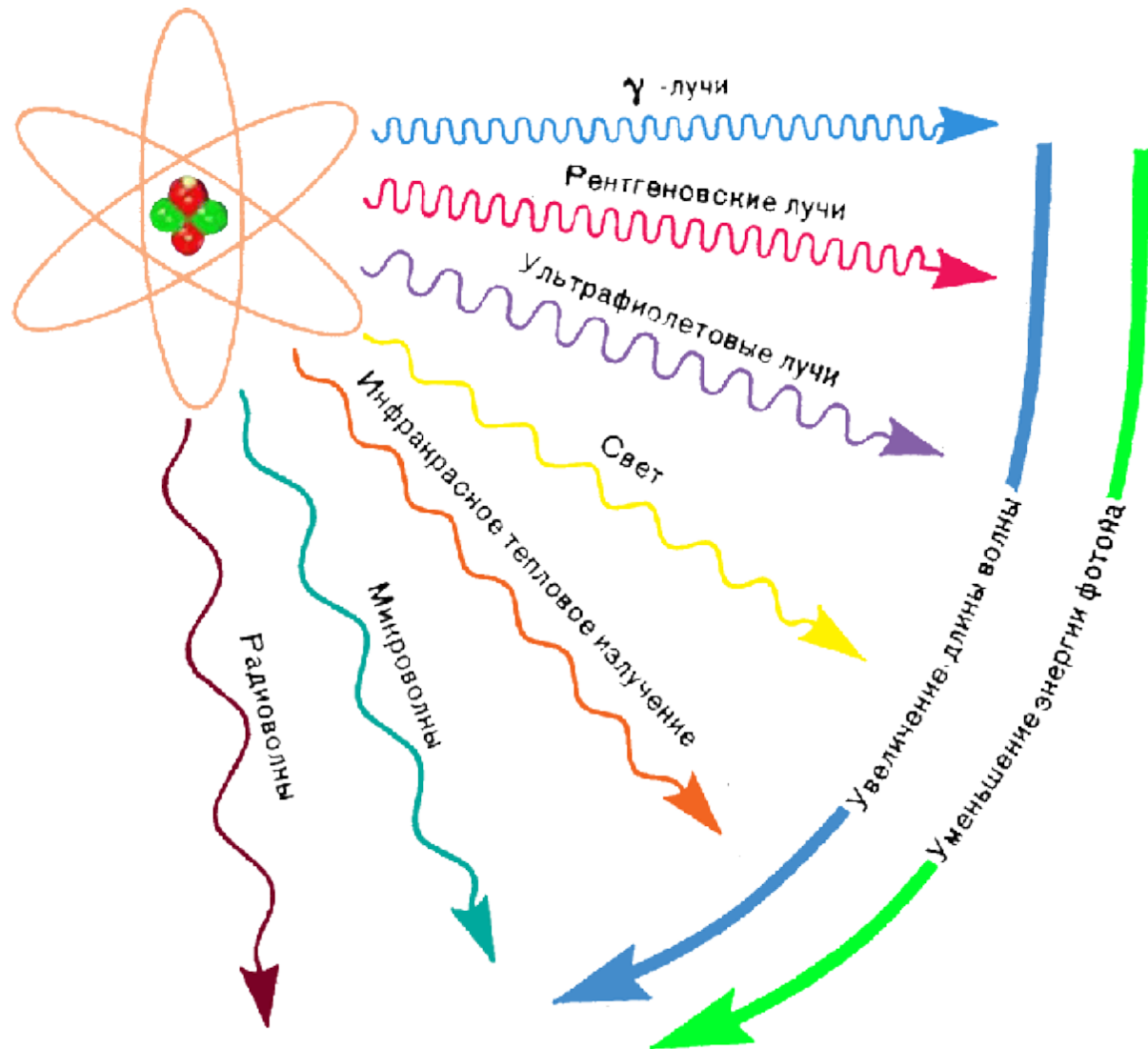


Люминесценция. Лазер

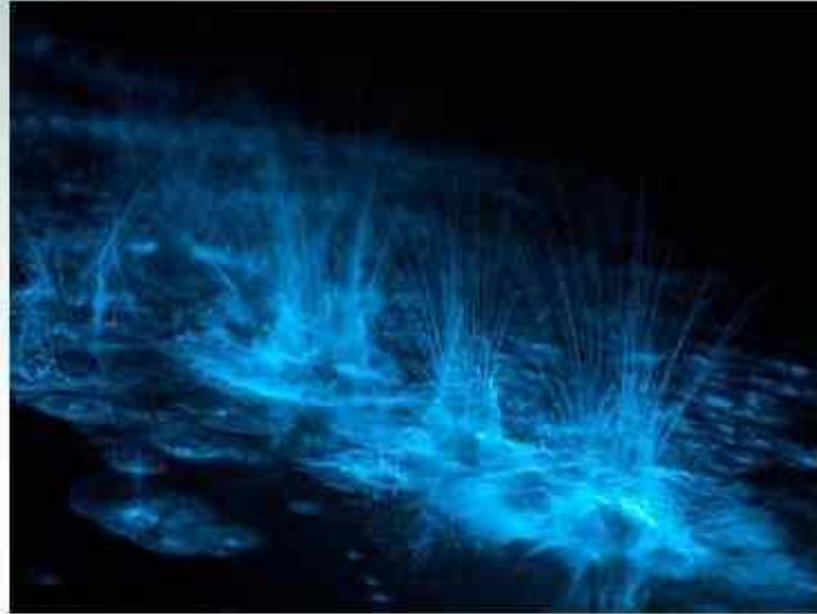
Коплак О.В.

Люминесценция — **электромагнитное излучение**, представляющее собой избыток над тепловым излучением тела и продолжающееся в течение времени, значительно превышающего период световых колебаний.

Люминесценция может наблюдаться при комнатной температуре, поэтому часто называют **холодным свечением**.



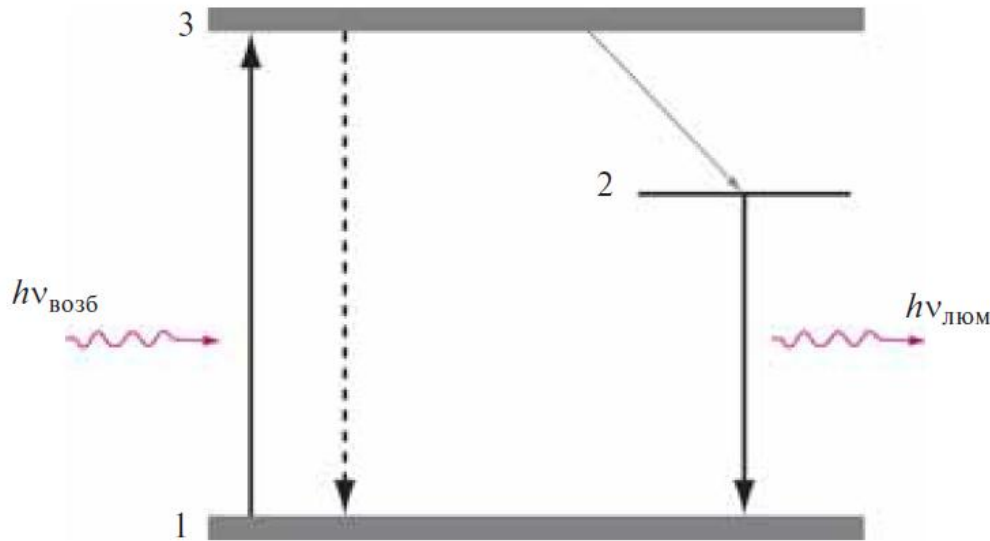
Природные явления люминесценции — северное сияние, свечение некоторых насекомых, минералов



В 1492 году Христофор Колумб обнаружил и описал удивительные воды цепи озер в Австралии: с заходом солнца, вода начинает излучать голубой свет. Моряки окрестили этот феномен огнем из преисподней.

Лишь через 100 лет этому феномену нашлось научное объяснение. Причиной является **биоломинесценция** — химические реакции жизнедеятельности живых организмов, населяющих воды озера: свечение возникает при ферментативном окислении кислородом воздуха специфических веществ - *люциферинов*

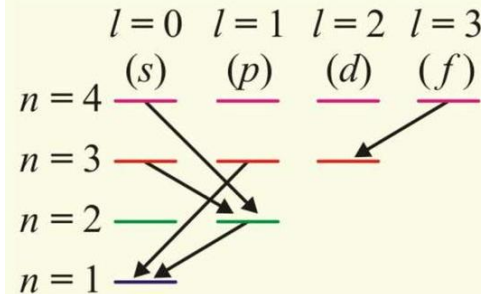
Люминесценция возникает в результате **квантовых переходов** излучающей системы с **каких-то возбужденных уровней на уровни более низкие**.
Характер люминесценции определяется структурой энергетических уровней.



Характер люминесценции определяется структурой энергетических уровней

Мера метастабильности состояния — его время жизни $\tau = 1/A$, где A — полная вероятность перехода из данного состояния во все состояния с меньшей энергией. Чем меньше A , тем больше τ и тем более стабильно состояние.

Правила отбора



Фотон изменяет момент атома, т.к. обладает спином $S = \pm 1$

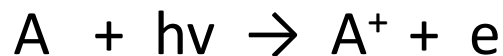
Переходы электрона между уровнями возможны только с $\Delta l = \pm 1$.

При других переходах атом не излучает энергию или они невозможны.

Схема квантовых переходов при элементарном процессе люминесценции:
1 — основной энергетический уровень;
2 — уровень излучения;
3 — уровень возбуждения.
Переход 3–1, показанный пунктирной стрелкой, соответствует резонансной люминесценции,
переход 2–1 — спонтанной люминесценции,
переход 3–2 — безызлучательный

Классификация видов люминесценции

- **1. По длительности свечения**
- **2. По способу возбуждения**
- **3. По механизму свечения:**
 - **свечение дискретных центров** – поглощающими и излучающими центрами являются одни и те же частицы (атомы, молекулы, ионы)
 - **рекомбинационное свечение** – процессы поглощения и излучения разделены во времени и в пространстве; в процессе возбуждения происходит разделение частицы вещества на две противоположно заряженные части; последующая их рекомбинация сопровождается выделением энергии



Классификация люминесценции по длительности свечения

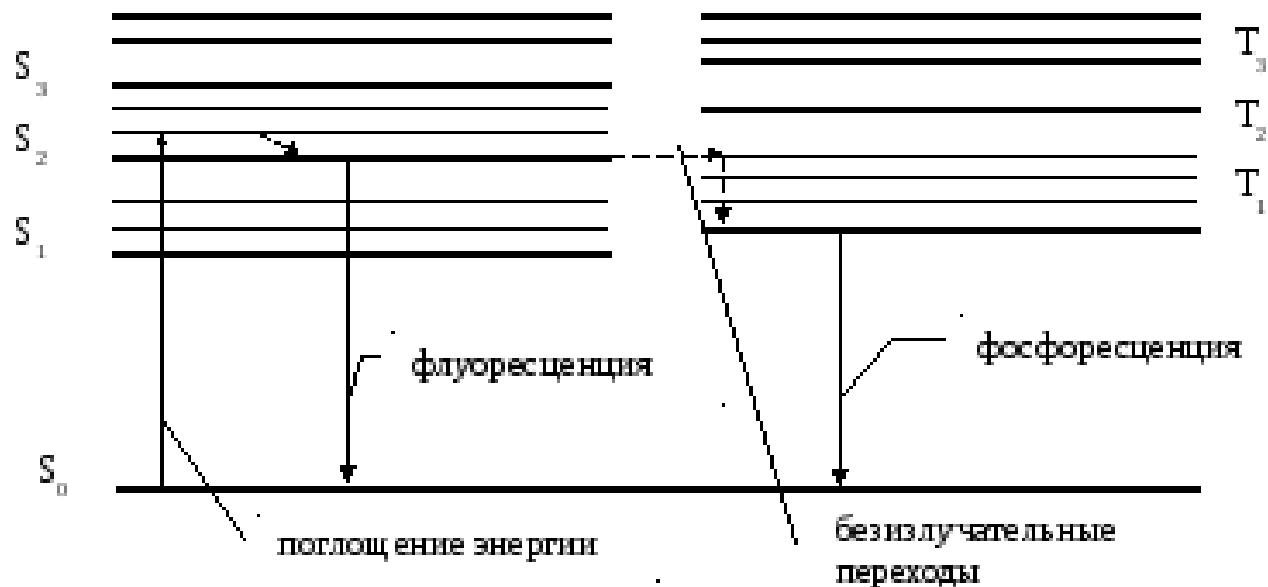
• флуоресценция ($\sim 10^{-8}$ с)

При флуоресценции молекула переходит в основное состояние из короткоживущего возбужденного состояния. Она наблюдается сразу же после поглощения света, быстро спадает и исчезает в результате столкновений излучающей молекулы с другими молекулами в растворе (тушение флуоресценции)

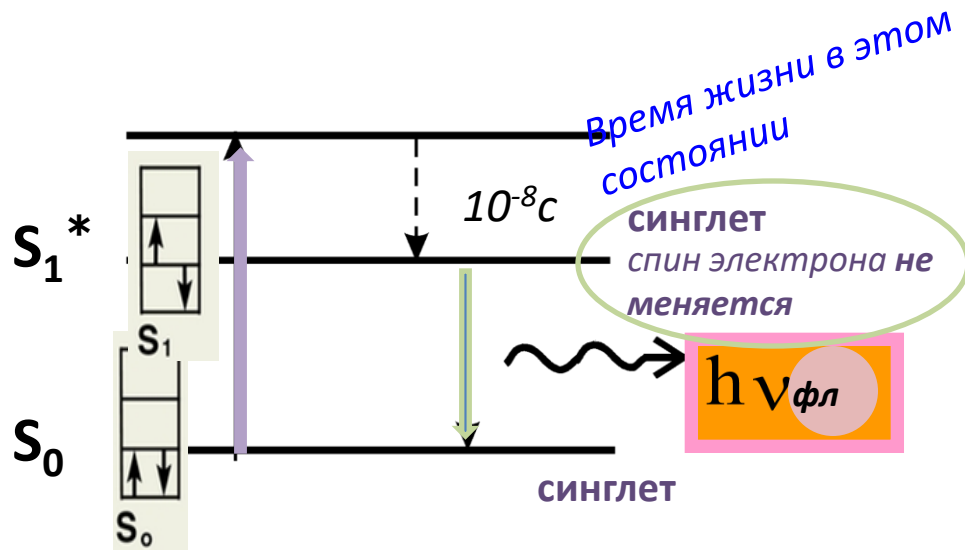
фосфоресценция ($> 10^{-6}$ с)

Фосфоресценция наблюдается при переходе молекулы в основное состояние из относительно долгоживущего возбужденного состояния, так что между поглощением и испусканием света может пройти относительно много времени.

Для фосфоресценции характерны большая длина волны излучения, меньшая интенсивность и большее влияние матрицы



Флуоресценция – это испускание кванта света при переходе возбужденного электрона между **синглетными** уровнями (спин электрона **не** меняется). Это **разрешенный** по спину излучательный переход.



Свечение **прекращается** после снятия возбуждения.

Тоник облучают

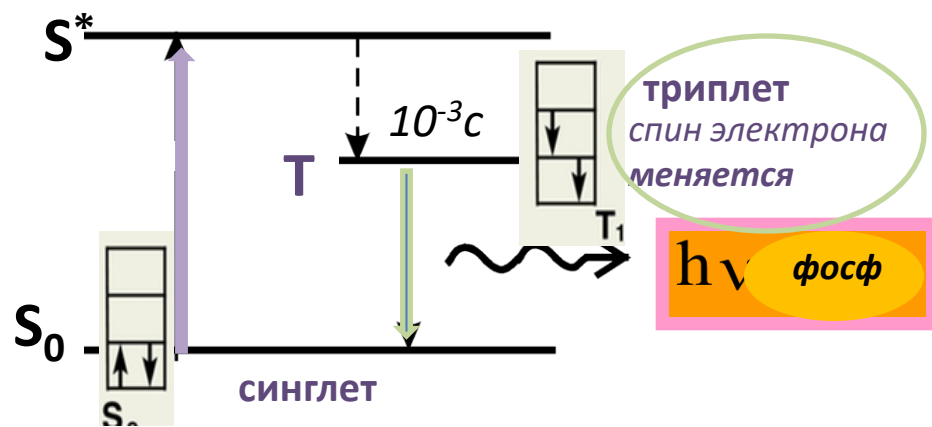


Ярко флуоресцирующее лекарственное соединение **хинин**. В кислых р-рах синяя область 475 нм.

Фосфоресценция – это испускание кванта света при переходе возбужденного электрона из триплетного состояния в синглетное (спин электрона *меняется*). Это запрещенный по спину излучательный переход.



Энергия, поглощенная веществом, высвобождается **медленно** в виде света.



Свечение сохраняется после снятия возбуждения



Банка в темноте



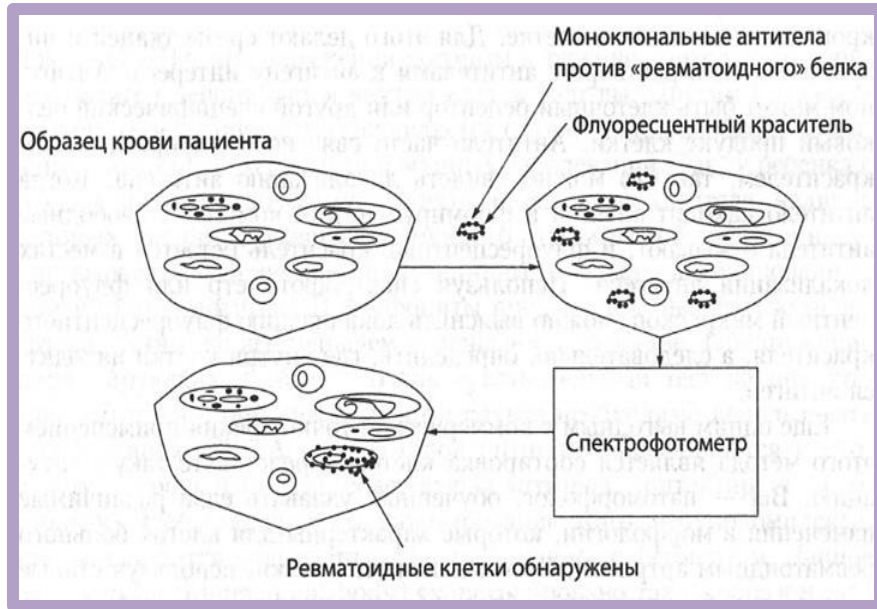
Облучили
видимым светом и УФ

ПРИМЕР:

Флуоресцентные метки

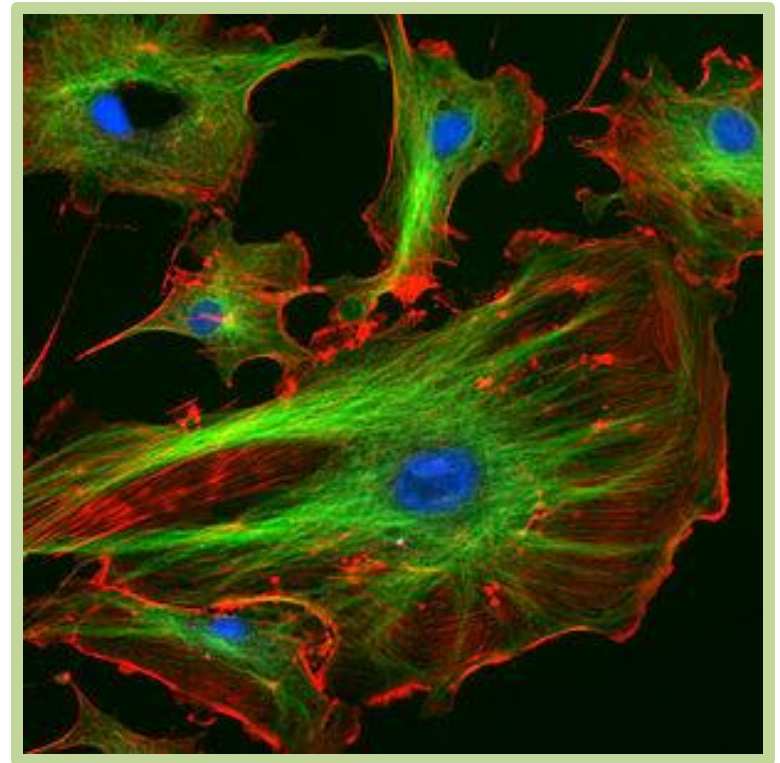
Использование **флуоресцентно меченных** антител в **иммунологических исследованиях крови**.

• Иммуноцитохимия



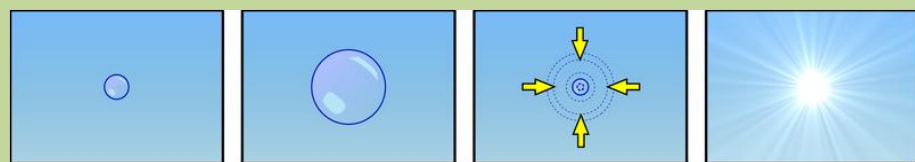
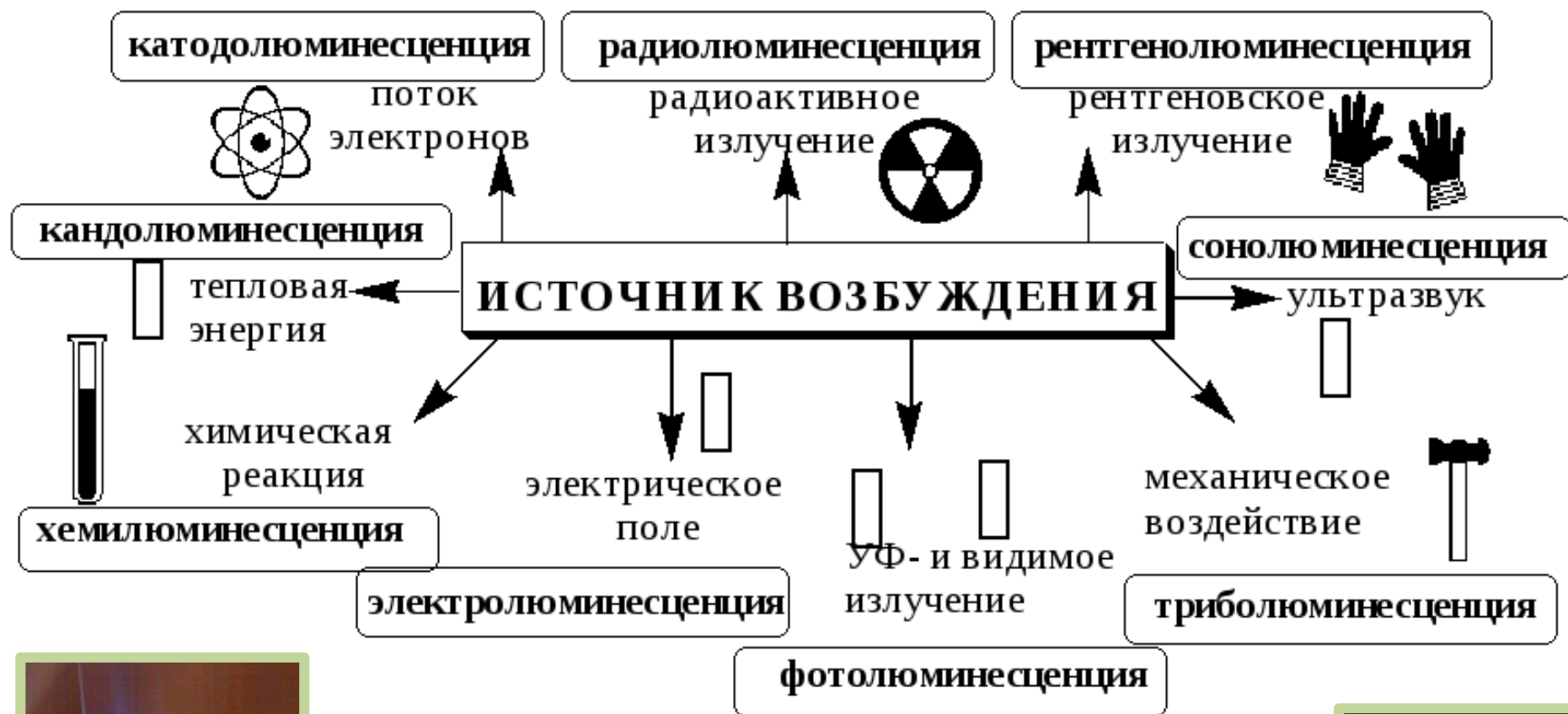
Использование связанных с флуоресцентной меткой моноклональных антител для выявления клеток, пораженных ревматоидным артритом

• Применение в клеточной биологии



Эндотелиальные клетки. Ядра клеток – голубой цвет; микротрубочки – зеленые – фл-но меченые антитела; Актиновые микрофиламенты – красные- меченые флуоресцеином

Классификация по способу возбуждения



Основные характеристики люминесценции

- **Спектр возбуждения** – зависимость интенсивности люминесценции (испускаемого света) от длины волны возбуждающего света. В разбавленных растворах спектр возбуждения совпадает со спектром поглощения данного вещества.
- **Спектр люминесценции** – зависимость интенсивности испускаемого света от его длины волны.
- **Энергетический выход люминесценции**

$$\varphi_{\text{л}} = E_{\text{л}} / E_{\text{погл}}$$

- **Квантовый выход люминесценции**

$$\varphi_{\text{кв}} = N_{\text{л}} / N_{\text{погл}}$$

$N_{\text{л}}$, $N_{\text{погл}}$ – число излучаемых и поглощаемых квантов, соответственно.

Правило Стокса

Длина волны фотолюминесценции больше, чем длина волны возбуждающего света

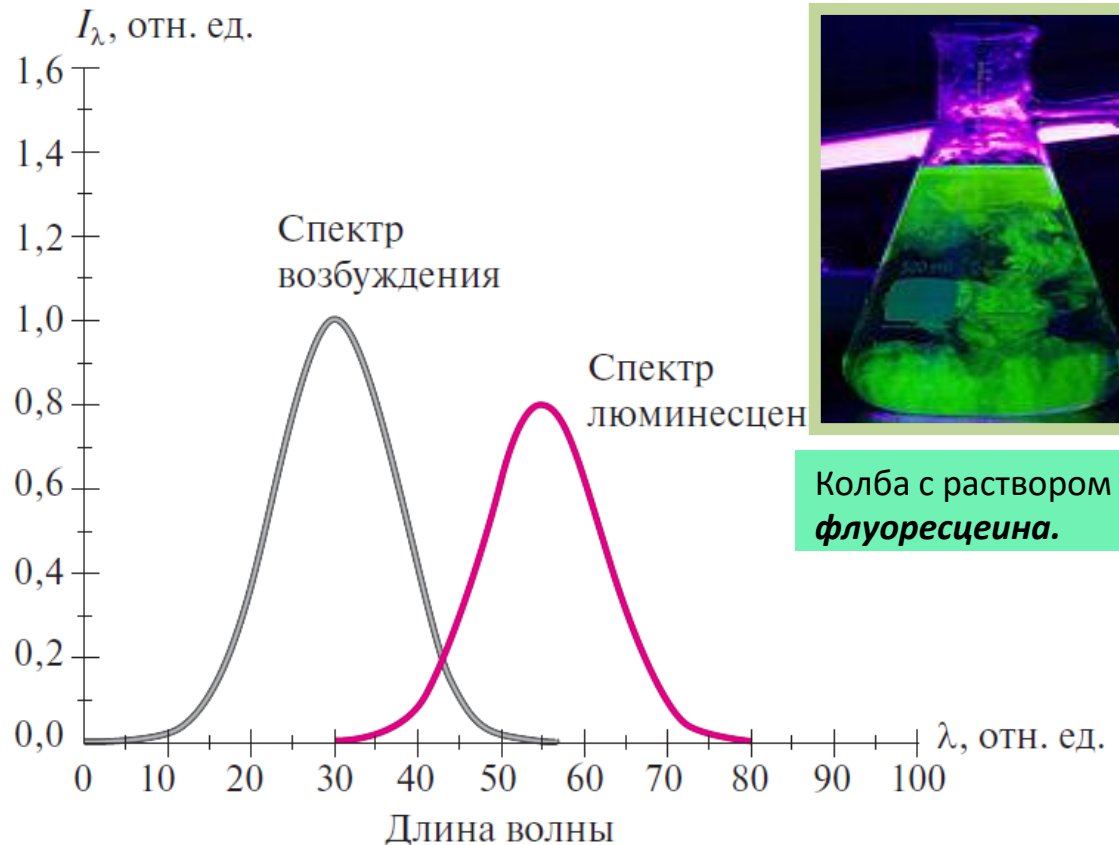
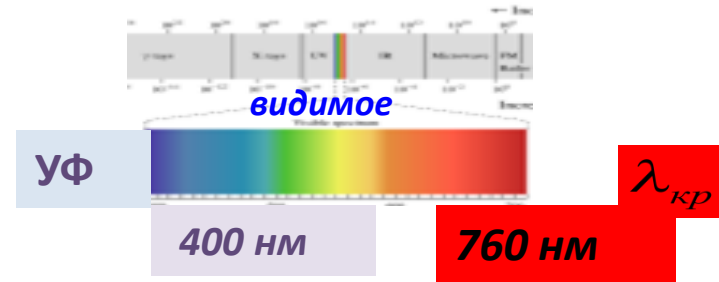
часть энергии превращается в энергию колебаний атомов (переходит в теплоту) q и квант люминесценции $h\nu_{\text{люм}}$ имеет меньшую энергию (и большую длину волны), чем квант возбуждающего света $h\nu_{\text{возб}}$

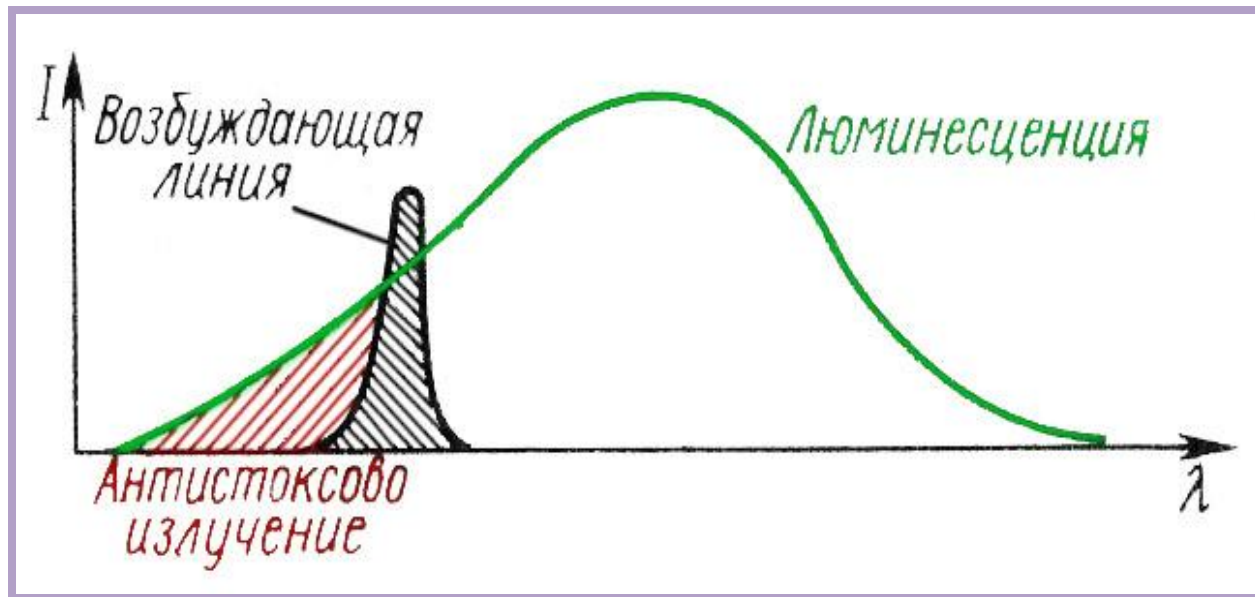
$$h\nu_{\text{возб}} = h\nu_{\text{люм}} + q,$$

$$\nu = c / \lambda,$$

$$\lambda_{\text{люм}} > \lambda_{\text{возб}}.$$

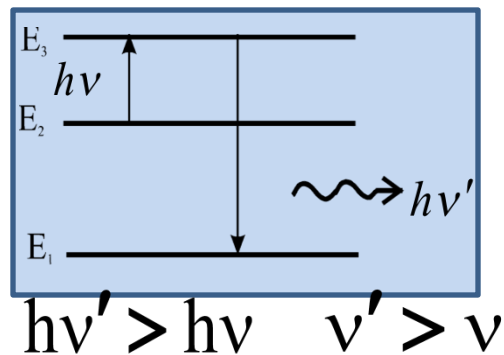
Э. Ломмель: максимум спектра люминесценции сдвинут по отношению к максимуму спектра поглощения в сторону более длинных волн





Антистоксовая

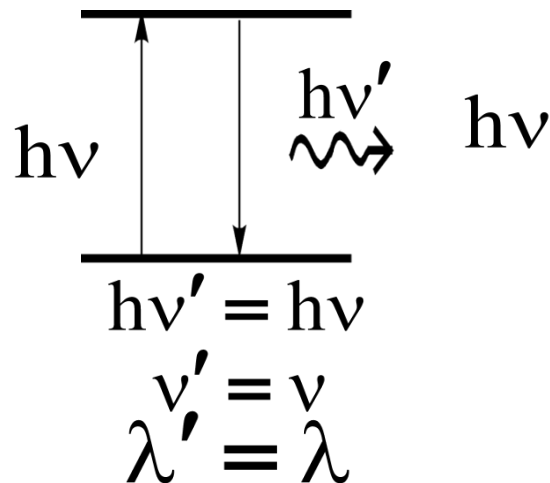
L-я (атом уже находится в возбужденном состоянии)



$$h\nu' > h\nu \quad \nu' > \nu$$

$$\lambda' < \lambda$$

Резонансная L-я

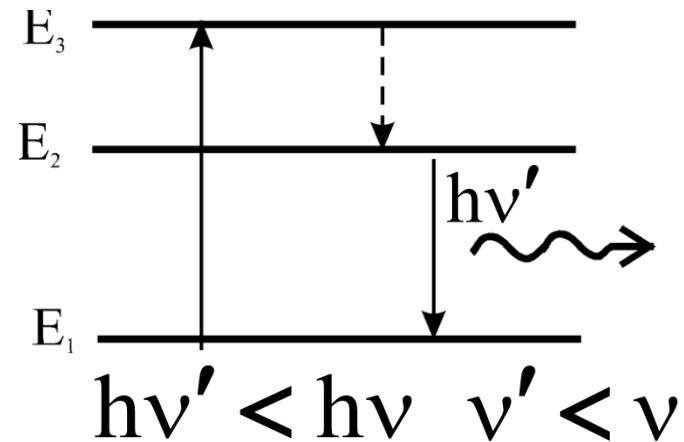


$$h\nu' = h\nu$$

$$\nu' = \nu$$

$$\lambda' = \lambda$$

Стоксовая L-я



$$h\nu' < h\nu \quad \nu' < \nu$$

$$\lambda' > \lambda$$

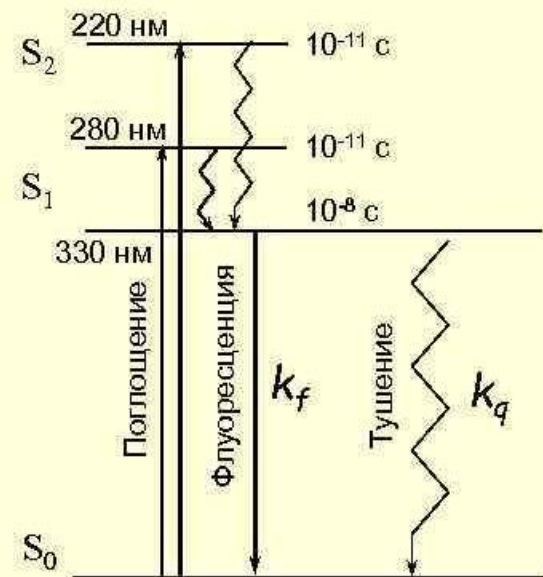
Закон С.И. Вавилова

- Квантовый выход постоянен, если длина волны (в определенном интервале) возбуждающего света меньше длины волны люминесценции
 $\phi = \text{const}$, если $\lambda_{\text{погл}} < \lambda_{\text{л}}$
- Следствие из закона Вавилова:
при $\lambda_{\text{погл}} < \lambda_{\text{л}}$, то спектр люминесценции не зависит от длины волны возбуждающего излучения.

Излучение люминесценции происходит с нижнего колебательного уровня нижнего возбужденного электронного состояния независимо от того, на какой уровень молекула была возбуждена в результате поглощения излучения.

$$\eta = \frac{\text{Число квантов флуоресценции}}{\text{Число поглощенных квантов}}$$

$$\eta = \frac{k_f}{k_f + k_q}$$



Уровни энергии индивидуальны для каждого вещества

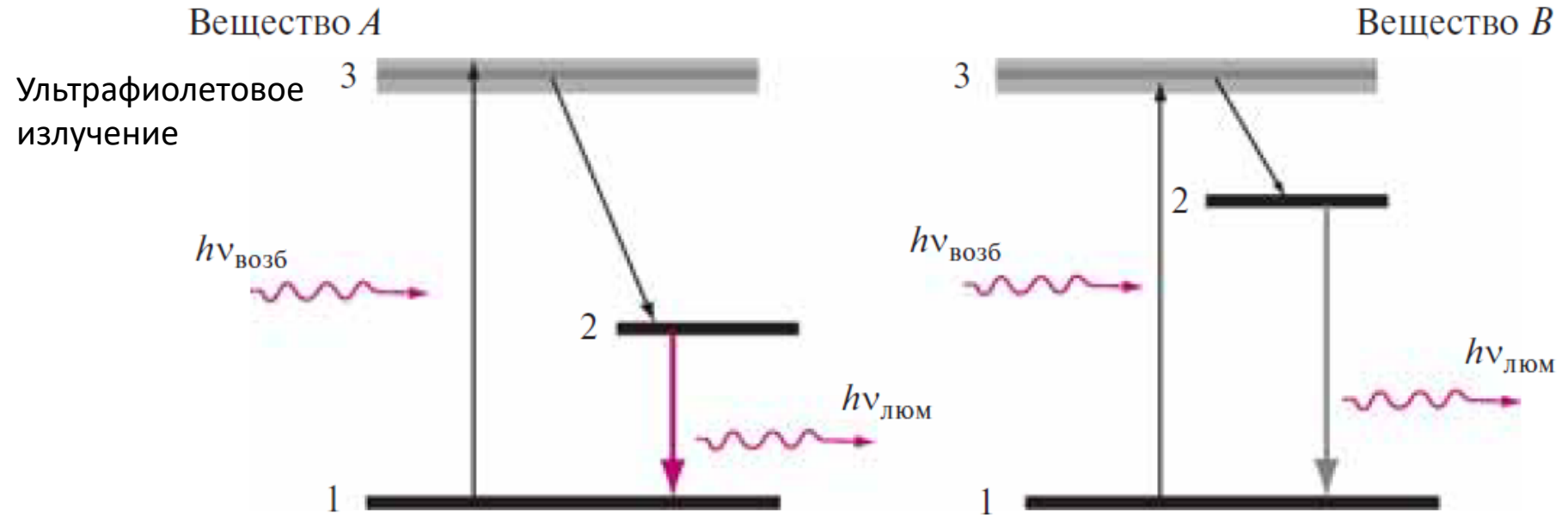
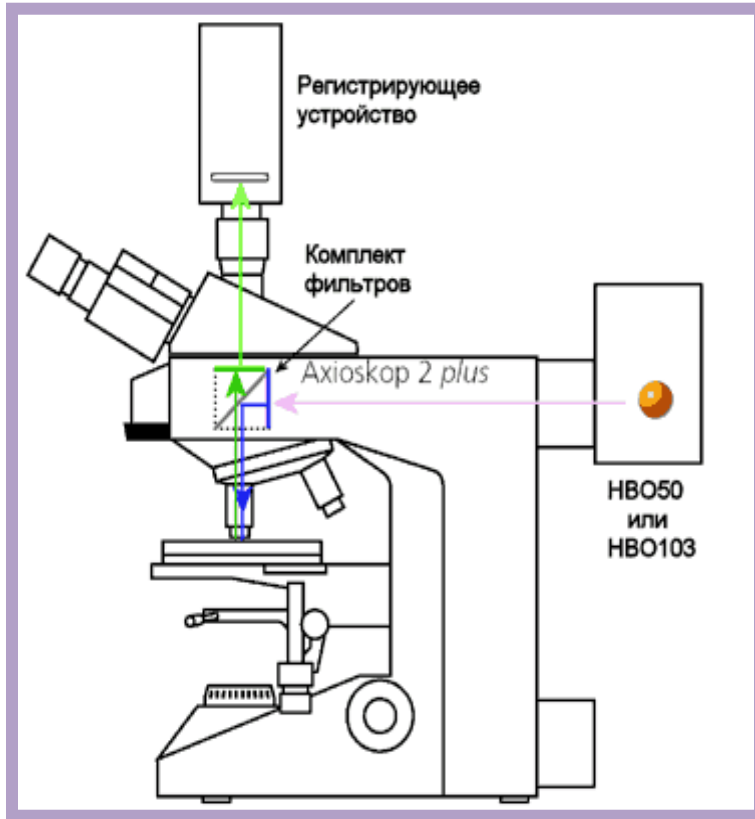


Схема квантовых переходов для разных веществ А и В

Длина волны фотолюминесценции для вещества А будет больше, чем для вещества В, поскольку **разность энергий** между уровнями 2 и 1 меньше для вещества А.

$\Delta E_A < \Delta E_B$
следовательно, $\nu_A < \nu_B$ и
соответственно $\lambda_A > \lambda_B$, поэтому
вещество В будет светиться,
например, **зеленым**, а вещество А —
красным светом.

Устройство люминесцентного микроскопа



3. Вторичный светофильтр

Между объективом и окуляром-
выделяет свет L-ии

L_L

Цвет:

Зеленый,
желтый

1. Источник для проведения фотовозбуждения:

Ртутно-кварцевая лампа сверхвысокого давления (УФ)

Чтобы увидеть люминесценцию нужны светофильтры.

2. Первичный светофильтр перед конденсором

Выделяет область спектра, которая вызывает L-ию

Цвет: Фиолетовый, УФ

$L_{\text{возб}}$

4. Наблюдают с помощью **ФЭУ** или визуально

Примеры люминесценции биологических объектов

Под воздействием УФ

Собственное
свечение
(Первичная L-я)

Витамины B_1 , A, E, B_6
зел. УФ. син

Белки

• Триптофан

• Тирозин

• Фенилаланин

Белки содержат 3 собственных
флуоресцирующих хромофора:

Вторичная L-я (возникает *после*
соответствующей *химической*
модификации имеющихся веществ)

Под действием L-х красителей =
люминофоров. Это вещества,
способные **превращать** поглощаемую
ими энергию в **люминесценцию**.

ПРИМЕР: • Витамины B_{12} , C, D

• Наркотические вещества морфин и
героин после обработки серной
кислотой с послед. выщелачиванием
дают **синюю** фл. Опр. до **0,02** мкг
наркотика в крови.

Применение люминесценции на практике

- Спектр люминесценции зависит от рода вещества. Этим пользуются при люминесцентном анализе состава флуоресцирующих веществ. Присутствие ничтожно малого количества вещества достаточно, чтобы возник характерный для него спектр люминесценции.

- Люминесценция используется также для обнаружения дефектов в деталях машин.
- Под действием ультрафиолетового излучения флуоресцируют многие ткани организма (ногти, зубы, непигментированные волосы, роговая оболочка, хрусталик глаза и др.).
- В некоторых случаях по характеру свечения можно отличить патологически измененные ткани от нормальных. Характерное свечение дают бактериальные и грибковые колонии.
- Люминесцентный анализ применяется при диагностике многих заболеваний, особенно в области дерматологии.

ПРИМЕР:

Флуоресцентные зонды

Определение времени циркуляции крови и области с пониженным кровоснабжением.

Определение скорости кровотока

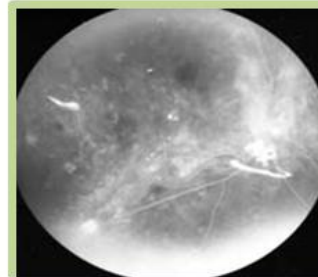
Внутривенно вводят флуоресцеин
флуоресценция в тканях глаз, слизистой оболочке рта, на губах.



Определение проницаемости капилляров кожи



Л-ю вызывают **УФ** и наблюдают в **видимой** области.

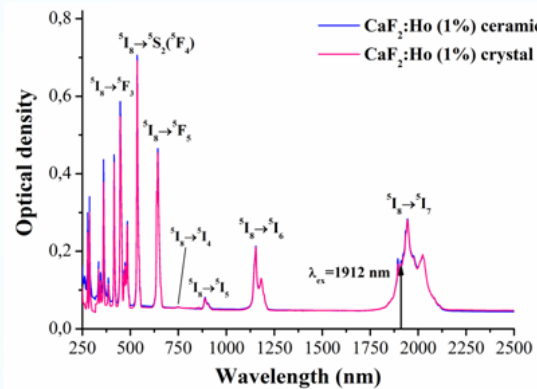
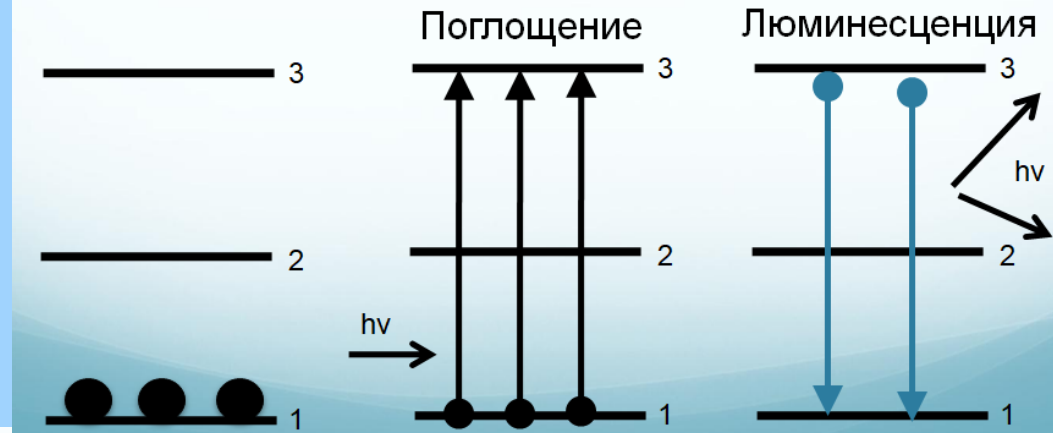
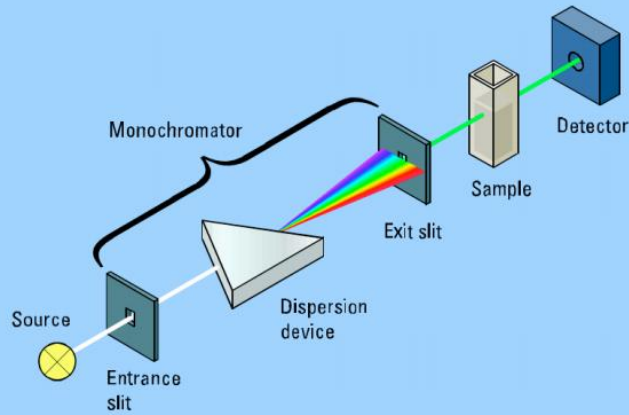


Фл-я ангиография сетчатки.
Выход флуоресцеина из поврежденных сосудов



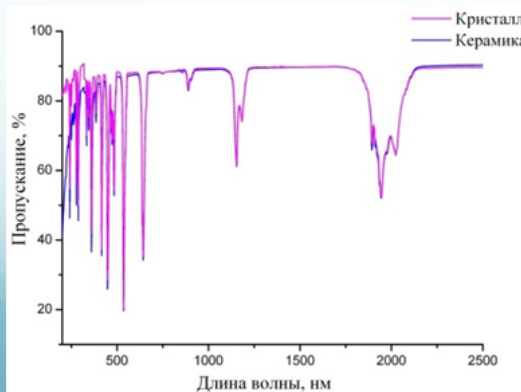
Глазное дно после лазерокоагуляции сетчатки.

Спектры поглощения



Коэффициент поглощения материала

$$k = \frac{\ln(\frac{I_0}{I})}{d}$$



Коэффициент пропускания материала

$$T = \frac{I}{I_0} 100\%$$

**Люминесценция некоторых веществ
лежит в основе действия **лазеров**.
Яркость люминесценции и ее высокий
энергетический выход позволили создать
люминесцентные источники
света с высоким коэффициентом полезного
действия**

***Лазер (оптический квантовый генератор)** — устройство, генерирующее когерентные электромагнитные волны (видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов), основанный на вынужденном излучении атомов и молекул.*

«Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», что означает «усиление света вынужденным излучением».

Лазеры

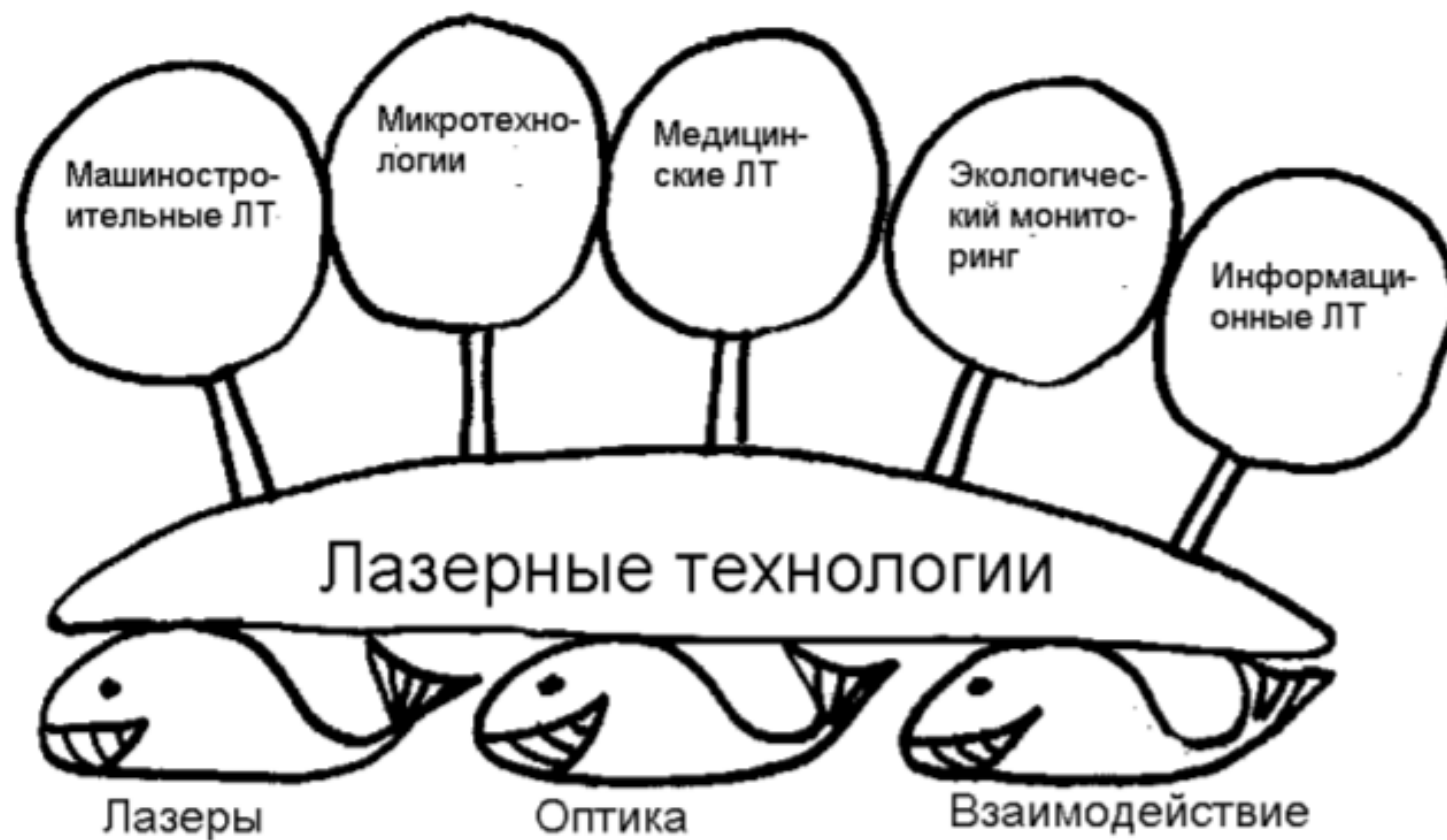
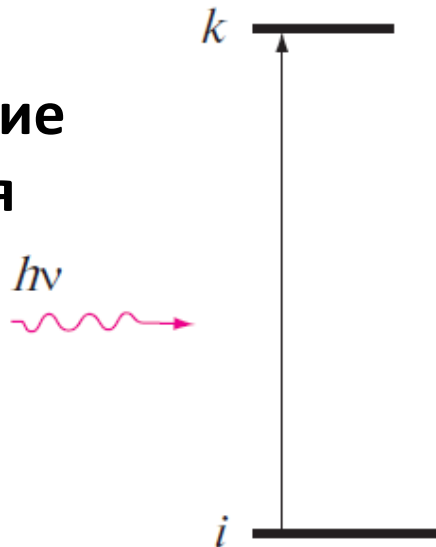


Схема возбуждения атома

поглощение
излучения

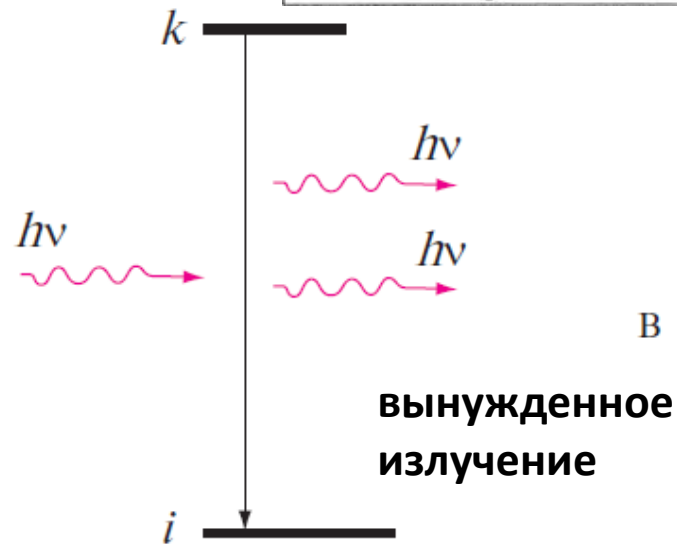
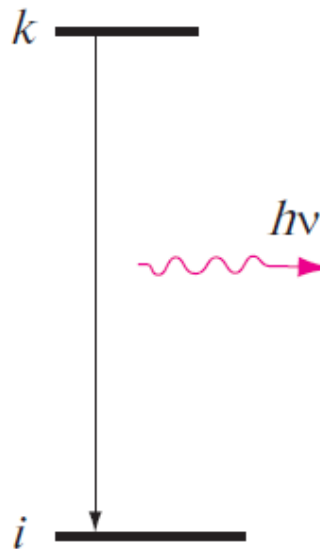


а

	До взаимо- действия	После взаимо- действия
Спонтанное излучение		
Поглощение		
Вынужденное излучение		

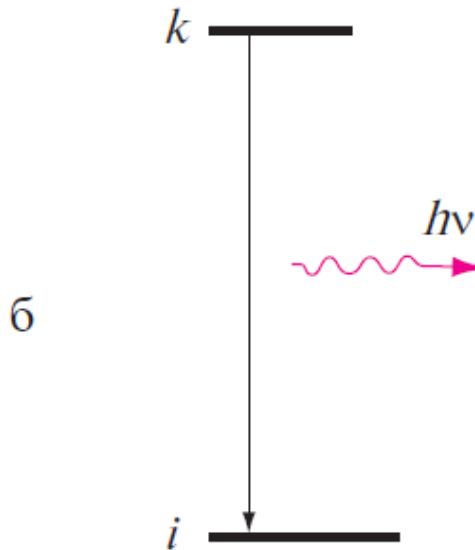
спонтанное
излучение

б



вынужденное
излучение

Спонтанное излучение (спонтанное испускание) — самопроизвольное испускание электромагнитного излучения атомами и другими квантовыми системами, находящимися на возбужденных уровнях энергии.



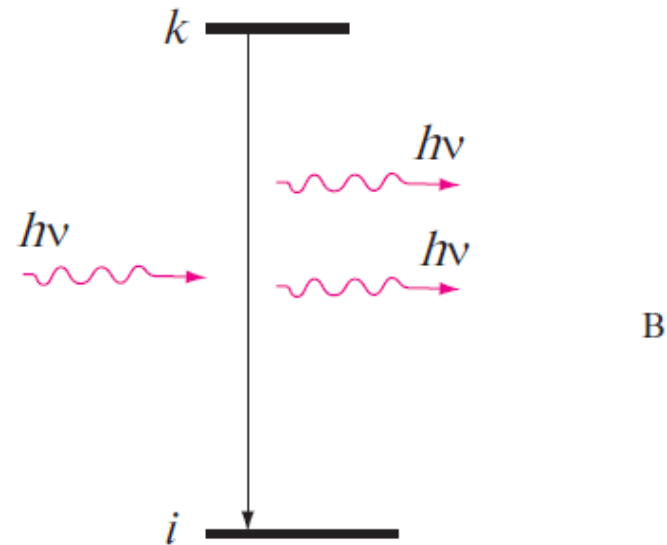
- Спонтанное излучение происходит при переходе атома из состояния k в состояние i без внешнего воздействия.
- Закономерности спонтанного излучения определяются исключительно **свойствами самой системы**.
- Спонтанное излучение возникает при спонтанном квантовом переходе возбужденной системы с **более высоким уровнем энергии E_k на более низкий E_i** .

Вынужденное излучение (вынужденное испускание, индуцированное излучение).

Под действием внешнего излучения с энергией фотона

$$h\nu = E_k - E_i$$

происходит переход атома из возбужденного состояния k в исходное состояние i . С точки зрения квантовой теории в результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, излучаются два совершенно одинаковых фотона.



Инверсия населенностей — неравновесное состояние вещества

при котором для составляющих его частиц (атомов, молекул) выполняются неравенства:

$$E_2 > E_1; N_1 < N_2,$$

где E — энергия соответствующего уровня; N — число частиц с соответствующей энергией.

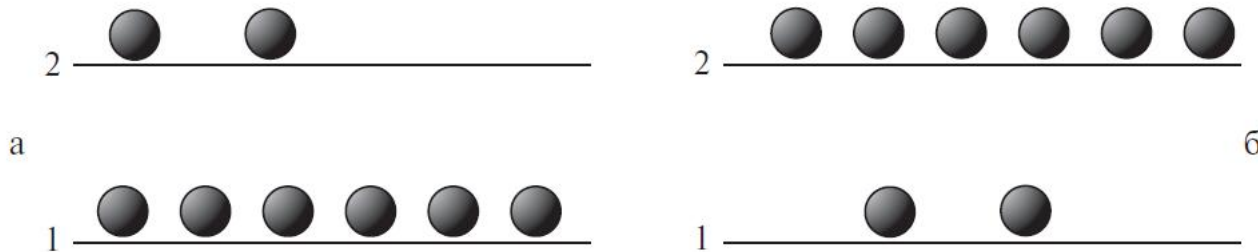
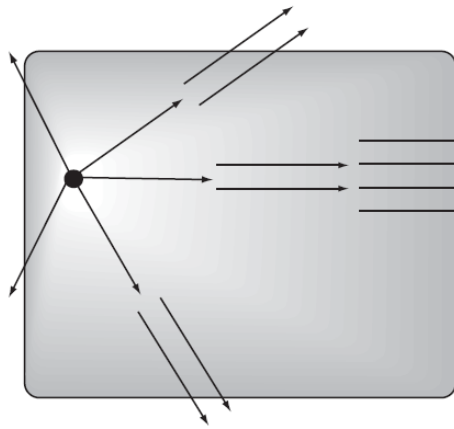


Схема населенностей уровней при тепловом равновесии (а) и при инверсии (б)

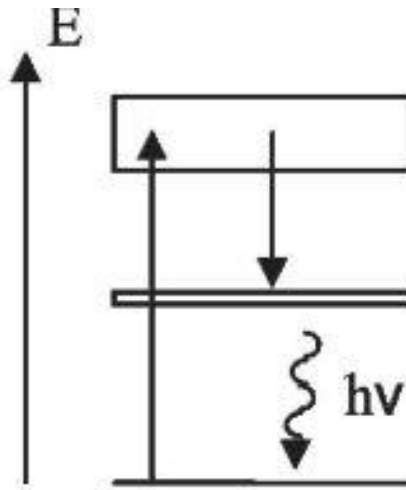


Если через среду с инверсией населенностей проходит электромагнитная волна с частотой $\nu = (E_k - E_i) / h$, то по мере ее распространения в среде **интенсивность волны будет возрастать** за счет актов вынужденного испускания, число которых превосходит число актов поглощения.

Создание инверсной населенности.

Способы накачки

Инверсионной населенности можно добиться, если использовать *три* энергетических уровня со следующей конфигурацией



E_3 — широкий уровень поглощения с малым временем жизни;

E_2 — узкий метастабильный уровень с относительно большим временем жизни;

E_1 — основной уровень.

Пусть среда освещается мощной вспышкой света. Часть спектра излучения будет поглощена в переходе с основного уровня E_1 на широкий уровень E_3 . **Широким** является энергетический уровень с малым временем релаксации. Поэтому большинство частиц, попавших на уровень возбуждения E_3 , безызлучательно переходит на узкий метастабильный уровень E_2 , где происходит их накопление. Вследствие узости этого уровня лишь малая доля фотонов вспышки способна вызвать вынужденный переход $E_2 \rightarrow E_1$. Этим и обеспечиваются условия для создания инверсной населенности.

Лазер содержит три основных элемента

1. активную среду (активный элемент), в которой создают инверсию населенностей
2. устройство для создания инверсии в активной среде (система накачки), например лампа накачки;
3. устройство для обеспечения положительной обратной связи (оптический резонатор).

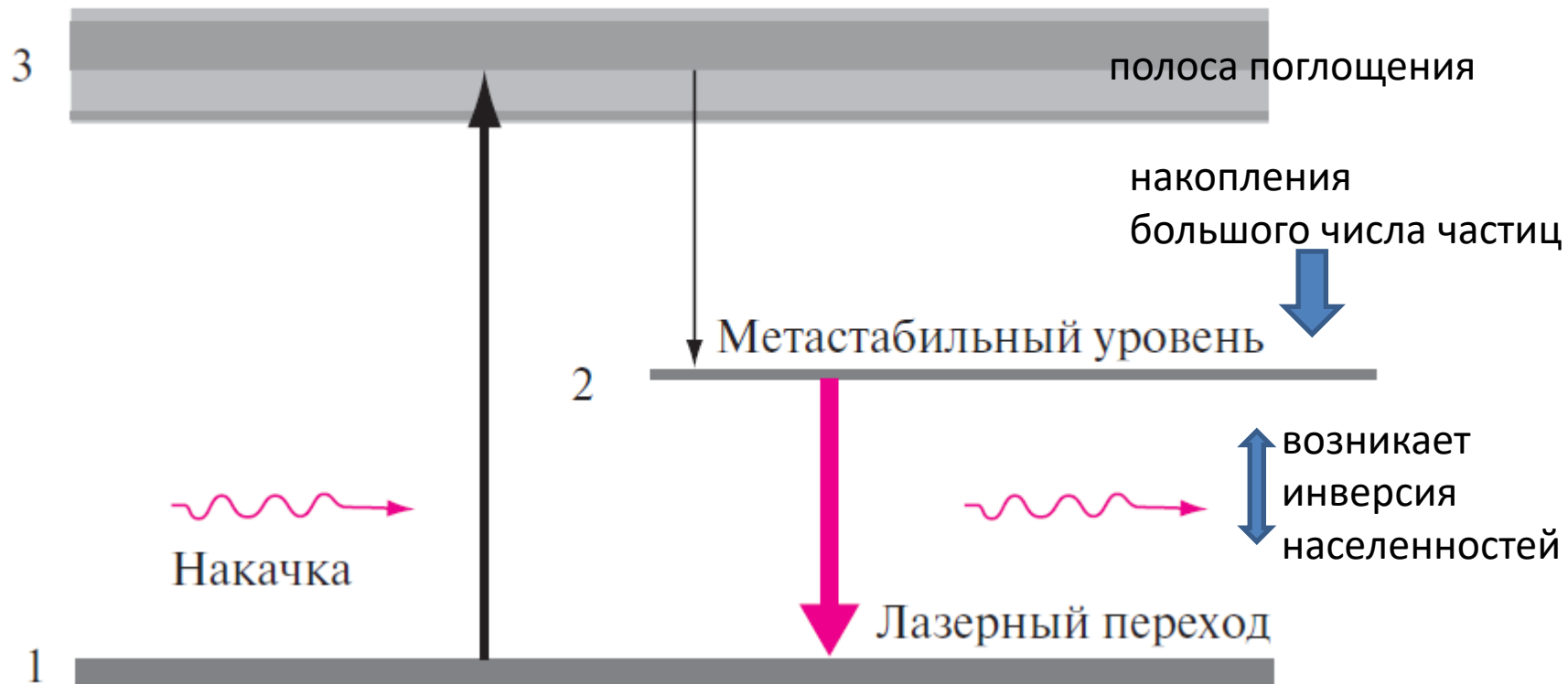


возникает когерентное излучение, направленное вдоль оси резонатора и содержащее лишь небольшое количество мод

Распределение по энергетическим уровням. Активная среда

- В состоянии термодинамического равновесия распределение частиц по энергетическим уровням за счёт тепловой энергии определяется распределением Больцмана:
- $N_i = N_0 \exp(-E_i / kT)$,
- где N_i – число частиц находящихся на i -м энергетическом уровне и называется населённостью уровней, E_i – энергия этого уровня, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, N_0 – число частиц на основном уровне.

Твердотельные лазеры (рубин, в состав которого входит Al_2O_3 с примесью ионов Cr^{3+})



Можно получить непрерывную и импульсную генерацию лазерного излучения в зависимости от способа осуществления инверсии населенности.

- Длительность импульсов лазерного излучения составляет от миллисекунд до фемтосекунд (10–15 с).
- Мощность излучения лазеров может изменяться в пределах от долей милливатта до 10^{12} – 10^{13} Вт (в импульсном режиме).

Особенности лазерного излучения

Лазерное излучение по своим свойствам значительно отличается от излучения обычных источников света.

Когерентность — *согласованное протекание во времени* нескольких колебательных или волновых процессов, разность их фаз остается постоянной во времени.

Временная когерентность излучения — согласованность колебаний светового поля в некоторой точке пространства в промежутке времени τ .

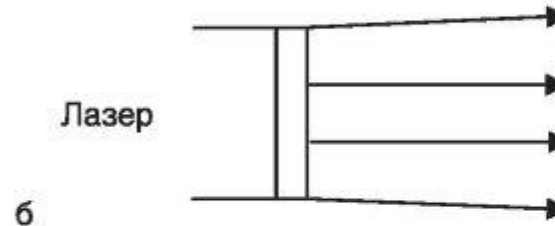
Пространственная когерентность — согласованность колебаний светового поля в точках в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Радиус когерентности лазерного излучения при одномодовом режиме почти равен радиусу пучка

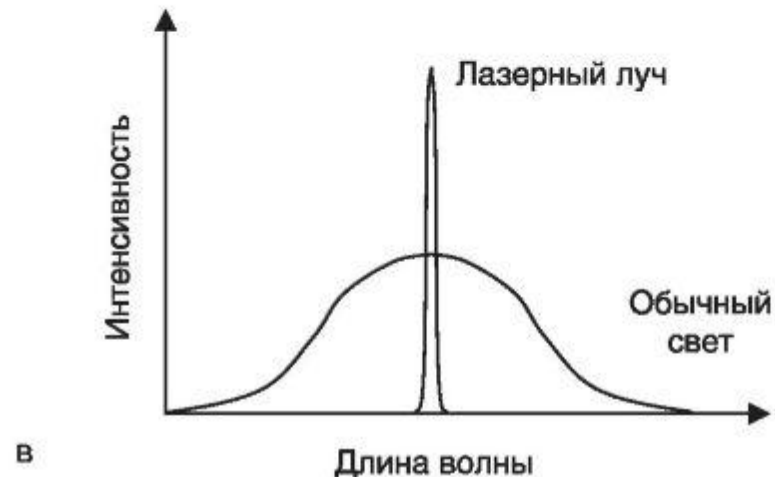
Когерентность.



Коллимированность



Монохроматичность



Особенности лазерного излучения

- **Высокая мощность.** Мощность монохроматического излучения - до 10^5 Вт в непрерывном режиме. Мощность импульсных лазеров $P = E/t = 2,5 \times 10^{13}$ Вт
- **Высокая интенсивность.** может достигать $I = 10^{14}-10^{16}$ Вт/см² для импульсных лазеров (ср. интенсивность солнечного света вблизи земной поверхности $I = 0,1$ Вт/см²).
- **Высокая яркость.** У лазеров, работающих в видимом диапазоне, *яркость* лазерного излучения (сила света с единицы поверхности) очень велика. Даже самые слабые лазеры имеют яркость 10^{15} кд/м² (для сравнения: яркость Солнца $L \sim 10^9$ кд/м²).
- **Давление.** При падении лазерного луча на поверхность тела создается *давление* (Д). При полном поглощении лазерного излучения, падающего перпендикулярно поверхности, создается давление $D = I/c$, где I - интенсивность излучения, c - скорость света в вакууме. При полном отражении величина давления в два раза больше. Для интенсивности $I = 10^{14}$ Вт/см² = 10^{18} Вт/м²; $D = 3,3 \times 10^9$ Па = 33 000 атм.
- **Поляризованность.** Лазерное излучение полностью *поляризовано*.

Характеристики лазерного излучения,

Длина волны излучения

Длины волн излучения (λ) медицинских лазеров лежат в диапазоне **0,2 -10 мкм**, т.е. от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области.

Мощность излучения

Для хирургических лазеров $P_{\text{и}} = 10^3\text{-}10^8$ Вт, а длительность импульса $t_{\text{и}} = 10^{-9}\text{-}10^{-3}$ с.

Энергия в импульсе излучения

Энергия одного импульса лазерного излучения ($E_{\text{и}}$) определяется соотношением $E_{\text{и}} = P_{\text{и}} \cdot t_{\text{и}}$, где $t_{\text{и}}$ - длительность импульса излучения (обычно $t_{\text{и}} = 10^{-9}\text{-}10^{-3}$ с). Для хирургических лазеров $E_{\text{и}} = 0,1\text{-}10$ Дж.

Частота следования импульсов

$f = N/t$ - количество импульсов излучения, генерируемых лазером за 1 с. Для терапевтических лазеров $f = 10\text{-}3000$ Гц, для хирургических $f = 1\text{-}100$ Гц.

Средняя мощность излучения

$$P_{\text{ср}} = E_{\text{и}} \cdot f = P_{\text{и}} \cdot t_{\text{и}} \cdot f.$$

$P_{\text{ср}}$ - энергия, которую лазер излучает за 1 с:

Для терапевтических лазеров $P_{\text{ср}} = 10^{-3} \dots 10^{-1}$ Вт, для хирургических $P_{\text{ср}} = 1 \dots 100$ Вт.

Интенсивность (плотность мощности) - отношение мощности лазерного излучения к площади поперечного сечения пучка. Для непрерывных лазеров $I = P/S$.

Интенсивность хирургических лазеров и давление, создаваемое их излучением:

для непрерывных лазеров $I \sim 10^3$ Вт/см², $D = 0,033$ Па;

для импульсных лазеров $I_{\text{и}} \sim 10^5\text{-}10^{11}$ Вт/см², $D = 3,3 - 3,3 \times 10^6$ Па.

Плотность энергии в импульсе - (W) характеризует энергию, которая приходится на единицу площади облучаемой поверхности за один импульс и определяется соотношением $W = E_{\text{и}}/S$, где S (см²) - площадь светового пятна (т.е. поперечного сечения лазерного луча) на поверхности биоткани. У лазеров, используемых в хирургии, $W \approx 100$ Дж/см². Параметр W можно рассматривать как дозу облучения D за 1 импульс.

Лазерное излучение

Поглощение мощного лазерного излучения биологической тканью сопровождается выделением теплоты. Для расчета выделяющейся теплоты используют специальную величину - *объемную плотность теплоты* (q)

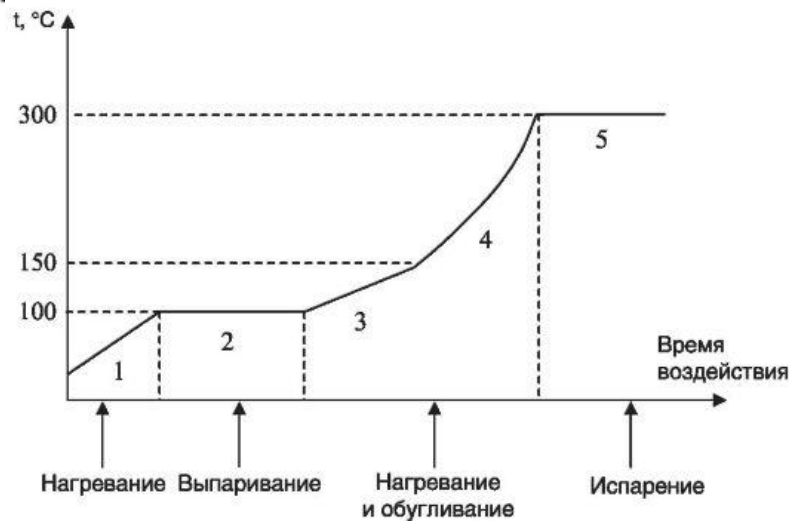
Объемная плотность выделяющейся теплоты (q) равна отношению выделенной теплоты (dQ) к объему ткани (dV) и времени облучения (dt):

$$q = dQ/dVdt, \text{ Вт/см}^3.$$

Объемная плотность теплоты, выделяющейся при облучении вычисляется по формуле

$$q = kI,$$

где I — интенсивность лазерного излучения, k [см^{-1}] — коэффициент поглощения ткани, зависящий от вида ткани и длины волны



Лазерное излучение. Абляция

При воздействии на ткань коротких импульсов лазерного излучения с высокой плотностью энергии реализуется другой механизм рассечения и удаления биоткани.

В этом случае происходит очень быстрый нагрев тканевой жидкости до температуры $T > T_{\text{кип}}$. При этом тканевая жидкость оказывается в метастабильном перегретом состоянии.

Затем происходит «взрывное» вскипание тканевой жидкости, которое сопровождается удалением ткани без обугливания. Это явление называется **абляцией**.

Абляция сопровождается генерацией механических ударных волн, способных вызвать механическое повреждение тканей в окрестностях зоны лазерного воздействия. Этот факт необходимо учитывать при выборе параметров импульсного лазерного излучения, например при шлифовке кожи, сверлении зубов или при лазерной коррекции остроты зрения.

Задача 1.1. Определить мощность и энергию импульсов излучения N_2 -лазера при длительности $\tau = 10^{-8}$ с, необходимые для достижения плотности мощности излучения в фокусе $q_0 = 10^7$ Вт/см², если расходимость пучка 1 мрад, а фокусное расстояние оптической системы 3 см.

Решение

Мощность импульсов лазерного излучения определяется выражением

$$P_0 = q_0 S,$$

где $S = \pi d_0^2 / 4$ — площадь пятна в фокальной плоскости.

Определим, чему равен диаметр пятна в фокусе, по следующей формуле:

$$d_0 = \theta f = 30 \text{ мкм.}$$

Вычислим мощность импульсов излучения:

$$P_0 = q_0 \pi d_0^2 / 4 = 70 \text{ Вт,}$$

а энергия импульсов излучения равна $W = P\tau = 7 \cdot 10^{-7}$ Дж.

Ответ: $P_0 = 70 \text{ Вт, } W = 7 \cdot 10^{-7} \text{ Дж.}$

Задача 1.2. Определить, во сколько раз изменится диаметр пучка в фокусе линзы, если перед ней поставить телескопическую систему с увеличением b^x .

Решение

Диаметр пучка в фокусе линзы $d_0 = \theta f$.

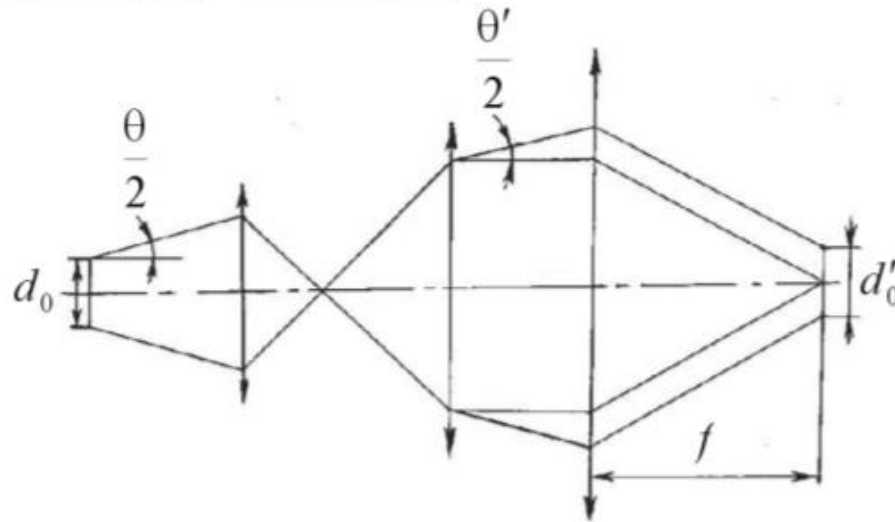


Рис. 1.1. Определение диаметра пучка в фокусе линзы

Если перед линзой поставить телескопическую систему, размер пучка в фокусе линзы определяется как $d'_0 = \theta' f$, где θ' — расходимость лазерного пучка после телескопической системы: $\theta' = \frac{\theta}{b^x}$. В результате получим:

$$\left. \begin{aligned} d'_0 &= \theta' f = \frac{\theta f}{b^x}; \\ d_0 &= \theta f, \end{aligned} \right\}$$

откуда $\frac{d'_0}{d_0} = \frac{1}{b^x}$.

Ответ: диаметр пучка в фокусе линзы уменьшится в b^x раз.

Задача №1.3

В молекуле фенилаланина разница энергий в основном и возбужденном состояниях составляет $\Delta E = 0,1$ эВ. Найти соотношение между заселенностями этих уровней при $T = 300$ К.

Решение:

В соответствии с распределением Больцмана

$$N = N_0 \exp(-\Delta E/kT)$$

$$\Delta E = 0.1 \text{ эВ} = 1.6 * 10^{-20} \text{ Дж}$$

$$kT = 1.38 * 10^{-23} * 300 = 0.414 * 10^{-20} \text{ Дж}$$

$$\frac{N}{N_0} = \exp(-3.86) = 0.021$$

Ответ: $\frac{N}{N_0} = \exp(-3.86) = 0.021$

Задача №1.4

В лазере на рубине, работающем в импульсном режиме на длине волны $\lambda = 694 \text{ нм}$ (темно-красный свет), используется оптическая накачка. Предположим, что рубиновый стержень лазера получил при накачке энергию $W = 20 \text{ Дж}$. Длительность лазерного импульса $\tau = 10^{-3} \text{ с}$. Какую мощность P в импульсе развивает лазер? Какую плотность I светового потока можно получить при фокусировке когерентного лазерного излучения на площадке $S = 10^{-2} \text{ мм}^2$?

Решение

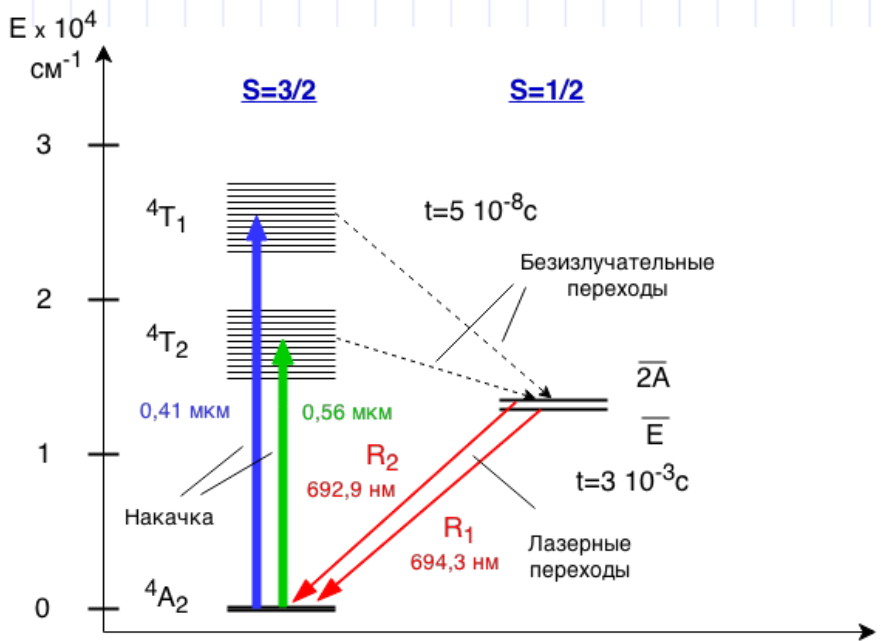
Мощность P равна отношению энергии W , излученной в импульсе, к длительности импульса τ :

$$P = W / \tau = 2 \cdot 10^4 \text{ Вт} = 20 \text{ кВт}.$$

Плотность I светового потока лазера при фокусировке излучения в пятно площадью S равна

$$I = \frac{P}{S} = 2 \cdot 10^{12} \text{ Вт/м}^2.$$

Следует отметить, что когерентное излучение может быть сфокусировано в пятно диаметром порядка длины волны λ . В этом случае плотность светового потока в фокусе достигла бы значения порядка $4 \cdot 10^{16} \text{ Вт/м}^2$.



Задача №1.5

Рубиновый лазер в импульсе длительностью 30 нс обладает энергией излучения $E_{\text{л}} = 1$ Дж. Длина волны излучения равна $\lambda = 694,3$ нм. Определить число фотонов n , излучаемых за лазерный импульс.

Решение:

Энергия фотона

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E = 6.63 * 10^{-34} * 3 * 10^8 / 694 * 10^{-9} = 0.29 * 10^{-18} \text{ Дж}$$

Число излученных фотонов

$$n = \frac{E_{\text{л}}}{E} = 3.5 * 10^{18}$$

Ответ: $n = \frac{E_{\text{л}}}{E} = 3.5 * 10^{18}$

Условие задачи:

Мощность излучения лазера 100 Вт, длина волны излучения $1,2 \cdot 10^{-6}$ м. Определите число фотонов, испускаемых лазером в единицу времени.

Задача №11.1.23 из «Сборника задач для подготовки к вступительным экзаменам по физике УГНТУ»

Дано:

$$P = 100 \text{ Вт}, \lambda = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}, t = 1 \text{ с}, N - ?$$

Решение задачи:

Мощность лазера P – это общая энергия всех фотонов E , которые излучаются лазером за единицу времени, поэтому справедливо записать:

$$P = \frac{E}{t} \quad (1)$$

Очевидно, что общая энергия всех фотонов E равна произведению энергии одного фотона E_0 на количество этих фотонов N :

$$E = NE_0 \quad (2)$$

Согласно формуле Планка, энергия фотона E пропорциональна частоте колебаний ν и определяется следующим образом:

$$E_0 = h\nu \quad (3)$$

В этой формуле h – это постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Известно, что частоту колебаний ν можно выразить через скорость света c , которая равна $3 \cdot 10^8$ м/с, и длину волны λ по следующей формуле:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

Подставим сначала (4) в (3), полученное – в (2), и полученное после этого – в формулу (1), тогда получим:

$$P = \frac{Nhc}{\lambda t}$$

Выразим из этой формулы число фотонов N :

$$N = \frac{P\lambda t}{hc}$$

Мы получили решение задачи в общем виде, подставим численные данные задачи в формулу и посчитаем численный ответ задачи:

$$N = \frac{100 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 6 \cdot 10^{20}$$

Контрольные вопросы и задачи

1. Каковы отличия люминесценции от теплового излучения?
2. Какой закон сохранения лежит в основе правила Стокса?
3. Перечислите виды люминесценции по типу возбуждения, по длительности свечения.
4. Что такое квантовый выход фотолюминесценции?
5. Сравните условия спонтанного и вынужденного излучения.
6. В трехуровневой схеме лазера между какими уровнями возникает инверсия населенностей? Между какими уровнями происходит переход при поглощении излучения?
7. Какова физическая роль основных элементов лазера (активное вещество, лампа накачки, зеркала)?
8. Сравните свойства лазерного излучения и излучения лампы накаливания.
9. Для сварки отслоившейся сетчатки используют лазер, генерирующий световые импульсы с длиной волны 640 нм, продолжительностью 25 мс, средней энергией 0,50 Вт в импульсе. Сколько энергии может выделяться в импульсе и сколько фотонов в нем?
10. Во сколько раз интенсивность излучения при фокусировке лазерного излучения больше, чем при фокусировке света лампы накаливания при одинаковой мощности излучения? Диаметр пучка лазерного излучения в фокусе примите равным 10 длинам волн ($\lambda = 540$ нм), диаметр пучка света обычного источника света примите равным 1 мм.