

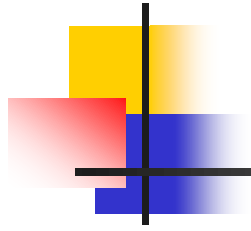


# Квантовая оптика

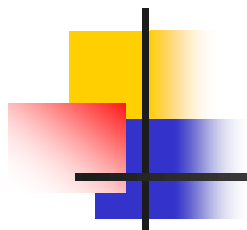
---

- *Квантовой оптикой* называется раздел оптики, занимающийся изучением явлений, в которых проявляются квантовые свойства света:
- Тепловое излучение
- Фотоэффект
- Эффект Комптона
- Фотохимические процессы
- Эффект Рамана

***Квантовая оптика*** – это раздел оптики, в котором изучают статистические свойства световых полей и квантовое проявление этих свойств в процессах взаимодействия света с веществом.



# Тепловое излучение



К концу XIX в физик победила теория о волновой природе света (интерференция, дифракция), но остались вопросы, которые волновая теория не могла объяснить ( фотоэффект, линейчатые спектры излучения атомов, полосатые спектры молекул, тепловое излучение (ТИ)).

Уильям Генрих Брэгг: *«Свет ведёт себя подобно волнам по понедельникам, средам и пятницам, подобно частицам по вторникам, четвергам и субботам и ни с чем не сравним по воскресеньям».*

Нобелевская премия по физике 1915г. , совместно с сыном (Уильямом Лоуренсом Брэггом) , «За заслуги в исследовании структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей». Премия стала уникальной , так как первый и единственный раз премию получили отец и сын. История знает родственником, которые стали лауреатами, но чтобы оба одновременно и за одно и то же, кроме того, Лоурес был самым молодым лауреатом – 25 лет.



# Люминесценция и тепловое излучение

Колебания электрических зарядов, входящих в состав вещества, обуславливают электромагнитное излучение, которое сопровождается потерей энергии веществом. При рассеянии и отражении света формирование вторичных световых волн и продолжительность излучения веществом происходит за время, сравнимое с периодом световых колебаний.

Если же излучение продолжается в течение времени, значительно превышающем период световых колебаний, то возможны два типа излучения: люминесценция и тепловое излучение.

*Тепловое излучение – электромагнитное излучение широкого спектрального состава, испускаемое веществом и обусловленной тепловыми колебаниями зарядов, возникающее за счет его **внутренней энергии**.*

Опыт показывает, что единственным видом излучения, которое может находиться в **равновесии** с излучающими телами, является **тепловое излучение**.

*Тепловое излучение – равновесное излучение.*

ТИ наблюдается при любой температуре  $T > 0K$



# Люминесценция и тепловое излучение

---

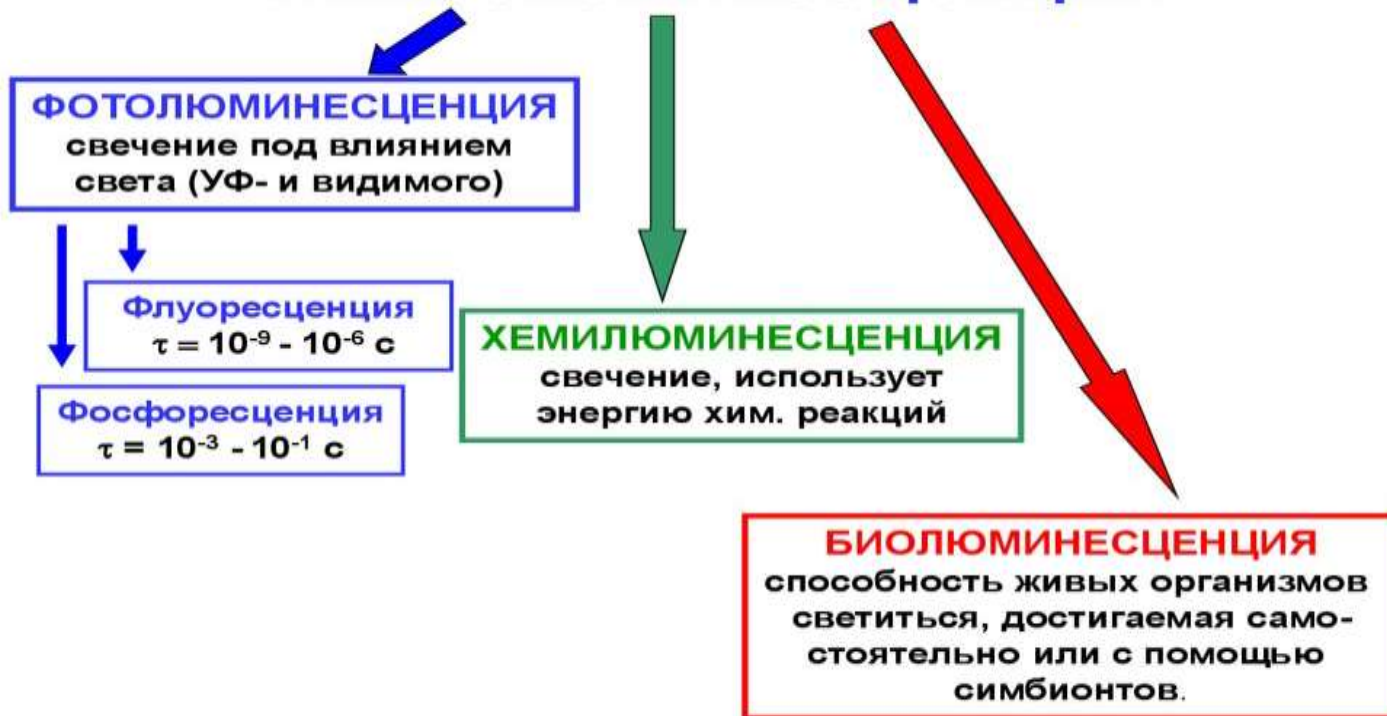
- Все другие виды свечения (излучения света), возбуждаемые за счет любого другого вида энергии, кроме теплового, называются *люминесценцией*, это виды *неравновесного* излучения:
- *Люминесценцией* называется излучение, избыточное над тепловым излучением тела при данной температуре и имеющее длительность, значительно превосходящую период излучаемых волн.
- Люминесцирующие вещества – *люминофоры*.
- **Люминесценция**
  - радиолюминесценция
  - хемилюминесценция
  - триболюминесценция
  - фотолюминесценция
  - электролюминесценция
  - флуоресценция
  - фосфоресценция

# Люминесценция и тепловое излучение

*Люминесценция* (от латинского *luminescence*) - «свечение».

Термин введен Видеманом в 1889 году.

## Типы люминесценции





# Люминесценция и тепловое излучение

---

*Электролюминесценция* - возникает при пропускании электрического тока через определённые типы люминофоров. Разряд в газе сопровождающийся свечением. Возбужденные атомы отдают энергию в виде световых волн. В результате этого разряда в газе сопровождается свечением.

*Радиолюминесценция* – возникает при возбуждении вещества ионизирующим излучением.

*Термолюминесценция ( термостимулированная люминесценция)* – свечение, возникающее в процессе нагревания вещества

# Люминесценция и тепловое излучение

## *Северное сияние*





# Люминесценция и тепловое излучение

*Катодолюминесценция* - физическое явление, заключающееся в свечении (люминесценции) вещества, облучаемого быстрыми электронами (катодными лучами).





# Люминесценция и тепловое излучение

---

*Хемилюминесценция* – свечение при некоторых химических реакциях, идущих с выделением энергии (источник света остается холодным). Большинство биохимических реакций сопровождается сверхслабым свечением, собственным излучением клеток и тканей.

Хемилюминесценция в биосистемах – *биохемилюминесценция*.

Некоторые организмы излучают сравнительно яркий свет, хорошо видимый невооруженным глазом – *биолюминесценция*.



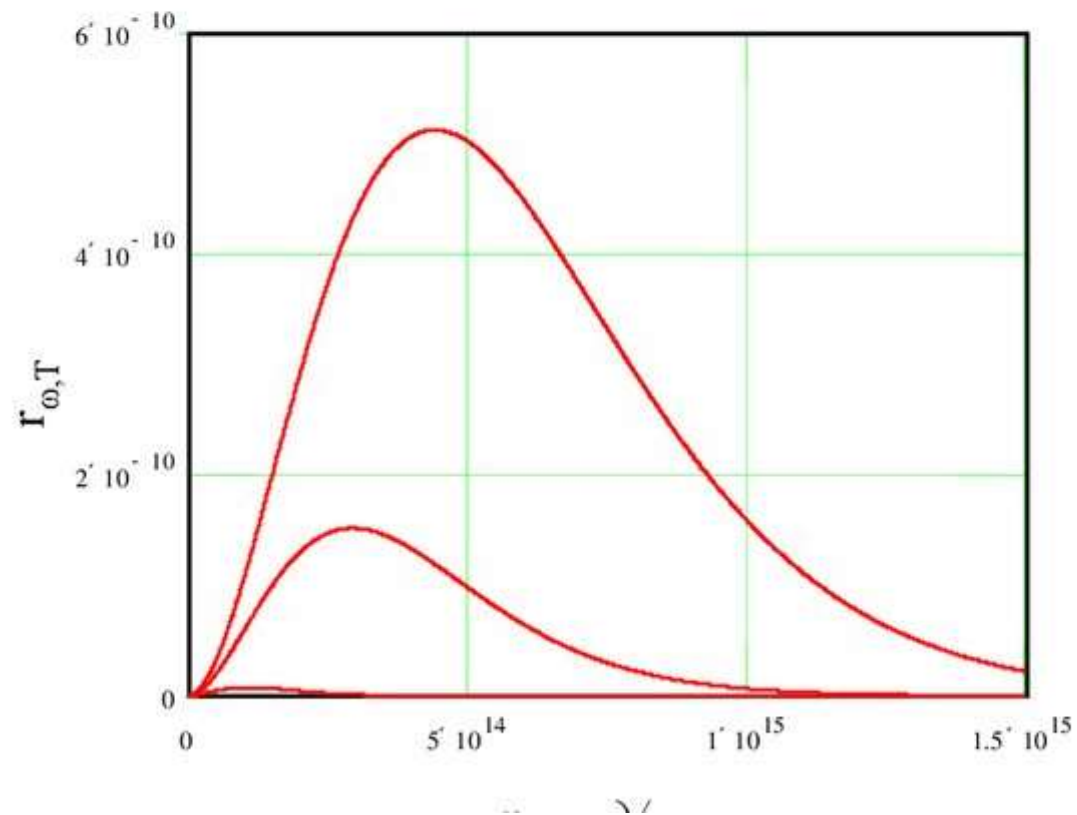
# Тепловое излучение

- *Тепловое равновесие* означает, что излучающее тело и поле излучения имеют одинаковую температуру, сколько тело излучает, столько и поглощает для данной длины волны (частоты) и температуры.
- *Тепловое излучение*:
  - 1) не зависит от материала, излучающего тела и его формы;
  - 2) зависит от длины волны (частоты) и температуры, причем спектр без скачков , сплошной спектр;
  - 3) тепловое излучение изотропно, т.е. вероятность испускания излучения разных длин волн и поляризаций равновероятно во всех направлениях;
  - 4) однородно;     5) неполяризовано;
  - 6) ТИ приводит к термодинамическому равновесию систему тел, обменивающуюся излучением;

Нагретые тела передают тепло от одного к другому тремя способами: теплопроводность, конвекционный теплообмен и *лучистый теплообмен*.

# Тепловое излучение

Спектр теплового излучения:





# Тепловое излучение

В общем случае любое тело отражает, поглощает и пропускает падающее на него излучение. Поток излучения, падающего на тело можно записать :

$$\Phi = \Phi_{\text{отр}} + \Phi_{\text{погл}} + \Phi_{\text{прош}}$$

или 
$$\frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi} + \frac{\Phi_{\text{погл}}}{\Phi} + \frac{\Phi_{\text{прош}}}{\Phi} = \rho + \alpha + t = 1, \text{ где}$$

$\rho$  – коэффициент отражения или отражательная способность,  
 $\alpha$  – коэффициент поглощения или поглощательная способность,  
 $t$  - коэффициент пропускания или пропускательная способность.

Если тело не пропускает излучение, то  $t = 0$  и  $\rho + \alpha = 1$ .

В общем случае коэффициенты зависят от частоты излучения ( $\omega$  или  $\nu$  или  $\lambda$ ) и температуры тела ( $T$ ):

$$\rho = \rho_{\omega, T} \text{ И } \alpha = \alpha_{\omega, T}$$



# Тепловое излучение

Если тело полностью поглощает падающее на него излучение любой частоты и не отражает его, то:  $\alpha_T = 1$  и  $\rho_T = 0$  - *тело называют абсолютно черным (АЧТ).*

Если тело полностью отражает излучение и не поглощает его, то:  $\alpha_T = 0$  и  $\rho_T = 1$  - *тело называют абсолютно белым.*

Если коэффициент поглощения  $0 < \alpha_T < 1$ , то тело *называют серым.*

Если поглощательная способность зависит от длины волны  $\lambda$  (или частоты  $\nu$ ), то тело называют *селективным поглотителем.*

Наряду с поглощением, отражением и пропусканием, все тела сами способны испускать ЭМВ, т.е. *светиться*. Все виды испускания можно разделить на два класса:

1. *Равновесное излучение – тепловое излучение*. Это свечение при нагревании, называют температурным или тепловым,
2. *Неравновесное излучение - люминесценция*

# Тепловое излучение

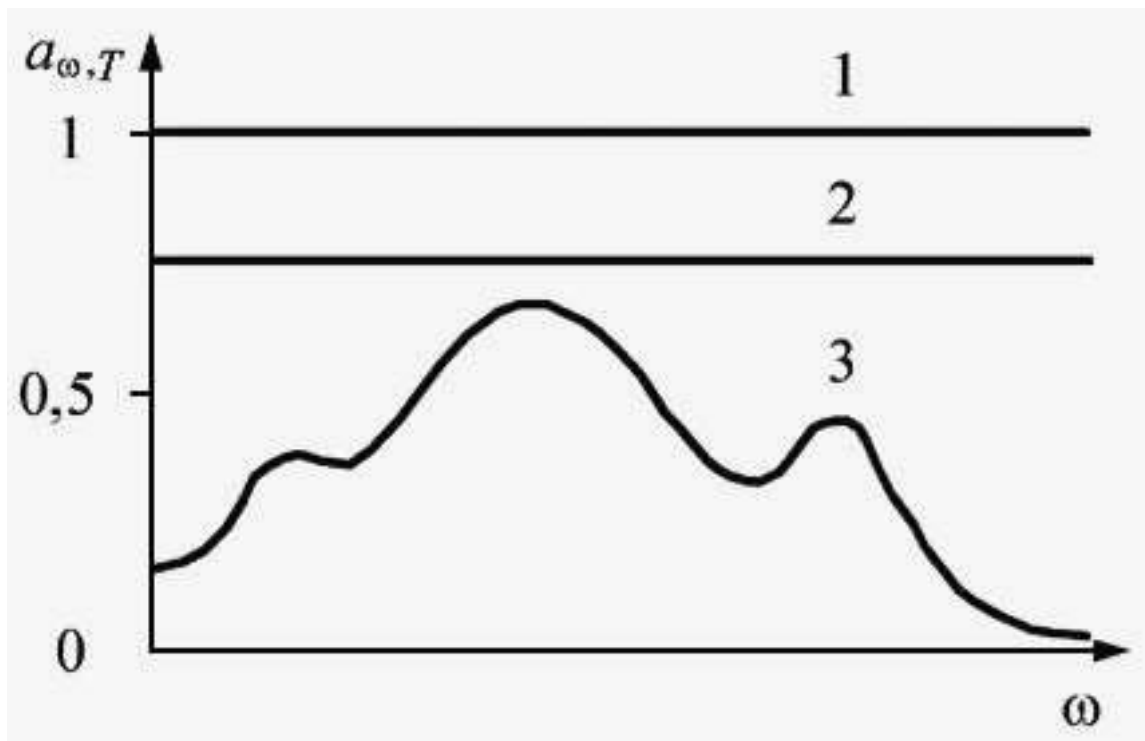


График спектральной поглотительной способности тела:  
1- АЧТ; 2- серое тело; 3- реальное тело



# Тепловое излучение

---

- Среди излучающих и поглощающих тел особое место занимает **АЧТ – абсолютно черное тело ( $\rho_T = 0$  и  $\alpha_T = 1$ )**.
- АЧТ полностью поглощает падающее на него излучение.
- Если АЧТ раскалить, то оно будет светиться ярче, чем серое.  
Если на фарфоре нанести рисунок желтой, зеленой и черной краской, а затем нагреть до высокой температуры, то черный рисунок будет светиться ярче, чем зеленой и желтый.
- Пример раскаленного АЧТ - Солнце.
- Модель АЧТ предложен Луммером и Вином – это термоизолированная полость с зеркальными стенками и бесконечно малым отверстием, попав в него ЭМ излучение бесконечное число раз отражается и не может выйти, затем полностью поглощается ( или полость может быть покрыта сажей).





# Тепловое излучение

## Характеристики теплового излучения:

1. Поле излучения принято характеризовать потоком излучения.

*Поток излучения* – это энергия переносимая излучением через произвольную поверхность в единицу времени:

$$\Phi = \frac{dW}{dt} \left[ \text{Вт} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right].$$

2. *Энергетическая светимость* – энергия электромагнитных волн, испускаемых единицей площади поверхности тела в единицу времени во всём спектральном диапазоне частот.

$$dR_T = \frac{dW}{dS dt} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \right]$$



# Тепловое излучение

---

## Спектральные характеристики ТИ:

3. Энергетическая светимость в интервале частот ( длин волн) от  $\nu$  до  $\nu + d\nu$  (или от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ ) обозначают -  $dR_{\nu,T}$  ( $dR_{\omega,T}$ ,



# Тепловое излучение

---

*4. Энергетическая светимость тела во всем интервале частот ( длин волн) – интегральная характеристика, зависит от температуры:*

$$R_T = \int dR_{\nu,T} = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} \cdot d\nu$$

Характеристики, зависящие от частоты  $\nu$  ( $\omega$ ) или  $\lambda$  - называются *спектральными*.



# Тепловое излучение

5. *Поглощательная способность тела* – отношение поглощенного телом потока  $d\Phi_{\omega,T}^{\alpha}$  (электромагнитных волн к падающему потоку  $d\Phi_{\omega,T}$  для единичного интервала частот ( $\omega \div \omega + d\omega$ ))

$$\alpha_{\omega,T} = \frac{d\Phi_{\omega,T}^{\alpha}}{d\Phi_{\omega,T}}$$

$0 < \alpha_{\omega,T} < 1$  , *безразмерная физическая величина*

6. Спектральная плотность энергетической светимости (излучательная способность) связана с объемной плотностью излучения соотношением:

$$E_{\nu,T} = \frac{c}{4} u(\nu, T)$$



# Тепловое излучение

## Связь между спектральными характеристиками излучения по частоте и длине волны

Характеристики излучения, зависящие от частоты  $\omega$  ( $\nu$ ) или длины волны  $\lambda$  излучения *называются спектральными*.

Учитывая, что  $dR_{\omega,T} = dR_{\lambda,T}$ , получим  $r_{\omega,T}d\omega = r_{\lambda,T}d\lambda$ .

Используем связь  $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$ , получим:  $d\lambda = -\frac{2\pi c}{\omega^2}d\omega = -\frac{\lambda^2}{2\pi c}d\omega$ .

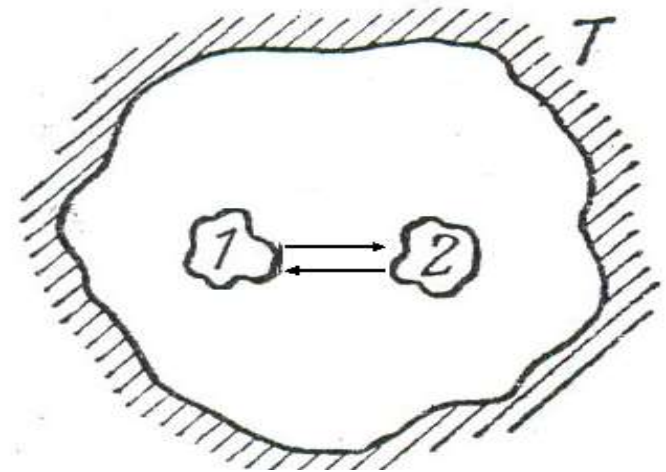
Знак минус показывает, что  $\lambda$  увеличивается, частота  $\omega$  уменьшается, и наоборот.

Получим:  $r_{\omega,T} = r_{\lambda,T} \left| \frac{d\lambda}{d\omega} \right| = r_{\lambda,T} \frac{\lambda^2}{2\pi c}$  или  $r_{\lambda,T} = \frac{c}{\lambda^2} r_{\nu,T}$

# Законы теплового излучения

- Правило Прево (1809 г.): При тепловом равновесии, *если два тела поглощают разные количества энергии, то и излучение у них должно быть различным.* Так, нагревая кристалл кварца и кусок стали до высокой температуры, наблюдаем яркое каление стали, кристалл же кварца совсем не светится. Таким образом, обнаруживается большая способность к излучению тел, хорошо поглощающих.

$$f_{\omega, T} = \frac{r_{\omega, T}}{\alpha_{\omega, T}}$$

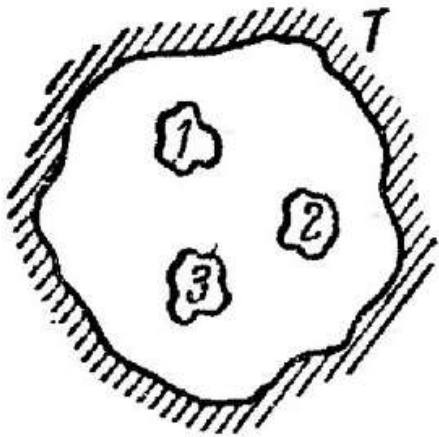


Теоретическое объяснение излучения АЧТ привело к понятию квантования энергии.

# Законы теплового излучения

## 1. Закон Кирхгофа

Рассмотрим замкнутую полость, внутри которой находится несколько тел в вакууме. Температура поддерживается постоянной. Тела между собой и с оболочкой могут обмениваться энергией только путем испускания и поглощения ЭМВ.



Через некоторое время установится термодинамическое равновесие, температура равна  $T$ , температуре оболочки. То есть тело, обладающее большей испускательной способностью  $r_{\omega,T}$ , теряет в единицу времени больше энергии с единицы поверхности, чем тело с меньшей испускательной способностью, а так как  $T = \text{const}$ , то тело которое испускает больше, должно больше и поглощать.

Кирхгоф установил, что:

$$\left( \frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}} \right)_1 = \left( \frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}} \right)_2 = \dots = r_{\omega,T}^0 = f(\omega, T)$$



# Законы теплового излучения

$$\left( \frac{r_{\omega, T}}{a_{\omega, T}} \right)_1 = \left( \frac{r_{\omega, T}}{a_{\omega, T}} \right)_2 = \dots = r_{\omega, T}^0 = f(\omega, T)$$

- это отношение не зависит от природы тела, для всех универсальная функция,
- Отношение спектральной лучеиспускательной способности к спектральной поглотательной способности, есть величина постоянная  $f(\omega, T)$ ,
- Так как для АЧТ поглотательная способность  $\alpha_{\omega, T}^0 = 1$ , то лучеиспускательная способность  $r_{\omega, T}^0$  по закону Кирхгофа:

$$f(\omega, T) = r_{\omega, T}^0 \quad - \quad f(\omega, T) \text{ — функция Кирхгофа.}$$

- *Функция Кирхгофа равна лучеиспускательной способности АЧТ при определенной температуре  $T$  и в определенном интервале частот  $d\omega$  ( $d\lambda$ ).*





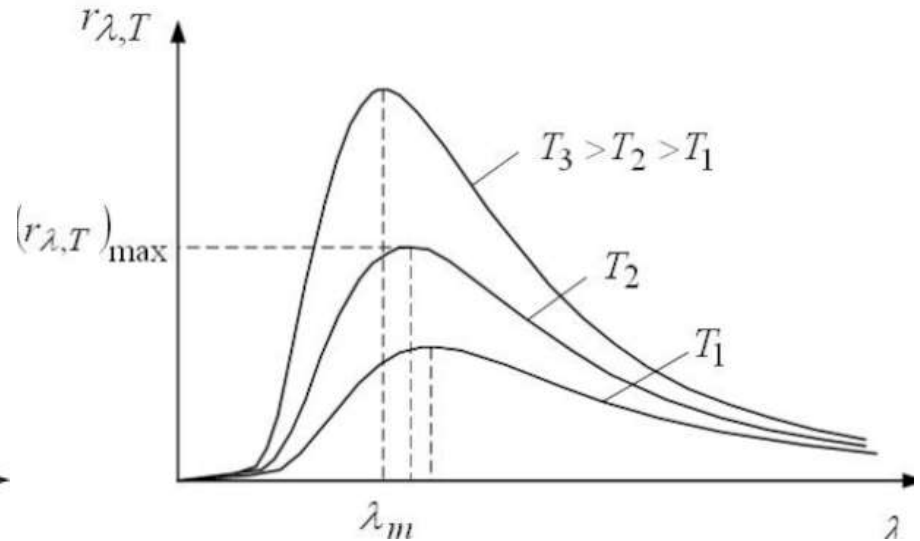
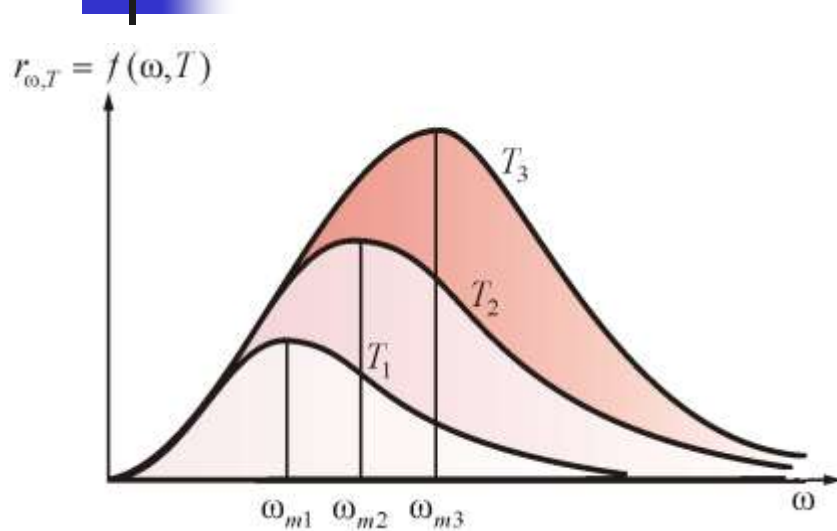
# Законы теплового излучения

---

## *Следствия из закона Кирхгофа:*

1. Так как для любого тела, не АЧТ, поглощательная способность  $\alpha_{\omega,T} < 1$ , то лучеиспускательная способность  $r_{\omega,T}^0 > r_{\omega,T}$ , то есть при любой температуре излучение АЧТ наибольшее;
2. Если поглощательная способность тела  $\alpha_{\omega,T} = 0$ , то и спектральная лучеиспускательная способность  $r_{\omega,T} = 0$ , из чего следует, что если тело не поглощается некоторых частот (длин волн), то оно их и не излучает, и наоборот.
3. Если излучательная способность АЧТ равна нулю, то есть  $r_{\omega,T}^0 = 0$ , то и излучательная способность любого тела равна нулю, то есть если АЧТ тело некоторых длин волн (частот) не излучает, то их не излучает и любое другое тело.

# Законы теплового излучения



По функции Кирхгофа  $f(\omega, T)$  можно найти излучательную способность любого тела, если для него известен коэффициент поглощения  $\alpha(\omega, T)$ , то есть :

$$r(\omega, T) = \alpha(\omega, T) \cdot f(\omega, T)$$

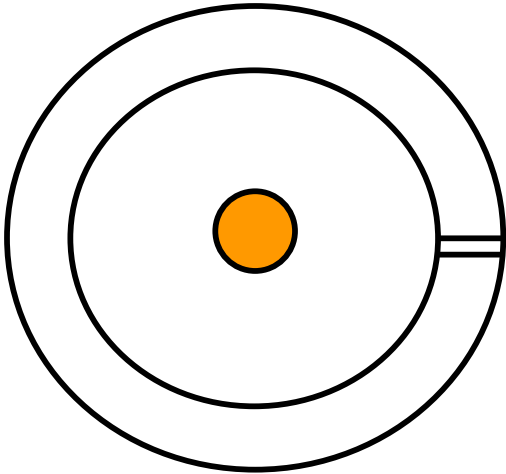
Закон Кирхгофа и модель АЧТ позволяют проводить количественные определения интенсивности ТИ.



# Законы теплового излучения

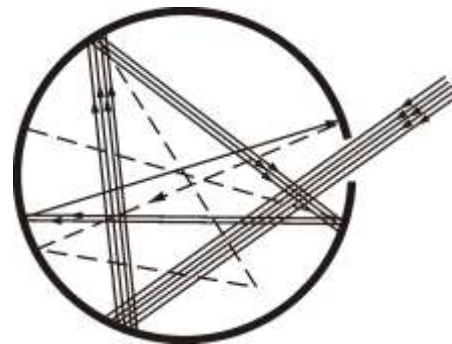
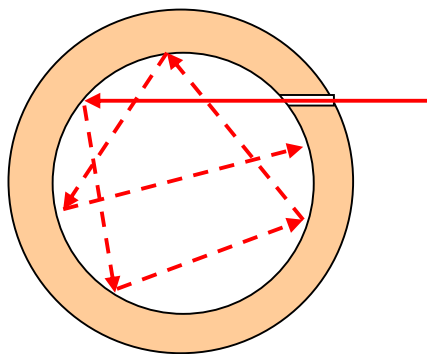
---

Для доказательства закона Кирхгофа рассмотрим теплоизолированную полость  $A$  с малым отверстием, внутри которой находится тело  $B$ . Полость  $A$  нагрета и обменивается теплом с телом  $B$  через поле излучения полости  $C$ . В состоянии теплового равновесия температура полости  $A$ , тела  $B$  и поля излучения  $C$  одинаковы и равны  $T$ . В опыте имеется возможность измерять поток



# Абсолютно черное тела (АЧТ)

- Абсолютно черных тел в природе не существует.
- Сажа или платиновая чернь имеют поглотительную способность близкую к единице, но только в ограниченном интервале частот.
- Хорошей моделью такого тела является почти замкнутая полость, снабженная малым отверстием,
- Испускательная способность такого устройства очень близка к  $f(\omega, T)$  причем  $T$  означает температуру стенок полости. Луч, попавший внутрь, после многократных отражений обязательно поглощается, причём луч любой частоты.



В теоретических работах:  $f(\omega, T) \Leftrightarrow f(\omega, T) = \frac{2\pi c}{\omega^3} \varphi(\lambda, T) = \frac{\lambda^2}{2\pi c} \varphi(\lambda, T)$   
В экспериментальных:  $\varphi(\lambda, T)$

# Законы теплового излучения

## 2. Законы Вина

- законы опытные (экспериментальные).

Вильгельм Вин – лауреат нобелевской премии за ТИ в 1911 году.

### Первый закон Вина

*Длина волны, соответствующая  
максимальному значению  
спектральной плотности излучений АЧТ,  
обратно пропорциональна его  
температуре - закон смещения Вина*

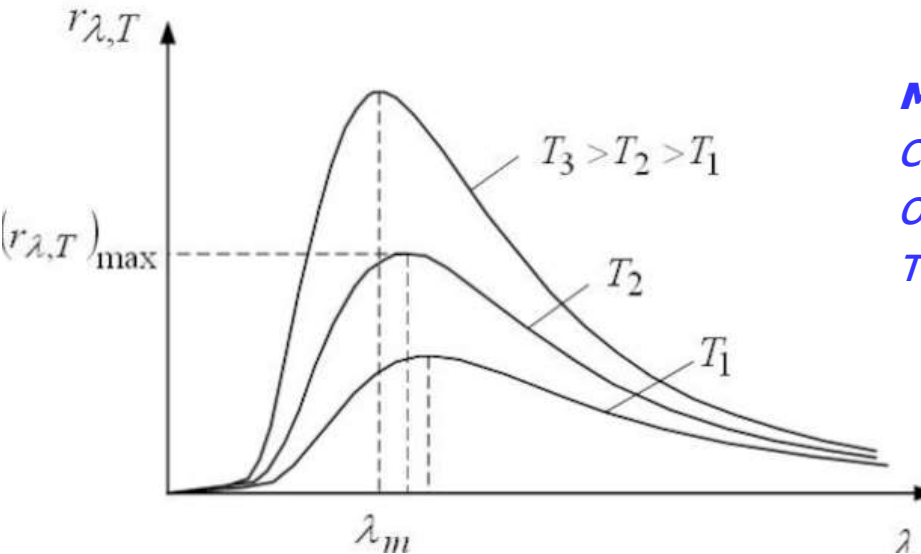
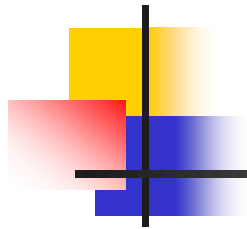
$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

*b = постоянная Вина,*

$$b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

*Постоянная Вина соответствует длине волны при  $T=1\text{К}$ .*

**Закон смещения показывает смещение максимума в сторону коротких волн при увеличении температуры.**



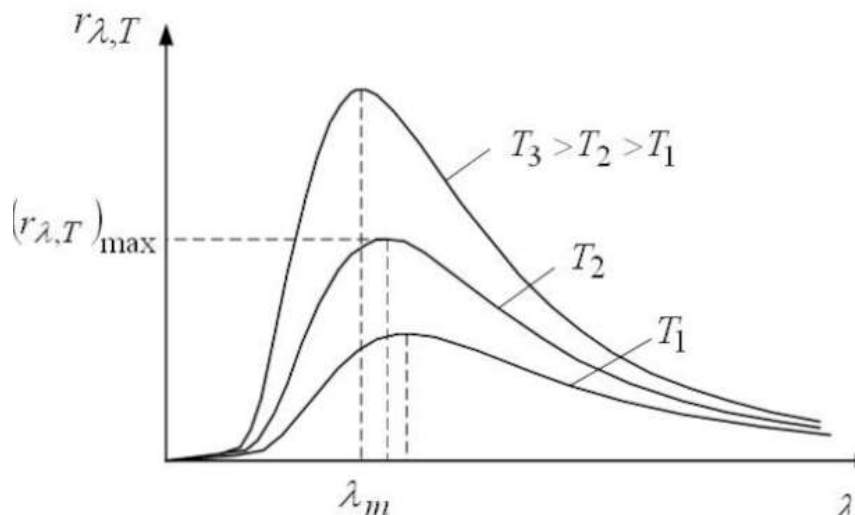
# Законы теплового излучения

## Второй закон Вина

Второй закон Вина утверждает: *максимальная* *испускательная способность АЧТ пропорциональна пятой степени его температуры:*

$$(r_{\lambda,T}^0)_{\max} = c \cdot T^5$$

$$c = 1.3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \text{К}^5} \text{ — вторая постоянная Вина}$$





# Законы теплового излучения

Позднее из общих соотношений термодинамики и электродинамики Вин получил следующее выражение для функции Кирхгофа:

$$f(\omega, T) = \omega^3 \varphi\left(\frac{\omega}{T}\right).$$

Из этой формулы следует закон Стефана-Больцмана:

$$R(T) = T^4 \int_0^\infty \frac{\omega^3}{T^3} \varphi\left(\frac{\omega}{T}\right) d\frac{\omega}{T} = \sigma T^4.$$

Для Солнца максимум энергетической светимости приходится на  $\lambda=470$  нм. Если Солнце считать АЧТ, то из закона Вина следует, что температура поверхности Солнца приблизительно 6000К.

Если считать, что кожа человека близка по свойствам к АЧТ, то максимум соотношений термодинамики им спектра излучения при температуре 36°C ( 309К) лежит в диапазоне ИК спектра (9400нм) .

Пусть поверхность тела приблизительно  $1 \text{ м}^2$  , разность температур со средой 10К, тогда поверхность тела излучает приблизительно 60 Вт, только в ИК диапазоне, на этом основаны приборы ночного видения.



# Законы теплового излучения

## 3. Закон Стефана-Больцмана

Австрийский физик Иозеф Стефан экспериментально и Людвиг Больцман теоретически установили: если вычислить площадь под кривой  $r_{\omega,T}^0 = f(T)$  равна энергетической светимости абсолютно чёрного тела:

$$R_T^0 = \int_0^\infty r_{\omega,T}^0 d\omega = \sigma T^4$$

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

Излучение АЧТ определяется его абсолютной температурой.

Для серых тел:  $R_T = \gamma \sigma T^4$ , где  $\gamma$  – коэффициент серости,  $\gamma < 1$ .

Законы Вина и Сьефана-Больцмана хорошо согласуются с экспериментальными данными.





# Абсолютно черное тело (АЧТ)

## Абсолютно черное тело

Температурный интервал в <a href="#">Кельвинах</a>	Цвет
до 1000	Красный
1000—1500	Оранжевый
1500—2000	Жёлтый
2000—4000	Бледно-жёлтый
4000—5500	Желтовато-белый
5500—7000	Чисто белый
7000—9000	Голубовато-белый
9000—15000	Бело-голубой
15000— $\infty$	Голубой



# Законы теплового излучения

## Формула Рэлея-Джинса

Следующая попытка объяснить кривых теплового излучения, исходя из законом классической физики и опираясь на закон Вина была сделана Рэлеем и Джинсом. Из уравнений Максвелла для ЭМП следует, что с энергетической точки зрения «чёрное» излучение в полости эквивалентно системе из бесконечно большого числа не взаимодействующих друг с другом гармонических излучателей ( радиационных осцилляторов), причем собственные частоты последних равны частотам соответствующих компонент чёрного излучения. Методами статистической физики было получено следующее выражение для функции Кирхгофа:

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \langle \varepsilon \rangle.$$

Где  $\frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2}$  - величина, пропорциональная плотности радиационных осцилляторов,  $\langle \varepsilon \rangle$  - средняя энергия осциллятора. По классическому закону о равномерном распределении энергии по степеням свободы ,  $\langle \varepsilon \rangle = kT$ , формула принимает вид:



# Законы теплового излучения

## 4. Формула Рэлея-Джинса

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT$$

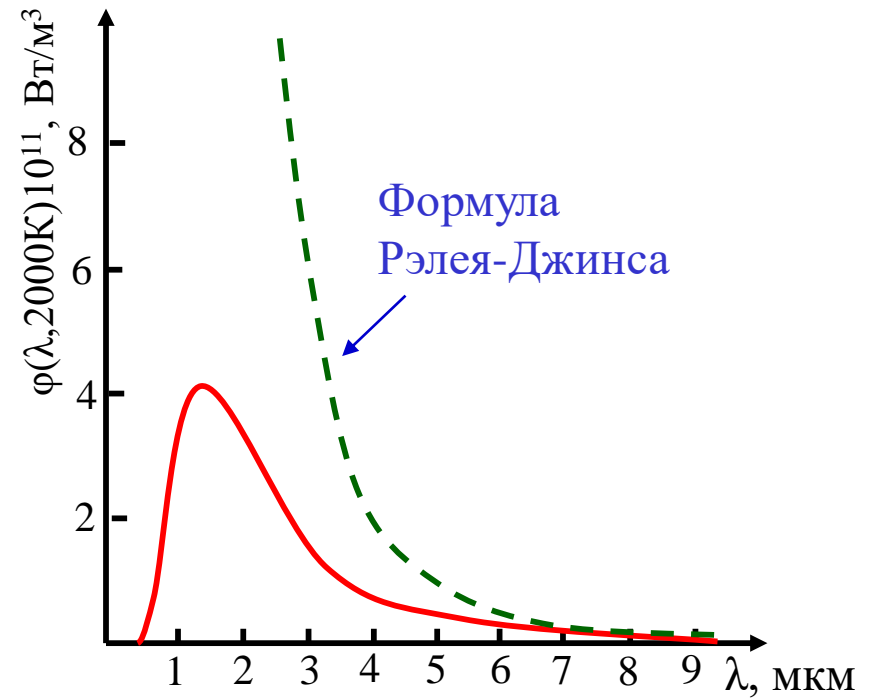
Заряд осциллятора, все частные свойства осциллятора выпали из формулы: ведь если мы достигли равновесия с одним осциллятором, то должно быть равновесия и с любым другим осциллятором. Полученная формула достаточно хорошо согласуется с экспериментом в области малых частот, но резко расходится с ним в коротковолновой части излучения, что видно на графике. Однако, при  $\omega \rightarrow \infty$  и  $f(\omega, T) \rightarrow \infty$ , хотя и  $f(\omega, T) \rightarrow 0$ .

*Рост излучения до бесконечности при переходе к ультрафиолетовой или рентгеновской частям спектра назвали ультрафиолетовой катастрофой.*

Классический подход для описания теплового излучения привел к парадоксальному результату.

# Тепловое излучение

## Формула Рэля-Джинса





# Законы теплового излучения

## 5. Формула Планка

Все попытки описать ТИ зашли в тупик, классическая физика оказалась несостоятельной.

В 1900 году немецкий физик Макс Планк выдвинул гипотезу о том, что энергия осцилляторов может принимать только определенные дискретные значения, равные целому числу элементарных порций энергии  $E_0$  - *эти порции он назвал квантами* (quantum – количество),  $E_0 \sim \nu$ , где  $\nu$  – частота излучения.

$$E_0 = h\nu = \hbar\omega$$

$h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Дж · с - постоянная Планка,

$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – приведенная постоянная Планка.

Тогда энергия может быть записана:  $E = nE_0 = n\hbar\omega$  ( $n = 0, 1, 2 \dots$ ).

Идет обмен квантами между полем излучения и телом осциллятора.



# Законы теплового излучения

В состоянии равновесия распределение колебаний по значениям энергии должно подчиняться закону Больцмана, то есть вероятность того или иного значения величины энергии осциллятора может быть определено:

$$\omega = \omega_0 \exp\left(-\frac{n\hbar\omega}{kT}\right), \text{ где } n=0,1,2\dots$$

Тогда можно найти среднюю энергию:

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}$$

Тогда из формулы Рэля-Джинса можно получить формулу Планка:

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \langle E \rangle = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}$$

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}$$



# Законы теплового излучения

В состоянии равновесия распределение колебаний по значениям энергии должно подчиняться закону Больцмана, то есть вероятность того или иного значения величины энергии осциллятора может быть определено:

$$\omega = \omega_0 \exp\left(-\frac{n\hbar\omega}{kT}\right), \text{ где } n=0,1,2\dots$$

Тогда можно найти среднюю энергию:

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}$$

Тогда из формулы Рэлея-Джинса можно получить формулу Планка:

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \langle E \rangle = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}$$

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}$$



# Законы теплового излучения

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{kT}\right) - 1}$$

Эта формула хорошо согласуется с экспериментом во всех диапазонах частот ( длин волн) от нуля до бесконечности.

Из этой формулы можно получить все законы:

1. Закон Вина виден явно:  $f(\omega, T) = \omega^3 F\left(\frac{\omega}{T}\right)$ ,
2. При малых частотах :  $\hbar \omega \ll kT$  – переход к закону Рэлея-Джинса

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar \omega}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{kT}\right) - 1} \approx \frac{\hbar \omega}{1 + \frac{\hbar \omega}{kT} - 1} = kT$$

$$r_{\omega, T}^0 = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT$$





# Законы теплового излучения

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}$$

При больших частотах :  $\hbar\omega \gg kT$  –

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1} \approx \hbar\omega e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}}$$
$$r_{\omega, T}^0 = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2c^2} e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}}$$

При увеличении частоты функция уменьшается, чего нет в формуле Рэля-Джинса.



# Законы теплового излучения

---

Вывод законов Стефана – Больцмана и  
Смещения Вина из формулы Планка

$$R_T^* = \int_0^\infty r_{\omega,T}^* d\omega = \frac{\hbar}{4\pi c^2} \left( \frac{kT}{\hbar} \right)^4 \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^2 k^4}{60 c^2 \hbar^3} T^4 = \sigma T^4$$

$$\frac{d r_{\lambda,T}^*}{d \lambda} = 0, \quad T \cdot \lambda_m = \frac{2\pi \hbar c}{4,965 k} = b$$



# Оптическая пирометрия

*Оптическая пирометрия* – это метод бесконтактного (дистанционного) измерения температуры нагретых тел.

Приборы для измерения температуры бесконтактным методом называются - *пирометры*. С их помощью можно измерять температуру звезд, Солнца, расплавленного металла, нити накаливания ламп и т.д.

Так, при комнатной температуре  $\lambda_{max}$  приходится на далёкую ИК- область и не регистрируется человеческим глазом, так что излучение тела воспринимается как тепло. При повышении температуры появляется видимое свечение, от вишнёво-красного при более низкой температуре до белого. Спектральные свойства излучения нагретых тел широко используются в науке и технике для бесконтактного определения температуры. На спектральный состав и интенсивность излучения сильно влияет отличие свойств тела от АЧТ. Степень серости исследуемых тел, как правило известна и обычно зависит от частоты излучения.

Вводят три типа температуры:



# Оптическая пирометрия

Три типа температур:

1. **Истинная температура** -  $T_{\text{и}}$ .
2. **Цветовая** - температура, определяется по положению максимума функции Планка (закон Вина). Цветовая температура совпадает с истинной температурой тела.  $T_{\text{ц}} = \frac{b}{\lambda_m} = T_{\text{и}}$
3. **Яркостную температуру** - измеряют по испускательной способности:  $r_{\lambda,T} = \alpha_T r_{\lambda,T}^0$ , для чего надо знать коэффициент черноты тела  $\alpha_T$  (закон Стефана Больцмана). Для выделения излучения с данной длиной волны используется светофильтр.  $T = \frac{T_{\text{я}}}{\ln \alpha_T}$ ,  $T_{\text{я}} < T_{\text{ист}}$
4. **Радиационная температура** - измеряют по энергетической светимости серого тела:  $R_T = \alpha_T R_T^0$ .  $T_{\text{рад}} = T \sqrt[4]{\alpha_T}$ ,  $T_{\text{рад}} < T_{\text{ист}}$



# Тепловое излучение

## Тепловое излучение

**Излучение тел, вызванное их нагреванием**

**Существует при любой температуре**

- при низких  $T$  – длинноволновые (ИК) ЭМ волны
- при высоких  $T$  – короткие (УФ) ЭМ волны

**Может находиться в равновесии с излучаемым его телом**

## Тепловое равновесие

$$\Delta W_{\text{излуч}} = \Delta W_{\text{поглощ}}$$

**тело излучает**



**температура тела ↓**

## Источник излучения

**Ускоренно движущиеся заряженные частицы**

**Следует отличать тепловое излучение от люминесценции**



## Люминесценция

**Свечение тел, вызванное ВНЕШНИМ воздействием**

**Существует, пока есть внешнее воздействие**



# Характеристики теплового излучения

**Спектральная  
плотность  
энергетической  
светимости**

физическая величина, численно равная  
**энергии излучения с единицы  
поверхности за единицу времени  
в единичном интервале частот**

$$E_{\nu,T} = \frac{dW_{изл}}{d\nu}$$

**Энергетическая  
светимость**

**энергия излучения с единицы  
поверхности за единицу времени  
в интервале частот от 0 до  $\infty$**

$$E_T = \int_0^{\infty} E_{\nu,T} d\nu$$

$$dW_{излуч} = E_{\nu,T} d\nu$$

**Поглощательная  
способность  
(спектральная  
поглощательная  
способность)**

**отношение поглощенной энергии  
к той энергии, которая подходит  
к данной поверхности**

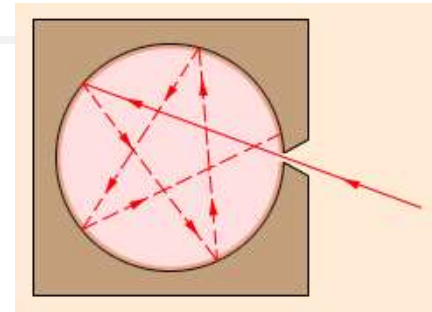
$$0 \leq A_{\nu,T} \leq 1$$

$$A_{\nu,T} = \frac{dW_{погл}}{dW_{пад}}$$

# Абсолютно черное тело

**Абсолютно  
черное тело  
(АЧТ)**

**Тело, обладающее свойством  
поглощать все падающее  
на его поверхность ЭМ излучение  
любого спектрального состава**



**идеализация,  
модель**

**примеры:**

- Вход в пещеру
- Сажа
- Черный бархат
- Окно извне
- Торец трубы
- Отверстие в замкнутой полости

$$\varepsilon_{\nu, T} = \frac{dW_{\text{изл}}}{d\nu}$$

**спектральная плотность  
энергетической светимости АЧТ**

$$\varepsilon_T = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\nu, T} d\nu$$

**энергетическая светимость АЧТ**

$$A_{\nu, T} = \frac{dW_{\text{поглощ}}}{dW_{\text{пад}}} = 1$$

**поглощательная способность АЧТ**

# Закон Кирхгофа

**Спектральная плотность энергетической светимости**

**Энергия излучения с единицы поверхности за единицу времени в единичном интервале частот**

**Поглощательная способность**

**Отношение поглощенной энергии к той энергии, которая подводится к данной поверхности**

$$\frac{E_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = \varepsilon_{\nu,T}$$

$$E_{\nu,T} = \frac{dW_{изл}}{d\nu}$$

**функция Кирхгофа**

$$A_{\nu,T} = \frac{dW_{погл}}{dW_{над}}$$

**НЕ зависит от природы тела**

**является для всех тел одной и той же функцией частоты (длины волны) и температуры**

**Отношение спектральной плотности энергетической светимости любого тела к его поглощательной способности есть величина, равная спектральной плотности энергетической светимости АЧТ (функция Кирхгофа)**





# Следствия из закона Кирхгофа

1. Если при какой-либо температуре тело не поглощает энергию, то оно при этой температуре и не излучает  $A_{\nu,T}=0$
2. Максимальной спектральной плотностью энергетической светимости обладает абсолютно черное тело  $A_{\nu,T}=1$

излучение

$$\frac{E_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = \epsilon_{\nu,T}$$

поглощение

$$E_{\nu,T} = \epsilon_{\nu,T} A_{\nu,T}$$

# Законы теплового излучения

1893 – Вин впервые установил вид функции Кирхгофа

$$\varepsilon_{\nu,T} = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

→ некоторая неизвестная Вину функция

Закон Вина

1879 – эксперимент – Стефан

1884 – теоретическое обоснование – Больцман

Закон Стефана-Больцмана

$$\varepsilon_T = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$$

постоянная Стефана-Больцмана

Спектральная плотность энергетической светимости пропорциональна температуре в 4 степени

Энергетическая светимость АЧТ численно равна энергии излучения с единицы поверхности за единицу времени

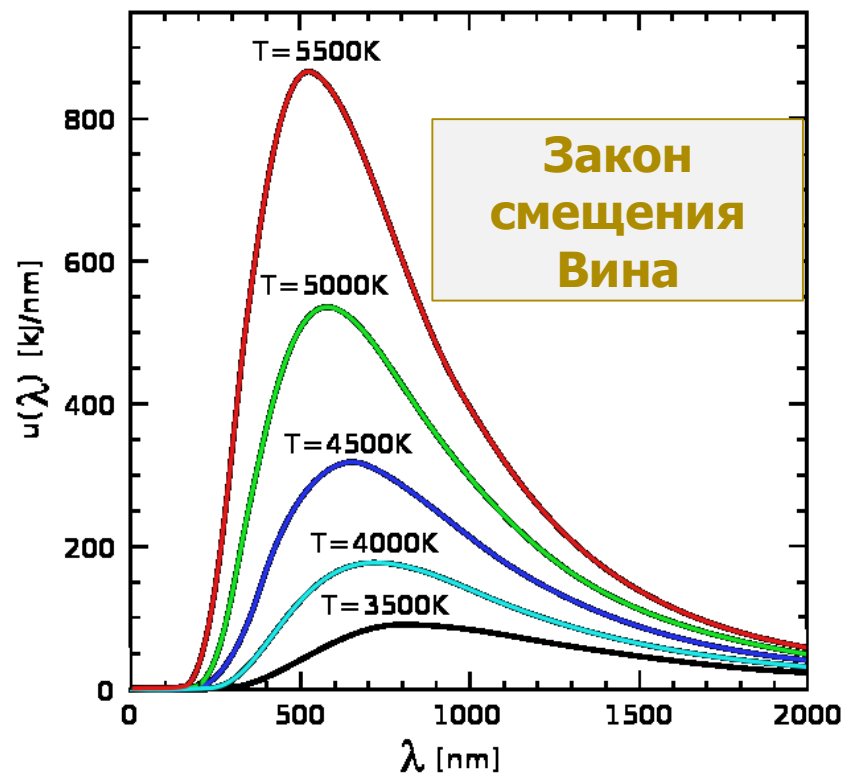
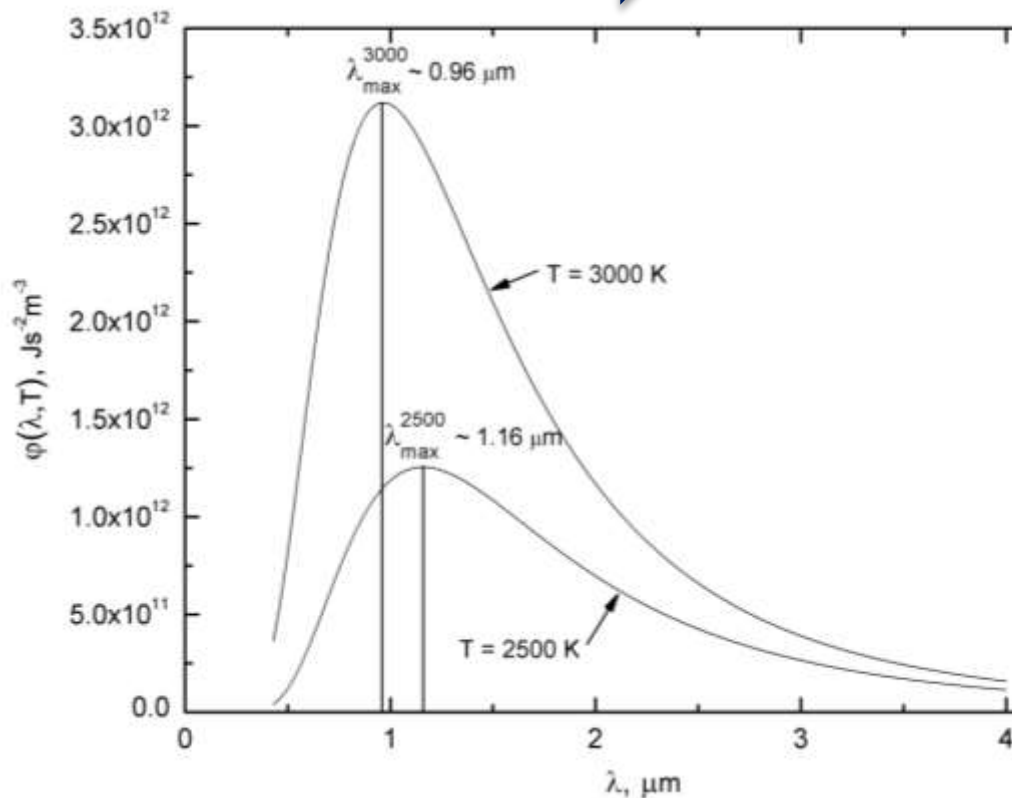
$$W = \sigma T^4 S t$$

энергия излучения с площади  $S$  за время  $t$

# Закон смещения Вина

$$\lambda_m T = b$$

Из закона Вина



**Закон  
смещения  
Вина**

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ M} \cdot \text{K}$$

**При повышении температуры  $\lambda$ , соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости смещается в сторону коротких длин волн**

# Ультрафиолетовая катастрофа

## Определение функции Кирхгофа

Исходя из законов статистической физики о равнораспределении по степеням свободы

$$\varepsilon_{\nu, T} - ?$$



## Формула Рэля-Джинса

$$\varepsilon_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

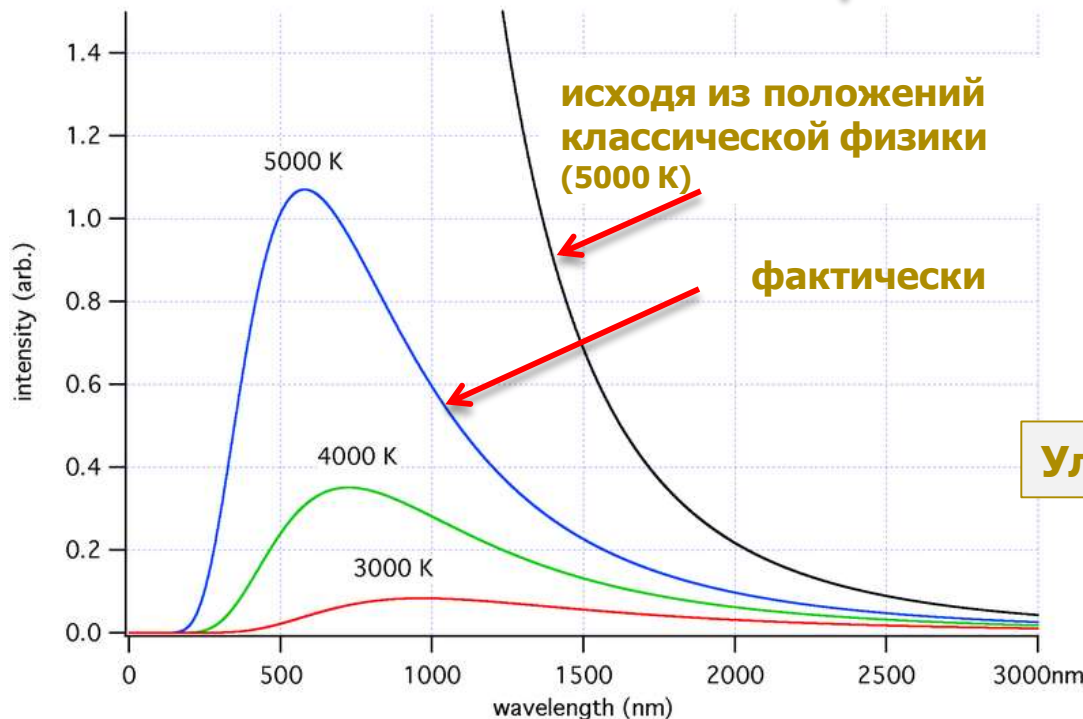
Энергия, излучаемая с 1 м<sup>2</sup> за 1 с в единичном интервале частот по всем частотам

$$\varepsilon_T = \int_0^{\infty} \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot kT d\nu = \infty$$

удовлетворительно описывает излучение только в области длинных волн

## Ультрафиолетовая катастрофа

Энергия, излучаемая с любой площади НЕ может быть ∞ большой величиной



1900 г.

# Квантовая гипотеза

Макс Планк

Предложил согласующееся с опытными данными выражение для спектральной плотности энергетической светимости черного тела



Квантовая  
гипотеза

атомы излучают энергию не непрерывно, а определенными порциями — **квантами**, причем энергия кванта пропорциональна частоте колебания

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

$h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с  
постоянная Планка

$$\varepsilon_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Функция  
Кирхгофа  
по Планку

---

## Исследовательские задания:

- Опишите на основе методологии научного исследования работы Планка по изучению излучения абсолютно черного тела
- Исследуйте зависимость спектральной плотности энергетической светимости от частоты по формуле, полученной Планком на основе квантовой гипотезы

# Законы теплового излучения

## с точки зрения квантовой физики

$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{kT} - 1}$$

**Функция  
Кирхгофа  
по Планку**



**законы  
теплового  
излучения**

**1. Закон Вина**

$$\varepsilon_{\nu,T} = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

**2. Формула  
Рэля-Джинса**

полагая

$$h\nu \ll kT$$



$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

**3. Закон  
смещения Вина**

$$\frac{d\varepsilon_{\nu,T}}{d\nu} = 0$$



$$\frac{\nu_m}{T} = b_1$$

$$\lambda_m T = b$$

**4. Закон  
Стефана-Больцмана**

$$\varepsilon_T = \int_0^\infty \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{kt} - 1} = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \left| \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^5} = \sigma \right| = \sigma T^4$$