

# 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>

# О выборе системы единиц

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

$$\longrightarrow 1\text{Н} = 10^5 \text{ дН}$$

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

## Электродинамика

Закон Кулона

$$F \sim \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = k \frac{q^2}{r^2}$$

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

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

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

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r^2}, \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{Н} \times \text{м}^2 / \text{Кл}^2 \longrightarrow 10^{-5} \text{Н} = 9 \times 10^9 \text{Н} \times \text{м}^2 / \text{Кл}^2 \frac{q^2}{10^{-4} \text{м}^2} \longrightarrow q(\text{Кл}) = \frac{10^{-9}}{3} q(\text{абс. ед.})$$

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

Потенциал:  $\varphi = q/r$

$$\varphi = (1/4\pi\epsilon_0)q/r$$

$$1 \text{ абс. ед.} = 9 \times 10^9 * (1 \times 10^{-9} / 3) / 0.01 = 300 \text{ В}$$

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

# Микромир: масштабы

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

Характерное значение скорости

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

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  $9.1 \text{e-}28$  г

Заряд электрона  $4.8 \text{e-}10$  абс. ед.

Скорость света  $3 \text{e}10$  см/с

Постоянная Больцмана  $1.38 \text{e-}16$  эрг/град

Гравитационная постоянная  $6.67 \text{e-}8$  см<sup>3</sup>г<sup>-1</sup>с<sup>-2</sup>

Масса протона  $1.67 \text{e-}24$  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

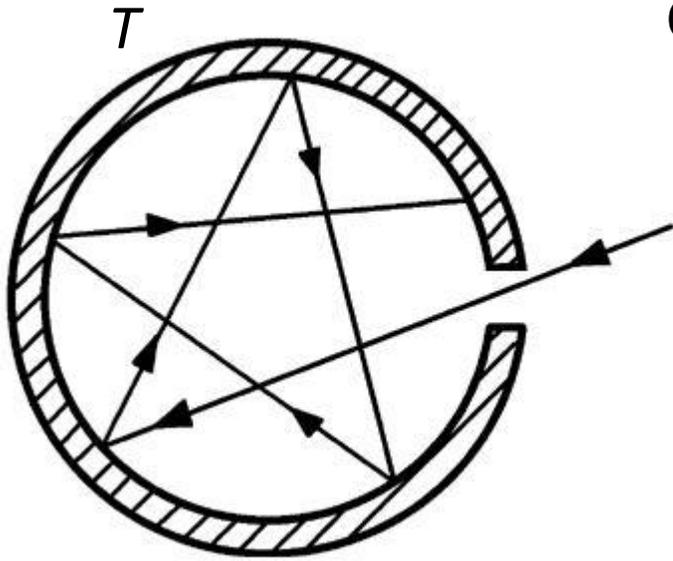
Электромагнитные и оптические явления.

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):  $\rho_\omega(T) \sim \exp(-\beta\omega/kT)$

**Планк (1900): идея совместить формулы РД и Вина**

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

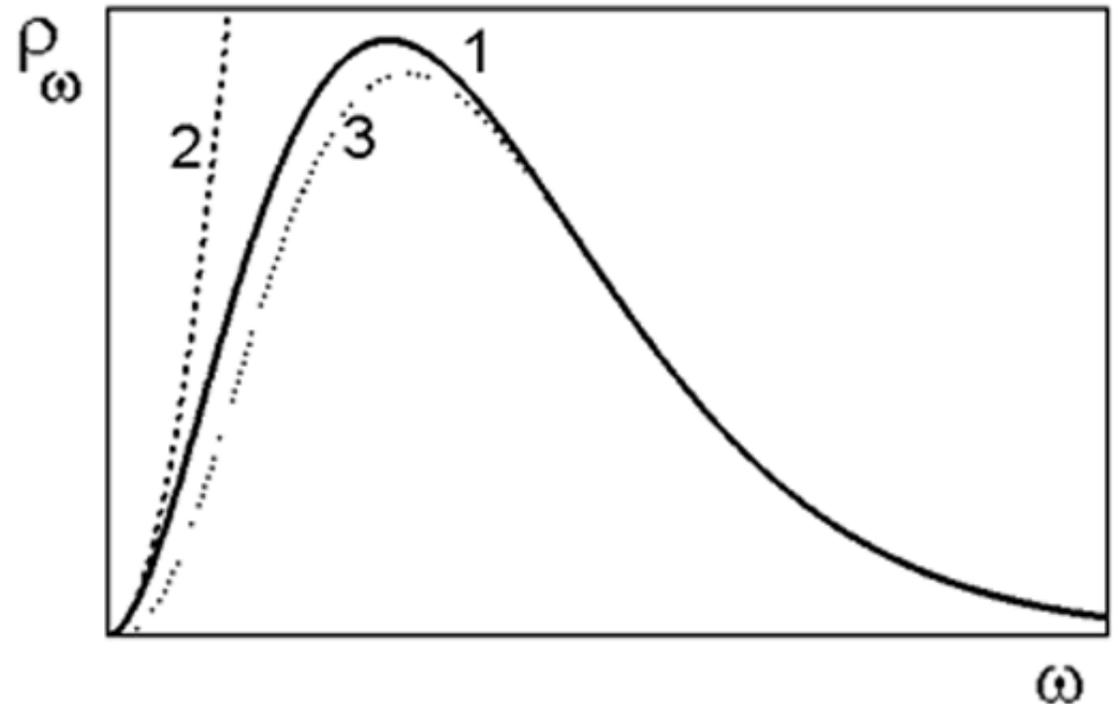
Тогда  $\langle \varepsilon_\omega \rangle = \varepsilon_0 / (\exp(\varepsilon_0/kT) - 1)$ . Видно, что  $\varepsilon_0 \sim \omega$ .  $\longrightarrow \varepsilon_0 = \hbar\omega$

**1) Классическая статистика не верна!**

**2) Существует минимальная порция энергии полевой моды**

Формула Планка

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

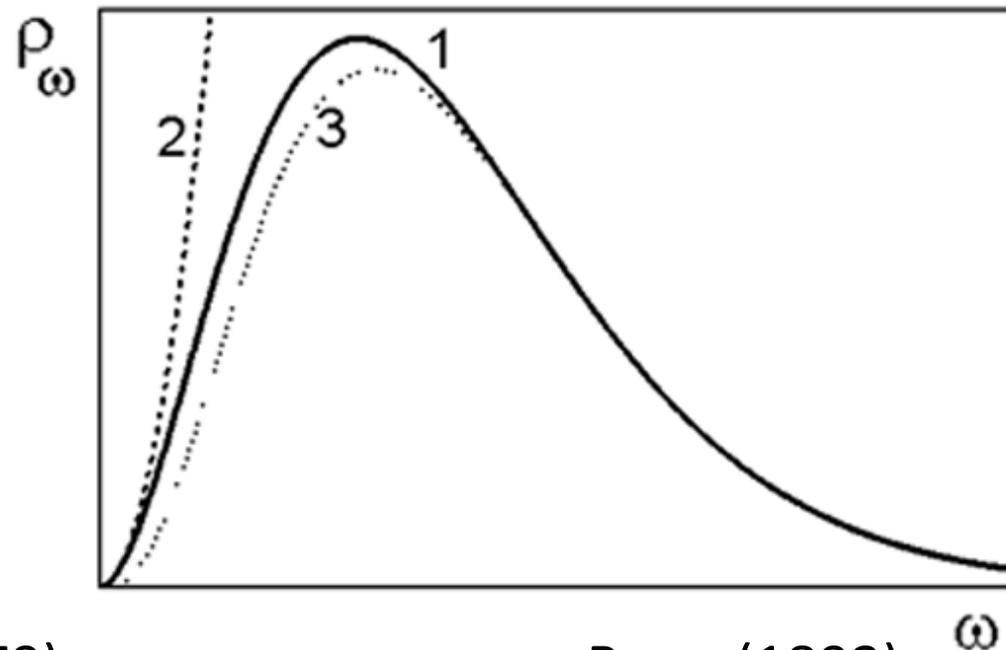


## Равновесное электромагнитное излучение III

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)

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

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

# Примеры

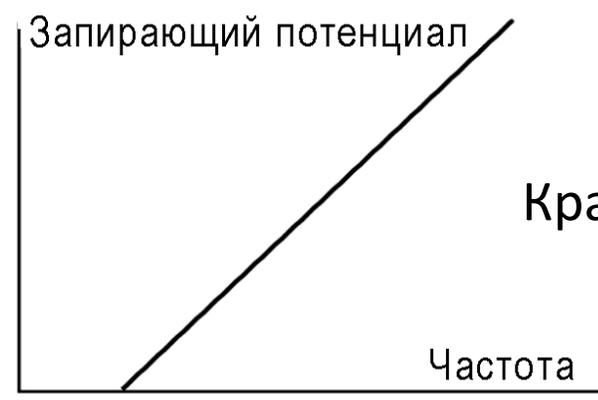
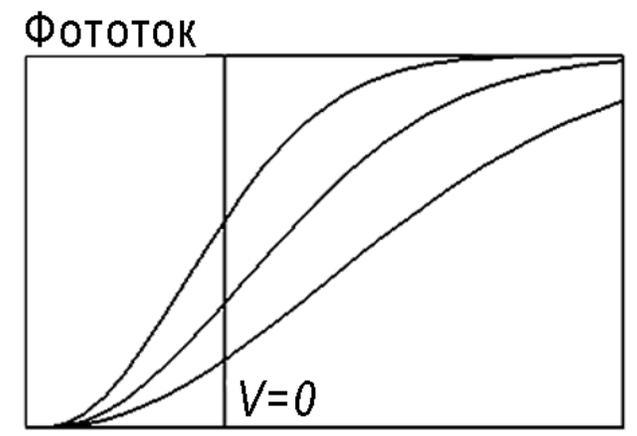
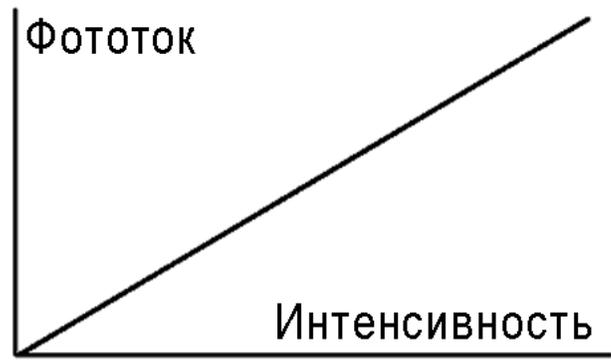
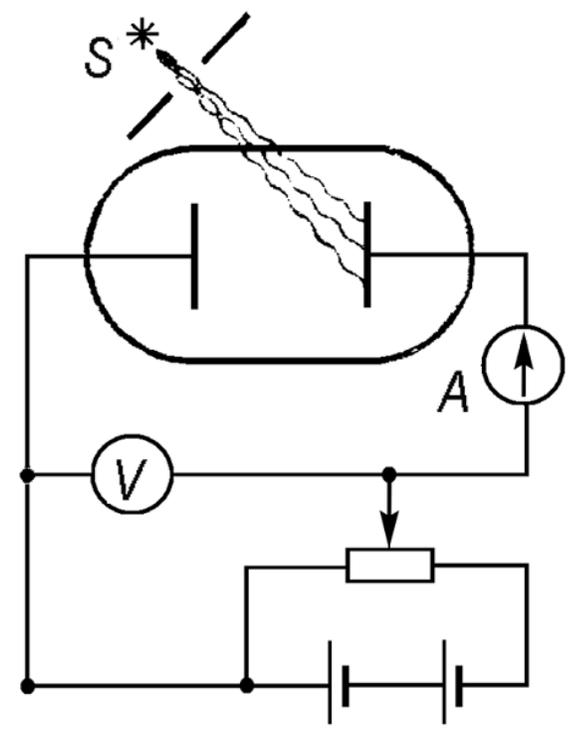
- 1) Излучение Солнца:  $T = 5770 \text{ К}$
- 2) Теория Большого взрыва (Гамов, 1948) и реликтовое излучение Вильсон и Пензиас (1965):  $T = 2.7 \text{ К}$



# 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)

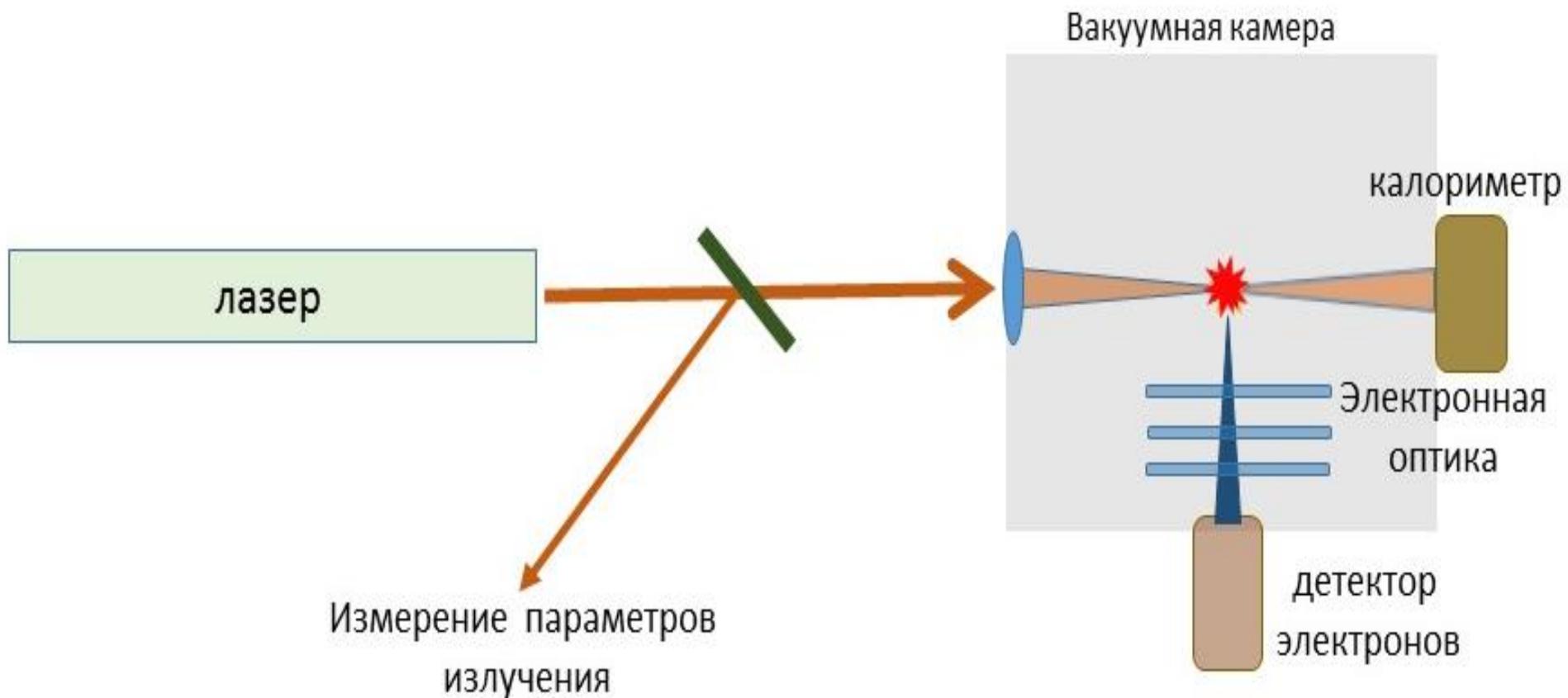
$$E_k = \hbar\omega - A_e$$

Свет как поток особых частиц – фотонов

# Многоквантовый фотоэффект (1964, Н.Б. Делоне)

Схема опытов по наблюдению многоквантового фотоэффекта

Семифотонная ионизация атомов ксенона (12.13 эВ) импульсом рубинового лазера (1.78 эВ)



$$E_k = N\hbar\omega - I_i$$

вероятность  $\sim I^N$