Сегодня: *

Тема: Тепловое излучение

Содержание лекции:

1. **Введение**
2. **Закон Кирхгофа.Абсолютно черное тело**
3. **Закон Стефана-Больцмана. Закон Вина**
4. **Формула Релея- Джинса. Ультрафиолетовая катастрофа**

Продолжение на следующем слайде...

5. Гипотеза о квантах. Формула Планка

6. Тепловое излучение Вселенной

1. Введение

Любое нагретое тело излучает электромагнитные волны.

Чем выше температура тела, тем более короткие волны оно испускает.

В нагретых телах часть внутренней энергии вещества может превращаться в энергию излучения.

Это излучение называют *тепловым излучением*.

Тепловое излучение имеет непрерывный спектр.

Распределение энергии излучения тела по спектру зависит от температуры тела.

Для всех тел с увеличением температуры максимум энергии излучения смещается в коротковолновый участок спектра, а общая энергия излучения возрастает.

Излучение батареи центрального отопления ($T \approx 350$ К) имеет пик энергии в диапазоне невидимого инфракрасного излучения.

Поверхность Солнца ($T \approx 6 \cdot 10^3$ К) излучает энергию в диапазоне видимого света.

При ядерном взрыве ($T \approx 10^6$ К) большая доля энергии взрыва уносится коротковолновым рентгеновским и гамма-излучением.

Если нагретые излучающие тела окружить непроницаемой для излучения оболочкой (рис. 1), то по истечении некоторого времени в системе «излучающие тела + излучение в полости» установится термодинамическое равновесие.

Это означает: температуры всех тел выровняются, распределение энергии между телами и излучением не будет изменяться со временем.

Такое равновесное состояние системы устойчиво. Тепловое излучение изотропно и неполяризованно.

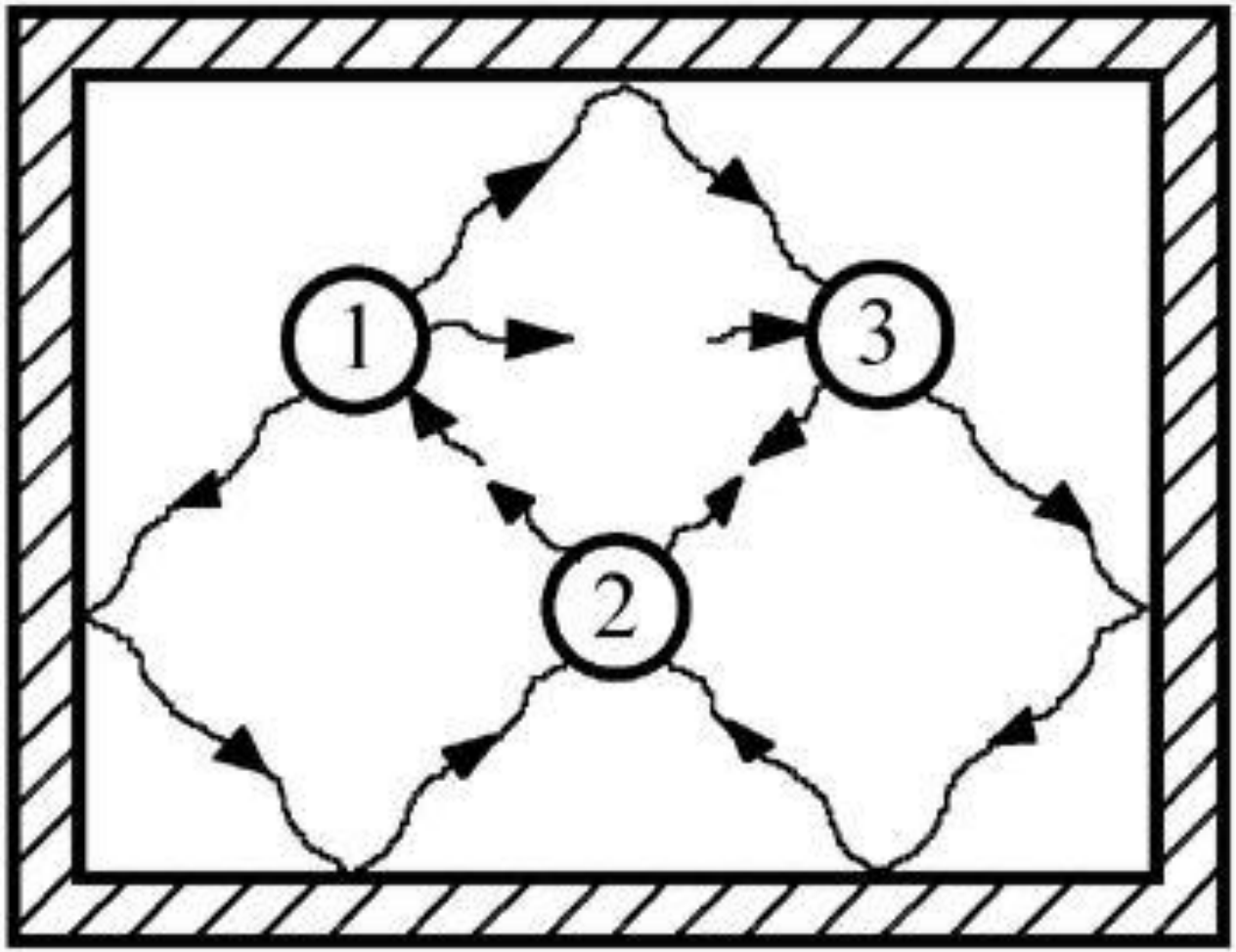


Рис. 1. В системе «излучающие тела + излучение в полости» установится термодинамическое равновесие

2. Закон Кирхгофа. Абсолютно черное тело.

Характеристики теплового излучения.

Энергия dR , излучаемая единицей поверхности нагретого тела в единицу времени в диапазоне частот от ω до $\omega + d\omega$ называется энергетической светимостью и определяется:

$$dR = rd\omega.$$

Энергию r, приходящуюся на единичный интервал частот, называют *испускательной способностью* тела.

r является функцией частоты и температуры

$$r = r(\omega, T).$$

Будем использовать принятое в теории теплового излучения обозначение: $r(\omega, T) \equiv r_{\omega, T}$.

Энергетическая светимость с единицы поверхности тела по всему диапазону частот

$$R = \int_0^\infty r_{\omega,T}\, d\omega$$

В системе СИ:

энергетическая светимость измеряется в Вт/м^2, испускательная способность - Дж/м^2.

Связь между испускательными способностями по шкале частот и шкале длин волн определяется следующим выражением

$$r_{\lambda,T} = r_{\omega,T} \cdot \frac{d\omega}{d\lambda} = r_{\omega,T} \cdot \frac{2\pi c}{\lambda^2}$$

Характеристикой процесса поглощения телами излучения служит *спектральная поглощательная способность* тела $a_{\omega,T}$, которая равна:

$$a_{\omega,T} = \frac{d\Phi'_{\omega}}{d\Phi_{\omega}}$$

где $d\Phi_{\omega}$ - падающий поток излучения, $d\Phi'_{\omega}$ поглощающий телом.

По определению $a_{\omega,T}$ не может быть больше единицы.

Тело, у которого $a_{\omega,T} < 1$ и одинакова по всему диапазону частот, называют *серым телом*.

Тело, у которого $a_{\omega,T} = 1$ *абсолютно черное тело*

Реальное тело всегда отражает часть энергии падающего на него излучения (рис. 2).

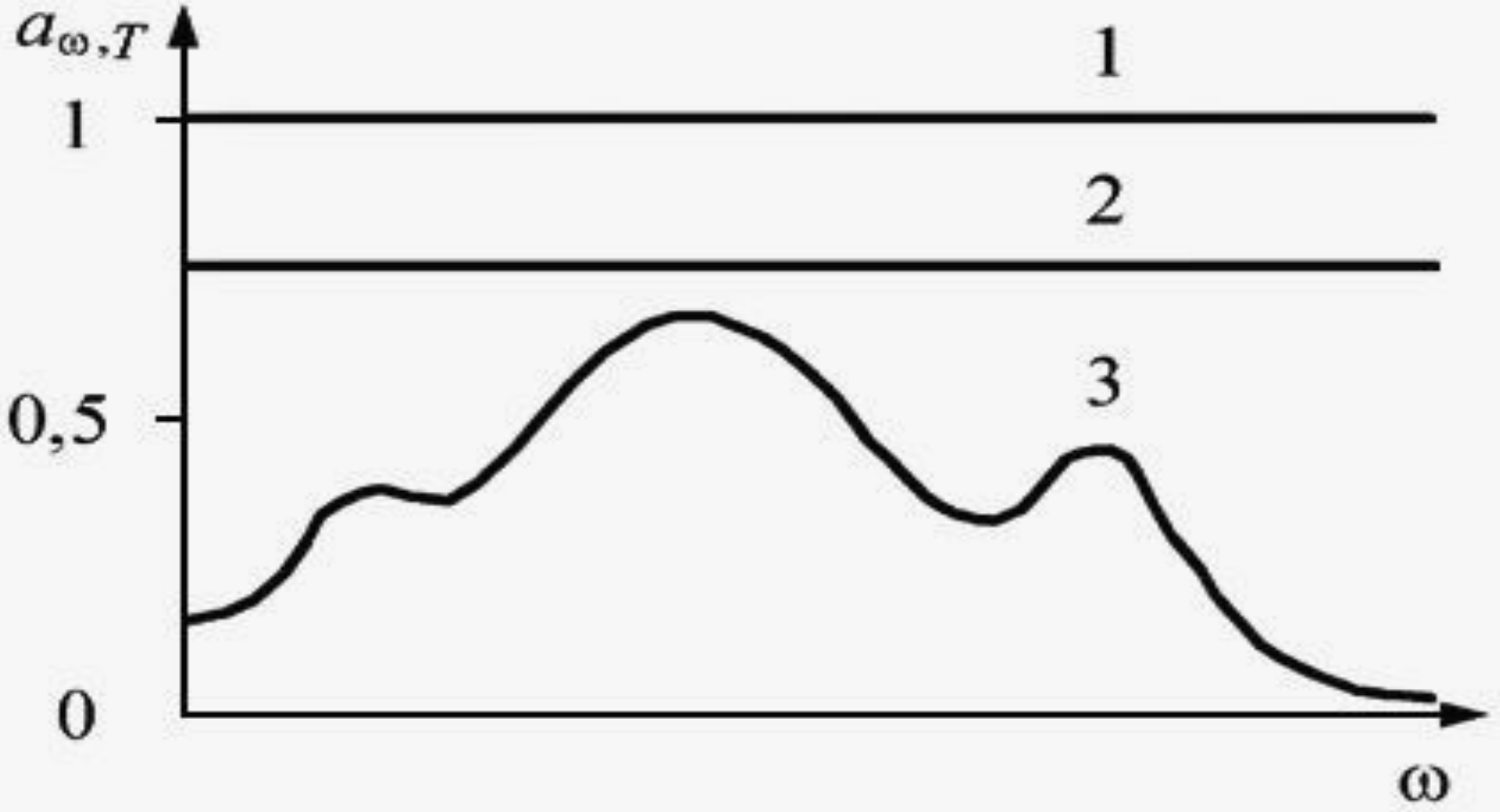


Рис. 2. Спектральная поглощательная способность тела: 1 − абсолютно черное тело; 2 − серое тело; 3 − реальное тело

Абсолютно черное тело можно представить в виде замкнутой полости (рис.3), снабженной малым отверстием.

Излучение через отверстие попадает на стенки полости, частично поглощаясь ими.

При малых размерах отверстия луч должен претерпеть множество отражений, прежде чем он сможет выйти из отверстия.

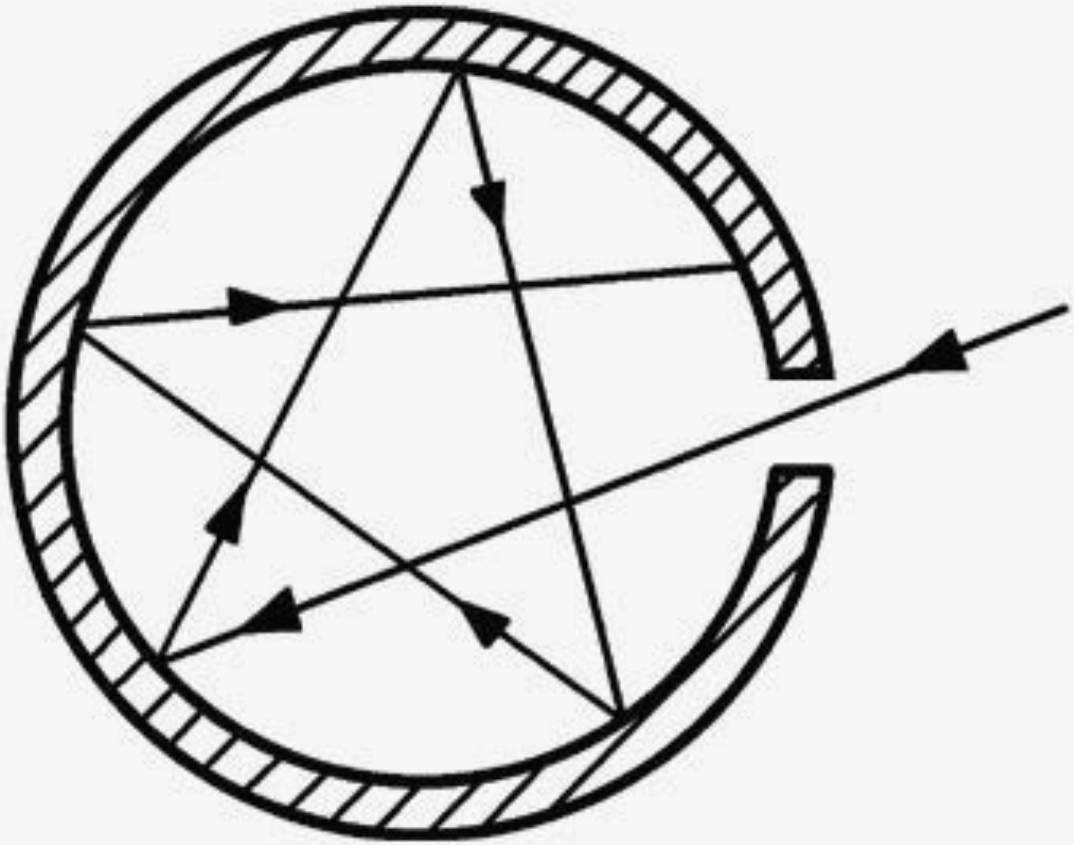


Рис. 3. Модель абсолютно черного тела

Малому отверстию и приписывается свойство абсолютно черного тела.

Исследуя распределение энергии излучения из малого отверстия в нагретой полости, экспериментально определяется испускательные способности абсолютно черного тела $r_{\omega,T}$, $r_{\lambda,T}$.

Результаты таких экспериментов при различных значениях температуры приведены на рис. 4.

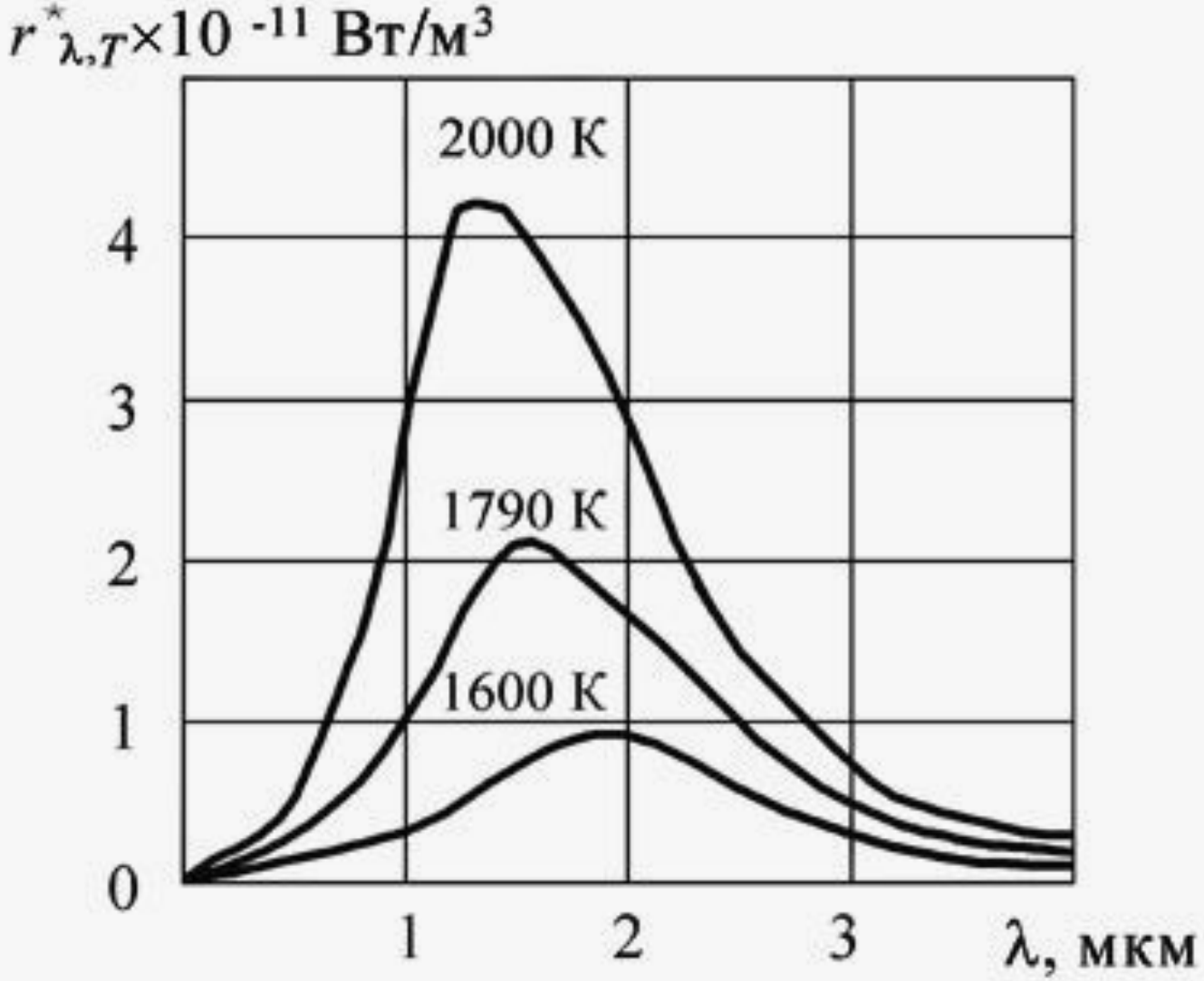


Рис. 4. Спектральная испускательная способность абсолютно черного тела

Закон Кирхгофа.

Равновесие в системе может установиться только в случае, если каждое тело излучает в единицу времени столько же энергии, сколько оно поглощает.

Это означает: тела, интенсивнее поглощающие излучение какой-либо частоты, будут это излучение интенсивнее и испускать.

Закон Кирхгофа: отношение испускательной и поглощательной способностей одинаково для всех тел и при данной температуре является универсальной функцией частоты (длины волны).

$$\left(\frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}}\right)_2 = \left(\frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}}\right)_3 = \ldots = \frac{r^*_{\omega,T}}{1} = f(\omega,T)$$

ИЛИ

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}\right)_2 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}\right)_3 = \ldots = \frac{r^*_{\lambda,T}}{1} = \varphi(\lambda,T)$$

Индексы 1, 2, 3... соответствуют различным телам

Из закона Кирхгофа следует: универсальные функции $f(\omega,T)$ и $\phi(\lambda,T)$ есть спектральные испускательные способности $r^*_{\omega,T}$ и $r^*_{\lambda,T}$ абсолютно черного тела.

3. Закон Стефана-Больцмана. Закон Вина

Экспериментальные (*Стефана*) и теоретические (*Больцмана*) исследования позволили установить: *энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры*

$$R^* = \sigma T^4.$$

Постоянная Стефана–Больцмана

$$\sigma = 5{,}6686 \cdot 10^{-8}\ \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4).$$

Для реальных тел вводится понятие эффективной радиационной температуры $T_р$.

$T_р$ определяется как температура абсолютно черного тела, имеющего такую же энергетическую светимость, что и реальное тело.

Радиационная температура тела $T_р$ всегда меньше истинной температуры тела T.

$T_р$ находится из уравнения: $R = \sigma T_р^4 = A_T \sigma T^4$.

$$T_p = T\sqrt[4]{A_T}$$

Пирометры.

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

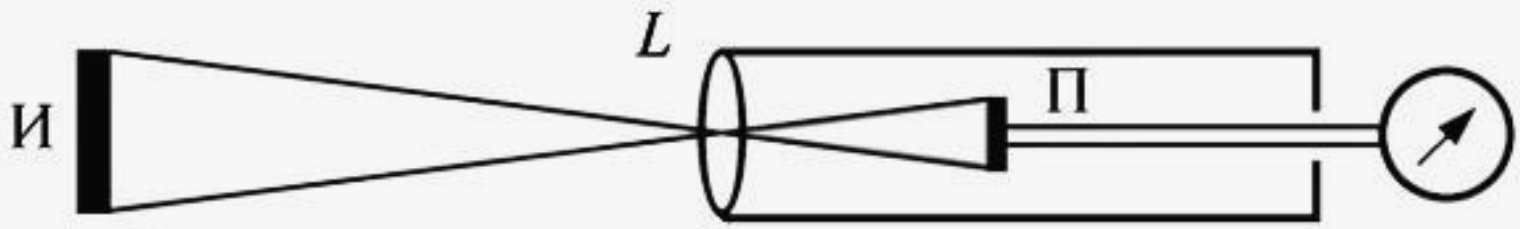


Рис. 6. Устройство радиационного пирометра

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

Энергия излучения, попавшего на приемник, измеряется болометром или термоэлементом.

Действие болометров основано на изменении электрического сопротивления металла или полупроводника при изменении температуры.

Показание прибора, подсоединенного к болометру или термоэлементу, оказывается пропорциональным энергии излучения, попавшей на приемник пирометра.

Проградуировав предварительно пирометр по излучению эталона абсолютно черного тела при различных температурах по шкале прибора измеряется температура нагретых тел.

Закон смещения Вина.

Вин теоретически рассмотрел термодинамический процесс сжатия излучения, заключенного в полости с идеально зеркальными стенками.

Вин пришел к выводу, что испускательная способность абсолютно черного тела должна иметь вид

$$r^*_{\omega,T} = \omega^3 f\left(\frac{\omega}{T}\right)$$

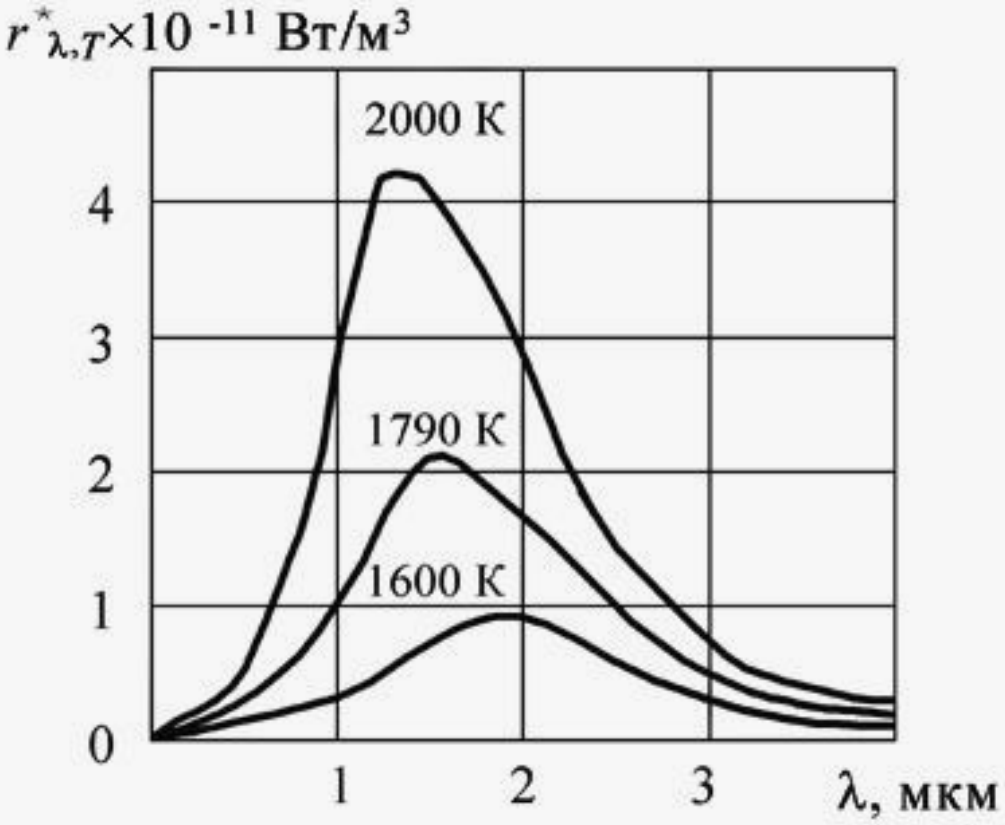
Здесь f – некоторая функция, конкретный вид которой термодинамическими методами установить нельзя.

Испускательная способность абсолютно черного тела - функция $r^*_{\lambda,T}$ достигает максимума на длине волны :

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

Значение постоянной Вина b равно

$b = 2{,}898 \cdot 10^{-3}$ м · К.



Максимум испускательной способности Солнца приходится на длину волны $\lambda_m = 0{,}48$ мкм.

Считая излучение Солнца близким к излучению абсолютно черного тела, оценим суммарную площадь панелей солнечной батареи мощностью $P = 10$ кВт на орбитальной околоземной космической станции. КПД солнечной батареи принять равным $\eta = 20\%$.

Из закона смещения Вина температура поверхности Солнца

≈ 6000 К.

По закону Стефана − Больцмана энергетическая светимость Солнца $R = \sigma T^4$.

Полная мощность излучения с поверхности Солнца

$$W = R \cdot 4\pi r_C^2 = 4\pi\sigma T^4 r_C^2.$$

Радиус Солнца $r_C = 6{,}95 \cdot 108$ м.

Считая, что Солнце излучает по всем направлениям изотропно, находим солнечную постоянную C, равную потоку энергии излучения через единицу поверхности сферы, радиус которой равен среднему расстоянию от Солнца до Земли $r_{CЗ} = 1{,}49 \cdot 10^{11}$ м.

При этом

$$C = \frac{W}{4\pi R_{СЗ}^2} = \sigma T^4 \left(\frac{R_С}{R_{СЗ}} \right)^2 = 1{,}6 \cdot 10^3 \ \frac{Вт}{м^2}$$

Вблизи Земли на каждый квадратный метр поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, за одну секунду падает 1,6 кДж энергии солнечного излучения. Часть этой энергии в солнечной батарее превращается в электрическую энергию. С учетом КПД солнечной батареи находим ее электрическую мощность $P = \eta CS$. Площадь панелей солнечной батареи

$$S = \frac{P}{\eta C} = \frac{10^4}{0{,}2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^3} = 31{,}2$$

$м^2$.

4. Формула Релея- Джинса. Ультрафиолетовая катастрофа

Дальнейшее развитие теории теплового излучения нашло в работах *Рэлея* и *Джина* (1900-1905 г.).

Они рассмотрели равновесное излучение абсолютно чёрного тела в замкнутой полости с зеркальными стенками как совокупность пространственных стоячих электромагнитных волн. Частоты этих волн удовлетворяют определённым условиям, подобным условиям для частот стоячих упругих волн в стержнях.

Они нашли выражение для испускательной способности абсолютно черного тела (Формула Рэлея–Джинса):

$$r^*_{\omega,T} = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT$$

где kT - средняя энергия, приходящаяся на одну колебательную степень свободы.

Формула Рэлея–Джинса хорошо согласуется с экспериментальными данными для излучения абсолютно черного тела в области малых частот или больших длин волн и резко расходится с опытом для больших частот или малых длин волн излучения.

Классическая теория теплового излучения приходит к выводу о том, что при конечных значениях энергии излучения равновесие между веществом и излучением невозможно.

Этот вывод противоречит опыту.

Такой результат следует из формулы Рэлея-Джинса, вывод которой с точки зрения классической теории не вызывал сомнений.

Эренфест назвал эту ситуацию «*ультрафиолетовой катастрофой*».

5. Гипотеза о квантах. Формула Планка

«Ультрафиолетовая катастрофа» показала: классическая физика содержит ряд принципиальных внутренних противоречий, которые проявились в теории теплового излучения; разрешить эти противоречия можно только с помощью принципиально новых физических идей. Такая физическая идея была сформулирована в 1900 г. *М. Планком* в виде гипотезы о квантах.

Согласно этой гипотезе: *излучение испускается и поглощается веществом не непрерывно, а конечными порциями энергии, квантами энергии.*

Величина энергии кванта зависит от частоты излучения и определяется формулой

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

Здесь $h = 2\pi\hbar$ – новая фундаментальная физическая константа, которую называют постоянной Планка.

$h = (6{,}62618 \pm 0{,}00004) \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Гипотеза Планка оказала огромное влияние на последующее развитие физики.

Развитие гипотезы Планка о квантах привело к появлению квантовой механики – современной физической теории.

Эта теории за последующие сто лет бурно развивалась и позволила физикам создать законченную и непротиворечивую картину микромира на уровне атомных явлений.

Планку удалось дать теоретическое описание равновесного теплового излучения.

Основное отличие квантовой теории излучения от классической проявляется при расчете средней энергии излучения частоты ω.

Согласно Планку средняя энергия излучения определяется по формуле

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$$

Для малых частот, когда

$$\frac{\hbar\omega}{kT} << 1 \ , \qquad e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} \approx 1 + \frac{\hbar\omega}{kT}$$

приходим к формуле классической теории: $\langle \varepsilon \rangle = kT$

Подставляя полученную формулу для $\langle \varepsilon \rangle$ находим спектральную испускательную способность абсолютно черного тела или *функцию Планка.*

$$r^*_{\omega,T} \equiv f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$$

Функция Планка находится в соответствии с результатами экспериментальных исследований излучения абсолютно черного тела на всех частотах и при всех температурах.

При низких частотах формула квантовой теории излучения переходит в формулу Рэлея–Джинса классической теории.

При высоких частотах, когда $\hbar\omega >> kT$ и с высокой точностью

$$e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} >> 1$$

формула Планка переходит в соотношение

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2} e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}}$$

структуру которого предсказал в 1893 г. В. Вин.

Интегрируя функцию Планка для $r^*_{\omega,T}$ по всем частотам, находим энергетическую светимость абсолютно черного тела.

В результате интегрирования имеем

$$R = \sigma T^4 .$$

закон Стефана–Больцмана.

Значение постоянной Стефана–Больцмана записывается через универсальные константы k, c и $\hbar$

$$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60 c^2 \hbar^3} = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ Вт \cdot м^{-2} \cdot К^{-4}$$

Планк, пользуясь экспериментальным значением σ, по этой формуле впервые определил значение постоянной $\hbar$.

Формула Планка позволила определить значение постоянной b в законе смещения Вина.

$$\lambda_m T = \frac{2\pi c\hbar}{4{,}966k} \quad = b = 2{,}9 \cdot 10^{-3}\ \text{м} \cdot \text{К},.$$

выраженную через универсальные константы k, c и $\hbar$.

6. Тепловое излучение Вселенной

Энергия излучения дает существенный вклад во внутреннюю энергию системы при больших температурах. Одной из таких систем является высокотемпературная плазма. В таком состоянии вещества фотонный газ наряду с газом частиц должен быть включен в рассмотрение равноправным элементом системы.

Многие свойства высокотемпературной плазмы можно объяснить, изучая взаимодействие фотонного газа с газом частиц.

Интересный пример такого взаимодействия представляет современная космологическая теория, описывающая ранние стадии эволюции Вселенной.

Эта теория утверждает, что вся наша Вселенная возникла приблизительно 10–20 миллиардов лет назад в результате Большого взрыва.

Взрыв образовал в очень малом объеме пространства горячий «котел», в котором при фантастически больших плотностях и температурах находилось все вещество нашей Вселенной.

По оценкам *Г. Гамова* через 100 с после взрыва плотность вещества была в тысячи раз больше плотности воды, а температура ($T \sim 10^9$ К) значительно превышала температуру в центре термоядерного взрыва.

В этот момент материя существовала в виде высокотемпературной плазмы, состоящей из протонов, нейтронов, электронов, фотонов, нейтрино и их античастиц. Вещество в таком состоянии было ионизованно и непрозрачно для излучения, и излучение находилось в «плену» вещества.

Согласно теории *А.А. Фридмана*, высказанной еще в 1922 г., после взрыва Вселенная начала расширяться. В результате расширения Вселенной температура вещества и излучения уменьшалась, достигнув через тысячу лет после взрыва значения $T^* = 3000$ К. Плотность вещества во Вселенной к этому времени приняла значение порядка $\rho^* \simeq 10^{-17}$ кг/м^3. В этих условиях электроны, протоны и нейтроны объединяются, образуя атомы водорода, гелия и других легких элементов.

Среда, состоящая из таких нейтральных атомов, становится прозрачной для излучения, и оно «отрывается» от вещества. Начиная с этого момента времени фотонный газ занимает весь объем Вселенной и расширяется вместе с ней. Это расширение фотонного газа можно считать адиабатическим.

По мере роста объема расширяющейся Вселенной температура фотонного газа, заполняющего ее, будет уменьшаться. Расчет показывает, что в результате такого процесса вся Вселенная к настоящему времени должна быть заполнена равновесным излучением с температурой порядка 3 К.

Так как это тепловое космическое излучение представляет собой первичное излучение, зародившееся на ранней стадии эволюции Вселенной, то известный астрофизик *И.С. Шкловский* назвал его *реликтовым* (от лат. *relictus* – оставленный). Оценки показывают, что сейчас в каждом кубическом сантиметре Вселенной находится порядка 700 фотонов реликтового излучения.

В 1965 г. американские инженеры *А. Пензиас* и *Р. Уилсон* при отладке приемника радиотелескопа обнаружили слабый фоновый радиошум, приходящий из космоса в виде равномерно распределенного по небесной сфере излучения с максимумом энергии на длине волны $\lambda_m = 0{,}96$ нм.

Закон Вина $\lambda_m = b/T_m$ позволяет определить, что на такой длине волны находится максимум энергии равновесного теплового излучения при температуре T_m = 3К. Так, в какой-то мере случайно, было обнаружено реликтовое тепловое излучение, как след процессов, происходивших во Вселенной в далеком прошлом.

Открытие реликтового излучения, удостоенное в 1978 г. Нобелевской премии по физике, является важным достижением современной науки. Оно подтверждает правильность теории «горячей» расширяющейся Вселенной, описывающей эволюцию Вселенной в течение десятков миллиардов лет.

Из этой теории следует, что на ранней стадии эволюции Вселенная существенно отличалась от современной и представляла собой сгусток сверхплотной плазмы и излучения с очень высокой температурой, рожденных в момент Большого взрыва.

Определим число фотонов в единице объема пространства, заполненного равновесным тепловым излучением при температуре T.

Введем объемную концентрацию n_ω фотонов излучения из интервала частот от ω до $\omega + d\omega$, искомая концентрация фотонов излучения всевозможных частот определится как

$$n_ф = \int_0^\infty n_\omega d\omega$$

По определению, спектральная объемная плотность энергии излучения $u_{\omega T} = \hbar\omega n_{\omega}$. С учетом формулы Планка имеем

$$n_{\text{ф}} = \frac{2{,}4}{\pi^2}\left(\frac{kT}{\hbar c}\right)^3$$

По этой формуле находим, что $n_{\text{ф}} = 9 \cdot 10^9$ м$^{-3}$ при $T = 10$ К и $n_{\text{ф}} = 9 \cdot 10^{16}$ м$^{-3}$ при $T = 1000$ К. Такая зависимость концентрации частиц от температуры является характерной особенностью фотонного газа.

В теории «горячей» Вселенной считается, что «отрыв» излучения от вещества на ранней стадии эволюции Вселенной произошел при температуре $T^* = 3000$ К и плотности вещества $\rho^* \sim 10^{-17}$ кг/м^3 – в процессе образования атомов и нейтрализации вещества. В настоящее время плотность вещества во Вселенной $\rho_0 \sim 10^{-26}$ кг.

Оценим температуру реликтового излучения на современном этапе эволюции Вселенной.

Предположим, что излучение, заполняющее Вселенную, расширяется вместе с ней адиабатно. С учетом уравнения адиабаты для фотонного газа (т.1, п.11.7) находим

$$T_*^3 V_* = T_0^3 V_0,$$

где T_0 – искомая температура реликтового излучения в настоящее время, а V_* и V_0 – объемы расширяющейся Вселенной на ранней и современной стадиях ее эволюции.

Считая массу вещества во Вселенной неизменной и равной M, определим плотности вещества

$\rho_* = M/V_*$, $\rho_0 = M/V_0$.

$$T_0^3 = \frac{V_*}{V_0} T_*^3 = \frac{\rho_0}{\rho_*} T_*^3$$

Отсюда получаем

$$T_0 = T_* \sqrt[3]{\frac{\rho_0}{\rho_*}}$$

Подставляя значения плотностей ρ_* и ρ_0, находим

$$T_0 = 10^{-3} T_* = 3 \text{ K}.$$

До такой температуры «остыло» излучение в расширяющейся Вселенной к настоящему времени.

Квантовая природа вещества качественно проявляется в том, что каждой частице присущи свойства волны и, наоборот, волны имеют свойства, характерные для частиц.

Нагретые тела являются источниками электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Это излучение называют *тепловым излучением.*

Тепловое излучение находится в равновесии с излучающим телом – является равновесным.

Энергия, испускаемая с единицы поверхности тела в единичном интервале частот, называется *спектральной испускательной способностью* тела, или *спектральной плотностью энергетической светимости*. Испускательная способность является функцией частоты и температуры $r = r(\omega,T)$.

Спектральная поглощательная способность тела $a\omega,T$ – безразмерная величина, характеризует долю поглощенного телом потока излучения

$$a_{\omega,T} = \frac{\mathrm{d}\Phi'_{\omega}}{\mathrm{d}\Phi_{\omega}}$$

Абсолютно черное тело – тело, у которого на всех частотах и при любых температурах поглощательная способность равна единице.

Закон Кирхгофа – отношение испускательной и поглощательной способностей одинаково для всех тел, включая абсолютно черное тело и равно спектральной испускательной способности абсолютно черного тела.

Закон Стефана–Больцмана – энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры

$$R^* = \sigma T^4$$

Закон смещения Вина – длина волны λm, на которую приходится максимум испускательной способности абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре:

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

Формуле Рэлея–Джинса для испускательной способности абсолютно черного тела

$$r^*_{\omega,T} = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT$$

хорошо согласуется с экспериментальными данными для излучения абсолютно черного тела в области малых частот или больших длин волн и резко расходится с опытом для больших частот или малых длин волн излучения – ультрафиолетовая катастрофа

Планк предположил, что свет квантован, и каждый квант света – фотон – имеет энергию $E = h\nu$.

С учетом гипотезы Планка средняя энергия теплового излучения определяется по формуле

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$$

Испускательная способность абсолютно черного тела или функция Планка ($r^*_{\omega,T} = cu_{\omega,T}/4$)

$$r^*_{\omega,T} \equiv f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$$

Функция Планка находится в соответствии с результатами экспериментальных исследований излучения абсолютно черного тела на всех частотах и при всех температурах.

Основные выводы

Нагретые тела являются источниками электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Это излучение называют *тепловым излучением*.

Тепловое излучение находится в равновесии с излучающим телом – является равновесным.

Энергия, испускаемая с единицы поверхности тела в единичном интервале частот, называется *спектральной испускательной способностью* тела, или *спектральной плотностью энергетической светимости*. Испускательная способность является функцией частоты и температуры $r = r(\omega, T)$.

Спектральная поглощательная способность тела $a\omega,T$ – безразмерная величина, характеризует долю поглощенного телом потока излучения

$$a_{\omega,T} = \frac{d\Phi'_{\omega}}{d\Phi_{\omega}}$$

Абсолютно черное тело – тело, у которого на всех частотах и при любых температурах поглощательная способность равна единице.

Закон Кирхгофа – отношение испускательной и поглощательной способностей одинаково для всех тел, включая абсолютно черное тело и равно спектральной испускательной способности абсолютно черного тела.

Закон Стефана–Больцмана – энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры

$$R^* = \sigma T^4$$

Закон смещения Вина – длина волны λm, на которую приходится максимум испускательной способности абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре:

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

Формуле Рэлея–Джинса для испускательной способности абсолютно черного тела

$$r^*_{\omega,T} = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT$$

хорошо согласуется с экспериментальными данными для излучения абсолютно черного тела в области малых частот или больших длин волн и резко расходится с опытом для больших частот или малых длин волн излучения – ультрафиолетовая катастрофа

Планк предположил, что свет квантован, и каждый квант света – фотон – имеет энергию $E = h\nu$.

С учетом гипотезы Планка средняя энергия теплового излучения определяется по формуле

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$$

Испускательная способность абсолютно черного тела или функция Планка ($r^*\omega,T = cu\omega,T/4$)

$$r^*_{\omega,T} \equiv f(\omega,T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$$

Функция Планка находится в соответствии с результатами экспериментальных исследований излучения абсолютно черного тела на всех частотах и при всех температурах.

Равновесное тепловое излучение однородно. Его плотность энергии одинакова во всех точках внутри полости, где оно заключено. Тепловое излучение изотропно и неполяризованно. Оно содержит все возможные направления распространения и направления колебаний векторов **E** и **B**.

Пусть в интервале частот ω до ω + $d\omega$. на поверхность тела падает поток излучения $d\Phi_\omega$. Часть этого потока $d\Phi'_\omega$ поглощается телом. Поглощательная способность тела на частоте ω определяется как безразмерная величина

$$a_{\omega,T} = \frac{\mathrm{d}\,\Phi'_\omega}{\mathrm{d}\,\Phi_\omega}$$

характеризующая долю поглощенного телом потока излучения.

Спектральная поглощательная способность тела $a_{\omega,T}$ зависит от частоты ω и температуры T.

Малое отверстие почти полностью поглощает падающее на него излучение. С уменьшением размера отверстия его поглощательная способность стремится к единице.

Излучение через отверстие попадает на стенки полости, частично поглощаясь ими. При малых размерах отверстия луч должен претерпеть множество отражений, прежде чем он сможет выйти из отверстия, то есть, формально, отразиться от него.

При многократных повторных переотражениях на стенках полости излучение, попавшее в полость, практически полностью поглотится.

В теории теплового излучения характеристики абсолютно черного тела имеют универсальный характер. Реальное тело излучает при любой температуре всегда меньше энергии, чем абсолютно черное тело.

Зная испускательную способность абсолютно черного тела (универсальную функцию Кирхгофа) и поглощательную способность реального тела, из закона Кирхгофа можно определить энергию, излучаемую этим телом в любом диапазоне частот или длин волн.

Способность теплового излучения находиться в равновесии с излучающим телом отличает тепловое излучение от других видов излучения тел. Излучение, находящееся в равновесии с излучающим телом, будем называть равновесным Равновесному излучению можно приписать температуру тела, с которым оно находится в равновесии, распространив при этом законы равновесной термодинамики на тепловое излучение.

Это означает, что для равновесного теплового излучения можно определить и рассчитать внутреннюю энергию, давление, энтропию и другие термодинамические характеристики, которые не будут изменяться со временем

Для реальных тел закон Стефана–Больцмана выполняется лишь качественно, то есть с ростом температуры энергетические светимости всех тел увеличиваются, зависимость энергетической светимости от температуры имеет вид

$$R = A_T R^* = A_T \sigma T^4$$

Коэффициент $A_T < 1$ называется *интегральной поглощательной способностью* тела. Значения A_T, в общем случае зависящие от температуры, известны для многих технически важных материалов. В достаточно широком диапазоне температур для металлов $A_T = 0{,}1–0{,}4$, а для угля и окислов металлов $A_T = 0{,}5–0{,}9$.

Зная интегральную поглощательную способность материала излучателя, можно перевести измеренную радиационную температуру излучателя $T_р$ в его истинную температуру T по формуле

$$T = \frac{T_р}{\sqrt[4]{A_T}}$$

В частности, если радиационный пирометр покажет температуру $T_р = 933$ К при наблюдении раскаленной поверхности вольфрамового излучателя ($A_T = 0{,}15$), то ее истинная температура $T = 1500$ К.

Закон Вина: *длина волны λm, на которую приходится максимум испускательной способности абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре.*

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

Значение постоянной Вина b равно $b = 2{,}898 \cdot 10^{-3}$ м · К.

Закон смещения Вина показывает, что при повышении температуры абсолютно черного тела положение максимума его испускательной способности смещается в область коротких длин волн. Результаты экспериментов, приведены на рис. 5.4.

Для реальных тел закон Вина выполняется лишь качественно. С ростом температуры любого тела длина волны, вблизи которой тело излучает больше всего энергии, также смещается в сторону коротких длин волн. Это смещение, однако, уже не описывается простой формулой $\lambda m = b/T$, которую для излучения реальных тел можно использовать только в качестве оценочной.

Формула Рэлея–Джинса достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными для излучения абсолютно черного тела в области малых частот или больших длин волн и резко расходится с опытом для больших частот или малых длин волн излучения.

Кроме того, интегрируя $u_{\omega,T}$ по всем частотам, мы получаем бесконечные значения для интегральной плотности энергии равновесного теплового излучения $u(T)$ и для энергетической светимости абсолютно черного тела R^*:

$$u(T) = \frac{4}{c} R^* = \int_0^\infty u_{\omega,T}\, \mathbf{d}\omega = \frac{kT}{\pi^2 c^3} \int_0^\infty \omega^2\, \mathbf{d}\omega \to \infty$$

Так как размерность этой постоянной «энергия×время» совпадает с размерностью величины, которую в механике называют действием, то постоянную Планка называют также квантом действия.

Гипотеза Планка о квантах нарушила «очевидное» правило классической физики о том, что любая физическая величина, в том числе и энергия, изменяется непрерывным образом, и за бесконечно малый промежуток времени ее изменение всегда бесконечно мало.

В области больших частот отличие средней энергии излучения, рассчитанной по формулам классической и квантовой физики становится существенным.

Именно в этой области частот классическая теория излучения приводит к «ультрафиолетовой катастрофе». Квантовая теория излучения устраняет это противоречие теории и эксперимента.