

Конспект лекций по курсу общей физики. Часть III
“Оптика. Квантовые представления о свете.
Атомная физика и физика ядра”
Лекция № 7

5. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

**5.1. Экспериментальные основания теории
теплового излучения**

«...свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений.»

1865г.



Д.Максвелл
(1831-1879г.)

Электромагнитная теория Максвелла рассматривает свет, как электромагнитные волны малой длины и с единой точки зрения объясняет все известные к тому времени факты. Это обеспечило успех теории и создало убеждение, что физика решила основные задачи оптики.

Однако в конце XIX века возникли принципиальные трудности: она не смогла объяснить совокупности законов теплового излучения тел.

Что понимают под термином тепловое излучение?

Излучение, испускаемое нагретыми телами, называется тепловым. Основной характеристикой теплового состояния тела является его температура.

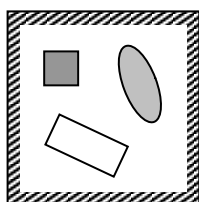


Рис.1

Предположим, что несколько тел с различной температурой окружены теплонепроницаемой оболочкой. Если даже внутри оболочки будет абсолютный вакуум, тела будут обмениваться энергией между собой через посредство излучения: более нагретые тела будут охлаждаться, так как они испускают большее количество энергии, чем получают от окружающих тел. Менее нагретые тела будут нагреваться, потому что они получают больше энергии, чем отдают. В конце концов, тела приобретут одинаковую температуру. То есть для теплового излучения автоматически установится **тепловое равновесие**, потому что каждое тело внутри оболочки испускает и поглощает одинаковое количество энергии. Плотность излучения в про-

странстве оболочки достигает определенной для данной температуры величины.

Что послужило основанием теории теплового излучения?

При тепловом равновесии выполняется **правило Прево: 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 кварца совсем не светиться. Таким образом, обнаруживается большая способность к излучению тел, хорошо поглощающих.

Закон Кирхгофа (1859г.)



Г.Кирхгоф
(1824-1887г.)

Кирхгоф придал правилу Прево вид строгого количественного закона, играющего фундаментальную роль в вопросах теплового излучения

Главная проблема состояла в следующем: определить количество лучистой энергии, испускаемое или поглощаемое телом при любой температуре и на любой частоте.

Прежде всего, условимся о терминах:

R_λ – **интегральная энергетическая светимость** - величина, численно равная потоку энергии dE , излучаемой в секунду единицей поверхности светящегося тела.

dE – **интегральный поток световой энергии**, т.е. поток, относящийся ко всем длинам волн, испускаемым телом

$$dE = R_\lambda dS.$$

Из этого количества энергии в пределах спектрального интервала между λ и $\lambda + d\lambda$ заключена часть энергии dE_λ

$$dE_\lambda = r_\lambda d\lambda dS.$$

Коэффициент пропорциональности r_λ называется **излучательной способностью** тела.

Очевидно, что

$$R_\lambda = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda,$$

поэтому:

r_λ – **спектральная плотность энергетической светимости или излучательная способность**, это энергетическая светимость, отнесенная к единичному интервалу длин волн вблизи данной длины волны.

a_λ – **поглощательная способность** показывает какая доля dE'_λ от общего потока энергии dE_λ , вблизи данной длины волны, в малом интервале длин волн $d\lambda$, поглотилась телом:

$$a_\lambda = \frac{dE'_\lambda}{dE_\lambda}.$$

Закон Кирхгофа можно выразить формулой

$$\frac{r_\lambda}{a_\lambda} = f(\lambda, T), \quad (1)$$

т.е. **отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности является одинаковым для всех тел.**

Следующей задачей является определение физического смысла универсальной функции $f(\lambda, T)$.

Кирхгоф ввел в употребление (в 1860г.) понятие **абсолютно черного тела**, т.е. такого тела, которое поглощает все падающее на него излучение. Для абсолютно черного тела $a_\lambda=1$, следовательно

$$f(\lambda, T)=r_\lambda \quad (2)$$

Таким образом, универсальная функция Кирхгофа есть не что иное, как **испускательная способность абсолютно черного тела.**



Рис.2. Абсолютно черное тело

Строго говоря в природе не существует абсолютно черных тел, однако сам Кирхгоф указал способ получения тела, обладающего свойствами, данными в его определении. Представим себе замкнутую полость с небольшим отверстием (рис.2). Лучи, проникающие внутрь, испытав многократные отражения от стенок и теряя энергию при отражении, практически полностью в ней поглощаются.

Закон Стефана – Больцмана (1884г.)

Интегральная энергетическая светимость абсолютно черного тела R , возрастает пропорционально четвертой степени абсолютной температуры тела:

$$R_0 = \sigma \cdot T^4,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – постоянная (константа) Стефана – Больцмана.

Закон смещения Вина (1894г.). Распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела.

Все твердые тела, нагретые до одинаковой температуры, излучают почти одинаковый непрерывный спектр, близкий к спектру абсолютно черного тела.

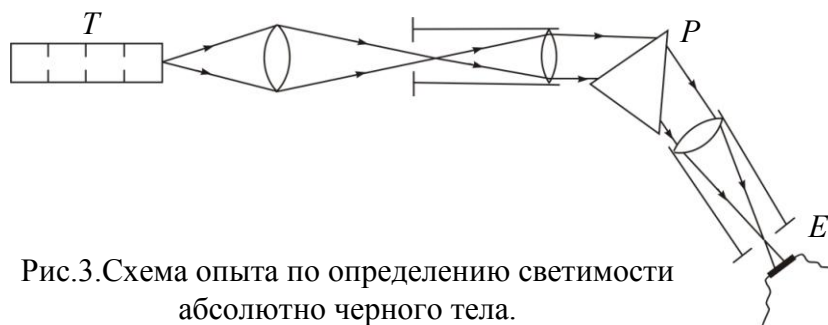


Рис.3.Схема опыта по определению светимости абсолютно черного тела.

На рисунке 3 представлена схема опыта, позволяющего излучить распределение энергии излучения абсолютно черного тела по длинам волн. Абсолютно черное тело помещается в печь, тем самым телу задается определенная температура T . Призма P спектрометра отклоняет лучи, находящиеся в спектральном интервале λ и $\lambda + d\lambda$, на определенный угол. Болометр E измеряет мощность сфокусированного на него излучения. Мощность пропорциональна произведению $r_\lambda \cdot d\lambda$.

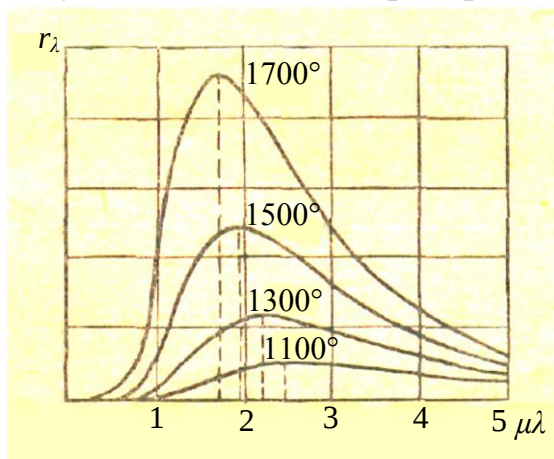


Рис.4.Кривые распределения светимости абсолютно черного тела по разным длинам волн.

Кривые, полученные в результате этих исследований, приведены на рисунке 4. Благодаря им получены следующие результаты.

1. Спектр излучения абсолютно черного тела имеет **сплошной (непрерывный)** характер, т.е. в спектре излучения присутствует непрерывный ряд волн.

2. Излучательная способность более резко уменьшается в сторону коротких волн, чем в сторону длинных.

3. Существует отчетливо выраженный максимум излучательной способности. С повышением температуры максимум смещается в сторону более коротких волн. Тщательное количественное исследование кривых позволило установить соотношение

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (4)$$

названное **законом смещения Вина**: *длина волны $\lambda_{\max}$, на которую приходится максимум излучательной способности r_λ , обратно пропорциональна его абсолютной температуре*. По современным данным, постоянная Вина $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

4. Получено доказательство того, что *максимальная излучательная способность абсолютно черного тела r_{λ_m} возрастает пропорционально пятой степени абсолютной температуры*:

$$r_{\lambda_m} = C'' T^5, \quad (5)$$

где $C'' = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-5}$.

5. Площадь, ограниченная каждой кривой и осью абсцисс, определяет полную энергию, испускаемую единицей поверхности за единицу времени, т.е. R_λ .

Мы получили представление об основных экспериментальных законах теплового излучения. Несомненно, полученные результаты позволяют сделать следующее важное заключение: *аналитический вид функции $r_\lambda = f(\lambda, T)$, т.е. математическая зависимость, показанная на рисунке 4, есть то соотношение, которое даст возможность вывести законы теплового излучения, полученные экспериментально*. Т.е. оставалось главное дело, а именно: проблема надежного теоретического обоснования эмпирических законов теплового излучения.

5.2. Гипотеза квантов.

Формула Планка для теплового излучения



Д.Релей
(1842-1919г.)

Многие физики пытались вывести формулу излучения. Вин исходил из законов термодинамики, Рэлей из теоремы равномерного распределения энергии по степеням свободы и т.д. Однако никогда еще формулы, выведенные на основе классических законов не были в таком кричащем противоречии с результатами опытов.



В.Вин
(1864-1928г.)

Классическая теория утверждала, что излучательная способность тела при данной температуре должна монотонно (рис.5) расти с уменьшением длины волны. Так, в формуле Рэля – Джинса

$$r_\lambda = \frac{8\pi}{c\lambda^2} kT, \quad (6)$$

при $\lambda \rightarrow 0$, $r_\lambda \rightarrow \infty$, что находилось в резком противоречии

с опытом. Это резкое расхождение с легкой руки Эренфеста получило специальное название «ультрафиолетовой катастрофы».

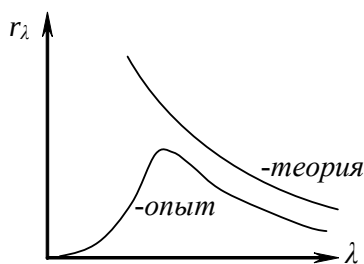


Рис.5

Учитывая неудачи теоретиков, Макс Планк в 1900г. выдвинул гипотезу, существенно изменившую ряд основных положений классической физики: **энергия микроскопических систем (атомов, молекул) изменяется не непрерывно, а дискретными порциями - квантами, причем, энергия квантов $E=h\nu$, где h – постоянная величина** (постоянная Планка $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с), ν – частота излучения (частота

кванта). Так было положено начало квантовой физики. Закон излучения Планка выглядит так:

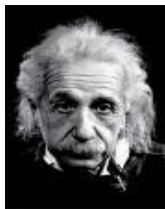
$$r_{\lambda} = \left(\frac{8\pi hc}{\lambda^5} \right) \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (7)$$



М.Планк
(1858-1947г.)

Формула Планка прекрасно согласуется с результатами измерений распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела при различных температурах. Кроме того, позволила теоретически вывести экспериментальные законы излучения, рассмотренные ранее, связать постоянную h с постоянной Стефана – Больцмана σ , постоянной закона Вина b и постоянной Больцмана k .

Сам Планк с большим трудом примирился с отказом от классических представлений и, совершив свое великое открытие, ряд лет посвящал тому, чтобы понять излучение черного тела на основе чисто классических представлений. Однако неудачи привели его к окончательному выводу, что в рамках классической физики излучение черного тела понять невозможно.



А.Эйнштейн
(1879-1955г.)

Эйнштейн сделал после Планка следующий крупный шаг на пути развития теории квантов. Он выдвинул гипотезу, согласно которой осцилляторы могут излучать или поглощать энергию порциями благодаря тому, что само излучение состоит из отдельных корпускул – фотонов или квантов, несущих энергию $h\nu$.