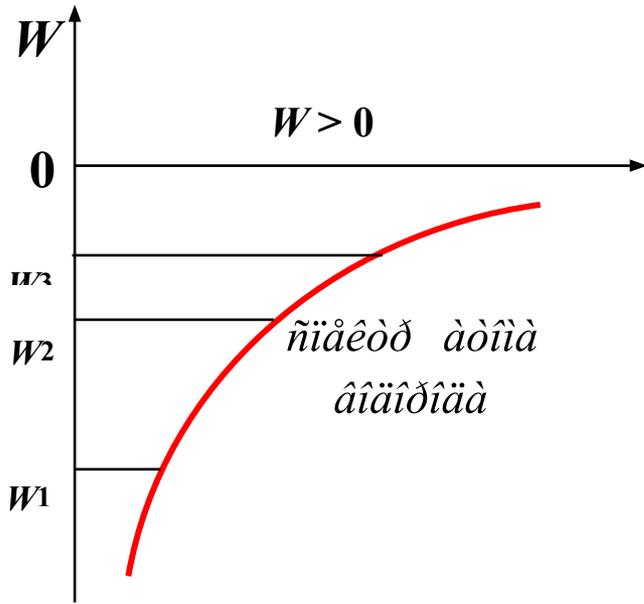


Вопросы:

- 1. Распределение электронов в атоме. Квантовые числа. Принцип Паули.**
- 2. Спонтанное и вынужденное излучение. Лазеры.**

Описание состояния электрона в атоме



В квантовой механике стационарные состояния электронов в атоме описываются волновой функцией $\psi = \psi(\vec{r})$, удовлетворяющей уравнению Шрёдингера:

$$\Delta \psi + \frac{2m\hbar^2}{\hbar^2} (W - U(r)) \psi = 0, \quad (1)$$

где для атома водорода ($Z = 1$)

$$U(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad \text{— потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром в атоме водорода.}$$

Уравнение (1) имеет решения либо при любых положительных энергиях W , либо при дискретных отрицательных энергиях W .

Таким образом, в квантовой механике дискретный энергетический спектр атома получается путем последовательного решения уравнения Шредингера без использования каких-либо искусственных постулатов.

Для атома
водорода:

$$W_n = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{m_e e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Решение уравнения Шредингера в сферической системе координат (r, θ, φ) дает собственные функции, содержащие три целочисленных параметра n, l, m :

$$\psi = \psi_{nlm}(r, \theta, \varphi)$$

и один полуцелочисленный параметр m_s , принимающий значения $\pm 1/2$ и соответствующий расщеплению пучка атомов водорода на 2 пучка в неоднородном магнитном поле (*опыты О.Штерна и В.Герлаха, 1921 г.*).

Квантовые числа

Из решения *уравнения Шредингера* следует, что для каждого стационарного состояния атома волновая функция ψ определяется *четырьмя квантовыми числами*.

- 1. Главное квантовое число n** определяет номер энергетического уровня в атоме и принимает любые натуральные значения, начиная с единицы: $n = 1, 2, 3, \dots$

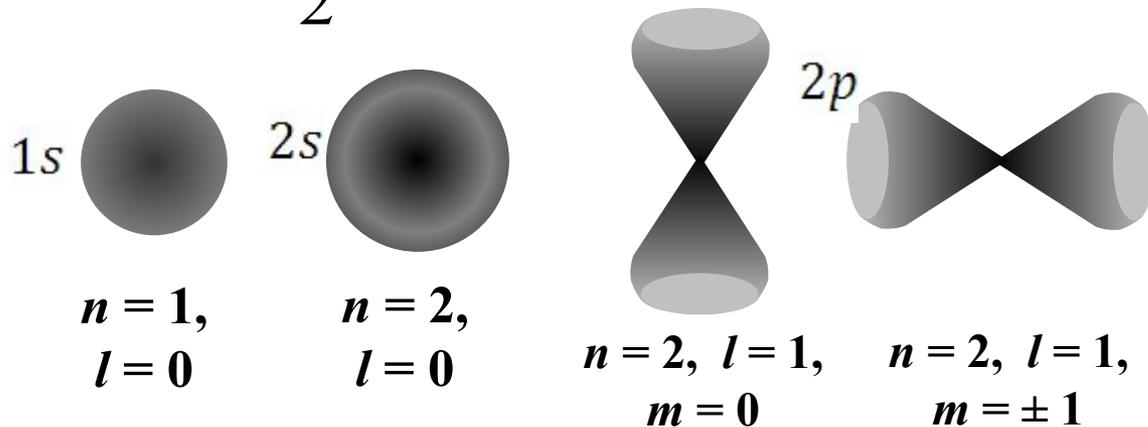
Число n	1	2	3	4
Обозначение электронной оболочки	K	L	M	N

- 2. Орбитальное квантовое число l** определяет форму электронного облака и при заданном n принимает значения: $l = 0, 1, \dots, n - 1$ (т.е. n значений).

Число l	0	1	2	3
Обозначение электронной подболочки	s	p	d	f

3. Магнитное квантовое число m определяет ориентацию электронного облака в пространстве и принимает значения: $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ (т.е. $2l + 1$ значений).

4. Спиновое квантовое число m_s характеризует направление собственного вращения электрона и принимает всего два значения: $m_s = \pm \frac{1}{2}$.



**Пространственные распределения
электронных состояний**

Принцип Паули (1925 г.)

Распределение электронов в атоме по состояниям определяется набором четырех квантовых чисел n, l, m, m_s и принципом В.Паули: в одном и том же атоме не может быть более одного электрона с одинаковым набором четырех квантовых чисел.



Вольфганг Паули
(1890 – 1958)

Принцип В.Паули выполняется для *фермионов* – частиц с полуцелым спином (электроны, протоны, нейтроны), описываемых антисимметричными волновыми функциями:

$$\psi(-x) = -\psi(x).$$

Более общая формулировка принципа Паули: в системе одинаковых фермионов любые два из них не могут одновременно находиться в одном и том же квантовом состоянии.

Определение максимально возможных наборов электронов для данного атома

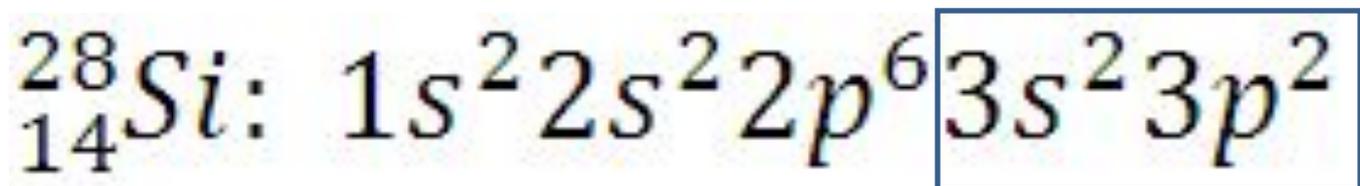
Исходя из принципа Паули, находим:

$$Z_{\max}(n, l, m, m_s) = 1 \quad Z_{\max}(n, l, m) = 2$$

$$Z_{\max}(n, l) = 2(2l + 1) \text{ – максимальное число электронов в подоболочке.}$$

$$Z_{\max}(n) = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l + 1) = 2n^2 \text{ – максимальное число электронов в оболочке.}$$

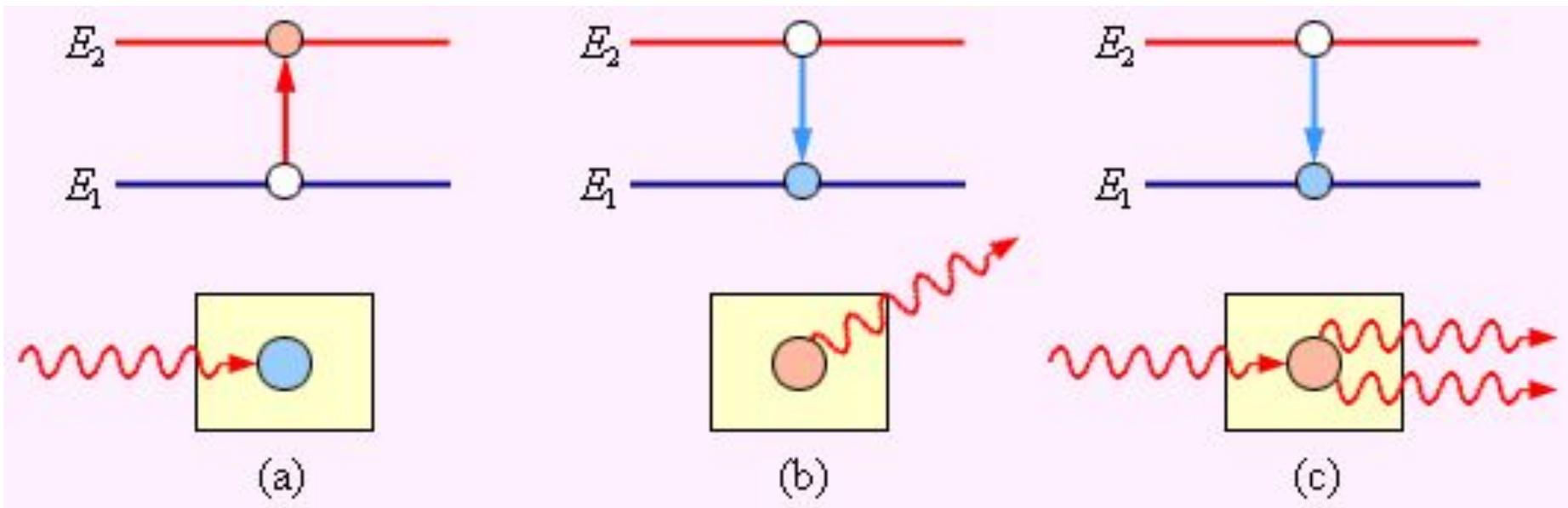
Пример электронной конфигурации (атом кремния):



Валентные электроны

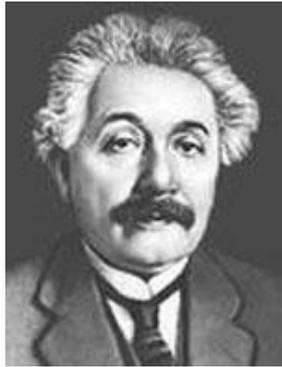
Спонтанное и вынужденное излучение

Переход возбужденного атома (а) в основное состояние приводит к возникновению двух видов излучения:
спонтанного (b) и вынужденного (c).



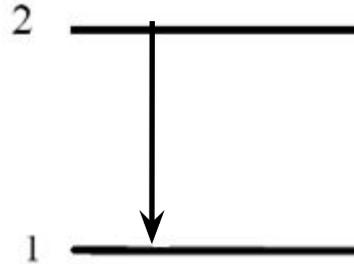
Спонтанное (самопроизвольное) излучение – это излучение фотона возбужденным атомом без внешних воздействий.

Вынужденное (индуцированное) излучение – это излучение фотона возбужденным атомом под действием внешнего монохроматического излучения.



Альберт Эйнштейн
(1879 – 1955)

Вынужденное излучение было впервые предсказано и описано А.Эйнштейном в 1916 г. (задача о резонансном взаимодействии излучения с двухуровневой квантовой системой).

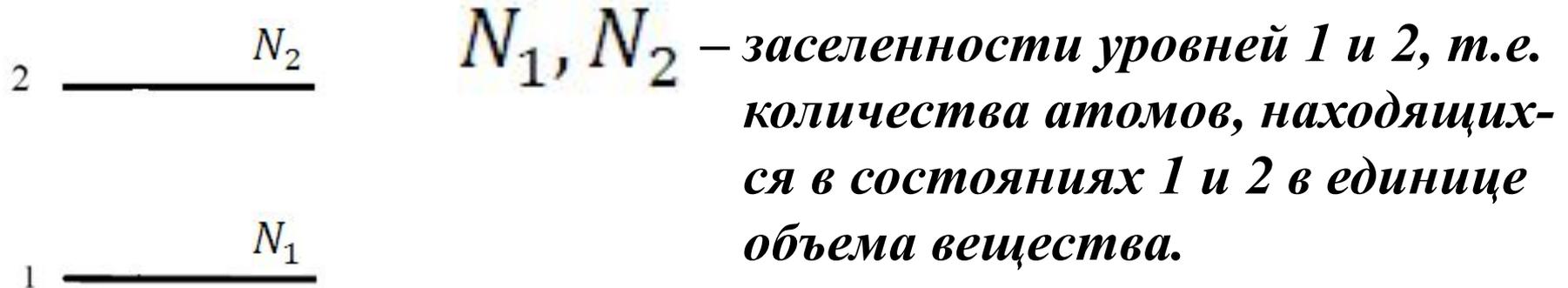


$$\nu = \frac{1}{h} \cdot (E_2 - E_1)$$

Свойства вынужденного излучения:

- первичный (вынуждающий) фотон и вторичный (новый) фотон имеют одинаковую энергию и распространяются в одном направлении, т.е. являются тождественными;
- вынужденное излучение *строго когерентно* с вынуждающим излучением, т.е. направление вылета фотонов, их фаза и поляризация одинаковы;
- вынужденное излучение при определенных условиях приводит к усилению потока падающих фотонов.

Условие усиления света, проходящего через среду



В равновесном состоянии:

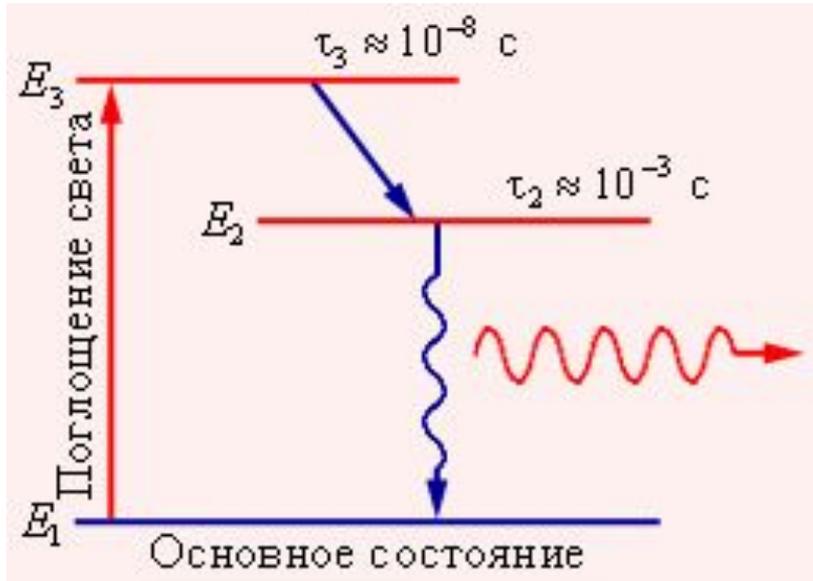
$$\frac{N_2}{N_1} = \exp \left[-\frac{(E_2 - E_1)}{k_B T} \right] < 1$$

(т.е. число актов поглощения излучения превышает число актов появления новых фотонов).

Для усиления падающей световой волны необходимо создать неравновесное состояние системы, при котором число атомов N_2 на возбужденном уровне было бы больше, чем число атомов N_1 в основном состоянии. Такие состояния называются состояниями с инверсной заселенностью.

Трехуровневая схема оптической накачки

Процесс перевода среды в состояние с инверсной заселенностью называется *накачкой среды*.



Практическое осуществление накачки среды впервые было осуществлено по трехуровневой схеме, предложенной академиком Н.Басовым и А.Прохоровым в 1955 г.



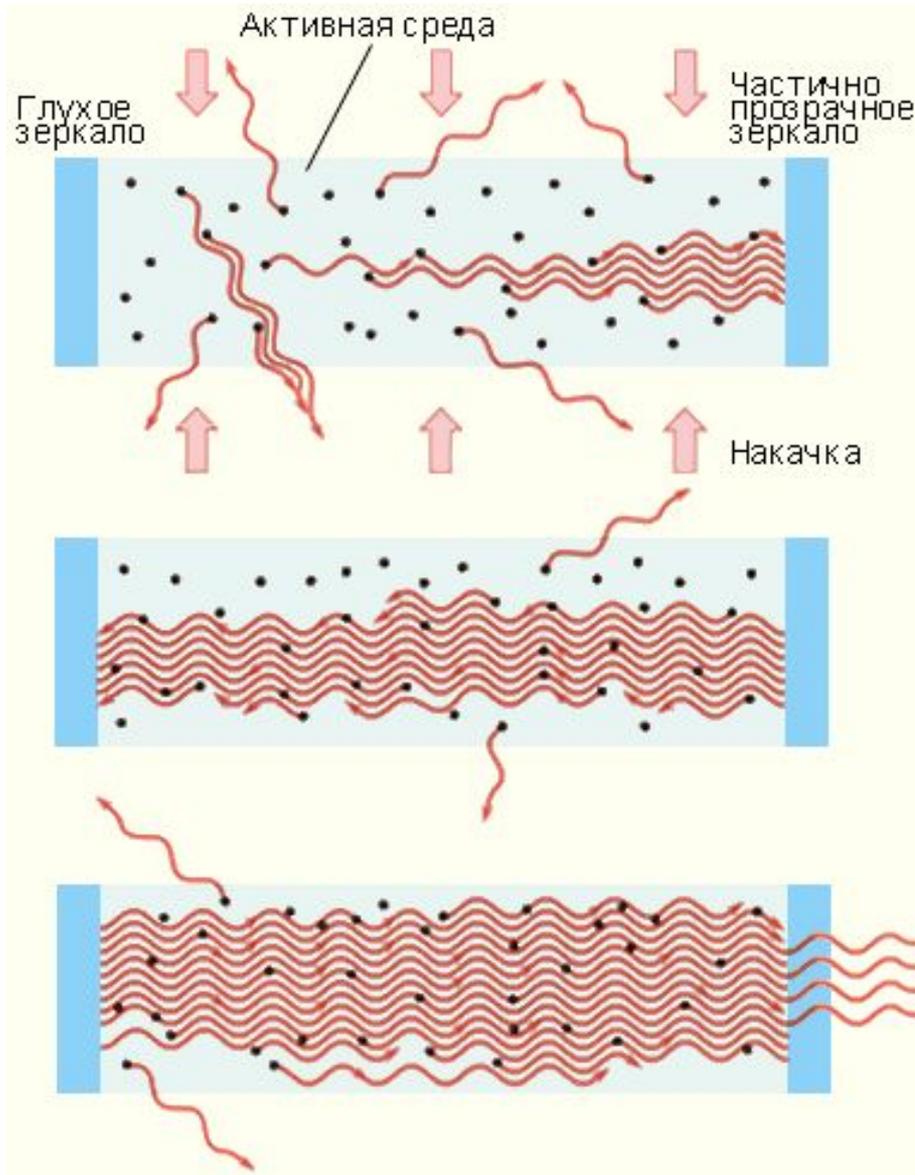
За счет специальных молекулярных примесей создается метастабильный уровень E_2 .



**Николай Геннадьевич
Басов (1922 – 2001)**

**Александр Михайлович
Прохоров (1916 – 2002)**

Развитие лавинообразного процесса генерации когерентного излучения в активной среде



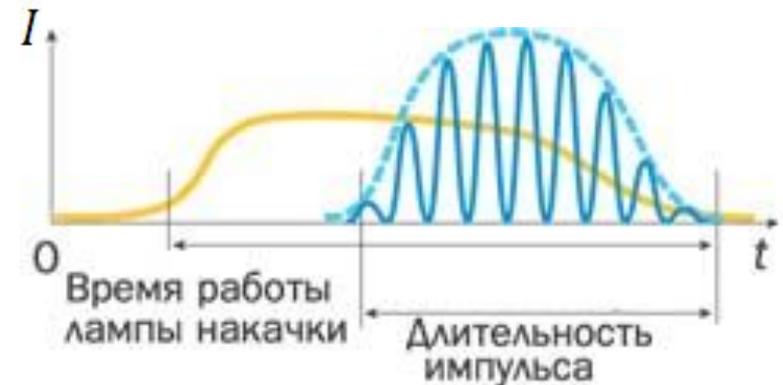
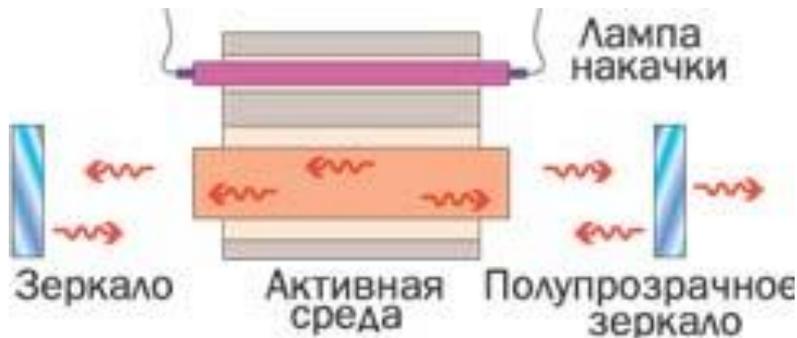
Активная среда – вещество с инверсной заселенностью.

Увеличение интенсивности выходного излучения достигается за счет интерференции когерентных волн, выходящих из генератора.

$$2nL = m\lambda$$
$$m = 1, 2, \dots$$

Принцип работы лазера

Лазеры, или оптические квантовые генераторы, – это современные когерентные источники вынужденного излучения в оптическом диапазоне, основанные на принципе усиления электромагнитного излучения в активной среде.



Принципиальная схема твердотельного импульсного лазера

Первый лазер, работающий в оптическом диапазоне длин волн, был создан в 1960 году американским физиком Т. Мейманом.



**Теодор Мейман
(1927 – 2007)**

Свойства лазерного излучения

1. Высокая временная и пространственная когерентность.

$$\tau_{\text{КОГ}} \sim 10^{-3} \text{ с} \Rightarrow l_{\text{КОГ}} = c\tau_{\text{КОГ}} \sim 3 \cdot 10^5 \text{ м}$$

(Для сравнения: в обычных источниках света $l_{\text{КОГ}} \sim 3 \text{ м}$).

2. Строгая монохроматичность.

$$\Delta\lambda \leq 10^{-11} \text{ м}$$

3. Большая плотность потока энергии ($\geq 10^{10} \text{ Вт/м}^2$).

4. Малое угловое расхождение в пучке.

(Для сравнения: луч лазера с Земли даст на Луне пятно размером 3 км, луч прожектора – 40 тыс. км).