

ЛАЗЕРЫ

Вынужденное излучение

Рубиновый лазер

Полупроводниковый лазер

Спонтанные переходы с верхних уровней на нижние приводят к спонтанному испусканию фотонов. Переходы с нижних уровней на более высокие обуславливают поглощение излучения веществом. В 1918 году Эйнштейн обратил внимание, что двух указанных видов недостаточно для объяснения существования равновесия между излучением и веществом.

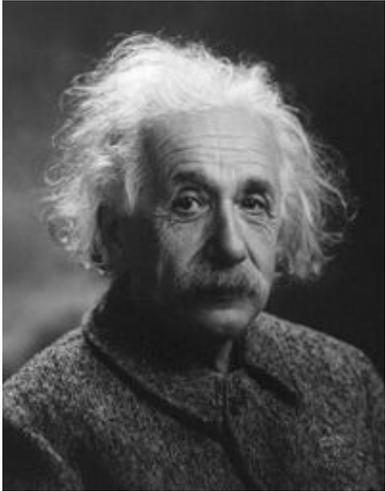
Вероятность спонтанных переходов определяется лишь внутренними свойствами атомов и не может зависеть от интенсивности падающего излучения, в то время как вероятность поглощательных процессов зависит как от свойств атомов.

Для возможности установления равновесия необходимо существование испускательных переходов, вероятность которых будет зависеть от интенсивности падающего излучения. Такие переходы называются вынужденными или индуцированными.

Согласно принципу детального равновесия вероятность вынужденных переходов, сопровождающихся излучением, равна вероятности вынужденных переходов, сопровождающихся поглощением.

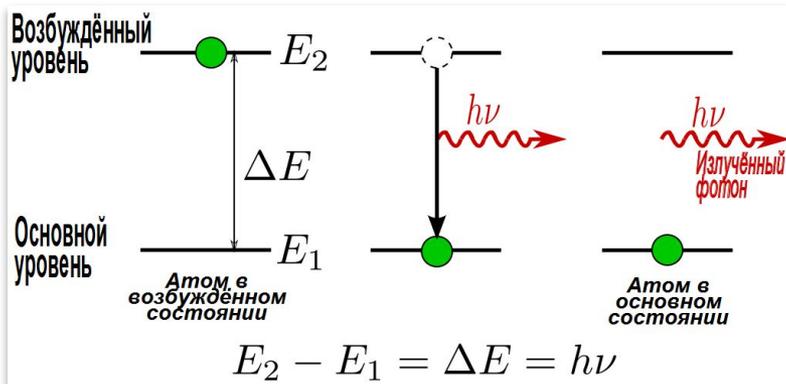
Вынужденное излучение и вынужденное поглощение строго когерентны. Эта особенность лежит в основе действия лазеров.

Спонтанное и вынужденное излучение.

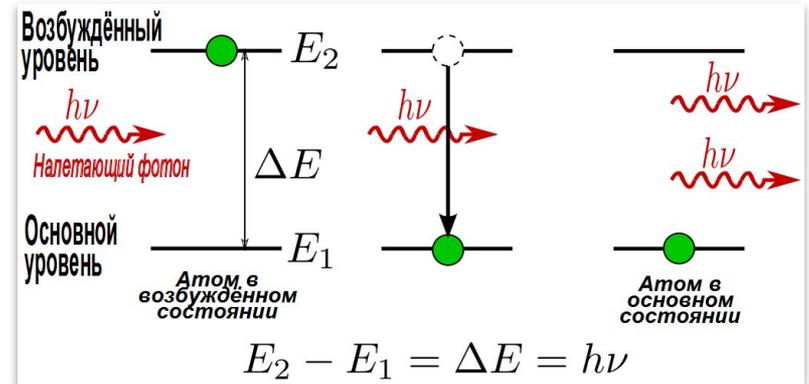


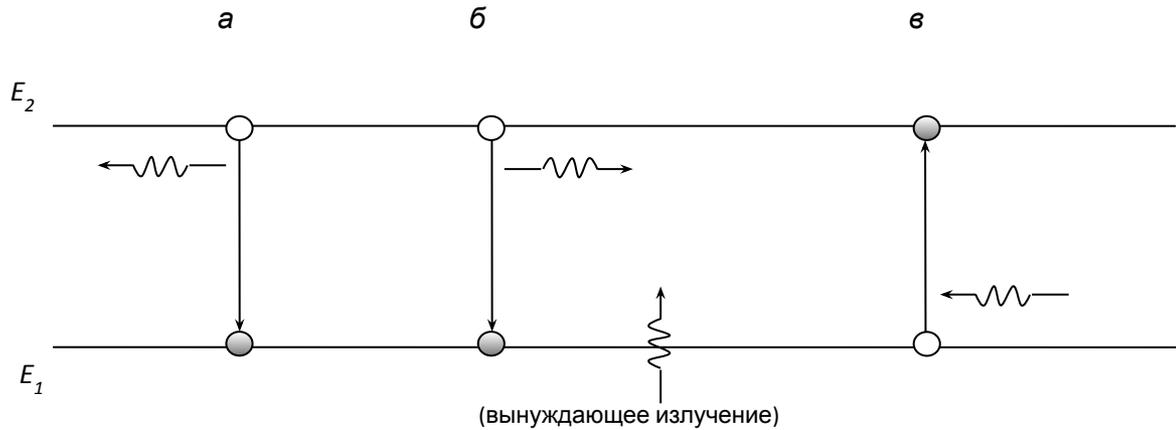
1917 г. А. Эйнштейн:
Механизмы испускания света веществом

Спонтанное (некогерентное)



Вынужденное (когерентное)





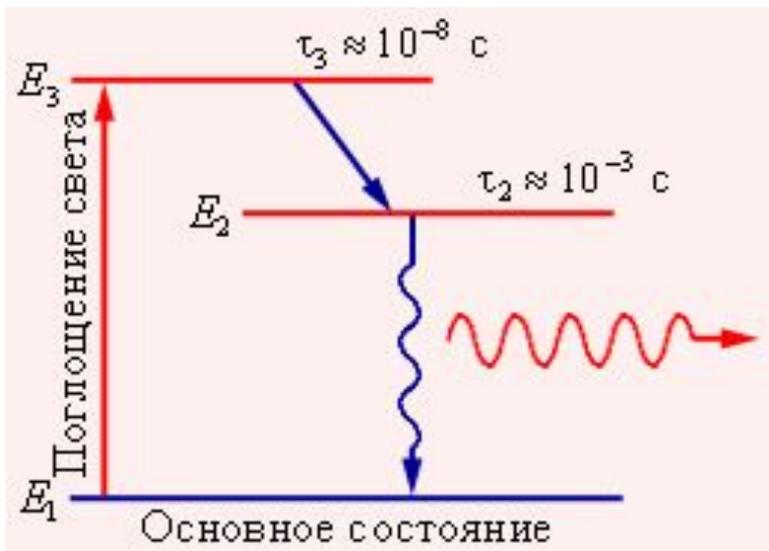
. *Механизмы взаимодействия атомов с фотонами.*
Спонтанное излучение – а . Вынужденное излучение – б.
Поглощение – в

Для атома вероятность вернуться из состояния 2 в основное состояние 1 в единицу времени за счет спонтанного излучения фотона может быть выражена как

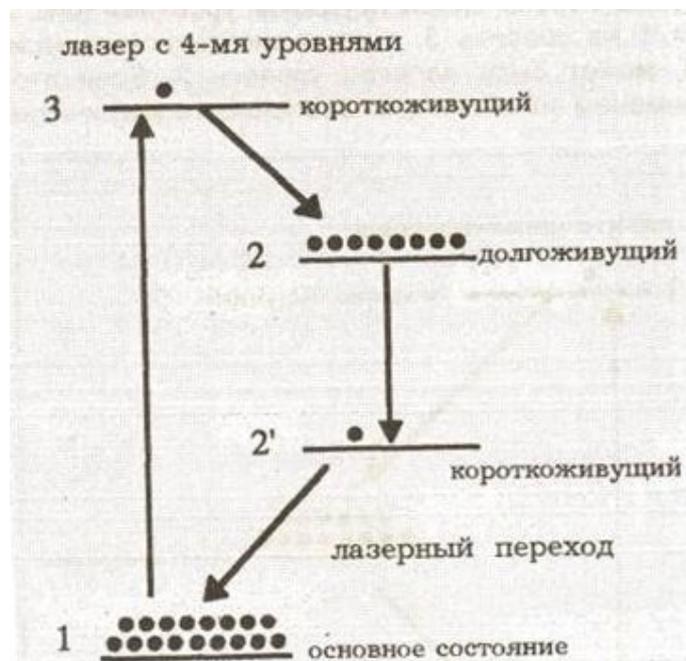
$$W_{21\text{с.и.}} = A_{21},$$

- Лазер – это устройство, генерирующее когерентные электромагнитные волны за счет вынужденного испускания света активной средой, находящейся в оптическом резонаторе.
- Особенности излучения лазера:
 - Строгая монохроматичность;
 - Высокая когерентность;
 - Большая интенсивность;
 - Узость пучка

- Усиление электромагнитной волны при ее прохождении через вещество может наступить при условии: заселенность верхних уровней превышает заселенность нижних. Такое состояние вещества называется инверсным. Данное состояние не равновесно.
- Люминесценция, усиленная за счет актов вынужденного испускания, называется сверхлюминесценцией.

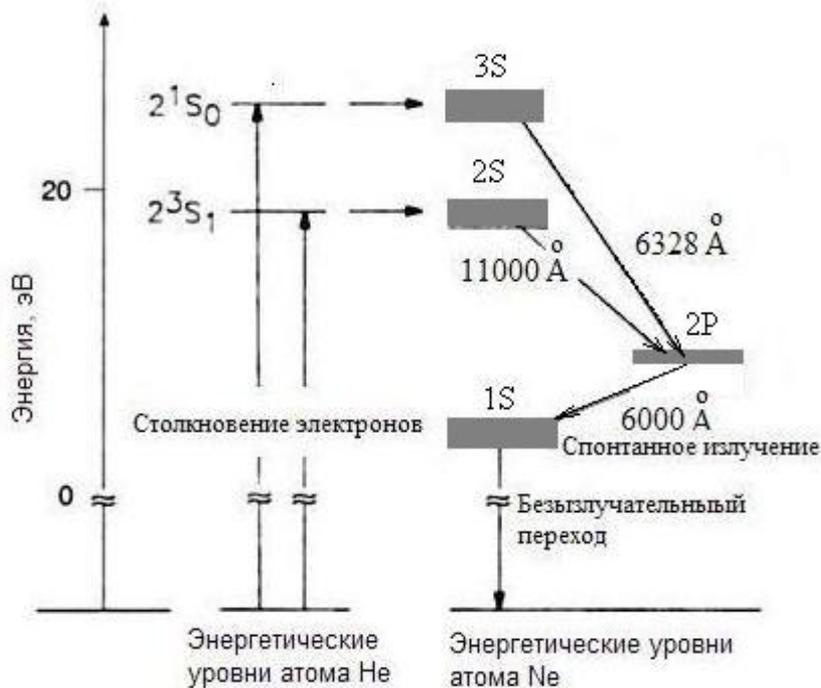


В трехуровневой лазерной системе при очень интенсивной накачке с уровня E_1 на уровень E_3 можно получить на уровне E_2 более высокую населенность, чем на уровне 1



В лазерной системе с 4-мя уровнями можно обеспечить даже при слабой накачке инверсию населенности на долгоживущем уровне 2 по отношению к короткоживущему уровню 2'

Гелий-неоновый лазер



Переход из основного состояния в 2^3S возможен посредством электрического разряда. Обратный излучательный переход запрещен (правило отбора $\Delta S = 0$).

Важны возбужденные состояния атома неона с энергиями 19,83 и 20,66 эВ (почти совпадают с энергиями уровней He). При столкновениях атомов гелия, находящихся в метастабильном состоянии с атомами неона в основном состоянии, возможна передача энергии атомам неона.

Способы достижения и поддержания инверсии в активной среде лазера зависят от ее природы.

В твердых телах и жидкостях используется главным образом оптическая накачка – освещение активного элемента специальными лампами с фокусированным солнечным излучением или излучением других ламп.

Для возбуждения газовых лазеров оптическая накачка применяется редко, т.к. для газов существуют более эффективные методы: электрический разряд, газодинамическое истечение, химические реакции и др., обеспечивающие высокие мощности до сотни *кВт*.

Возбуждение полупроводниковых лазеров производят непосредственно постоянным током (инжекционные лазеры), пучком электронов, оптической накачкой и др.

Создание инверсной заселенности является **необходимым**, но не достаточным условием усиления излучения, поскольку в реальных системах существуют дополнительные причины, приводящие к потерям энергии в веществе.

$$I = I_0 \exp[(\chi - \theta)x]$$

где $\chi = \sigma \Delta N$ – коэффициент усиления, θ – коэффициент поглощения из-за дополнительных потерь, не связанных с данным переходом $1 \rightarrow 2$.

Излучение усиливается, если индуцированное излучение с избытком компенсирует все потери электромагнитного излучения в веществе.

Необходимо наличие обратной связи.

- Для превращения свёрхлюминесценции в генерацию когерентных волн необходимо наличие обратной связи.
- Электромагнитная волна, испущенная частицами среды, должна многократно вызывать в этой среде новые акты вынужденного испускания точно таких же фотонов.
- В оптическом диапазоне обратную связь осуществляют применением той или иной комбинацией отражателей (зеркал)

Лазер содержит три основных компонента:

Активную среду, в которой создается инверсная заселенность;

Систему накачки - устройство для создания инверсной заселенности;

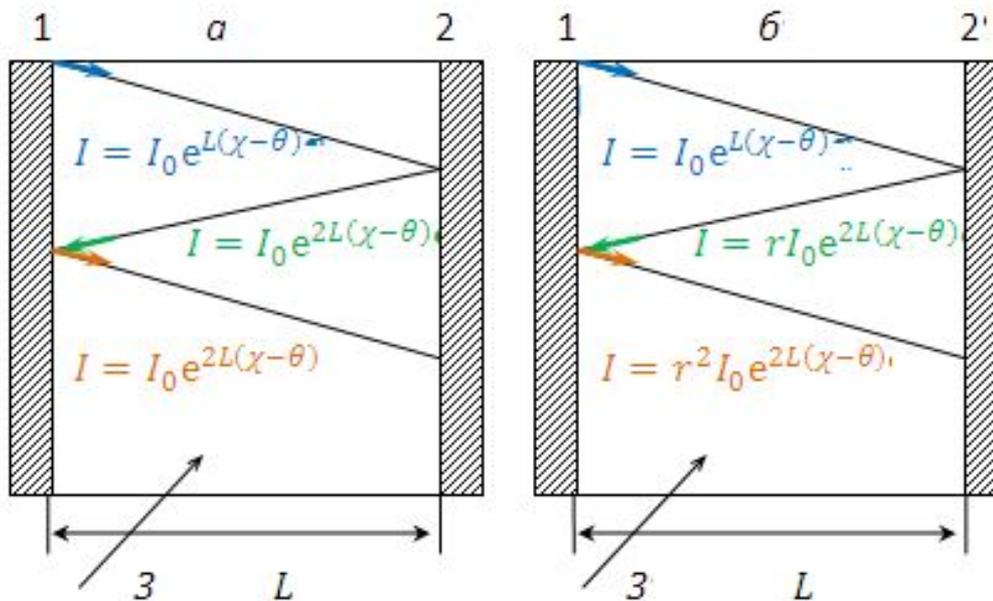
Оптический резонатор – устройство для обеспечения положительной обратной связи. Простейший резонатор состоит из двух плоских параллельных зеркал.

Процесс генерации

- После того как в активном элементе, расположенном внутри резонатора, достигнуто состояние инверсной заселенности, в нем возникают многочисленные акты люминесценции.
- Фотоны вызывают сверхлюминесценцию. Фотоны, распространяющиеся вдоль оси резонатора, испытывают многократное отражение от его зеркал. Начинается генерация излучения.

Применение принципа положительной обратной связи – усиленный сигнал возвращается обратно в усилитель, где он поддерживает генерацию и снова усиливается, позволило не только преодолеть эти затруднения, но и создать генератор излучения.

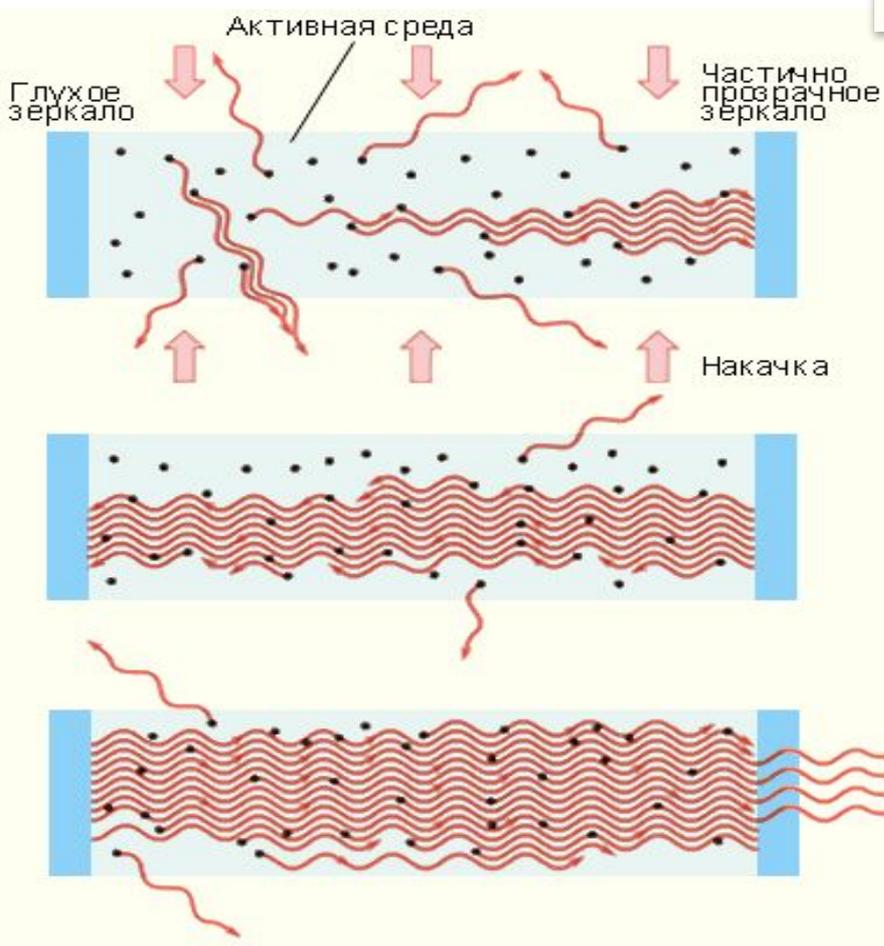
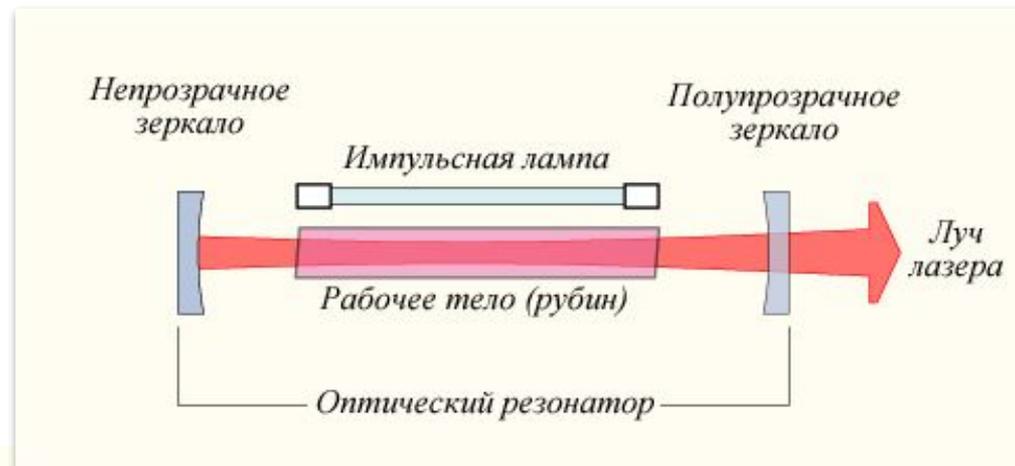
Усилитель начинает самопроизвольно генерировать колебания, если усиление, достигаемое за счет обратной связи, с избытком компенсирует все потери в системе усилитель-обратная связь. С этой целью в случае оптического квантового генератора (ОКГ), активное вещество помещается внутрь открытого резонатора, образованного двумя параллельными зеркалами, отстоящими друг от друга на расстоянии L .



Открытый резонатор. 1, 2 – зеркала (в случае "а" с коэффициентом отражения $r=1$, в случае "б" с $r < 1$), 3 – активное вещество.

Активная среда

- Наиболее распространенной трехуровневой средой для лазера является рубин Al_2O_3 с примесью Cr^{3+} .
- Среднее время жизни иона Cr^{3+} в метастабильном состоянии 10^{-3} с, что в 10^5 раз превышает время жизни в обычном возбужденном состоянии.
- Система накачки – импульсная ксеноновая лампа.



Развитие лавинообразного процесса генерации в лазере.

- Легче достигается порог генерации в активных средах, работающих по четырехуровневой схеме – неодимовый лазер (ионы неодима Nd^{3+} вводятся в состав специальных стекол).
- По четырехуровневой схеме работают газовые лазеры. Способ накачки – электрический разряд.

- В полупроводниковых лазерах используются не отдельные уровни, а разрешенные зоны.
- Активными частицами служат избыточные электроны и дырки. В результате накачки создается инверсная населенность уровней вблизи дна зоны проводимости и потолка валентной зоны.

Виды лазеров

Газовые

- гелий-неоновый
- аргоновый
- криптоновый
- ксеноновый
- азотный
- втористо-водородный
- кислородно-йодный
- углекислотный (CO_2)
- на монооксиде углерода (CO)
- экимерный

Твердотельные

- рубиновый
- алюмо-иттриевые
- на фториде иттрия-лития
- на ванадате иттрия
- на неодимовом стекле
- титан-сапфировые
- александритовый
- оптоволоконный
- на фториде кальция

На парах металлов

- гелий-кадмиевый
- гелий-ртутный
- гелий-селеновый
- на парах меди
- на парах золота

Другие типы

- полупроводниковый лазерный диод
- на красителях
- на свободных электронах
- псевдо-никелево-самариевый

Применение лазеров

Наука

Спектроскопия

Измерение расстояний

Фотохимия

Намагничивание

Интерферометрия

Голография

Охлаждение

Термоядерный синтез

Вооружение

Лазерное оружие

«Звездные войны»

Целеуказатели

Лазерный прицел

Лазерное наведение

Медицина

Скальпель

Точечная сварка тканей

Хирургия

Диагностика

Удаление опухолей

Промышленность и быт

Резка, сварка, маркировка, гравировка

CD, DVD-проигрыватели, принтеры, дисплеи

Фотолитография, считыватель штрихкода

Оптическая связь, системы навигации (л.гироскоп)

Манипуляции микрообъектами

Введем обозначения $P_{n,m}$ - вероятность
вынужденного перехода атома в единицу времени с
уровня n на уровень m .
Вероятность обратного перехода обозначим $P_{m,n}$.
Введем еще одно обозначение u_{ω} - плотность
энергии падающей электромагнитной волны.

$$P_{21\text{с.и.}} = A_{21}$$

$$t_{21} = \frac{1}{A_{21}} \cong 10^{-8} \text{ с}, \quad \text{откуда } A_{21} \cong 10^8 \text{ с}^{-1}.$$

где величина A_{21} – коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения, имеет размерность числа переходов в единицу времени. Обратная ей величина A_{12} будет иметь размерность времени на число переходов, то есть будет соответствовать времени, в течение которого система остается в состоянии 2, прежде чем вернется в состояние 1

Существует механизм, при котором излучение атома может стимулироваться переменным электромагнитным полем падающего излучения, спектральная плотность энергии которого на частоте ν_{21} равна ρ_ν , где $[\rho_\nu] = \text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-3}$. Такой процесс называется индуцированным (вынужденным) излучением

$$P_{21\text{в.и.}} = B_{21} \cdot \rho_\nu,$$

где B_{21} – коэффициент Эйнштейна для вынужденного излучения, который определяет число вынужденно излучаемых за одну секунду фотонов, приходящихся на один атом с энергией E_2 и на единицу спектральной плотности излучения

$\Delta E = E_{\text{изл.}} - E_{0 \text{ изл.}} = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1\right) \frac{B_{21} h \nu_{21}}{c} u_{\omega} c dt,$
 Приращение энергии излучения в единице объема при наличии внешнего электромагнитного поля с учетом

$\chi = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1\right) \frac{B_{21} h \nu_{21}}{c} = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1\right) \sigma_{21},$
 Коэффициент усиления

$\Delta E = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1\right) \sigma_{21} \rho_{\nu} c dt = \chi u_{\omega} c dt.$
 если $\chi > 0$, то система атомов будет усиливать излучение. В случае $\chi < 0$, по мере распространения излучения в среде его интенсивность будет уменьшаться, будет иметь место поглощение излучения

Для усиления излучения необходимо

$$N_2 > \frac{g_2}{g_1} N_1,$$

$N_2 > N_1$ среда обладает инверсной заселенностью, а совокупность атомов с инверсной заселенностью называют активной средой

$$N_1 u_\omega B_{12} \gg N_2 u_\omega B_{21} .$$

Чтобы число вынужденных переходов превышало число переходов с поглощением, в возбужденном состоянии должно находиться больше атомов, чем в основном ($N_2 > N_1$). Подобное состояние с инверсной заселенностью достигается в тех случаях, когда возбужденное состояние E_2 является метастабильным, (то есть вероятность спонтанного перехода с этого уровня мала). Если в системе создана инверсная заселенность, то любой фотон, излученный при спонтанном переходе $E_2 \rightarrow E_1$, вызовет излучение других возбужденных атомов, то есть происходит усиление излучения. Процесс получения инверсной заселенности часто называют оптической накачкой, при которой атомы как бы «забрасываются» на уровни с энергией выше E_2 за счет поглощения мощного внешнего излучения. Затем все атомы переходят в метастабильное состояние E_2 за счет спонтанного излучения либо вследствие безызлучательных переходов в результате столкновений

- Вероятность вынужденных переходов пропорциональна плотности энергии \mathcal{U}_ω , т. е. спектральной плотности излучения действующей волны

$$P_{nm} = B_{nm} u_\omega \qquad P_{mn} = B_{mn} u_\omega$$

- Так как $P_{nm} = P_{mn}$, то $B_{nm} = B_{mn}$ - коэффициенты Эйнштейна

- Основываясь на принципе детального равновесия Эйнштейн дал простой вывод формулы Планка для теплового излучения.
- Равновесие будет достигнуто, если число атомов N_{nm} , совершающих в единицу времени переход из состояния n в состояние m , будет равно числу атомов N_{mn} , совершающих переход в обратном направлении.

- Допустим, что $E_n > E_m$, тогда

$$N_{mn} = N_{mn}^{\text{ВЫНУЖД}}$$

$$N_{nm} = N_{nm}^{\text{ВЫНУЖД}} + N_{nm}^{\text{СПОНТ}}$$

- Запишем условие равновесия

$$N_{mn}^{\text{ВЫНУЖД}} = N_{nm}^{\text{ВЫНУЖД}} + N_{nm}^{\text{СПОНТ}}$$

$$N_{mn}^{\text{ВЫНУЖД}} = P_{mn} N_m = B_{mn} u_{\omega} N_m$$

$$N_{nm}^{\text{ВЫНУЖД}} = P_{nm} N_n = B_{nm} u_{\omega} N_n$$

$$N_{nm}^{\text{СПОНТ}} = A_{nm} N_n$$

- Используя принцип детального равновесия

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

- найдем

$$u_{\omega} = \frac{A_{nm} N_n}{B_{mn} N_m - B_{nm} N_n} = \frac{A_{nm}}{B_{mn} \left(\frac{N_m}{N_n} - 1 \right)}$$

- Равновесное распределение атомов по энергиям задается законом Больцмана

$$\frac{N_m}{N_n} = \exp\left(\frac{E_n - E_m}{kT}\right) = \exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right)$$

- Таким образом

$$u_\omega = \frac{A_{nm}}{B_{mn}} \frac{1}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}$$

$$u_{\omega} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \left(\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \right),$$

коэффициенты поглощения и вынужденного излучения одинаковы для любой пары состояний отношение коэффициентов спонтанного и вынужденного излучений пропорционально ν^3 , вследствие чего с увеличением разности *спонтанное излучение становится значительно более вероятным, чем вынужденное*

$$\frac{A_{21}}{B_{21} u_{\omega}} = e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1, \quad \text{в равновесии при спонтанное излучение}$$

значительно вероятнее вынужденного

- Коэффициент $\frac{A_{nm}}{B_{mn}}$ определяется из условия,

что полученная для u_ω формула должна

переходить при условии формулу

Релея-Джинса

$$\hbar \omega \ll kT$$

в

$$\frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT$$