



Вынужденное  
излучение.  
Принцип  
действия лазера

# Понятие о вынужденном излучении

Вынужденное излучение, индуцированное излучение — генерация нового фотона при переходе квантовой системы (атома, молекулы, ядра и т. д.) из возбуждённого в стабильное состояние (меньший энергетический уровень) под воздействием индуцирующего фотона, энергия которого была равна разности энергий уровней.

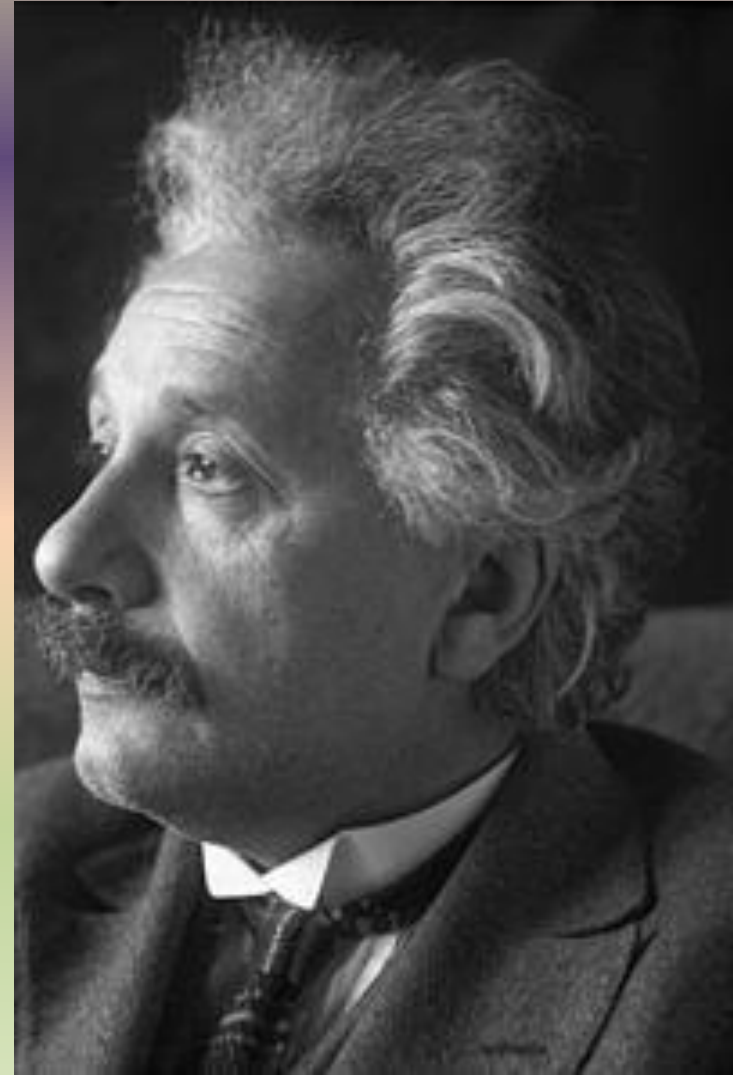
# Квантовые энергетические уровни



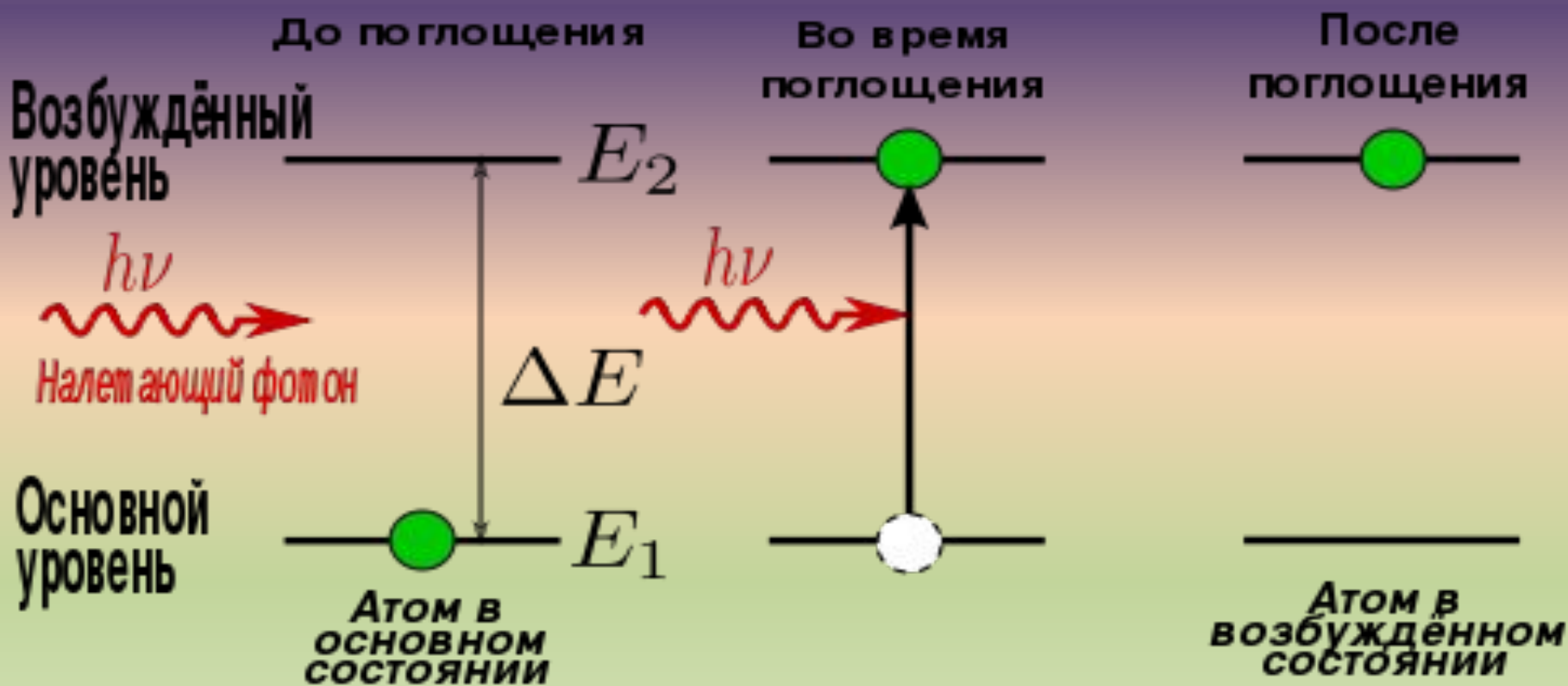
Представление о квантовых энергетических уровнях атомов было введено в физику Нильсом Бором в 1913 г. Оно объяснило линейчатые атомные спектры как результат процессов спонтанного излучения и резонансного поглощения света атомами.

# Гипотеза Эйнштейна

Большой вклад в разработку вопроса о вынужденном излучении (испускании) внес А. Эйнштейн. Гипотеза Эйнштейна состоит в том, что под действием электромагнитного поля частоты  $\omega$  молекула (атом) может:

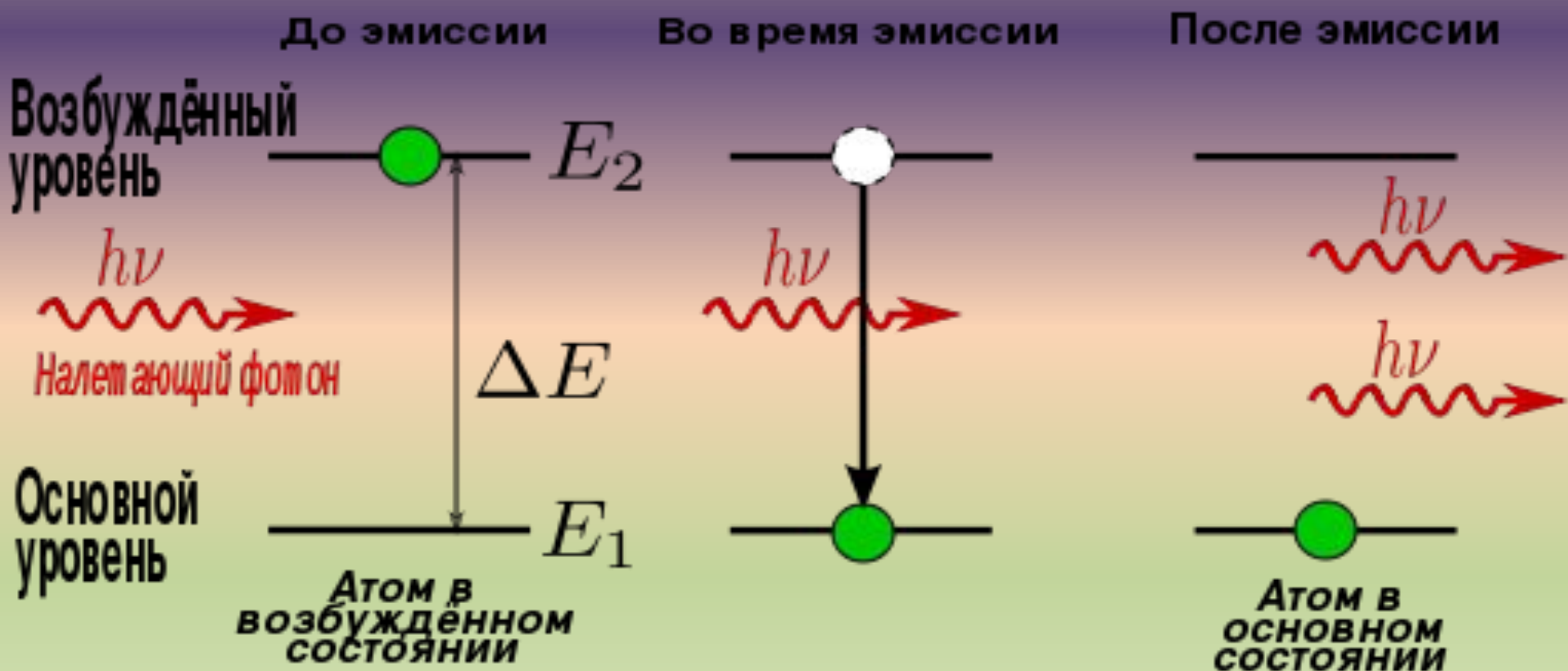


- перейти с более низкого энергетического уровня на более высокий с поглощением фотона энергией  $h\nu = E_2 - E_1$



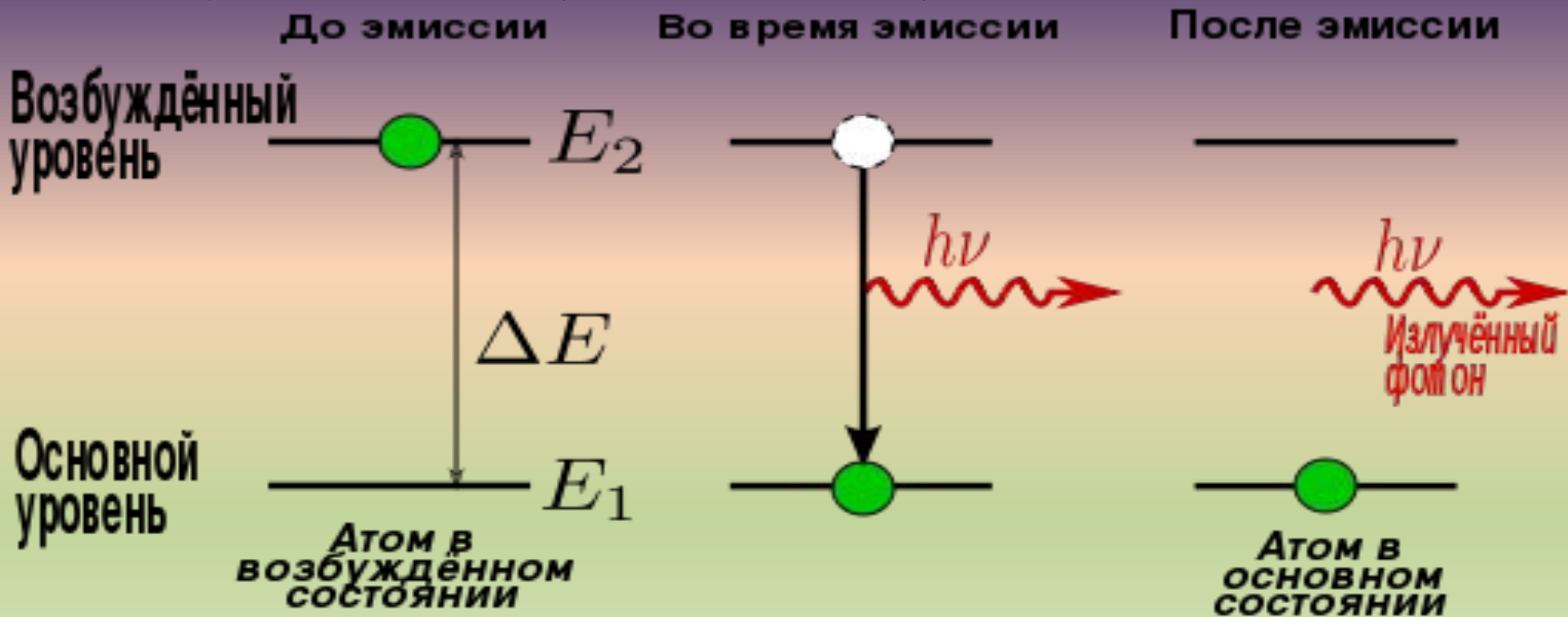
$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

- перейти с более высокого энергетического уровня на более низкий с испусканием фотона энергией  $h\nu = E_2 - E_1$



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

- кроме того, как и в отсутствие возбуждающего поля, остаётся возможным самопроизвольный переход молекулы (атома) с верхнего на нижний уровень с испусканием фотона энергией  $h\nu = E_2 - E_1$



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

Первый процесс принято называть поглощением, второй — вынужденным (индуцированным) испусканием, третий — спонтанным испусканием.

Скорость поглощения и вынужденного испускания фотона пропорциональна вероятности соответствующего перехода:

$$B_{12} \cdot u \text{ и } B_{21} \cdot u,$$

где  $B_{12}$ ,  $B_{21}$  — коэффициенты Эйнштейна для поглощения и испускания,  $u$  — спектральная плотность излучения.



# Свойства вынужденного излучения:

1. Вынужденное излучение распространяется строго в том же направлении, что и излучение, его вызвавшее.
2. Фаза волны вынужденного излучения, испускаемого атомом, точно совпадает с фазой падающей волны.
3. Вынужденное излучение линейно поляризовано с той же плоскостью поляризации, что и падающее излучение.

Таким образом, кванты вынужденного излучения неотличимы от первичных стимулирующих квантов. Поэтому вынужденное излучение при распространении в веществе отличается от спонтанного излучения ничтожно малой расходимостью пучка, а также когерентностью и линейной поляризацией волны.

Эта особенность вынужденного излучения лежит в основе действия усилителей и генераторов света, называемых **лазерами**.

Если  $P_{nm}$  - вероятность вынужденного перехода атома в единицу времени с энергетического уровня  $E_n$  на уровень  $E_m$ , а  $P_{mn}$  - вероятность обратного перехода. При одинаковой интенсивности излучения  $P_{nm} = P_{mn}$ . Вероятность вынужденных переходов пропорциональна плотности энергии  $u_\omega$  вынуждающего переход электромагнитного поля, приходящейся на частоту  $\omega$ , соответствующую данному переходу  $\omega = (E_n - E_m)/\hbar$ , где  $\hbar = h/2\pi$ ,  $h$  - постоянная Планка,  $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Дж\*с.

$P_{nm} = V_{nm} u_\omega$ ,  $P_{mn} = V_{mn} u_\omega$ , где  $V_{nm}$  и  $V_{mn}$  - коэффициенты пропорциональности, называемые коэффициентами Эйнштейна. При условии равновесия  $V_{nm} = V_{mn}$

Предположим, что  $E_n > E_m$ . Тогда переходы  $m \rightarrow n$  смогут происходить только под воздействием излучения, переходы  $n \rightarrow m$  будут совершаться как вынужденно, так и спонтанно.

$$N_{mn} = N_{mn}(\text{вынужд}), \quad N_{nm} = N_{nm}(\text{вынужд}) + N_{nm}(\text{спонт})$$

Условие равновесия имеет вид:

$$N_{mn}(\text{вынужд}) = N_{nm}(\text{вынужд}) + N_{nm}(\text{спонт});$$

$$N_{mn}(\text{вынужд}) = P_{mn} N_m = V_{mn} \rho_{\omega} N_m ,$$

$$N_{nm}(\text{вынужд}) = P_{nm} N_n = V_{nm} \rho_{\omega} N_n ,$$

Где  $N_m$  и  $N_n$  - числа атомов в состояниях  $m$  и  $n$ .

Если  $A_{nm}$  - вероятность спонтанного перехода в единицу времени.

$$N_{nm(\text{спонт})} = A_{nm} N_n.$$

$$B_{mn} \omega N_m = B_{nm} \omega N_n + A_{nm} N_n.$$

$$u(\omega, T) = \frac{A_{nm} N_n}{B_{mn} N_m - B_{nm} N_n} = \frac{A_{nm}}{B_{nm}} \frac{1}{N_m/N_n - 1},$$

Равновесное распределение атомов по состояниям с различной энергией определяется законом Больцмана

$$\frac{N_m}{N_n} = \exp \frac{E_n - E_m}{kT} = \exp \frac{\hbar \omega}{kT}.$$

$$\text{Следовательно } u(\omega, T) = \frac{A_{nm}}{B_{nm}} \frac{1}{\exp(\hbar \omega / kT) - 1}$$

Для малых частот в случае  $h\omega \ll kT$  можно произвести замену  $\exp(h\omega/kT) \approx 1 + h\omega/kT$ , в результате :

$$\Rightarrow u(\omega, T) = \frac{A_{nm} kT}{B_{nm} h\omega},$$

Из формулы Рэлея-Джинса получаем


$$\frac{A_{nm}}{B_{nm}} = \omega^2 c^3.$$

в результате подстановки получаем формулу

Планка 
$$\frac{\omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{h}{\exp(h\omega/kT) - 1}$$

$$u(\omega, T) = \frac{h \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\exp(h\omega/kT) - 1}.$$

# ЛАЗЕР



*laser* - аббревиатура выражения  
*light amplification by stimulated  
emission of radiation* -

усиление света вынужденным  
излучением

Вещество в обычных равновесных условиях поглощает излучение, и по мере распространения излучения в веществе его энергия уменьшается. Это уменьшение энергии излучения в пучке, распространяющемся вдоль направления оси, описывается законом Бугера:

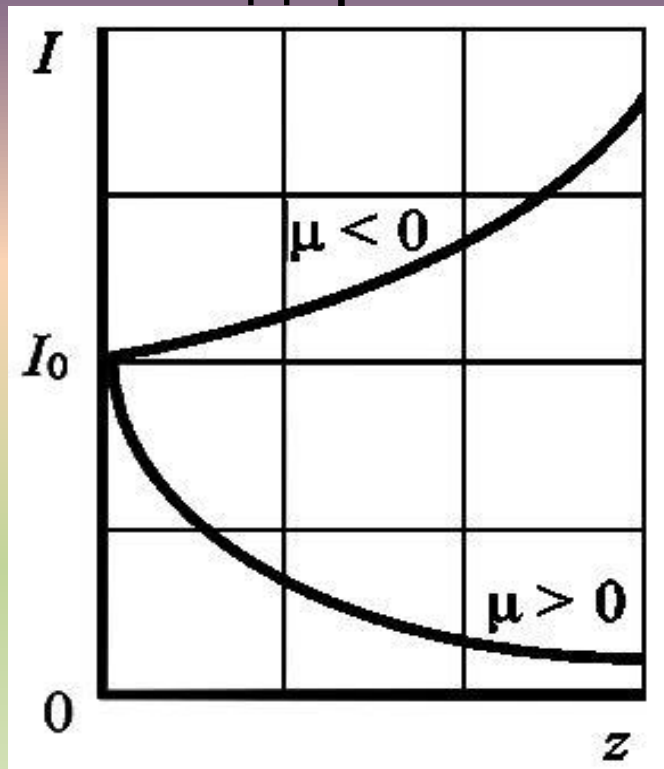
$$I(z) = I_0 \exp(-\mu z)$$

Где  $I_0$  - интенсивность излучения на входе в вещество,  $I(z)$  - интенсивность на глубине  $z$ ,  $\mu$  - коэффициент поглощения вещества.

Для сред, поглощающих излучение, коэффициент  $\mu$  положителен.

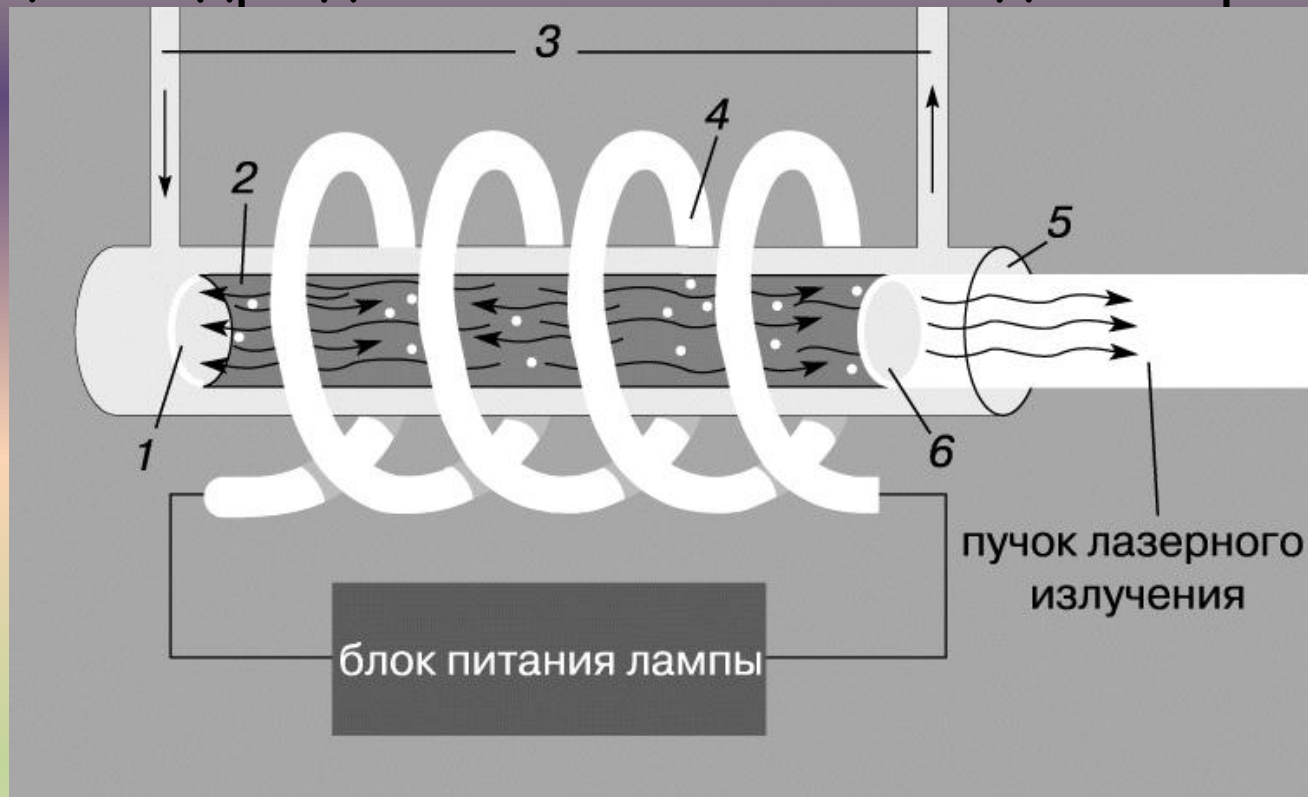


Профессор МЭИ *В.А. Фабрикант* в 1939 г. показал, что среда может усиливать вынужденное излучение, но такая *активная среда* должна иметь *инверсную заселенность энергетических уровней*. Инверсия (от латинского - переворачивание, перестановка) заселенностей уровней соответствует нестандартной заселенности, когда в среде число



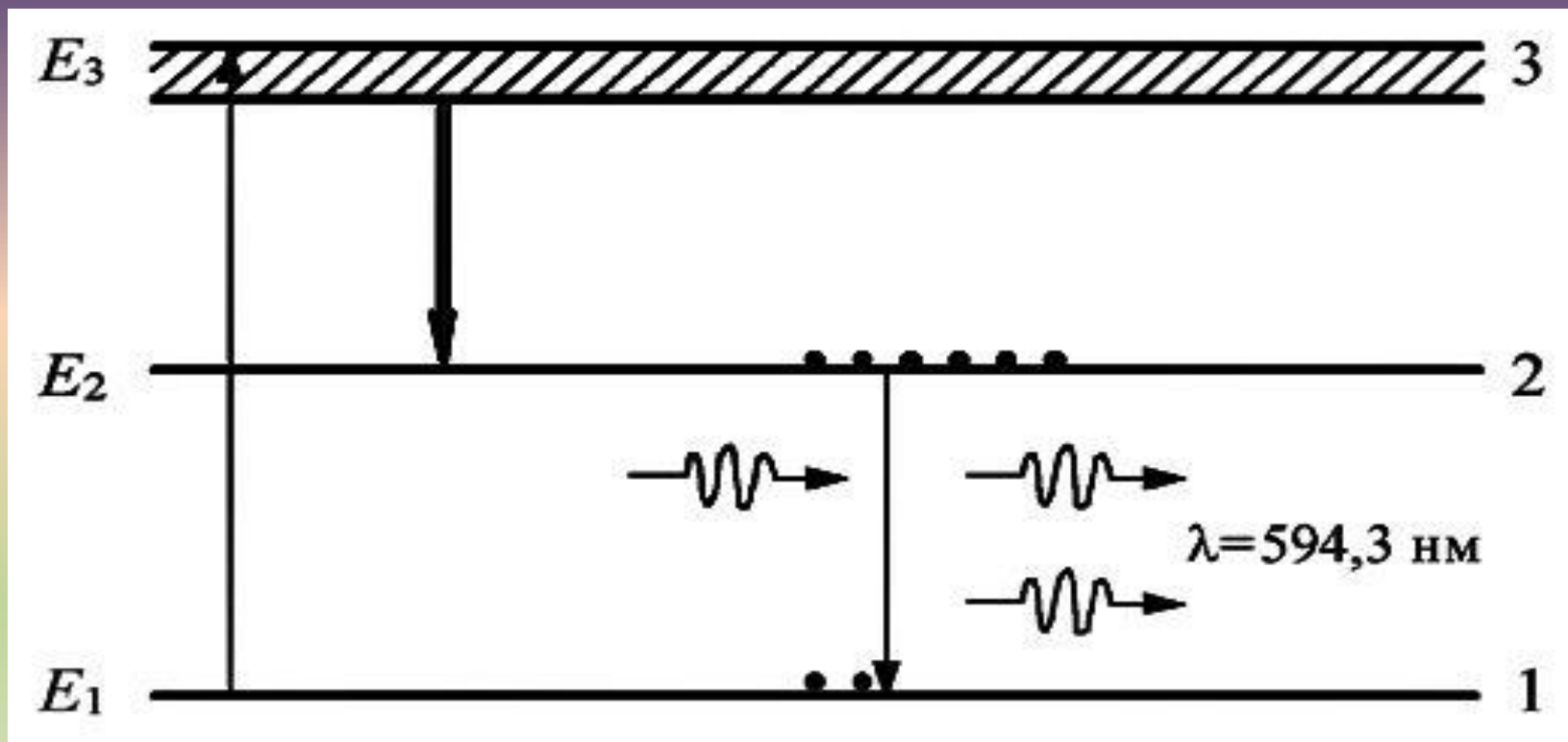
возбужденном состоянии  
ает число атомов в  
состоянии.  
ов с инверсной  
можно рассматривать  
с отрицательным  
ения.

В 1960 г. был создан (Г.Мейман, США) оптический квантовый генератор, получивший название лазера. Рабочим веществом лазера служил монокристалл рубина (корунд  $Al_2O_3$  с примесями  $Cr^{3+}$ ) в виде цилиндра длиной около 5 см и диаметра 1 см.



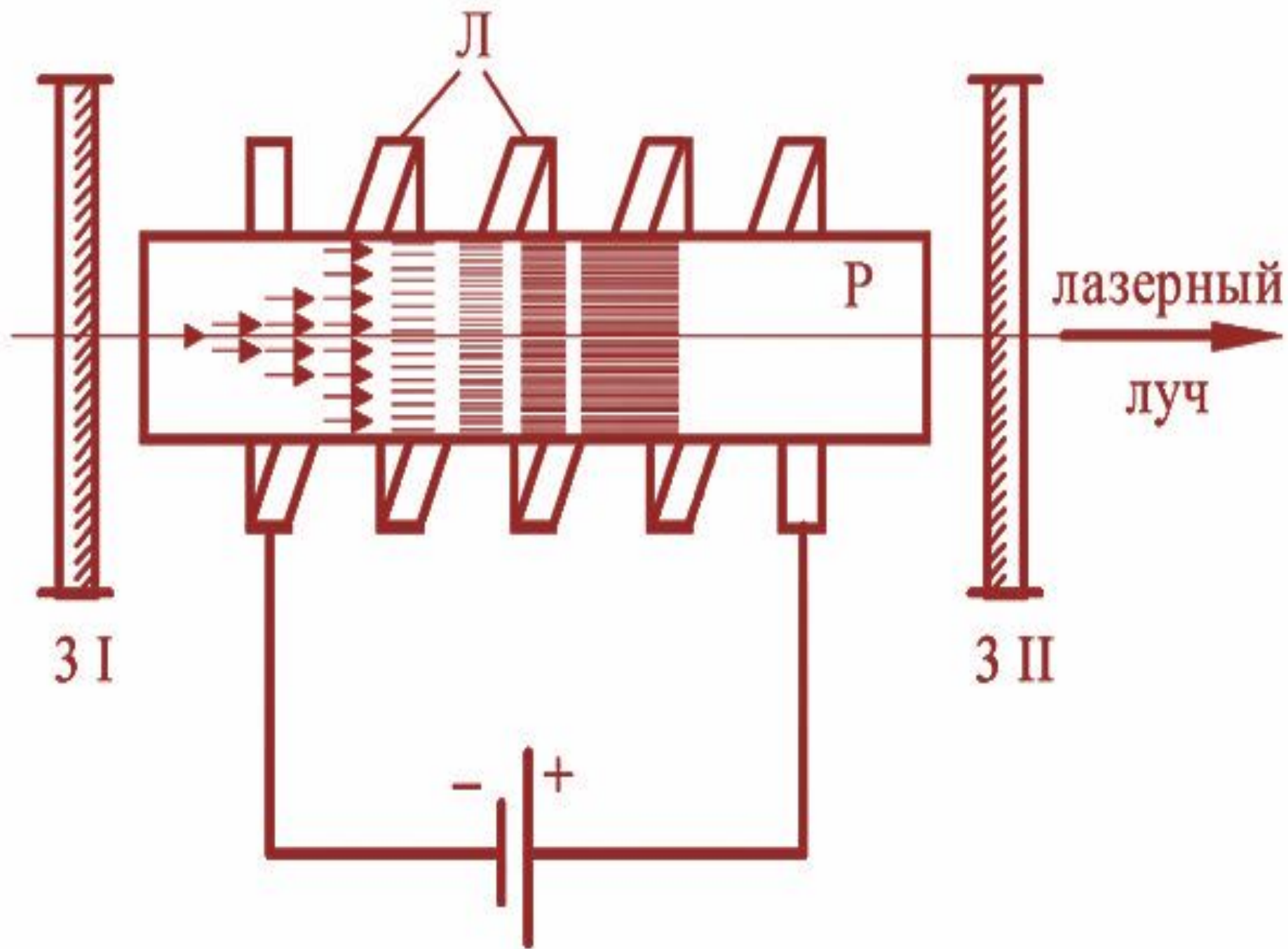
1 - посеребренный торец стержня (глухое зеркало); 2 - рубиновый стержень; 3 - охлаждающая жидкость; 4 - газоразрядная лампа накачки; 5 - кожух (трубка) охлаждения; 6 - слабо посеребренный торец стержня (полупрозрачное зеркало).

Для создания инверсии заселенностей уровней в лазерах наиболее часто используется метод трех уровней. Энергетический спектр атомов (ионов) содержит три уровня с энергиями  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  (совокупность близко расположенных уровней)



Главная особенность трехуровневой системы состоит в том, что уровень 2, расположенный ниже уровня 3, должен быть метастабильным уровнем.

Время жизни атома в метастабильном состоянии ( $\sim 10^{-3}$  с) в сотни раз превышает время жизни атома в обычном возбужденном состоянии ( $\sim 10^{-8}$  с). Это обеспечивает возможность накопления возбужденных атомов с энергией  $E_2$ . Процесс сообщения рабочему телу лазера для перевода атомов в возбужденное состояние называют **накачкой**. Существуют различные физические механизмы накачки. В рубиновом лазере используется импульсная оптическая накачка.



На время инверсии рубиновый стержень превращается в активную среду, которая может усиливать вынужденное излучение с длиной волны  $\lambda = 594,3 \text{ нм}$  (красный свет), соответствующее переходу  $2 \rightarrow 1$ . Поэтому, если в результате спонтанного перехода рождается фотон с такой длиной волны, то, взаимодействуя с атомами хрома, он индуцирует новые фотоны, точно копирующие первоначальный. Процесс рождения вынужденных фотонов при распространении в рубине излучения носит лавинообразный характер.

Для того, чтобы такой оптический усилитель превратить в оптический генератор когерентного лазерного излучения, необходимо обеспечить положительную обратную связь при помощи *оптического резонатора*, состоящего из двух строго параллельных плоских зеркал, расположенных вблизи торцов рубинового стержня.

В обычном свободном режиме генерации одно из зеркал, например,  $Z_{II}$ , делается полупрозрачным. Поэтому после многократного отражения от зеркал и усиления лазерный пучок становится достаточно интенсивным и получает возможность выхода через полупрозрачное зеркало. Затем следует новая вспышка лампы накачки и процесс повторяется. Лазер на рубине работает в импульсном режиме с частотой порядка нескольких импульсов в минуту. К настоящему времени обнаружены сотни кристаллов с примесями, которые можно использовать в качестве активных сред в твердотельных лазерах. Созданы лазеры на итриево-алюминиевом гранате, александрите, стекле с примесью неодима и других материалах.

# Типы лазеров.

Лазерное излучение реализовано во многих активных средах - твердых телах, жидкостях и газах.

- Твердотельные лазеры с оптической накачкой;
- Газовые лазеры;
- Химические лазеры;
- Полупроводниковые лазеры;
- Лазеры на красителях.

Приборы квантовой электроники - мазеры и лазеры нашли многообразные области применения.





Сварка, резка и плавление металлов осуществляется с помощью газовых лазеров. Лазеры применяются в медицине как бескровные скальпели. Когерентное излучение лазеров лечит глазные, кожные и другие болезни.

Сверхкороткие лазерные импульсы нашли применение в оптических линиях связи. Сверхстабильные мазеры и лазеры являются основой стандартов частот и времени. Лазерные локаторы позволяют контролировать распределение загрязнений в атмосфере. Лазерная локация космических объектов способствовала созданию систем космической навигации. Физики обсуждают возможные применения рентгеновских лазеров, схемы которых прорабатываются уже сейчас в физических лабораториях.



# Литература

• И.В. Савельев, Курс общей физики, том 2. Электричество, волны, оптика. М. Наука, 1982 г.