

**Тепловое излучение**

**Люминесценция**

Испускаемый источником свет уносит с собой энергию. В тех случаях, когда необходимая энергия сообщается нагреванием, т. е. подводом тепла, излучение называется **тепловым** или **температурным**.

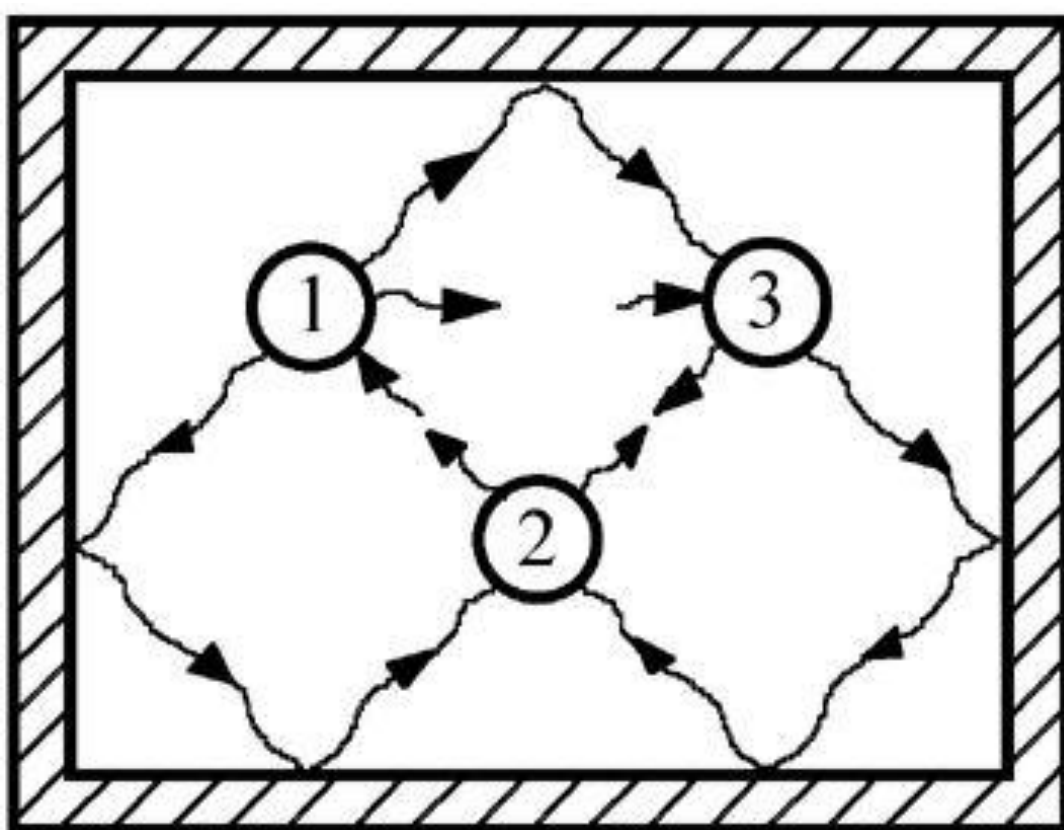
**Тепловое излучение** — это электромагнитное излучение, возбуждаемое за счет внутренней энергии тела. Если излучающее тело не получает теплоты извне, то оно охлаждается и его внутренняя энергия уменьшается.

Тепловое излучение свойственно всем телам при температурах выше абсолютного нуля.



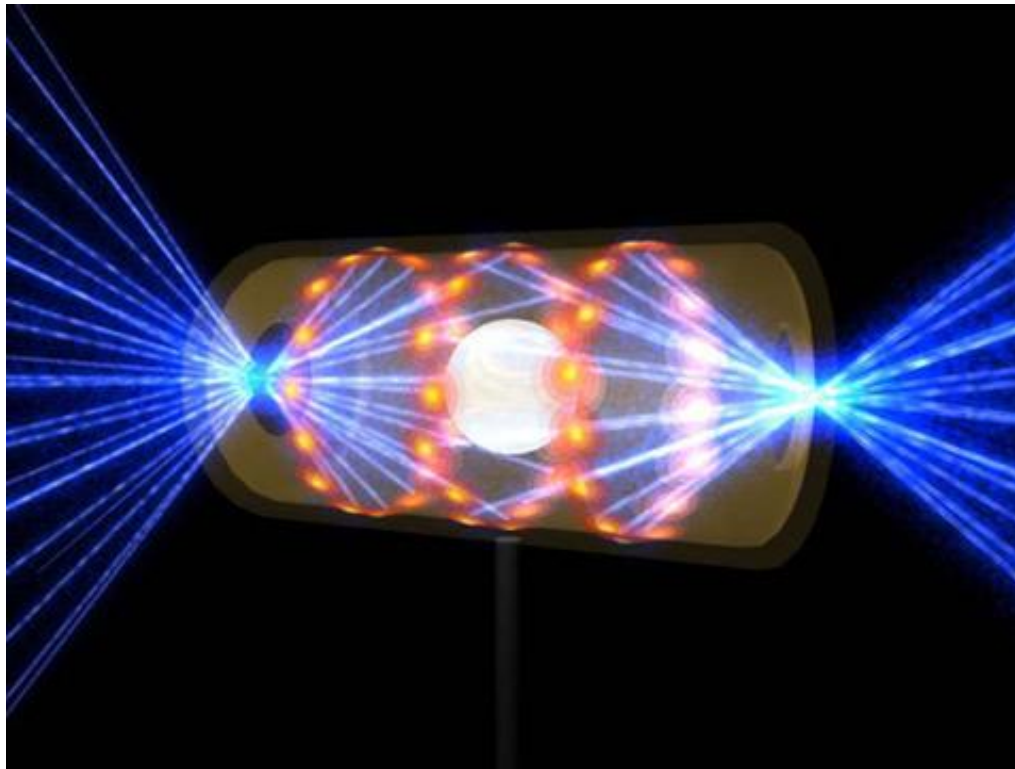
Все виды свечения, возбуждаемые за счет любого вида энергии, кроме внутренней (тепловой), объединяются под общим названием **люминесценция**.

Если в замкнутую полость с зеркально отражающими стенками поместить несколько тел, нагретых до различной температуры, то, как показывает опыт, такая система с течением времени приходит в состояние теплового равновесия, при котором все тела приобретают одинаковую температуру. Тела обмениваются энергией только путем испускания и поглощения лучистой энергии. В состоянии равновесия процессы испускания и поглощения энергии каждым телом в среднем компенсируют друг друга, и в пространстве между телами плотность энергии излучения достигает определенного значения, зависящего только от установившейся температуры тел.



Это излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с телами, имеющими определенную температуру, называется **равновесным излучением.**

**Всякое другое излучение, возбуждаемое не нагреванием, а каким-либо иным способом, не приводит к установлению статистического равновесия. Например, если внутрь упомянутой выше полости поместить тело, светящееся благодаря предварительному облучению ультрафиолетовыми лучами, то свечение этого тела постепенно ослабнет и прекратится.**



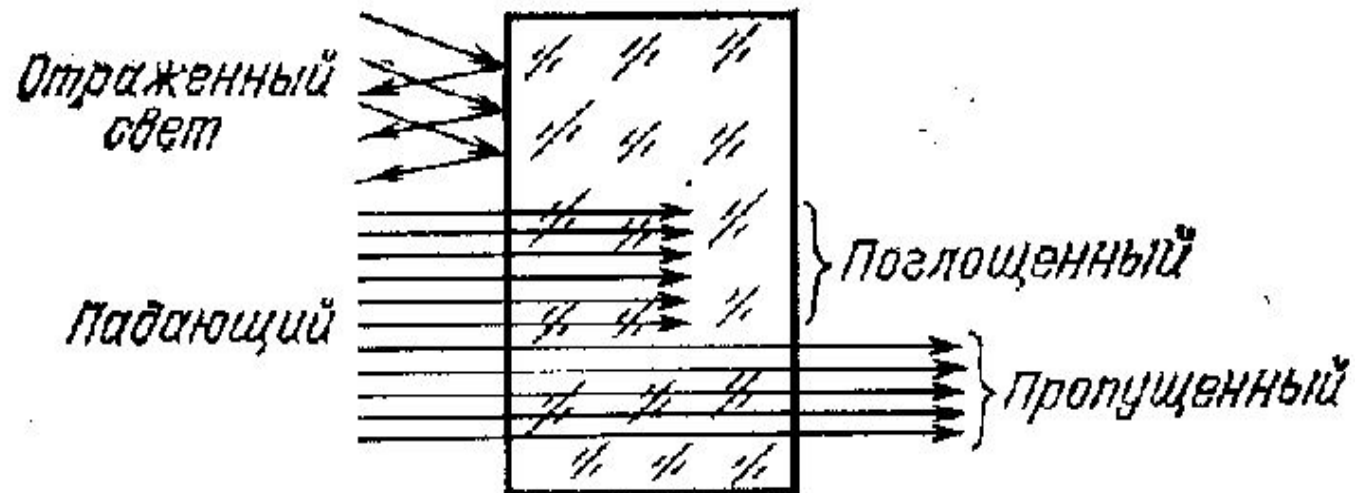
**нетепловое излучение всегда неравновесно !**

При падении на поверхность какого-либо тела лучистого потока наблюдаются следующие явления:

1) часть потока **отражается** обратно в окружающее пространство. При этом происходит или зеркальное отражение, или поверхностное рассеяние потока в зависимости от структуры поверхности тела

Величина  $\rho$ , равная отношению лучистого потока  $P_\rho$ , отраженного телом, к лучистому потоку  $P$ , падающему на поверхность тела, называется **коэффициентом отражения**

$$\rho = \frac{P_\rho}{P}$$

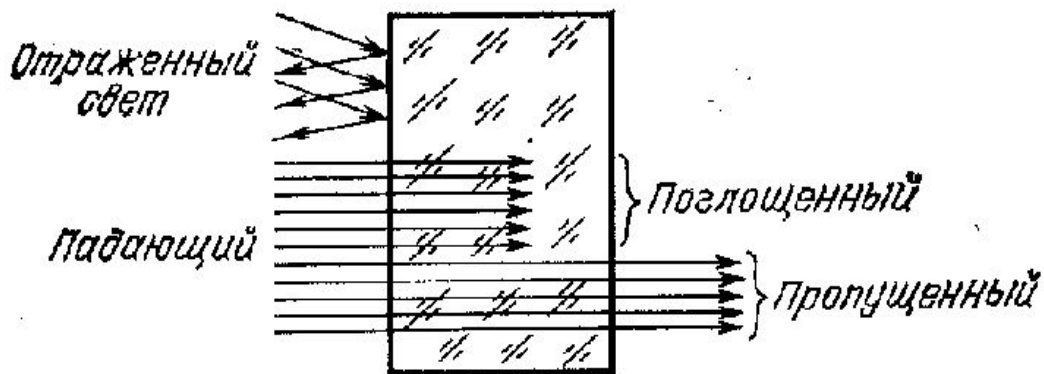


При падении на поверхность какого-либо тела лучистого потока наблюдаются следующие явления:

2) часть потока пройдет через тело

Величина  $\tau$ , равная отношению лучистого потока  $P_\tau$ , прошедшего через данное тело (среду), к лучистому потоку  $P$ , падающему на данное тело (среду), называется *коэффициентом пропускания*:

$$\tau = \frac{P_\tau}{P}$$



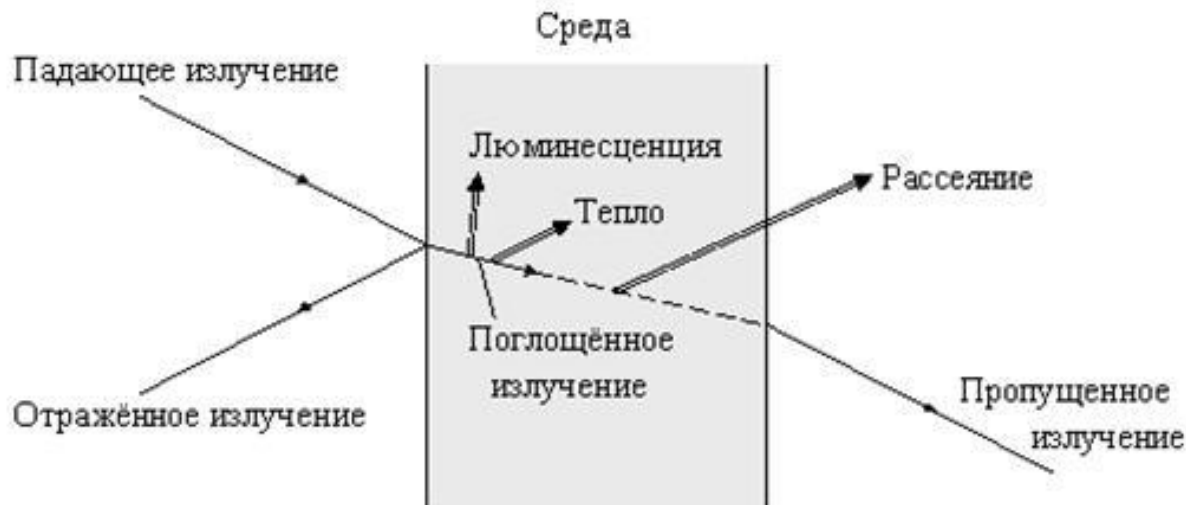
Коэффициент пропускания характеризует прозрачность тела (среды) по отношению к падающему излучению.

При падении на поверхность какого-либо тела лучистого потока наблюдаются следующие явления:

3) оставшаяся часть потока будет поглощена телом, и его энергия превратится в другие виды энергии.

Величина  $\alpha$ , равная отношению лучистого потока  $P_\alpha$ , поглощенного телом, к лучистому потоку, падающему на тело, называется **коэффициентом поглощения** тела:

$$\alpha = \frac{P_\alpha}{P}$$



Из закона сохранения энергии следует, что

$$P_{\rho} + P_{\tau} + P_{\alpha} = P \quad \text{тогда}$$

$$\rho + \tau + \alpha = 1$$

Измерения показывают, что коэффициенты поглощения, пропускания и отражения тела зависят от длины волны  $\lambda$  падающего излучения и от *температуры тела*

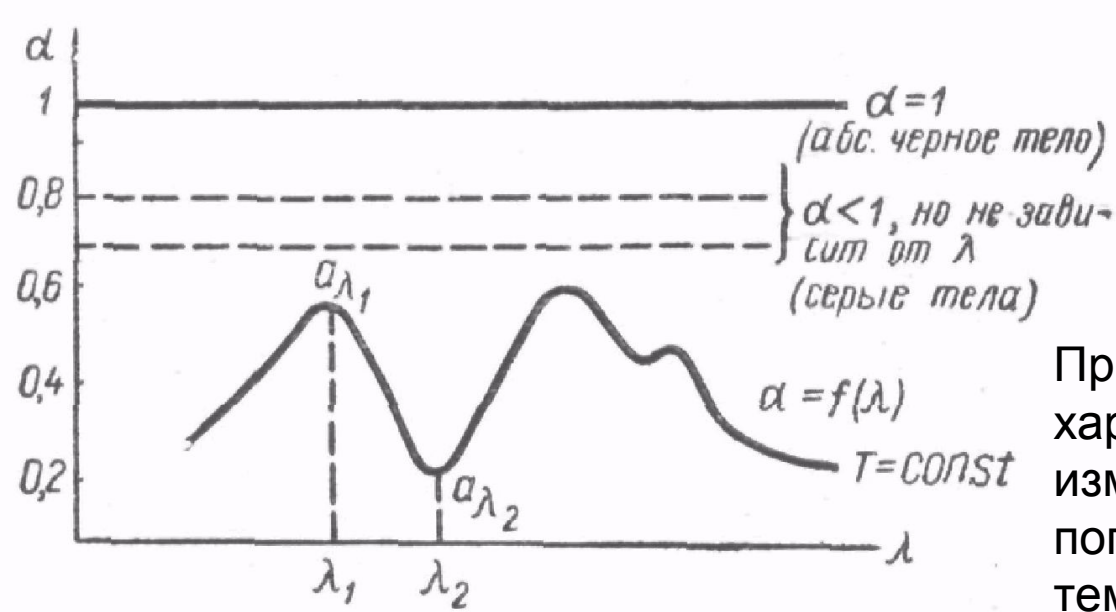
$$\rho = F(\lambda, T); \quad \tau = \varphi(\lambda, T); \quad \alpha = f(\lambda, T);$$

Для монохроматического излучения они называются:

спектральным коэффициентом *поглощения*,  $\alpha_{\lambda}$   
спектральным коэффициентом *пропускания*  $\tau_{\lambda}$   
спектральным коэффициентом *отражения*  $\rho_{\lambda}$

(для данной температуры тела)





зависимость  $\alpha(\lambda)$  при данной температуре  $T$

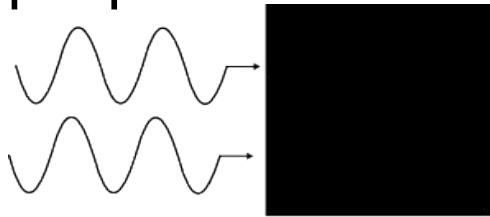
При изменении температуры характер кривой  $\alpha = f(\lambda, T)$  может измениться; лучи, сильно поглощающиеся при одной температуре, могут пропускаться при другой температуре, и наоборот.

Зависимость коэффициентов  $\rho$ ,  $\tau$  и  $\alpha$  от длины волны является во многих случаях физической причиной окрашенности тел, не излучающих собственного света.

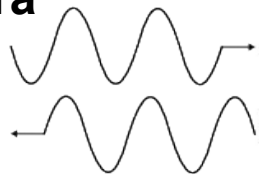
Если тело при освещении его белым светом имеет красный цвет, то его коэффициент поглощения  $\tau$  для коротковолновой (зелено-фиолетовой) части видимого спектра близок к единице, а для длинноволновой — близок к нулю; соответственно коэффициент отражения этого тела для «красных» лучей близок к единице, а для «зелено-фиолетовых» — близок к нулю.

# Белый свет падает на

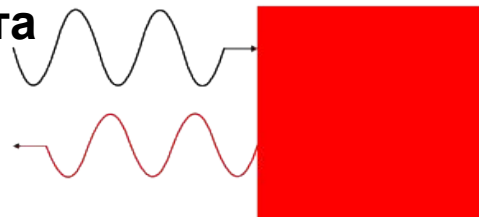
Непрозрачный объект



Полное поглощение  
света



Полное отражение  
света



Частичное поглощение  
и  
отражение света

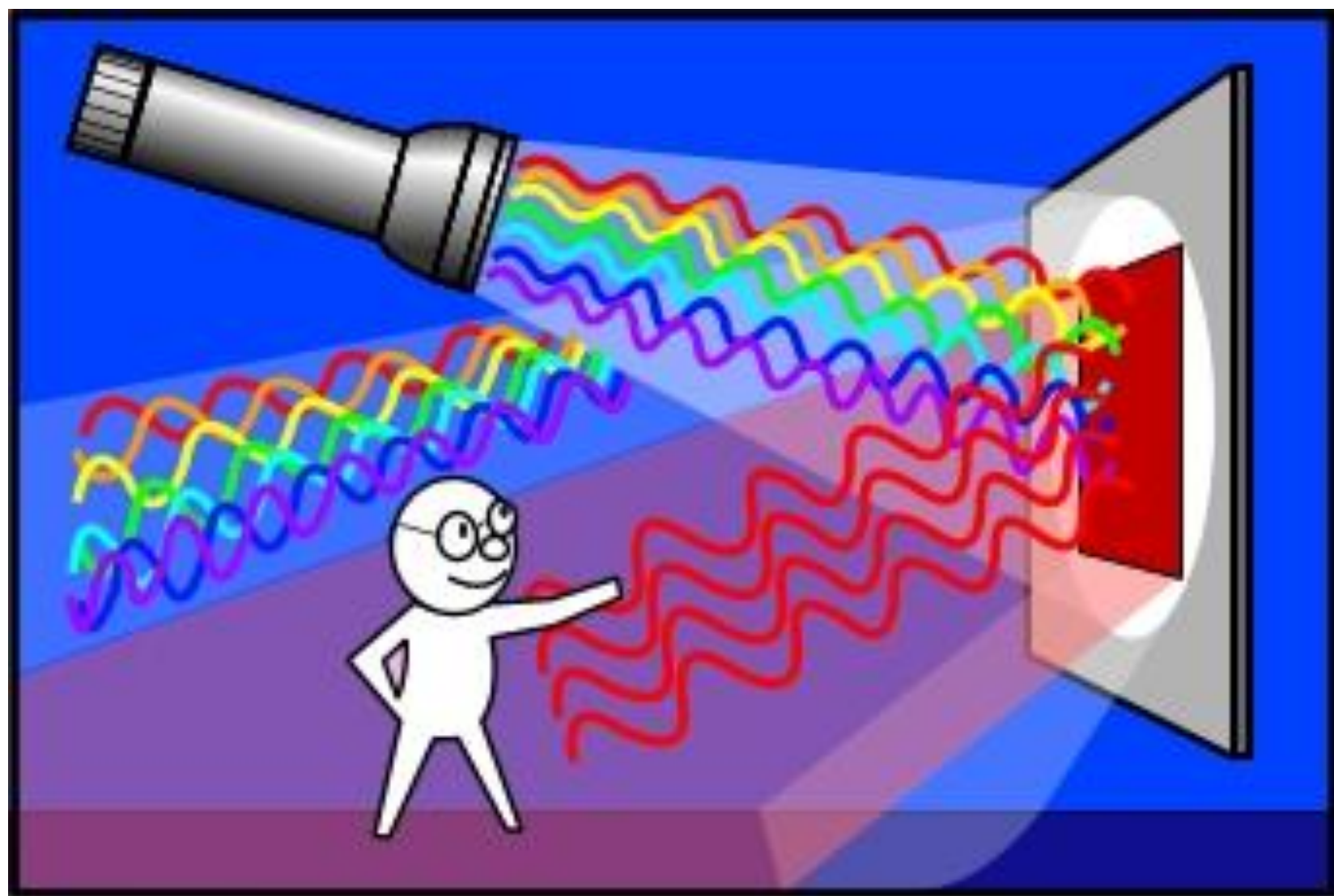
Прозрачный объект

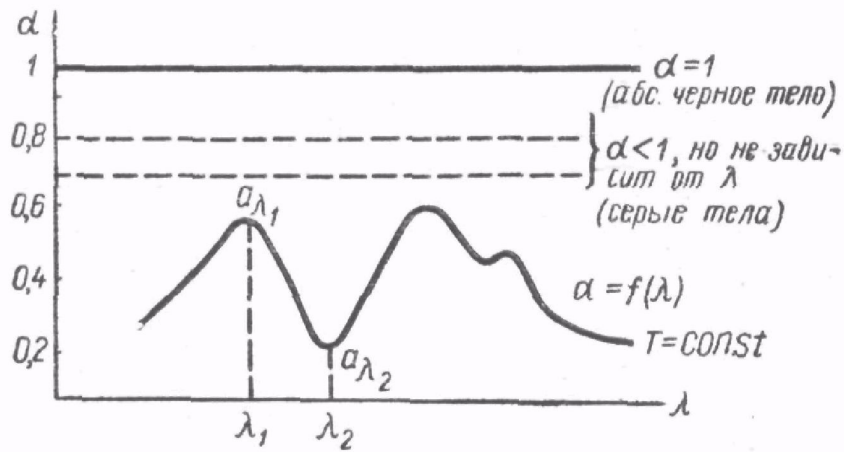


Полное пропускание  
света



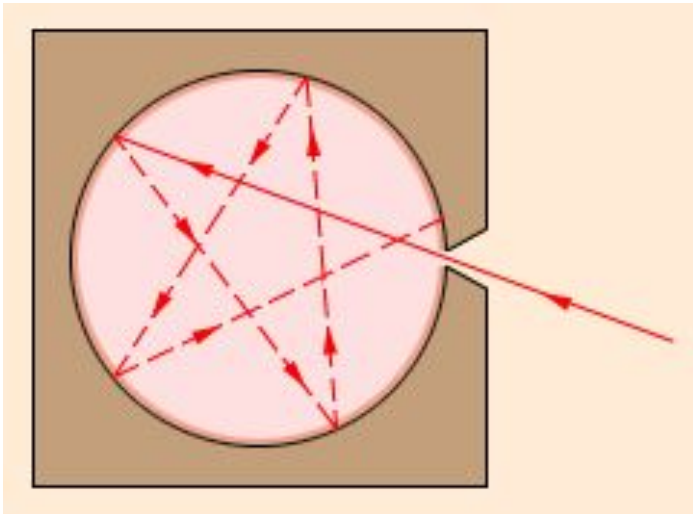
Частичное поглощение  
и  
пропускание света





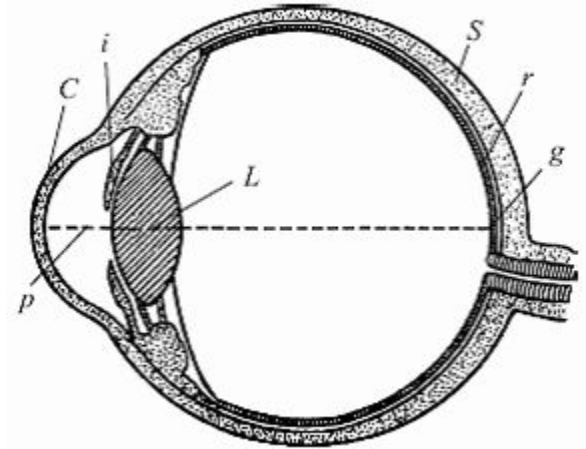
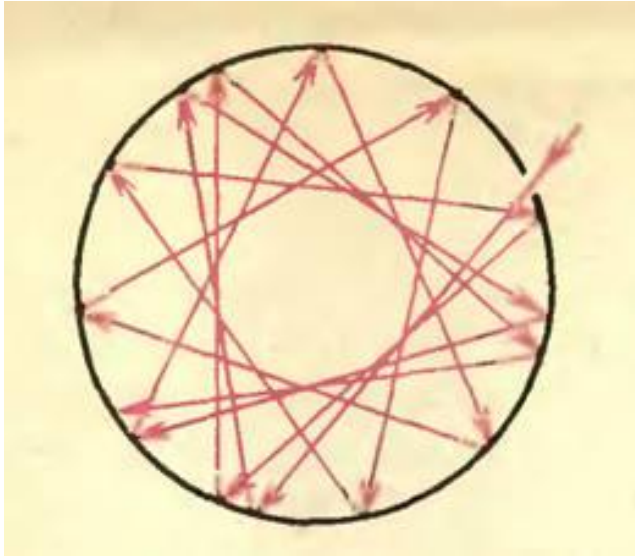
Тело, которое поглощает полностью все падающие на него излучения любой длины волны при любой температуре, называют **абсолютно черным** (точнее абсолютно поглощающим) **телом**. Его коэффициент поглощения для всех длин волн при любых температурах равен единице.

Тела, для которых коэффициент поглощения меньше единицы, но не зависит от длины волны называются «**серыми**». Для них  $\alpha$  выражается прямой, ордината которой меньше единицы.

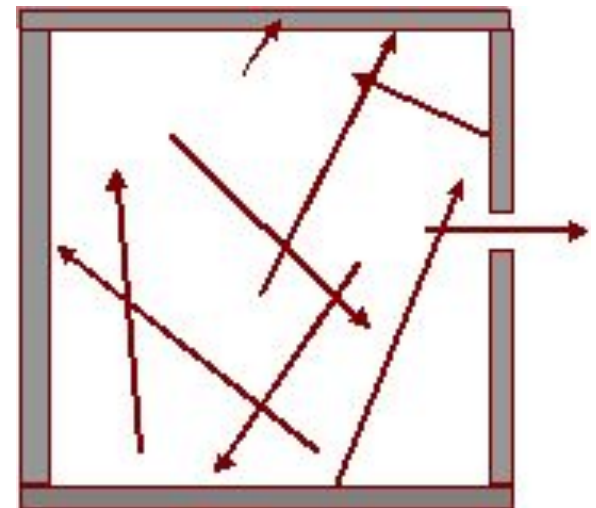


Абсолютно черных тел в природе нет. Моделью абсолютно черного тела является полость с очень малым отверстием.

Свет, падающий через отверстие внутрь полости, после многочисленных отражений будет практически полностью поглощен стенками, и отверстие снаружи будет казаться совершенно черным.



Но если полость нагрета до определенной температуры  $T$ , и внутри установилось тепловое равновесие, то собственное излучение полости, выходящее через отверстие, будет излучением абсолютно черного тела.

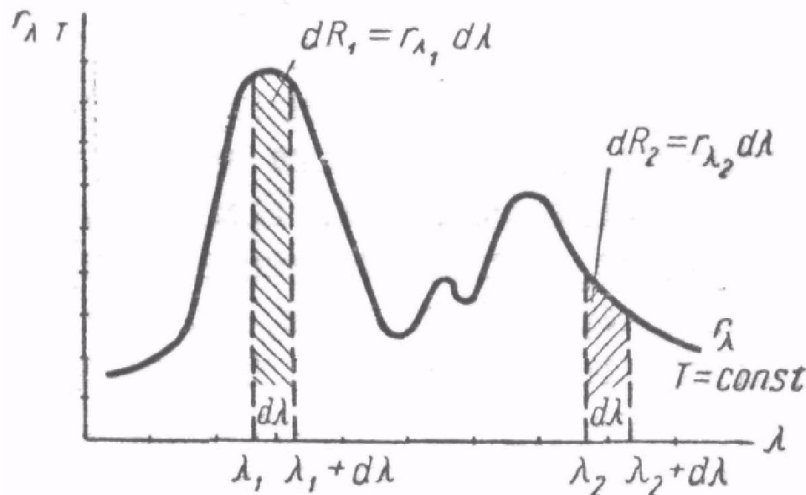


Нагретые тела излучают энергию в виде электромагнитных волн различных длин (инфракрасные, видимые, ультрафиолетовые лучи и др.).

Количество  $R$  энергии, излучаемой с  $1\text{ м}^2$  поверхности тела в пределах телесного угла  $2\pi$  за одну секунду по всем длинам волн, называется **энергетической светимостью тела** (интегральной плотностью излучения).

Энергия излучения распределяется неравномерно между всеми длинами волн, которые испускаются нагретым телом.

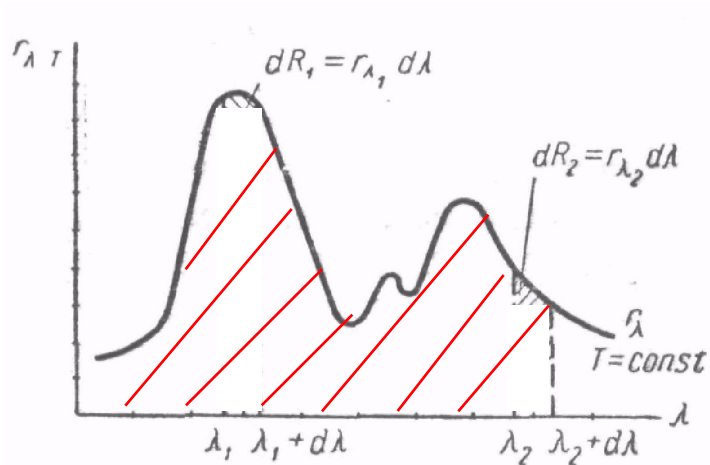
Откладывая по оси ординат величину  $r_{\lambda T} = \Delta R / \Delta \lambda$ , мы получим представление о распределении энергии по длинам волн нагретого тела.



Величина  $r_{\lambda T}$  называется **испускательной способностью** (спектральной плотностью излучения) тела и является функцией распределения энергии по спектру.

Интегральная плотность излучения тела связана со спектральной плотностью излучения соотношением:

$$R(T) = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda$$



на графике изображается площадью, заключенной между кривой  $r_{\lambda T}$  и осью абсцисс

Установлено, что испускательные и поглощательные способности тел пропорциональны



Получение света от пламени горящей свечи основано на той же пропорциональности между испускательной и поглощательной способностями тел. В пламени имеются частицы сажи, обладающие большим поглощением; они и дают яркий свет. Если пламя не содержит частиц сажи (например, пламя газовой горелки), оно не будет светиться.





Результаты экспериментальных исследований и термодинамические рассуждения привели к следующему утверждению (**закон Кирхгофа**):

**для всех тел, независимо от их природы, отношение спектральной плотности излучения к спектральному коэффициенту поглощения при той же температуре и для тех же длин волн есть универсальная функция от длины волны и температуры.**

Закон Кирхгофа можно выразить равенством

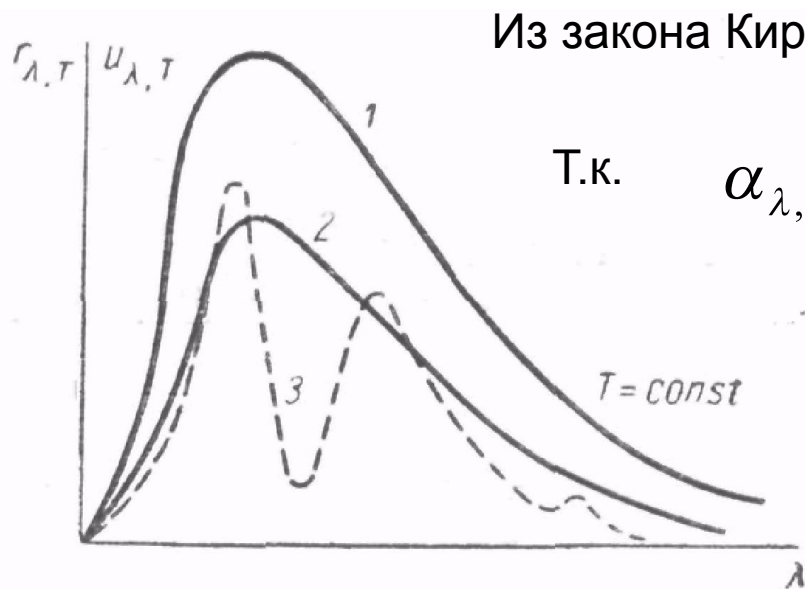
$$\left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}\right)_2 = \dots = \left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}}\right)_n = f(\lambda, T)$$

где индексы 1, 2, ... относятся к первому, второму и т. д. телам. Если одно из этих тел – абсолютно черное, и его спектральная плотность излучения равна  $u_{\lambda T}$ , то учитывая, что коэффициент поглощения абсолютно черного тела равен единице, закон Кирхгофа можно записать так:

$$\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} = \frac{u_{\lambda T}}{1} = f(\lambda, T)$$

Тогда, универсальная функция Кирхгофа  $f(\lambda, T)$  есть спектральная плотность излучения абсолютно черного тела, т.е.  $f(\lambda, T) = u_{\lambda, T}$ , поэтому:

*отношение спектральной плотности излучения любого тела к его спектральному коэффициенту поглощения равно спектральной плотности излучения абсолютно черного тела для той же длины волны и при той же температуре*



Из закона Кирхгофа:

Т.к.  $\alpha_{\lambda, T} < 1$  то

$$r_{\lambda, T} = \alpha_{\lambda, T} \cdot u_{\lambda, T}$$

$$r_{\lambda, T} < u_{\lambda, T}$$

кривые распределения энергии в спектре **абсолютно черного тела (1)**, **«серого» тела (2)** и **произвольного тела (3)**

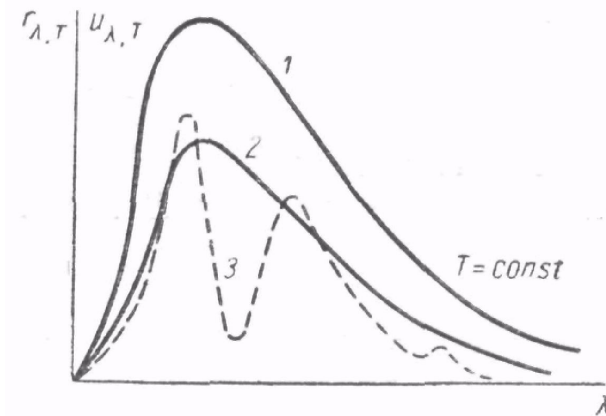
Следовательно, тепловое излучение любого тела в любой области спектра всегда меньше, чем тепловое излучение абсолютно черного тела в этой же области спектра и при той же температуре.

Кроме дифференциальной формы закона Кирхгофа, существует его интегральная форма:

*отношение интегральной плотности излучения тел к их коэффициенту поглощения есть универсальная (общая для всех тел) функция температуры*

где  $R$  и  $\alpha$  относятся ко всему спектру излучения при данной температуре

$$\frac{R}{\alpha} = f(T)$$



Для абсолютно черного тела  $\alpha = 1$  при всех температурах, поэтому  $f(T)$  есть его интегральная плотность излучения при температуре  $T$ . Так как для всех тел  $\alpha < 1$ , то их интегральное излучение всегда меньше, чем у абсолютно черного тела (на рис. площадь, ограниченная кривой излучения абсолютно черного тела, больше площади, ограниченной кривой излучения серого и любого другого тела).

# Законы излучения абсолютно черного тела

Энергетическая светимость абсолютно черного тела является универсальной функцией длины волны и температуры. Это значит, что спектральный состав и энергия излучения абсолютно черного тела не зависят от природы тела.

зная спектральную и интегральную плотность излучения абсолютно черного тела, можно вычислить их для любого нечерного тела, если известен коэффициент поглощения последнего, который определяют экспериментально.

## 1. Закон Стефана — Больцмана:

В 1879 году Йозеф Стефан на основе анализа экспериментальных данных пришел к заключению, что **интегральная светимость  $R(T)$  абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры  $T$ :**

$$R = \sigma T^4$$

Несколько позднее, в 1884 году, Л. Больцман теоретически получил эту зависимость из термодинамических соображений.

Числовое значение постоянной  $\sigma$ , по современным измерениям, составляет

$$\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К}^4\text{)}.$$

Энергия, испускаемая за время  $t$  абсолютно черным телом с излучающей поверхностью  $S$  при постоянной температуре  $T$ , равна  $W = \sigma T^4 \cdot S \cdot t$ .

Если же температура тела изменяется со временем

$$W = \int_0^t \sigma T^4(t) S dt$$

Если абсолютно черное тело окружено средой с температурой  $T_0$ , то оно будет поглощать энергию, излучаемую самой средой. В этом случае разность между мощностью испускаемого и поглощаемого излучений можно приближенно выразить формулой:  $U = \sigma(T^4 - T_0^4)$ .

К реальным телам закон Стефана — Больцмана не применим, так как наблюдения показывают более сложную зависимость  $R$  от температуры, а также — от формы тела и состояния его поверхности

## 2. Закон смещения Вина.

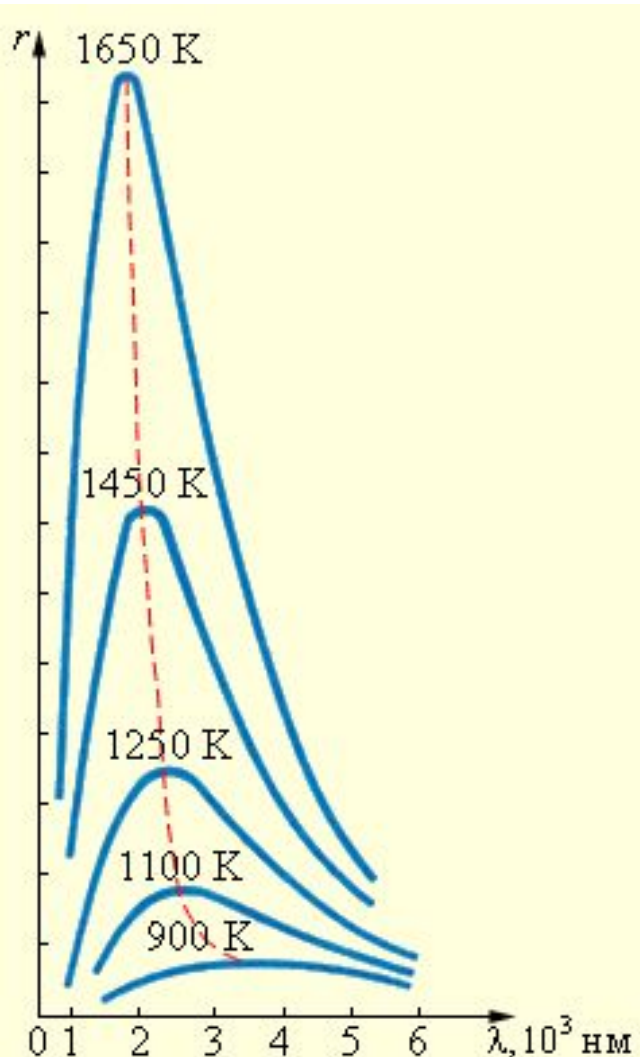
К концу 90-х годов XIX века были выполнены тщательные экспериментальные измерения спектрального распределения излучения абсолютно черного тела, которые показали, что при каждом значении температуры  $T$  зависимость  $r(\lambda, T)$  имеет ярко выраженный максимум

С увеличением температуры максимум смещается в область коротких длин волн, причем произведение температуры  $T$  на длину волны  $\lambda_m$ , соответствующую максимуму, остается постоянным:

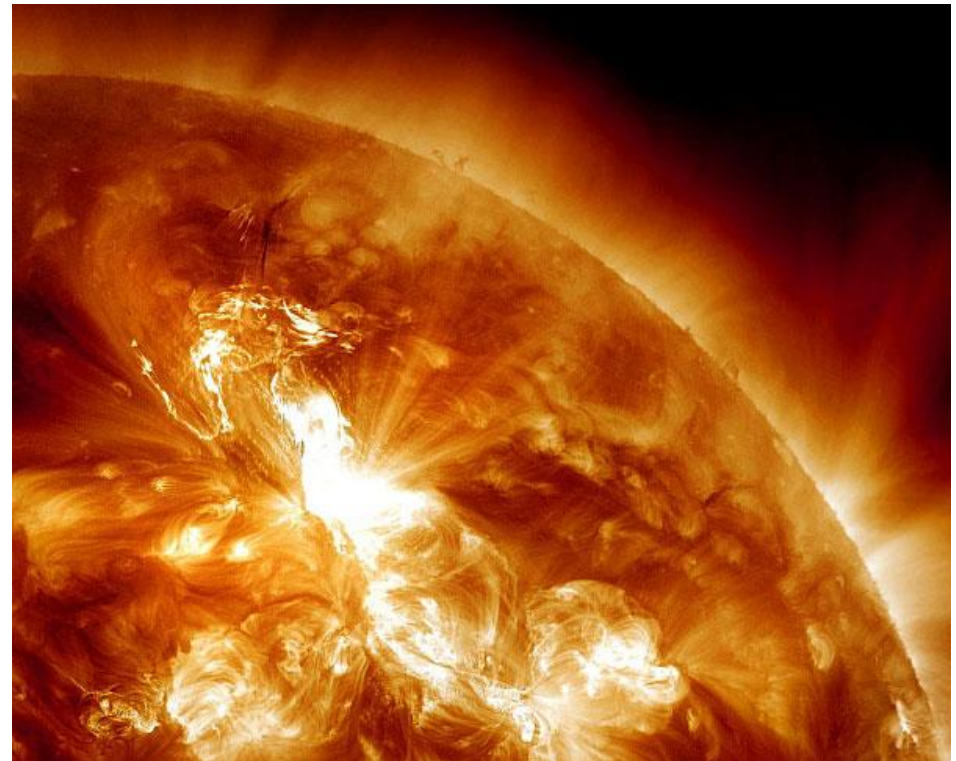
$$\lambda_m T = b \quad \text{или} \quad \lambda_m = b / T.$$

Это соотношение ранее было получено Вином из термодинамики. Оно выражает так называемый **закон смещения Вина**: длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре  $T$ . Значение постоянной Вина

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$



## Проявления закона смещения Вина.



### 3. Закон Планка

Закон Стефана - Больцмана и закон смещения Вина не решают основной задачи о том, как велика спектральная плотность излучения, приходящаяся на каждую длину волны в спектре абсолютно черного тела при температуре  $T$ . Для этого надо установить функциональную зависимость  $u$  от  $\lambda$  и  $T$ .

Основываясь на представлении о непрерывном характере испускания электромагнитных волн и на законе равномерного распределения энергии по степеням свободы (принятых в классической физике), были получены две формулы для спектральной плотности излучения абсолютно черного тела:

- 1) формула Вина  $u_{\lambda T} = \alpha \lambda^{-5} e^{-\frac{b}{\lambda T}}$ , где  $a$  и  $b$  — постоянные величины;
- 2) формула Рэлея — Джинса:  $u_{\lambda T} = 8\pi k T \lambda^{-4}$ .

Опытная проверка показала, что для данной температуры формула Вина верна для коротких волн (когда  $\lambda T$  очень мало) и дает резкие расхождения с опытом в области длинных волн.

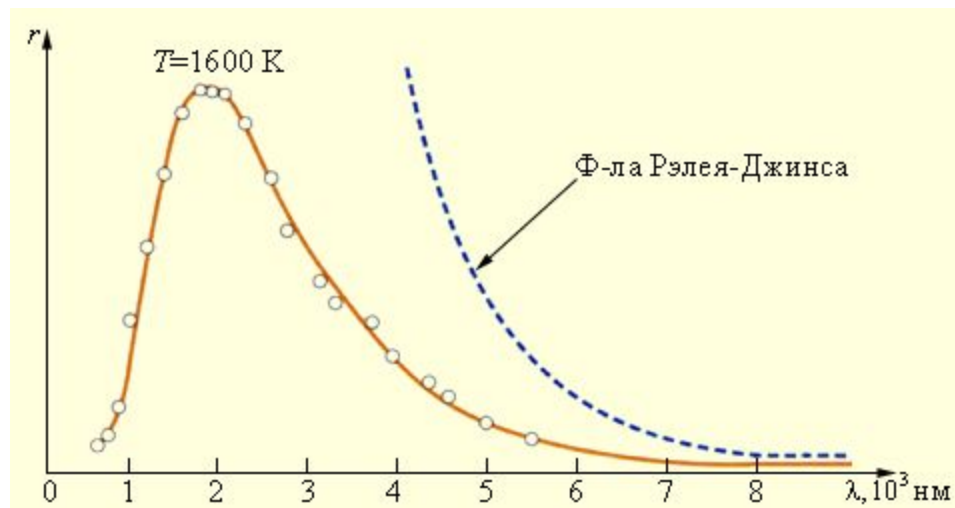
Формула Рэлея - Джинса оказалась верна для длинных волн и совершенно не применима для коротких



Успехи термодинамики, позволившие теоретически вывести законы Стефана–Больцмана и Вина, вселяли надежду, что из термодинамических соображений удастся получить всю кривую спектрального распределения излучения черного тела  $r(\lambda, T)$ . В 1900 году эту проблему пытался решить знаменитый английский физик Д. Релей, который в основу своих рассуждений положил теорему классической статистической механики о **равномерном распределении энергии по степеням свободы в состоянии термодинамического равновесия**. Эта теорема была применена Релеем к равновесному излучению в полости. Несколько позже эту идею подробно развил Джинс. Таким путем удалось получить зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны  $\lambda$  и температуры  $T$ :

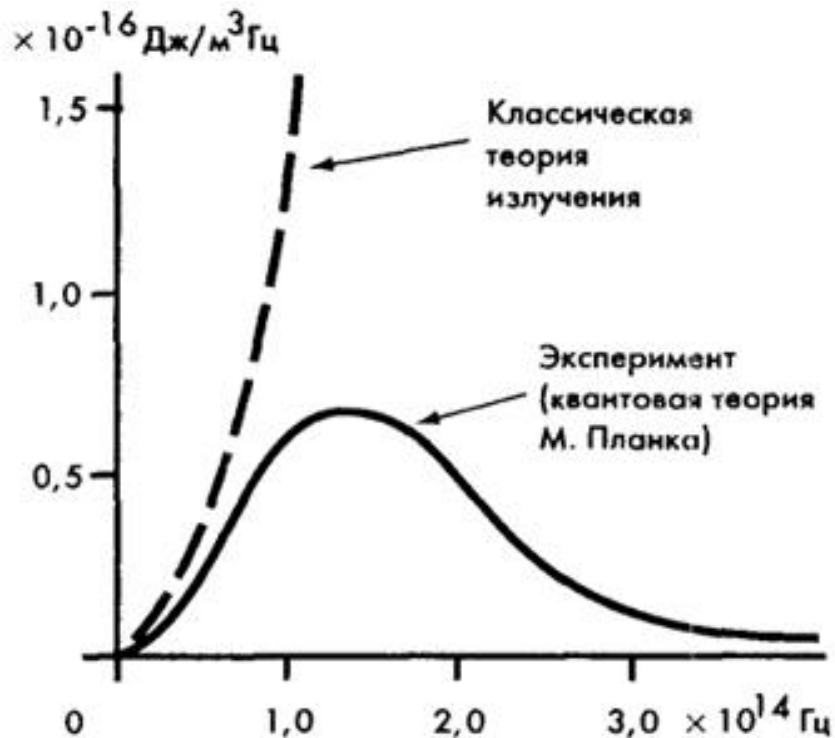
$$r(\lambda, T) = 8\pi k T \lambda^{-4}.$$

Это соотношение называют **формулой Релея–Джинса**. Она согласуется с экспериментальными данными только в области достаточно длинных волн



## «Ультрафиолетовая катастрофа».

Интегрирование формулы Релея-Джинса по  $\lambda$  в пределах от 0 до  $\infty$  дает для равновесной плотности энергии  $u(T)$  бесконечно большое значение. Т.е. из нее следует абсурдный вывод о том, что интегральная светимость  $R(T)$  черного тела должна обращаться в бесконечность, а, следовательно, равновесие между нагретым телом и излучением в замкнутой полости может установиться только при абсолютном нуле температуры.



Этот результат противоречит опыту и получил название «УФ катастрофа» (Эренфест).

Стало ясно, что решить задачу о спектральном распределении излучения абсолютно черного тела в рамках существующих теорий невозможно. Эта задача была успешно решена М. Планком на основе новой идеи, чуждой классической физике.

Планк пришел к выводу, что процессы излучения и поглощения нагретым телом электромагнитной энергии, происходят не непрерывно, как это принимала классическая физика, а конечными порциями – **квантами**. Квант – это минимальная порция энергии, излучаемой или поглощаемой телом. По теории Планка, энергия кванта  $E$  прямо пропорциональна частоте света:

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

где  $h$  – так называемая **постоянная Планка**, равная  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Постоянная Планка – это универсальная константа, которая в квантовой физике играет ту же роль, что и скорость света в СТО

На основе гипотезы о прерывистом характере процессов излучения и поглощения телами электромагнитного излучения Планк получил формулу для спектральной светимости абсолютно черного тела. Формулу Планка удобно записывать в форме, выражающей распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела по частотам  $\nu$ , а не по длинам волн  $\lambda$ .

$$r(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



Зависимость от:

длины волны  $\lambda$

частоты  $\nu$   $T = 5800$  К

$$r(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

## Оптическая пирометрия

законы излучения черного тела позволяют определять температуру этого тела, если длина волны  $\lambda_0$ , соответствующая максимуму  $u_{\lambda T}$  (по закону Вина), или если известна величина интегральной плотности излучения (по закону Стефана — Больцмана).

### а. Метод, основанный на законе смещения Вина

Если нам известна та длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности излучения, то температура тела может быть вычислена по формуле  $\lambda_0 = b/T$ . В частности, таким способом определяется температура на поверхности Солнца, звезд и т. д. Для нечерных тел этот способ не дает истинную температуру тела.

б. Радиационный способ измерения температур основан на измерении интегральной плотности излучения тела  $R$  и вычисления его температуры по закону Стефана — Больцмана. Соответствующие приборы называются радиационными пирометрами.

в. Яркостный метод определения температур. Принцип действия его основан на визуальном сравнении яркости раскаленной нити лампы пирометра с яркостью изображения накаливаемого испытуемого тела.

## Пирометры.

Радиационную температуру нагретых тел можно определить с помощью радиационного пирометра (рис. 6).

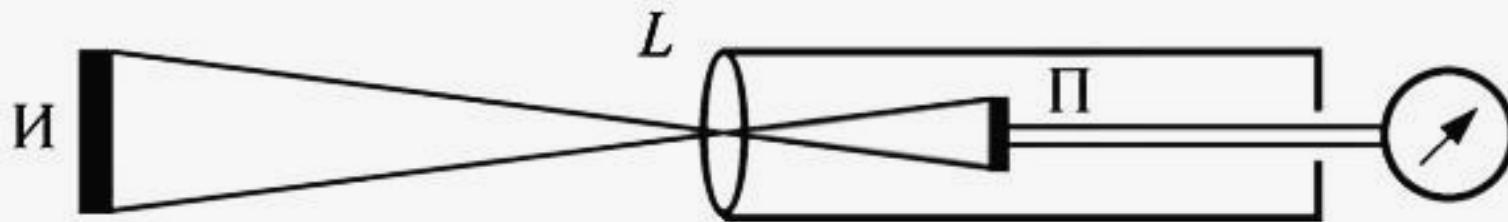
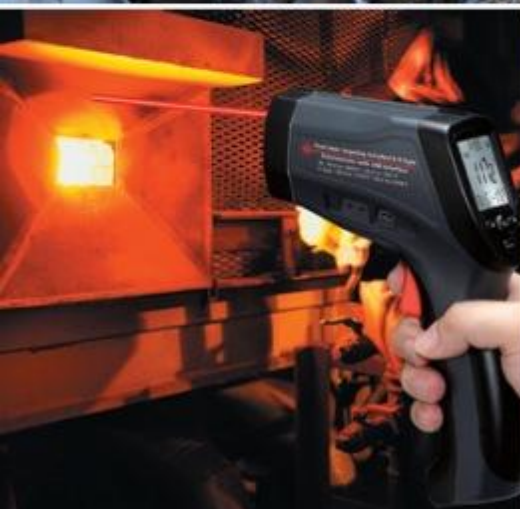


Рис. 6. Устройство радиационного пирометра

Изображение удаленного нагретого источника *И* проецируется с помощью объектива *L* на приемник *П* так, чтобы изображение излучателя полностью перекрывало приемник.

# Пирометры.



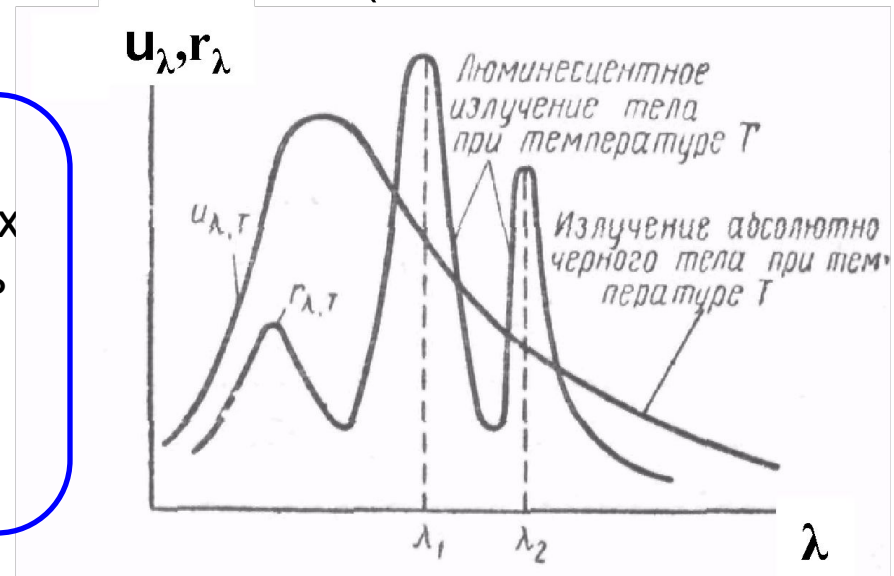
## Люминесцентное излучение

Некоторые вещества при их облучении (видимым, ультрафиолетовым, рентгеновским или гамма-излучением) начинают испускать собственное излучение, спектральный состав которого отличается от спектрального состава падающего излучения и определяется только химическим составом и молекулярной структурой этих веществ.

Этот вид свечения называется **люминесцентным излучением**, или **люминесценцией**. Оно имеет следующие особенности:

**1)** при одной и той же температуре люминесцентное свечение имеет большую интенсивность по сравнению с тепловым (для того же спектрального интервала).

если спектральная плотность излучения какого-либо тела превышает на отдельных участках спектра спектральную плотность излучения абсолютно черного тела, то на этом участке излучение не тепловое, а люминесцентное





2) люминесцентное свечение вещества продолжается некоторое время после прекращения облучения.

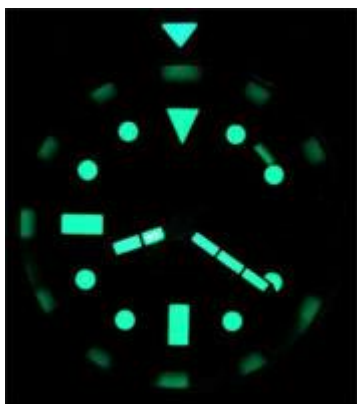
3) люминесценция есть собственное излучение тел; каждое вещество обладает определенным характерным для него спектром люминесценции

Объединяя все эти признаки, С.И. Вавилов дал следующее определение люминесценции:

*люминесценция есть оптическое излучение тела, являющееся избытком над тепловым излучением того же тела в данной спектральной области при той же температуре, имеющее длительность свечения более  $10^{-10}$  с, т.е. не прекращающееся сразу после устранения вызвавшей его причины*

По **способу возбуждения** различают несколько видов люминесценции:

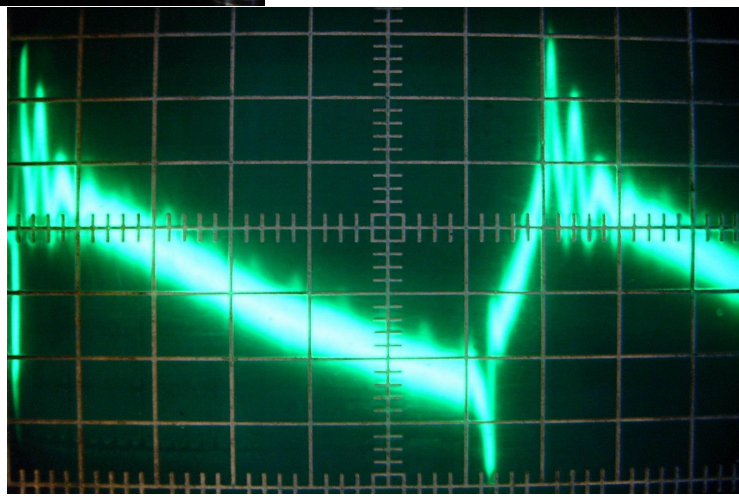
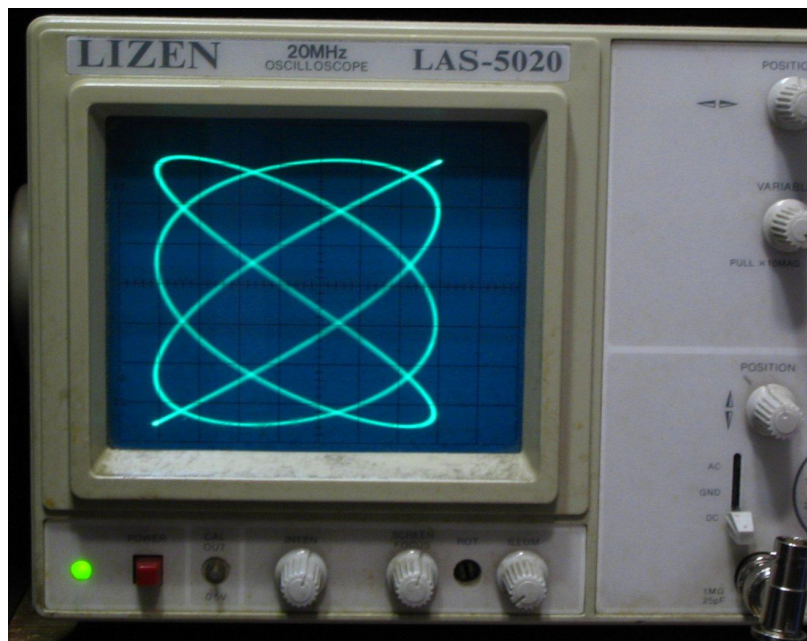
1) свечение, возникающее под действием светового излучения как видимого, так и более коротковолнового (**фотолюминесценция**). Сюда относится свечение специальных красок — фосфоров или люминофоров, при облучении их видимыми или ультрафиолетовыми лучами и т. д.;



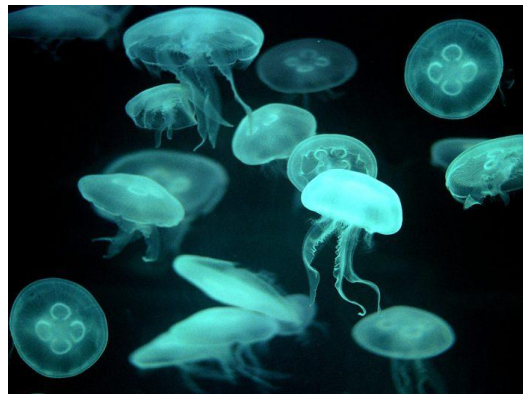
2) свечение, возникающее при электрических разрядах (**электрOLUMИнесценция**); например, свечение газов в газосветных трубках, свечение некоторых веществ при помещении их в переменное электрическое поле;



3) свечение, возбуждаемое ударами электронов (**катодолюминесценция**). Таково свечение экрана осциллографа и телевизора, свечение минералов и т. д.;



4) свечение, вызванное химическими превращениями внутри тела, называется **хемилюминесценцией**. Например, свечение фосфора, гниющего дерева, свечение морских животных, светляков, световые явления при некоторых химических реакциях



# фотолюминесценция

Спектры фотолюминесценции отличаются от спектров возбуждающего излучения.

Согласно **правилу Стокса**, спектр люминесценции в целом и его максимум всегда оказываются в области более длинных волн по сравнению со спектром поглощенного излучения, способного вызвать эту люминесценцию.

Энергия падающего фотона  $h\nu_0$  частично расходуется на процессы внутри вещества, не приводящие к излучению; оставшаяся часть расходуется на возбуждение молекулы или атома, после которого происходит излучение фотона с энергией  $h\nu$ .

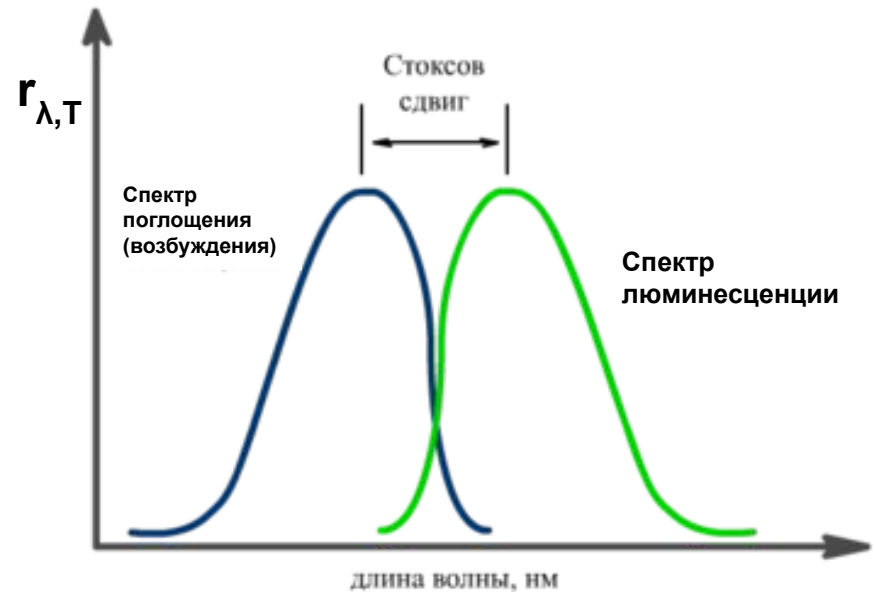
$$h\nu_0 = h\nu_1 + A$$

$A$  - часть энергии падающего фотона, не приводящая к излучению

$$\nu_1 < \nu_0$$

$$\lambda_1 > \lambda_0$$

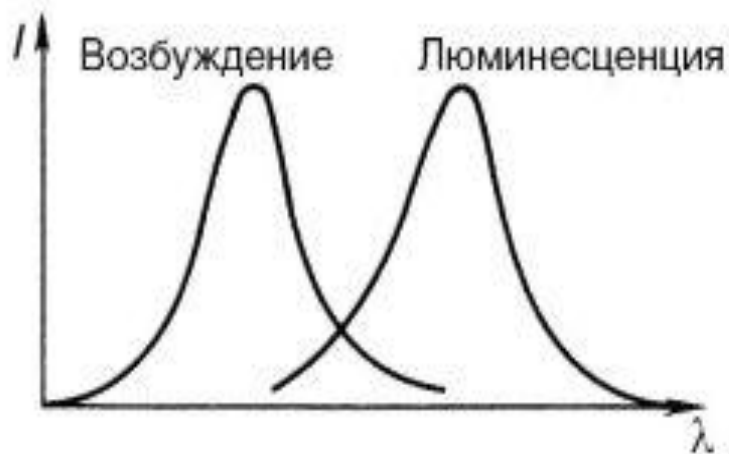
испускаемый при люминесценции свет должен иметь более длинные волны, чем поглощаемый.



При  $A=0$

$$\lambda_1 = \lambda_0$$

В редких случаях, когда фотон поглощается уже возбужденной молекулой, и испускаемый фотон уносит с собой часть энергии молекулы. При этом испускаемый люминесценцией свет будет иметь большую частоту (меньшую длину волны); в этом случае нарушается правило Стокса (**«антистоксова область»**).



Энергия, затраченная на возбуждение вещества, превращается в энергию излучения; при этом часть энергии рассеивается в веществе, не вызывая излучения.

Процессы, приводящие к рассеиванию энергии, называются **тушением люминесценции**

## Практические применения люминесценции

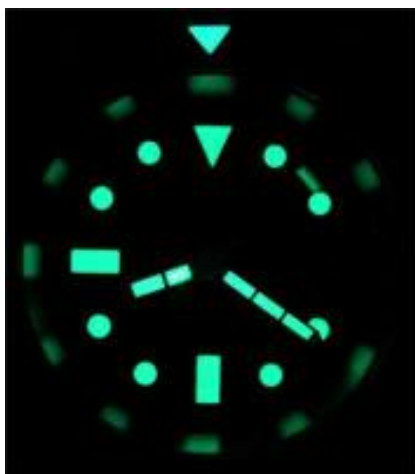
1) Люминесцентная лампа представляет собой стеклянную трубку, наполненную парами ртути и аргоном, стенки лампы покрыты изнутри тонким слоем люминесцирующего состава — люминофором. Изменяя состав люминофоров, можно подобрать спектральный состав излучения люминесцентных ламп в соответствии с требованиями эксплуатации.





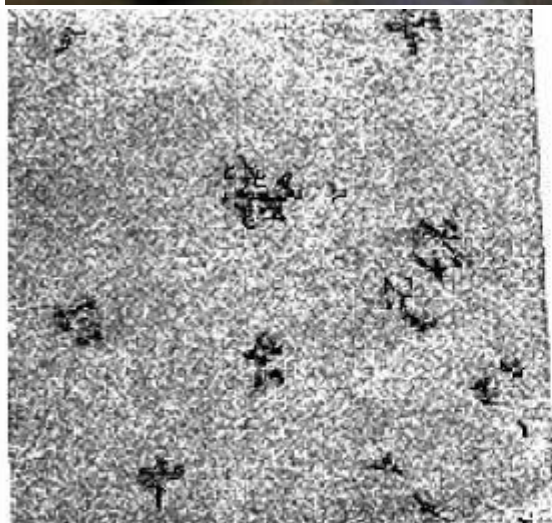
## Практические применения люминесценции

2) Применение люминесценции для создания слабых освещенностей (аварийное и маскировочное освещение).



# Практические применения люминесценции

3. Дефектоскопия. Поверхность детали покрывают люминесцирующей жидкостью, затем жидкость убирают и она остается только в дефектах (поры, трещины и т.д.). При освещении детали УФ или синим светом, дефекты начинают светиться



# Практические применения люминесценции

4) Люминесцентный анализ. Так как люминесцентное излучение имеет спектр, характерный для каждого вещества, то можно обнаружить и исследовать различные объекты с помощью люминесценции

