

Квантовые свойства света

Тема 10 лекция 22

Поглощательная и излучательная способность тела. Правило Прево. Закон Кирхгофа. Абсолютно черное тело. Формула Винна. Закон смещения Винна. Формула Релея-Джина.

Гипотеза Планка. Формула Планка для теплового излучения. Источники (глобар, шрифт Нернста) и приемники (пирометры) теплового излучения. Их практическое применение.

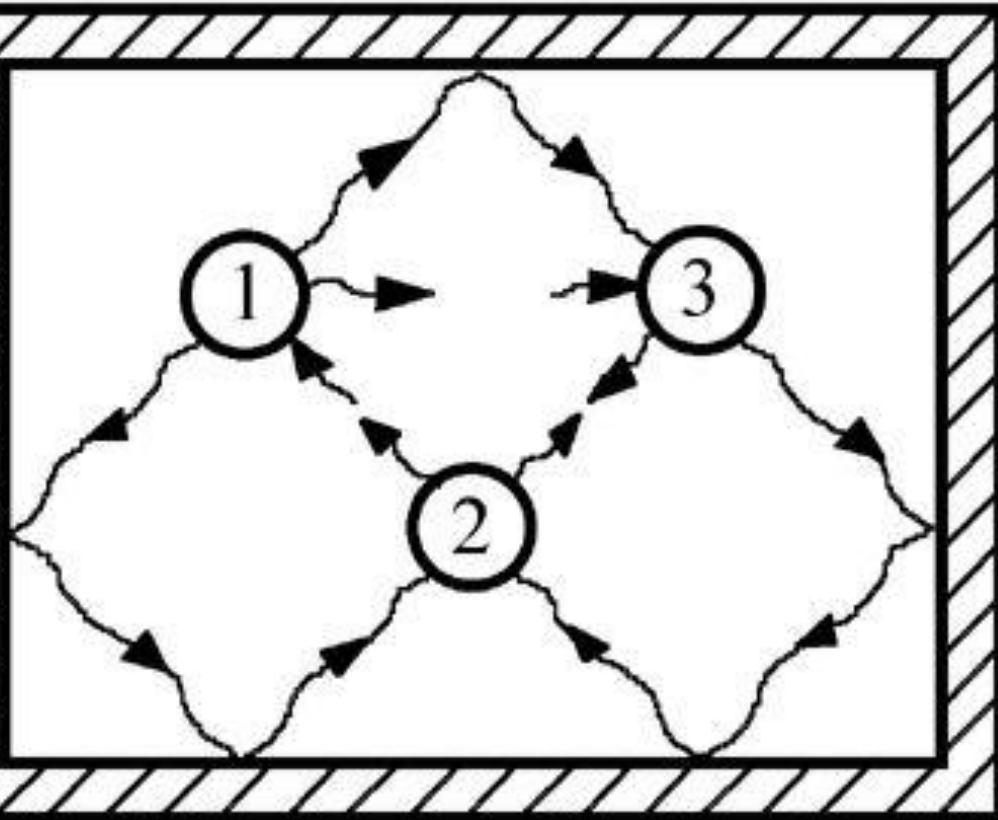
Испускаемый источником свет уносит с собой энергию. В тех случаях, когда необходимая энергия сообщается нагреванием, т. е. подводом тепла, излучение называется **тепловым** или **температурным**.

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.

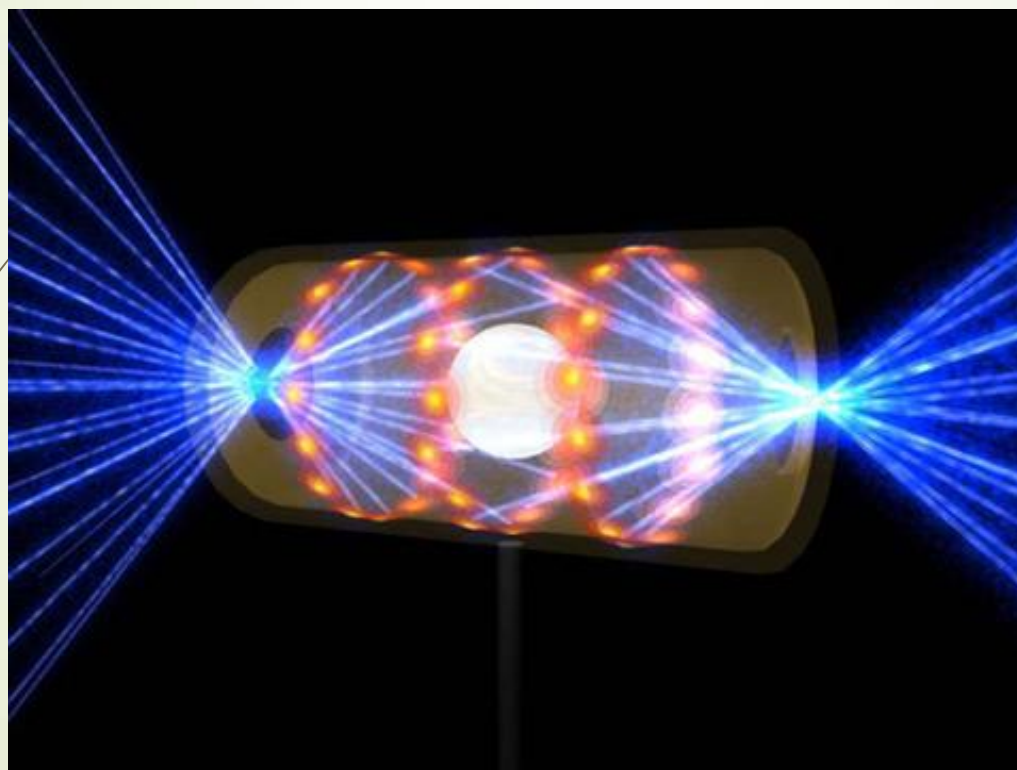
Все виды свечения, возбуждаемые за счет любого вида энергии, кроме внутренней (тепловой), объединяются под общим названием **люминесценция**.

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.



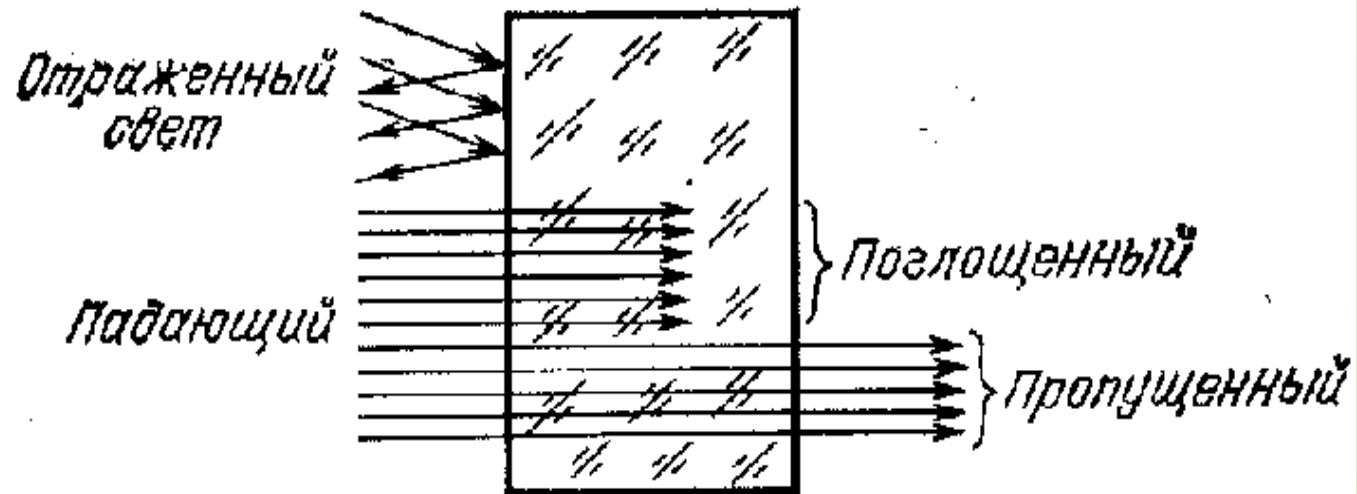
нетепловое излучение всегда неравновесно !

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 ρ , равная отношению лучистого потока P_ρ , отраженного телом, к лучистому потоку P , падающему на поверхность тела, называется **коэффициентом отражения**

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

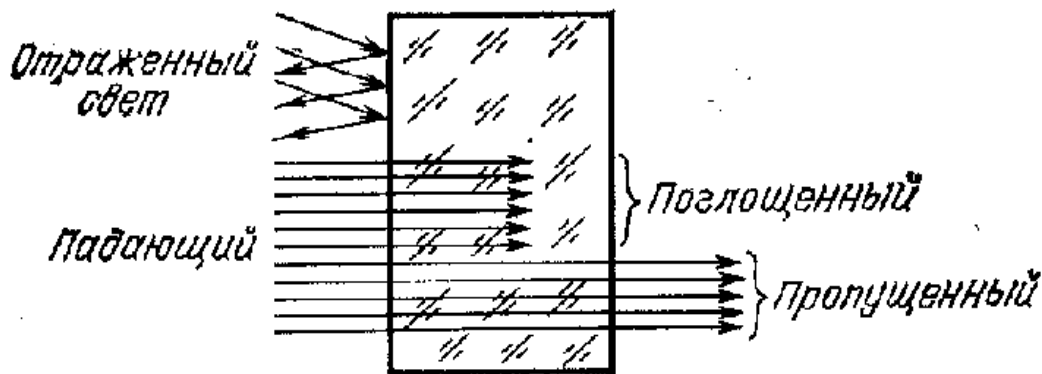


При падении на поверхность какого-либо тела лучистого потока наблюдаются следующие явления:

2) часть потока пройдет через тело

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

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



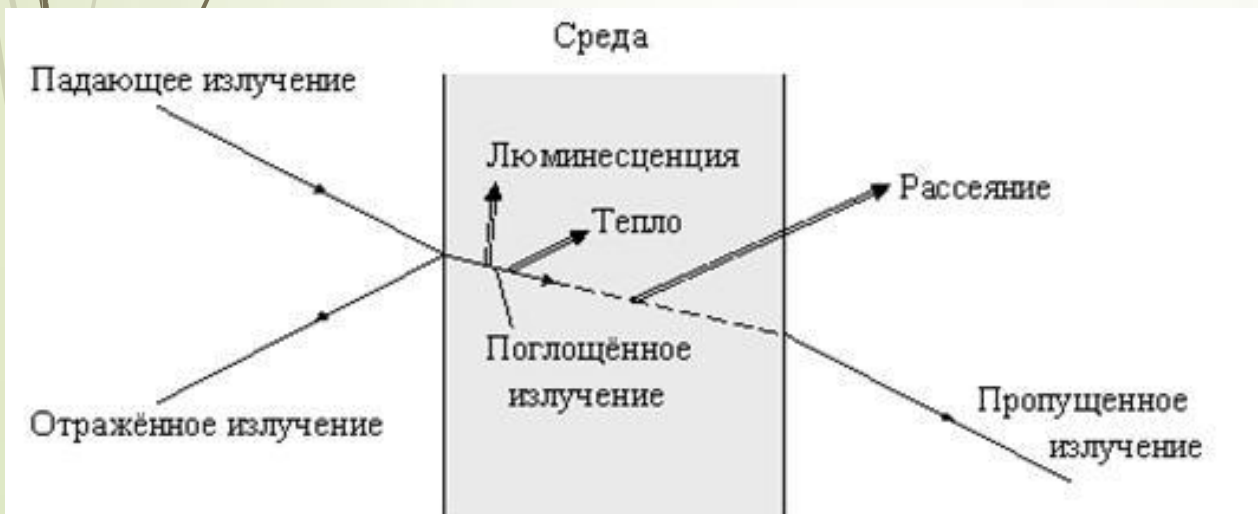
Коэффициент пропускания характеризует прозрачность тела (среды) по отношению к падающему излучению.

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 α , равная отношению лучистого потока P_α , 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 λ падающего излучения и от температуры тела

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

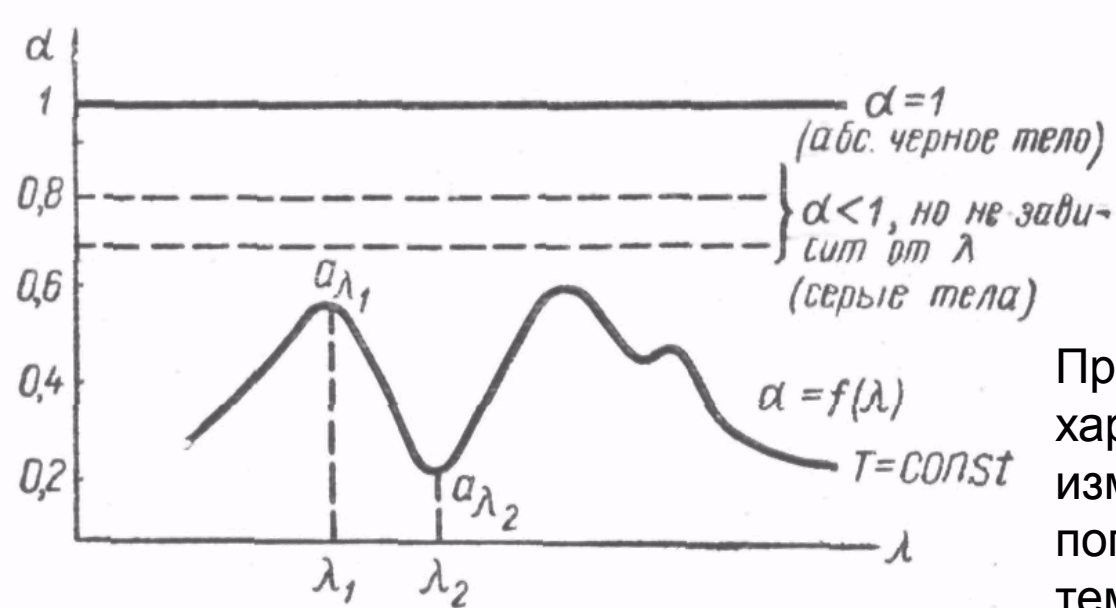
Для монохроматического излучения они называются:

спектральным коэффициентом *поглощения*, α_{λ}

спектральным коэффициентом *пропускания*, τ_{λ}

спектральным коэффициентом *отражения*, ρ_{λ}

(для данной температуры тела)



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

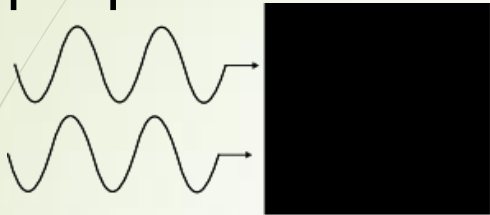
зависимость $\alpha(\lambda)$ при данной температуре T

Зависимость коэффициентов ρ , τ и α от длины волны является во многих случаях физической причиной окрашенности тел, не излучающих собственного света.

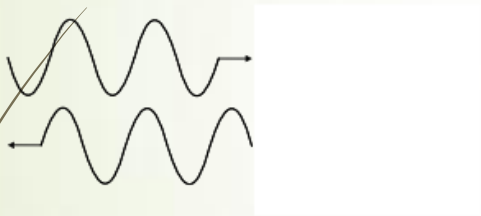
Если тело при освещении его белым светом имеет красный цвет, то его коэффициент поглощения τ для коротковолновой (зелено-фиолетовой) части видимого спектра близок к единице, а для длинноволновой — близок к нулю; соответственно коэффициент отражения этого тела для «красных» лучей близок к единице, а для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

Белый свет падает на

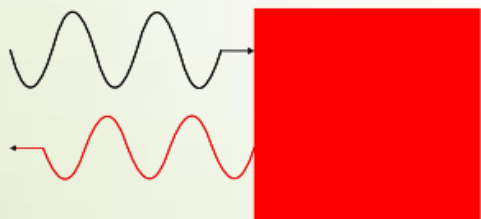
Непрозрачный объект



Полное поглощение света

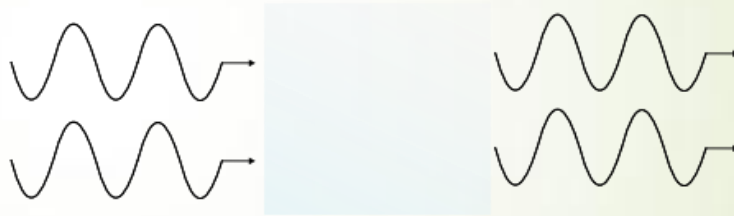


Полное отражение света

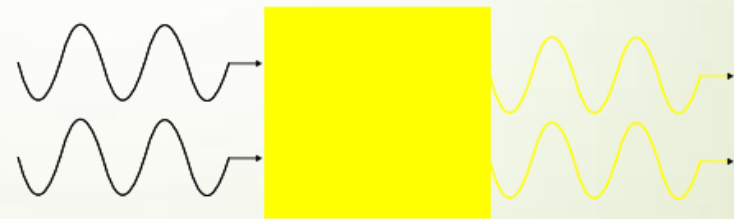


Частичное поглощение и
отражение света

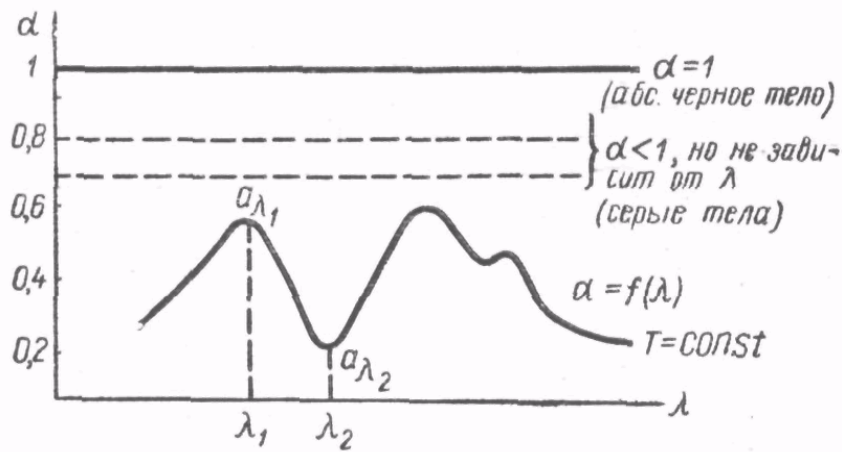
Прозрачный объект



Полное пропускание света

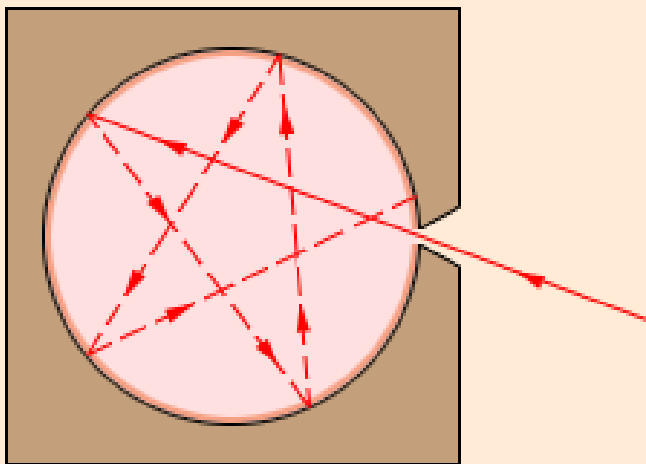


Частичное поглощение и
пропускание света



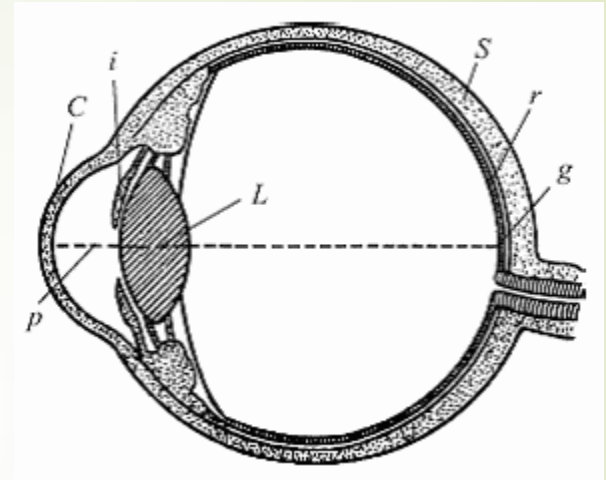
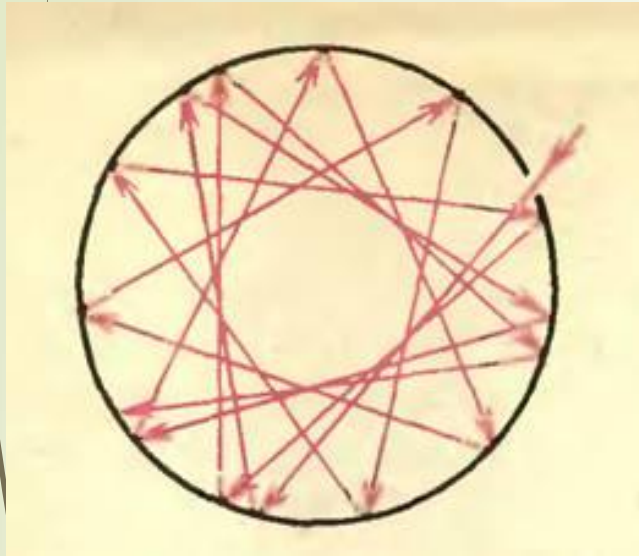
Тело, которое поглощает полностью все падающие на него излучения любой длины волны при любой температуре, называют **абсолютно черным** (точнее абсолютно поглощающим) **телом**. Его коэффициент поглощения для всех длин волн при любых температурах равен единице.

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

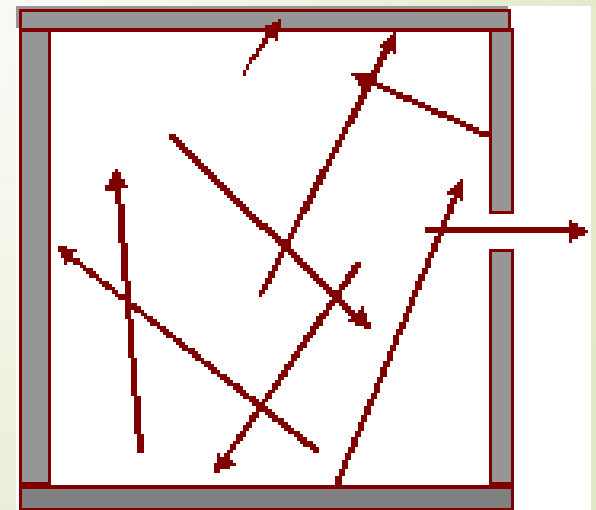


Абсолютно черных тел в природе нет. Моделью абсолютно черного тела является полость с очень малым отверстием.

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.

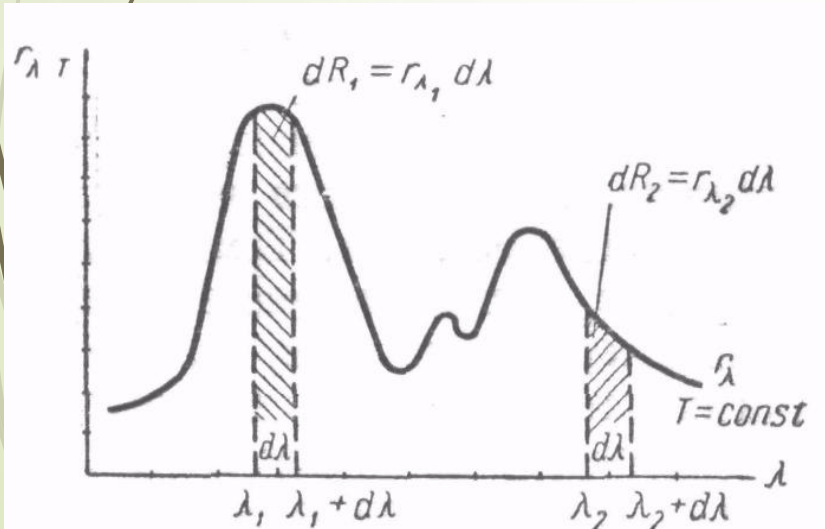


Нагретые тела излучают энергию в виде электромагнитных волн различных длин (инфракрасные, видимые, ультрафиолетовые лучи и др.).

Количество R энергии, излучаемой с 1 м^2 поверхности тела в пределах телесного угла 2π 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.

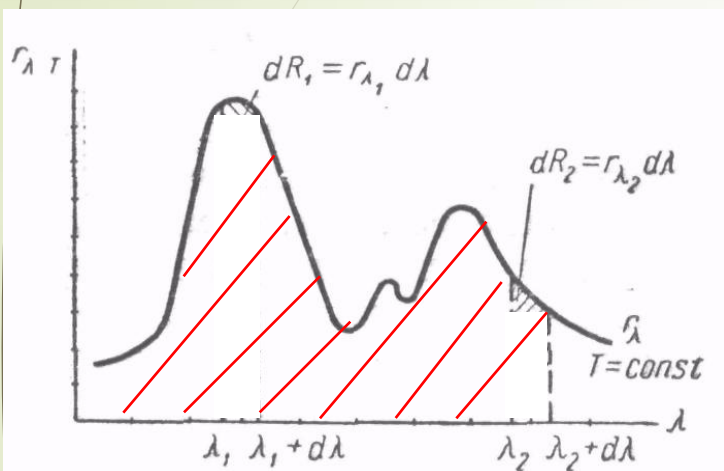
Откладывая по оси ординат величину $r_{\lambda T} = \Delta R / \Delta \lambda$, мы получим представление о распределении энергии по длинам волн нагретого тела.



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:

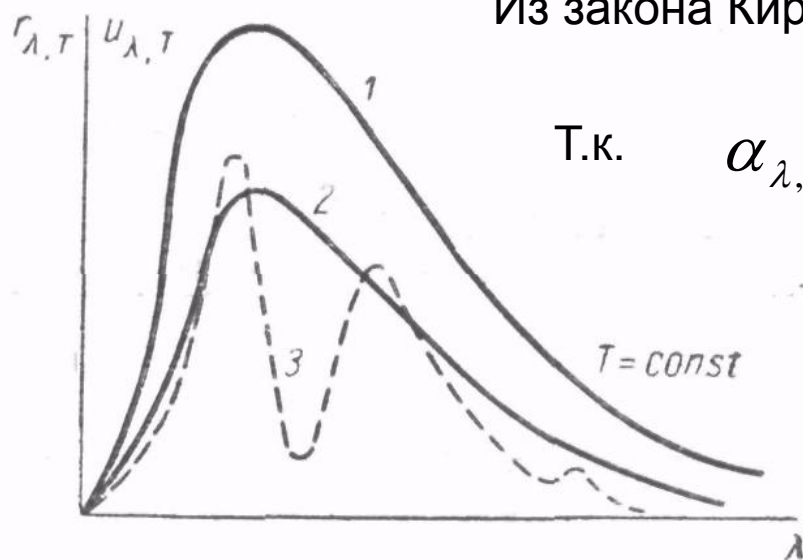
отношение спектральной плотности излучения любого тела к его спектральному коэффициенту поглощения равно спектральной плотности излучения абсолютно черного тела для той же длины волны и при той же температуре

Из закона Кирхгофа:

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

Т.к. $\alpha_{\lambda, T} < 1$ то

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



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

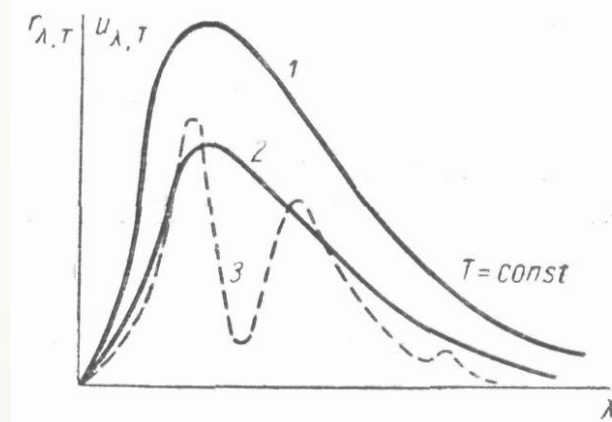
Следовательно, тепловое излучение любого тела в любой области спектра всегда меньше, чем тепловое излучение абсолютно черного тела в этой же области спектра и при той же температуре.

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 α 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 σ , по современным измерениям, составляет

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

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

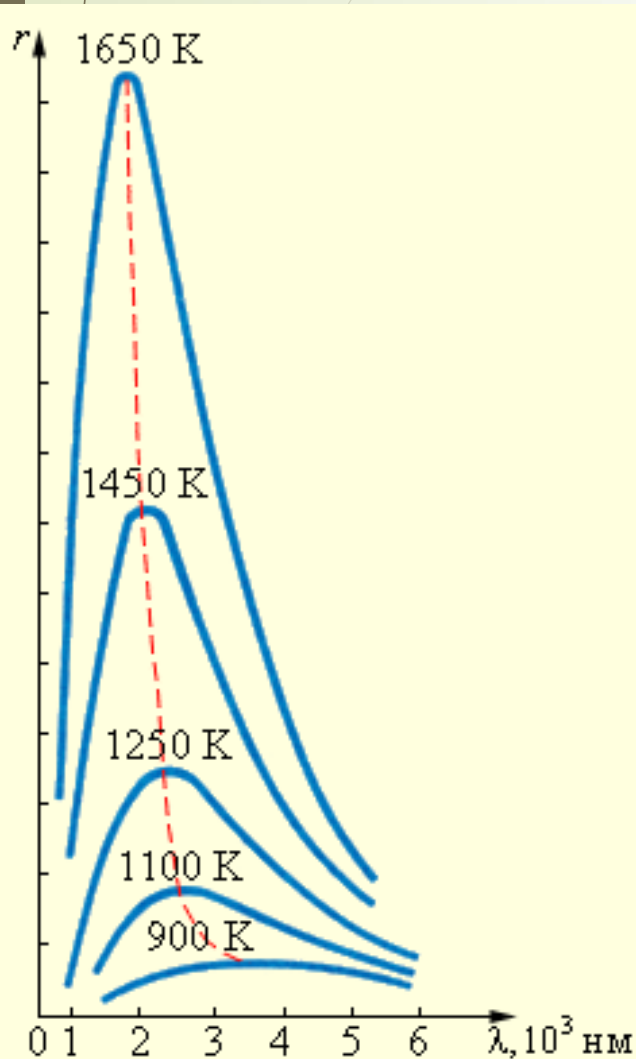
$$W = \int_0^t \sigma T^4(t) S dt$$

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 λ_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 λ_m , на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре T . Значение постоянной Вина

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

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 λ 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 : $u_{\lambda T} = 8\pi k T \lambda^{-4}$.

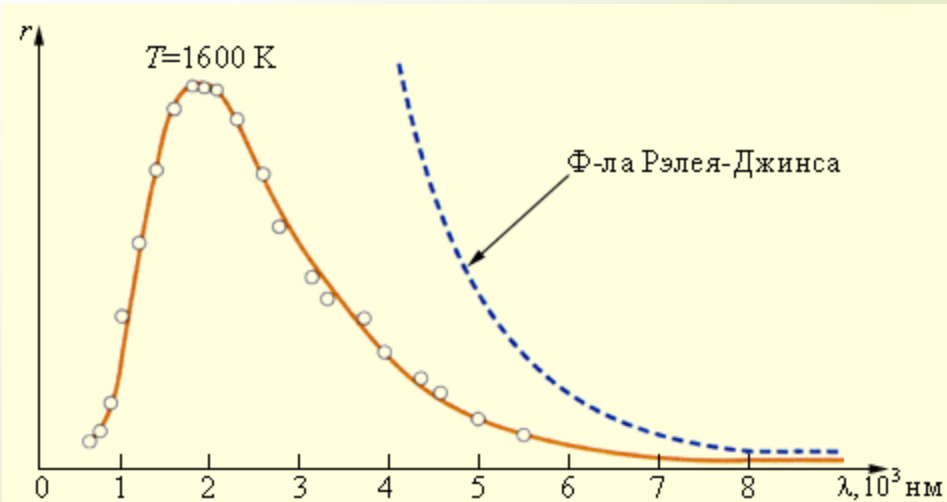
Опытная проверка показала, что для данной температуры формула Вина верна для коротких волн (когда λT очень мало) и дает резкие расхождения с опытом в области длинных волн.

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 λ и температуры T :

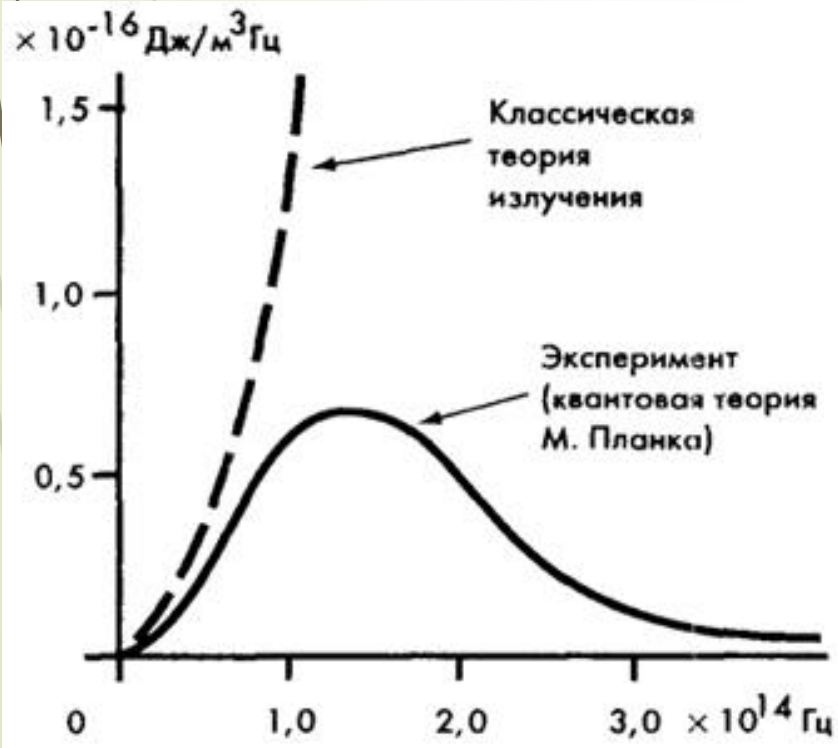
$$r(\lambda, T) = 8\pi kT\lambda^{-4}.$$

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



«Ультрафиолетовая катастрофа».

Интегрирование формулы Релея-Джинса по λ в пределах от 0 до ∞ 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.

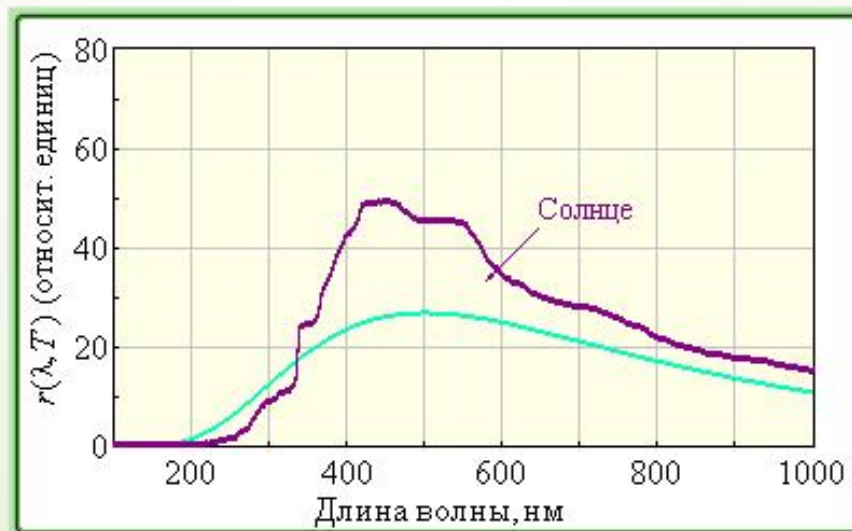
Планк пришел к выводу, что процессы излучения и поглощения нагретым телом электромагнитной энергии, происходят не непрерывно, как это принимала классическая физика, а конечными порциями – **квантами**. Квант – это минимальная порция энергии, излучаемой или поглощаемой телом. По теории Планка, энергия 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 ν , а не по длинам волн λ .

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



Зависимость от:

длины волны λ

частоты ν $T = 5800$ 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 λ_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).

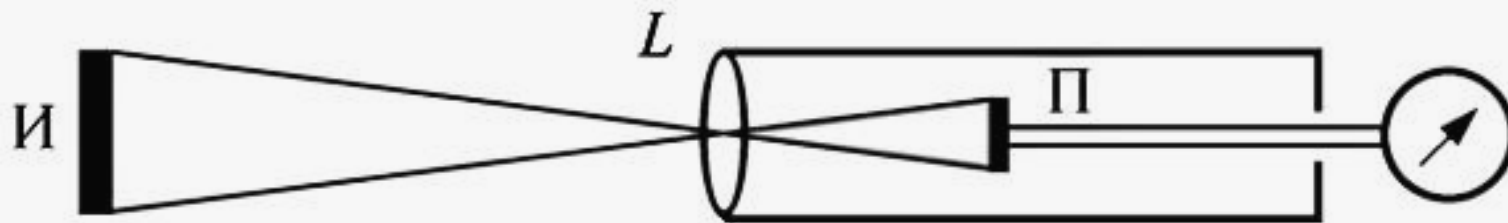


Рис. 6. Устройство радиационного пирометра

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

Пирометры.

