

ЛЕКЦИЯ 7

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Спектр атома водорода.
2. Конфигурация $1s$ – состояния атома водорода.
3. Спонтанное и вынужденное излучения атомов.
4. Нормальная и инверсная заселенности энергетических уровней.
5. Принцип работы квантового генератора. Рубиновый и газовый лазеры.

СПЕКТР АТОМА ВОДОРОДА.

Спектры излучения водородоподобных атомов – простейшие, линейчатые.

Их простота физически связана с наличием в атомах только одного электрона, а математически с тем, что положение энергетических уровней зависит лишь от одного квантового числа n .

Спектр атома водорода состоит из отдельных тонких спектральных линий, положение которых на шкале частот однозначно связано с положением соответствующих энергетических уровней в атоме.

Изобразим схему энергетических уровней атома водорода.

СПЕКТР АТОМА ВОДОРОДА.

Покажем на схеме квантовые состояния уровней $l = 1 - 5$.

Пусть $m = 0$. $l = 0, 1, \dots, (n - 1)$.

Возможны следующие состояния электрона:

$l = 0 - s$ - состояние;

$l = 1 - p$ - состояние;

$l = 2 - d$ - состояние;

$l = 3 - f$ - состояние;

$l = 4 - g$ - состояние.

$1s - n = 1$ и $l = n - 1 = 0$. Это s - состояние;

$2s, 2p - n = 2$, возможны два состояния с $l = 0$ и $l = 1$ (s - и p - состояния);

$3s, 3p, 3d$ - к предыдущим добавляется еще одно возможное состояние с $l = 2$ - d - состояние;

$4s, 4p, 4d, 4f$ - добавляется еще одно возможное состояние с $l = 3$ - f - состояние.

$5s, 5p, 5d, 5f, 5g$ - добавляется еще одно состояние с $l = 4$ - g - состояние.

СПЕКТР АТОМА ВОДОРОДА.

Формула для энергии квантовых состояний электрона:

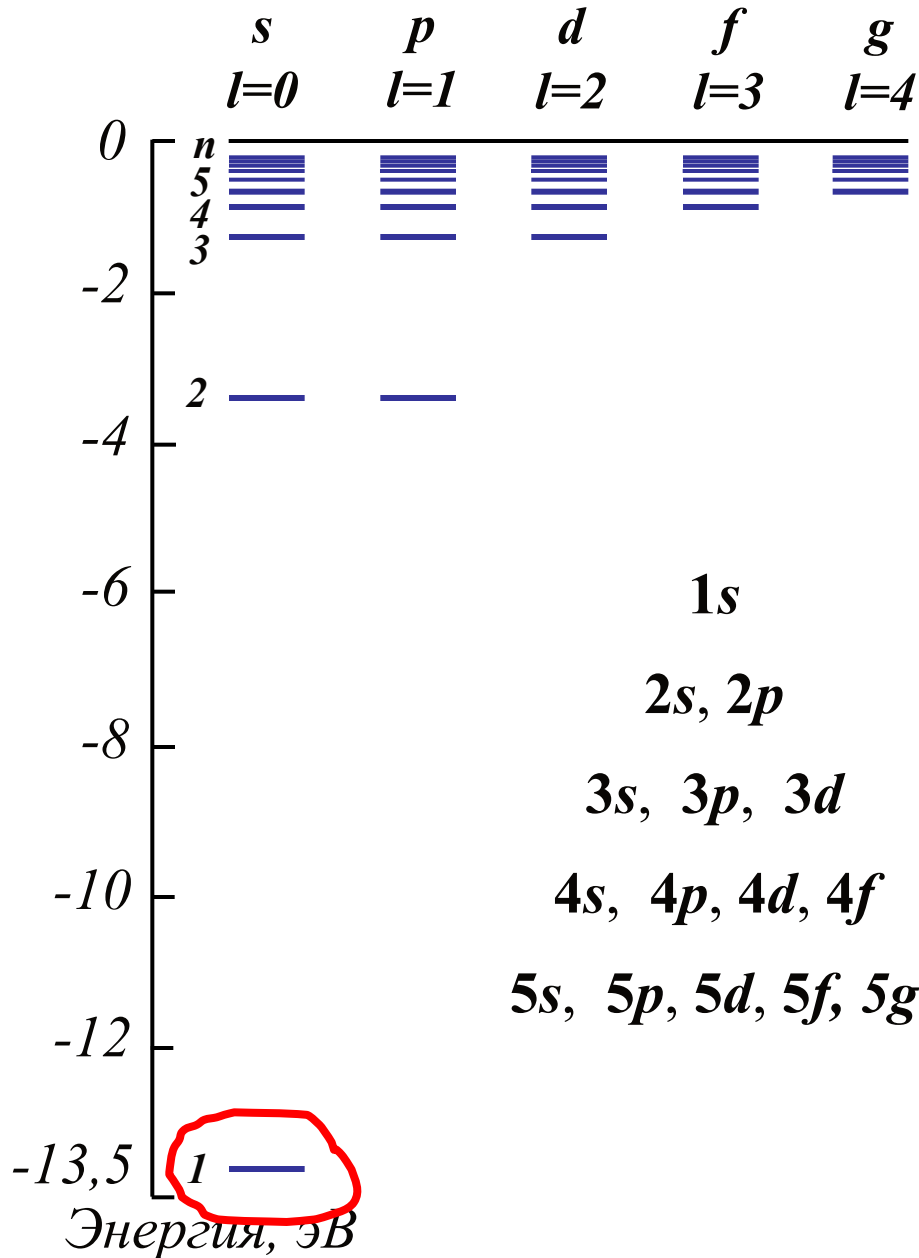
$$E_n = -\frac{me^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

После подстановки постоянных величин:

$$E_n = -13.5 \frac{1}{n^2} \text{ эВ}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

С помощью этой формулы рассчитаем энергетические уровни атома водорода. Изобразим некоторые квантовые состояния атома.

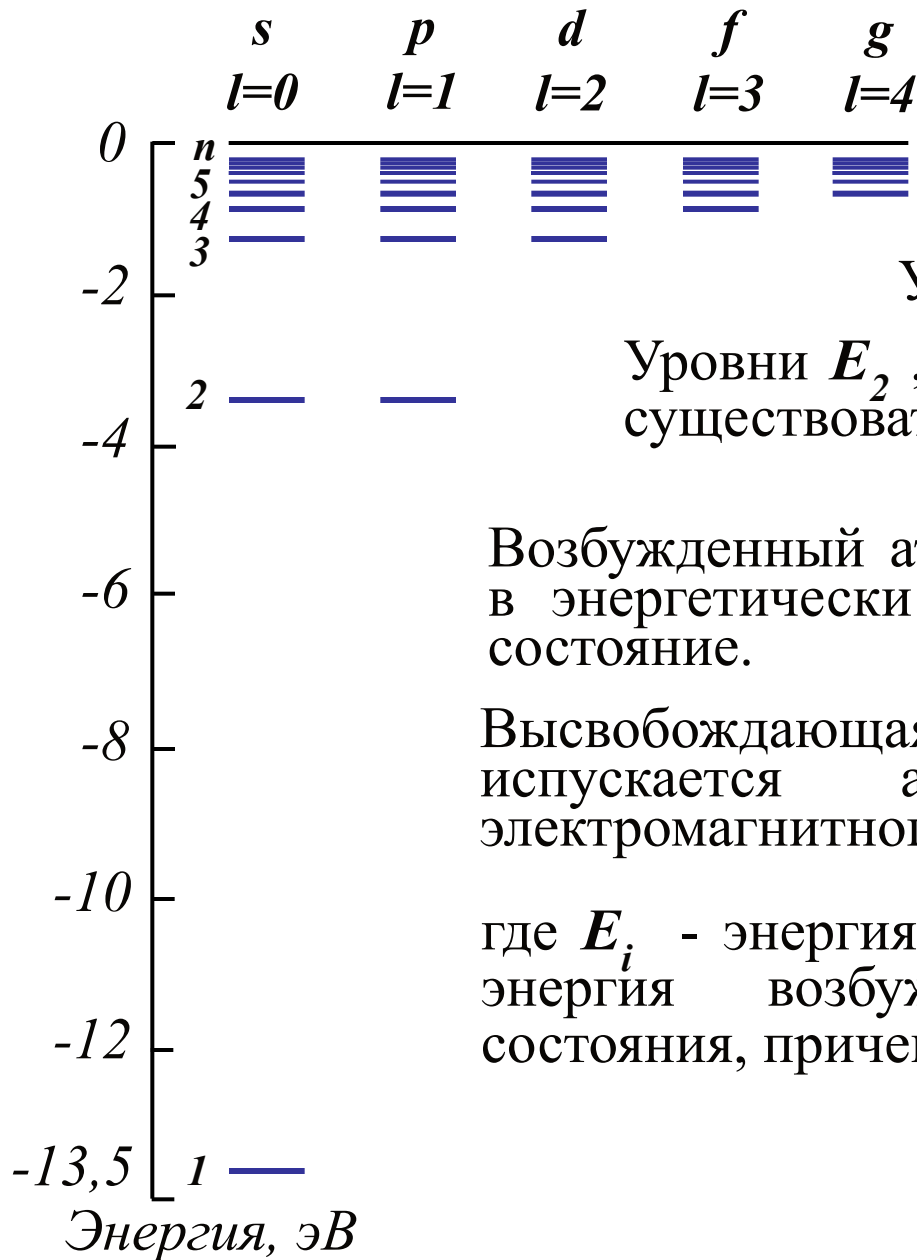
СПЕКТР АТОМА ВОДОРОДА.



Состояние атома $1s$, в котором электрон находится на уровне $E_1 = -13,5$ эВ, - **основное** (**нормальное**) и является стационарным.

Атом, не подверженный внешнему воздействию, может находиться в основном состоянии неопределенно долго.

СПЕКТР АТОМА ВОДОРОДА.



Уровень E_1 - бесконечно тонкий.

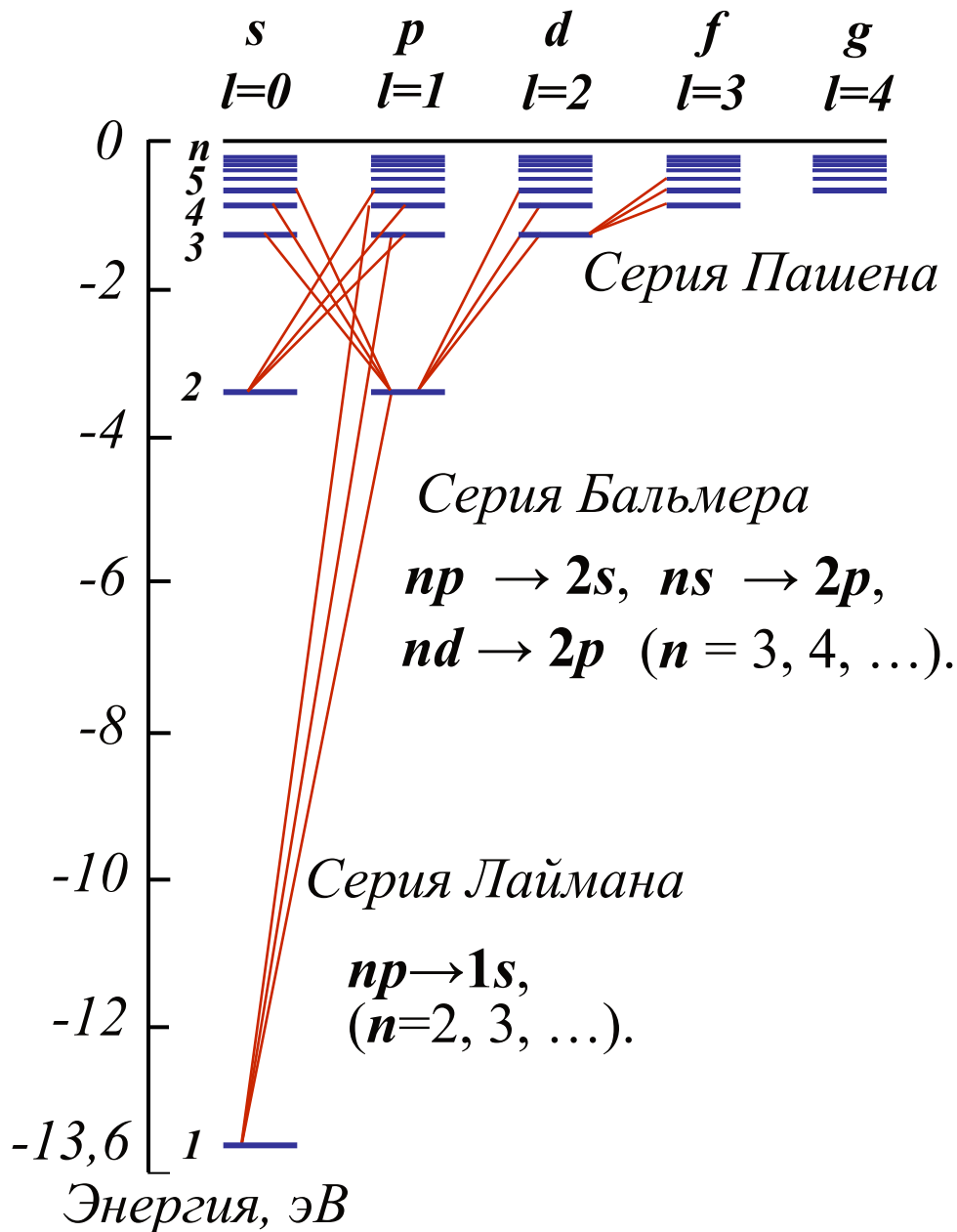
Уровни E_2, E_3, \dots - возбужденные, могут существовать лишь ограниченное время $\Delta\tau$.

Возбужденный атом самопроизвольно переходит в энергетически более низкое или нормальное состояние.

Высвобождающаяся при этом энергия испускается атомом в виде кванта электромагнитного излучения: $\hbar\omega = E_i - E_k$

где E_i - энергия возбужденного состояния, E_k - энергия возбужденного или нормального состояния, причем $E_i > E_k$.

Энергия, эВ



СПЕКТР АТОМА ВОДОРОДА.

В атоме возможны не все переходы между уровнями, а только те, при которых орбитальное квантовое число l изменяется на единицу:

$$\Delta l = \pm 1.$$

Это *правило отбора*.

Покажем некоторые разрешенные переходы, разрешенные правилом отбора.

КОНФИГУРАЦИЯ $1s$ – СОСТОЯНИЯ АТОМА ВОДОРОДА.

Пространственное распределение вероятности обнаружить электрон вблизи ядра зависит от квантовых чисел n , l , m (нерелятивистский случай).

Пример: $1s$ – состояние атома (наиболее простое).

Все волновые функции, соответствующие s – состояниям атома, сферически симметричны.

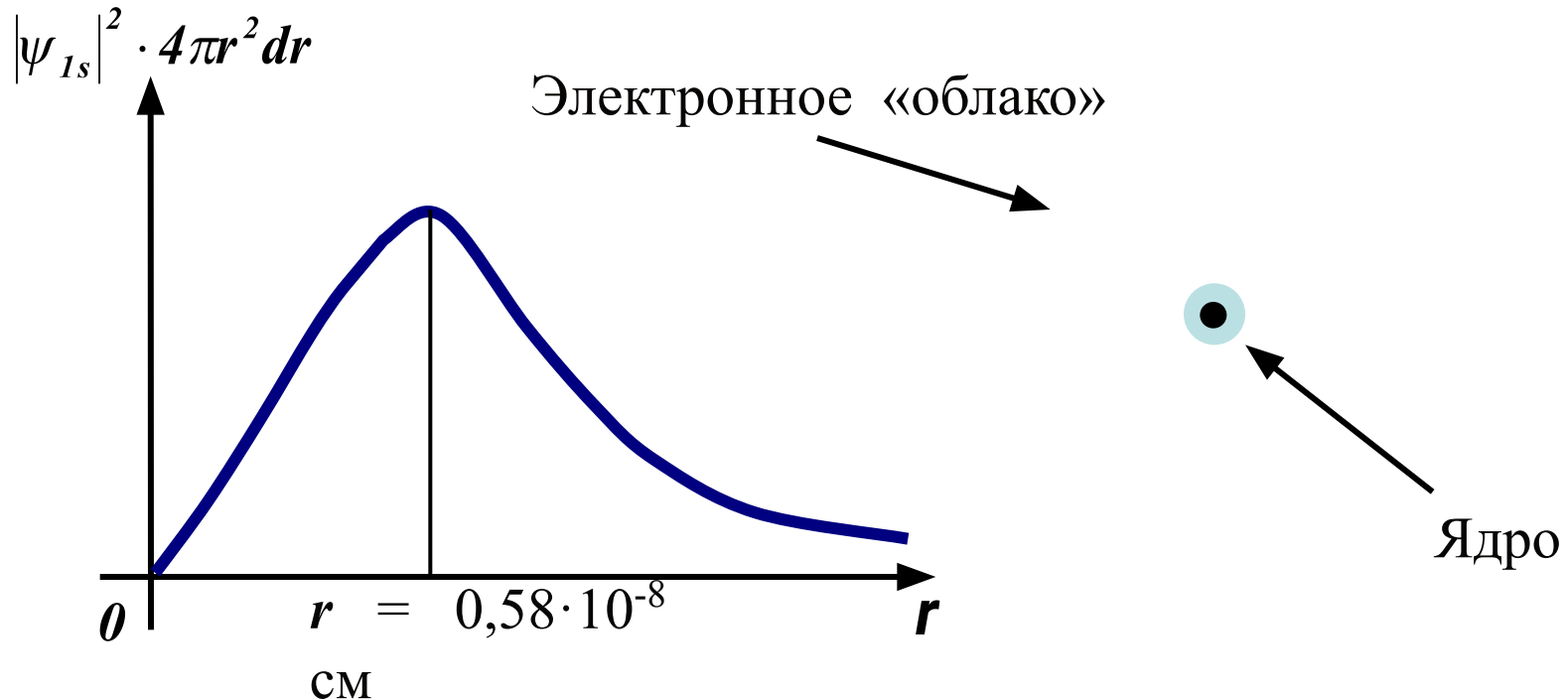
Вероятность обнаружения электрона в сферическом слое объемом $dV = 4\pi r^2 dr$ равна (без вывода):

$$dW = |\psi_{1s}|^2 dV = \frac{1}{\pi a^3} \exp(-2r/a) \cdot 4\pi r^2 dr$$

Вывод: вероятность обнаружить электрон вблизи ядра зависит только от r .

Покажем условно на рисунке распределение вероятности встретить электрон в сферическом слое единичной толщины радиусом r .

КОНФИГУРАЦИЯ 1s – СОСТОЯНИЯ АТОМА ВОДОРОДА.

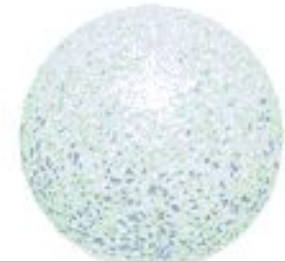


С наибольшей вероятностью электрон атома водорода в $1s$ – состоянии «бывает» в сферическом слое радиусом $0,58 \cdot 10^{-8}$ см. Это соответствует первому боровскому радиусу орбиты электрона в невозбужденном атоме водорода.

В остальных слоях пространства вокруг ядра электрон бывает реже.

КОНФИГУРАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМА ВОДОРОДА.

s - состояния имеют форму шара.



p - состояния имеют форму двух шаров, которые касаются друг друга в точке, где расположено ядро. По внешнему виду p -орбиталь имеет форму гантели.



d - состояния имеет сложную пространственную форму, получаемую при перпендикулярном расположении двух гантелей.



СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМОВ.

При поглощении электронами энергии могут происходить *вынужденные переходы* с низких на высокие уровни.

Обратные переходы (*спонтанные или самопроизвольные*), приводят к испусканию атомами квантов света с частотой .

$$\omega_{mn} = |E_m - E_n|/\hbar$$

А.Эйнштейн - двух видов переходов недостаточно для объяснения существования равновесия между излучением и поглощением энергии веществом.

Должны существовать дополнительные переходы с испусканием квантов света.

СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМОВ.

Такие переходы существуют. Это *вынужденные* или *индуцированные* переходы с высоких на низкие уровни.

Итак,

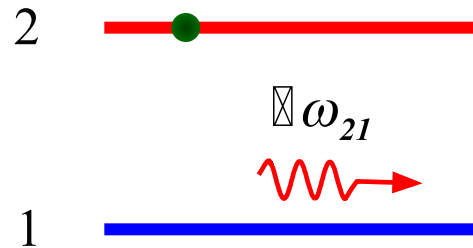
существуют *излучающие* переходы двух типов: *спонтанные* (самопроизвольные) переходы и *вынужденные* (индуцированные) переходы, происходящие под влиянием внешнего облучения с частотой, близкой к частоте ω_{mn} .

Свойства спонтанного и вынужденного излучений.

Пусть атом имеет два возможных состояния: состояние 1 с более низкой энергией (нормальное) и состояние 2 – возбужденное.

СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМОВ.

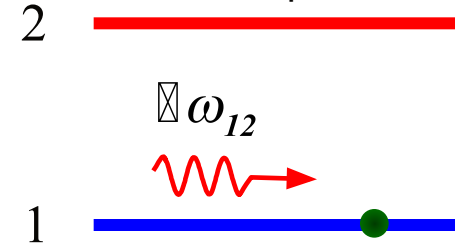
Спонтанное излучение



Атом из состояния 2 через $\sim 10^{-8}-10^{-6}$ с самопроизвольно переходит на уровень 1, излучая при этом квант энергии $\hbar\omega_{21} = E_2 - E_1$.

Спонтанное излучение *некогерентное*.

Вынужденный переход с поглощением

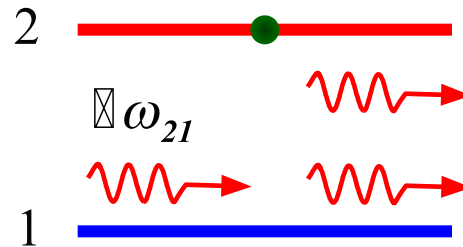


Переходы, индуцированные световым квантом ω_{12} могут быть с поглощением и излучением.

Поглотив квант света частотой $\omega_{12} = \omega_{21}$, атом из состояния 1 переходит в возбужденное состояние 2.

СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМОВ.

Вынужденный переход с излучением



Если атом находится в возбужденном состоянии 2, то квант света частотой ω_{21} может индуцировать переход атома в нормальное состояние 1. При этом атом излучает два кванта света: первичный с частотой ω_{21} и вторичный с частотой $\omega_{12} = \omega_{21}$. Вторичные фотоны неотличимы от первичных.

Таким образом, индуцированное излучение *когерентно и сонаправлено* с внешним электромагнитным излучением, вызвавшим переход.

НОРМАЛЬНАЯ И ИНВЕРСНАЯ ЗАСЕЛЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ

Воздействующая на вещество электромагнитная волна с частотой ω , совпадающей с одной из частот $(E_n - E_m)/\hbar$ атомов вещества ($E_n > E_m$), будет вызывать два процесса: вынужденный переход $m \rightarrow n$ с энергетически более низкого уровня на более высокий и вынужденный переход $n \rightarrow m$.

Первый переход ослабляет падающий поток, второй – увеличивает интенсивность падающей волны.

Результат: зависит от того, какой из процессов преобладает.

Из статистической физики: число атомов в нормальном (более низком) энергетическом состоянии больше числа возбужденных атомов. Поэтому электромагнитное излучение при прохождении через вещество ослабляется.

Но: можно создать состояние, при котором число возбужденных атомов будет больше числа атомов в нормальном состоянии.

Это *инверсное* (обращенное) состояние. Неравновесное.

НОРМАЛЬНАЯ И ИНВЕРСНАЯ ЗАСЕЛЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ

Процесс перевода вещества в состояние с инверсной заселенностью - *накачка*.

Способы накачки: оптические, тепловые, химические, электроионизационные, другие.

Среда, заполненная веществом с инверсной заселенностью, называется *активной средой*.

В веществе с инверсной заселенностью уровней электромагнитное излучение, проходящее через вещество, усиливается.

Вывод: среда с инверсной заселенностью энергетических уровней усиливает электромагнитное излучение с частотой

$$\omega = (E_n - E_m) / \hbar$$

Использование: оптические квантовые генераторы – *лазеры*, генераторы микроволнового излучения – *мазеры*.

Первые квантовые генераторы созданы в 1954 году Н.Г.Басовым и А. М.Прохоровым (советские ученые) и Таунсом (США).

Басов Николай Геннадиевич



Басов Н.Г. (1922-2001) - Академик АН СССР, доктор наук. Основные направления научной деятельности: физика лазеров и квантовая электроника, один из основоположников квантовой электроники; первооткрыватель принципа генерации и усиления излучения квантовыми системами, один из создателей *мазера* (1954). лауреат **Нобелевской премии** (совместно с Прохоровым А.М. и Ч.Х. Таунсом) (1964); лауреат Ленинской (1959) и Государственной премий.

Прохоров Александр Михайлович



Прохоров А.М. (1916-2002) - Академик АН СССР, доктор наук. Основные направления научной деятельности: радиоп физика, физика ускорителей, радиоспектроскопии, квантовая электроника, нелинейная оптика. Совместно с Н.Г. Басовым сформулировал основные принципы квантового усиления и генерации (1953), что было реализовано при создании первого квантового генератора (мазера) на аммиаке (1954). Лауреат **Нобелевской премии** (совместно с Н.Г. Басовым и Ч.Х. Таунсом) (1964); лауреат Ленинской (1959) и Государственной премий.

Чарлз Хард Таунс



Чарлз Хард Таунс (1915 – 2015г.г.) - В 1958 запатентовал возможность создания оптического квантового генератора (лазера). В 1964 «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию излучателей и усилителей на лазерно-мазерном принципе», был удостоен **Нобелевской премии по физике** (совместно с Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым).

ПРИНЦИП РАБОТЫ КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА.

Принцип работы лазера.

Лазер имеет три компонента:

- 1). *Активную среду*, в которой создается состояние с инверсной заселенностью энергетических уровней;
- 2). *Систему накачки* для создания инверсии в активной среде;
- 3). *Оптический резонатор*, формирующий световой пучок.

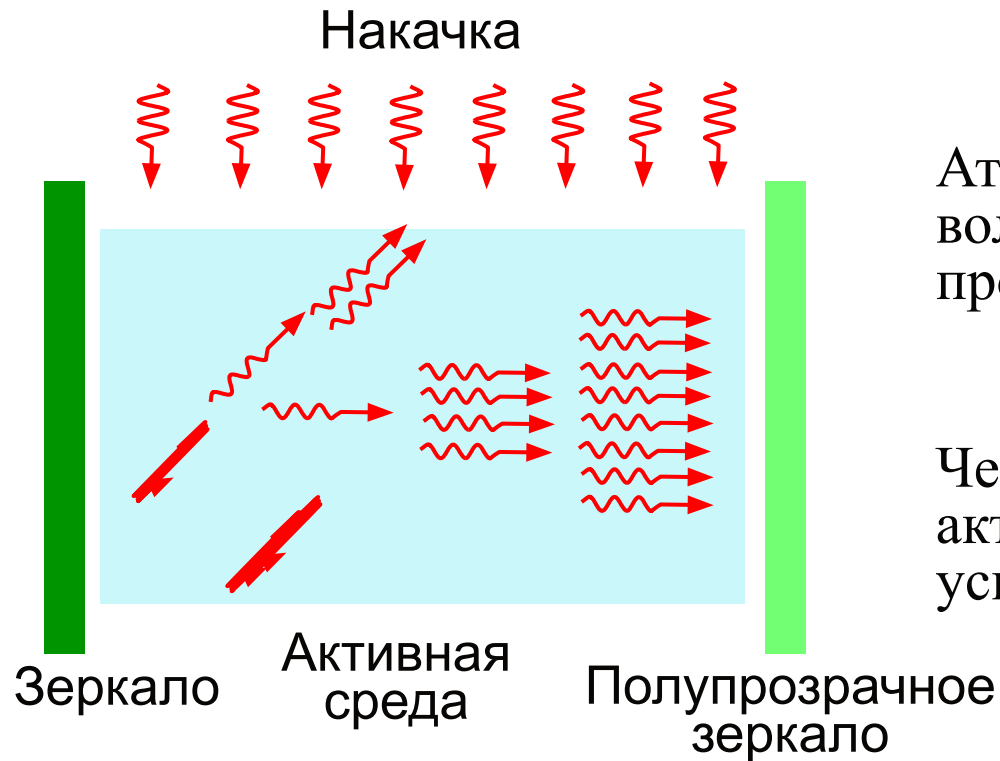
Простейший резонатор – это пара обращенных друг к другу плоских или вогнутых зеркал.

Между зеркалами помещается активная среда. Такая система называется *открытый резонатор*.

Для вывода излучения лазера одно из зеркал делается частично прозрачным.

Рассмотрим схему открытого резонатора

ПРИНЦИП РАБОТЫ КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА.

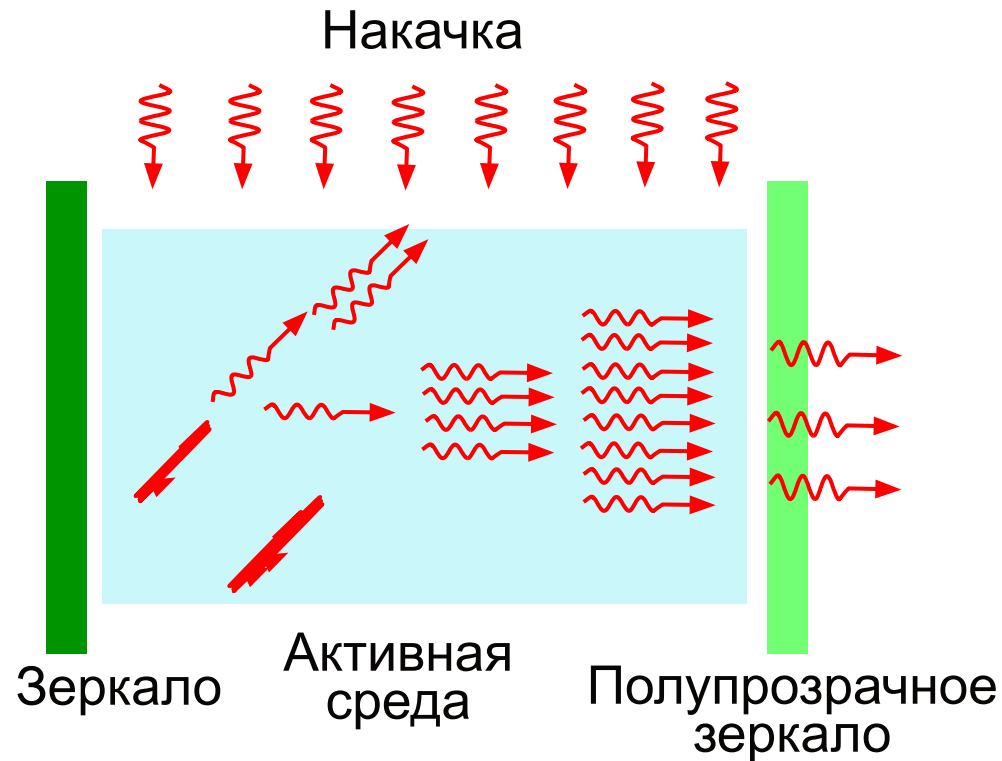


Атом излучает световую волну. Волна усиливается, проходя через активную среду.

Чем больше путь волны в активной среде, тем больше усиление световой волны.

Фотоны, движущихся вдоль оптической оси, многократно отражаются от зеркал резонатора и максимально усиливаются.

ПРИНЦИП РАБОТЫ КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА.



Число фотонов, движущихся вдоль оптической оси, лавинообразно нарастает.

Достигнув полупрозрачного зеркала, излучение частично выйдет наружу, частично отразится, и будет вновь использоваться для генерации лазерного излучения.

Усиленный и вышедший сквозь полупрозрачное зеркало поток фотонов создает направленный световой пучок большой яркости.

РУБИНОВЫЙ И ГАЗОВЫЙ ЛАЗЕРЫ.

РУБИНОВЫЙ и ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫЙ ЛАЗЕРЫ –
изучить самостоятельно.