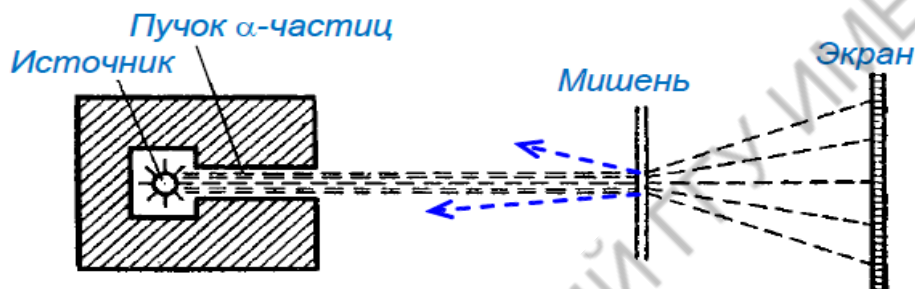


СТРОЕНИЕ АТОМА. МОДЕЛЬ АТОМА ТОМСОНА (1)

Дж. Дж. Томсон, исследуя отклонение в электрических и магнитных полях частиц, испускаемых под действием света (фотоэффект) *открыл электрон*. Поскольку *масса электрона оказалась в десятки тысяч раз меньше масс атомов*, Томсон предложил **модель строения атома**, согласно которой атом представляет собой непрерывно заряженный положительным зарядом шар диаметром $\sim 10^{-10}$ м, в который "вкраплены" электроны ("как изюм в пудинг"). Гармонические колебания электронов около положений равновесия (гармонические осцилляции) являются причиной излучения (или поглощения) монохроматических волн атомами.

Однако в экспериментах **Ленарда** по рассеянию электронов и в экспериментах **Резерфорда** по рассеянию α -частиц на тонких металлических



плёнках, было показано, что почти все частицы проходили через фольгу, без *рассеяния* или отклоняясь на очень малые углы порядка $1-3^\circ$. И только некоторые из них (одна из 10000) *отклонялись на*

большие углы, порядка $135-180^\circ$. Поскольку α -частица в 7300 раз тяжелее электрона, то причиной такого рассеяния не может быть её рассеяние на электронах. Резерфорд предположил, что рассеяние α -частицы происходит на положительном заряде большой массы – "**ядре**" атома, размер которого очень мал по сравнению с объёмом атома (диаметр $\sim 10^{-14}$ м). (Например, в 1 м^3 платины "объем" ядер равен $0,3 \text{ мм}^3$.)

Поэтому в атоме, подавляющая часть которого состоит из пустого пространства, электроны не могут находиться в статическом равновесии. Их устойчивость может быть только динамической, как у планет в астрономии.

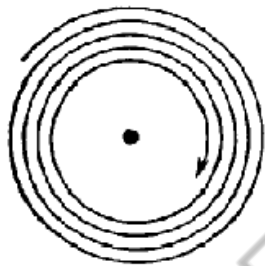
СТРОЕНИЕ АТОМА. МОДЕЛЬ АТОМА ТОМСОНА (2)

Резерфорд предложил **планетарную модель атома**. Согласно Резерфорду, атом представляет собой систему зарядов, в центре которой расположено **положительное ядро** с зарядом Ze , размером 10^{-15} – 10^{-14} м и массой, практически равной массе атома, а **вокруг ядра**, в области с линейными размерами $\sim 10^{-10}$ м, по **замкнутым орбитам** движется Z электронов, образуя **электронную оболочку атома**.

Второй закон Ньютона для электрона, движущегося по окружности под действием кулоновской силы:

$$\frac{Ze \cdot e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r},$$

где m_e и v – масса и скорость электрона на орбите радиуса r , ϵ_0 – электрическая постоянная. При $r \approx 10^{-10}$ м скорость движения электронов $v \approx 10^6$ м/с, а ускорение $v^2/r \approx 10^{22}$ м/с². Согласно классической электродинамике, ускоренно движущиеся электроны должны **излучать** электромагнитные волны и



вследствие этого непрерывно **терять** энергию. В результате электрон будет приближаться к ядру и, в конечном счёте, **упадёт на ядро**.

Кроме того, классическая планетарная модель атома **не объясняет линейчатого спектра атомов**.

ЛИНЕЙЧАТЫЙ СПЕКТР АТОМА ВОДОРОДА

Экспериментальное исследование спектров излучения разреженных газов (отдельных атомов) показали, что характерный *линейчатый* спектр каждого элемента представляет собой *серии линий*, положение которых может быть описано простыми эмпирическими формулами. Так, положение линий атома водорода в видимой области спектра описываются **формулой Бальмера**:

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ или } \left(\nu = \frac{c}{\lambda} \right) \text{ для частот: } \nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, \dots),$$

где $R' = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$, $R = R' \cdot c = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ – **постоянная Ридберга**.

Позднее, в ультрафиолетовой области была обнаружена

$$\text{серия Лаймана: } \nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 2, 3, 4, \dots),$$

а в инфракрасной области:

$$\text{серия Пашена: } \nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 4, 5, 6, \dots),$$

$$\text{серия Брэкета: } \nu = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 5, 6, 7, \dots),$$

$$\text{серия Пфунда: } \nu = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 6, 7, 8, \dots),$$

$$\text{серия Хэмфри: } \nu = R \left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 7, 8, 9, \dots).$$

Все эти серии могут быть описаны **обобщённой формулой Бальмера**:

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

где $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ определяет **серию**, а $n = m + 1, m + 2, \dots$ определяет отдельные **линии** этой серии. С увеличением n линии серии сближаются; значение $n = \infty$ определяет **границу серии**, к которой со стороны больших частот примыкает сплошной спектр.

Аналогичные серии были выделены в линейчатых спектрах других атомов.

ПОСТУЛАТЫ БОРА

Для объяснения закономерностей в линейчатых спектрах Бор объединил планетарную модель атома Резерфорда с гипотезой Планка о квантовой природе света. Теория атома Бора основывается на **двух постулатах**:

(I) Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): существуют стационарные (не изменяющиеся со временем) состояния атома, находясь в которых он не излучает энергии. Стационарным состояниям атома соответствуют *стационарные орбиты*, по которым движутся электроны. Каждое стационарное состояние характеризуется *определённым* (дискретным) значением энергии. Движение электронов по стационарным орбитам *не сопровождается* излучением электромагнитных волн.

Правило квантования орбит Бора утверждает, что в стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь квантованные значения момента импульса, удовлетворяющие условию $m_e v r_n = n \hbar$ ($n = 1, 2, \dots$), m_e – масса электрона, v – скорость на орбите r_n , $\hbar = h / (2\pi)$.

(II) Второй постулат Бора (правило частот): при переходе атома из одного состояния в другое испускается или поглощается один фотон с энергией $h\nu = E_n - E_m$, равной разности энергий состояний.

Излучение ($E_m < E_n$) происходит при переходе атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией (при переходе электрона с орбиты более удалённой от ядра на ближнюю к ядру орбиту).

Поглощение фотона ($E_m > E_n$) сопровождается переходом атома в состояние с большей энергией (переход электрона на более удалённую от ядра орбиту).

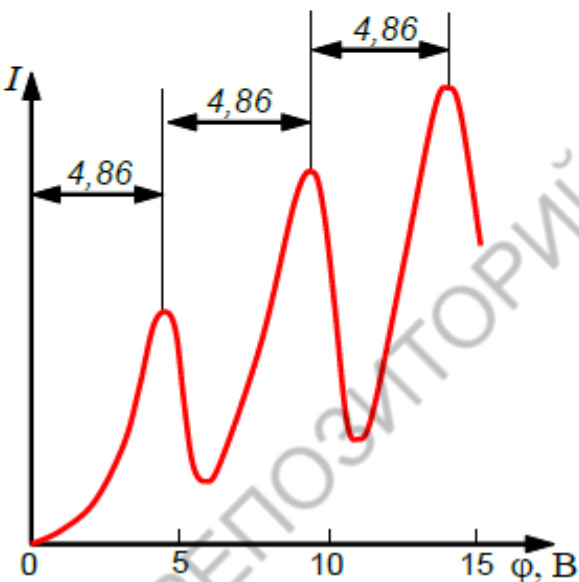
Набор всевозможных дискретных частот квантовых переходов: $\nu = \frac{E_n - E_m}{h}$
определяет **линейчатый спектр атома.**

ОПЫТЫ ФРАНКА И ГЕРЦА

В опытах Франка и Герца было экспериментально доказано существование в атомах стационарных состояний.

Электроны, эмитированные катодом K , разгоняются в области 1 под действием ускоряющей разности потенциалов φ между катодом и сеткой C_1 . В области 2 электроны проходят через пары ртути и достигают анода A . Первое возбуждённое состояние атома ртути имеет энергию 4,86 эВ.

При увеличении ускоряющего потенциала φ до этой величины, соударения электронов с атомами становятся неупругими: электрон отдаёт кинетическую энергию атому, возбуждая переход из основного энергетического состояния в первое возбуждённое состояние (**поглощение** энергии атомами ртути) – ток в установке резко уменьшается. При дальнейшем увеличении φ подобное же поведение тока наблюдается при энергиях, кратных $\Delta E = 4,86$ эВ, когда электроны испытывают 2, 3, 4... неупругих соударений. Таким образом, в атоме действительно существуют стационарные состояния (**подтверждение первого постулата Бора**).



Возбуждённые атомы ртути, переходя в основное состояние, **излучают** кванты света с длиной волны $\lambda = hc/\Delta E = 255$ нм (**подтверждение второго постулата Бора**).

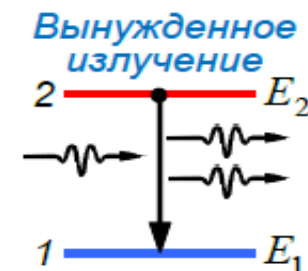
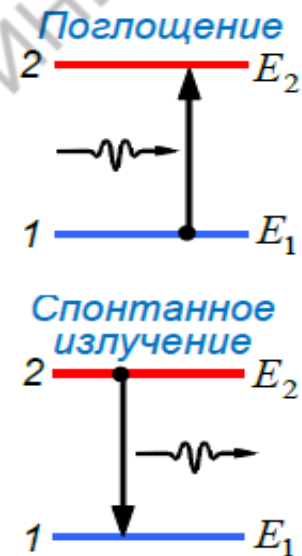
ПОГЛОЩЕНИЕ. СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (1)

Рассмотрим два квантовых состояния с энергиями E_1 и E_2 .

1. **Поглощение.** Если атом находится в основном состоянии 1, то под действием внешнего излучения может осуществиться вынужденный переход в возбуждённое состояние 2, приводящий к поглощению излучения.

2. **Спонтанное излучение.** Атом, находясь в возбуждённом состоянии 2, может спонтанно (без внешних воздействий) перейти в основное состояние, испуская при этом фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$. Процесс испускания фотона возбуждённым атомом *без внешних воздействий* называется **спонтанным излучением**. Чем больше вероятность спонтанных переходов, тем меньше среднее время жизни атома в возбуждённом состоянии. Так как спонтанные переходы взаимно не связаны, то **спонтанное излучение некогерентно**.

3. **Вынужденное излучение.** А. Эйнштейн для объяснения наблюдавшегося на опыте термодинамического равновесия между веществом и испускаемым и поглощаемым им излучением постулировал, что помимо поглощения и спонтанного излучения должен существовать **третий, качественно иной тип взаимодействия**. Если на атом, находящийся в возбуждённом состоянии 2, действует внешнее излучение с частотой, удовлетворяющей условию $h\nu = E_2 - E_1$, то возникает **вынужденный (индуцированный) переход** в основное состояние 1 с излучением фотона той же энергии $h\nu = E_2 - E_1$ **дополнительно** к тому фотону, под действием которого произошёл переход. Таким образом, в процесс вынужденного излучения вовлечены **два фотона**: **первичный фотон**, вызывающий (стимулирующий) испускание излучения возбуждённым атомом, и **вторичный фотон**, испущенный атомом.



ПОГЛОЩЕНИЕ. СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (2)

Вынужденное излучение (вторичные фотоны) **тождественно** *вынуждающему* (первичным фотонам) – оно имеет такую же частоту, фазу, поляризацию, направление распространения.

Следовательно, вынужденное излучение **строго когерентно** с вынуждающим излучением, т. е. испущенный фотон **неотличим** от фотона, падающего на атом.

Испущенные фотоны, двигаясь в одном направлении и встречая возбуждённые атомы, стимулируют вынужденные переходы – происходит размножение фотонов.

Для того чтобы происходило усиление излучения, необходимо, чтобы **интенсивность вынужденного излучения превышала интенсивность поглощения фотонов**. А для этого необходимо, чтобы заселённость возбуждённого состояния (число атомов в возбуждённом состоянии) была больше, чем заселённость основного состояния (число атомов в основном состоянии). Такое термодинамически неравновесное состояние называется **состоянием с инверсией населённостей**.

Процесс перевода системы в состояние с инверсией населённостей называется **накачкой** (осуществляется оптическими, электрическими и другими способами). Инверсная среда, в которой происходит усиление падающего на неё пучка света, называется **активной**. Закон Бугера $I = I_0 \exp(-\alpha x)$ для таких сред имеет **отрицательный коэффициент поглощения**.

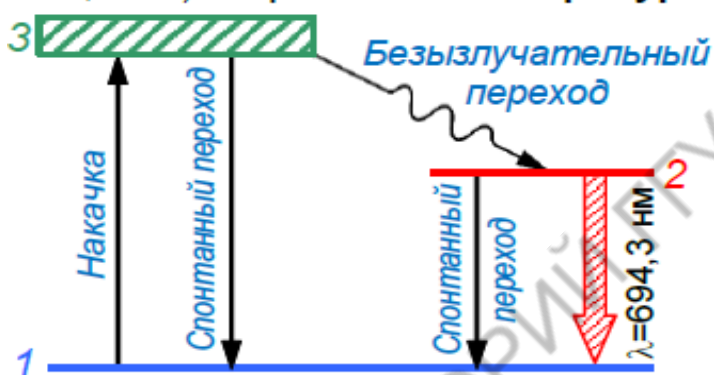
ЛАЗЕРЫ (1)

Эффект усиления излучения в активных средах используется в **оптических квантовых генераторах**, или **лазерах** (**L**ight **A**mplification of **S**timulated **E**mission of **R**adiation – **LASER**).

Лазеры подразделяются:

- по типу активной среды (твердотельные, газовые, полупроводниковые и жидкостные);
- по методам накачки (оптические, тепловые, химические, электроионизационные и др.);
- по режиму генерации (непрерывного или импульсного действия).

Первый твердотельный лазер – **рубиновый** (длина волны излучения 694,3 нм) – работает по трёхуровневой схеме: накачка кристалла рубина



(Al_2O_3 с примесью (~0,03%) Cr^{3+}) переводит атомы хрома в **возбуждённое короткоживущее состояние 3** (переход 1→3), с которого происходит **безызлучательный переход** в **долгоживущее (метастабильное) состояние 2** – происходит "накопление" атомов хрома на **уровне 2**.

При достаточной мощности накачки их концентрация на **уровне 2** будет гораздо больше, чем на **уровне 1**, т.е. возникает **инверсная населённость уровня 2**. (Спонтанные переходы 3→1 в данной системе незначительны).

Каждый фотон, случайно родившийся при спонтанном переходе 2→1, может породить в активной среде лавину вторичных фотонов.

Для многократного усиления лазерной генерации используется **оптический резонатор** – в простейшем случае – пара обращённых друг к другу параллельных (или вогнутых) зеркал на общей оптической оси, между

ЛАЗЕРЫ (2)

которыми помещается **активная среда** (кристалл или кювета с газом). Фотоны B и C , движущиеся под углами к оси кристалла или кюветы, выходят из активной среды через боковую поверхность. Фотоны A , движущиеся вдоль оптической оси, после многократного отражения от зеркал и усиления в активной среде, выходят через полупрозрачное зеркало, создавая строго направленный световой пучок когерентных фотонов.

Свойства лазерного излучения:

1. *Временная и пространственная когерентность.* Время когерентности $\tau \sim 10^{-3}$ с, что соответствует длине когерентности $l = c\tau \sim 10^5$ м, что на семь порядков выше, чем для обычных источников света.
2. *Строгая монохроматичность* ($\Delta\lambda < 10^{-11}$ м).
3. *Большая плотность потока энергии* (характерные величины $\sim 10^{10}$ Вт/м²).
4. *Очень малое угловое расхождение пучка* (в 10^4 раз меньше, чем у традиционных оптических осветительных систем, например у прожектора).

