

Министерство здравоохранения Республики Беларусь
УО «Гомельский государственный медицинский университет»
(кафедра медицинской и биологической физики)

❖ Тепловое излучение

- ❖ Люминесценция
- ❖ Законы Вавилова и Стокса.
- ❖ Люминесцентный анализ.

Петрова Е.С., к.ф-м.н, доцент
кафедра медицинской и биологической физики

Petrova E.S., PhD
Department of Medical and Biological Physics

* Тепловое излучение

- ❑ Характеристики теплового излучения;
- ❑ абсолютно черное тело; закон Кирхгофа;
- ❑ законы излучения абсолютно черного тела (закон Стефана-Больцмана, закон Вина);
- ❑ квантовая гипотеза; фотоны; формула Планка для универсальной функции Кирхгофа.
- ❑ Инфракрасное излучение и его применение в медицине
термография



Тепловое излучение -

происходит за счет нагревания тела, т. е. внутренней энергии вещества и поэтому свойственно всем физическим телам при любой температуре, отличной от 0 К.

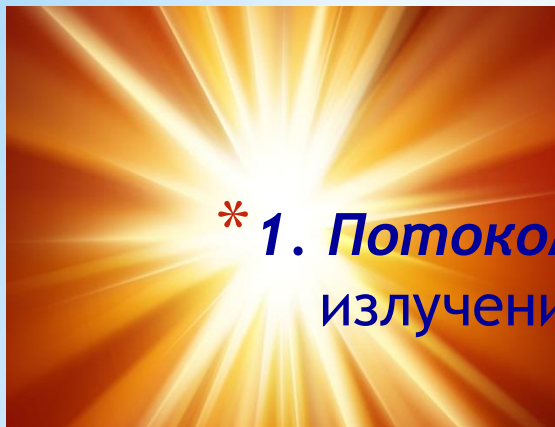
➤ Тепловое излучение осуществляется за счет внутренней энергии тел (колебаний атомов в кристаллической решетке или вращательно-колебательного движения)

➤ Все без исключения тела в природе излучают электромагнитные волны, интенсивность и спектральный состав которых существенно зависят от температуры тела. (*тепловое излучение*).

➤ Чем выше температура тела, тем интенсивнее это излучение.

Спектр теплового излучения сплошной

➤ При $T = 10\text{K} \div 3000\text{K}$ излучаются волны инфракрасного диапазона



* Основные характеристики теплового излучения

* **1. Поток излучения** называется отношение энергии излучения E ко времени t , за которое оно произошло:

$$\Phi_e = E / t$$

это количество электромагнитной энергии, излучаемое всей поверхностью тела в единицу времени по всем направлениям:

2. Энергетической светимостью тела называется отношение потока излучения, испускаемого телом, к площади поверхности излучателя:

$$R_e = \Phi_e / S = E / (t S)$$

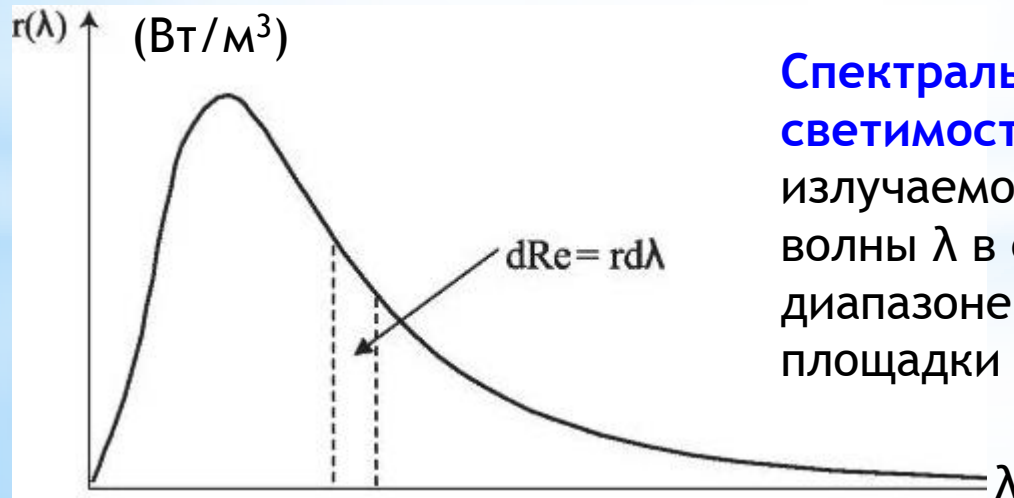
количество электромагнитной энергии, излучаемое с 1 м^2 поверхности тела за 1 с по всем направлениям и во всем спектральном диапазоне

Единица энергетической светимости - *ватт на квадратный метр* ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

* Спектральная плотность энергетической светимости

Спектральная плотность энергетической светимости (или испускательной способности) - отношение энергетической светимости dR_e , соответствующей узкому участку спектра, к ширине этого участка $d\lambda$

$$r_{\lambda, T} = dR_e / d\lambda$$



Спектральная плотность энергетической светимости - Количество энергии, излучаемое по всем направлениям на длине волны λ в единичном спектральном диапазоне $\Delta\lambda$ за 1 сек с единичной площадки 1 м^2

4. Коэффициентом поглощения или поглотительной способностью называют

отношение потока излучения, поглощенного телом на длине волны λ , к потоку излучения с той же длиной волны, падающему на ту же поверхность тела:

❖ Абсолютно черное тело, коэффициент поглощения равен единице на всех длинах волн $\alpha=1$

Такое тело полностью поглощает любое падающее на него излучение.

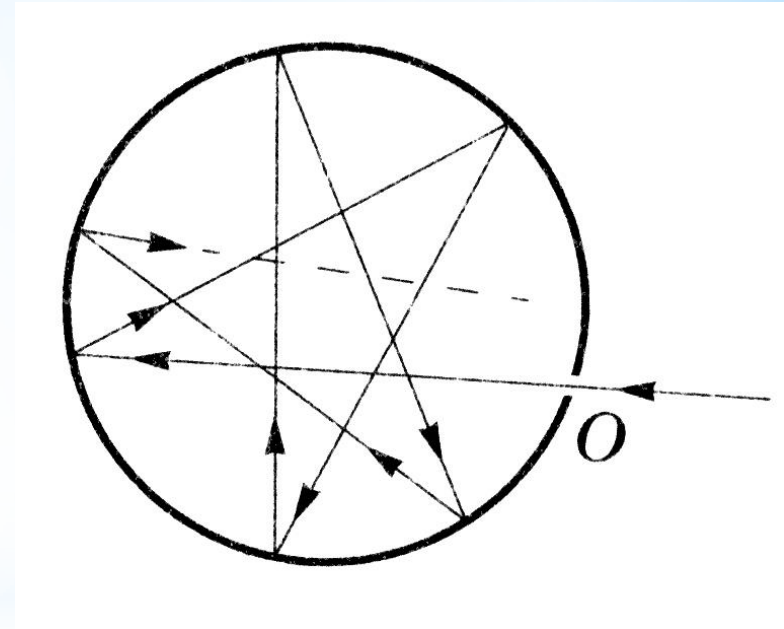
$$\alpha_{\lambda} = \frac{\Phi_{\text{погл}}(\lambda)}{\Phi_{\text{пад}}(\lambda)}$$

❖ Серые тела, коэффициент поглощения которых меньше единицы, но одинаков на всех длинах волн $\alpha=\text{const}<1$

❖ Тела, коэффициент поглощения которых зависит от длины волны $\alpha(\lambda)=\text{const}<1$

* Модель абсолютно черного тела

- * Идеальной моделью абсолютно черного тела является замкнутая полость с небольшим отверстием O , внутренняя поверхность которой зачернена
- * Луч света, попавший внутрь такой полости, испытывает многократные отражения от стенок, в результате чего **интенсивность вышедшего излучения оказывается практически равной нулю.**
- * Абсолютно черное тело - это идеализированная модель.
- * Солнце, сажа, платиновая чернь, черный бархат в определенном интервале частот по своим свойствам близки к абсолютно черному телу.



* Закон Кирхгофа


- * **Закон Кирхгофа:** в состоянии термодинамического равновесия у тел, обменивающихся энергией лишь путем излучения и поглощения, отношение спектральной плотности энергетической светимости к коэффициенту поглощения является величиной постоянной, не зависящей от природы тела.
- * Для всех тел оно выражается одной и той же функцией от длины волны λ и температуры T :

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}}\right)_2 = \dots = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}}\right)_n = f(T, \lambda)$$

где $f(T, \lambda)$ — универсальная функция Кирхгофа.

* Следствие закона Кирхгофа:

- * тело поглощает электромагнитные волны преимущественно в том интервале, в котором само их испускает.
- * **Абсолютно черным телом** называется тело, *которое* при любой температуре *поглощает всю энергию* падающего на него электромагнитного излучения произвольной длины волны.

Отсюда следует  $r_{\lambda, T} = f(T, \lambda)$

Таким образом, универсальная функция Кирхгофа есть не что иное, как **спектральная плотность энергетической светимости черного тела.**

* Закон Стефана-Больцмана

* **Закон Стефана - Больцмана:** энергетическая светимость

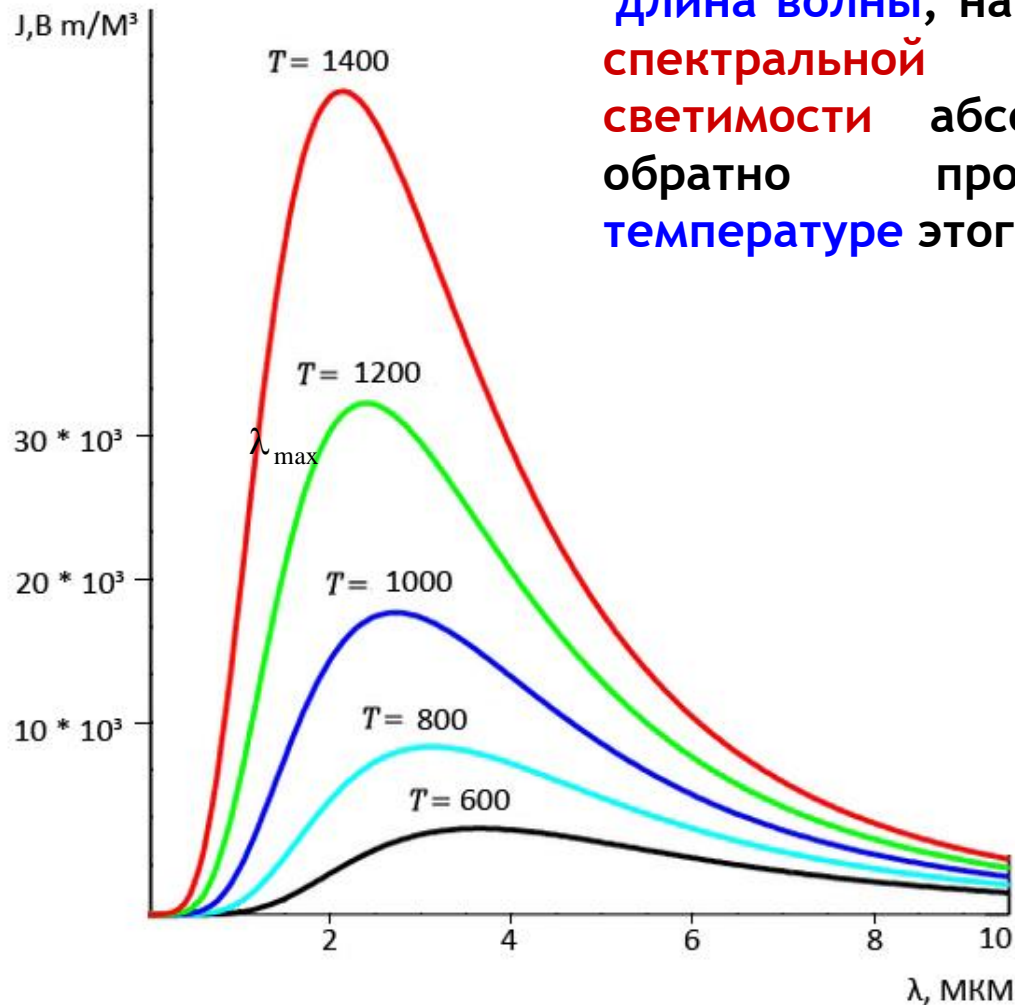
$$R_e$$

абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени температуры T .

$$R_e = \sigma T^4$$

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ - **постоянная Стефана-Больцмана.**

* Закон Вина



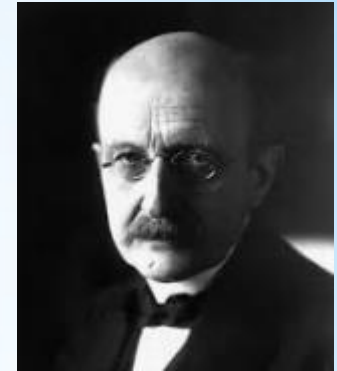
длина волны, на которую приходится **максимум спектральной плотности энергетической светимости** абсолютно черного тела λ_{max} , **обратно пропорциональна абсолютной температуре** этого тела:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}$$

$b = 2,898 \cdot 10^{-3} (\text{м} \cdot \text{К})$ — **постоянная Вина**

- **Законы Стефана-Больцмана и Вина являются эмпирическими (экспериментально установленными).**
- **Многочисленные попытки теоретически установить закон излучения черного тела долгое время приводили к результатам, согласующимся с опытом только в ограниченном интервале температур и длин волн.**
- **в основу этих попыток были положены классические представления электродинамики и термодинамики, согласно которым тело испускает и поглощает энергию непрерывно.**
- **Однако эти представления приводили к абсурдному результату. Проблема теплового излучения зашла в тупик...**
- **Только путем введения принципиально новых квантовых воззрений в 1900 г. Планку удалось получить формулу, находящуюся в полном согласии с опытом.**

* Гипотеза Планка



Гипотеза Планка (1900 г.):

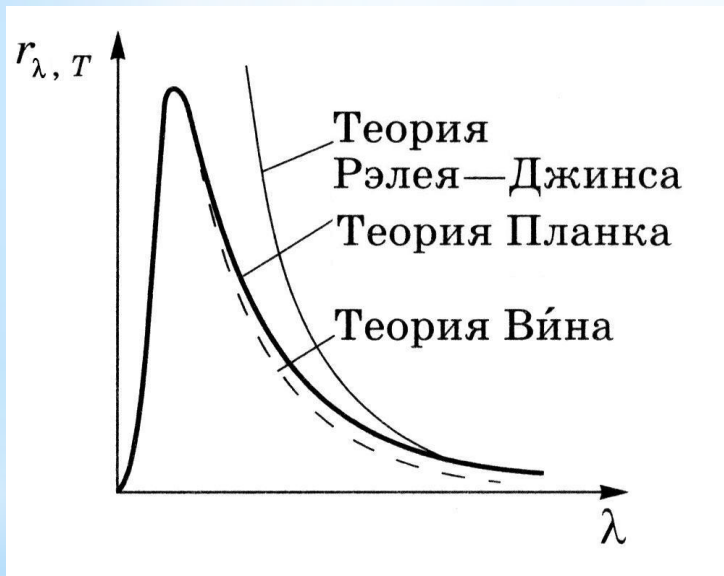
вещество не может испускать и поглощать энергию излучения иначе как конечными порциями (квантами), пропорциональными *частоте этого излучения*.

Энергия кванта

$$E = h \nu$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Представляя вещество в виде совокупности электронных осцилляторов, энергия которых может изменяться лишь на величину, кратную $h\nu$, Планк построил теорию теплового излучения и *вывел закон распределения спектральной плотности энергии для черного тела:*



$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp[h\nu / (kT)] - 1}$$

или

$$r_{\lambda, T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp[hc / (\lambda kT)] - 1}$$

Эти формулы блестяще согласуются с опытом по распределению энергии в спектрах излучения черного тела *во всем интервале частот (длин волн) и температур*

*Термография

Термография - диагностический метод, основанный на регистрации теплового излучения (тепловой портрет) поверхности тела человека
(Используется закон Стефана -Больцмана)



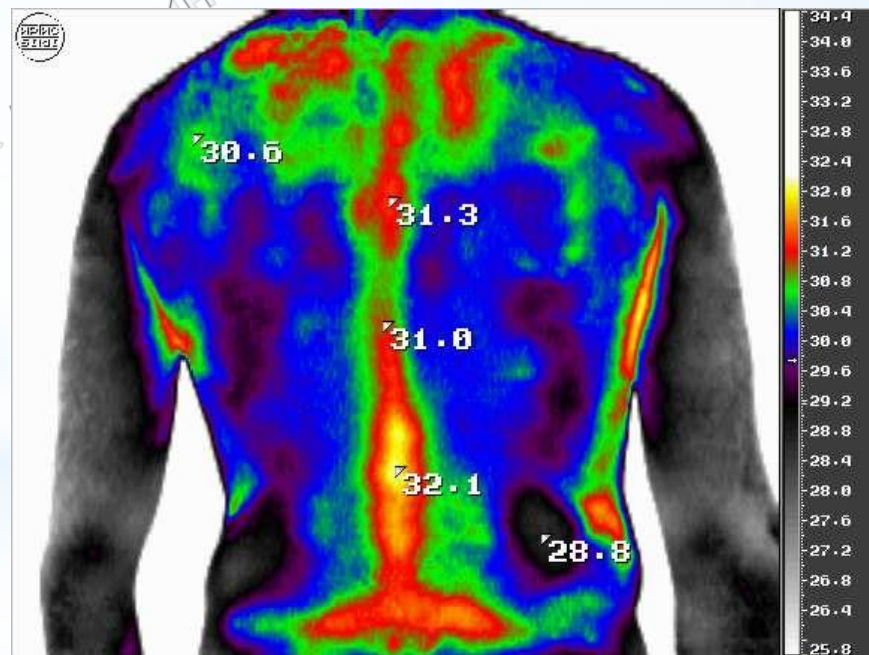
Тепловизор фиксирует изменения температуры на $0,02^{\circ}\text{C}$
При патологиях изменение температуры поверхности тела составляет $0,5-4^{\circ}\text{C}$



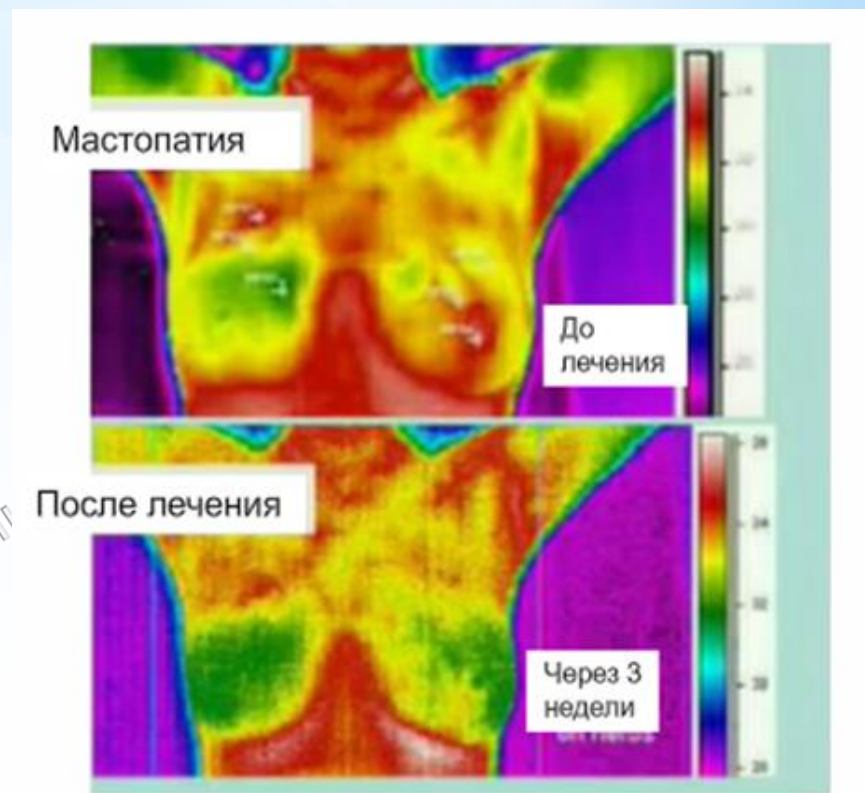
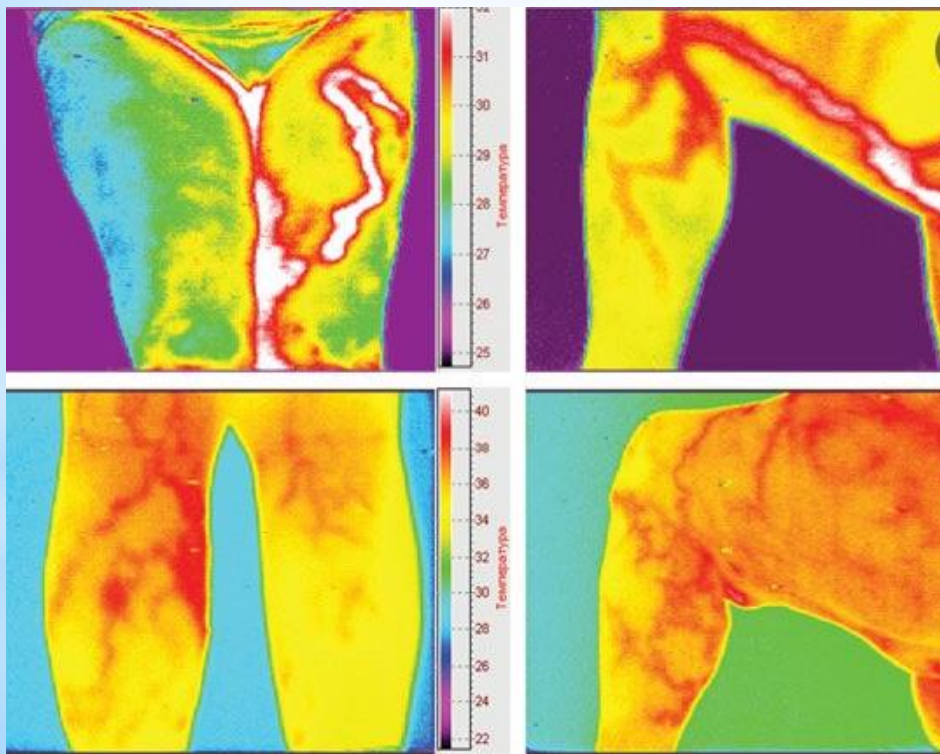
Термография (в медицине) - это метод регистрации видимого изображения тепловых полей человеческого тела, излучающих инфракрасные импульсы, которые могут быть считаны непосредственно или отображены на экране как тепловой образ. Получаемое в результате изображение, называется термограммой.

Разница температур образуется вследствие различного кровообращения в тканях. Низкая температура может означать различные нарушения кровообращения, повышенная температура тела является симптомом воспаления или какой-либо болезни.

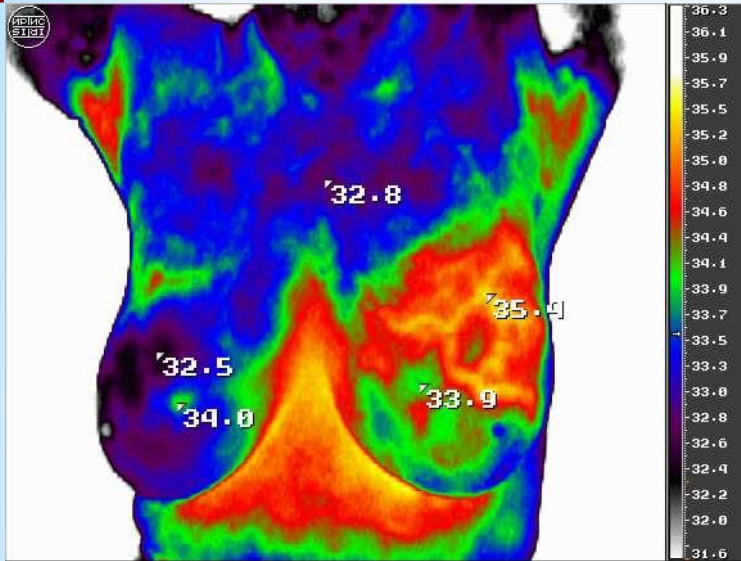
остеохондроз



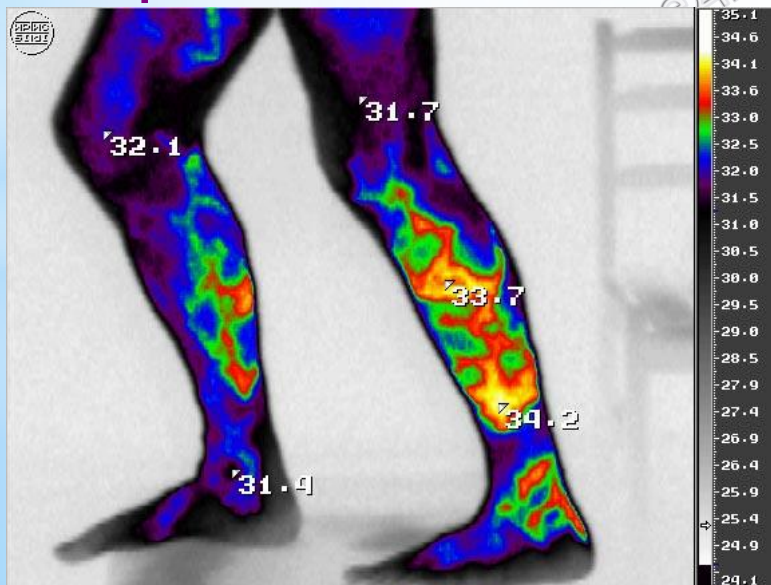
Термограммы больных при хронической венозной недостаточности



рак молочной железы



варикозная болезнь



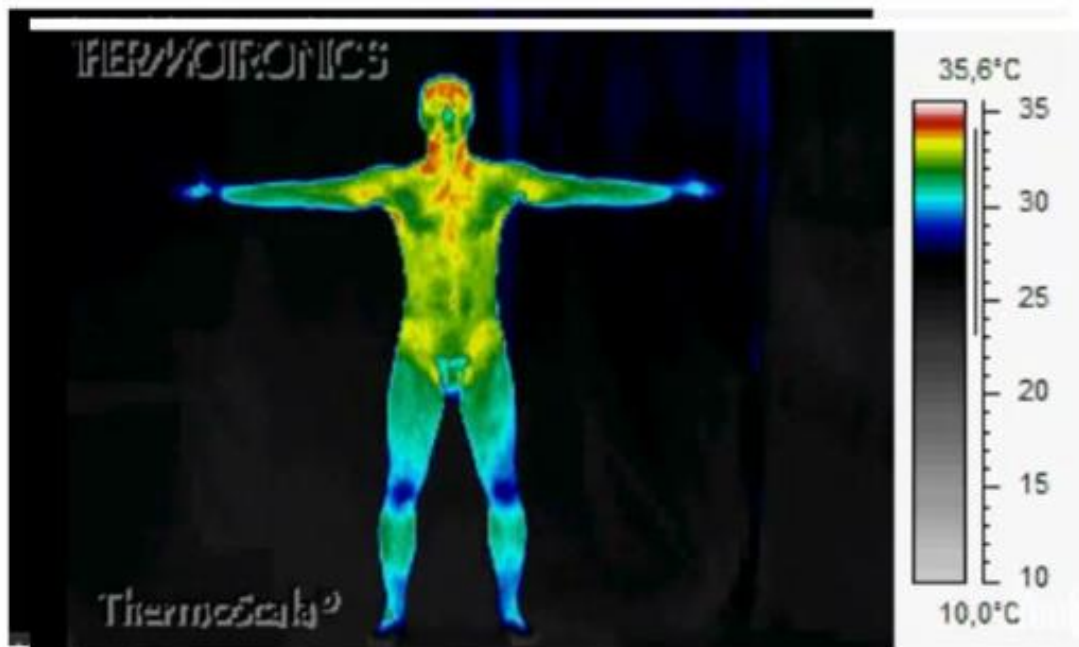
Воспаления и опухоли

❖ Применяя термографию, врач может диагностировать воспалительные процессы и опухоли

❖ Например, для ранней диагностики рака груди термография является даже более эффективной, чем маммография.

❖ Применяя термографию, можно обнаружить даже небольшие опухоли, например, раковые опухоли обычно излучают очень много тепла.

С диагностической целью температуру тела **измеряют бесконтактным** методом, регистрируя **его тепловое излучение**



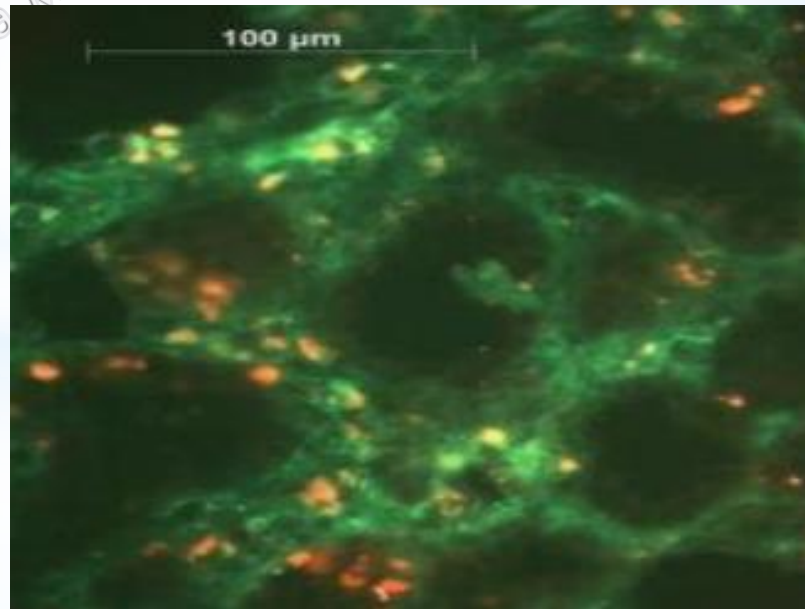
Телетермография **основана на преобразовании инфракрасного излучения тела человека в электрический сигнал**, который визуализируется на экране телевизора.

На термограмме разные цвета и оттенки соответствуют разным температурам. **«Холодные» участки тела окрашены в синий цвет**, а участки с более высокой температурой - в **зеленый, красный, желтый**, наконец, **белый, означающий самую высокую температуру.**

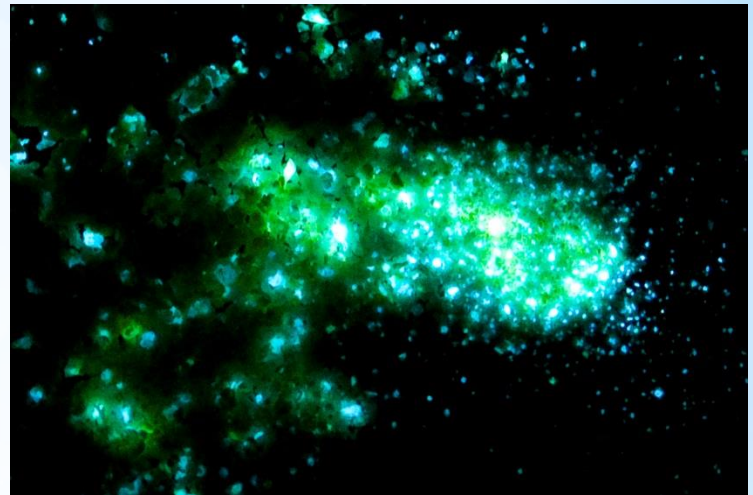
❖ Люминесценция

❖ Законы Вавилова и Стокса.

❖ Люминесцентный анализ.



❖ **Люминесценция, ее виды.**
Характеристики
люминесценции (спектр,
длительность, квантовый
выход).



❖ **Законы Вавилова и Стокса.**

❖ **Люминесцентный анализ.** Люминесцентные метки и зонды.

❖ **Медицинское применение люминесцентных методов исследования.**



* Люминесценция света

Если **атом или молекулу** каким-либо образом *перевести в возбужденное электронное состояние*, то они затем **самопроизвольно возвращаются в основное электронное состояние**.

Электромагнитное излучение, сопровождающее такие переходы, называют **люминесценцией**.

Чтобы отличать люминесценцию от теплового излучения тел и рассеянного света, СИ. Вавилов предложил следующее ее определение:

Люминесценция — это излучение, **превышающее тепловое при данной температуре** и имеющее **длительность послесвечения много больше периода световых колебаний** $\tau > 10^{-15} \text{ с}$

Интенсивность люминесценции вещества в сотни раз **превышает интенсивность его теплового излучения** в том же **спектральном диапазоне**, поэтому ее часто называют **холодным свечением**.

ВИДЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПО СПОСОБУ ВОЗБУЖДЕНИЯ:

❖ **Фотолюминесценция** – возбуждение происходит в результате поглощения электромагнитного излучения (обычно видимого или ультрафиолетового диапазонов).



До облучения

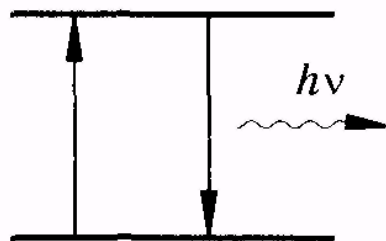


облучение



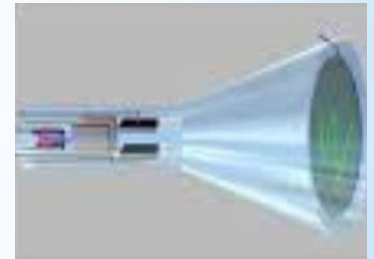
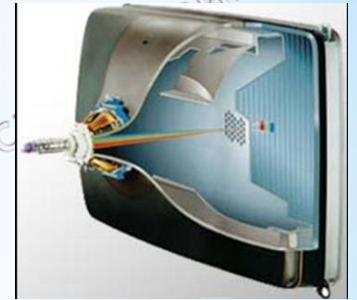
люминесценция

При **резонансной флуоресценции** происходит **возбуждение атома или молекулы фотоном с энергией $h\nu$** , после которого **атом возвращается в основное состояние, излучая фотон света той же частоты ν** .



Катодолюминесценция : люминесценция, вызванная заряженными частицами: **электронами**

Катодолюминесценция- возбуждение происходит вследствие электронного удара по атомам или молекулам вещества (**кинескопы, электроннолучевые трубки**)



Электролюминесценция : люминесцируют электронно-возбужденные молекулы (атомы).



❖ Люминесценцию под воздействием **рентгеновского и γ -излучения** называют **рентгенолюминесценцией** (рентгенолюминесцирующие экраны)



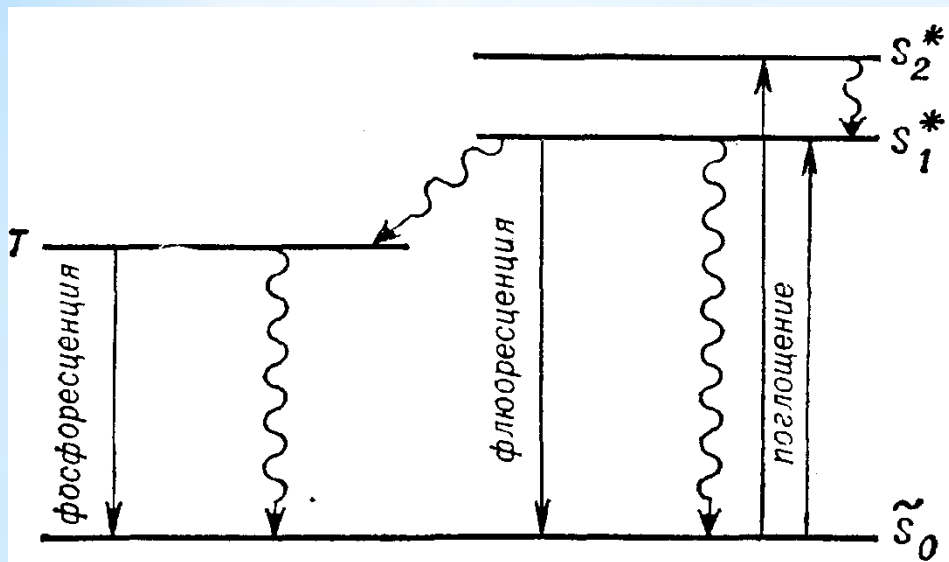
❖ Люминесценцию, сопровождающую экзотермическую химическую реакцию, называют **хемилюминесценцией**.

Хемилюминесценция — в результате химической реакции между молекулами **A** и **B** образуется их соединение **B** в **возбужденном состоянии**, при переходе из которого в основное состояние **испускается квант люминесценции**

❖ **Биолюминесценция**- возбуждение молекул происходит в результате биохимических реакций живого организма



Схема электронных энергетических уровней и переходов между ними в люминесцирующей молекуле.



Горизонтальные линии — основные энергетические подуровни;
 Волнистые — безизлучательные (тепловые) переходы,
 вертикальные — энергетические переходы с излучением кванта энергии

При поглощении кванта света молекула переходит в возбужденное состояние (переход с уровня S_0 на S_1^* или S_2^*).

За время $\sim 10^{-13}$ сек. электрон, растратив часть энергии на тепловые колебания (волнистая линия), переходит на энергетически более низкий возбужденный подуровень S_1 .

На этом уровне электрон может находиться 10^{-9} сек., после чего молекула может испустить квант люминесценции ($S_1 \rightarrow S_0 + h\nu$), носящий название флуоресценции

В некоторых случаях возможен переход с уровня S_1^* на уровень T , из которого, затратив часть энергии в виде тепла или испустив квант света, молекула также переходит в основное невозбужденное состояние S_0^* (переход $T \rightarrow S_0^*$).

Последний переход, связанный с испусканием кванта света, носит название фосфоресценции.

➤ Флуоресценция возникает в результате разрешенных оптических переходов с возбужденных электронных состояний в основное, вероятность этих переходов очень велика, поэтому время высвечивания мало.

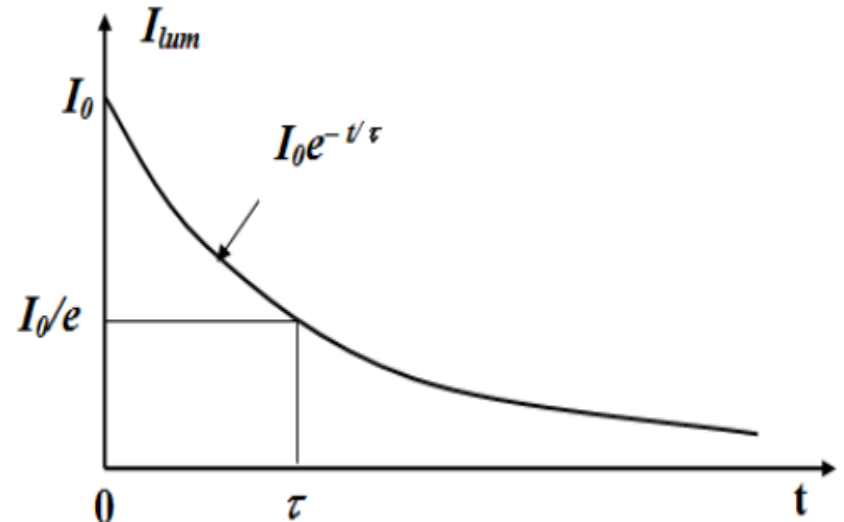
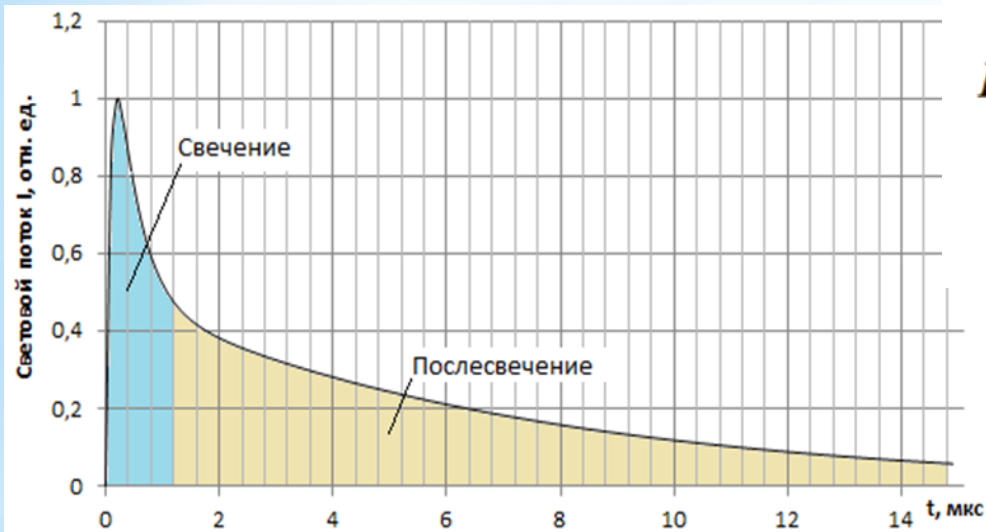
➤ Флуоресценция характеризуется $\tau < 10^{-7}$ с, т.е. затухание люминесценции происходит очень быстро (почти мгновенно для глаз)

➤ Фосфоресценция характеризуется , $\tau > 10^{-4}$ с

затухание люминесценции происходит сравнительно медленно (хорошо наблюдается невооруженным глазом)

➤ Фосфоресценция происходит в результате оптических переходов, запрещенных правилами отбора квантовой механики, вероятность их очень мала (в 10^6 - 10^4 раз меньше, чем вероятность разрешенных переходов, т.е. флуоресценции), и соответственно время высвечивания (время жизни в возбужденном состоянии) весьма велико.

* Затухание люминесценции



$$I_l = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

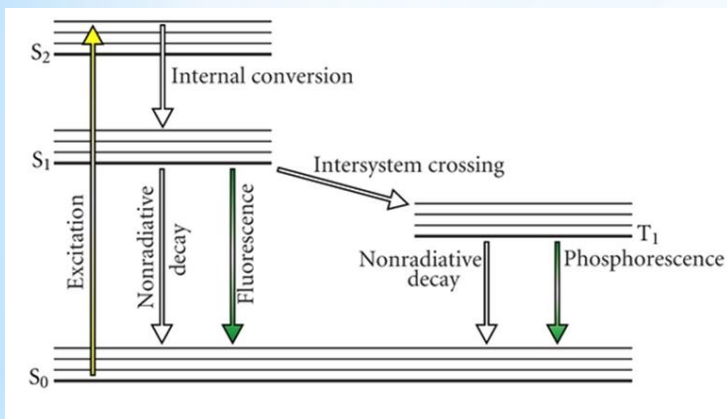
- I_0 – интенсивность стационарной люминесценции;
- t время, прошедшее после прекращения возбуждения;
- τ длительность люминесценции – время, за которое интенсивность люминесценции уменьшается в $e = 2.7$ раз

* Основные характеристики и законы люминесценции

- * **Спектр люминесценции** — зависимость интенсивности люминесценции от длины волны или от частоты $I(\lambda)$
- * **Длительность люминесценции** τ — это время, за которое интенсивность люминесценции уменьшается в $e = 2,7$ раз
- * **Квантовый выход люминесценции** — это отношение числа квантов люминесценции к количеству квантов, поглощенных при возбуждении молекулы: $\gamma = n_{\text{люм}} / n_{\text{погл}}$ Квантовый выход всегда $\gamma < 1$ из-за наличия неоптических переходов, вещество считается хорошо люминесцирующим, если $\gamma > 0,01 = 1\%$.
- * **Спектр возбуждения** — это зависимость интенсивности фотолюминесценции от длины волны возбуждающего излучения (для многих молекул он совпадает с их спектром поглощения).
- * **Степень поляризации люминесценции** определяется при возбуждении вещества линейно поляризованным светом и позволяет оценить скорость вращения люминесцирующей молекулы и микровязкость ее окружения.

ПРАВИЛО СТОКСА

Спектр люминесценции вещества всегда смещен в область **более длинных волн** относительно его спектра поглощения



В возбужденных колебательно-вращательных состояниях молекула долго находится не может и за время совершает безызлучательные переходы на, самые нижние колебательно-вращательные подуровни этого же электронного состояния, — ЭТО ЯВЛЕНИЕ называется внутренней конверсией.

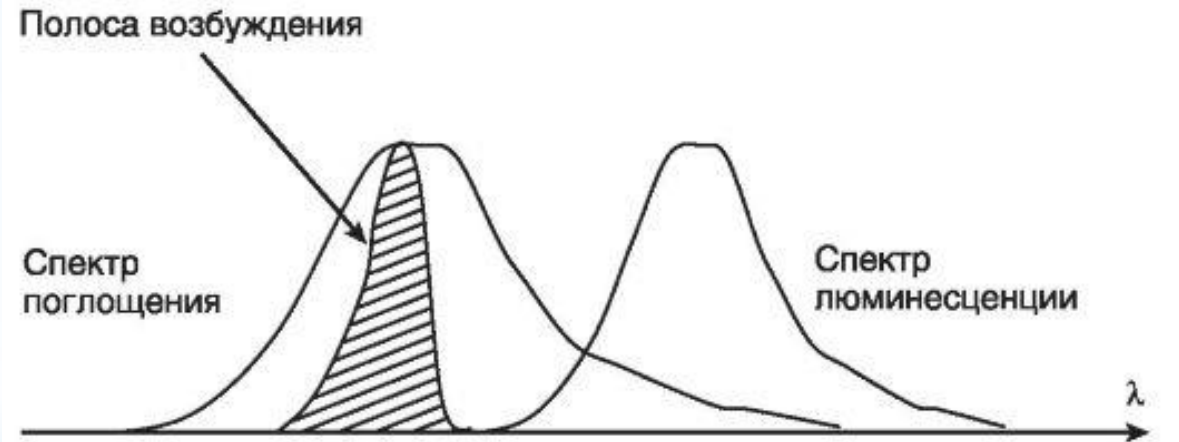
- **Причина сдвига спектров** заключается в том, что электронный переход при поглощении происходит с нижнего колебательного уровня основного состояния на любые колебательные уровни возбужденных электронных уровней.
- Вследствие внутренней конверсии испускание электромагнитных квантов происходит при переходе молекулы с самых нижних подуровней возбужденных состояний на любые подуровни нижележащих электронных состояний.
- В результате образуются **полосы испускания (люминесценции)** — первая, вторая и т.д., которые не совпадают по частоте с полосами поглощения, а **смещены относительно них в сторону меньших частот (больших длин волн)**

* Закон Вавилова

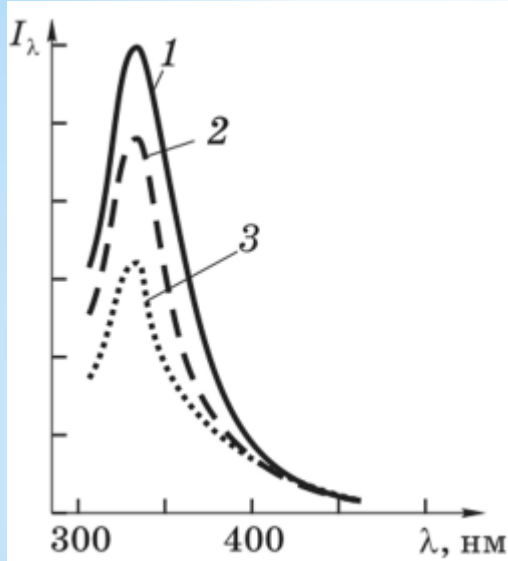


С.И. Вавилов
1891-1951

Закон Вавилова: квантовый выход и спектр люминесценции сложных молекул не зависят от длины волны возбуждения.



Основное требование к спектральному диапазону волн, используемых для возбуждения люминесценции, — *спектр возбуждения должен попадать внутрь полосы поглощения вещества.*



Спектры
ультрафиолетовой
флуоресценции
мышечных волокон (1),
нейронов (2),
эритроцитов (3)

Из **аминокислот** способны **люминесцировать** только **триптофан, тирозин и фенилаланин**, максимумы флуоресценции квантовые выходы которых в водных растворах

триптофан $\lambda_{\max} = 348 \text{ nm}, \gamma = 0,2$

Тирозин $\lambda_{\max} = 303 \text{ nm}, \gamma = 0,21$

фенилаланин $\lambda_{\max} = 282 \text{ nm}, \gamma = 0,04$

Собственная люминесценция белков лежит в **УФ-области спектра и полностью определяется люминесценцией этих трех аминокислот**. При этом основной вклад в люминесценцию белков принадлежит **триптофану**, а в его отсутствие – тирозину, и только в отсутствие их обоих проявляется слабая люминесценция фенилаланина.

В **видимой области спектра люминесцируют** различные **продукты окисления белков и липидов** (синяя область с максимумом около 405 нм).

Люминесцентный анализ в 1000 раз чувствительнее абсорбционного спектрального анализа и позволяет обнаруживать люминесцирующее соединение при концентрации 10^{-12} г/л.

•Люминесцентный анализ - метод определения состава вещества по характерному его свечению



➤ Позволяет обнаруживать наличие ничтожных примесей и применяется в биологии, медицине, пищевой промышленности.

➤ С очень высокой чувствительностью определяют канцерогенные углеводы – бензапирен, дибензантрацен и др. – в воздухе городов, в табачном дыме и др.

➤ **Люминесцентная дефектоскопия** позволяет обнаружить мельчайшие трещины на поверхности деталей.

➤ **Контроль качества пищевых продуктов.**

при длительном хранении молока и сливок рибофлавин окисляется в люмихром, что сопровождается изменением цвета флюоресценции от желто-зеленого к синему.

➤ для обнаружения грибковой инфекции у человека и дерматомикозов у животных по характерной желто-зеленой флюоресценции пораженных волос, возбуждаемой УФ-облучением при длине волны 365нм.

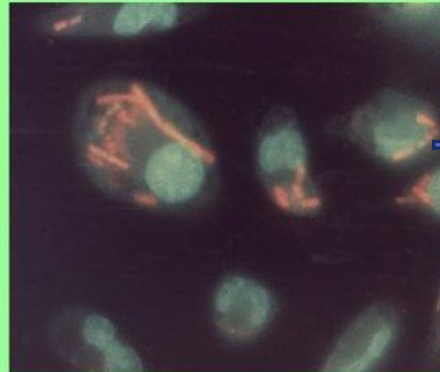
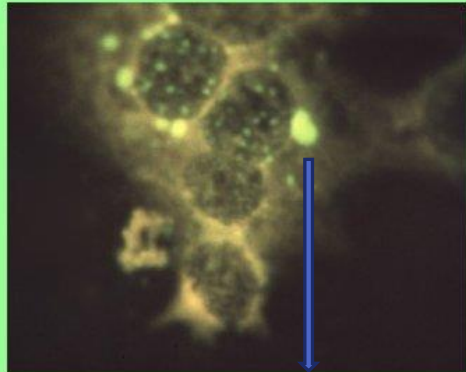


ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В МЕДИЦИНЕ

1. Благодаря тому, что невидимые факторы среды могут вызывать люминесценцию, её применяют для их **визуализации** в различных медицинских приборах.
2. Создание **осветительной аппаратуры** (лампы дневного света).
3. **Люминесцентный анализ:**

-**Макроанализ** – вводят в организм люминофоры (красители) с известными различием распределения в разных тканях (например, в опухолевой и здоровой). Освещают область тела лазерным пучком света и неинвазивно определяют степень развития патологического процесса или результат лечения.

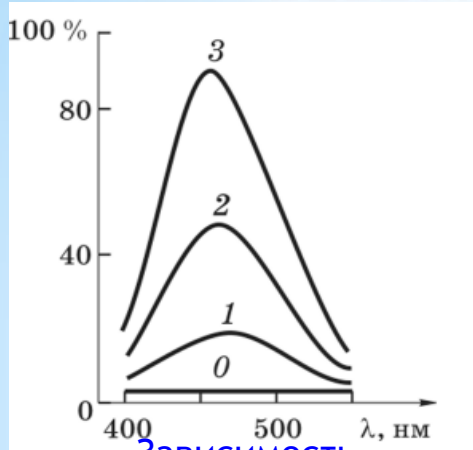
-**Микроанализ** – с помощью микроскопа наблюдают свечение введённых красителей в микрообъектах или с помощью люминесцентного микроскопа обнаруживают вещества или организмы, способные к люминесценции.



Люминесцентная микрофотография макрофага, внутри которого видны **фагоцитированные бактерии**, излучающие красное свечение (обработка акридиновым Оранжевым)

Люминесцентная микрофотография культуры **клеток амниона человека, зараженных вирусом кори**: зоны локализации вирусного антигена обладают зеленоватым свечением (метод флюоресцирующих антител)

* Вторичная люминесценция, люминесцентные зонды

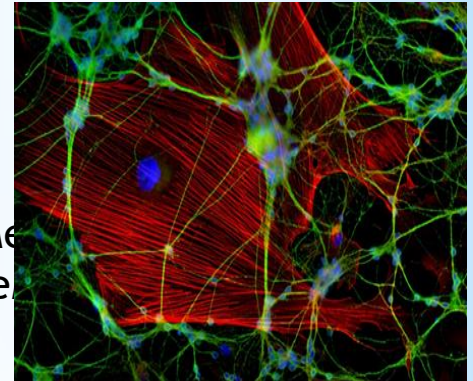


Зависимость относительной интенсивности люминесценции АНС от концентрации сывороточного альбумина человека САЧ в растворе

существует ряд **люминесцирующих веществ (зондов)**, которые *избирательно взаимодействуют с определенными компонентами клетки и отдельными молекулами,*

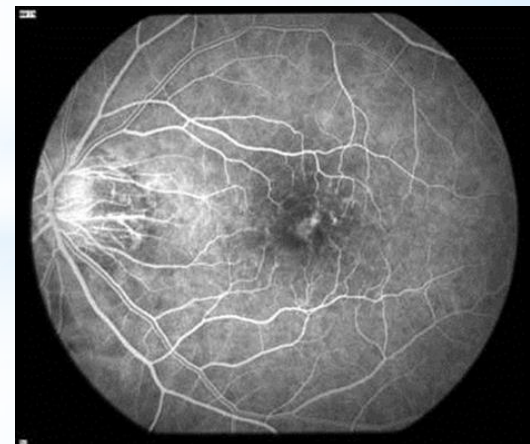
образующийся комплекс: флуоресцентный зонд + вещество и имеет **более интенсивную флуоресценцию**, чем люминесцентный зонд в несвязанном состоянии.

Свечение этого комплекса под действием света называют *вторичной или зондовой флуорисценцией*



В чистой воде (кривая 0) флуоресценция зонда очень слаба (квантовый выход 0,006), но по мере связывания с белком квантовый выход возрастает до 0,3-0,8, т.е. в 50-100 раз (кривые 1-3).

Как правило, в **качестве флуоресцентных зондов** используют молекулы, которые в воде почти не флуоресцируют, а **при связывании с биол. мембранами или белками интенсивность их люминесценции возрастает в десятки раз.**



Спасибо за внимание!

УО «ГомГМУ» кафедра Медицинской и биологической физики