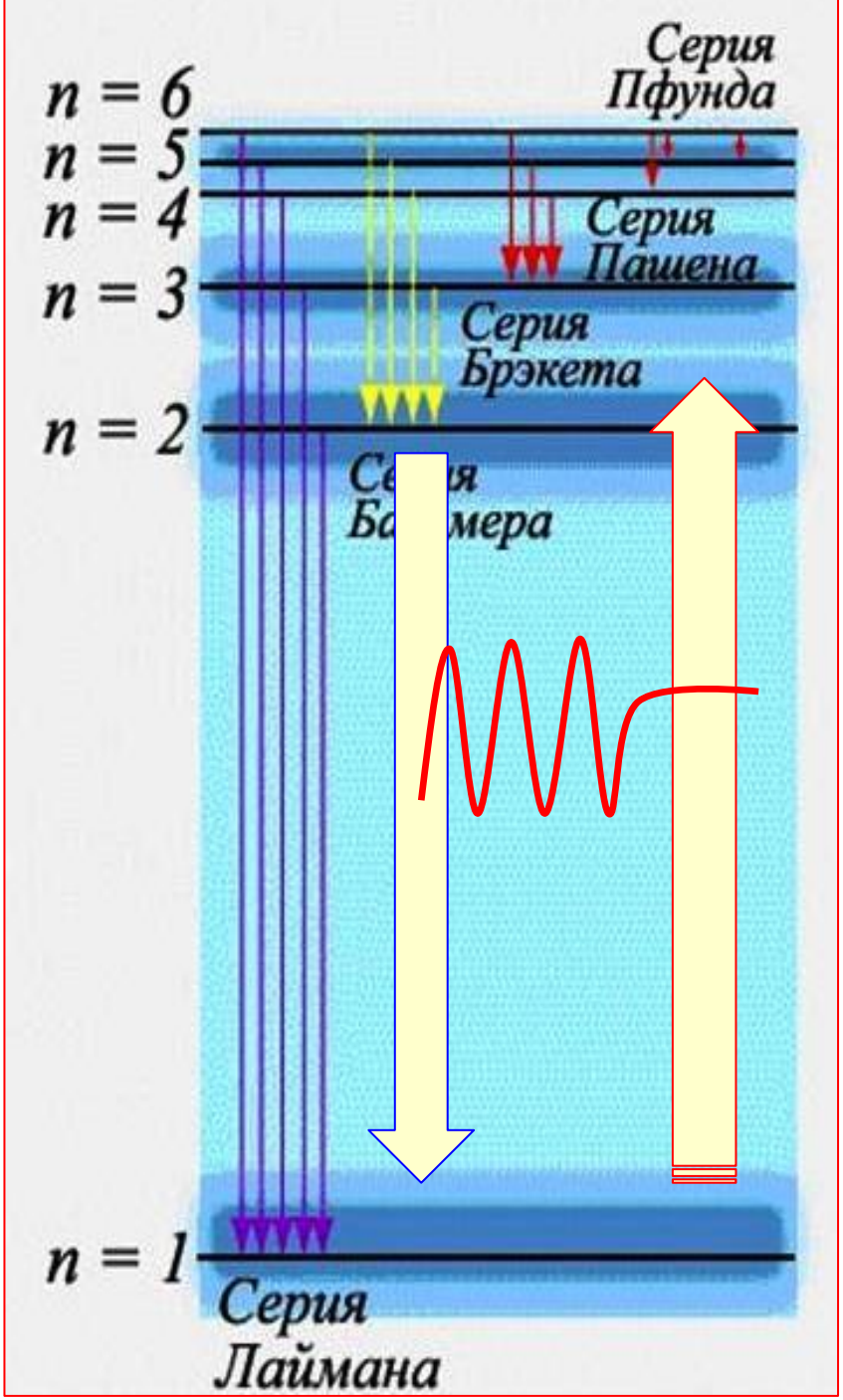
$R = 3{,}29 \cdot 10^{15}\ \ ^{-1}$ — **постоянная Ридберга.**

Обобщенная формула Бальмера

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

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.

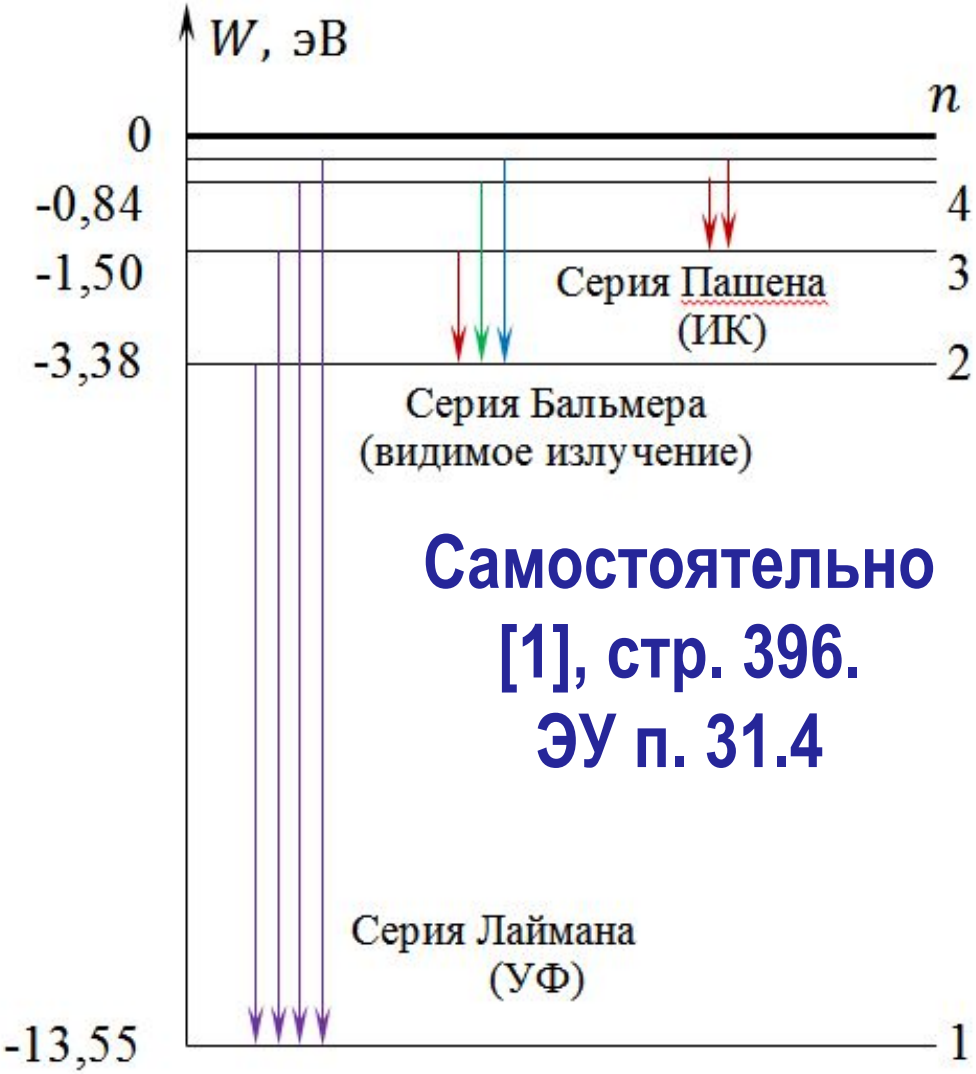
Для атома H ***серия Лаймана***: переход электрона на первую (основную) орбиту с любой другой орбиты, начиная со второй, (атом переходит из возбужденного состояния в основное).

Серию Лаймана получим, подставляя в (11)

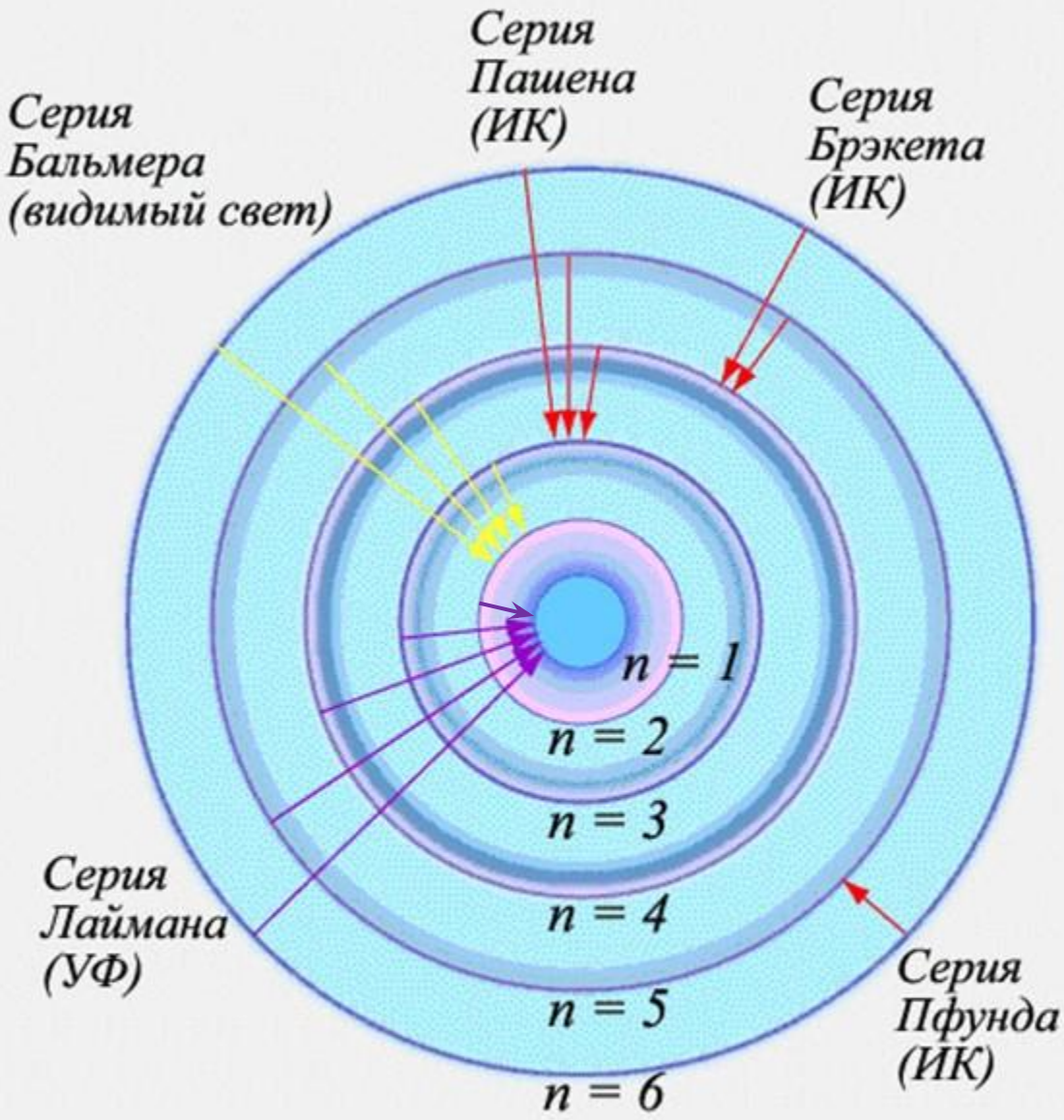
$$k = 1, \quad n = 2, 3, \ldots \; .$$

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

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



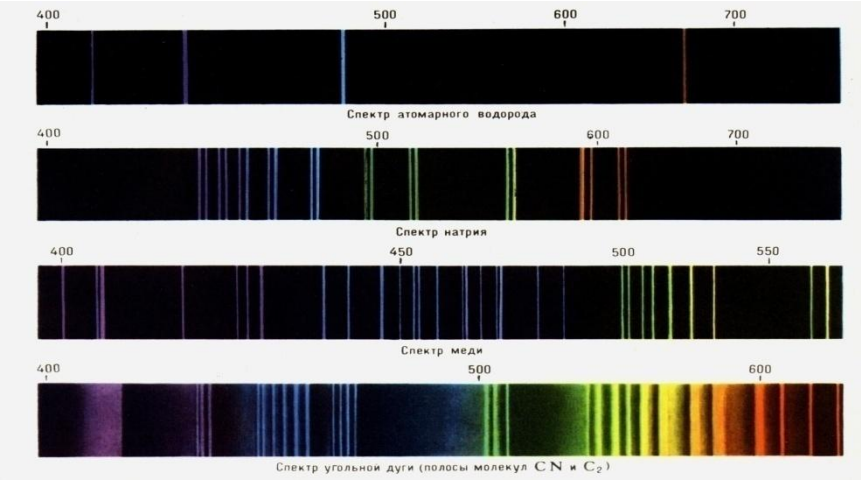
Самостоятельно [1], стр. 396. ЭУ п. 31.4



Орбитальная трактовка 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).

$$h\nu = W_k - W_n \Rightarrow$$

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

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!