

Лекция 6. Тепловое излучение.

Тепловое излучение



Тепловое излучение – называется испускание электромагнитных волн нагретыми телами за счет их внутренней энергии.

Все тела излучают энергию при температуре выше **0 К**.

Колебания ионов дает излучение с низкими частотами (инфракрасное) .

Движение электронов, входящих в состав атомов или молекул, создает высокочастотное излучение (видимое и ультрафиолетовое).

Излучение сопровождается потерей энергии телом.

Люминесценция (от лат. lumen — «свет») — свечение вещества, связанное с преобразованием поглощаемой энергии в световое излучение.

Тепловое излучение



Виды излучений:

- Фотолюминесценция (под действием электромагнитное излучения видимого, ультрафиолетового или инфракрасного диапазона).
- Электролюминесценция (под действием электрического поля).
- Хемилюминесценция (под химическим воздействием, или при протекании химической реакции).
- Катодолюминесценция (под действием быстрых электронов (катодные лучи)).
- Тепловое

Тепловое излучение - равновесное.

Все другие виды излучений – неравновесные.

Равновесное тепловое излучение однородно, то есть его плотность энергии одинакова во всех точках внутри полости, где оно заключено

Тепловое излучение



Светящееся вещество называется люминофором.

Тепловое излучение бывает при любой температуре,

человек не ощущает его при меньшей температуре, чем температура тела,

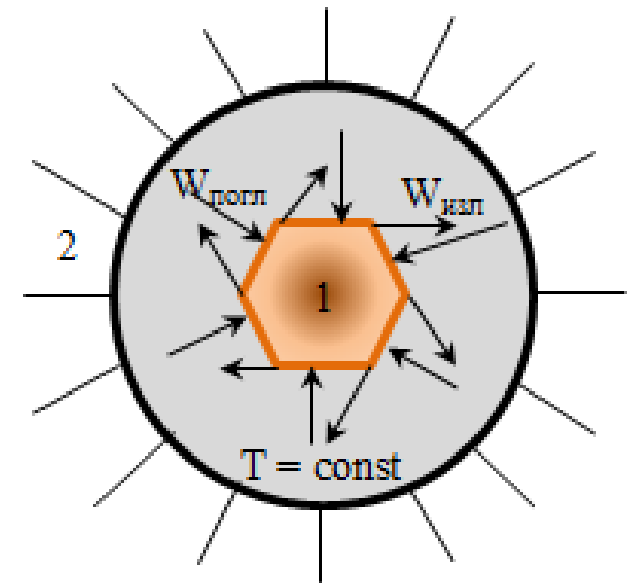
при $\lambda > 0,8$ мкм излучение не видно глазу человека.

Тепловое излучение

Пусть нагретое (излучающее) тело помещено в полость, ограниченную идеально отражающей оболочкой.

Тело излучает и поглощает обратно часть излученной им энергии отраженной от стенок оболочки.

Наступит момент, когда тело в единицу времени будет столько же поглощать энергии, сколько и излучать $T = \text{const}$.



Тепловое излучение

Поток излучения Φ_e физическая величина, равная количеству энергии, излучаемой нагретым телом со всей поверхности в единицу времени:

$$\Phi_e = \frac{dW}{dt}, \quad [\text{Дж} / \text{с} = \text{Вт}.]$$

Энергетическая светимость (излучательность) тела R_T - энергия, излучаемая в единицу времени с единицы площади нагретого тела во всем интервале длин волн ($0 < \lambda < \infty$).

$$R_T = \frac{d\Phi_e}{dS} = \frac{d^2W}{dSdt}, \quad [\text{Вт} / \text{м}^2].$$

Поток излучения и энергетическая светимость – функции температуры.

Тепловое излучение

спектральная плотность энергетической светимости (излучательности) $r_{\lambda,T}$

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_T}{d\lambda}, \left[\frac{Вт}{м^3} \right].$$

Связь между энергетической светимостью и излучательностью

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda.$$

Тепловое излучение

Поглощательная способность (коэффициент поглощения) тела $\alpha_{\lambda,T}$ безразмерная физическая величина, показывающая, какая доля энергии, падающей в единицу времени на единицу поверхности тела в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, им поглощается

$$\alpha_{\lambda,T} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}}$$

параметры $\epsilon_{\lambda,T}$ и $\alpha_{\lambda,T}$ твердых тел зависят не только от длины волны и температуры, но и от химического состава тела и состояния его поверхности.

Тепловое излучение



Параметр $\alpha_{\lambda,T}$ не может быть больше единицы.

Абсолютно черное тело – тело полностью поглощающее падающее на него излучение всех длин волн ($\alpha_{\lambda,T} = 1$).

Абсолютно белое тело – тело полностью отражающее упавшее на него излучение всех длин волн ($\alpha_{\lambda,T} = 0$).

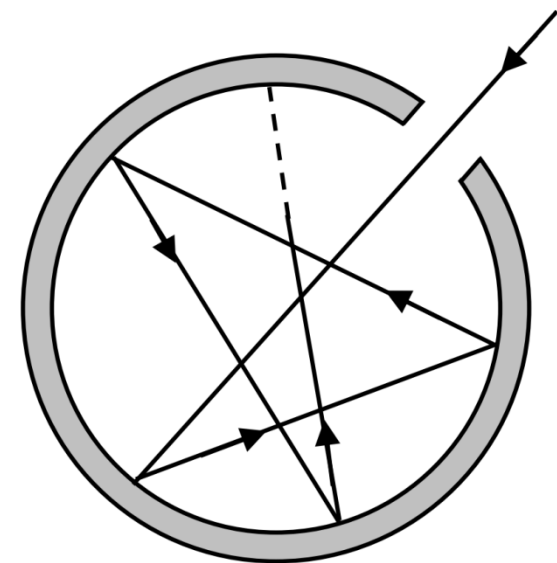
Тело, для которого поглощательная способность одинакова для всех длин волн и зависит только от температуры, называют серым телом: $\alpha_{\lambda,T} = \alpha_T = \text{const}$.

Тепловое излучение

Рассмотрим небольшое отверстие в непрозрачной стенке замкнутой плоскости.

Луч света, попадающий внутрь полости через отверстие, претерпевает многократные отражения от стенок полости, поглощается ими и практически полностью остается внутри полости.

Ворсистые ткани обладают большей поглощательной способностью, чем гладкие.



В природе не существует абсолютно черных тел!

Тепловое излучение

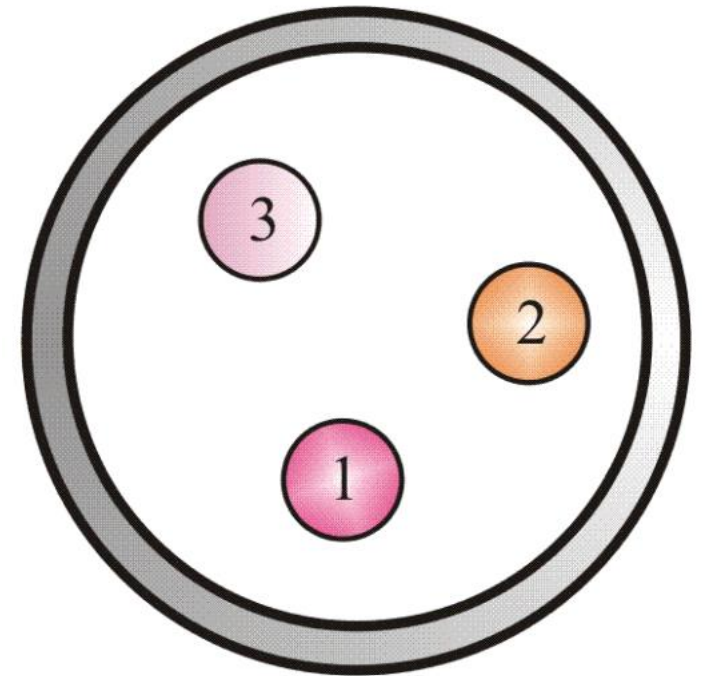
Пусть внутри замкнутой оболочки находятся три тела.

Тела находятся в вакууме, следовательно обмен энергией может происходить только за счет излучения.

Система придет в состояние теплового равновесия (все тела и оболочка будут иметь одну и ту же температуру).

Тело, обладающее большей испускательной способностью, теряет в единицу времени и больше энергии, но $T = \text{const}$, следовательно это тело должно обладать и большей поглощающей способностью:

$$\left(\frac{r_{v,T}}{\alpha_{v,T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{v,T}}{\alpha_{v,T}} \right)_2 = \left(\frac{r_{v,T}}{\alpha_{v,T}} \right)_3 = \dots = \text{const}.$$



Закон Кирхгофа

Закон Кирхгофа - отношение испускательной к поглотительной способности не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты и температуры.

$$\frac{r_{\nu, T}}{\alpha_{\nu, T}} = f(\nu, T),$$

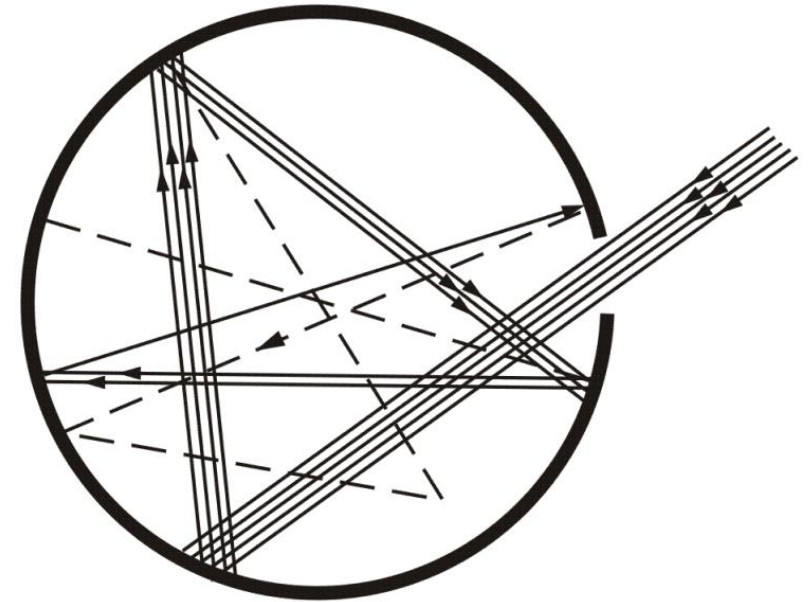
$f(\nu, T)$ – универсальная функция Кирхгофа.

Для абсолютно черного тела $\alpha_{\nu, T} \equiv 1$, следовательно, для него $r_{\nu, T} = f(\nu, T)$, т.е. универсальная функция Кирхгофа есть не что иное, как испускательная способность абсолютно черного тела.

Закон Кирхгофа

Полость с малым отверстием очень близка по своим свойствам к абсолютно черному телу. Луч, попавший внутрь, после многократных отражений обязательно поглощается, причём луч любой частоты.

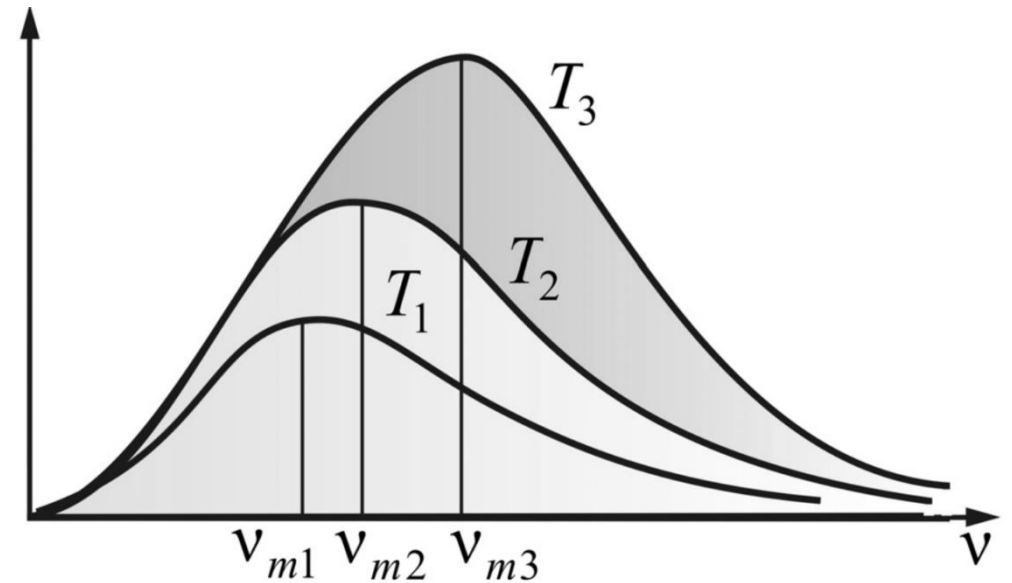
Испускательная способность такого устройства (полости) очень близка к $f(\nu, T)$. Таким образом, если стенки полости поддерживаются при температуре T , то из отверстия выходит излучение близкое по спектральному составу к излучению абсолютно черного тела при той же температуре.



Закон Кирхгофа

Кривые одинаковы для всех тел.

Максимум излучения (излучательной способности)
с увеличением температуры смещается в сторону
больших частот.



Экспериментальный вид функции $f(\nu, T)$
при разных температурах $T_3 > T_2 > T_1$

Закон Стефана–Больцмана

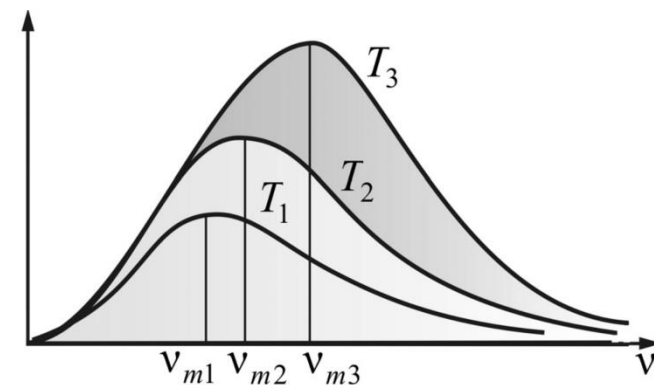
Закон Стефана - Больцмана – энергия, излучаемая абсолютно черным телом с единицы поверхности в единицу времени пропорциональна четвёртой степени абсолютной температуры этого тела.

Площадь под кривой $r_{\nu,T} = f(T)$ равна энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$R_T = \sigma T^4$$

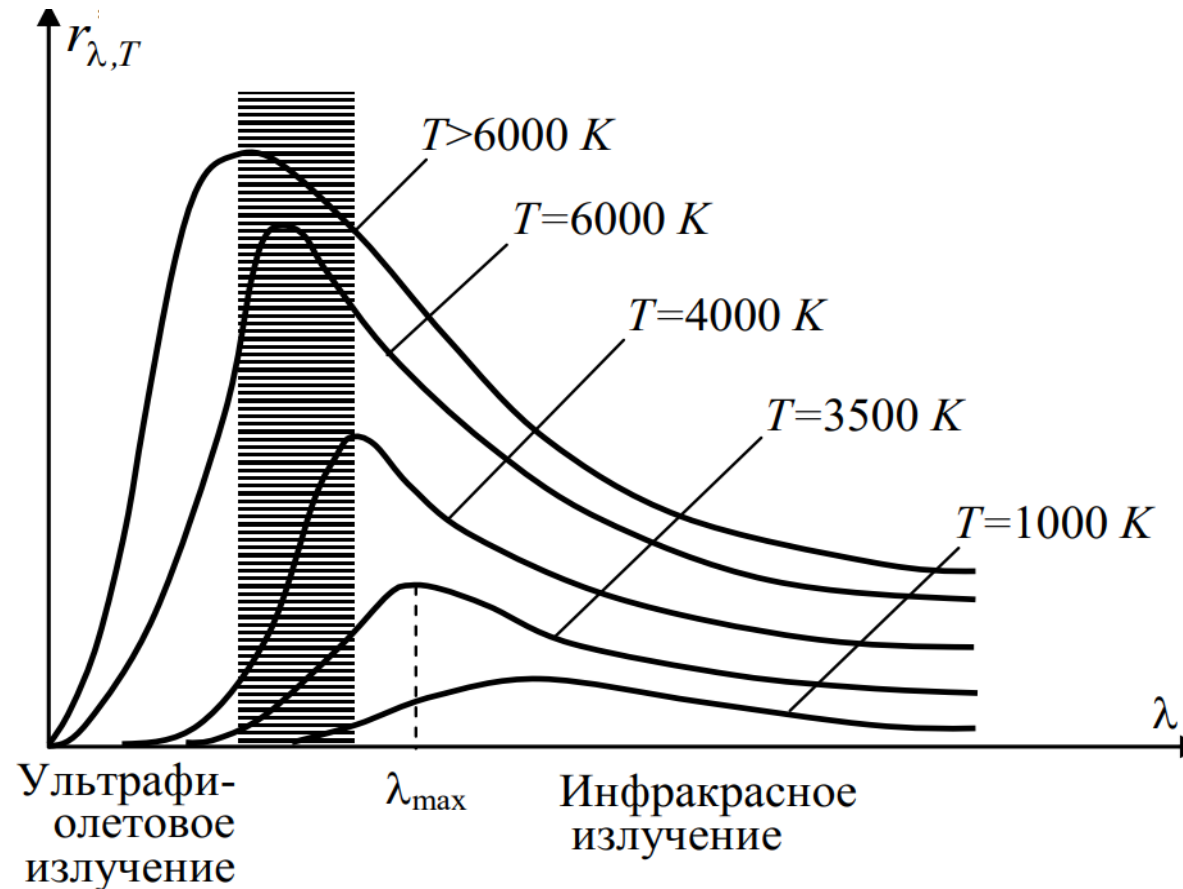
- закон Стефана–Больцмана.

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



Закон Вина

Экспериментально была получена система кривых, дающих распределения $r_{\lambda,T}$ по длинам волн при фиксированных температурах ($T = \text{const}$).



Закон Вина



Выводы из анализа кривых:

- Зависимость $r_{\lambda,T}$ от длины волны изображается непрерывной кривой, обращающейся в нуль при малых и больших длинах волн.
- Энергия излучения абсолютно черного тела распределена по длинам волн неравномерно: кривая имеет ярко выраженный максимум.
- По мере повышения температуры тела максимум кривой смещается в область коротких длин волн.
- Площадь, ограниченная кривой и осью абсцисс, равна энергетической светимости абсолютно черного тела R_T .

Закон Вина

Зависимость длины волны λ_{\max} , соответствующей максимуму функции $r_{\lambda,T}$ от температуры, устанавливающая смещение λ_{\max} в коротковолновый диапазон длин волн при увеличении температуры тела – **закона смещения Вина**

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

где $b = 2.89 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

Закон Рэлея — Джинса



Рэлей на основе статистической физики воспользовавшись классическим законом равномерного распределения энергии по степеням свободы рассмотрел равновесное излучение в замкнутой полости с зеркальными стенками как совокупность стоячих электромагнитных волн (осцилляторов).

Закон Рэлея — Джинса



Релей использовал закон о равномерном распределении энергии между степенями свободы системы, находящейся в равновесии.

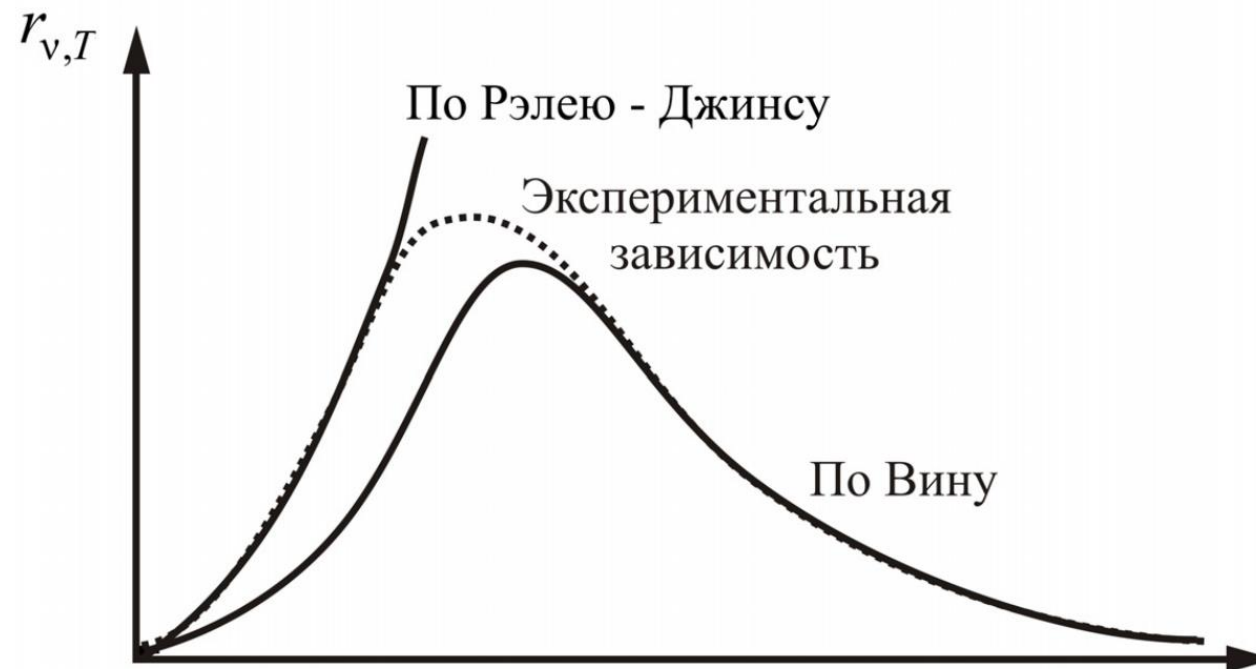
Каждой стоячей волне со своей собственной частотой соответствует своя колебательная степень свободы (на одну колебательную степень свободы приходится $E = kT$, то есть сумма потенциальной $\frac{1}{2}kT$ и кинетической $\frac{1}{2}kT$, в среднем). То есть каждый осциллятор в среднем имеет энергию, равную kT

Закон Рэлея — Джинса

В 1905 году Джинс уточнил расчеты Рэлея и окончательно получил:

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

- формула Рэлея–Джинса.



Закон Рэлея — Джинса



Формула Рэлея — Джинса справедлива только в области малых частот и не согласуется с законом Вина.

Попытка получить из формулы Рэлея–Джинса закон Стефана–Больцмана ($R \sim T^4$) приводит к неопределенности :

$$R = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty$$

Этот результат получил название «**ультрафиолетовая катастрофа**».

В итоге: Получено две формулы, описывающие излучение абсолютно черного тела: одна для коротковолновой части спектра (формула Вина), другая – для длинноволновой (формула Рэлея–Джинса).

ультрафиолетовая катастрофа



Основываясь на классической теории излучения света, считали, что интенсивность излучения пропорциональна частоте излучения и температуре излучающего тела. Отсюда следовало, что при росте температуры излучающего тела интенсивность света в ультрафиолетовой части спектра уходит в бесконечность. А это означало, что полная мощность излучения нагретого тела должна была быть бесконечной, что противоречило экспериментальным наблюдениям. Этот парадокс и был назван ультрафиолетовой катастрофой.

Такие выводы были сделаны на основе данных полученных при температурах тела, для которых максимум интенсивности света был в средней части спектра. Однако при дальнейших исследованиях с более высокой температурой и с более совершенной измерительной аппаратурой обнаружилось, что при дальнейшем росте температуры максимум интенсивности излучения перестает смещаться в сторону ультрафиолета. Что противоречило классическим представлениям о процессе излучения света нагретым телом.

Нужна была более реалистичная формула распределения интенсивности излучения света от роста температуры излучающего тела.

Формула Планка. Гипотеза о квантах.



Планк связал энергию гармонического осциллятора не с его температурой а с его энтропией

Принцип Больцмана $S = k \ln W$

Термодинамическая вероятность (W) – число возможных микроскопических комбинаций, совместимое с данным состоянием в целом.

Однако, такой процесс подсчета возможен, если энергия будет принимать не любые непрерывные значения, а лишь **дискретные значения**, кратные некоторой единичной энергии. Эта энергия колебательного движения должна быть пропорциональна частоте.

Энтропия (S) - это понятие, которое описывает степень беспорядка или хаотичности системы. В простом смысле, энтропия показывает, сколько информации требуется для описания состояния системы.

Формула Планка. Гипотеза о квантах.

Энергия осциллятора должна быть целым кратным некоторой единицы энергии, пропорциональной его частоте.

$$E_n = nh\nu, \quad \text{где } n = 1, 2, 3, \dots$$

Минимальная порция энергии: $E = h\nu = \hbar\omega$, где $h = 6,62 \times 10^{-34}$ — Постоянная Планка

$$\hbar = h / 2\pi \text{ и } \omega = 2\pi\nu.$$

**равномерного распределения энергии между
осцилляторами не может быть!**

Формула Планка. Гипотеза о квантах.



Формулы Планка:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad \text{или} \quad r_{\lambda,T} = \frac{4\pi^2\hbar c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{2\pi\hbar c/kT\lambda} - 1}.$$

Из формулы Планка можно получить и формулу Рэля–Джинса, и формулу Вина, и закон Стефана–Больцмана.

Формула Планка. Гипотеза о квантах.



В области малых частот, т.е. при $h\nu \ll kT$

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} = 1 + \frac{h\nu}{kT} + \dots, \text{ поэтому } e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \approx \frac{h\nu}{kT},$$

Отсюда получаем формулу Рэлея–Джинса:

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

Формула Планка. Гипотеза о квантах.

В области больших частот, при $h\nu \gg kT$ единицей в знаменателе можно пренебречь, и получается формула Вина:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}.$$

Формулы планка можно получить закон Стефана–Больцмана:

$$R = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \int_0^{\infty} \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu.$$

Введем безразмерную переменную $x = \frac{h\nu}{kT}$, тогда $\nu = \left(\frac{kT}{h}\right)x$, $d\nu = \left(\frac{kT}{h}\right)dx$.

Подставим и проинтегрируем эти выражения, получим:

$$R = \frac{2\pi k^4}{c^2 h^3} T^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \boxed{\sigma T^4} \quad - \text{ получили закон Стефана- Больцмана.}$$

Формула Планка. Гипотеза о квантах.



- Формула Планка полностью объясняла законы излучения абсолютно черного тела.
- Гипотеза о квантах энергии была подтверждена экспериментально.

Для универсальной функции Кирхгофа Планк вывел формулу:

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

Где c – скорость света.

Формула Планка. Гипотеза о квантах.



Формула блестяще согласуется с экспериментальными данными по распределению энергии в спектрах излучения черного тела во всем интервале частот и температур. Теоретически вывод этой формулы М. Планк представил 14 декабря 1900 г. на заседании Немецкого физического общества. Этот день стал датой рождения **квантовой физики**.

Формула Планка. Гипотеза о квантах.



- Из формулы Планка, зная универсальные постоянные h , k и c , можно вычислить постоянную Стефана–Больцмана σ и Вина b .
- С другой стороны, зная экспериментальные значения σ и b , можно вычислить h и k (именно так было впервые найдено числовое значение постоянной Планка).

Вывод

Таким образом, формула Планка не только хорошо согласуется с экспериментальными данными, но и содержит в себе частные законы теплового излучения.

Формула Планка является полным решением основной задачи теплового излучения, поставленной Кирхгофом. Ее решение стало возможным лишь благодаря революционной квантовой гипотезе Планка.