

ЛЕКЦИЯ 12

ПЛАН ЛЕКЦИИ

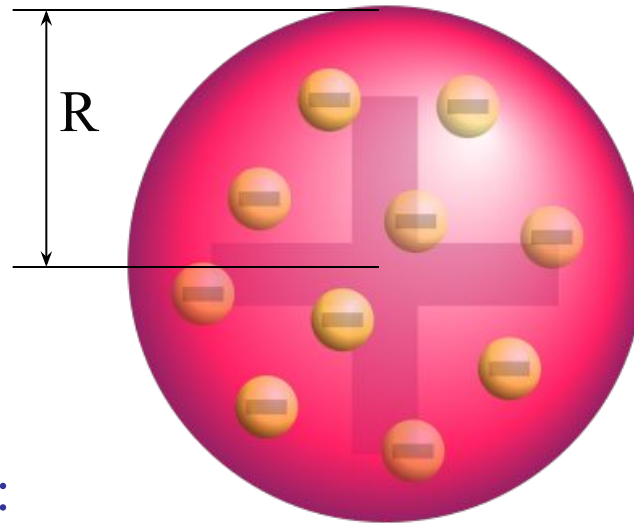
1. Модель атома Томсона. Модель атома Резерфорда. Атомные спектры.
2. Постулаты Бора. Опыт Франка и Герца.
3. Элементарная Боровская теория водородного атома.

МОДЕЛЬ АТОМА ТОМСОНА

В 1897 г. Дж. Дж. Томсон открыл электрон

В 1903 г. Дж. Дж. Томсон предложил модель атома «пудинг с изюмом»

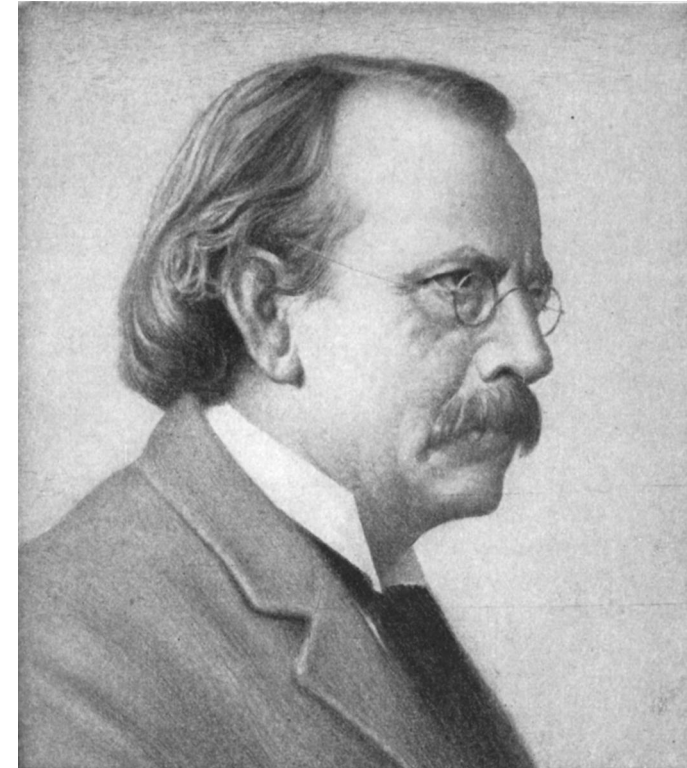
$$R \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$



Атом Томсона:

1. Стабилен.
2. Теория Томсона давала размеры атомов близкие к истинным.
3. Не объясняет атомных спектров.

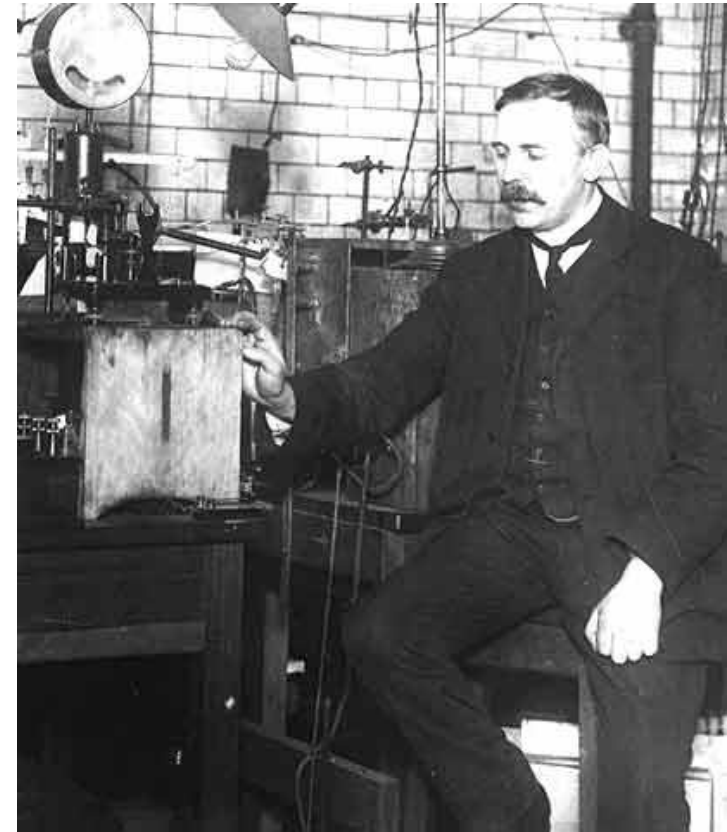
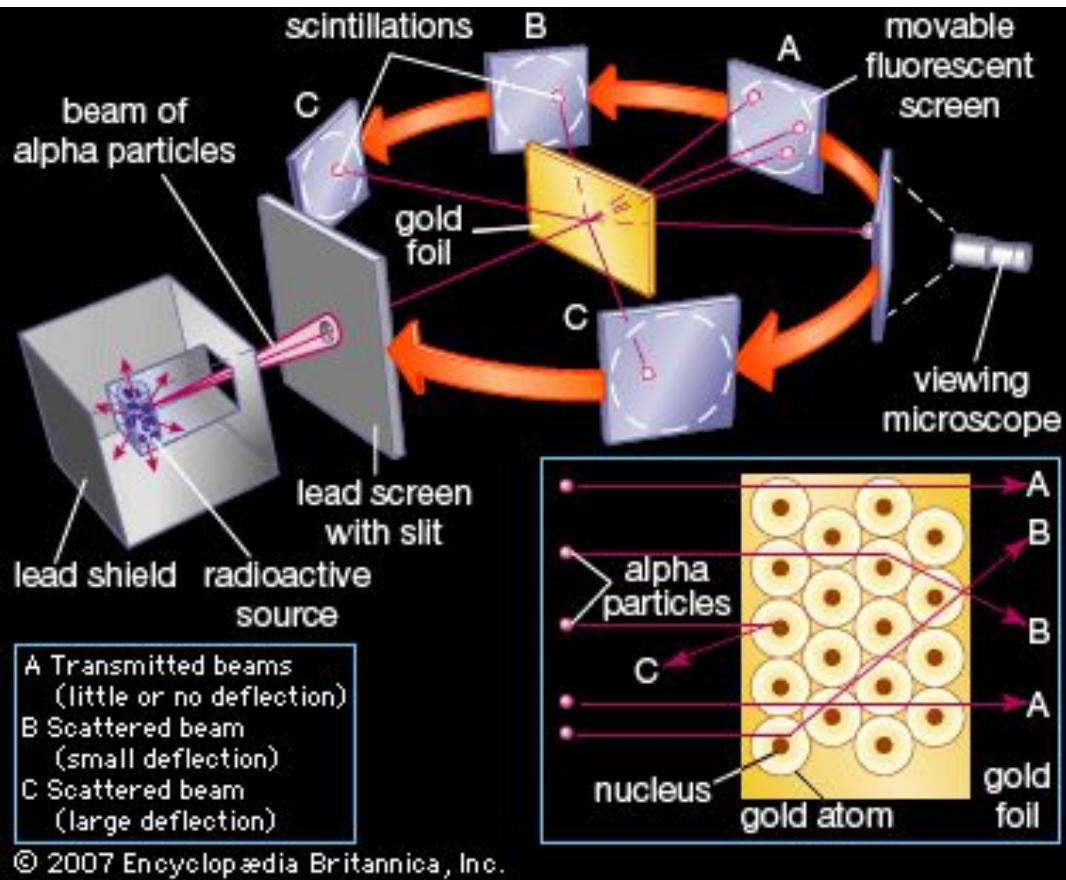
Общая физика. ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ



Сэр Джозеф Джон Томсон
(1856 — 1940)

английский физик,
открывший электрон,
лауреат Нобелевской премии
по физике 1906 г.

МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА



**Эрнест Резерфорд
(1871-1937)**

Geiger–Marsden experiment or Rutherford experiment

британский физик новозеландского происхождения. Известен как «отец» ядерной физики.

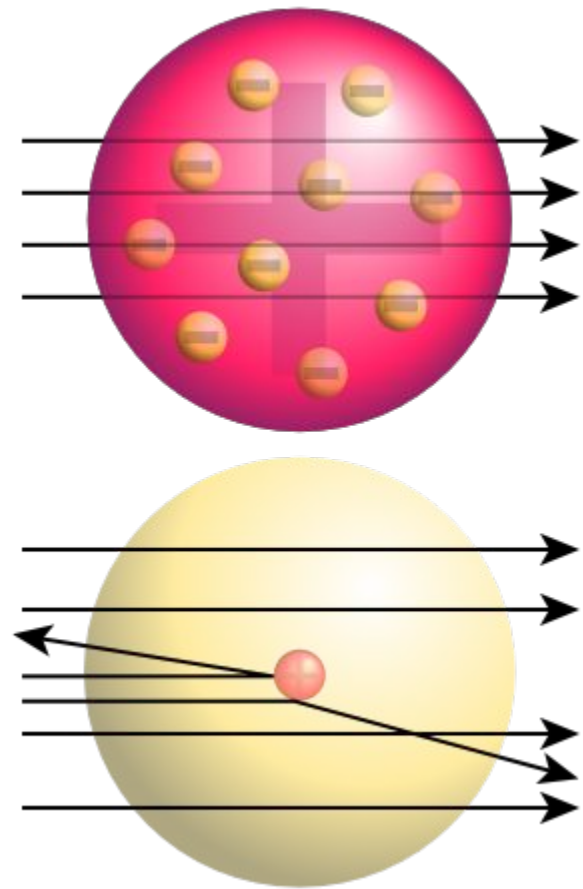
Лауреат Нобелевской премии по химии 1908 года.

МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА

Атомное ядро открыл английский физик Резерфорд в 1911 году в опытах по изучению рассеяния α - частиц на тонких фольгах (1909, Гейгер, Марсден).

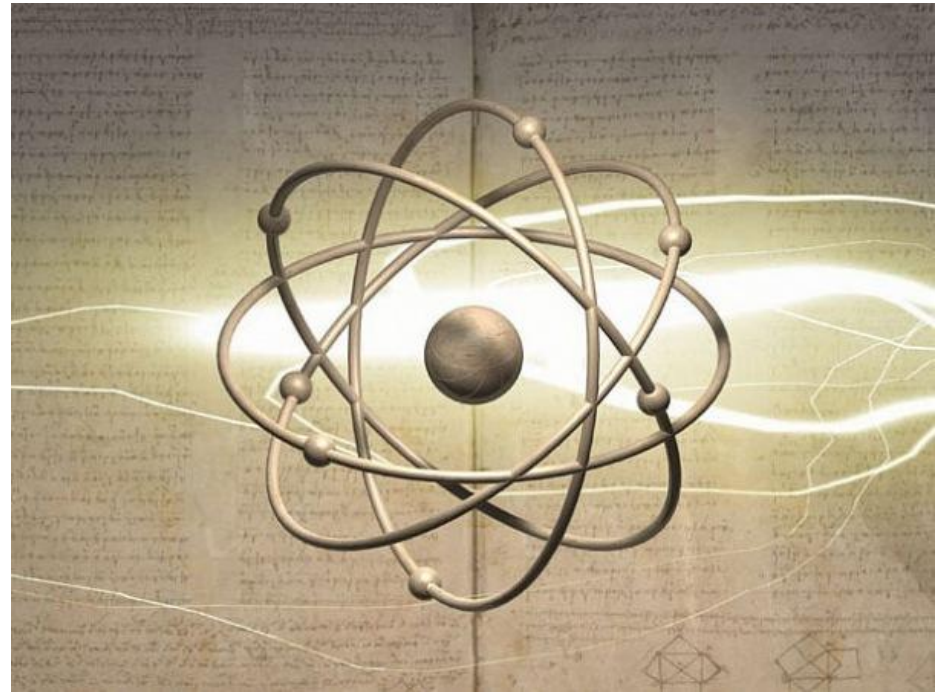
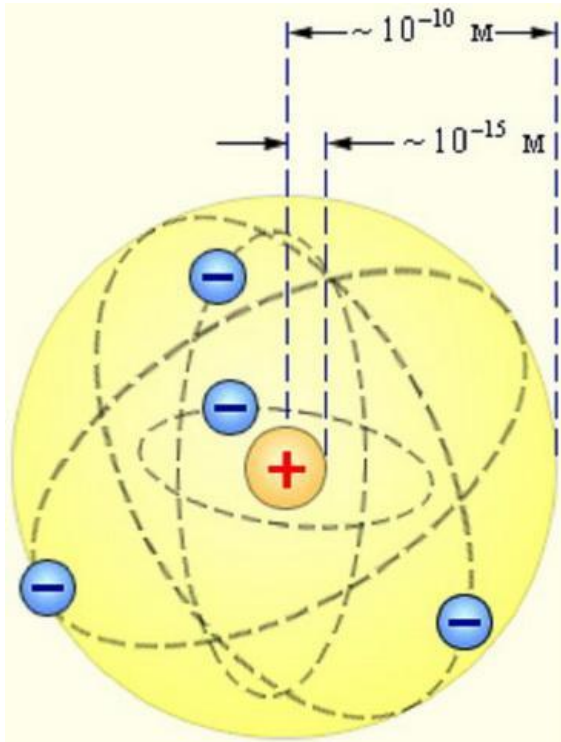
Небольшая доля α - частиц отклонялась на большие углы (до 180°). Резерфорд предположил, что в центре атома расположено тяжелое (до 99,98% массы атома) положительно заряженное ядро очень малых размеров (10^{-13} - 10^{-12} см).

Вокруг ядра на относительно очень больших расстояниях ($\sim 10^{-8}$ см) вращаются Z электронов. Z - порядковый номер элемента в периодической таблице Менделеева.

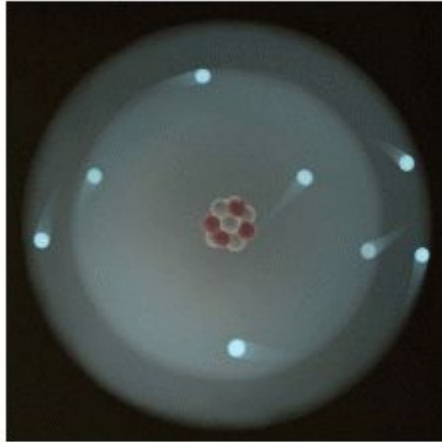


**Geiger–Marsden experiment or
Rutherford experiment**

МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА



Модель названа ядерной или планетарной. Строение атома напоминает Солнечную систему. Роль Солнца выполняет ядро, роль планет – электроны, роль гравитационного притяжения – кулоновское взаимодействие между ядром и электронами.



Таким образом приходим к выводу, что окружающие нас материальные тела состоят в основном из пустоты.

Попробуйте ответить на два вопроса:

1. Почему стекло прозрачное?
2. Почему дерево, металл, камни – не прозрачные?

МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА

Противоречия модели.

1. Модель не удовлетворяет условию устойчивости.

Заряженная частица, движущаяся с ускорением, в соответствии с законами электродинамики должна тратить энергию на излучение. Из-за потерь энергии электрон должен в итоге упасть на ядро.

2. Модель допускает испускание атомами светового излучения *любой* длины волны.

Из опытов было известно, что конкретные атомы испускают излучение только *строго определенных* длин волн.

Излучение невзаимодействующих друг с другом атомов состоит из отдельных спектральных линий. Такой спектр называется *линейчатым*

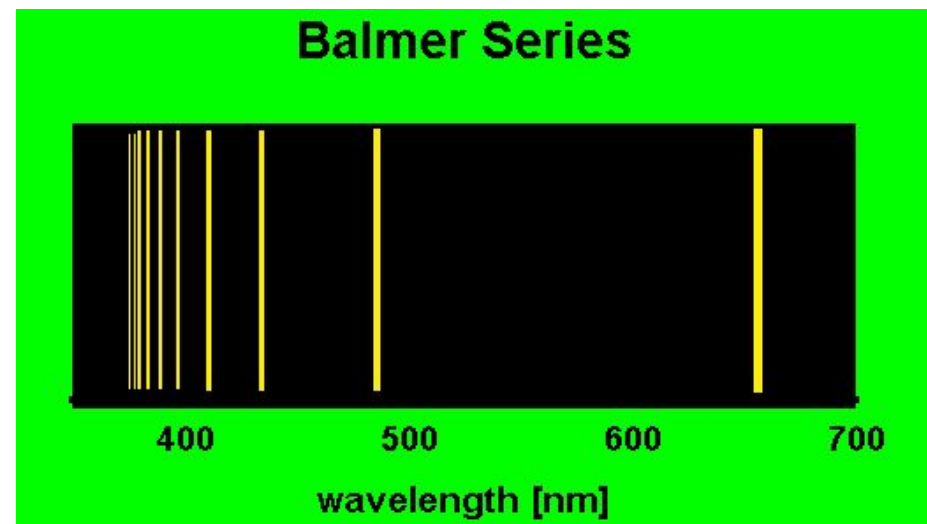
Изучение атомных спектров послужило ключом к познанию строения атомов.

Исследования показали: линии в спектрах атомов расположены не беспорядочно, а объединяются в группы или *серии линий*.

Отчетливее всего это обнаруживается в спектре простейшего атома – водорода. Швейцарский физик Бальмер в 1885 году обнаружил, что длины волн в видимой и близкой ультрафиолетовой области спектра излучения водорода могут быть точно представлены формулой

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

λ_0 - константа, n - целое число, принимающее значения 3, 4, 5 и т.д.



АТОМНЫЕ СПЕКТРЫ.

Если заменить длину волны частотой, получится:

$$\omega = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (n = 3, 4, 5, \dots) \quad R' - \text{постоянная Ридберга.}$$

$$R' = 2.07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}.$$

Это *формула Бальмера*, а соответствующая серия спектральных линий атома водорода называется *серией Бальмера*.

В справочниках часто приводится $R = 1.09737 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$, входящая в формулу вида

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

С учетом выражения $\nu = c/\lambda$, эта же формула может быть переписана для частот:

$$\nu = R'' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad R'' = Rc = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

В спектре атома водорода кроме серии Бальмера есть еще серии.

В ультрафиолетовой части спектра - *серия Лаймана*. Формула линий -

$$\omega = R' \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

$$(n=2, 3, 4, \dots)$$

АТОМНЫЕ СПЕКТРЫ.

В инфракрасной части спектра находится *серия Пашена*. Линии этой серии описываются формулой

$$\omega = R' \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (n=4, 5, 6, \dots)$$

И т.д. Частоты всех линий в спектре атома водорода можно представить одной формулой - *обобщенной формулой Бальмера*

$$\omega = R' \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

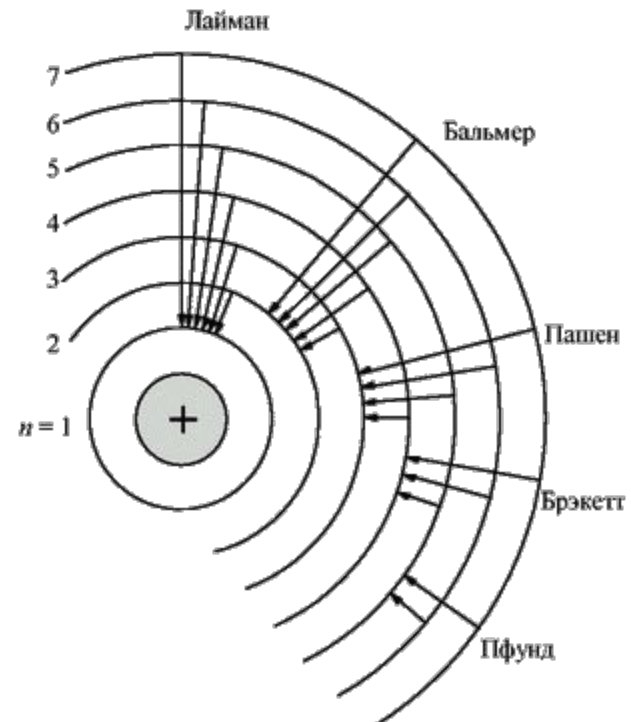
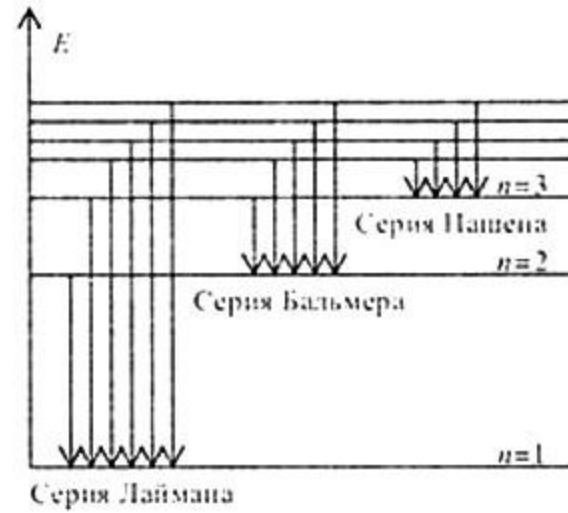
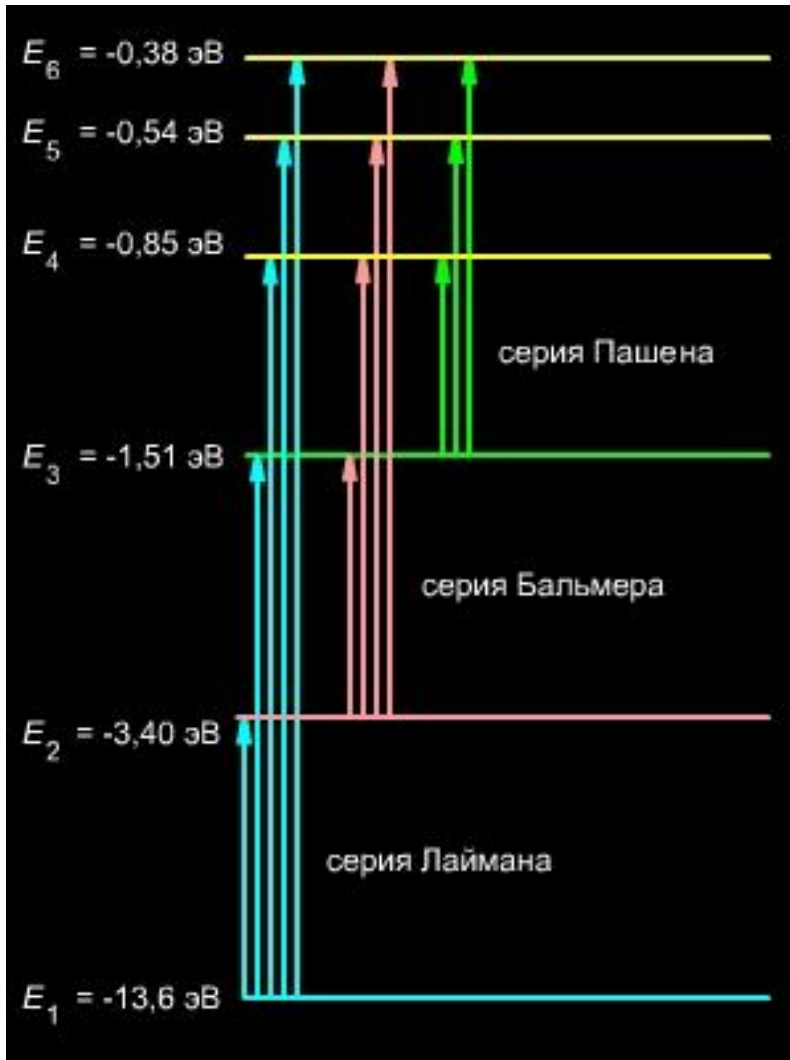
В этой формуле $m = 1$ для серии *Лаймана*, 2 для серии *Бальмера* и т.д. При заданном m число n принимает все целые значения, начиная с $m+1$.

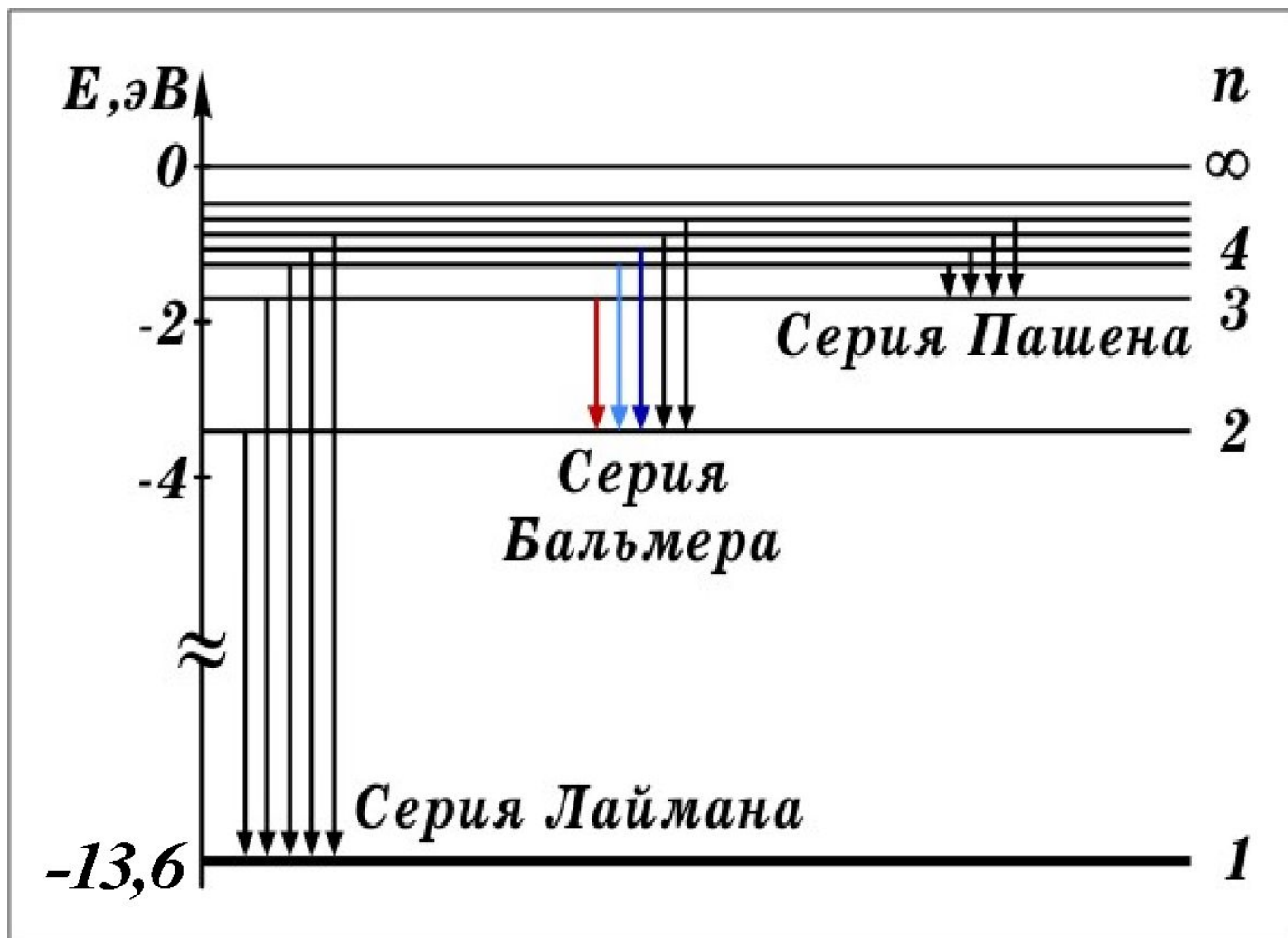
Приведенные формулы подобраны эмпирически и долго не имели теоретического обоснования, хотя и были подтверждены экспериментально с высокой точностью.

Простой вид формул, универсальность постоянной Ридберга свидетельствуют о глубоком физическом смысле найденных закономерностей, открыть которые в рамках классической физики оказалось невозможным.

Серия Лаймана	$\nu = R'' \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 2, 3, 4, \dots$
Серия Бальмера	$\nu = R'' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 3, 4, 5, \dots$
Серия Пашена	$\nu = R'' \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 4, 5, 6, \dots$
Серия Брэкета	$\nu = R'' \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 5, 6, 7, \dots$
Серия Пфунда	$\nu = R'' \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 6, 7, 8, \dots$

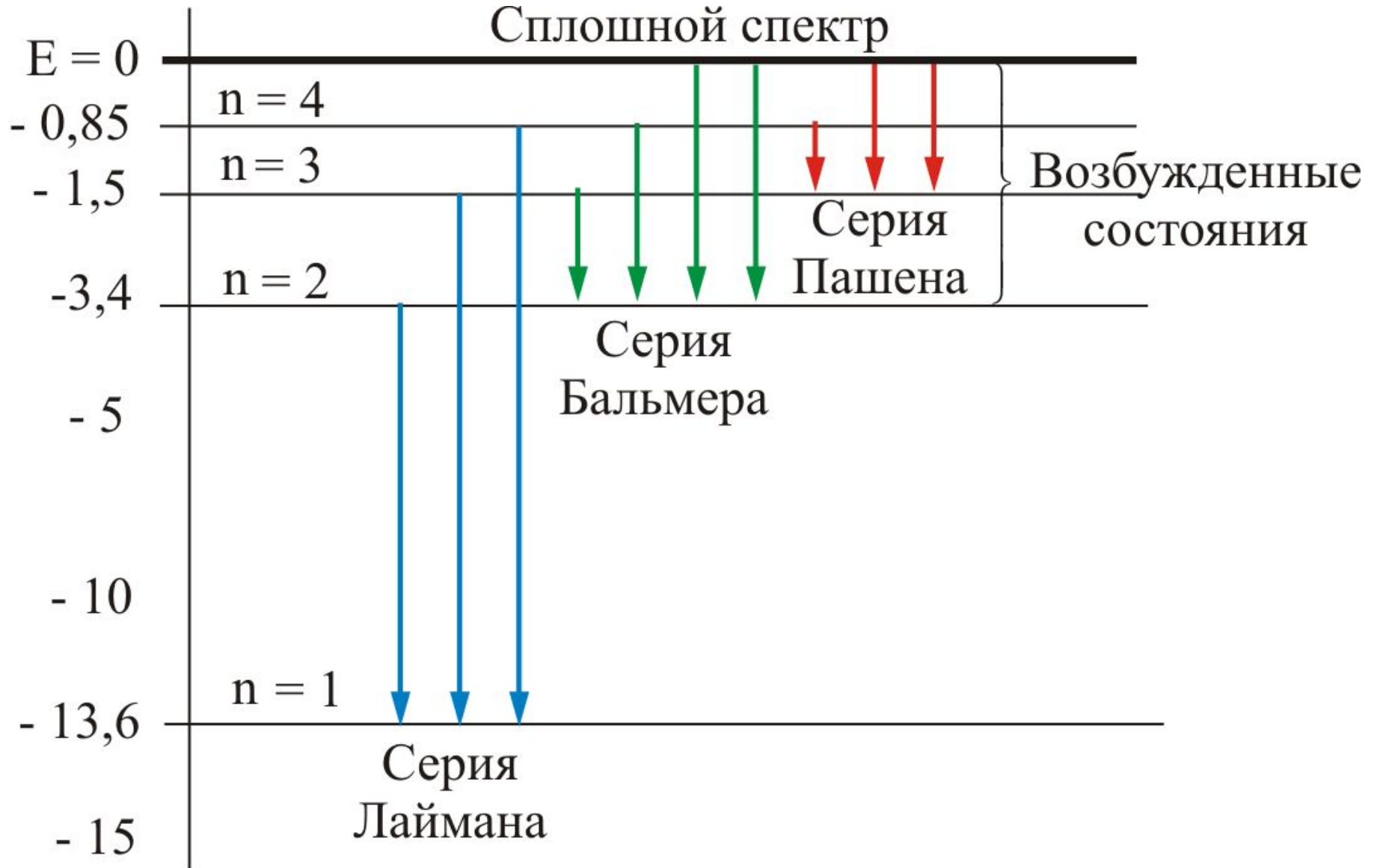
АТОМНЫЕ СПЕКТРЫ





H





ПОСТУЛАТЫ БОРА

Нильс Бор (датский физик), 1913 год - попытка построить качественно новую – квантовую – теорию атома.

Цель Бора: создать теорию, которая связала бы в единое целое эмпирические закономерности линейчатых спектров, устойчивость ядерной модели атома Резерфорда и квантовый характер излучения и поглощения света.

Основа теории Бора - два постулата:

1) Существуют стационарные состояния атома с соответствующими дискретными значениями энергии W_1, W_2, \dots, W_n , причем в этих состояниях атом не излучает и не поглощает энергию. В стационарных состояниях атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь дискретные квантованные значения момента импульса, удовлетворяющие условию: $m_e v r_n = n \hbar$ ($n = 1, 2, 3$),

v - скорость электрона на n -ой орбите с радиусом r_n .

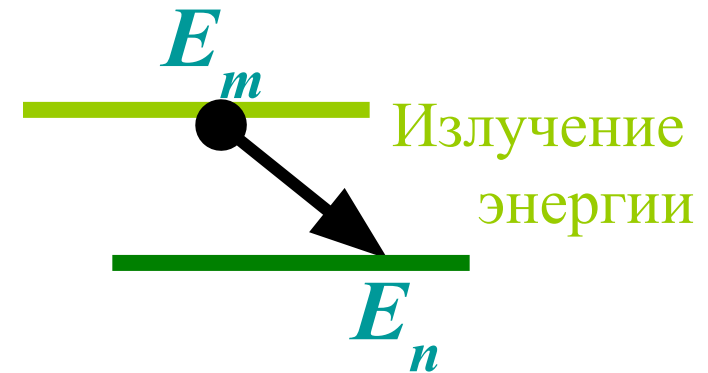
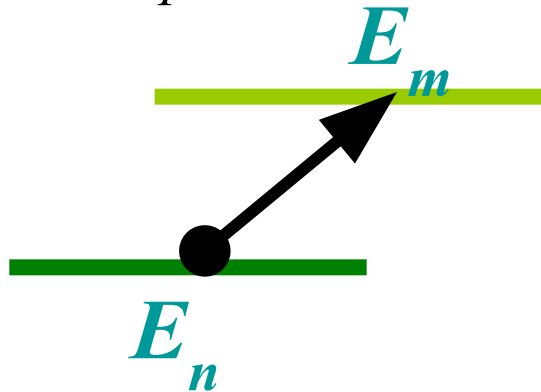
n – главное квантовое число.

2) поглощение и испускание энергии (излучение) атомом происходит скачкообразно при его переходах из одного стационарного состояния в другое. Частота ω_{mn} испускаемого или поглощаемого атомом света при переходах определяется формулой:

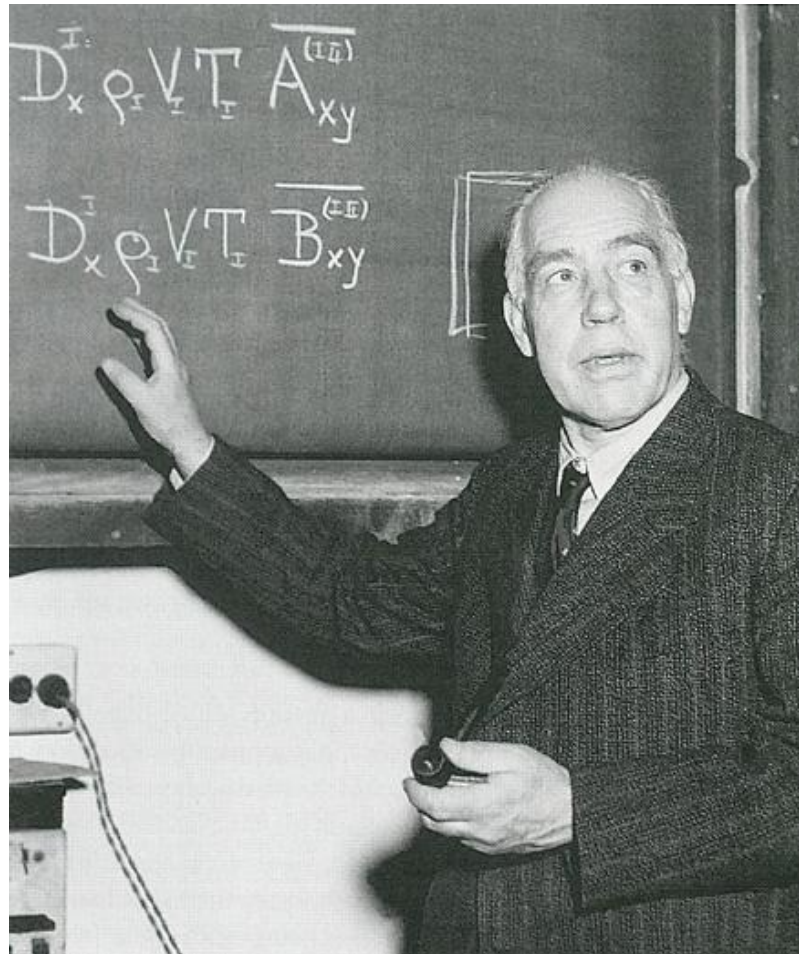
$$\omega_{mn} = \frac{W_m - W_n}{\hbar} \quad (\text{правило частот Бора}),$$

W_m и W_n - энергии атома в m и n - состояниях, \hbar - постоянная Планка.

Поглощение
энергии

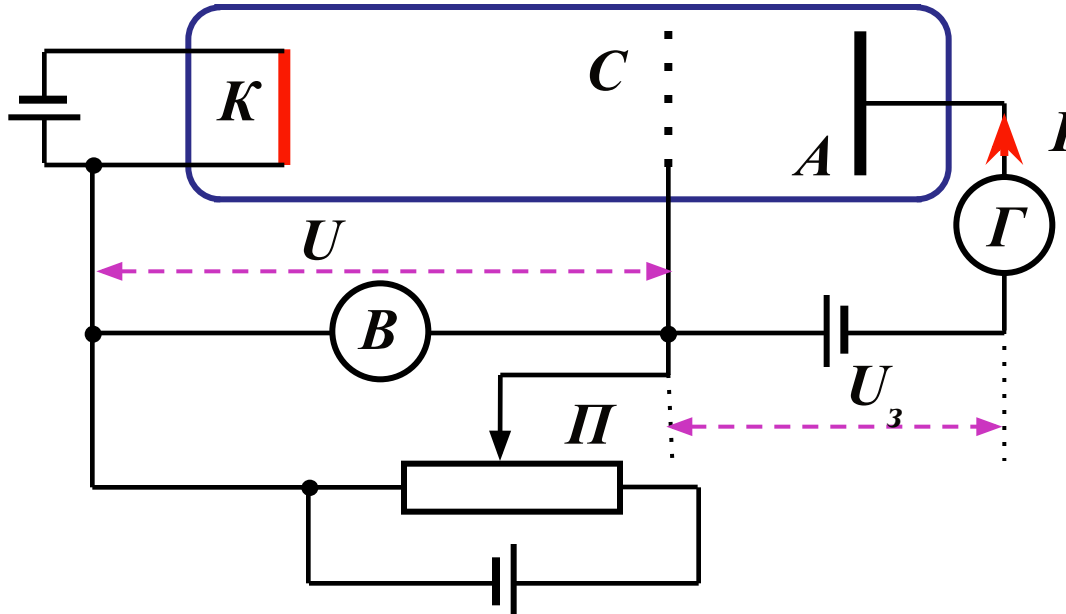


Постулат Бора о наличии дискретных энергетических уровней у атомов подтверждается многими экспериментами, в частности, опытами Франка и Герца (1913-1914 гг).



Нильс Хёнрик Давид Бор (1885 — 1962) датский физик-теоретик и общественный деятель, один из создателей современной физики. Лауреат Нобелевской премии по физике (1922).

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

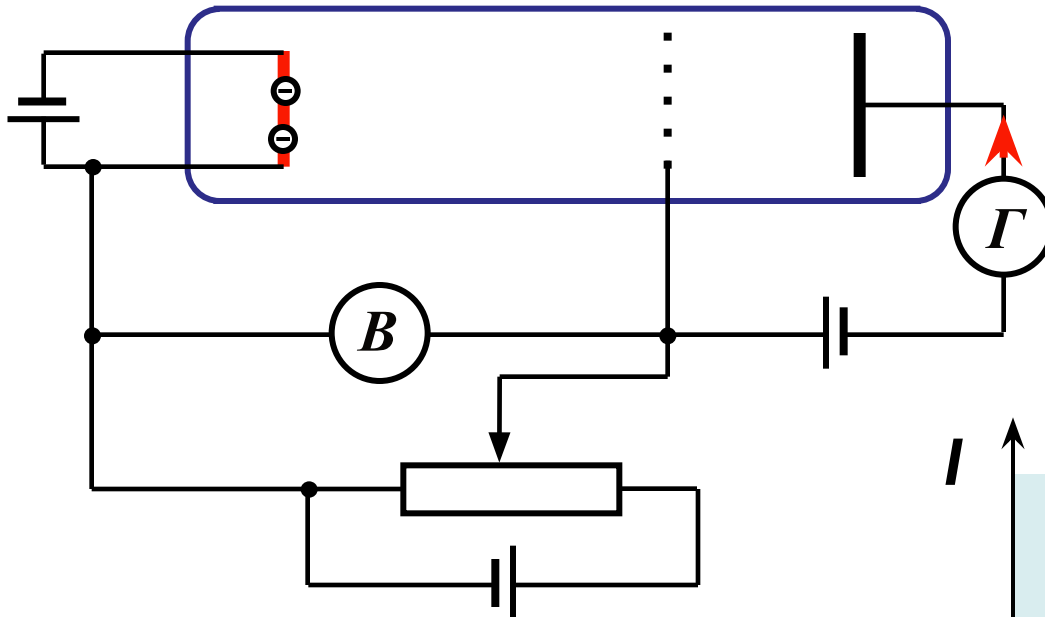
Схема опыта (1913 г)*K* - катод*A* - анод*C* - сетка*П* - потенциометр*B* - вольтметр*Г* - гальванометр

U - ускоряются разностью потенциалов между катодом и сеткой

U_3 - тормозящая разность потенциалов между сеткой и анодом

I - анодный ток

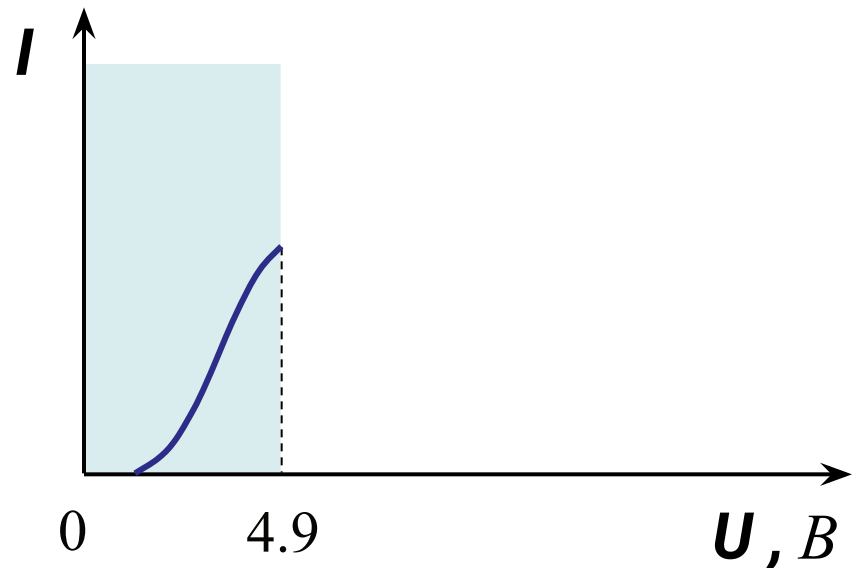
ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Результаты опыта

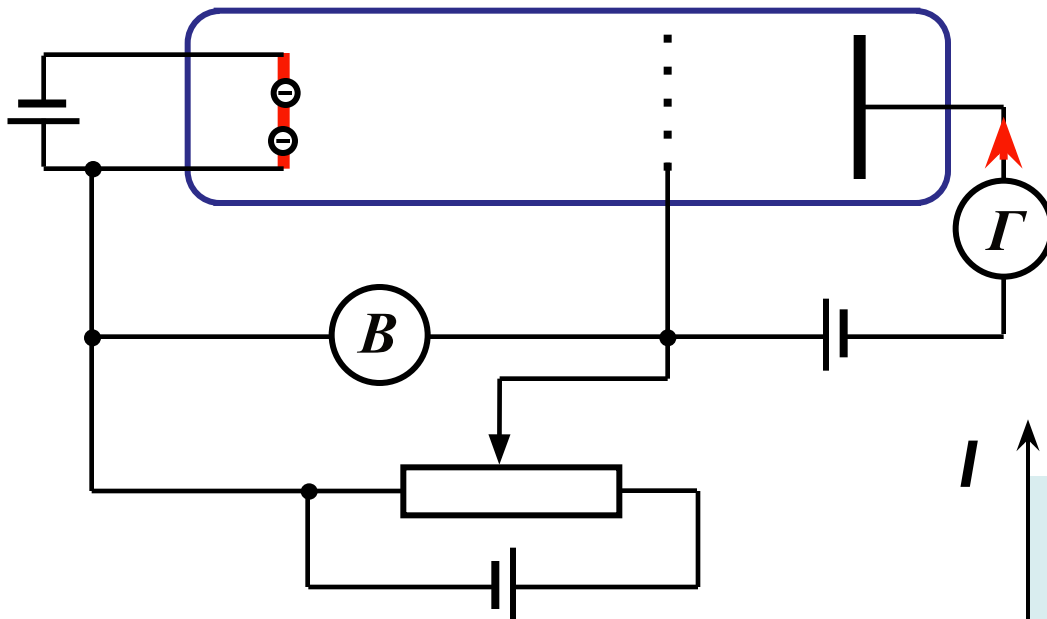
При $U < 4.9$ В кинетическая энергия электронов $W_k < 4.9$ эВ, столкновения электронов с атомами ртути упругие. Ток плавно нарастает.

Исследовалась зависимость анодного тока от разности потенциалов между катодом и сеткой.

$$1) \quad U_3 = 0.5 \text{ В}, \\ 0.5 \text{ В} < U < 4.9 \text{ В}$$



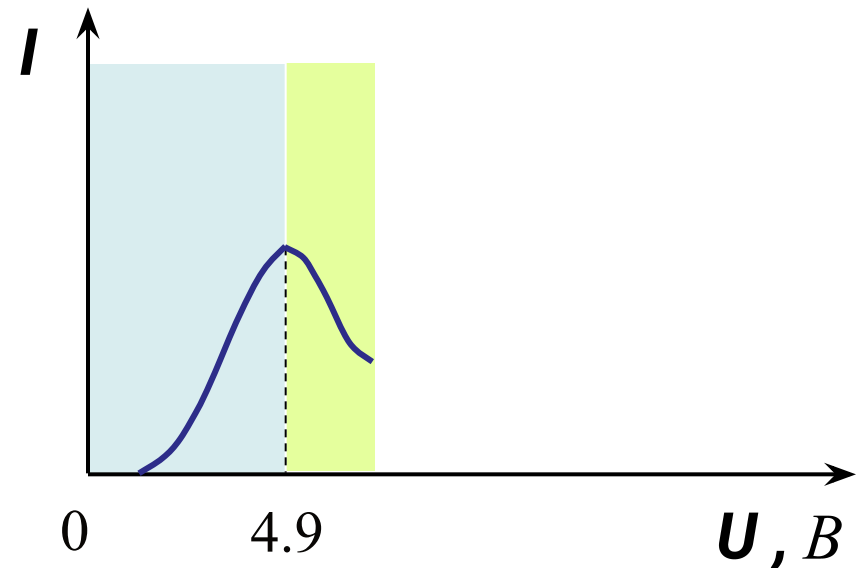
ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Результаты опыта

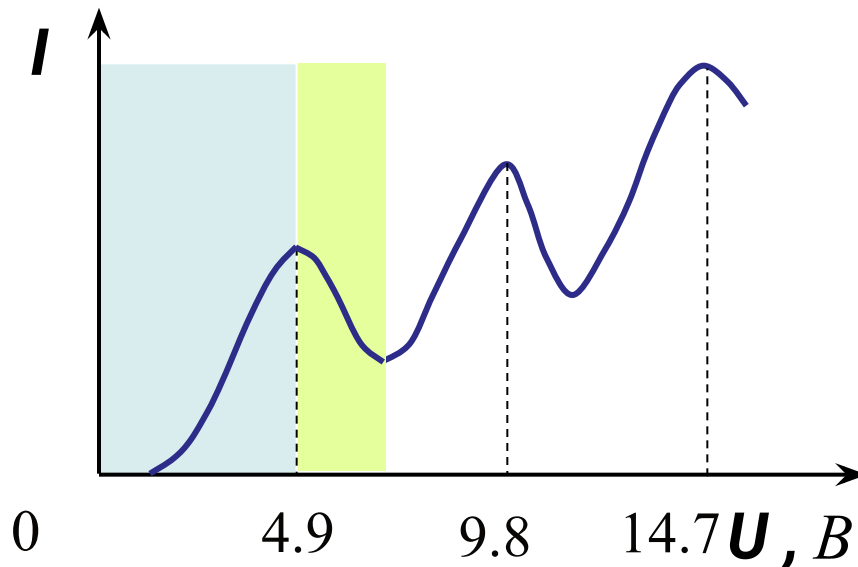
При $U \geq 4.9$ В кинетическая энергия электронов $W_k \geq 4.9$ эВ, столкновения электронов с атомами ртути с большой вероятностью становятся неупругими.

$$2) \quad U_3 = 0.5 \text{ В}, \\ U > 4.9 \text{ В}$$

Электроны отдают часть энергии атомам, их энергия уменьшается, снижается анодный ток.



ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Результаты опыта

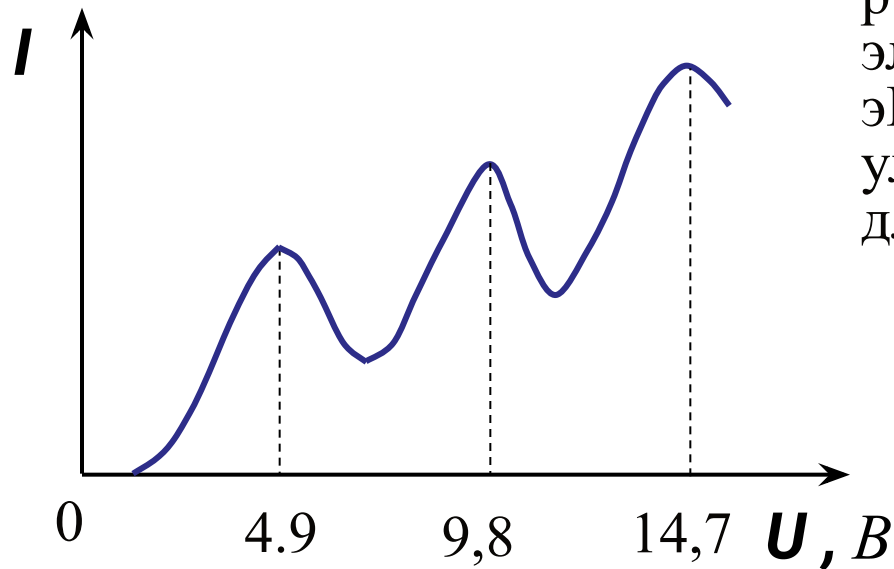
При значениях U , кратных 4.9 В электроны могут несколько раз испытывать неупругие столкновения, отдавая каждый раз по 4.9 В атому ртути.

Это приводит к резкому спаду тока при U , кратных 4.9 В.

Атомы, получившие при соударении с электронами энергию $W_k = 4.9$ эВ или кратную ей, переходят в возбужденное состояние, из которого они спустя время порядка 10^{-8} с, возвращаются в основное состояние, излучая фотон с частотой $\omega = W_k / \hbar$

По известному значению W_k можно вычислить длину волны излучения: $\lambda = hc / W_k$.

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

Результаты опыта

Если теория верна, то атомы ртути, бомбардируемые электронами с энергией $W_k = 4.9$ эВ, должны являться источником ультрафиолетового излучения с длиной волны около 255 нм.

В опыте такая линия была обнаружена Комптоном (1922-1923г).

Обнаружить другие высшие энергетические уровни возбуждения атома (6.7 эВ, 8.3 эВ) в данном опыте сложно.

Таким образом, опыт Франка и Герца подтвердил постулаты Бора и показал, что 4.9 В – наименьшая возможная порция энергии (наименьший квант энергии), которая может быть поглощена атомом ртути в основном энергетическом состоянии, что и является проявлением дискретности уровней энергии в атоме.

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА



Густав Людвиг Герц (1887 — 1975) — немецкий физик.
Племянник знаменитого *Генриха Герца*.



James Franck.

Джеймс Франк (1882 — 1964) — немецко-американский физик.

Нобелевская премия по физике в 1925 г.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

Постулаты, выдвинутые Бором, позволили рассчитать спектр атома водорода и водородоподобных систем, т.е. систем, состоящих из ядра с зарядом **Ze** и одного электрона, а также теоретически вычислить постоянную Ридберга.

В соответствии с теорией Бора рассмотрим движение электрона в водородоподобной системе, ограничиваясь круговыми стационарными орбитами.

Для круговых орбит условие квантования Бора выглядит следующим образом:

$$m_e v r_n = n \hbar$$

$m_e v r_n$ - момент импульса электрона относительно ядра атома.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

Полная квантованная механическая энергия электрона в поле неподвижного ядра в водородоподобном атоме равна:

$$W_n = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} + \frac{m_e v^2}{2}$$

Первый член – потенциальная энергия взаимодействия электрона с зарядом $-e$, с ядром, заряд которого Ze ; второй член – кинетическая энергия вращающегося по орбите электрона.

В соответствии со вторым законом Ньютона

$$\frac{m_e v^2}{r_n} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2}$$

Здесь v^2/r_n - центростремительное ускорение электрона;
 $Ze^2/4\pi\epsilon_0 r_n^2$ - кулоновская сила притяжения электрона к ядру.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

Из последнего уравнения следует:

$$\frac{m_e v^2}{r_n} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{m_e v^2}{2} = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

Подставим это выражение в соотношение для полной механической энергии электрона, получим:

$$W_n = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} + \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \quad \Rightarrow \quad W_n = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

Преобразуем полученное выше уравнение следующим образом.

Используя условие квантования Бора $m_e v r_n = n\hbar$, получим соотношение для r_n . Для этого в уравнении избавимся от скорости.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

$$W_n = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{m_e v^2}{2} = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \\ m_e v r_n = n\hbar \end{array} \right. \Rightarrow v = \frac{n\hbar}{m_e r_n} \Rightarrow \frac{m_e}{2} \left(\frac{n\hbar}{m_e r_n} \right)^2 = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

После преобразований получим:

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

Используя выражения для r_n , запишем формулу для полной механической энергии электрона в виде

$$W_n = -\frac{Z^2 e^4 m_e}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

Боровский радиус атома водорода



$$W_n = -\frac{Z^2 e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

$$r_n = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2}{m_e Z e^2} n^2$$

$$r_1 = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} \cong 0.529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

Частота ω_{mn} испускаемого или поглощаемого атомом света при переходах в соответствии с постулатом Бора выражается формулой

$$\omega_{mn} = \frac{W_m - W_n}{\hbar}$$

Используя выражение для W_n , запишем

$$\omega_{mn} = -\frac{Z^2 e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^3} \frac{1}{m^2} + \frac{Z^2 e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^3} \frac{1}{n^2} = \frac{Z^2 e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

$$\omega_{mn} = \frac{Z^2 e^4 m_e}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = RZ^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Поскольку $\frac{1}{\lambda} = \frac{\omega}{2\pi c}$, перепишем формулу в виде

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = \frac{Z^2 e^4 m_e}{64\pi^3 c \varepsilon_0^2 \hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = RZ^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

В полученном выражении
- постоянная Ридберга.

$$R = \frac{e^4 m_e}{64\pi^3 c \varepsilon_0^2 \hbar^3} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$$

Значение R , найденное по этой формуле, хорошо совпадает с его значением, найденным экспериментально.

Таким образом, Бор, используя квантовую постоянную \hbar , показал, что эта величина определяет также и движение электронов в атоме, законы которого существенно отличаются от законов классической механики.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БОРОВСКАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА

Теория Бора сыграла большую роль в развитии квантовой механики. Однако, она не лишена недостатков:

1. Она внутренне противоречива: с одной стороны, использовалась механика Ньютона, с другой – привлекались чуждые этой механике искусственные правила квантования.
2. «Полуклассическая» или «полуквантовая» теория Бора не смогла также ответить на вопрос, как движется электрон при переходе с одного уровня энергии на другой.
3. Теория не позволяла описывать атомы с числом электронов больше единицы.

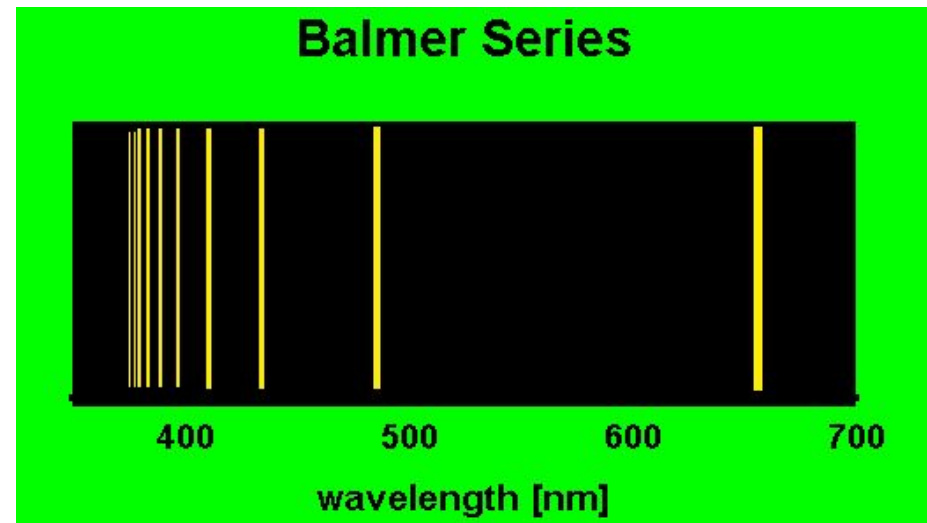
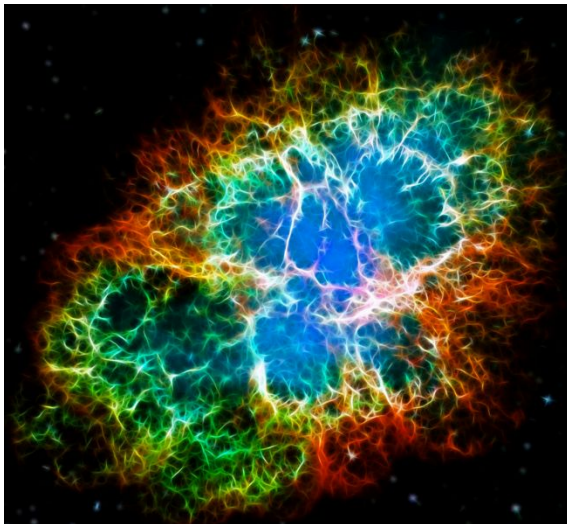
Дальнейшее развитие теории микрочастиц привело к убеждению, что движение электрона в атоме нельзя описывать с помощью законов классической механики и что необходима новая теория.

Такая (квантовая) теория была создана к 1927 году усилиями многих ученых, среди которых выдающуюся роль сыграли В. Гейзенберг, Э.Шрёдингер, М.Борн, П.Дирак.

4 июля 1054 в созвездии Тельца вспыхнула яркая звезда замеченная и описанная китайскими астрологами. В 1731 году на этом месте английский астроном Джон Бевис обнаружил туманность. В 1758 году ее заново открыл французский астроном Шарль Мессье и включил в свой каталог туманностей как М1.

Туманность более известна под названием “Крабовидная туманность”. В 1913 году Весто Слайфер получил первые спектры М1. Линии излучения, которые были видны на фоне непрерывного спектра, оказались раздвоены.

Линии расщепляются из-за излучения атома в сильном магнитном поле – эффект Зеемана, или в сильном электрическом поле – эффект Штарка (Весто Слайфер думал что это эффект Штарка). Что было причиной раздвоения линий излучения в Крабе?





ВВС. Atom.

Год выхода: 2007 Жанр: Научно-популярный

Рассказчик: Джим Аль-Халили

Преподаватель университета обратился к сэру Эрнесту Резерфорду, президенту Королевской Академии и лауреату Нобелевской премии по физике за помощью. Он собирался поставить самую низкую оценку по физике одному из своих студентов, в то время как тот утверждал, что заслуживает высшего балла. Оба — преподаватель и студент — согласились положиться на суждение третьего лица, незаинтересованного арбитра. Выбор пал на Резерфорда. Экзаменационный вопрос гласил: «Объясните, каким образом можно измерить высоту здания с помощью барометра?»

Ответ студента был таким: «Нужно подняться с барометром на крышу здания, спустить барометр вниз на длинной верёвке, а затем втянуть его обратно и измерить длину верёвки, которая и покажет точную высоту здания».

Случай был и впрямь сложный, так как ответ был абсолютно полным и верным! С другой стороны, экзамен был по физике, а ответ имел мало общего с применением знаний в этой области. Резерфорд предложил студенту попытаться ответить ещё раз. Дав ему шесть минут на подготовку, он предупредил его, что ответ должен демонстрировать знание физических законов. По истечении пяти минут студент так и не написал ничего в экзаменационном листе. Резерфорд спросил его, сдаётся ли он, но тот заявил, что у него есть несколько решений проблемы, и он просто выбирает лучшее. Заинтересовавшись, Резерфорд попросил молодого человека приступить к ответу, не дожидаясь истечения отведённого срока. Новый ответ на вопрос гласил: «Поднимитесь с барометром на крышу и бросьте его вниз, замеряя время падения. Затем, используя формулу, вычислите высоту здания». Тут Резерфорд спросил своего коллегу преподавателя, доволен ли он этим ответом. Тот, наконец, сдался, признав ответ удовлетворительным. Однако студент упоминал, что знает несколько ответов, и его попросили открыть их.

— Есть несколько способов измерить высоту здания с помощью барометра, — начал студент. — Например, можно выйти на улицу в солнечный день и измерить высоту барометра и его тени, а также измерить длину тени здания. Затем, решив несложную пропорцию, определить высоту самого здания.

— Неплохо, — сказал Резерфорд. — Есть и другие способы?

— Да. Есть очень простой способ, который, уверен, вам понравится. Вы берёте барометр в руки и поднимаетесь по лестнице, прикладывая барометр к стене и делая отметки. Сосчитав количество этих отметок и умножив его на размер барометра, вы получите высоту здания. Вполне очевидный метод.

— Если вы хотите более сложный способ, — продолжал он, — то привяжите к барометру шнурок и, раскачивая его, как маятник, определите величину гравитации у основания здания и на его крыше. Из разницы между этими величинами, в принципе, можно вычислить высоту здания. В этом же случае, привязав к барометру шнурок, вы можете подняться с вашим маятником на крышу и, раскачивая его, вычислить высоту здания по периоду прецессии. — Наконец, — заключил он, — среди множества прочих способов решения данной проблемы лучшим, пожалуй, является такой: возьмите барометр с собой, найдите управляющего и скажите ему: «Господин управляющий, у меня есть замечательный барометр. Он ваш, если вы скажете мне высоту этого здания».

Тут Резерфорд спросил студента, неужели он действительно не знал общепринятого решения этой задачи. Тот признался, что знал, но сказал при этом, что сыт по горло школой и колледжем, где учителя навязывают ученикам свой способ мышления.

Студент этот был Нильс Бор (1885 – 1962), датский физик, лауреат Нобелевской премии 1922 г.

ПРИМЕРЫ ЗАДАЧ

1. Определить длину волны третьей линии серии Бальмера в спектре атома водорода (в нм).

Дано:

$$i = 3$$

$$n = 2$$

$$R = 1.097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$$

$$\lambda = ?$$

Решение:

Спектр излучения атома водорода линейчатый. Частоты линий описываются формулой Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right]$$

Где R - постоянная Ридберга

$$R = 1.097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$$

m и n – натуральные числа;

$m = n + i$; т.к. по условию задачи дана серия Бальмера то $n = 2$, т.е.

$$m = 3 + 2 = 5$$

$$\lambda = \frac{1}{R \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right]}$$

$$\lambda = 434 \text{ нм}$$