

ЛЕКЦИЯ 1

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Тепловое излучение.
2. Абсолютно черное тело. Закон Кирхгофа. Законы Стефана – Больцмана и Вина.
3. Гипотеза Планка. Формула Планка.

Изученные физические процессы и явления неживой природы сложно описать с общих позиций.

Поэтому обычно строятся частные теории, которые в пределах своей применимости достаточно точно описывают какие-то законы природы.

Примеры: классическая и релятивистская механики, классическая электродинамика, основанная на уравнениях Максвелла.

В начале 20-го века возникло противоречие между новыми экспериментальными результатами и классическими физическими теориями того времени.

Примеры:

1. Теория теплового излучения абсолютно черного тела (теория Рэля и Джинса). Из классических представлений следовал вывод о невозможности термодинамического равновесия между тепловым излучением и веществом. При непрерывном тепловом излучении вся внутренняя энергия вещества должна мгновенно перейти в излучение, а вещество охладиться до температуры, равной 0 К.

2. Фотоэффект. Исследования показали, что максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности света, падающего на фотокатод, а зависит от частоты света. Это противоречило классическим представлениям о взаимодействии света с веществом.

3. Планетарная модель атома Резерфорда. Из классической электродинамики следует, что заряд, движущийся по орбите с ускорением, должен излучать электромагнитные волны и, следовательно, терять энергию. Расчеты показывали, что за время порядка 10^{-11} с электрон должен упасть на ядро. Следовательно, атом оказывается нестабильным.

Попытки разрешения противоречий привели к открытию законов квантовой физики.

Впервые квантовые представления были введены в 1900 году Планком в работе, посвященной теории теплового излучения тел.

Идея Планка: свет испускается не непрерывно, как в классической теории излучения, а определенными дискретными порциями энергии – **квантами**.

Планк ввел также универсальную постоянную \hbar , имеющую размерность Дж·с (размерность действия), которая, в частности, определяет соотношение между классической и квантовой механиками:

если в условиях рассматриваемой задачи физические величины, имеющие размерность действия (Дж·с), значительно больше \hbar , то применима классическая механика, в противном случае - квантовая механика.

Квантовая механика важна для инженерного образования, поскольку квантовые представления и законы лежат в основе многих практически важных наук – химии, твердотельной электроники и т.д.

Рассмотрим приведенные выше примеры: *теорию теплового излучения, фотоэффект, модель атома*. Покажем, как введение квантовых представлений позволяет объяснить экспериментальные результаты.

Тепловое излучение.

Определения

Тепловое излучение - это электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет изменения его внутренней энергии.

Излучения, возбуждаемые за счет любого вида энергии, кроме внутренней, называются *люминесценцией*.

Примеры:

- *хемилюминесценция* – свечение за счет энергии, высвобождающейся при химических реакциях (фосфор);
- *электролюминесценция* – свечение, возникающее в газах и твердых телах под действием электрического поля;
- *катодолюминесценция* – свечение твердых тел, вызванное бомбардировкой их электронами;
- *фотолюминесценция* – свечение, возбуждаемое при поглощении телом электромагнитного излучения.

Тепловое излучение.

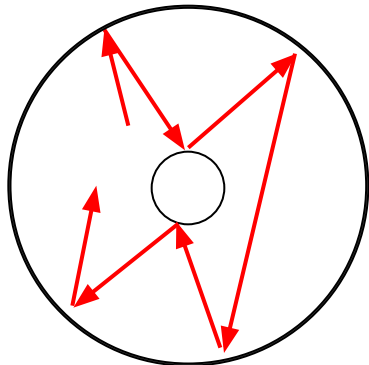
Тепловое излучение характерно для всех тел в любом агрегатном состоянии, при любой их температуре.

Тепловое излучение имеет сплошной спектр, с максимумом интенсивности при некоторой длине волны.

С ростом температуры возрастает энергия теплового излучения, а максимум перемещается в область более коротких длин волн.

Рассмотрим некоторые понятия, определения теплового излучения.

Окружим излучающее тело оболочкой с идеально отражающей внутренней поверхностью.



Отраженное оболочкой излучение, попав на тело, поглощается им частично или полностью.

Из опытов следует:

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

Тепловое излучение.

Характеристики излучающего тела

Энергетическая светимость ($R_{\omega, T}$) – количество энергии, испускаемое наружу единицей поверхности тела во всем диапазоне длин волн за единицу времени по всем направлениям, т.е. в пределах телесного угла 2π .

Рассмотрим часть энергии, испускаемой единицей поверхности тела за единицу времени в узком интервале частот $d\omega$ вблизи частоты ω . Обозначим эту часть потока через $dR_{\omega, T}$.

Поток $dR_{\omega, T}$ пропорционален $d\omega$: $dR_{\omega, T} = r_{\omega, T} d\omega$

Величина $r_{\omega, T}$ называется *испускательной способностью тела* (интегральной плотностью энергетической светимости).

Эта величина есть функция частоты ω и температуры T .

Величины R_T и $r_{\omega, T}$ связаны между собой формулой:

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

Тепловое излучение.

Пусть на площадку dS поверхности тела падает поток лучистой энергии $d\Phi_{\omega,T}$, характеризующийся узким интервалом частот $d\omega$ вблизи частоты ω .

Пусть часть этого потока $d\Phi'_{\omega,T}$ поглощается телом, а часть $d\Phi''_{\omega,T}$ - отражается.

По закону сохранения энергии: $d\Phi_{\omega,T} = d\Phi'_{\omega,T} + d\Phi''_{\omega,T}$

$$a_{\omega,T} = \frac{d\Phi'_{\omega,T}}{d\Phi_{\omega,T}} \quad - \quad \text{поглощательная способность тела.}$$

$$b_{\omega,T} = \frac{d\Phi''_{\omega,T}}{d\Phi_{\omega,T}} \quad - \quad \text{отражательная способность тела.}$$

Тепловое излучение.

Абсолютно черное тело. Закон Кирхгофа.

Тело называется *абсолютно черным*, если оно полностью поглощает падающее на него излучение всех частот:

$$\mathbf{a}_{\omega, T} = 1, \quad \mathbf{b}_{\omega, T} = 0$$

Между испускательной $\mathbf{r}_{\omega, T}$ и поглощательной $\mathbf{a}_{\omega, T}$ способностями любого тела существует универсальная связь:

$$\frac{\mathbf{r}_{\omega, T}}{\mathbf{a}_{\omega, T}} = \mathbf{f}(\omega, T)$$

Это соотношение выражает *закон Кирхгофа*:

Отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела и является универсальной функцией частоты и температуры.

Тепловое излучение.

Абсолютно черное тело. Закон Кирхгофа.

Для абсолютно черного тела $\mathbf{a}_{\omega, T} = 1$

Из закона Кирхгофа для такого тела следует $\mathbf{r}_{\omega, T} = \mathbf{f}(\omega, T)$

Универсальная функция Кирхгофа есть не что иное, как испускательная способность абсолютно черного тела.

Модель абсолютно черного тела - малое отверстие в стенке большой замкнутой полости. Необходимые условия: стенка непрозрачна, температура во всех точках одинакова.

Если отношение площади отверстия к площади поверхности много меньше единицы, то практически все излучение, проникающее через отверстие, остается внутри полости, т.е., коэффициент поглощения отверстия близок к единице.

Внутри полости устанавливается тепловое равновесие, соответствующее температуре стенок полости.

Часть тепла излучается из отверстия наружу.

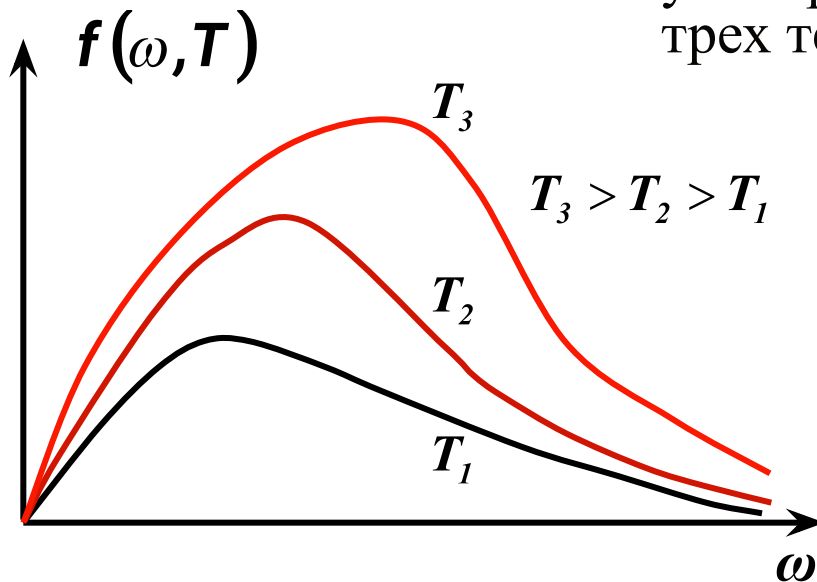
Тепловое излучение.

Абсолютно черное тело. Закон Кирхгофа.

Из закона Кирхгофа: испускательная способность модели абсолютно черного тела близка к универсальной функции Кирхгофа $f(\omega, T)$, - температура стенок полости.

Модель используется для изучения характеристик излучения абсолютно черного тела.

Экспериментально определенный вид универсальной функции Кирхгофа для трех температур приведен на рисунке.



Как следует из формулы

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

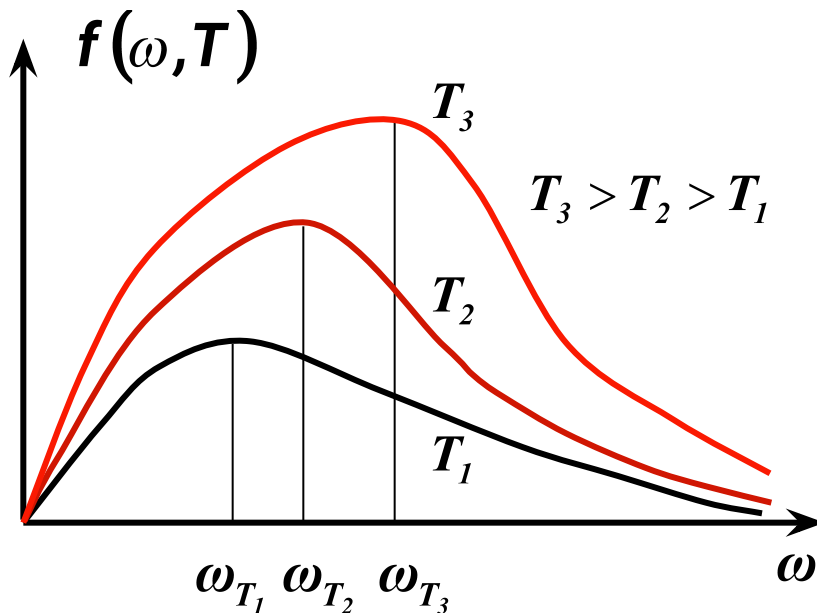
площадь, охватываемая кривой $f(\omega, T) = r_{\omega, T}$ дает энергетическую светимость абсолютно черного тела R_T при соответствующей температуре.

Тепловое излучение.

Абсолютно черное тело. Закон Стефана – Больцмана.

Из рисунка видно:

- а) энергетическая светимость а.ч.т. R_T растет с ростом T ,
 б) максимум испускательной способности с ростом T смещается в сторону более высоких частот: $\omega_{T_1} < \omega_{T_2} < \omega_{T_3}$



Экспериментально установлено, что

$$R_T = \sigma T^4$$

Это закон *Стефана – Больцмана*

σ - постоянная Стефана – Больцмана.

Экспериментальное значение этой постоянной - $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Тепловое излучение.

Абсолютно черное тело. Закон Вина.

Закон Вина выражает связь между длиной волны λ_T или частотой излучения ω_T и температурой тела T :

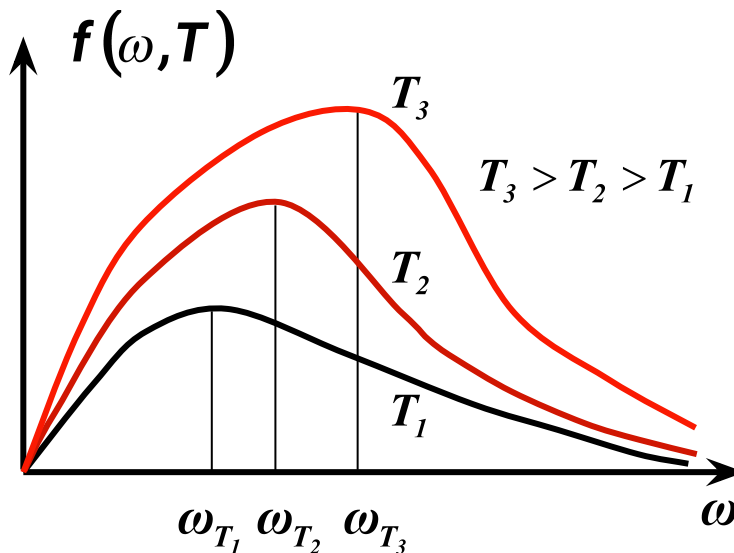
$$\omega_T = b'T$$

$$\lambda_T = b \frac{1}{T}$$

λ_T и ω_T - параметры в максимуме функции спектрального распределения

b', b - постоянные Вина.

Экспериментальное значение постоянной $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.



Закон Вина еще называют *законом смещения Вина*, поскольку из этого закона следует, что максимум испускательной способности тела с увеличением T смещается в сторону более высоких ω_T (при увеличении

температуры нагретого до свечения тела в его спектре все больше преобладает коротковолновое излучение).

Тепловое излучение.

Элементы теории. Противоречия.

Изучение физического явления: набор экспериментальных результатов + теория (либо наоборот - теория + эксперимент).

Рэлей и *Джинс* (английские физики): исходя из теоремы классической статистики о равномерном распределении энергии по степеням свободы попытались определить спектральную плотность энергии равновесного излучения тела $u_{\omega, T}$.

Спектральная плотность излучения - это количество энергии теплового излучения вблизи определенной частоты в единице объема.

Рэлей и Джинс предположили: при излучении тела на каждое электромагнитное колебание приходится в среднем энергия, равная двум половинкам kT - одна половинка на электрическую, другая на магнитную энергии волны.

Было получено уравнение вида:
$$u_{\omega, T} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT$$

Вывод уравнения с точки зрения классической физики был безупречен.

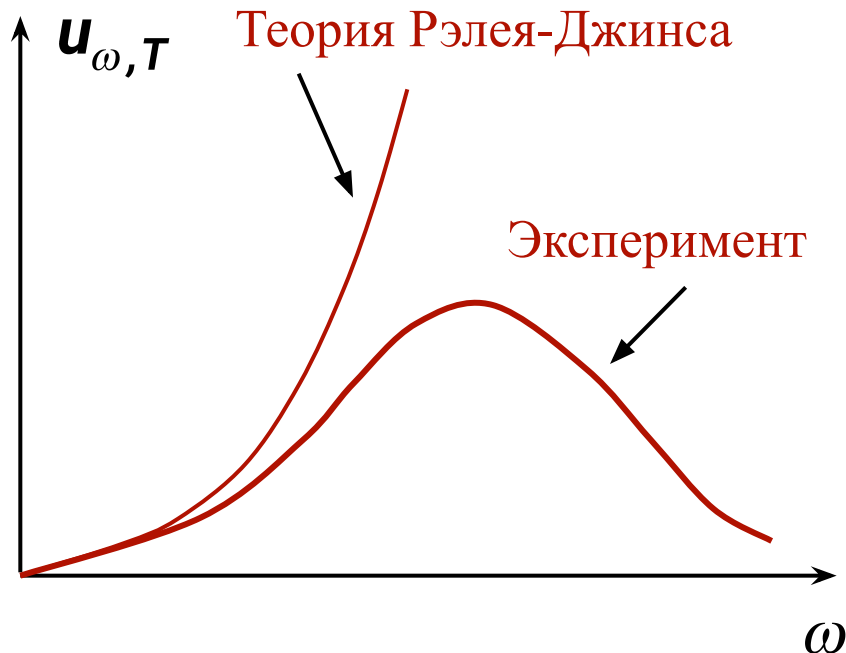
Тепловое излучение.

Элементы теории. Противоречия.

Сравнение теории с экспериментом:

а) в области малых частот наблюдаются близкие результаты;

б) в области больших ω расчетная зависимость $u(T)$ отличается от экспериментальной. Анализ теоретического выражения приводил в некоторых случаях к абсурдным выводам.



Пример: в результате интегрирования уравнения для $u_{\omega, T}$ по ω от нуля до ∞ получающаяся равновесная плотность энергии приобретает значение, равное бесконечности.

Этот результат получил название *ультрафиолетовая катастрофа*.

Тепловое излучение.

Гипотеза Планка. Формула Планка.

Формула для спектральной плотности энергии $u_{\omega, T}$ равновесного излучения, совпадающая с экспериментом на всех частотах, была получена в 1900 году немецким физиком – теоретиком Максом Планком (1858 - 1947).

Планк выдвинул гипотезу, чуждую представлениям классической физики:

электромагнитное излучение испускается дискретными порциями энергии – квантами электромагнитного поля (фотонами).

Энергия такого кванта пропорциональна частоте излучения ω :

$$W = h\nu = \hbar\omega$$

ν - частота света (ω - циклическая частота), $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка (квант действия), $\hbar = h/2\pi = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Тепловое излучение.

Гипотеза Планка. Формула Планка.

На основе этого предположения Планк получил формулу для спектральной плотности энергии равновесного теплового излучения:

$$u_{\omega, T} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / kT} - 1} \quad \left[\begin{array}{l} u_{\omega, T} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT \\ - \text{уравнение Рэля} \\ - \text{Джинса} \end{array} \right]$$

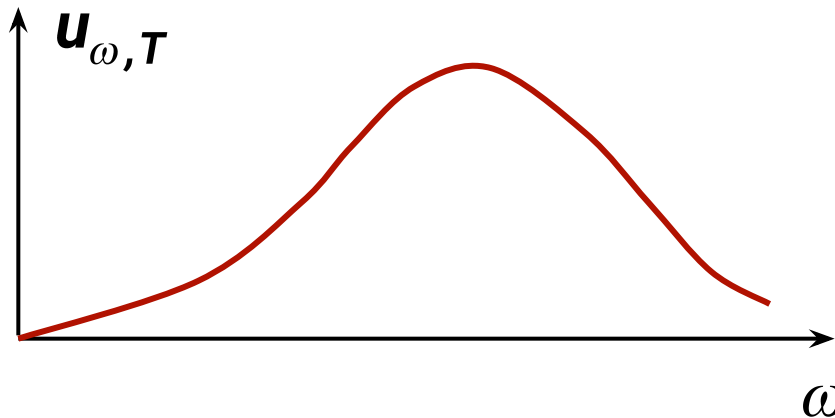
Отличия от уравнения Рэля – Джинса: среднее значение энергии классического осциллятора $\langle W \rangle = kT$ заменено на среднее значение энергии квантового осциллятора:

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

Тепловое излучение.

Гипотеза Планка. Формула Планка.

Формула Планка правильно описывает экспериментальные результаты, например, кривую $u_{\omega, T} = f(\omega)$.



На ее основе были объяснены все экспериментально открытые законы теплового излучения, не находившие своего объяснения в рамках классической физики, в частности, законы Стефана – Больцмана и Вина.

В области малых частот формула Планка переходит в формулу Рэля – Джинса.

Таким образом, формула Планка является полным решением основной задачи теплового излучения. Решение этой задачи стало возможным благодаря революционной квантовой гипотезе Планка.