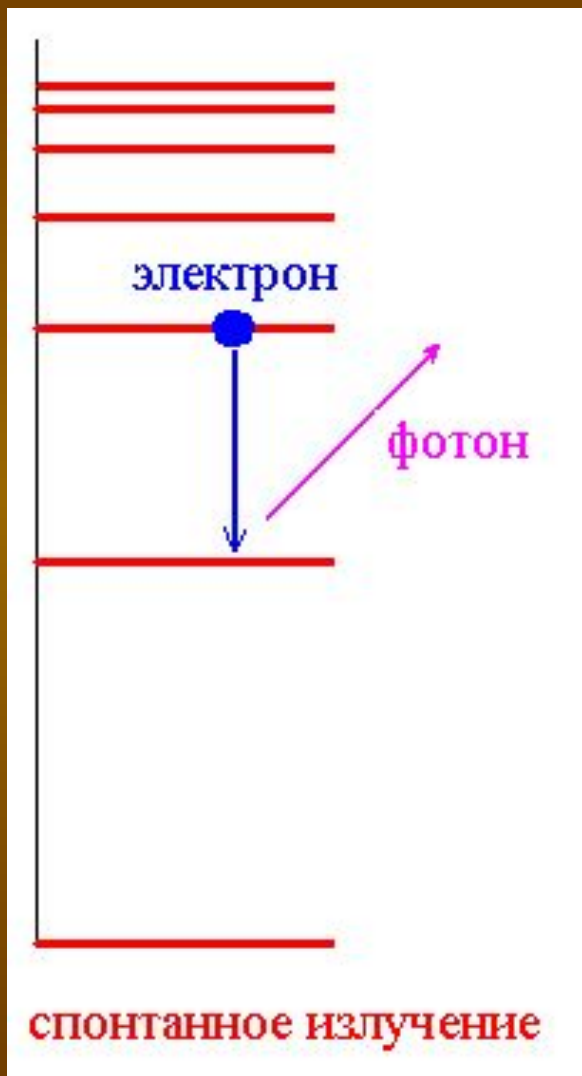


# Физические основы работы лазера

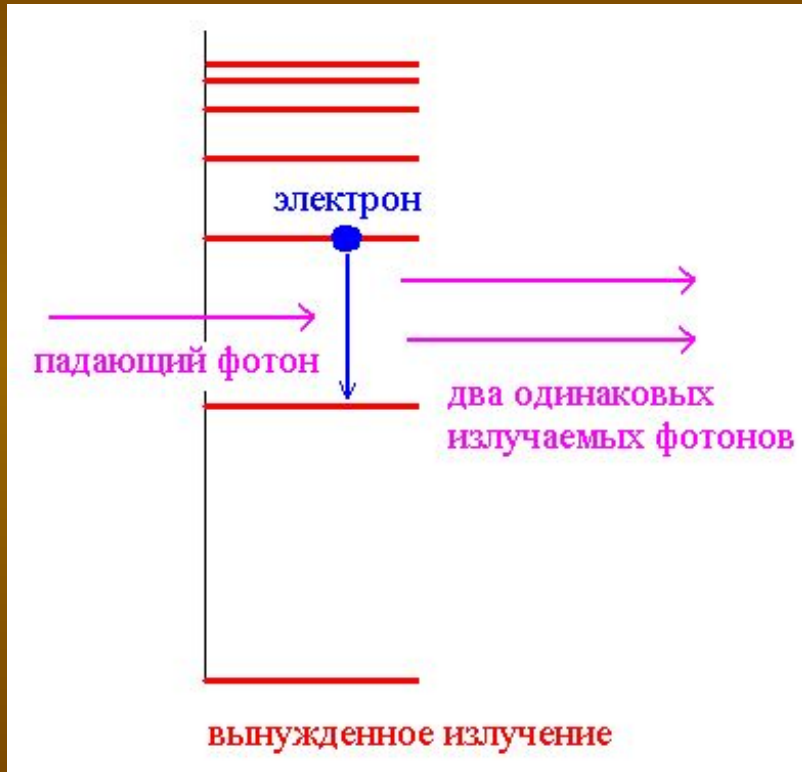


# Спонтанное излучение фотонов



- В процессе спонтанных переходов атомы и молекулы излучают фотоны независимо друг от друга.
- Фотоны хаотически испускаются в виде волновых пакетов (цугов), имеющих совершенно различные фазы.
- Следовательно, **спонтанное излучение некогерентное.**

# Вынужденное излучение фотонов



- Когда атом попадает в электромагнитное поле падающего на него фотона, энергия электрона начинает колебаться между двумя разрешенными уровнями энергии.
- В результате, согласно законам квантовой механики, образуется новый фотон, когерентный падающему.
- При вынужденном излучении электромагнитные волны когерентны.

При поглощении фотонов веществом интенсивность излучения  $I$  меняется по закону:

$$\frac{dI}{dx} = -\sigma_{12}N_1I$$

где  $\sigma_{12} = B_{12}h\nu/c$  – эффективное сечение поглощения,  
 $B_{12}$  – коэффициент Эйнштейна,  
 $N_1$  – плотность атомов в основном состоянии.

Знак «минус» означает ослабление интенсивности с ростом  $x$ .

При спонтанном излучении понижение плотности возбужденных атомов  $N_2$  за время  $t$  можно описать уравнением:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{N_2}{t}$$

Типичное время жизни возбужденного состояния для разрешенного перехода составляет  $\sim 1$  нс, а для запрещенного перехода  $\sim 1$  мс.

При **вынужденном излучении**:

$$\frac{dI}{dx} = \sigma_{21} N_2 I$$

где  $\sigma_{21}$  – эффективное сечение вынужденного излучения.  
Знак «плюс» означает усиление интенсивности падающей световой волны.

Если уровни 1 и 2 обладают одинаковым статистическим весом, то

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma$$

$$B_{12} = B_{21} = B$$

С учетом количества подуровней  $n_1$  и  $n_2$  на уровнях 1 и 2 имеем условие:

$$n_1 \sigma_{12} = n_2 \sigma_{21}$$

Вынужденное излучение сопровождается одновременным поглощением части излучения веществом.

Тогда  $dI = dI_{\text{вынужд. излучения}} - dI_{\text{погл.}}$

Если  $n_1 = n_2$

то получим уравнение:

$$\frac{dI}{dx} = -\sigma N_1 I + \sigma N_2 I = \sigma (N_2 - N_1) I$$

После интегрирования этого выражения получаем закон Бэра:

$$I = I_0 \exp(\sigma(N_2 - N_1)x)$$

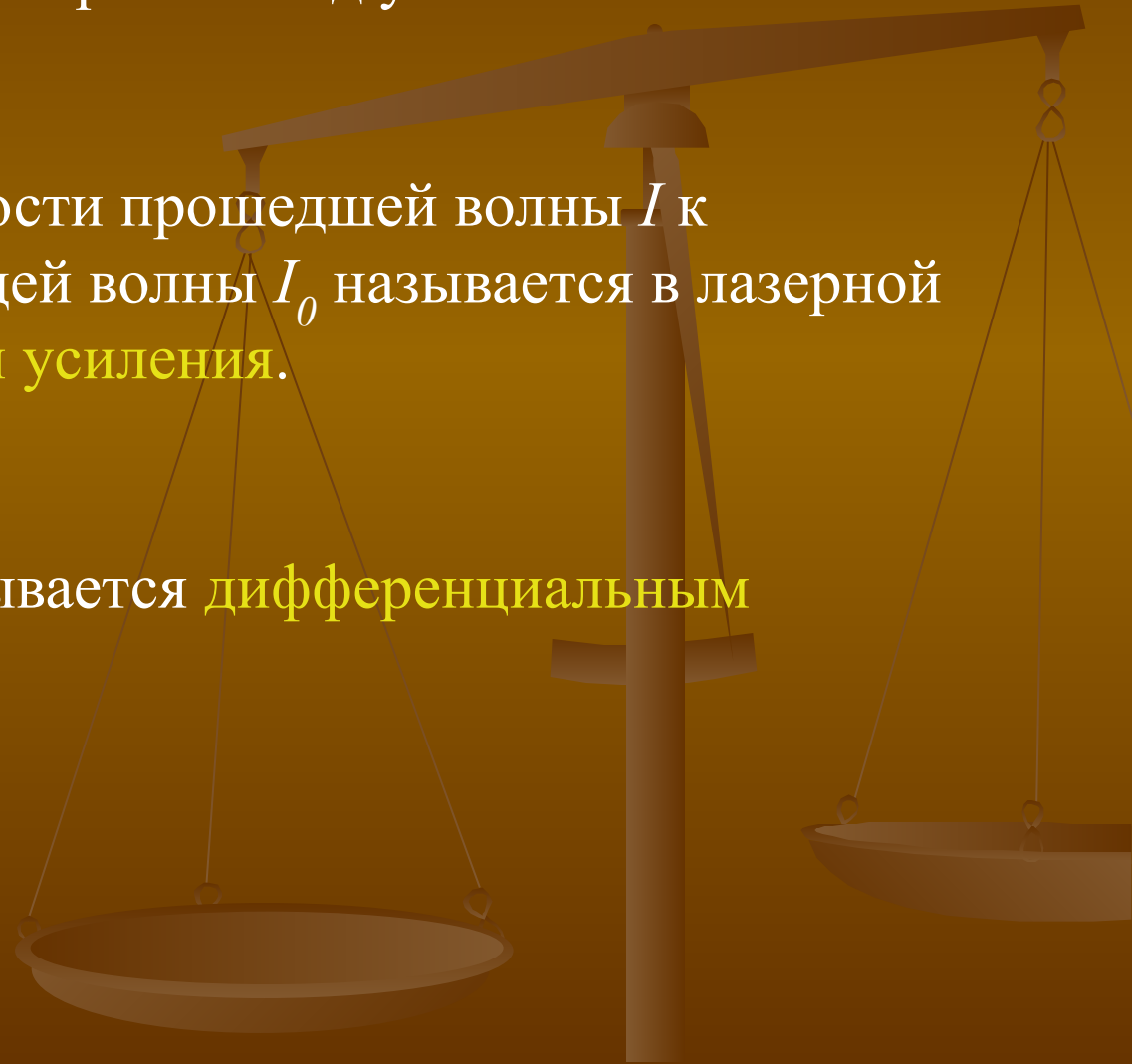
Если плотность атомов на верхнем уровне  $N_2$  больше плотности атомов на нижнем уровне  $N_1$ , экспонента будет положительной, следовательно, будет усиление света.

Это условие и есть самым важным в работе лазера и называется условием **инверсии населенностей**.

Если условие инверсии населенностей не выполняется, то поглощение будет доминировать над усилением.

Отношение интенсивности прошедшей волны  $I$  к интенсивности падающей волны  $I_0$  называется в лазерной физике коэффициентом усиления.

Величина  $\sigma(N_2 - N_1)$  называется дифференциальным усилением.





Естественная ширина линии при вынужденном излучении определяется соотношением неопределенности Гейзенберга и условием Бора:

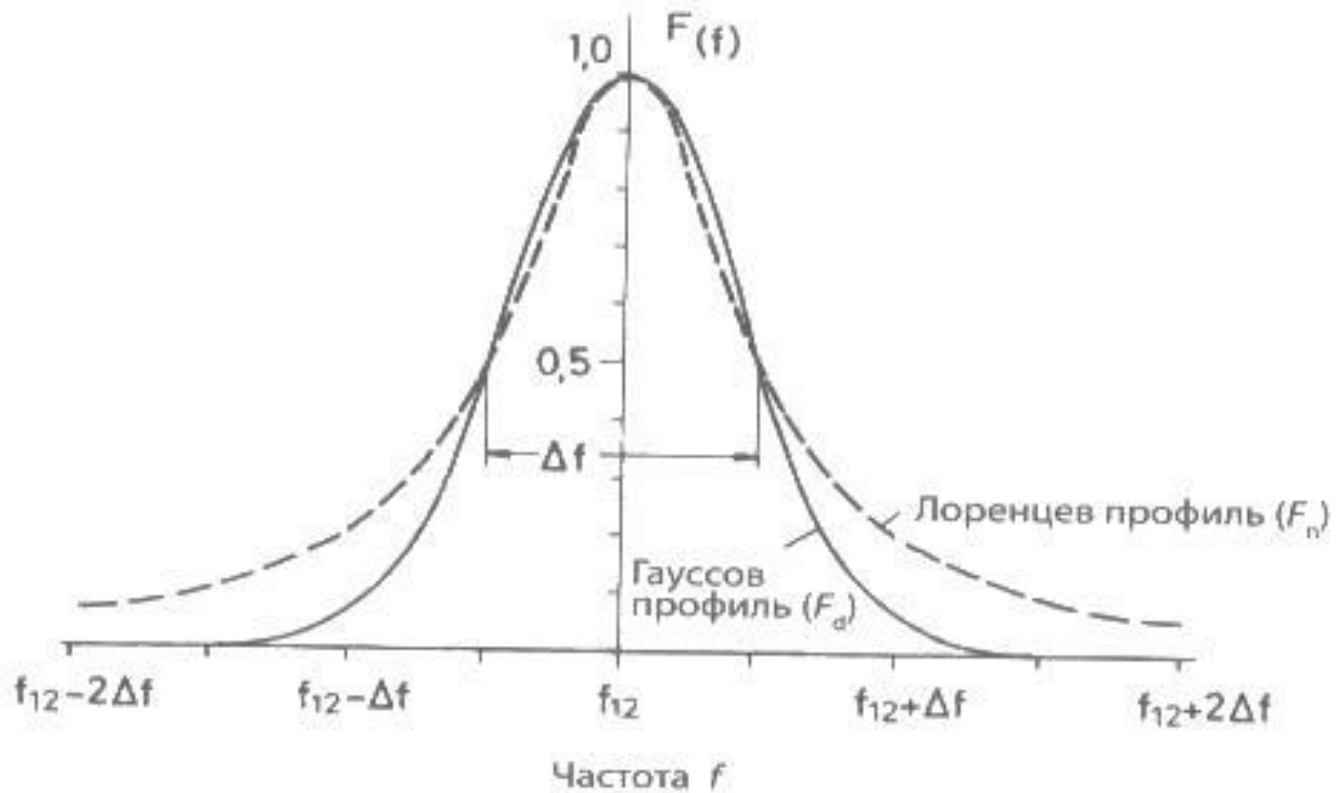
$$\Delta E = \frac{h}{2\pi t}$$

$$h\nu_{12} = \Delta E$$

Тогда ширина полосы одной линии определяется как

$$\Delta \nu = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – время жизни на соответствующем уровне.



В реальности множество разных факторов приводят к уширению частоты излучения, например, упругие столкновения между атомами и молекулами в газе, колебания решетки в твердых телах, доплеровское уширение и др.

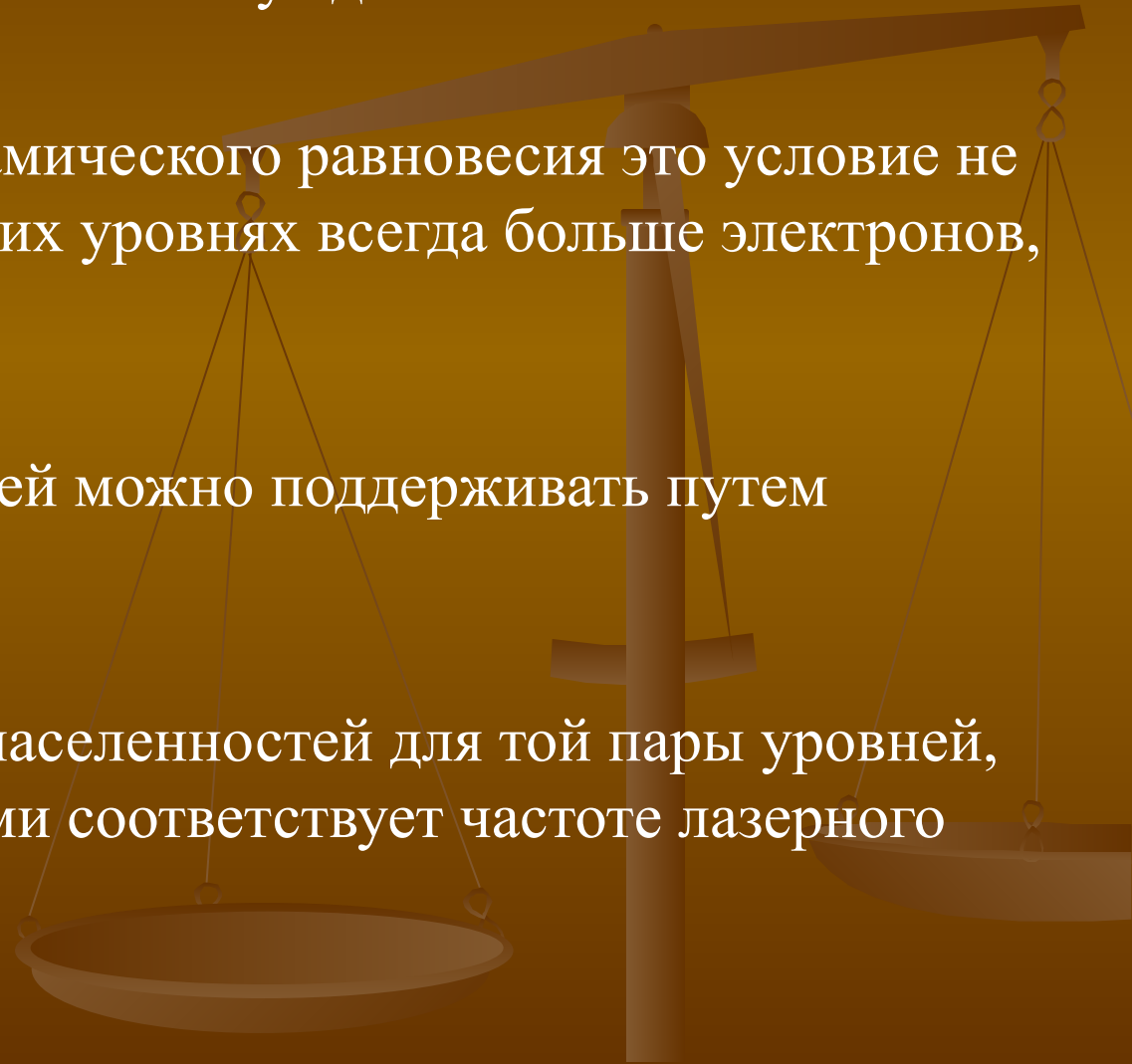
# Условия лазерной генерации

Три главных условия для создания лазерного излучения:

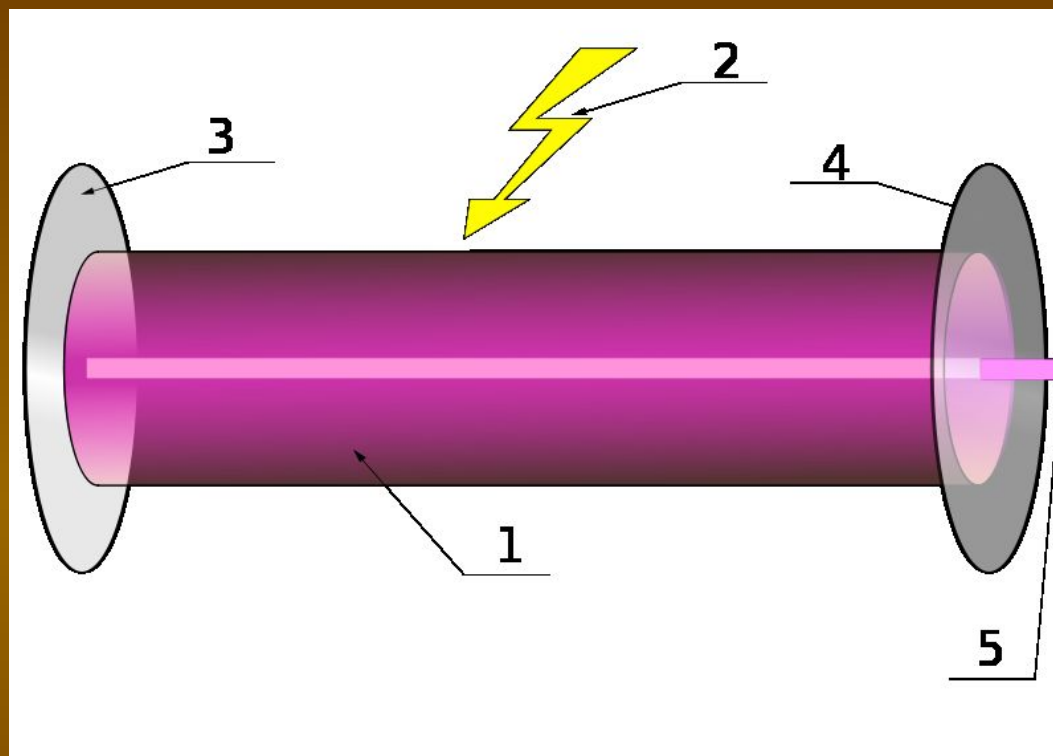
1. **Условие резонанса** – совпадение частоты падающего на атом фотона с одной из частот спектра атома.
2. **Условие инверсии населенностей** – населенность на верхнем уровне энергии должна быть больше населенности на нижнем уровне.
3. **Условие положительной обратной связи** – часть световой энергии все время должна оставаться внутри активного элемента, вызывая вынужденное излучение света все новыми и новыми атомами. Для создания положительной обратной связи активная среда лазера помещается в оптический резонатор (система зеркал).

# Инверсия населенностей

- Для усиления света необходимо, чтобы возбуждённых атомов в среде было больше, чем невозбуждённых.
- В состоянии термодинамического равновесия это условие не выполняется – на нижних уровнях всегда больше электронов, чем на верхних.
- Инверсию населенностей можно поддерживать путем подвода энергии извне.
- Необходима инверсия населенностей для той пары уровней, переход между которыми соответствует частоте лазерного излучения.

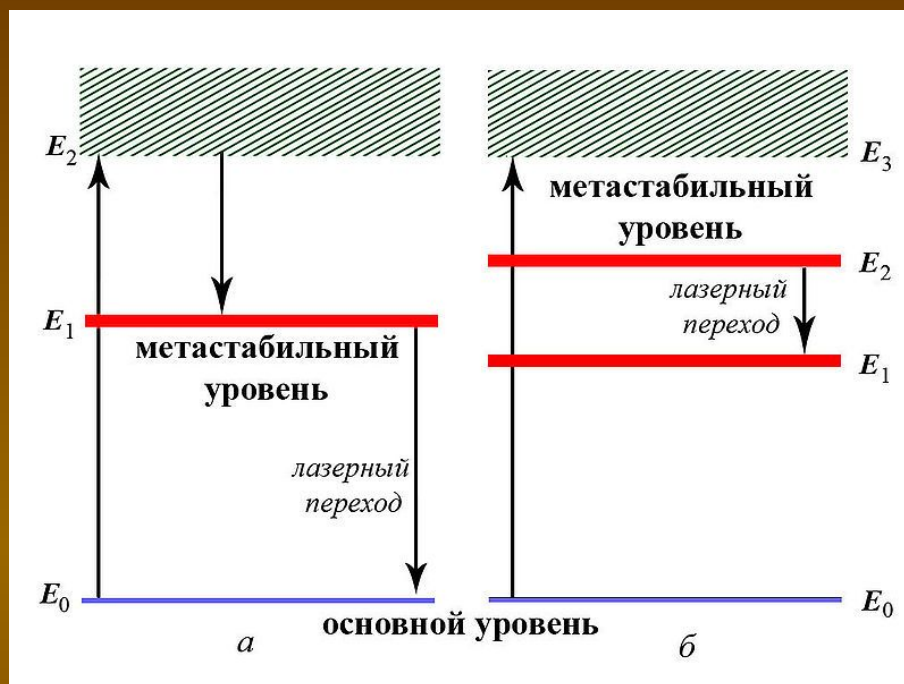


# Схема лазера

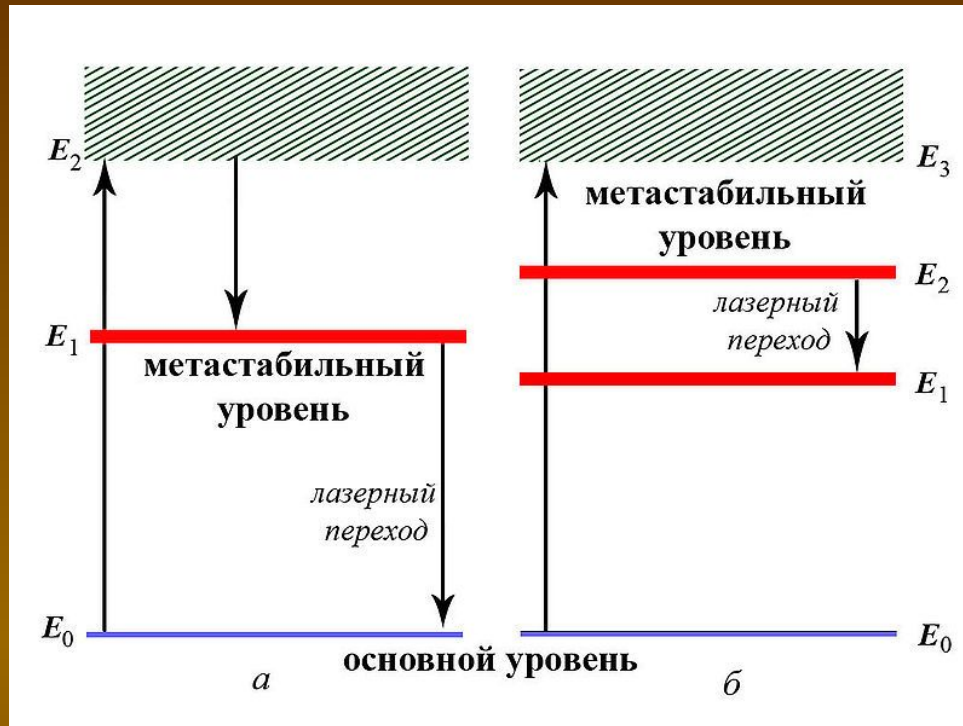


- 1 — активная среда
- 2 — энергия накачки лазера
- 3 — непрозрачное зеркало
- 4 — полупрозрачное зеркало
- 5 — лазерный луч

# Трёхуровневая (а) и четырёхуровневая (б) схемы



В 3-уровневой схеме атом переходит из состояния  $E_0$  в состояние  $E_2$ . В этом состоянии атом живет  $\sim 10$  нс и сваливается в состояние  $E_1$ , в котором атом живет  $\sim 1$  мс. За счет этого заселенность уровня  $E_1$  становится достаточно большой, чтобы реализовать инверсию. Как только атомов, находящихся в метастабильном состоянии становится больше, чем в основном, начинается процесс генерации лазера.



В 4-уровневой схеме между метастабильным  $E_2$  и основным уровнем  $E_0$  имеется промежуточный уровень  $E_1$ . Вынужденное излучение происходит при переходе между уровнями  $E_2$  и  $E_1$ . Условие инверсии выполняется, если время жизни уровня  $E_2$  на порядки больше времени жизни уровня  $E_1$ . Применение 4-уровневой схемы позволяет создавать мощные непрерывные лазеры.

Рассмотрим для примера схему уровней газового лазера.

$\Lambda$  – область уровней, между которыми происходят лазерные переходы.

Если атом попадает на один из верхних уровней  $E_i$ , то он быстро "скатывается" до верхних уровней серии  $\Lambda$ .



Если время жизни атома на верхних уровнях серии  $\Lambda$  большое, то создается инверсия населенностей.

На нижних уровнях серии  $\Lambda$ , например  $E_3$ , атомы долго не задерживаются, что дополнительно способствует инверсии населенностей между верхними и нижними уровнями серии  $\Lambda$ .



# Маленькая проблема, однако

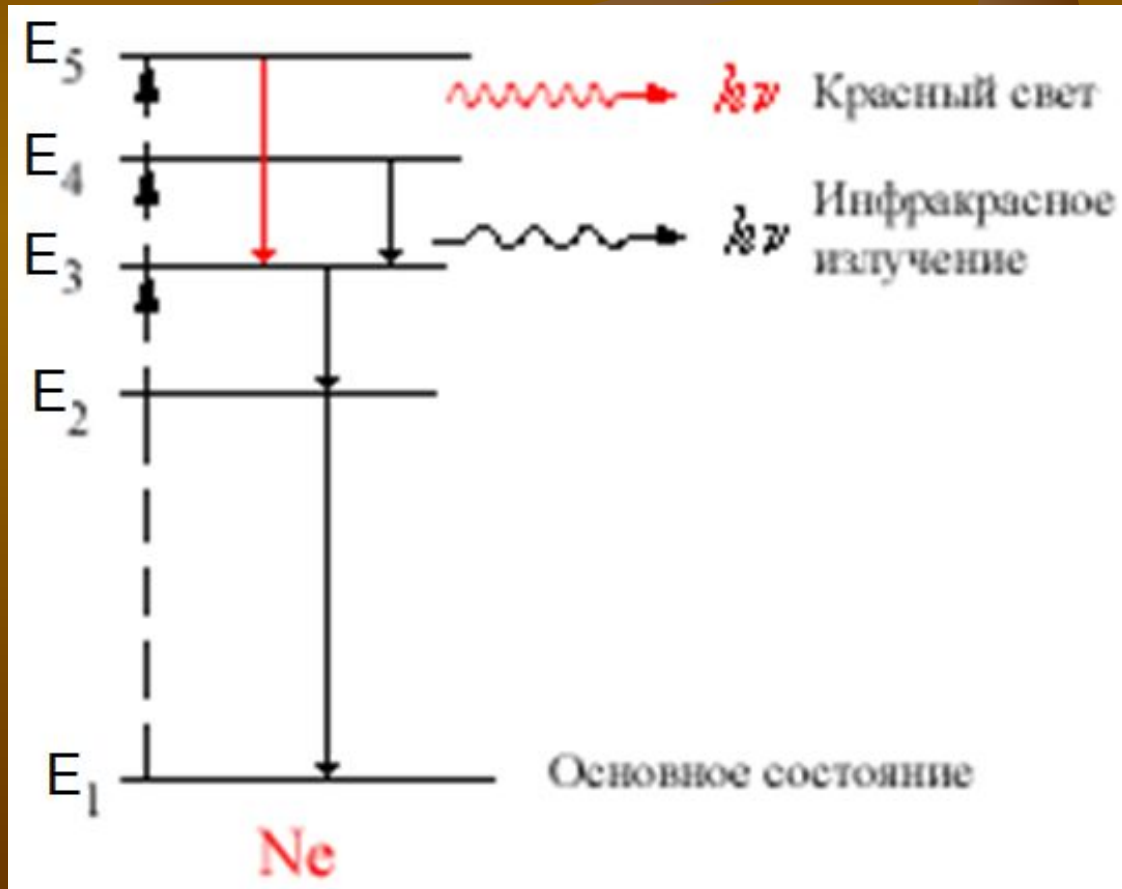
**Существует гадость:** в спектрах многих газов под нижними короткоживущими уровнями серии А расположен метастабильный уровень  $E_2$ , на котором атом может находиться долго и населенность которого поэтому велика.

**Это не хорошо!** Наличие долгоживущего метастабильного уровня  $E_2$  препятствует образованию инверсии населенностей. Следовательно, надо как-то уровень  $E_2$  опустошать.

Некоторая часть атомов, находящихся на уровне  $E_2$ , легко переходит на ближайший к нему уровень  $E_3$ . Уровень  $E_2$  является как бы "резервуаром", питающим уровень  $E_3$ , но нам бы хотелось загонять атомы на более высокие рабочие уровни  $E_4$  и  $E_5$ .

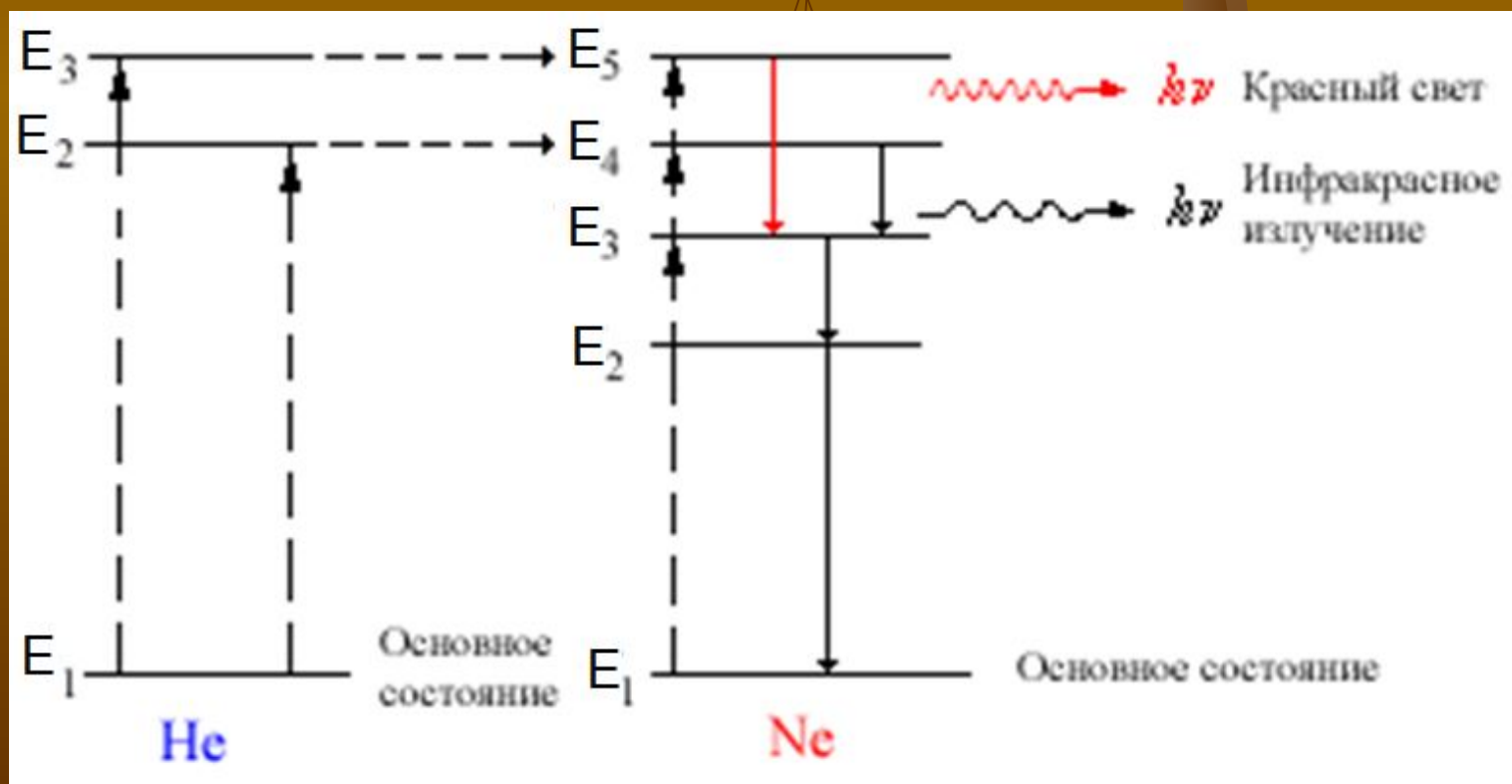
Например, в **He-Ne** лазере рабочее вещество – это нейтральные атомы неона. При накачке часть атомов неона переходит с основного уровня  $E_1$  на долгоживущие уровни  $E_5$  и  $E_4$ .

Но в чистом неоне созданию инверсии населенностей мешает метастабильный уровень  $E_2$ , который питает уровень  $E_3$ .



Проблема решается введением в неон 15% примеси гелия, имеющего два возбужденных долгоживущих уровня  $E_2$  и  $E_3$ , совпадающие с энергиями уровней  $E_4$  и  $E_5$  атомов неона.

При столкновениях атом гелия передают избыток своей энергии атому неона. В результате атом гелия переходит в состояние  $E_1$ , а атом неона – в состояние  $E_4$  или  $E_5$ , что и обеспечивает условие инверсии населенностей.



# Оптический резонатор

**Оптический резонатор** представляет собой два зеркала на оптической оси, обращенные отражающими поверхностями друг к другу.

В лазерах используются зеркала с многослойным напылением, позволяющим получить коэффициент отражения более 99%.

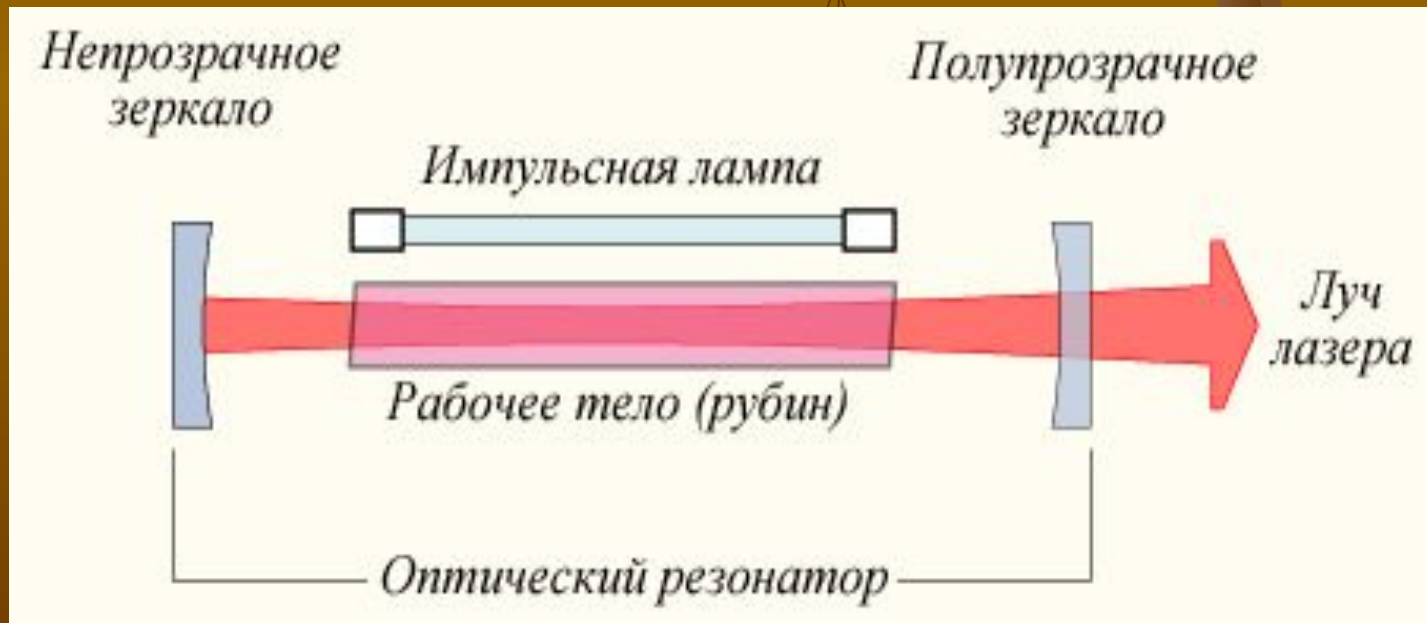
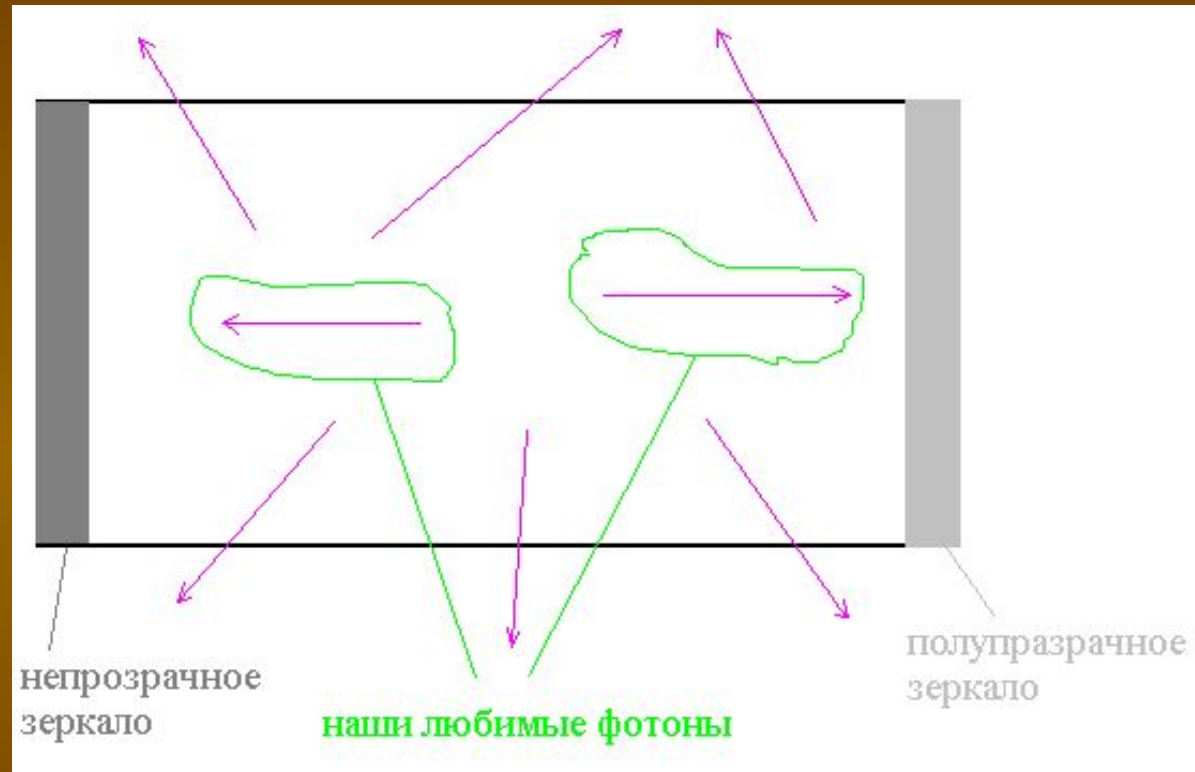


Схема оптического резонатора рубинового лазера

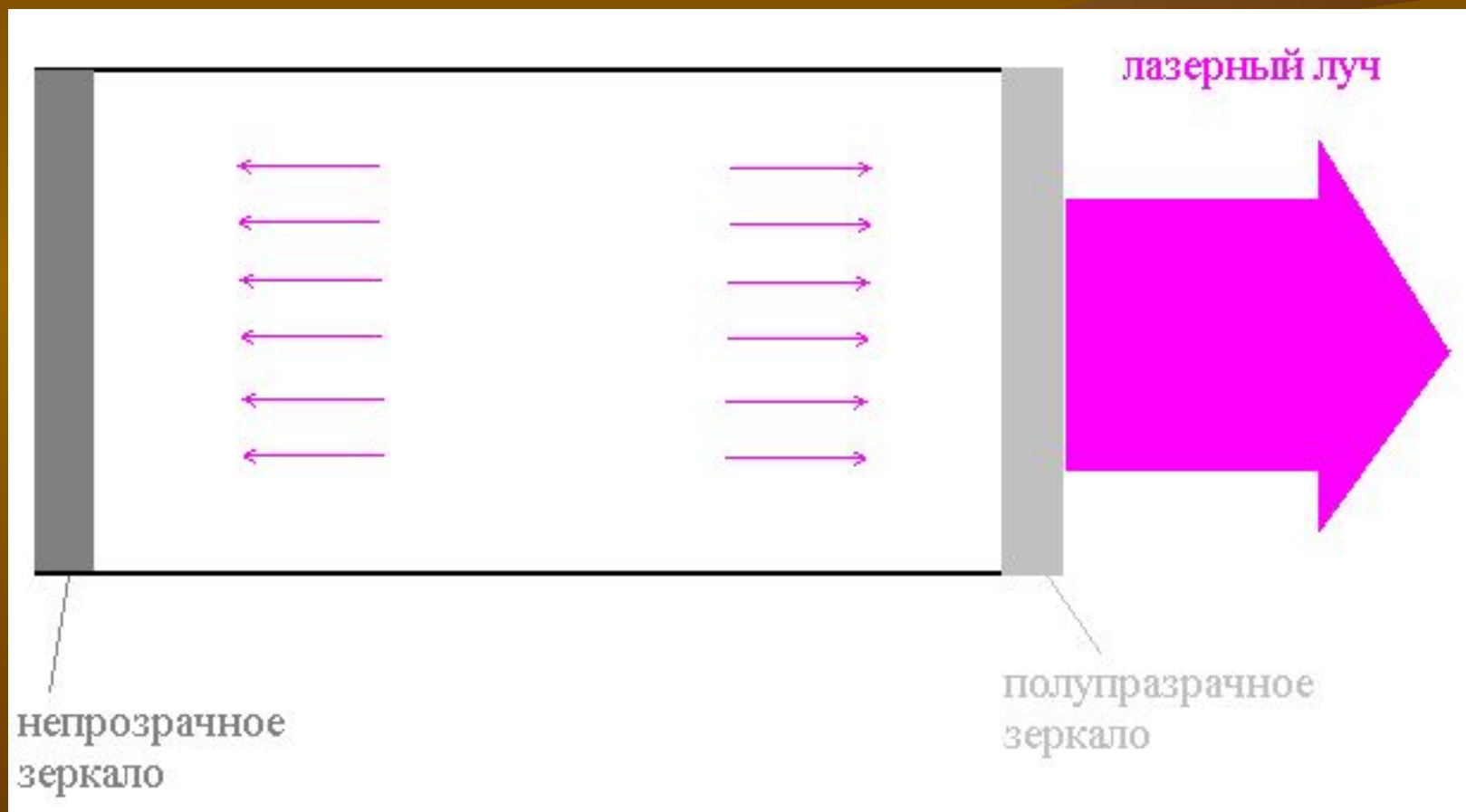
# Зачем нам нужен оптический резонатор?

В начале в активной среде вот что творится:



Но постепенно «плохие» фотончики удаляются из активной среды через стенки и в системе остаются только «хорошие» фотоны, которые курсируют вдоль оси оптического резонатора и создают себе подобных путем вынужденного излучения.

Когда интенсивность достигнет порогового значения, лазерное излучение «вырвется» из системы через полупрозрачное зеркало.

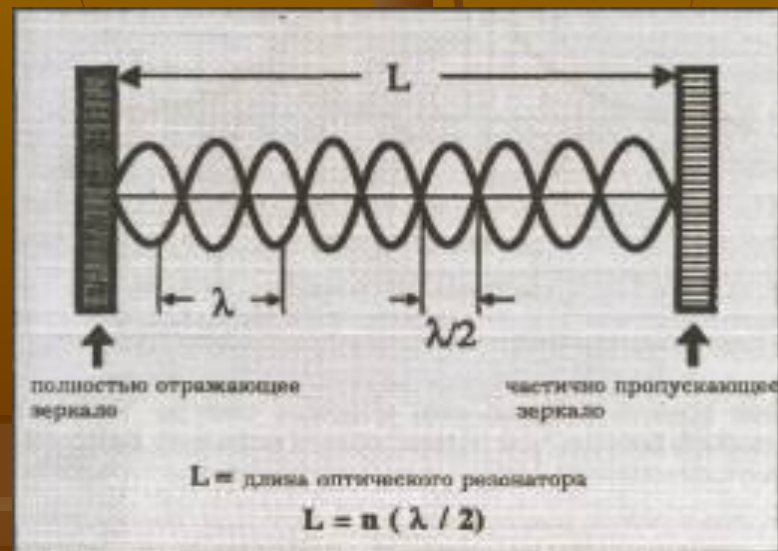
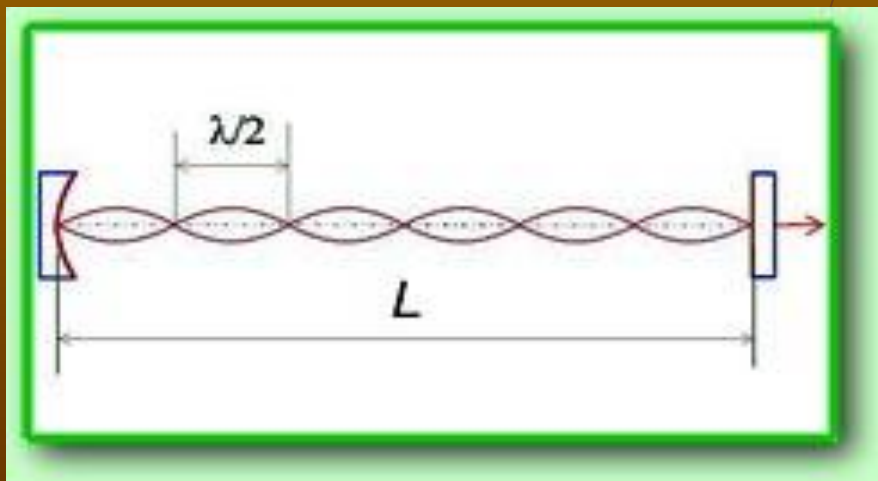


Оптический резонатор нужен для многократного пропускания излучения в прямом и обратном направлении через активную среду.

В результате, усиление за счет вынужденного излучения преобладает над поглощением и рассеиванием света.

Принципиально важно, чтобы длина резонатора была равна полуцелому числу длин волн излучения.

При этом возможен оптический резонанс, а запущенный между зеркалами луч, будет некоторое время существовать в виде цепочки стоячих электромагнитных волн.



# Моды оптического резонатора

Из-за множества отражений от зеркал в резонаторе образуются различные типы колебаний – **моды**.

Моды могут быть продольными и поперечными относительно оси резонатора.

Чем выше частота лазерного излучения, тем больше количество мод. Например, для видимого диапазона в резонаторе образуются миллионы различных мод!

Если выбрать нужную геометрию, то резонатор будет работать как оптический фильтр и подавляющее число мод будут иметь очень большие потери и через короткое время затухнут.

Лишь небольшое число «нужных» мод имеют малые потери и поэтому могут существовать в резонаторе достаточно долго.



Что же это нам дает?

Только моды с малыми потерями достигают порога генерации лазера, тогда как остальные моды быстро затухают.

Порог генерации достигается, когда усиление света сравнивается с потерями в резонаторе.

Следовательно, выход энергии из оптического резонатора происходит в основном в нужных нам модах.

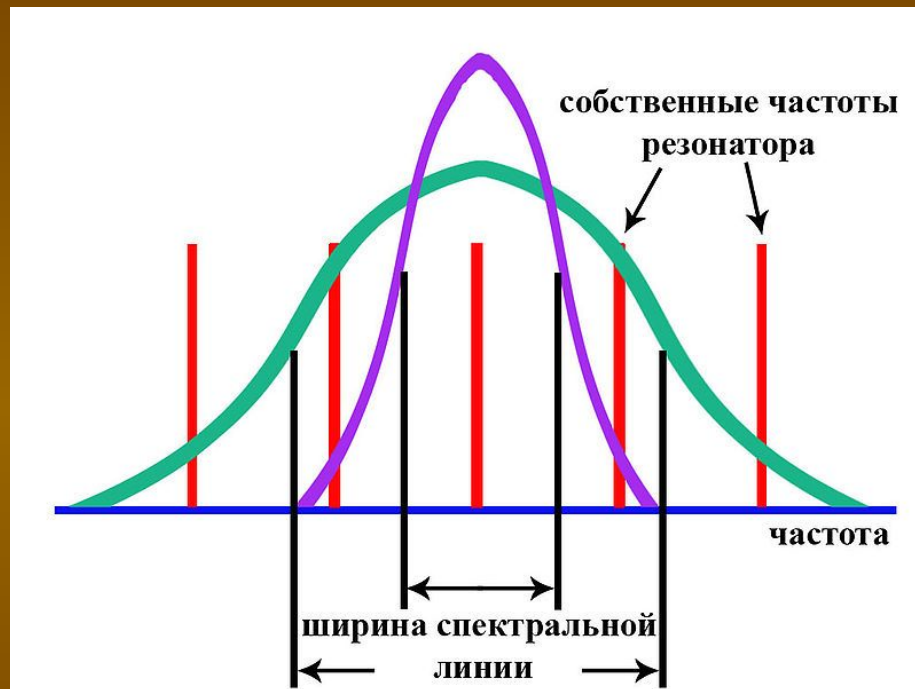
Что еще это нам дает?

Из законов оптики следует, что только те фотоны будут иметь малые потери, которые излучаются вдоль оси резонатора.

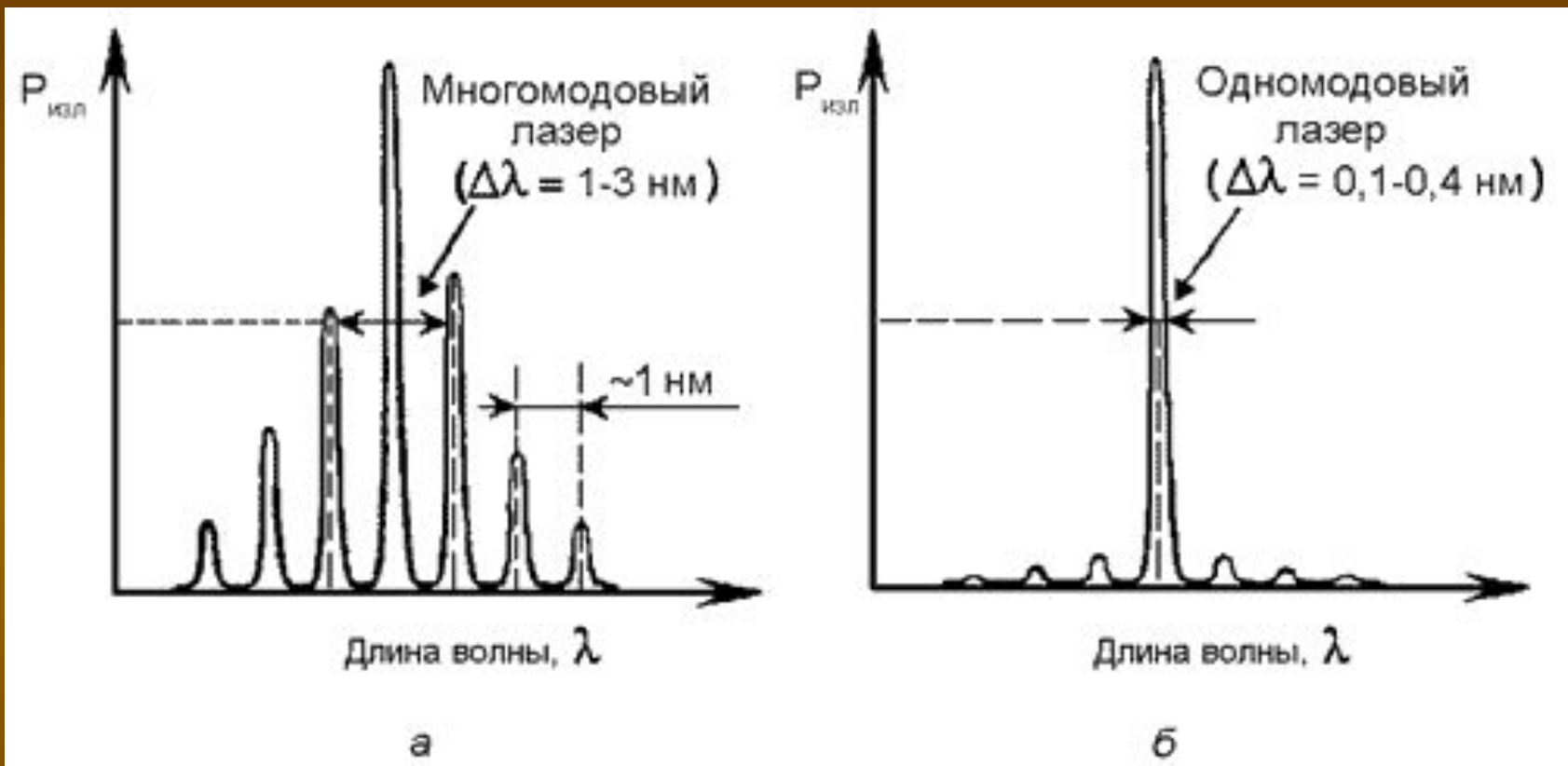
Следовательно, имеет место мощный узконаправленный пучок света – условие коллимированности.

На ширину спектральной линии излучения может укладываться несколько собственных частот резонатора.

В этом случае излучение лазера будет многомодовым.



В ширину спектральной линии, изображённой зелёным цветом, укладывается три собственные частоты резонатора и излучение будет трехмодовым. Для фиолетовой линии излучение будет чисто монохроматическим, так как укладывается одна собственная частота резонатора.



Многомодовое (а) и одномодовое (б) излучение лазера.

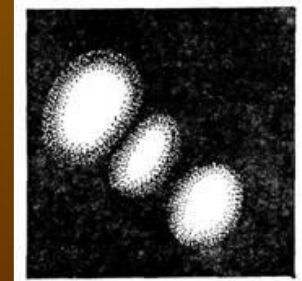
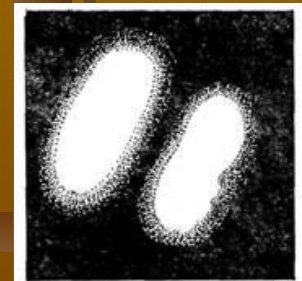
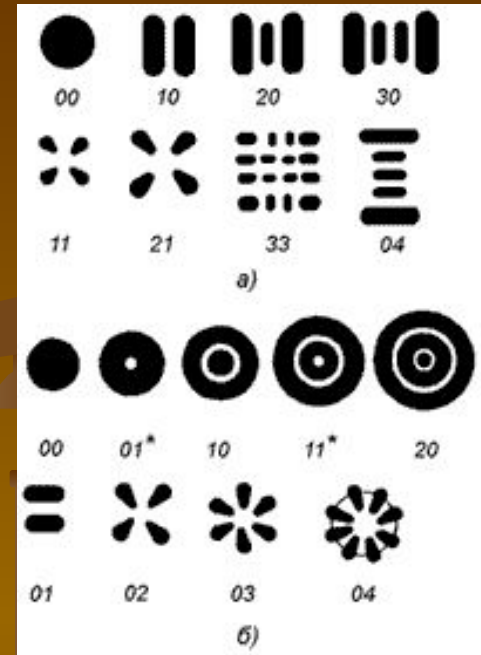
# Символы $TEM_{mn}$

Распределения интенсивности по сечению лазерного луча определяются «поперечными модами», которые представляют в виде символов  $TEM_{mn}$ .

На рисунке для примера показаны поперечные моды с прямоугольной (а) и осевой (б) симметрией

Индексы  $m$  и  $n$  у символа  $TEM_{mn}$  в прямоугольной системе координат обозначают число нулей по направлениям  $X$  и  $Y$  в плоскости поперечного сечения пучка.

На рисунке для примера показаны фотографии мод.



Для многих применений лазеров предпочтительнее использовать  $TEM_{00}$ , называемую **гауссовой**.

При распространении лазерного излучения через среды и оптические системы пространственная форма гауссова пучка остается неизменной, в то время как другие моды не сохраняют первоначального пространственного распределения.

В моде  $TEM_{00}$  за диаметр лазерного луча принимается удвоенное расстояние от оси луча, на котором интенсивность падает в  $e$  раз.

