ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Лекция 32.

Тема: Физика атома.

Учебник:

Трофимова Т.И. Курс физики : учеб. пособ. для вузов / Т. И. Трофимова. - М.: Академия, 2007.- с. 378-388.

Курочкин А.Р.
к.ф.-м.н.

Спектр - распределение интенсивности электромагнитного излучения по частотам или по длинам волн.

Типы спектров

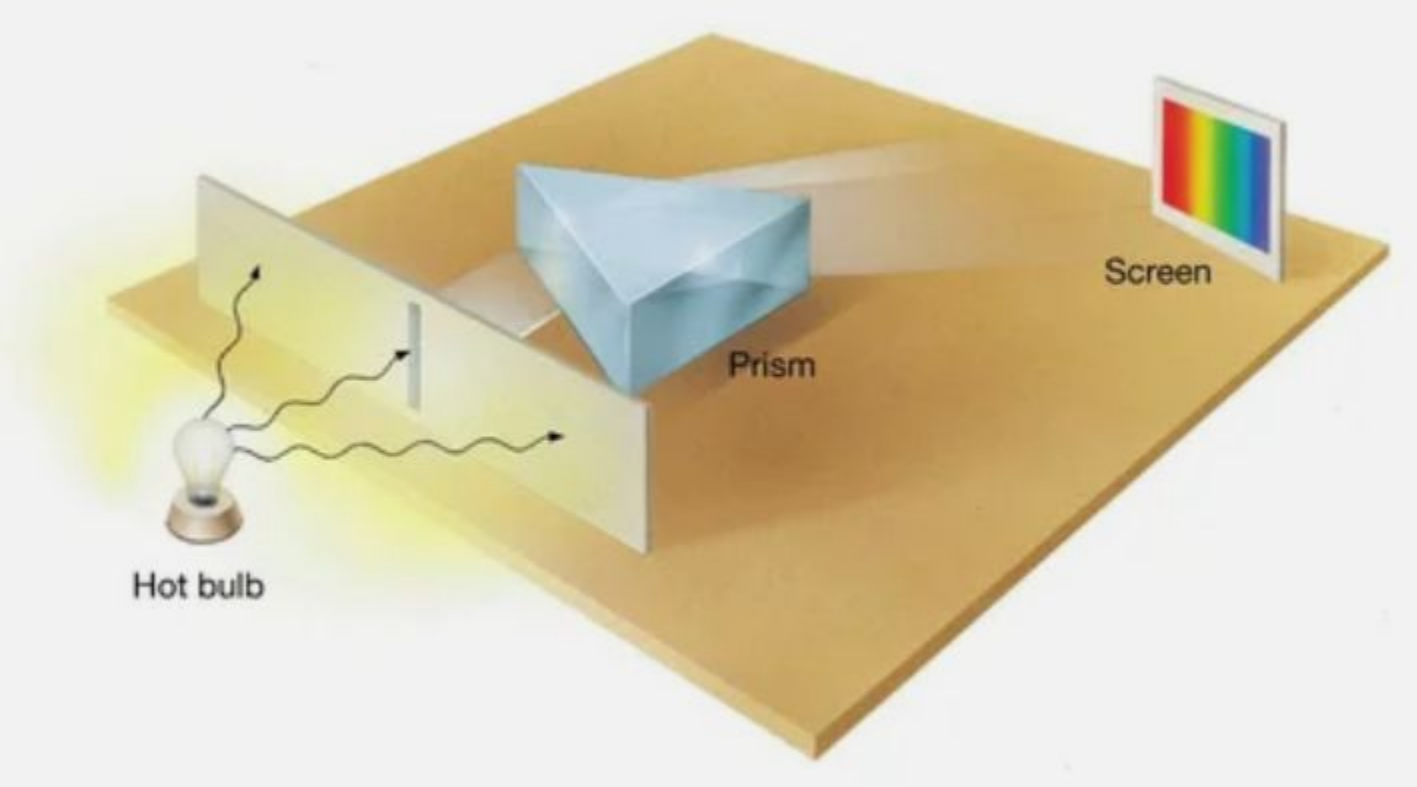
Спектры испускания | **Спектры поглощения**

I. Спектры испускания

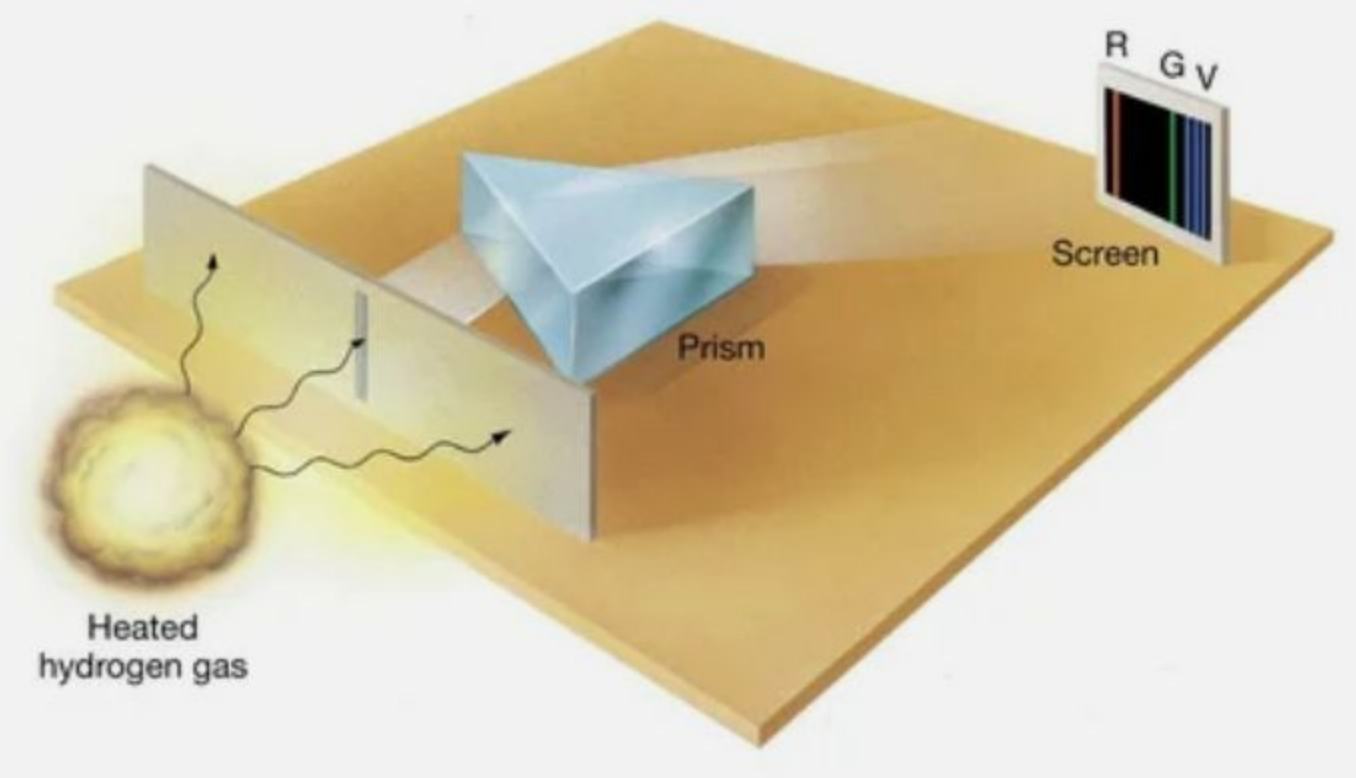
- Возбуждённые электроны переходят из состояния большей энергии в состояние меньшей энергии с испусканием фотона.
- Разница энергий уровней определяет энергию испущенного фотона, и следовательно его частоту.

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

Получение сплошного спектра испускания



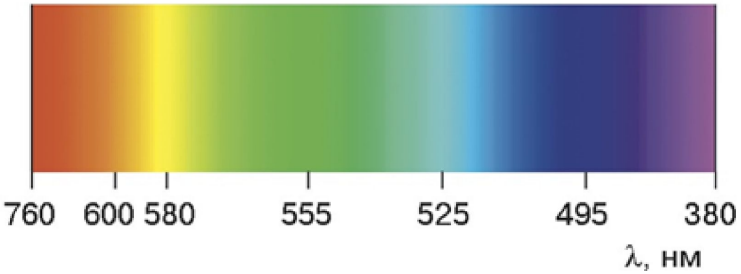
Получение линейчатого спектра испускания



1. ***Сплошной*** - это спектр, содержащий все длины волны определенного диапазона от красного и до фиолетового.

Сплошной спектр излучают:

- нагретые твердые и жидкие вещества,
- газы, нагретые под большим давлением.



2. ***Линейчатый*** - это спектр, испускаемый газами, парами малой плотности в **атомарном состоянии**. Состоит из отдельных линий разного или одного цвета, имеющих разные расположения.

Каждый атом излучает набор электромагнитных волн определенных частот. Поэтому каждый химический элемент имеет свой спектр.

3. ***Полосатый*** - это спектр, который испускается газом в молекулярном состоянии.

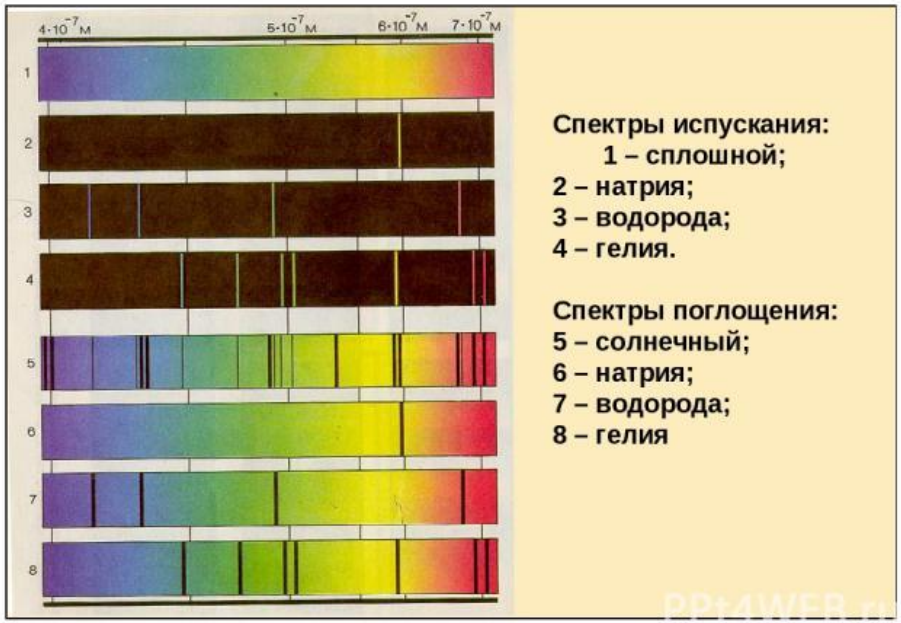
II. Спектры поглощения

Спектры поглощения получают, пропуская свет от источника, дающего сплошной спектр, через вещество, атомы которого находятся в невозбужденном состоянии.

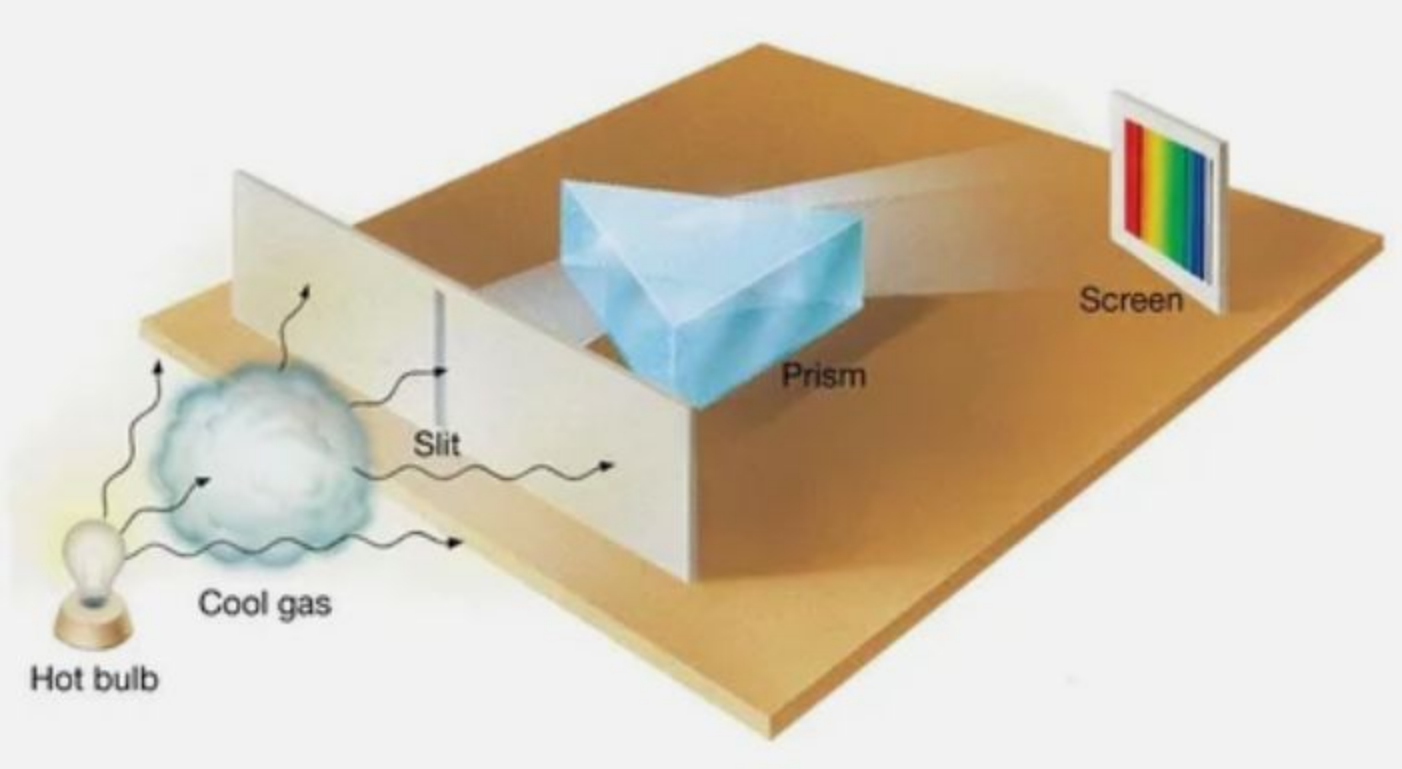
Спектр поглощения - это совокупность частот, поглощаемых данным веществом.

Согласно **закону Кирхгофа**, вещество поглощает те линии спектра, которые и испускает, являясь источником света.

Спектры испускания и поглощения



Получение линейчатого спектра поглощения

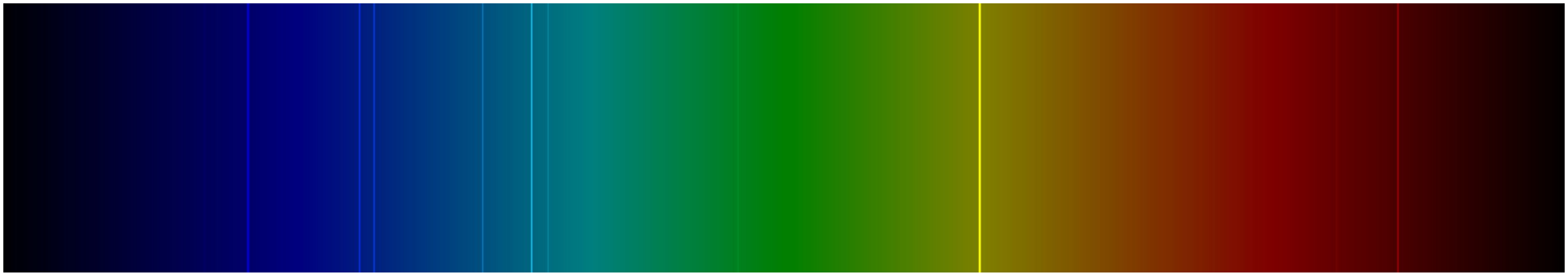


СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Метод определения качественного и количественного состава вещества по его спектру называется **спектральным анализом**.

- Количественное содержание элемента в соединении определяется путем измерения **яркости спектральных линий**.
- Зная длины волн, испускаемых различными парами, можно установить наличие тех или иных элементов вещества.
- Этот метод очень чувствительный. Можно обнаружить элемент, масса которого не превышает 10^{-10} г.
- С помощью спектрального анализа был изучен **состав звезд**.

Открытие Гелия



В **1868** г. французский астроном **Жансен** наблюдал в Индии полное солнечное затмение и спектроскопически исследовал хромосферу солнца.

- Он обнаружил в спектре солнца **яркую желтую линию**, обозначенную им D_3, которая не совпадала с желтой линией D натрия.
- Одновременно с ним эту же линию в спектре солнца увидел английский астроном Локьер, который понял, что она принадлежит неизвестному элементу. Локьер совместно с Франкландом, у которого он тогда работал, решил назвать новый элемент гелием (от греч.- гелиос, солнце).
- Затем новая желтая линия была обнаружена другими исследователями в спектрах "земных" продуктов; так, в 1881 г. итальянец Пальмиери обнаружил её при исследовании пробы газа, отобранного в кратере Везувия.

- Гелий **занимает второе место по распространённости во Вселенной** после водорода — около 23 % по массе.
- Практически весь гелий Вселенной **образовался в первые несколько минут после Большого Взрыва**, во время первичного нуклеосинтеза.
- В современной Вселенной почти весь новый гелий образуется в результате **термоядерного синтеза из водорода** в недрах звёзд.

- На Земле гелий редок.
- Гелий **образуется в результате альфа-распада** тяжёлых элементов.
- Часть гелия, возникшего при альфа-распаде и просачивающегося сквозь породы земной коры, захватывается природным газом, концентрация гелия в котором может достигать 7 % от объёма и выше.

Было замечено, что линии в спектрах атомов расположены не беспорядочно, а объединяются в группы - **серии линий**.

Отчетливее всего это обнаруживается в спектре атома — **водорода**.

H_α H_β H_γ H_δ

Обозначение	H_α	H_β	H_γ	H_δ	H_ε	H_ζ	H_η
Длина волны, нм	656,3	486,1	434,1	410,2	397,0	388,9	383,5

Первые 4 линии серии находятся в видимом диапазоне, остальные — в ультрафиолетовом

Бальмер обнаружил, что длины волн **в видимой области спектра** атома водорода могут быть точно представлены формулой

Бальмер Иоганн Якоб (1825 – 1898)

$$\frac{1}{\lambda} = R'\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (n = 3, 4, 5, \ldots),$$

R' **=1,10·10^7 м$^{-1}$ – постоянная Ридберга.**

$$\nu = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (n = 3, 4, 5, \ldots),$$

R=R' ·c **= 3,29·10^{15} с$^{-1}$ – постоянная Ридберга.**

Данные формулы образуют **серию Бальмера.**

С увеличением n линии серии **сближаются**; значение $n=\infty$ определяет границу серии, к которой со стороны бо́льших частот примыкает **сплошной спектр**.

В XX веке было обнаружено ещё несколько серий.

Серия Лаймана – описывает **ультрафиолетовую** область спектра:

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

В **инфракрасной** области спектра:

серия Пашена

$$\nu = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (n = 4, 5, 6, \ldots),$$

серия Брэкета

$$\nu = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (n = 5, 6, 7, \ldots),$$

серия Пфунда

$$\nu = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (n = 6, 7, 8, \ldots).$$

E_n,эВ
$n = \infty$
–0,54
5
–0,85
4
–1,51
3
Серия Пашена
–3,39
2
Серия Бальмера
–13,6
1
Серия Лаймана

Все вышеперечисленные серии в **спектре атома водорода** могут быть описаны формулой – **обобщённой формулой Бальмера**:

$$\nu = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (n = 2, 3, 4, \ldots)$$

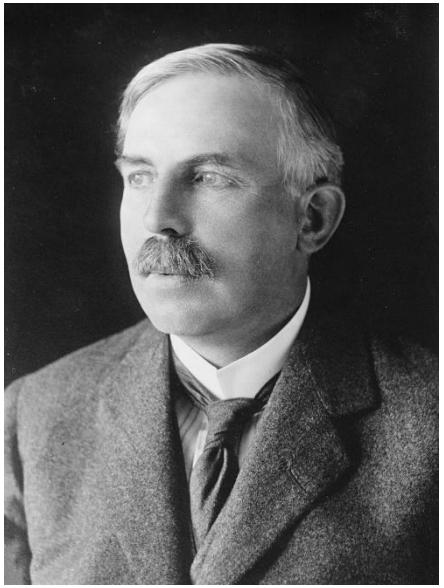
m=1,2,3,4,5,6 (**определяет серию**);

n принимает целые значения, начиная с *m+1* (определяет **отдельные линии** этой серии).

Классическая физика
была не в состоянии объяснить вышеприведённые эмпирические формулы.

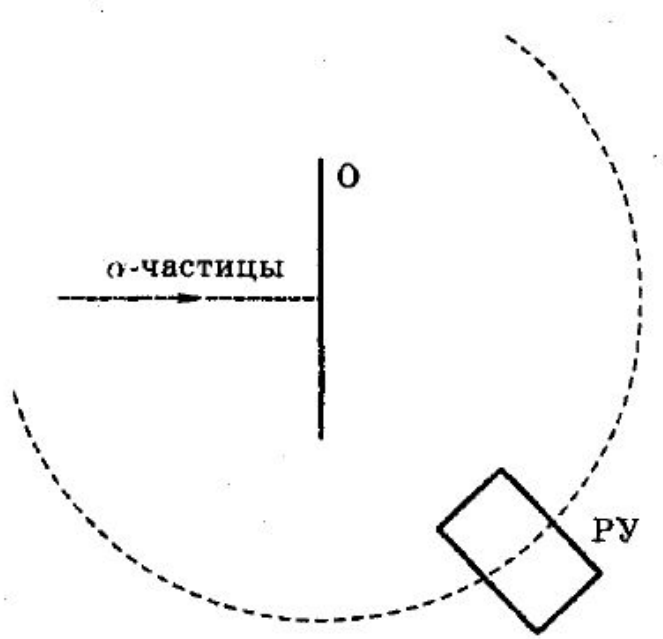
Ядерная (планетарная) модель атома

***α*-частицы** – **положительно заряженная частица**, образованная **двумя протонами** и **двумя нейтронами**, **ядро атома гелия-4**.



Эрнест Резерфорд
1871 - 1937

1911 год. Эрнест Резерфорд. Суть опыта: источник создаёт узкий пучок ***α*-частиц**, который воздействует на образец О.



О – образец – **тонкая металлическая фольга**;

РУ – регистрирующее устройство, которое подсчитывает число *α*-частиц, рассеянных образцом за единицу времени под тем или иным углом по отношению к линии падения.

Результаты опыта

1. Подавляющее число ***α*-частиц** проходит через образец-фольгу, почти **не испытывая** отклонения.

2. Остальные ***α*-частицы** испытывают отклонения, причём некоторая часть этих частиц **отклоняется на очень большие углы, доходящие до 180°**.

- Была обнаружена **неоднородность вещества**.
- В основном оно «прозрачно» и не содержит объектов, способных помешать движению ***α*-частиц**.
- **Некоторые** небольшие части вещества весьма существенно влияют на движение ***α*-частиц**, даже **изменяя направление** их движения на **противоположное**.

Выводы Резерфорда

1. В центре атома расположено ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома и весь положительный заряд.

2. **«Вокруг ядра как планеты вокруг Солнца вращаются электроны»*.**

3. Атом электронейтрален, т.е. суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду ядра.

Достижения модели Резерфорда

1. Оценка **размера ядра атома** (его радиус ≈ **10^{-15} м**).

2. Оценка **заряда ядра**. Он оказался равен номеру химического элемента в таблице Менделеева. Этому же номеру равно и число **электронов в атоме**.

3. Оценка **размера атома** (его радиус ≈ **10^{-10} м**).

Недостатки модели Резерфорда

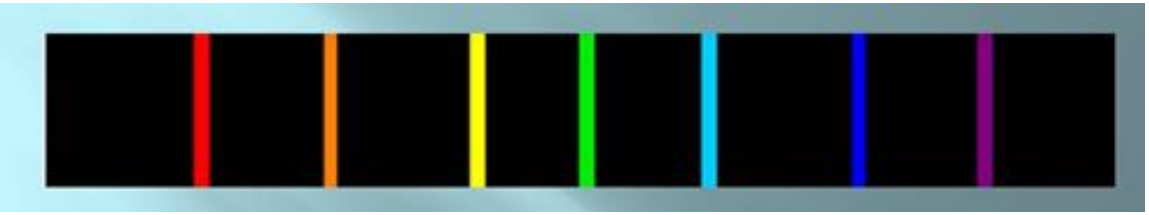
1. Если **электрон вращается вокруг ядра**, то он обладает **нормальным ускорением** (т.е. движется **ускоренно**). В этом случае он является источником **ЭМП**, а значит, будет **терять энергию** и со временем упадёт на ядро. И атом прекратит своё существование.

Но мы знаем, что **атомы стабильны**!

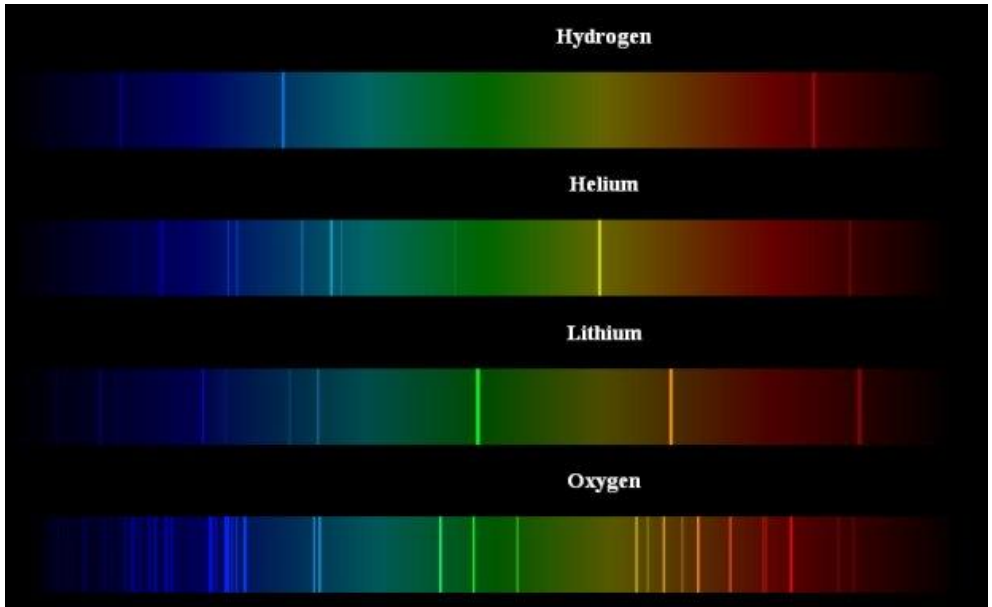
2. Значение нормального ускорения a_n зависит от двух величин – скорости v и радиуса окружности r. **Они могут меняться непрерывно.** Это означает, что и энергия, испущенная **атомами**, может быть любой. В этом случае спектры **атомов** должны быть сплошными.

Из опыта известно, что атомы имеют линейчатый спектр!

Линейчатый спектр



- состоит из отдельных линий разного или одного цвета, имеющих разные расположения;
- испускается газами, парами в атомарном состоянии;
- позволяет по спектральным линиям судить о химическом составе источника света



Важно!!!

На самом деле **электроны не вращаются** по орбитам как планеты солнечной системы вокруг Солнца.

Электрон при своём движении как бы **«размазан»** по всему объёму, образуя **электронное облако**, плотность которого характеризует вероятность нахождения электрона в различных точках объёма атома.

Квантовые числа ***n*** и ***l*** характеризуют размер и форму **электронного облака**, а квантовое число m_l – ориентацию электронного облака в пространстве.

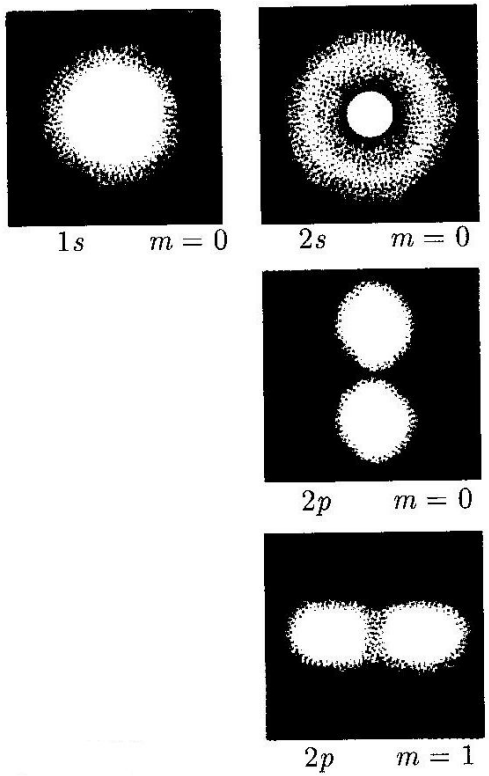
Описание состояний электрона

l=0 – s-состояние. Электрон называется **s-электроном**.

l=1 – p-состояние (***p*-электрон**).

l=2 – d-состояние (***d*-электрон**).

l=3 – f-состояние (***f*-электрон**).



Распределение **электронной плотности** (**формы электронного облака**) для состояний атома водорода при ***n*=1** и ***n*=2**.

Постулаты Бора

1913 год. Нильс Бор предпринял попытку построить **модель атома** на основе **квантовых представлений**.

Бор Нильс Хенрик Давид (1885 – 1962)

Его целью было связать **воедино**

1. **модель атома Резерфорда** (оставив её ядерной, но внеся в неё поправки),
2. **обобщённую формулу Бальмера**, квантовый характер излучения и поглощения света.

Постулаты Бора

1. Электрон в атоме может находиться в **стационарных состояниях**, в которых **электрон** движется по круговым орбитам вокруг ядра.

Электрон в стационарном состоянии имеет **дискретные квантовые значения момента импульса:**

$$m_e \upsilon_n r_n = n\hbar, \quad (n = 1, 2, 3 \ldots), \qquad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

m – масса электрона;
n – номер стационарной орбиты;
υ_n – скорость электрона на n-й стационарной орбите;
r_n – радиус n-й стационарной орбиты.

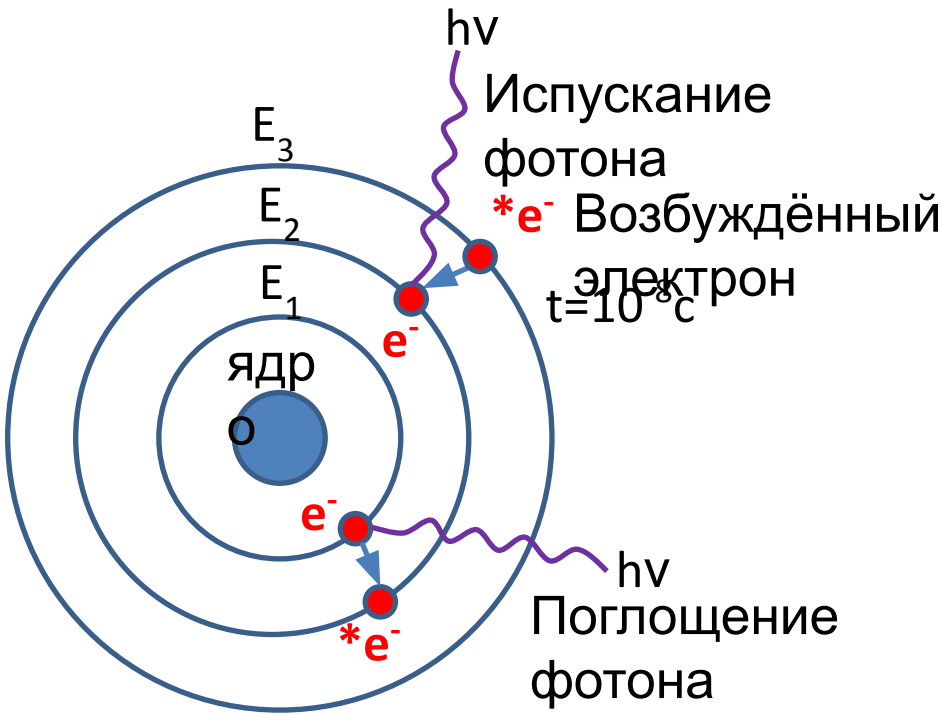
2. Находясь в стационарном состоянии электрон не излучает и не поглощает энергию.

3. При переходе электрона с более удалённой стационарной орбиты на менее удалённую он излучает, а при обратном переходе – поглощает квант энергии электромагнитного поля.

$$h\nu = E_n - E_m,$$

E_n – энергия электрона на орбите n;
E_m – энергия электрона на орбите m;
ν – частота волны света;
h – постоянная Планка.

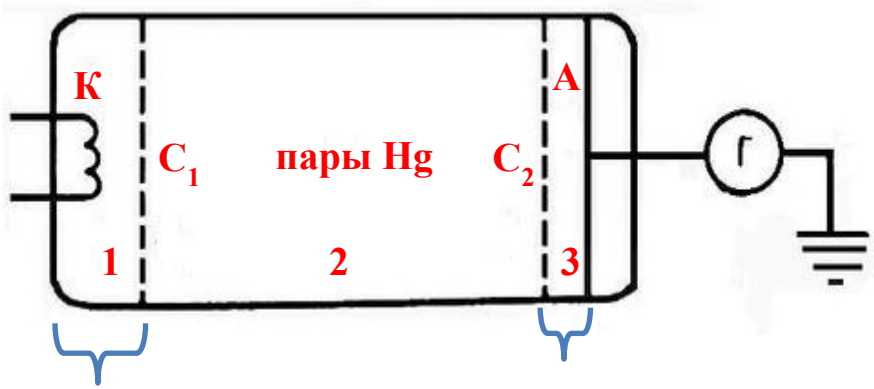
- При $E_m < E_n$ происходит **излучение фотона** (переход атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, т.е. переход электрона с более удалённой от ядра орбиты на более близлежащую).
- При $E_m > E_n$ происходит **поглощение фотона** (переход атома в состояние с большей энергией, т.е. переход электрона на более удалённую от ядра орбиту).

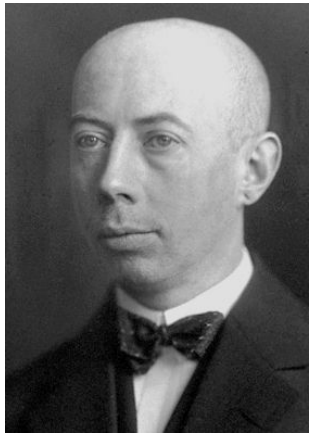


$$\nu = \frac{E_3 - E_2}{h}$$ - частота излучения

Опыт Франка и Герца

Франк Джеймс (1882-1964)





Герц Густав Людвиг (1887-1975)

- К катоду **К** и сетке **C_1** электровакуумной трубки, **наполненной парами Hg (ртути)**, прикладывается разность потенциалов ***U***, ускоряющая электроны, и снимается вольт-амперная характеристика.
- К сетке **C_2** и аноду **А** прикладывается замедляющая разность потенциалов.
- Ускоренные **в области 1** электроны испытывают соударения с атомами **Hg в области 2**.
- Если энергия электронов после соударения достаточна для преодоления замедляющего потенциала **в области 3**, то они попадут на анод.
- Следовательно, показания гальванометра **Г** зависят от потери электронами энергии при ударе.

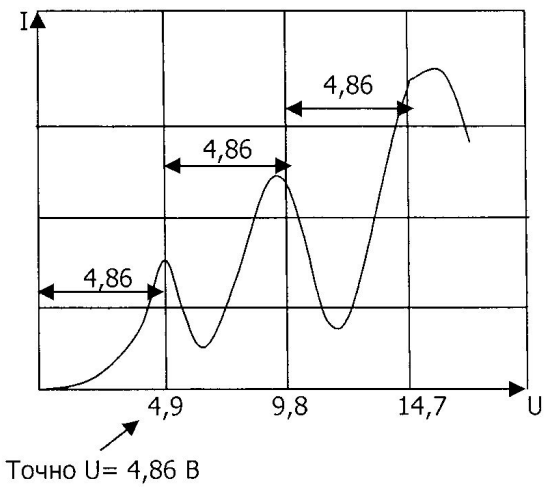
- Сила тока вначале монотонно возрастала, достигая максимума при ***U = 4,9В***, после чего с дальнейшим увеличением ***U*** резко падала, достигая минимума, и снова начинала расти.
- Максимумы силы тока повторялись при ***U***, равном **9,8**; ***14,7В*** и т. д.

Такой ход кривой объясняется тем, что **вследствие дискретности энергетических уровней атомы могут воспринимать энергию только порциями**:

$$\Delta E_1 = E_2 - E_1 \text{ либо } \Delta E_2 = E_3 - E_1 \text{ и т. д.,}$$

E_1, E_2, E_3 ... - энергия 1-го, 2-го и т.д. стационарных состояний.

1. До тех пор, пока **энергия электрона меньше** ΔE_1, соударения между электроном и атомом ртути носят **упругий характер**, причем, поскольку масса электрона во много раз меньше массы атома ртути, энергия электрона при столкновениях практически не изменяется. Часть, электронов попадает на сетку, остальные же, проскочив через сетку, достигают анода, создавая ток в цепи гальванометра G.

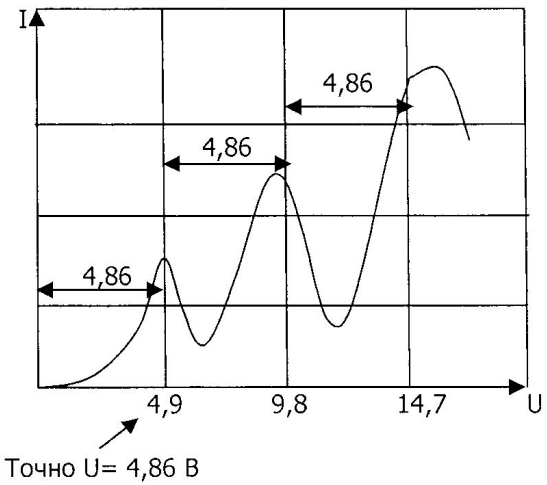


2. Когда энергия, накапливаемая электроном в промежутке катод-сетка, **достигает значения** ΔE_1 соударения становятся **неупругими** — электроны при ударах об атомы передают им энергию ΔE_1 и продолжают затем двигаться с меньшей скоростью.

Поэтому число электронов, достигающих анода, уменьшается.

Пример. При ***U = 5,3В*** электрон сообщает атому энергию, соответствующую ***4,9 В*** (первый потенциал возбуждения атома ртути), и продолжает двигаться с энергией ***0,4эВ***. Если даже такой электрон окажется между сеткой и анодом, он не сможет преодолеть задерживающее напряжение ***0,5В*** и будет возвращен обратно на сетку.

3. При напряжении, **превышающем** ***9,8 В***, электрон на пути катод — анод может дважды претерпеть неупругое соударение с атомами ртути, теряя при этом энергию ***9,8эВ***, вследствие чего сила тока ***I*** снова начнет уменьшаться. При еще большем напряжении возможны трехкратные неупругие; соударения электронов с атомами, что приводит к возникновению максимума при ***U=14,7В***, и т. д



Опыт Франка и Герца показал, что спектр поглощаемой атомом энергии не непрерывен, а дискретен!

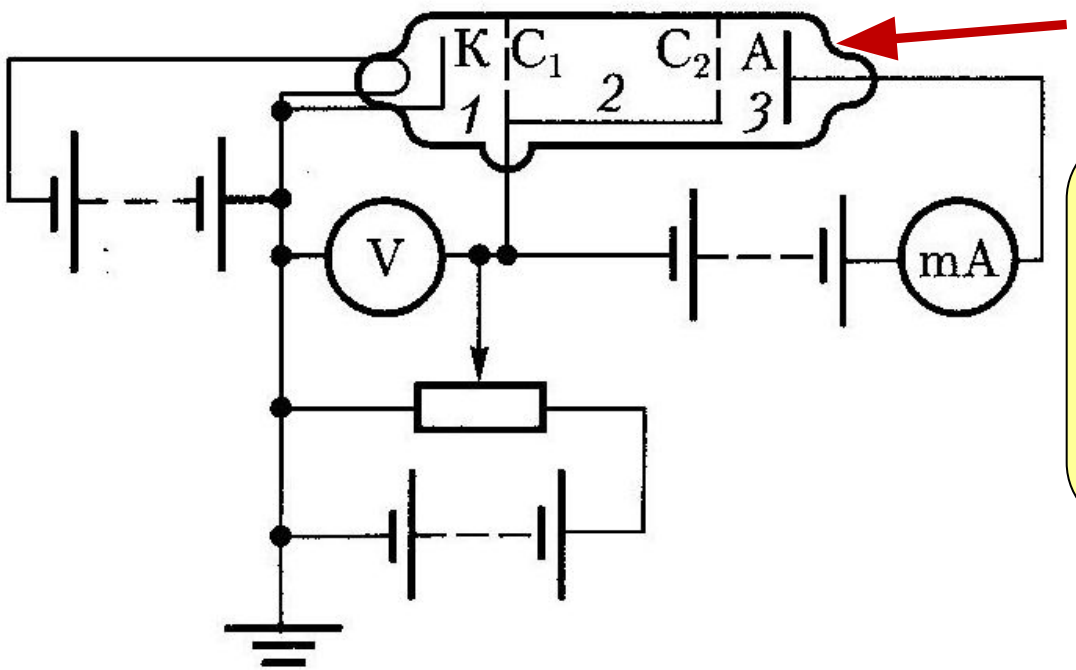
(минимальная порция кванта электромагнитного поля, которую может поглотить атом ***Hg***, равна **4,9 эВ**)

Потенциалы возбуждения различных газов

Газы	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg	H_2
$U_в$, эВ	21,2	16,9	11,6	10,0	8,5	4,9	10,2

Опыты Франка и Герца. 1913 год

Они изучали методом задерживающего потенциала столкновения электронов с атомами газов.



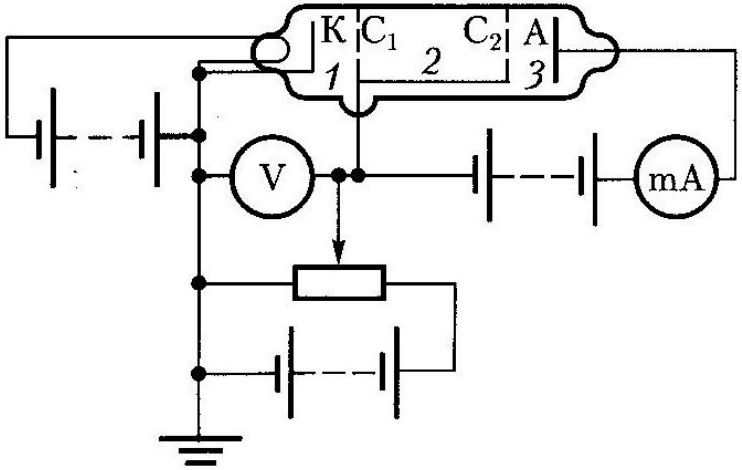
вакуумная трубка

К – катод;
А – анод;
C_1 и C_2 – сетки;
mA – миллиамперметр;
***V* – вольтметр.**

Внутри **вакуумной трубки** находятся **пары ртути**.

Между **К** и **C_1** приложена **ускоряющая разность потенциалов.**

Между **A** и **C_2** приложена небольшая **задерживающая разность потенциалов**.

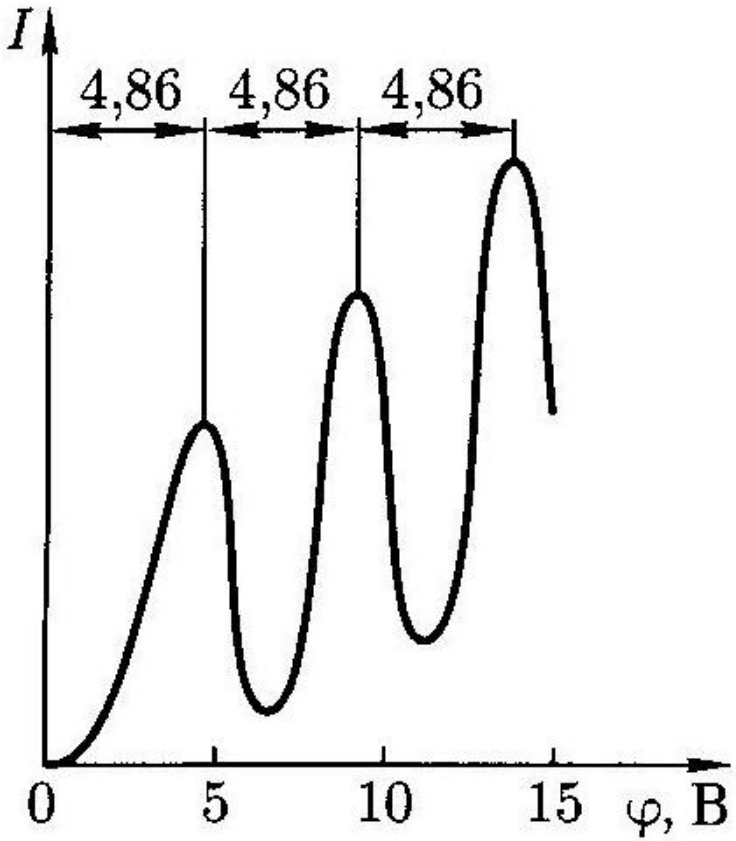


Электроны из области 1 попадают в область 2 и сталкиваются с атомами паров ртути.

При **неупругих** соударениях **электронов** с **атомами ртути** последние могут **возбуждаться**.

Но «по Бору» **атомы** могут получать лишь определённые **дискретные значения энергий**. Это означает, что **электроны** в этом случае должны **терять энергию дискретно**!

Что показал эксперимент?



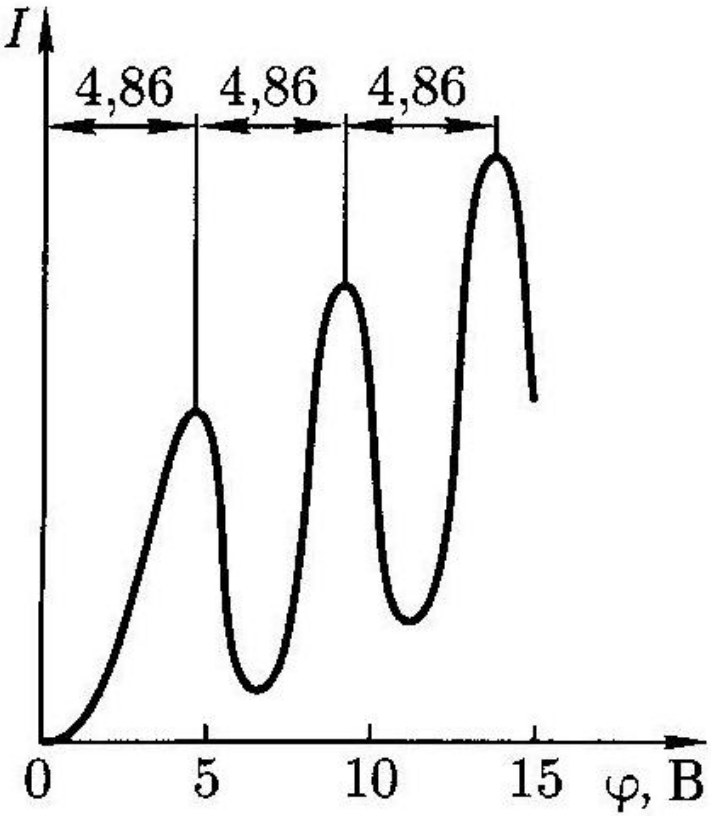
1. При увеличении разности потенциалов между **К** и **C_1** до **4,86 В анодный ток монотонно возрастает**.

2. При дальнейшем увеличении разности потенциалов **анодный ток резко убывает, а потом вновь возрастает**.

3. Каждый последующий максимум возникает через **4,86В**.

И о чём это нам говорит? Пока непонятно…

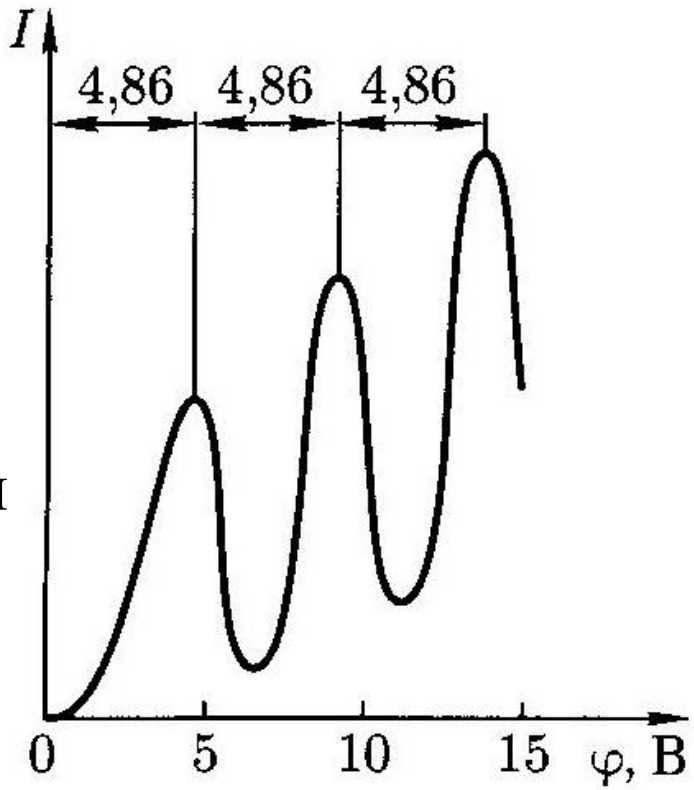
Ближайшим к основному состоянию атома ртути является возбуждённое состояние с энергией равной 4,86 эВ!



Получается, что пока разность потенциалов между **К** и **C_1** меньше 4,86В, **электроны** испытывают с атомами ртути только **упругие столкновения**!

При достижении **4,86В** **энергия** **электрона** (***eφ***=4,86 эВ) становится достаточной, чтобы вызвать **неупругий удар**!

В этом случае **электроны** теряют почти всю свою **кинетическую энергию** и уже **не могут** достичь **анода**. Именно поэтому **анодный ток** начинает резко **уменьшаться**!



Каждый раз при увеличении разности потенциалов на ***n*·4,86 В** наблюдается очередное **максимальное значение силы тока** (вновь возникает **неупругий удар)**. Затем **анодный ток** вновь **уменьшается**!

Вывод: Атомы вещества могут поглотить только определённую порцию энергии!

Опыт Франка и Герца показал, что спектр поглощаемой атомом энергии не непрерывен, а дискретен!

(минимальная порция кванта электромагнитного поля, которую может поглотить атом ***Hg***, равна **4,9 эВ**)

Потенциалы возбуждения различных газов

Газы	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg	H_2
$U_в$, эВ	21,2	16,9	11,6	10,0	8,5	4,9	10,2

Спектр атома водорода по Бору

Рассмотрим вращение электрона по круговой стационарной орбите.

1. **Момент импульса электрона** должен удовлетворять условию

$$m_e \upsilon_n r_n = n\hbar$$

2. **Электрон** движется с нормальным ускорением a_n в поле ядра атома под действием **силы Кулона**

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

3. В соответствии со **втором законом Ньютона**

$$F_к = m_e a_n$$

Получим:

- **выражение для радиусов допустимых орбит:**

$$r_n = \frac{h^2 \varepsilon_0}{2\pi m_e e^2} n^2, \left(n = 1, 2, 3, \ldots\right)$$

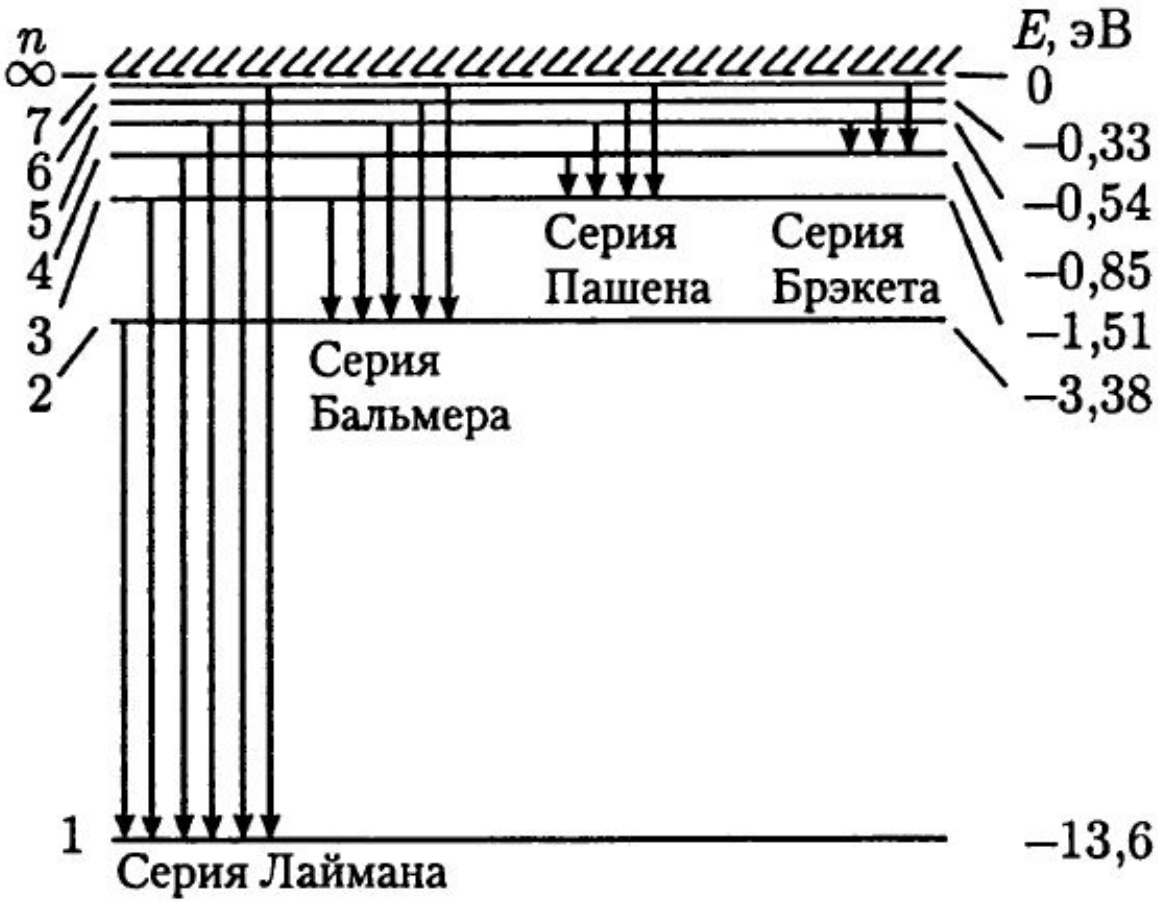
- **выражение для дозволенных дискретных значений энергий электрона в атоме**

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \frac{1}{n^2}, \quad \left(n = 1, 2, 3, \ldots\right)$$

Энергетические состояния атома образуют последовательность энергетических уровней, изменяющихся в зависимости от значения ***n***.

Главное квантовое число *n* (целое число) определяет энергетические уровни атома.

- **Основное состояние** – энергетическое состояние с n=1.
- **Возбуждённые состояния** – энергетические состояния с n>1.



Минимальная энергия атома водорода

E_1 **= -13,6 эВ.**

Ионизация атома (отрыв электрона) водорода

E_∞ **= 0 эВ.**

При переходе атома водорода (Z=1) из **стационарного состояния *n*** в **стационарное состояние *m*** с меньшей энергией испускается квант

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

откуда **частота излучения**

$$\nu = \frac{m_e e^4}{8h^3\varepsilon_0^2}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

где

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^3\varepsilon_0^2}$$

- постоянная Ридберга

Достижения теории Бора

Теория Бора практически точно описала все частоты излучения атома водорода, и стал ясен смысл целых чисел, стоящих в скобках этой формулы.

Излучение возникает тогда, когда электрон переходит с верхней стационарной орбиты ***n*** в атоме на нижнюю ***m***. Первое число (***m***) в обобщённой формуле Бальмера означает номер орбиты (уровня), **на которую переходит электрон**, а второе число (***n***) – номер орбиты (уровня), **с которой происходит переход электрона**.

Процесс излучения атомов носит квантовый характер!!!

Впервые было введено понятие **стационарного состояния.**

Неудачи теории Бора

Кроме **водородоподобного атома**, эта теория больше **ничего** объяснить не сумела.

Вопрос «Почему»?

Теория Бора внутренне противоречива, так как вместе с **квантовыми законами** Бор использовал **классический второй закон Ньютона** и при этом «отменил» закон об излучении электрона на стационарной орбите.

В связи с этим

теория Бора это «всего лишь» полуклассическая теория водородоподобных атомов.

Гипотеза де Бройля

1923 год. Луи де Бройль выдвинул гипотезу **об универсальности корпускулярного-волнового дуализма**.

Луи де Бройль
1892 - 1987

С каждым микрообъектом связываются, с одной стороны, **корпускулярные характеристики** – **энергия** E и **импульс** p, а с другой – **волновые характеристики** – **частота** ν и **длина волны** λ.

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda}.$$

Любой микрочастице сопоставляется волновой процесс, длина волны которого определяется по **формуле де Бройля**:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Эта гипотеза была подтверждена не только для **электронов**, но и для **нейтронов**, **протонов** и других частиц.

А как быть с макроскопическими телами?

Для частицы массой **5г**, движущейся со скоростью **1м/с**, соответствует **волна де Бройля** с длиной волны $\lambda = 1{,}33 \cdot 10^{-31}$ **м**.

Такие длины волн лежат за пределами возможностей наблюдения приборов!

Вывод: связывать волновые свойства с макрообъектами лишено практического смысла!

Любая частица может в разных ситуациях являться либо **классической** частицей, либо **релятивистской**.

Как определить какая частица перед нами: классическая или релятивистская?

- Если энергия рассматриваемой частицы **много больше** **её энергии покоя** $E_0=mc^2$ (на несколько порядков), то перед нами **релятивистская** частица.
- Если **сопоставима**, тогда – **классическая**.

Пример для электрона:

$$E_0=m_ec^2=0{,}511 \text{ МэВ};$$

1) $E=900\cdot10^3$ эВ.

2) $E=850\cdot10^8$ эВ.

Классическая частица

Релятивистская частица

- **Кинетическая энергия релятивистской частицы** равна

$$E_к = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}-1\right)$$

- **Импульс релятивистской частицы** равен

$$p = \frac{\sqrt{E_к\left(E_к + 2mc^2\right)}}{c}$$

c – скорость света;
υ – скорость частицы;
m – масса частицы.

Свойства волн де Бройля

1. Эти волны не являются физическими материальными волнами, их принято трактовать как волны вероятности. Физический смысл имеет квадрат амплитуды волны де Бройля, определяющий её интенсивность. Значение последней в заданной точке пространства определяет вероятность обнаружения в этом же месте частицы, которой сопоставляется волна де Бройля.

2. Длина волны де Бройля уменьшается с увеличением массы частицы. Для макроскопических тел длина волны де Бройля много меньше размеров самих тел и лежит за пределом, доступным для наблюдения, поэтому волновые свойства у них не проявляются.

Свойства микрочастиц

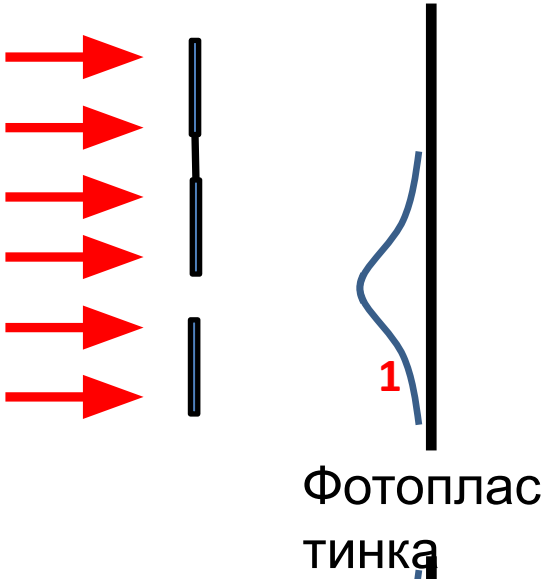
Отличие микрочастицы от волны заключается в том, что она всегда обнаруживается как неделимое целое.

Никто никогда не наблюдал, например, полэлектрона. В то же время волну можно разделить на части (например, направив световую волну на полупрозрачное зеркало) и воспринимать затем каждую часть в отдельности.

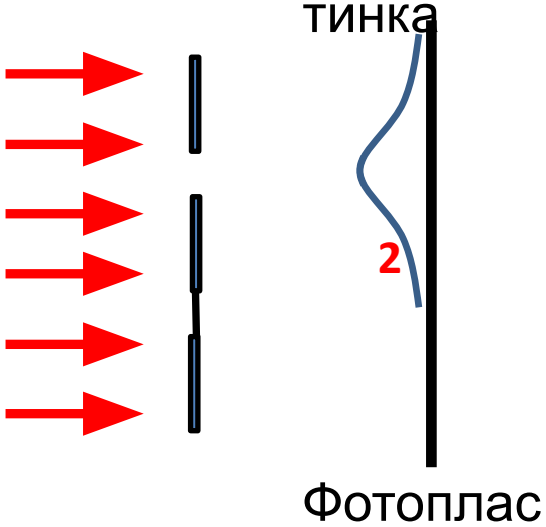
Отличие **микрочастицы** от **макрочастицы** заключается в том, что она **не обладает одновременно определенными значениями координаты и импульса**, вследствие чего **понятие траектории применительно к микрочастице утрачивает смысл**.

Мысленный эксперимент

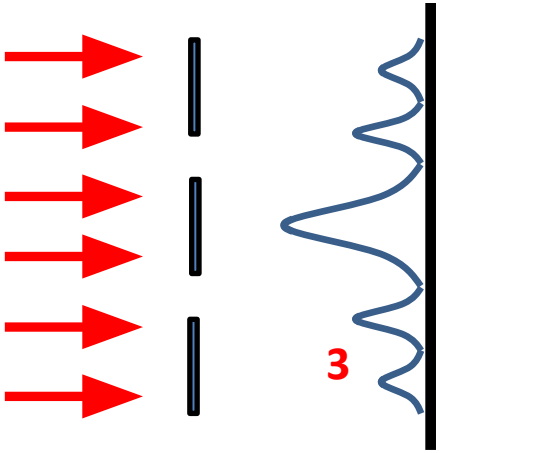
- Направим на преграду с двумя узкими щелями параллельный пучок моноэнергетических электронов.
- За преградой поставим фотопластинку.



1. Закроем верхнюю щель и произведем экспонирование в течение времени **τ**. Почернение на фотопластинке будет характеризоваться кривой **1**.



2. Проведём туже самую операцию при закрытой нижней щели. Характер почернения фотопластинки определятся в этом случае кривой **2**.



3. Откроем обе щели и подвергнем экспонированию в течение времени **τ** третью пластинку.

Картина оказывается аналогичной картине, получающейся при интерференции двух когерентных световых волн.

<u>Характер картины свидетельствует о том, что на движение каждого электрона оказывают влияние оба отверстия!!!</u>

Такой вывод несовместим с представлением о траекториях.

Если бы электрон в каждый момент времени находился в определенной точке пространства и двигался по траектории, он проходил бы через определенное отверстие — первое или второе.

1927 год. Неопределённость Гейзенберга

Нельзя приписывать микрочастицам **одновременно корпускулярные свойства и волновые**!

В **классической механике** у частицы (тела) **одновременно** могут быть определены и импульс и координата.

Ве́рнер Карл Ге́йзенберг
1901 - 1976

У **микрочастиц** при полной **определенности импульса невозможно** определить **координату**. **Почему?**

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

в этом случае мы должны сказать о «длине волны в данной точке», но это **лишено физического смысла!**

Это означает, что микрочастица с определённым импульсом имеет полностью неопределённую координату и наоборот!

Соотношение неопределённостей Гейзенберга: микрочастица не может иметь одновременно и определённую координату (x, y, z) и определённую соответствующую проекцию импульса (p_x, p_y, p_z), неопределённости этих величин удовлетворяют условиям:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2};$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2};$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2}.$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1{,}05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

- Если микрочастица находится в состоянии с точным значением координаты (**$\Delta x=0$**), то в этом состоянии соответствующая проекция её импульса оказывается совершенно неопределённой (**$\Delta p_x \to \infty$**), и наоборот.

- Невозможность одновременно точно определить координату и соответствующую проекцию импульса **не связано с несовершенством методом измерения** или измерительных приборов, а является следствием специфики микрообъектов, отражающей особенности их объективных свойств, а именно двойственной корпускулярно-волновой природы.

Перепишем соотношение неопределённостей к следующему виду

$$\Delta x \cdot \Delta \upsilon_x \geq \frac{\hbar}{2m}$$

Чем больше масса частицы, тем меньше неопределённость её координаты и скорости.
Это означает, что мы с большей точностью можем применять понятие траектории!

Траектория – линия, по которой движется тело.

Движение по траектории характеризуется в любой момент времени **определёнными значениями координат и скорости.**

Пример 1.

Пусть пучок электронов движется вдоль оси ***x*** со скоростью ***v=10⁸м/с***, определяемой с точностью до 0,01%.
Какая точность определения координаты электрона?

$$\Delta\upsilon_x = 0,0001 \cdot 10^8 = 10^4$$

$$\Delta x = \frac{\hbar}{2m_e \cdot \Delta\upsilon_x} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 10^4} = \boxed{5,8 \cdot 10^{-9}}$$

Такая точность достаточна, чтобы можно было говорить о **движении электронов по определённой траектории**.

Пример 2.

Пусть электрон движется в поле ядра атома.

Допустим, что неопределённость координаты электрона прядка линейного размера атома **$\Delta x=10^{-10}$м.**

Какая точность определения скорости электрона?

$$\Delta\upsilon_x = \frac{\hbar}{2m_e \cdot \Delta x} = \frac{1,05\cdot 10^{-34}}{2\cdot 9,11\cdot 10^{-31}\cdot 10^{-10}} = \boxed{0,6\cdot 10^{6}\ \frac{м}{}}$$

$$m_e \frac{\upsilon^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \qquad \upsilon = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r m_e}}$$

$$\upsilon = \sqrt{\frac{\left(1,6\cdot 10^{-19}\right)^2}{4\cdot 3,14\cdot 8,85\cdot 10^{-12}\cdot 0,5\cdot 10^{-10}\cdot 9,11\cdot 10^{-10}}} = \boxed{2,2\cdot 10^{6}\ \frac{м}{с}}$$

Неопределённость скорости соизмерима со скоростью.

В данном случае нельзя говорить о движении электрона в атоме по определённой траектории.

Соотношение неопределённости Гейзенберга для энергии

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

- ΔE – **неопределённость энергии** некоторого квантового состояния системы;
- Δt – (неопределённость времени) **промежуток времени**, в течение которого существует данное квантовое состояние системы.

Чем больше время жизни данного состояния, тем больше у него «разброс» значений энергии!

- **Ширина энергетического состояния** будет определяться как

$$\Delta E \geq \frac{\hbar}{2\Delta t}.$$

Атом излучает фотон за время ≈**10^{-8} с**.

- Частота излученного фотона также должна иметь неопределённость

$$\Delta E = \hbar \Delta\omega.$$

$$\Delta\omega = \frac{\Delta E}{\hbar}$$

Опыт подтверждает, что **все спектральные линии размыты**.

Линии спектра должны характеризоваться частотой, равной

$$\omega = \omega \pm \Delta\omega = \omega \pm \frac{\Delta E}{\hbar}$$