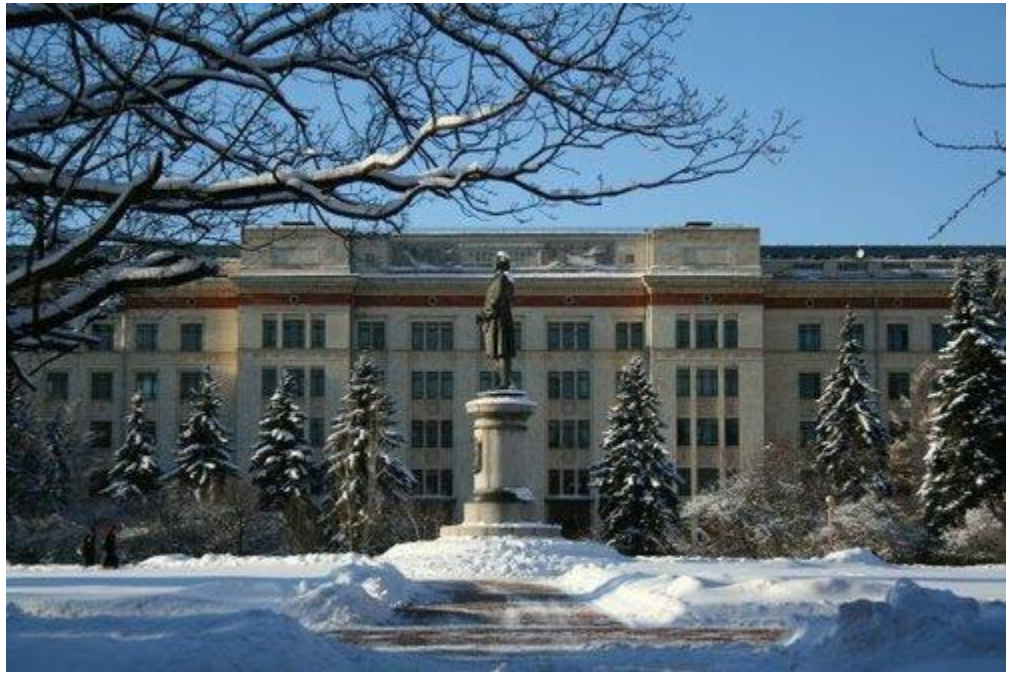
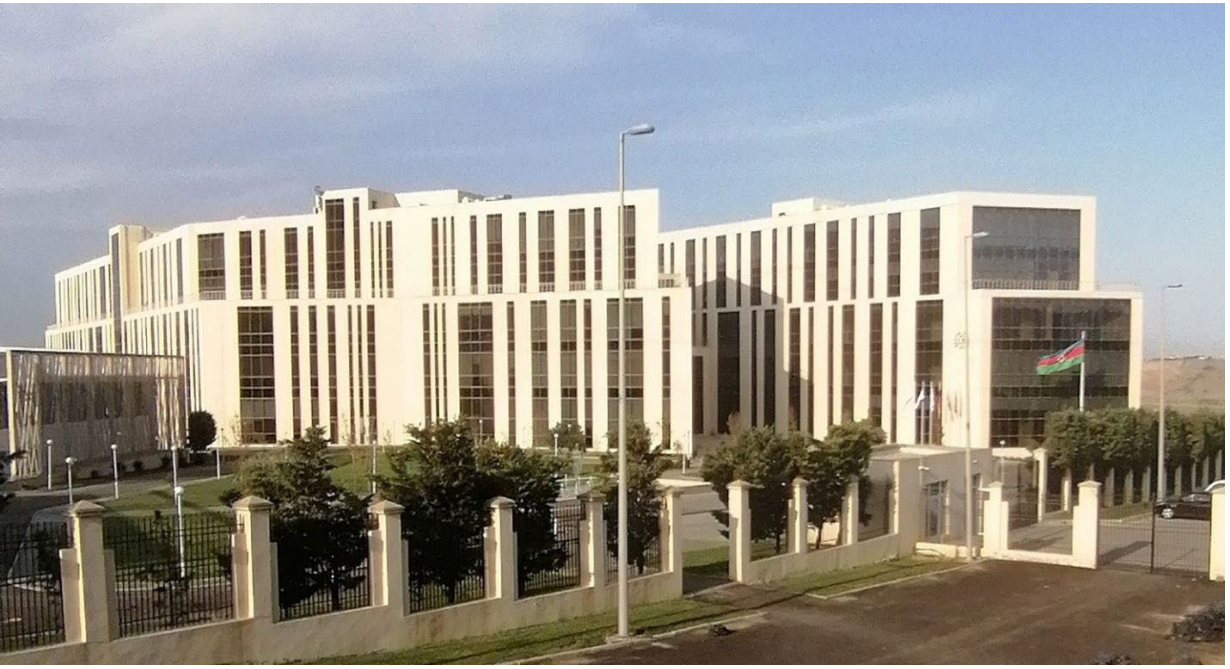
Атомная физика

Лекция 1





проф. Попов Александр Михайлович

Программа курса

Физика микромира атомно-молекулярных масштабов

I. Классическая теория и ее недостаточность для описания явлений в микромире.
II. Квантовые представления о микромире.
III. Основы формализма квантовой механики. Простейшие квантовые системы.
IV. Атом водорода.
V. Многоэлектронные атомы.
VI. Понятие о молекулярных системах.
VII. Взаимодействие квантовой системы с электромагнитным полем
VIII. Современная атомная физика. Нобелевские премии по физике 2018 и 2023 г.

Литература

- А.М. Попов, О.В. Тихонова Лекции по атомной физике, М. 2007
- А.М. Попов, О.В. Тихонова Атомная физика, М., 2019
  http://affp.phys.msu.ru/index.php/education/books
- А.В. Богацкая, А.М. Попов Основы атомной физики и теории взаимодействия света и вещества, М., 2023
- Сборник задач по атомной физике. М. 2014
  http://affp.phys.msu.ru/index.php/education/books

Сайт кафедры в Москве: http://affp.phys.msu.ru/

О выборе системы единиц

СИ: 1кг, 1м, 1с: $1\text{Н} = 1\text{кг} * 1\ \text{м/с}^2$

CGS (Гауссова): 1г, 1см, 1с: $1\text{дн} = 1\text{г} * 1\ \text{см/с}^2$

$\Rightarrow$ 1Н =10^5 дн

Электродинамика

Закон Кулона $F \sim \frac{q_1 q_2}{r^2}$ $\qquad F = k\frac{q^2}{r^2}$

1) Выбор единицы заряда $k \equiv 1$ $\Rightarrow$ $[q^2] = [F] \times [r^2]$ $\Rightarrow$ $[q] = \text{г}^{1/2}\text{см}^{3/2}\text{с}^{-1} = 1\ \text{абс. ед.}\ CGSE$

Элементарный заряд: $e = 4.8 \times 10^{-10}$ абс.ед.

2) СИ: новая независимая единица – сила тока 1 Ампер. Заряд 1 Кл = 1А*1с

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q^2}{r^2}, \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{Н} \times \text{м}^2/\text{Кл}^2 \Rightarrow 10^{-5}\text{Н} = 9 \times 10^9 \text{Н} \times \text{м}^2/\text{Кл}^2 \frac{q^2}{10^{-4}\text{м}^2} \Rightarrow \text{q(Кл)} = \frac{10^{-9}}{3} q(\text{абс. ед.})$$

$$e = 4.8 \times 10^{-10}\ \text{абс. ед.} = 1.6 \times 10^{-19}\text{Кл}$$

Потенциал: $\varphi = q/r$ $\qquad \varphi = (1/4\pi\varepsilon_0)q/r$ $\qquad$ 1 абс.ед.=9e9*(1e-9/3)/0.01=300 В

1 эВ= $1\text{В} \times 1.6 \times 10^{-19}\text{Кл} = 1.6 \times 10^{-19}$ Дж $= \frac{1}{300} \times 4.8 \times 10^{-10} = 1.6 \times 10^{-12}$ эрг

Микромир: масштабы

Атомный размер $a_0 = 5.29 \times 10^{-9}$ см (0.529 А)

Характерное значение скорости

$v_0 = \sqrt{e^2/m a_0} \approx 2.18 \cdot 10^8$ см/с

$$\frac{m v_0^2}{a_0} = \frac{e^2}{a_0^2}$$

Почему размер атома такой???

Характерное время $\tau = a_0/v_0 = 2.42 \times 10^{-17}$ с

Энергия $E = m v_0^2/2 = 13.6$ эВ

Основные константы

Масса электрона 9.1e-28 г

Заряд электрона 4.8e-10 абс. ед.

Скорость света 3e10 см/с

Постоянная Больцмана 1.38e-16 эрг/град

Гравитационная постоянная 6.67e-8 $\text{см}^3\text{г}^{-1}\text{с}^{-2}$

Масса протона 1.67e-24 г (1836 эл. масс)

Энергия покоя электрона 0.511 МэВ

Энергия покоя протона 938 МэВ

Постоянная Планка $h = 6.62 \times 10^{-27}$ эрг*с

$\hbar = h/2\pi = 1.05 \times 10^{-27}$ эрг*с

Микромир атомно-молекулярных масштабов и классическая физика

- Электронная теория Лоренца (1892-1895), как синтез идей классической механики и электродинамики для описания явлений микромира
- Атомистическое строение вещества. Электроны (Дж.Дж. Томсон, 1897)
- Атом, как гармонический осциллятор. Модель атома Томсона (1904).

Микромир атомно-молекулярных масштабов и классическая физика

- Электронная теория Лоренца (1892-1895), как синтез идей классической механики и электродинамики для описания явлений микромира
- Атомистическое строение вещества. Электроны (Дж.Дж. Томсон, 1897)
- Атом, как гармонический осциллятор. Модель атома Томсона (1904).

Успехи электронной теории Лоренца

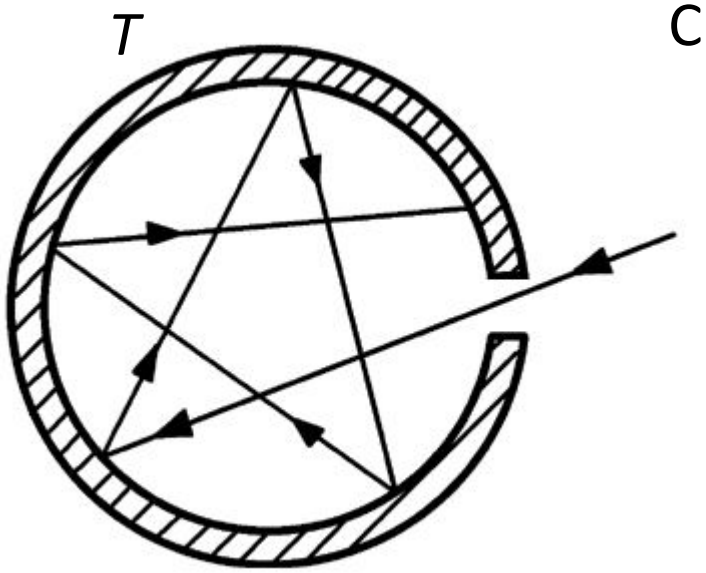
Электромагнитные и оптические явления.
Распространение света в проводящих и диэлектрических средах, дисперсия показателя преломления, теория Друде металлов (1900), эффект Зеемана (1896)

Некоторые принципиальные проблемы теории

- 1) Равновесное электромагнитное излучение
- 2) Фотоэффект
- 3) Эффект Комптона
- 4) Спектр тормозного электромагнитного излучения

- 5) Устойчивость атомов

Равновесное электромагнитное излучение



Спектральная плотность излучения $\rho_\omega(T)$: $\int \rho_\omega(T) d\omega = U(T)$

Стоячие волны в объеме L^3:

В интервале волновых векторов $(\vec{k}, \vec{k} + d\vec{k})$

число типов колебаний $dN = d^3k/(2\pi)^3$

В интервале частот $(\omega, \omega + d\omega)$ $dN = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} d\omega$ (поляризация!)

$$\rho_\omega(T) d\omega = \langle \varepsilon_\omega \rangle dN = \langle \varepsilon_\omega \rangle \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} d\omega$$

Закон равнораспределения энергии по степеням свободы: $\langle \varepsilon_\omega \rangle = kT$

Формула Релея и Джинса (1905): $\rho_\omega(T) d\omega = \frac{\omega^2 kT}{\pi^2 c^3} d\omega$

Эренфест: ультрафиолетовая катастрофа!!

Равновесное электромагнитное излучение II

Формула Вина (1896) (фиолетовая часть спектра): $\rho_\omega(T) \sim \exp(-\beta\omega/k_B T)$

Планк (1900): идея совместить формулы РД и Вина

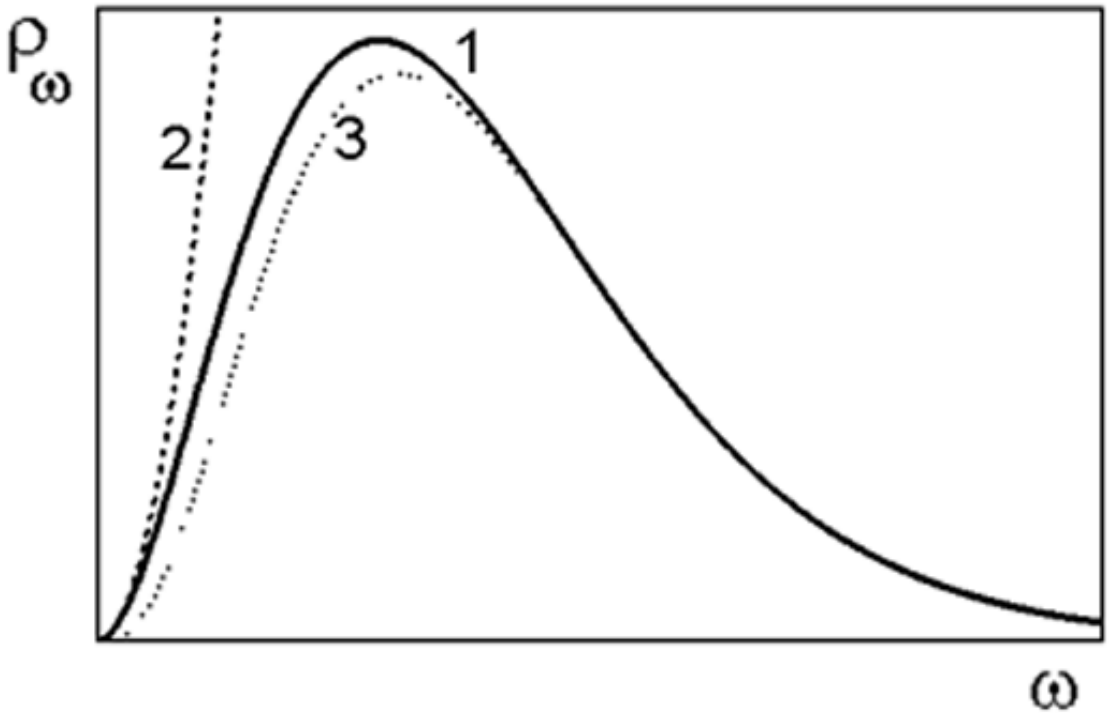
Энергия полевой моды строго дискретна: $\varepsilon_\omega = n\varepsilon_0, (n = 0,1,2 \dots)$

Тогда $\langle \varepsilon_\omega \rangle = \varepsilon_0/(\exp(\varepsilon_0/k_B T) - 1)$. Видно, что $\varepsilon_0 \sim \omega$. $\longrightarrow$ $\varepsilon_0 = \hbar\omega$

1) Классическая статистика не верна!
2) Существует минимальная порция энергии полевой моды

Формула Планка

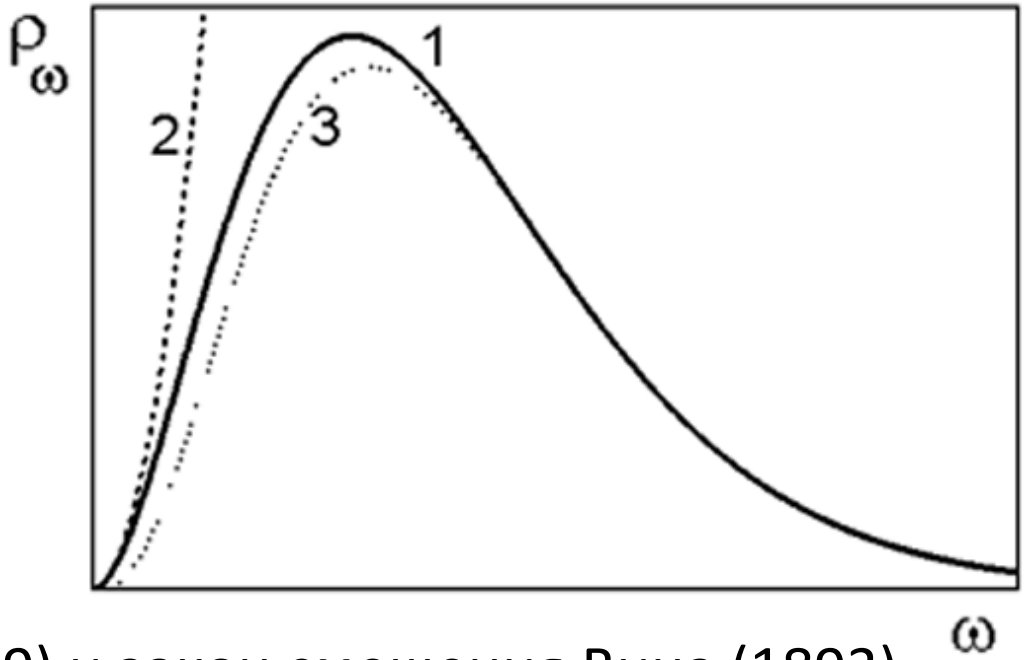
$$\rho_\omega d\omega = \frac{1}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar\omega^3}{\exp(\hbar\omega/k_B T) - 1} d\omega$$



Равновесное электромагнитное излучение III

Формула Планка

$$\rho_\omega d\omega = \frac{1}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar\omega^3}{\exp(\hbar\omega/k_B T) - 1} d\omega$$



Формулы Релея-Джинса и Вина

Закон Стефана – Больцмана (1879) и закон смещения Вина (1893)

$$U = \int_0^\infty \rho_\omega d\omega = \frac{1}{\pi^2 c^3} \int_0^\infty \frac{\hbar\omega^3}{\exp(\hbar\omega/k_B T) - 1} d\omega = \frac{k_B^4 T^4}{\pi^2 c^3 \hbar^3} \int_0^\infty \frac{\xi^3}{\exp(\xi) - 1} d\xi = \sigma T^4 \quad \sigma = \frac{\pi^2 k_B^4}{15 c^3 \hbar^3} = 7.57 \cdot 10^{-15}$$

эрг/(см^3 К^4)

$$\frac{\hbar\omega_{\max}}{k_B T} \approx 2.82$$

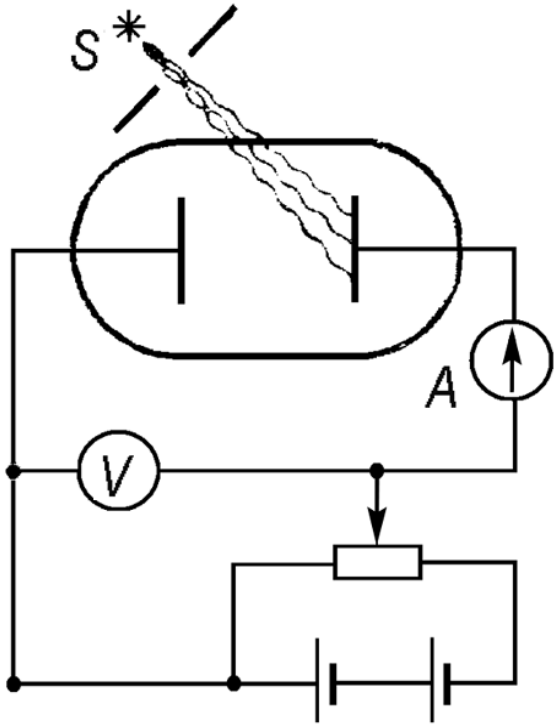
Примеры

1) Излучение Солнца: $T = 5770$ К

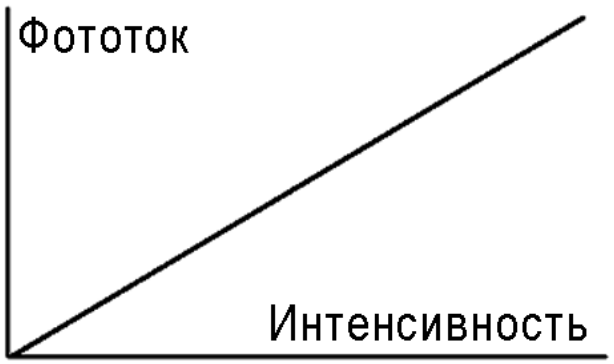
2) Теория Большого взрыва (Гамов, 1948) и реликтовое излучение
   Вильсон и Пензиас (1965): $T = 2.7$ К

Фотоэффект

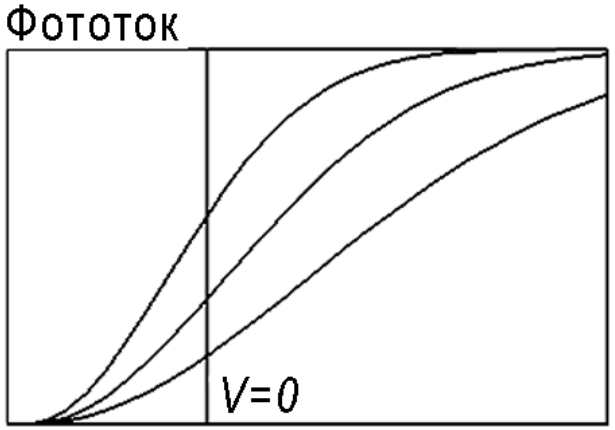
Опыты Г.Герца (1887), Столетова (1888-89) и Ленарда (1899-1902)

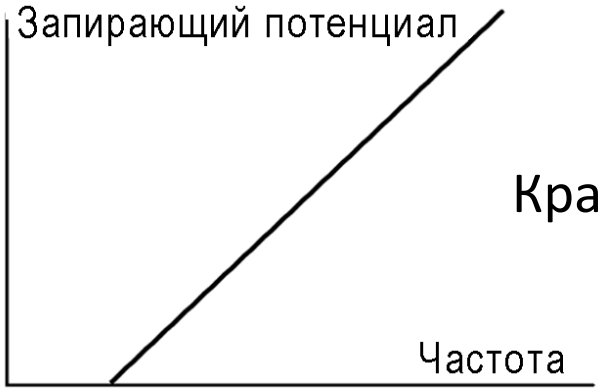


Зависимость фотока от интенсивности



Запирающий потенциал





Красная граница фотоэффекта

Фотоэффект II

1) Что можно и что нельзя понять исходя из классических представлений о свете ?

2) Закон Эйнштейна (1905)

$$E_k = \hbar\omega - A_e$$

Свет как поток особых частиц – фотонов