

Раздел 17. Квантовые модели материи

Тема 1. Фотонный газ

Тема 2. Электронный газ в металле

Тема 3. Квантовая теория электропроводности

Тема 4. Полупроводники. Сверхпроводимость

Тема 5. Фононы

Для работы с тестами скорректируйте Word:
Сервис→Макрос→Безопасность→Низкая

Тема 1. Фотонный газ.

П.1. Взаимодействие ЭМИ с физическими телами.

П.2. Абсолютно черное тело и его ЭМИ.

П.3. Законы излучения АЧТ

П.1. Взаимодействие ЭМИ с физическими телами.

ВОПРОС: Как воздействует электромагнитное излучение на вещество?

ИЗВЕСТНО: Материальными являются как вещественные объекты, так и взаимодействие между ними.

Между заряженными объектами существует электромагнитное взаимодействие.

В квантовой физике считается, что электромагнитное взаимодействие (электромагнитное излучение - ЭМИ) передается с помощью материального объекта, который следует описывать в одних условиях, как электромагнитную волну (волновая модель), а в других условиях, как поток частиц, называемых фотонами (корпускулярная модель).

Известно взаимодействие ЭМИ с границей вещества. В этом случае мы наблюдаем следующие эффекты:

- отражение, т.е. возвращение ЭМИ в ту среду, из которой оно двигалось;
- проникновение внутрь вещества, которое для прозрачных тел называется преломлением;
- распространение ЭМИ в любом веществе сопровождается потерей энергии или, как принято говорить, «затуханием».

Явление уменьшения энергии ЭМИ при его распространении в веществе называется затуханием.

Затухание ЭМИ в веществе в конечном итоге приводит к его нагреву (пример - СВЧ-печка).

Отражение ЭМИ от границы используется чрезвычайно широко. Оно обеспечивает человеку подавляющую часть информации через зрение.

Совокупность ЭМИ диапазона длин волн $0.3 - 0.7$ мкм называется видимым светом или просто светом.

Цвет это свойство ЭМИ по-разному воздействовать на зрение человека (около 0.5 мкм – зеленый, около 0.4 мкм – синий и т.д.).

Чтобы видеть предметы, которые сами не светятся, нужны осветительные приборы. Днем мы используем «дневной свет», т.е. излучение Солнца, которое отражается от предметов.

Черными называют предметы, которые ничего не отражают и мы видим их «черными» на фоне других предметов, которые отражают или излучают видимый свет.

Характеристика отражательных свойств предмета называется коэффициентом отражения.

$$a(\lambda) = \frac{dE_{\text{отр}}(\lambda)}{dE_{\text{пад}}(\lambda)},$$

где $dE(\lambda)$ – энергия ЭМИ, имеющего длины волн в диапазоне от λ до $\lambda + d\lambda$.

В соответствии с законом сохранения энергии $dE_{\text{пад}}(\lambda) = dE_{\text{отр}}(\lambda) + dE_{\text{погл}}(\lambda)$.

Разделив на $dE_{\text{пад}}(\lambda)$ слева и справа, получим соотношение

$$1 = a + b,$$

где b есть коэффициент поглощения, причем $b = 1 - a$.

Если $a = 0$, а $b = 1$, то такое тело называется абсолютно черным (АЧТ).

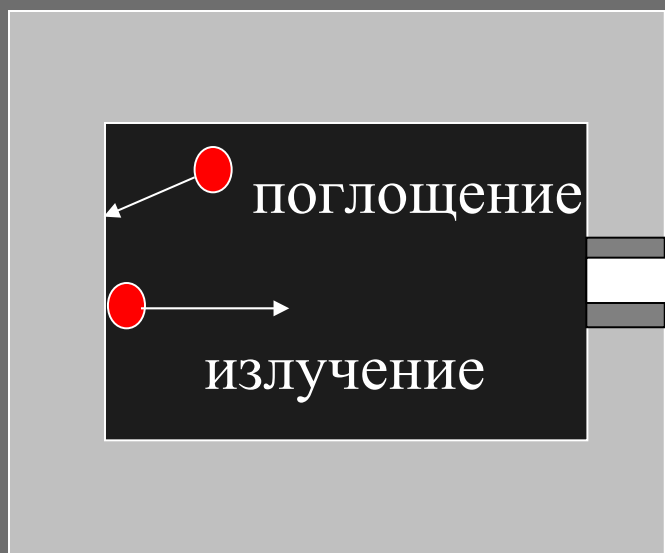
АЧТ это модельный объект, который поглощает (не отражает) любое ЭМИ, падающее на его поверхность.

ЗАМЕЧАНИЕ: АЧТ не обязательно черное, оно может светиться, если испускает ЭМИ.

ТЕСТ

П.2. Абсолютно черное тело и его ЭМИ.

Вопрос: Как создать реальный объект, близкий к модели АЧТ?



излучение АЧТ

Выходят только фотоны, находящиеся в термодинамическом равновесии со стенками полости.

Количество фотонов внутри полости может меняться, но постоянной остается их суммарная энергия.

Излучательная способность АЧТ характеризуется спектральной плотностью излучения

$$r(\lambda) = \frac{dE_{\text{изл}}(\lambda)}{d\lambda}.$$

Задача. Найти $r(\lambda)$.

Энергия фотона $E_{\text{ф}} = h\nu = \hbar\omega$, где ν - частота, ω - циклическая частота ЭМИ. Постоянная Планка (перечеркнутая)

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

Импульс фотона $p_{\text{ф}} = m_{\text{ф}}c = \frac{E_{\text{ф}}}{c}$. Энергия фотона $E_{\text{ф}} = m_{\text{ф}}c^2$.

Равновесным фотонным газом называется ЭМИ, находящееся в тепловом равновесии со всеми объектами, с которыми оно имеет тепловой контакт достаточно долго.

ТЕСТ

Фотон обладает спином. Спиновое квантовое число фотона $s_{\phi} = 1$.

Частицы с целочисленным спином не подчиняются принципу Паули и в каждом квантовом состоянии может находиться сколько угодно частиц (фотонов).

Статистика систем таких частиц разработана Бозе и Эйнштейном, а сами частицы получили наименование «бозоны».

Заполненность уровня с данной энергией E_i равна отношению n_i (количества фотонов dN с энергией E_i в объеме dV) к g_i (количеству доступных квантовых состояний, обладающих этой энергией), причем

$$\frac{n_i}{g_i} = \frac{1}{e^{\frac{E_i}{kT}} - 1}.$$

Отсюда можно получить спектральную плотность энергии излучения АЧТ в единице объема, как функцию частоты:

$$w_{\omega} = \hbar \omega \frac{dN(\omega)}{dV \cdot d\omega} = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1}.$$

Эта формула получила название формулы Планка.

Графически:

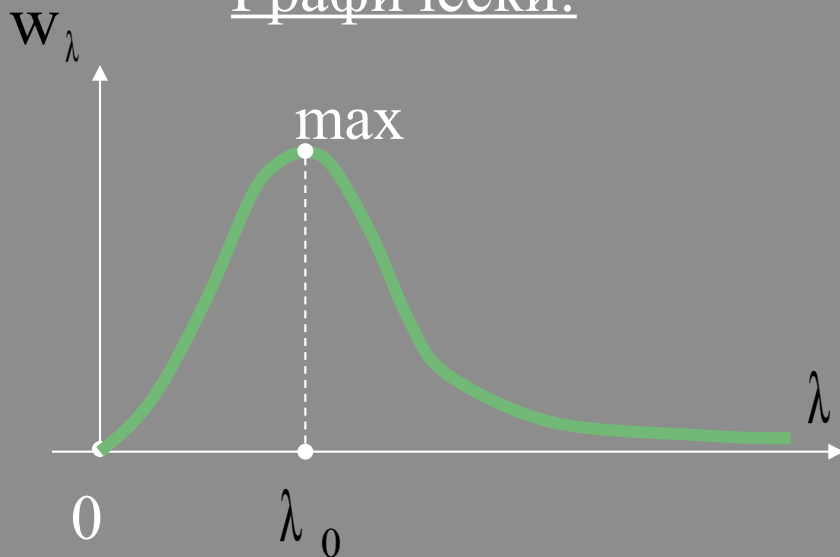


График начинается из 0 и асимптотически приближается к 0 при $\lambda \rightarrow \infty$.

При λ_0 наблюдается максимум спектральной плотности энергии излучения АЧТ.

ТЕСТ

П.3. Законы излучения АЧТ

Проблема: Как связаны характеристики излучения АЧТ с его температурой?

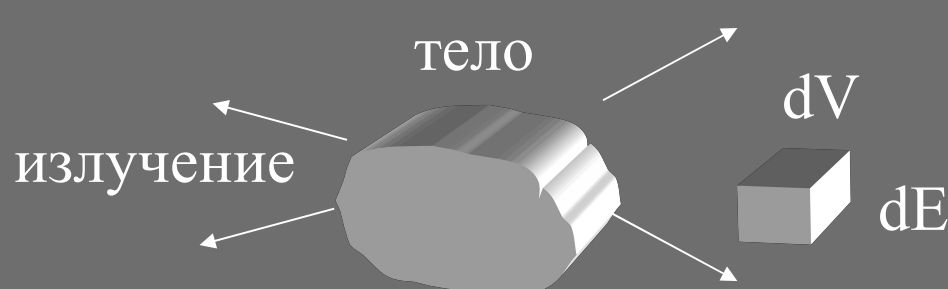
Закон Стефана-Больцмана:

Объемная плотность энергии ЭМИ, излучаемого АЧТ, пропорциональна четвертой степени температуры АЧТ.

Математически
$$W_{\text{ПОЛН}} = \int_0^{\infty} w_{\lambda} d\lambda = aT^4,$$

где константа
$$a = \frac{k^4 \pi^2}{15c^3 \hbar} = 7.56 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}^4}.$$

Объемная плотность энергии есть отношение энергии dE к объему dV , в котором она сосредоточена:



$$w_{\text{полн}} = \frac{dE}{dV}.$$

Энергетическая светимость тела (поток энергии с единицы площади поверхности тела за единицу времени или поверхностная плотность потока мощности излучения АЧТ):

$$R_{\text{ЭН}} = \frac{dE(dS, dt)}{dS \cdot dt} = \frac{c}{4} w_{\text{полн}} = \sigma T^4 - \text{закон Стефана-Больцмана.}$$

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

ТЕСТ

Закон смещения Вина

Длина волны ЭМИ АЧТ, при которой спектральная плотность излучения максимальна, обратно пропорциональна температуре тела.

$$\lambda_0 = \frac{b}{T}, \quad \text{константа Вина} \quad b = \frac{2\pi \hbar c}{5k} = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м/К.}$$

Задача. Рассчитать мощность излучения человека.

Решение. Используем закон Стефана-Больцмана $R_{ЭН} = \sigma T^4$.

$$R_{ЭН} = \frac{dE_{ИЗЛ}}{dS \cdot dt} = \frac{N_{ИЗЛ}}{S}.$$

Для оценки: площадь поверхности тела человека 1 м^2 , температура поверхности тела $T \approx 300 \text{ К}$.

Тогда $N_{ИЗЛ} = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 3^4 \cdot 10^8 \approx 413.3 \text{ Вт}$

— как очень мощная электрическая лампа!

ТЕСТ

ТЕСТ

Задача. Найти длину волны ЭМИ человека, при которой он излучает максимальное ЭМИ.

Решение. Используем закон смещения Вина.

Пусть температура $T = 300$ К. Тогда

$$\lambda_0 = \frac{2.9 \cdot 10^{-3}}{300} = 10^{-5} \text{ м} = 10 \text{ мкм.}$$

Излучение с такой длиной волны называется инфракрасным. Оно используется для обнаружения человека в темноте.

ДОПОЛНЕНИЕ:

Видимый свет имеет длины волн от 0.3 мкм до 0.7 мкм.
Середина этого диапазона 0.5 мкм.

Расчет с использованием закона Вина дает температуру 6000 К для тела, имеющего максимум излучения при такой длине волны.

Какое известное нам тело имеет такую температуру?

Такова температура поверхности Солнца!