

Электромагнитные волны

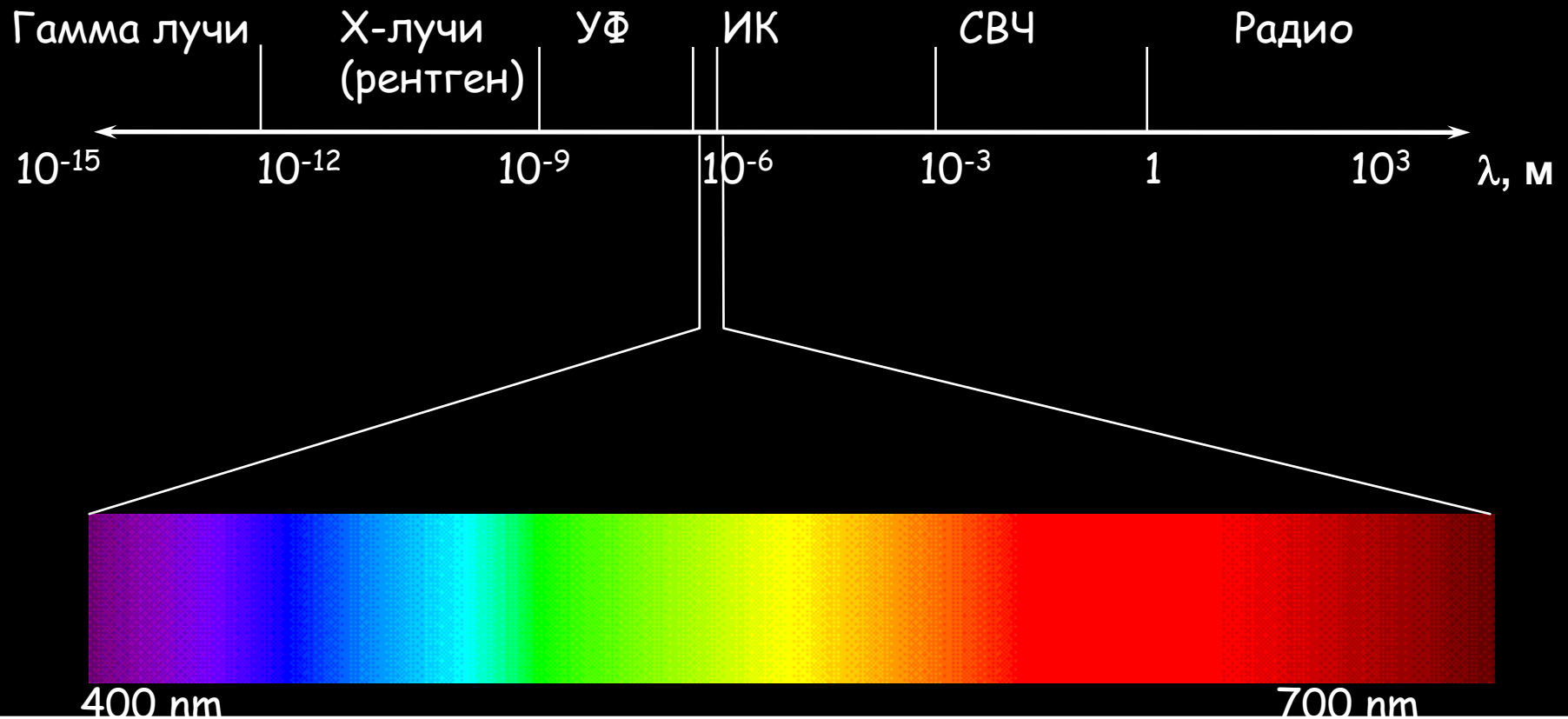
В 1887 году Г.Герц экспериментально подтвердил существование электромагнитных волн в диапазоне длин волн от сантиметров до метров. В 1895 году А.С.Попов изобрел способ использования волн, открытых Герцем, для радиосвязи, и поэтому этот диапазон электромагнитных волн стали называть *радиоволнами*.

Еще раньше были открыты **инфракрасное излучение** (электромагнитные волны с длиной волны, промежуточной между радиоволнами и оптическим излучением) и **ультрафиолетовое излучение** (электромагнитные волны с меньшей длиной волны, и, соответственно, большей частотой, чем оптическое излучение).

В том же 1895 году В.К.Рентген открыл X-лучи, названные его именем, частота которых больше, чем у ультрафиолетовых лучей.

1898-1903 года Резерфорд и Содди выделили из радиоактивных излучений гамма-лучи с частотой, еще большей, чем у рентгеновских лучей.

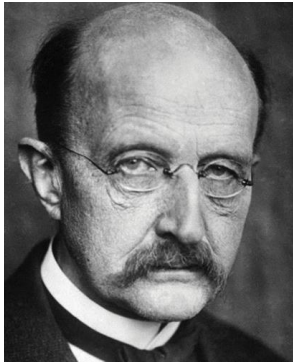
Спектр электромагнитных волн



Квантовые свойства электромагнитного излучения

- Излучение абсолютно черного тела
- Фотоэффект
- Коротковолновая граница рентгеновского излучения
- Эффект Комптона

Излучение абсолютно черного тела

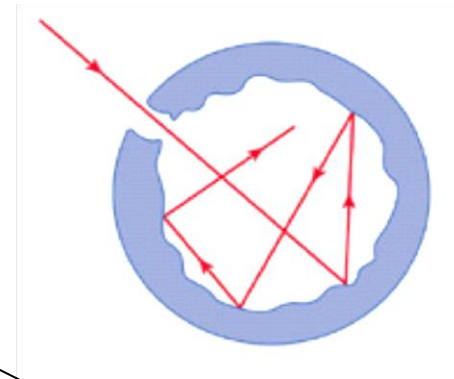
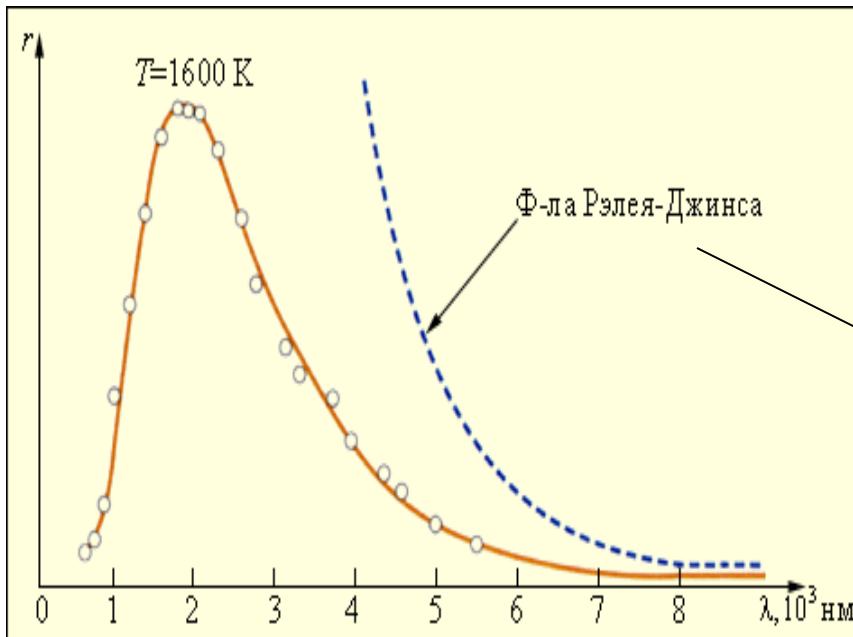


Макс Планк
1858 – 1947

14.12.1900, Берлин

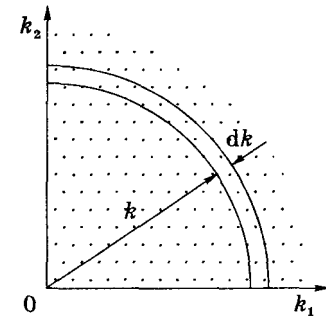
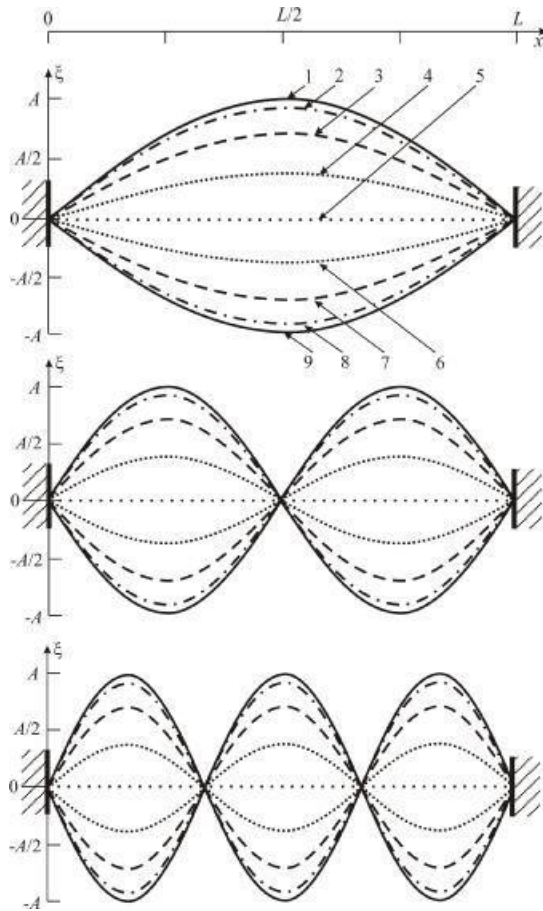
$$\rho_{\omega}(T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / kT} - 1}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$



$$\rho_{\omega}(T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT$$

Расчет числа мод в полости



$$\frac{\lambda_n}{2} n = L \Rightarrow k_n = \frac{\pi}{L} n \Rightarrow \delta k = \frac{\pi}{L}$$

объем одной моды $\delta k_x \delta k_y \delta k_z = (\delta k)^3$

$$dN_\omega = \frac{1}{8} \cdot 2 \cdot \frac{4\pi k^2 dk}{(\delta k)^3} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} L^3 d\omega$$

$$n_\omega = \frac{1}{L^3} \frac{dN_\omega}{d\omega} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3}$$

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \text{Sin}(kx) \text{Cos}(\omega t)$$

$$\rho_\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \langle E \rangle$$

Формула Рэля -Джинса

$$E = \frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2}$$

$$dP = B \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE$$

$$\int B \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE = 1$$

$$B = \frac{1}{\int \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE} = \frac{1}{kT}$$

$$\langle E \rangle = \frac{1}{kT} \int E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE = kT$$

$$\rho_\omega = n_\omega \langle E \rangle = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT$$

Формула Планка

$$E_n = n\hbar\omega \quad \langle E \rangle = \sum P_n E_n$$

$$P_n = \frac{N_n}{N} = \frac{\exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right)}{\sum \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right)} \quad \text{обозначим } x = \frac{\hbar\omega}{kT}$$

$$\langle E \rangle = \hbar\omega \frac{\sum n \exp(-nx)}{\sum \exp(-nx)} = -\hbar\omega \frac{d}{dx} \ln \sum \exp(-nx)$$

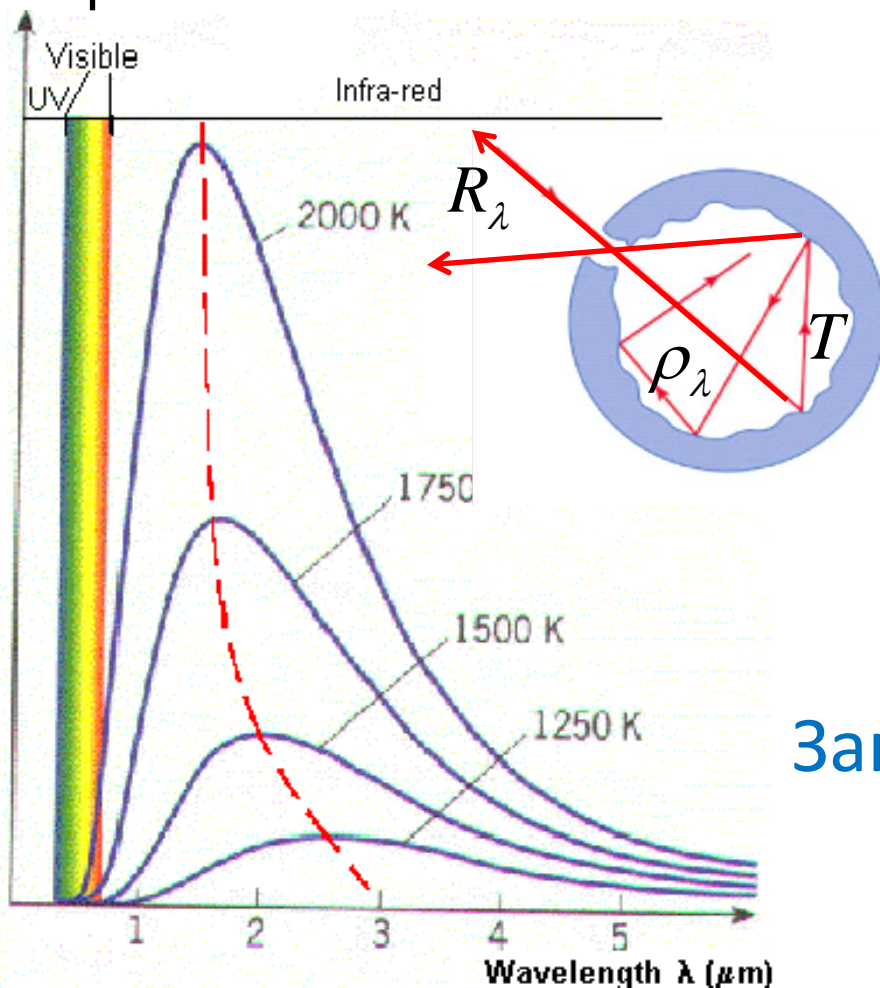
$$\sum \exp(-nx) = [1 - \exp(-x)]^{-1}$$

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}$$

$$\rho_\omega = n_\omega \langle E \rangle = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}$$

Излучение абсолютно черного тела

$$R_{\lambda} = \frac{c}{4} \rho_{\lambda}$$



Закон смещения Вина

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = b$$

$$b = 2.9 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

Закон Стефана - Больцмана

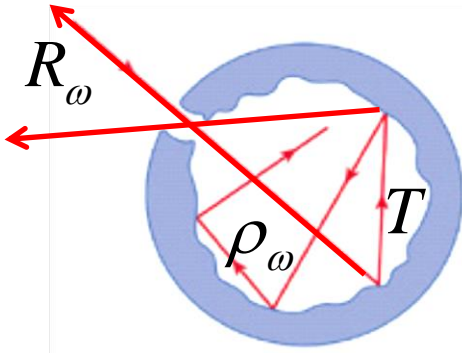
$$R = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{К}^4$$

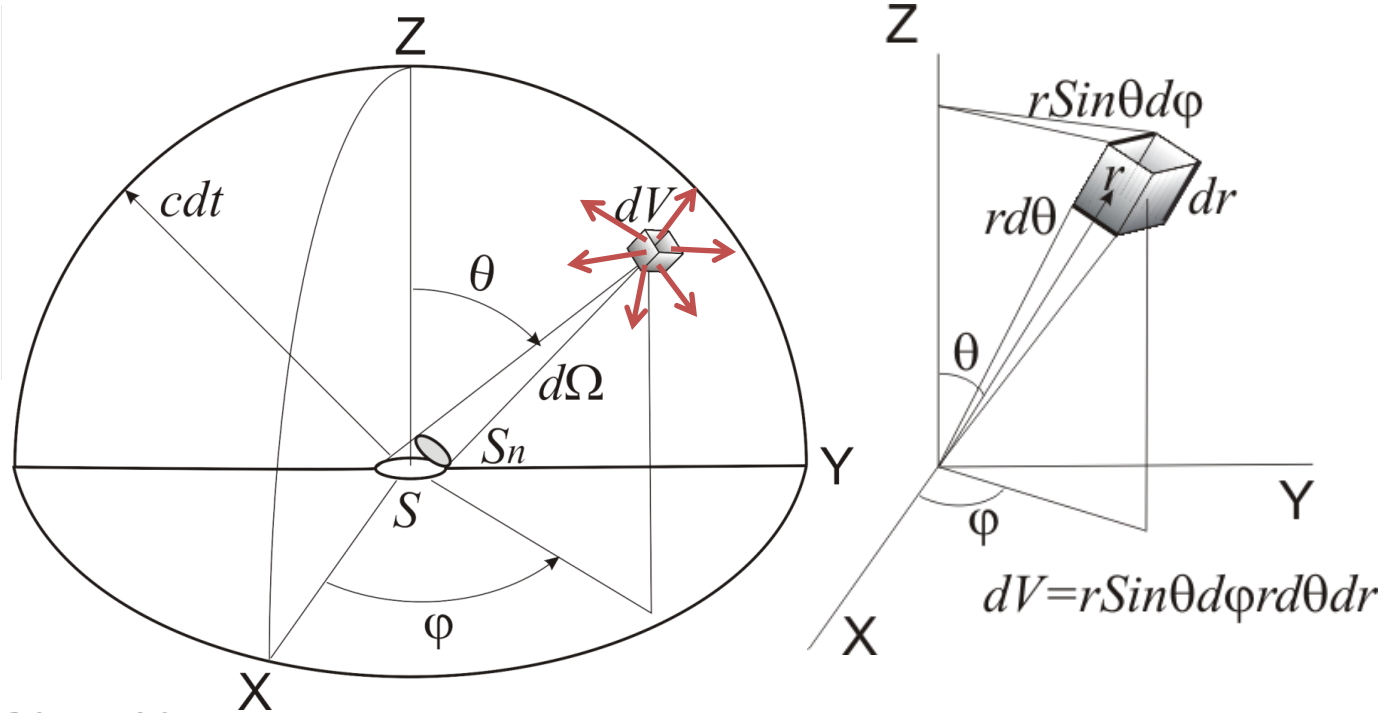
$$R = \int R_{\lambda} d\lambda$$

Энергетическая светимость

Излучение абсолютно черного тела



Как связана энергия, излучаемая полостью, с энергией внутри?



(Связь энергетической светимости АЧТ с плотностью энергии).

$$d\Omega = \frac{S_n}{r^2} = \frac{S \cos \theta}{r^2} \quad dW = \rho_\omega dV \frac{d\Omega}{4\pi}$$

$$dW = \rho_\omega dV \frac{d\Omega}{4\pi} = \rho_\omega r^2 \sin \theta d\varphi d\theta dr \frac{S \cdot \cos \theta}{r^2 4\pi}$$

$$r_\omega = \frac{W}{S dt} = \frac{S \cdot \rho_\omega}{S dt 4\pi} \int_0^{cdt} dr \int_0^{2\pi} d\varphi \int_1^0 \cos \theta d(\cos \theta) = \frac{c}{4} \rho_\omega$$

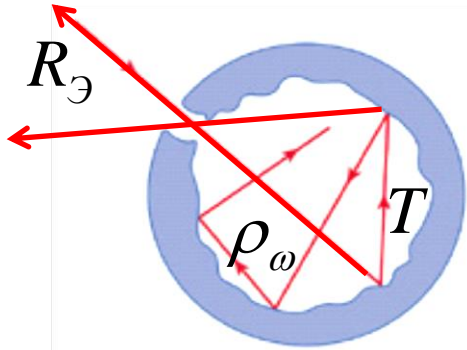
$$R_\omega(T) = \frac{c}{4} \int \rho_\omega(T) d\omega = \frac{c}{4} \int \frac{1}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar \omega^3 d\omega}{\exp(\frac{\hbar \omega}{kT}) - 1} = \sigma T^4$$

$$r_\omega = \frac{c}{4} \rho_\omega$$

Излучение абсолютно черного тела

Закон Стефана - Больцмана

$$R_{\text{э}} = \sigma T^4$$



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

$$R_{\text{э}}(T) = \frac{c}{4} \int \rho_{\omega}(T) d\omega$$

$$x = \frac{\hbar \omega}{kT}$$

$$R_{\text{э}}(T) = \frac{\hbar c}{4\pi^2 c^2} \left(\frac{kT}{\hbar} \right)^4 \int \frac{x^3}{e^x - 1} dx$$

$$R_{\text{э}}(T) = \sigma T^4$$

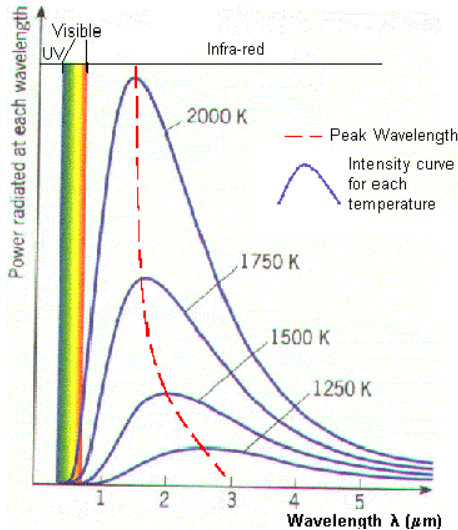
$$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60c^2 \hbar^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$$

- постоянная Стефана-Больцмана

Излучение абсолютно черного тела

Закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} \cdot T = b$$



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

$$b = 2.9 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$$

$$d\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} d\lambda \quad \rho_{\omega} d\omega = -\rho_{\lambda} d\lambda$$

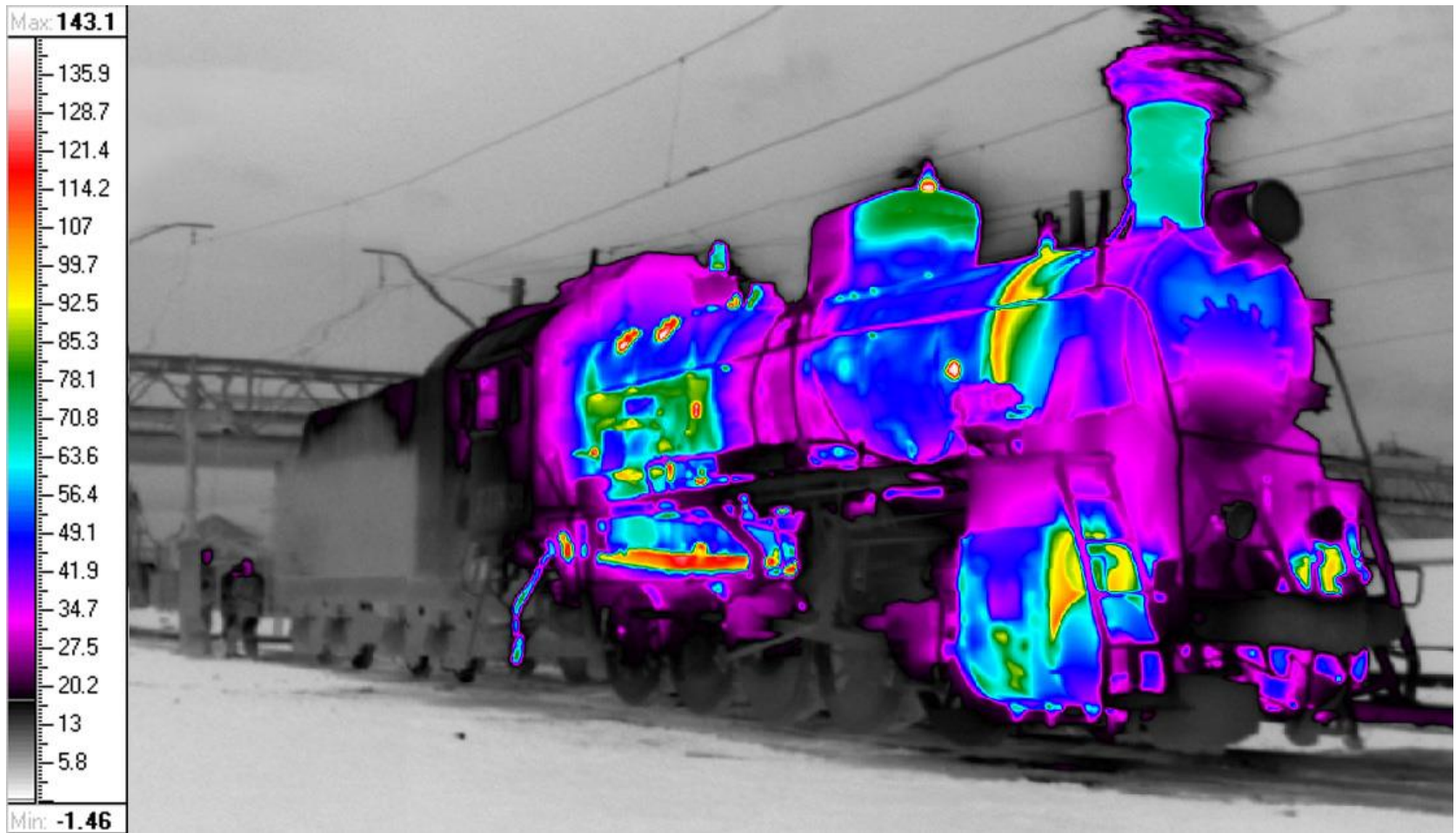
$$\rho_{\lambda}(T) = \frac{16\pi^2 \hbar c}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(2\pi \hbar c / \lambda kT) - 1}$$

$$x = \frac{2\pi \hbar c}{kT \lambda}$$

$$\frac{d\rho_x}{dx} = 0 \quad \longrightarrow \quad 5(e^x - 1) - x e^x = 0 \quad \text{корень} \quad x \approx 4,965$$

$$T \lambda_{\max} = b = \frac{2\pi \hbar c}{4,965 k} \quad b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} \quad \text{постоянная Вина}$$

Излучение абсолютно черного тела



Излучение абсолютно черного тела



[Моделирование Blackbody Spectrum](#)

Фотоэффект

(1887) Г. Герц обнаружил, что длина искры между металлическими электродами разрядника увеличивается, если катод освещается ультрафиолетовым светом.

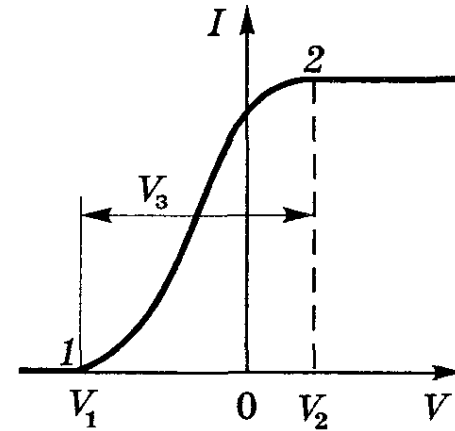
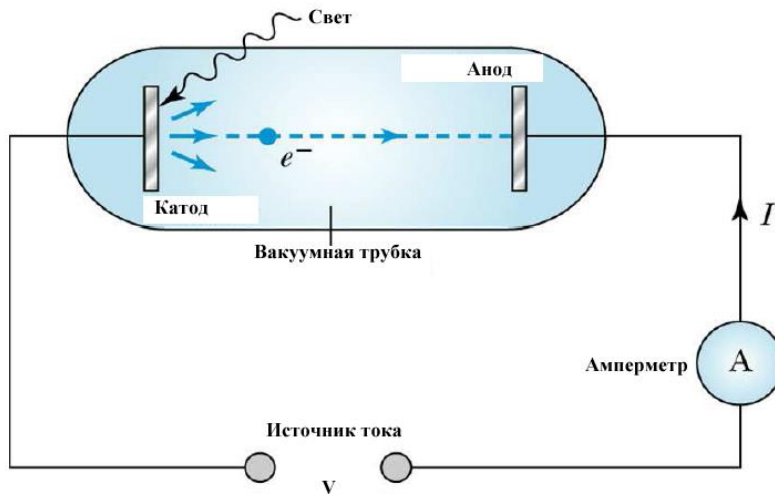
В. Гальвакс, А. Столетов, П. Ленард и др., установили основные количественные характеристики фотоэффекта .

(1905) А. Эйнштейн. Объяснение фотоэффекта.

◆ Нобелевская премия 1921г.

Фотоэффект

Схема эксперимента



$$V_3 = V_2 + |V_1| = V_2 - V_1$$

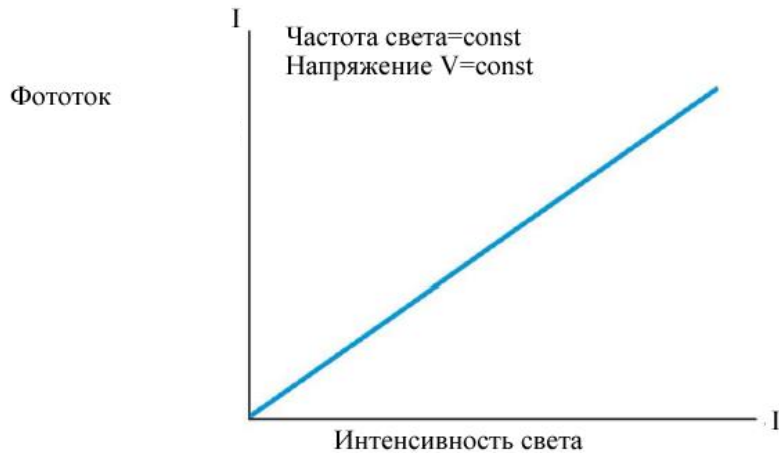
$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eV_3$$

Металл *A, эВ*

Na	2.46
Al	4.08
Cu	4.70
Zn	4.31
Ag	4.73
Pt	6.35
Pb	4.14
Fe	4.50

[Моделирование Photoelectric Effect](#)

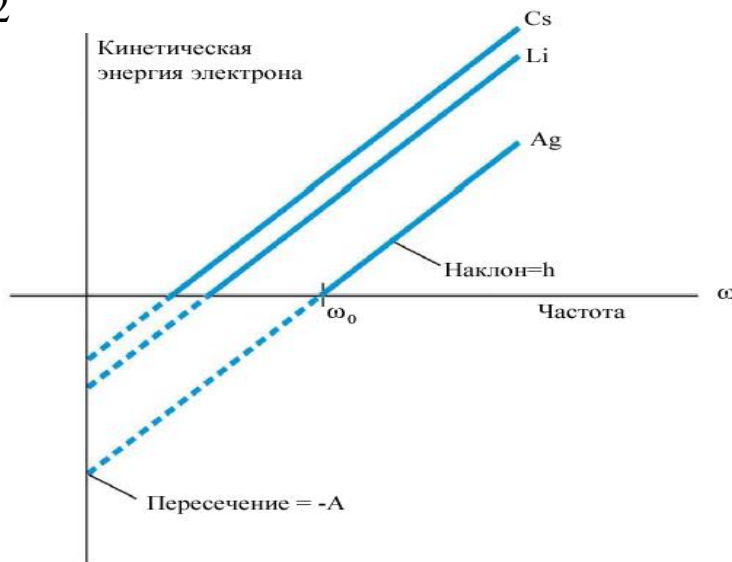
Законы фотоэффекта



При фиксированной частоте излучения число электронов, выбитых из катода в единицу времени, прямо пропорционально интенсивности падающего света.

Существует граничная частота света, ниже которой для данного материала катода фотоэффект отсутствует, независимо от интенсивности светового потока и продолжительности облучения катода.

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eV_3$$



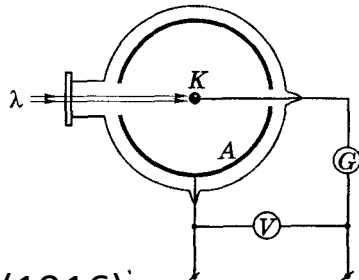
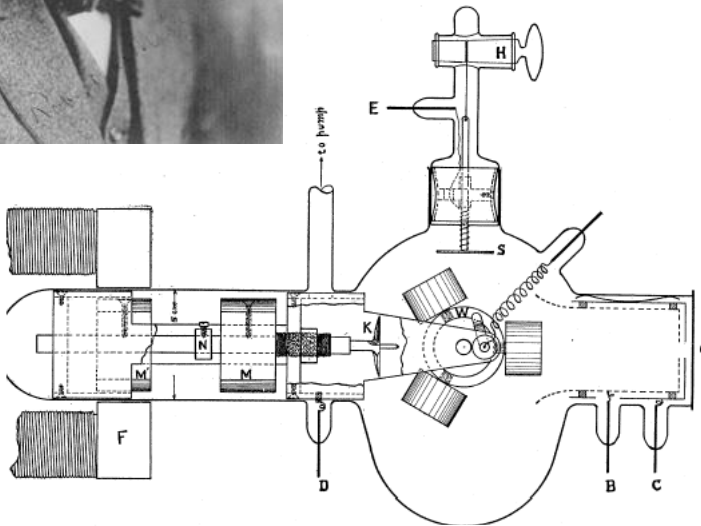
Электроны покидают катод с энергиями от нуля до максимальной, которая не зависит от интенсивности светового потока и линейно зависит от частоты.

$$\hbar\omega = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}$$

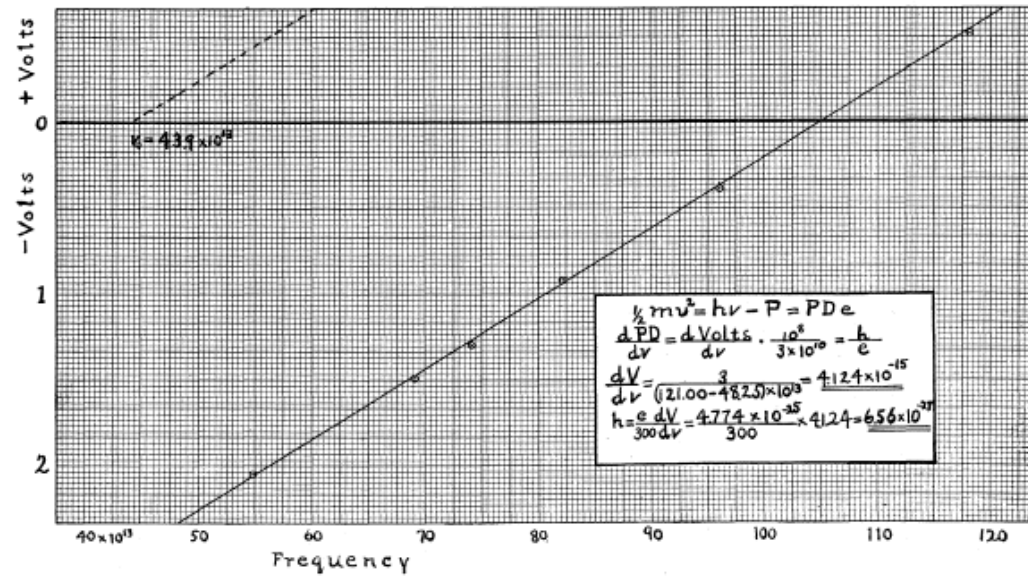
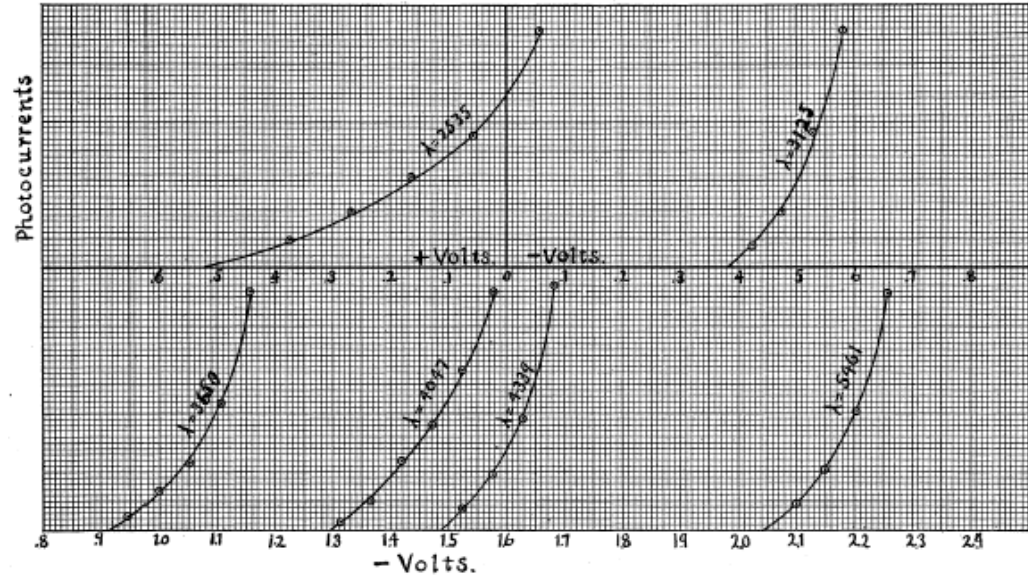
Фотоэффект



Измерение h
Милленом

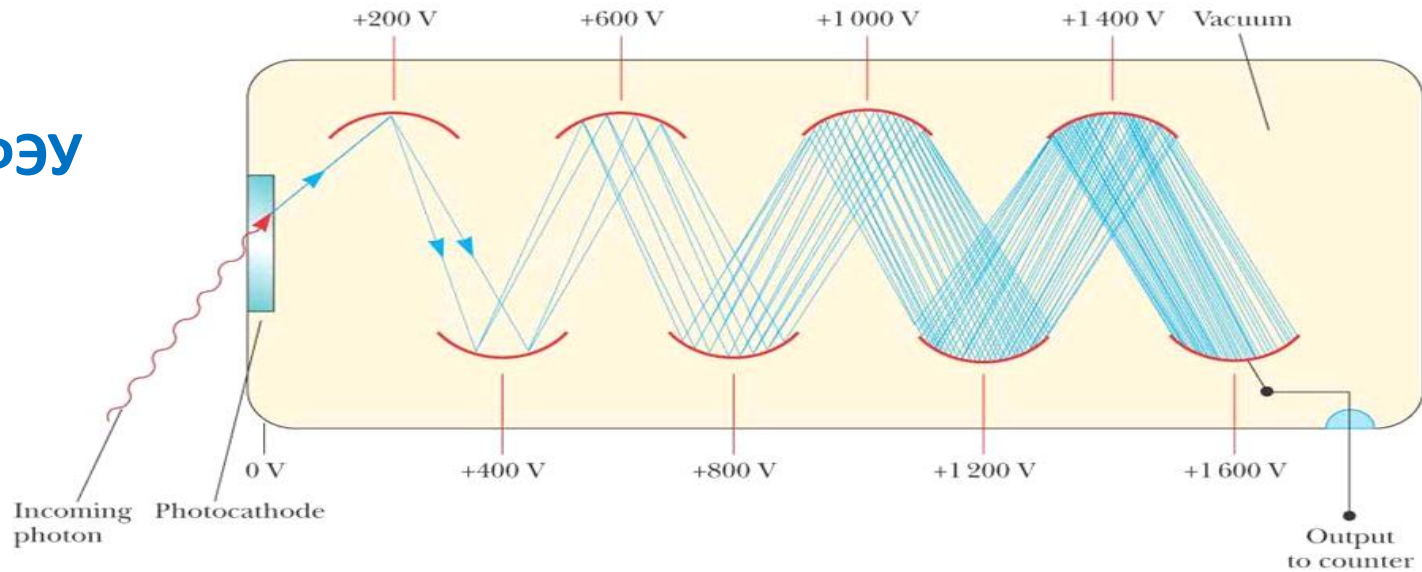


Millikan R. A.,
Phys. Rev. 7, 355, (1916).

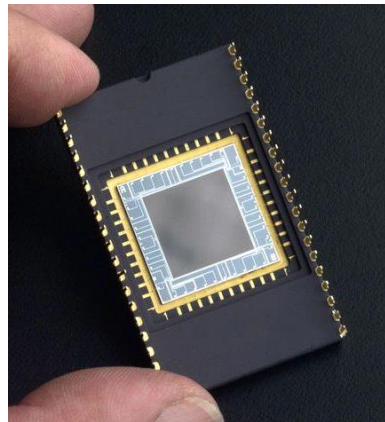


Применение фотоэффекта

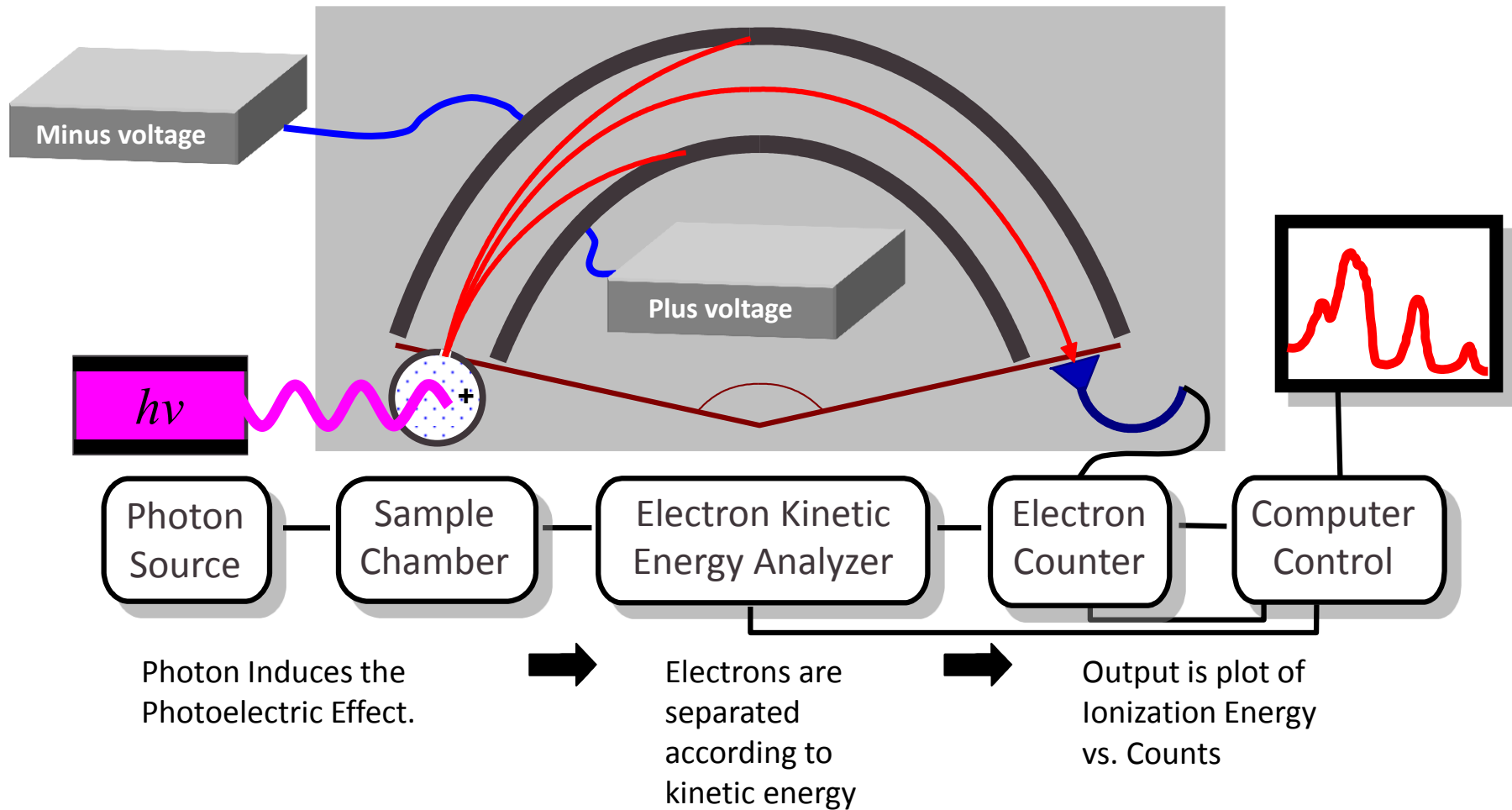
ФЭУ



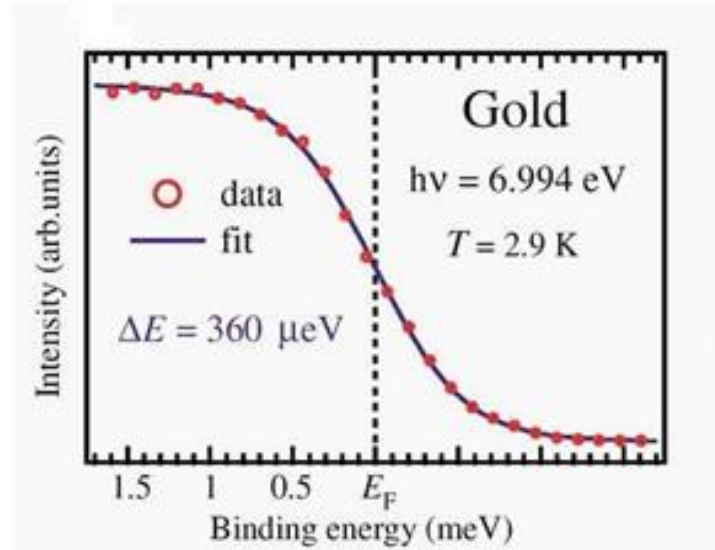
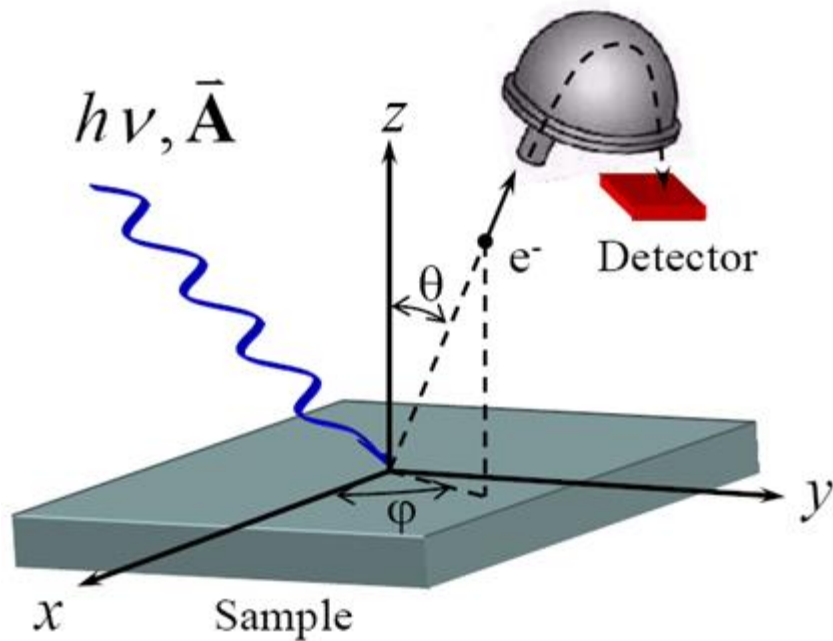
ПЗС матрица



Фотоэлектронная спектроскопия

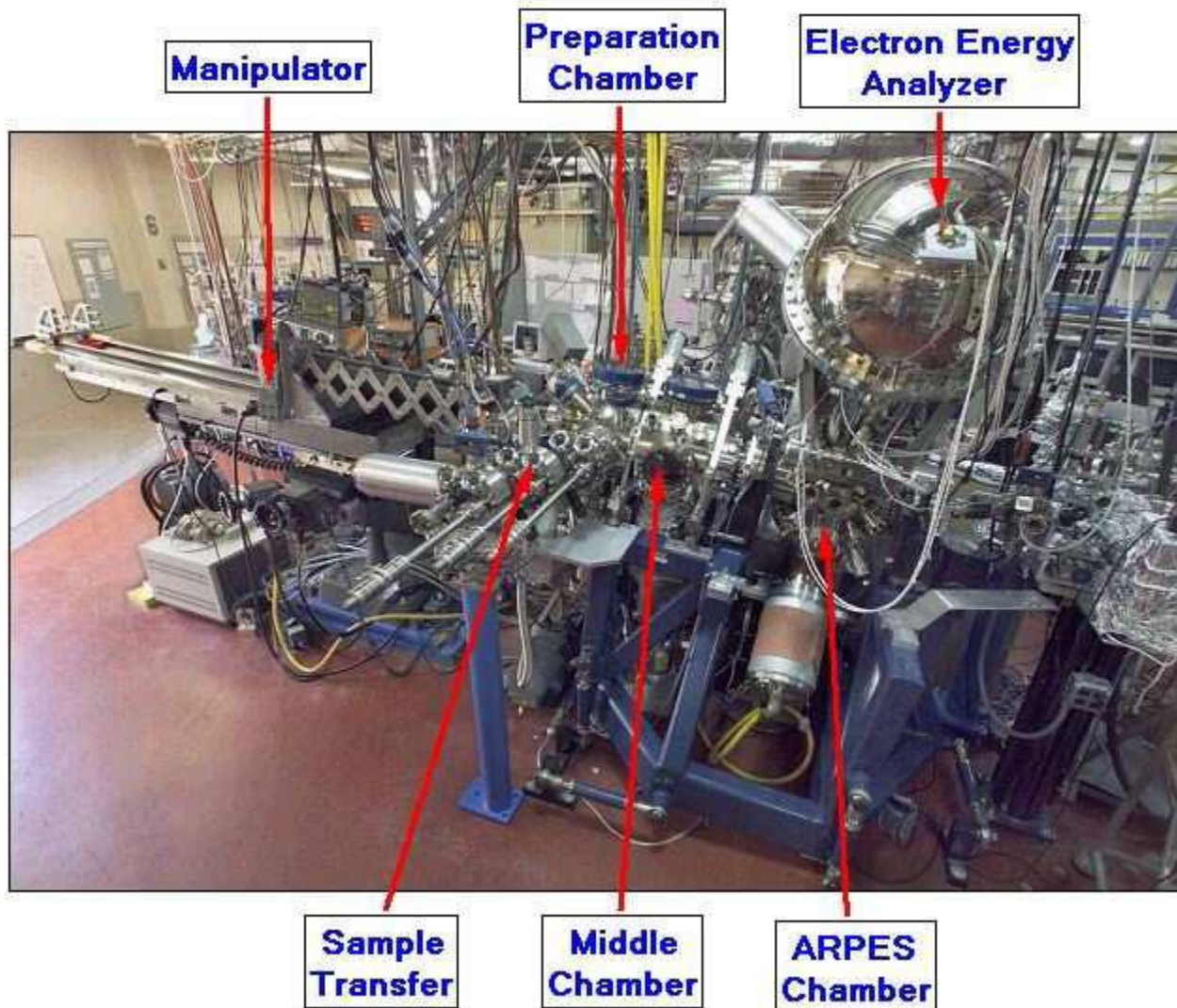


Фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением



X. J. Zhou, T. Cuk, T. Devereaux, N. Nagaosa, and Z.-X. Shen Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy on Electronic Structure and Electron-Phonon Coupling in Cuprate Superconductors// SLAC-PUB-14072

Фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (установка)

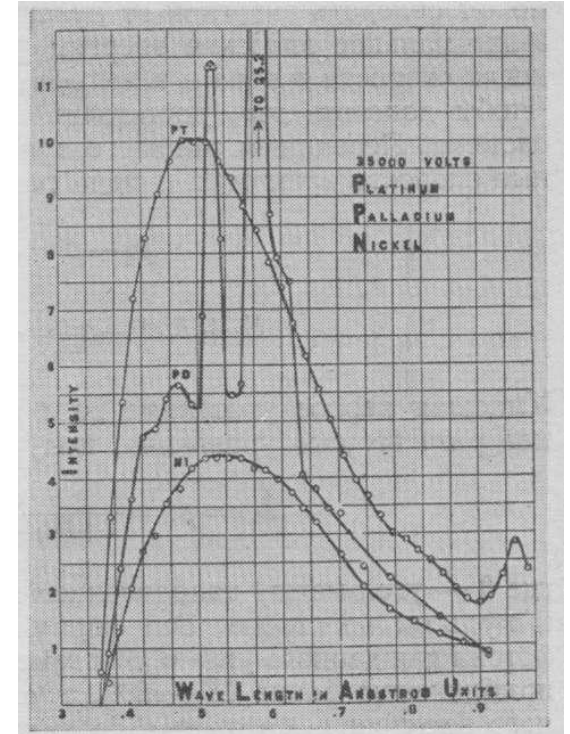
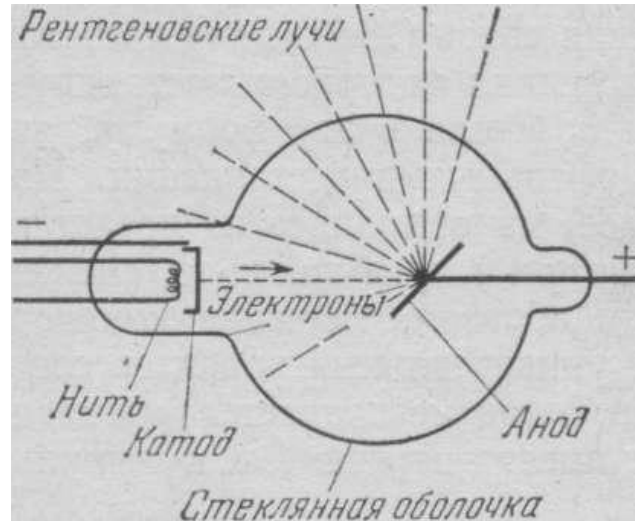


Рентгеновское излучение



Wilhelm Conrad Röntgen
(1895)

Нобелевская премия (1901)



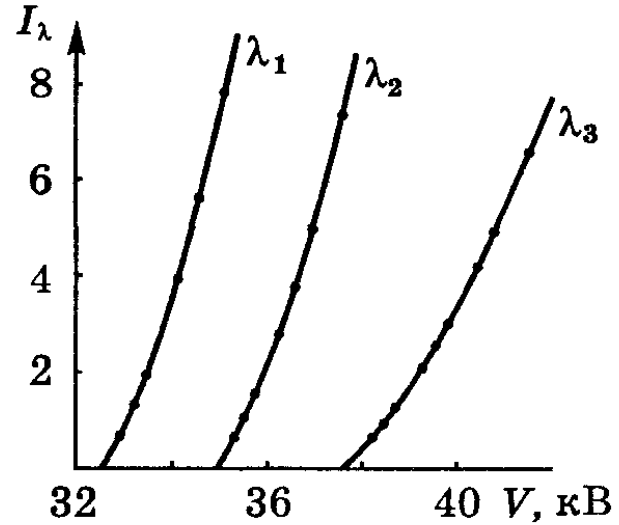
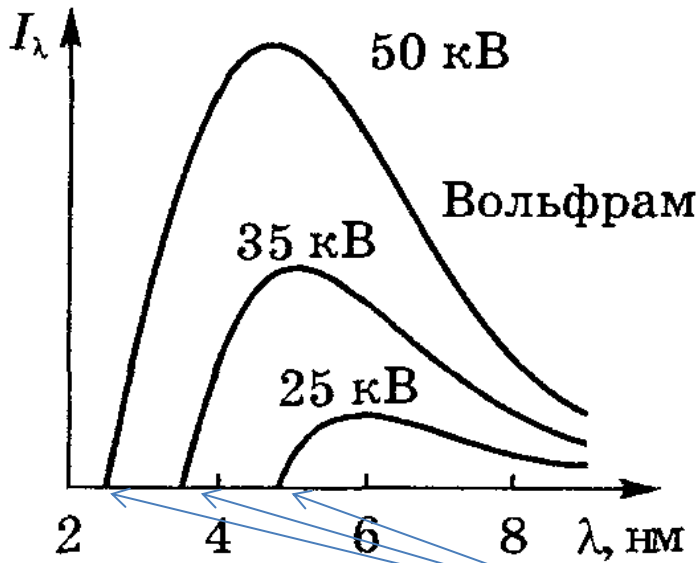
$$e\Delta V = h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{e\Delta V} \approx \frac{12345}{e\Delta V[\text{V}]} [\text{\AA}]$$

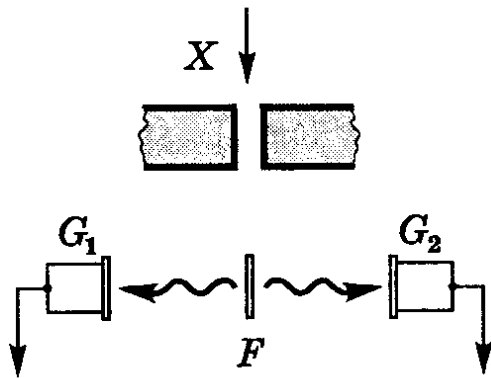
U I r e y C. T., Experimental Investigation of the Energy in the Continuous X-Ray Spectra of Certain Elements, Phys. Rev. 11, 401 (1918).

История открытия

Рентгеновское излучение



$$\lambda_{\min} = \frac{h2\pi c}{eV} \quad \hbar = \frac{e\lambda}{2\pi c} V_0$$



Опыт Боте.

$$E = mc^2 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

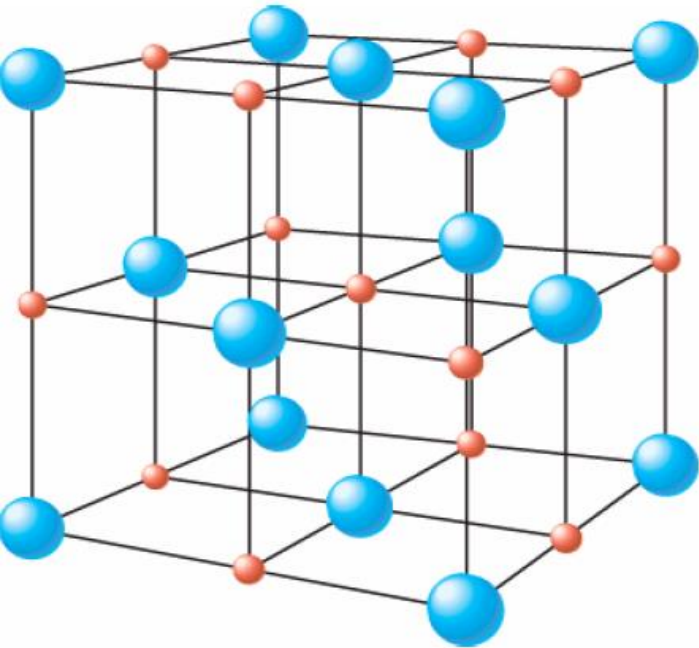
$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$$

$$p = \hbar\omega/c$$

Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах

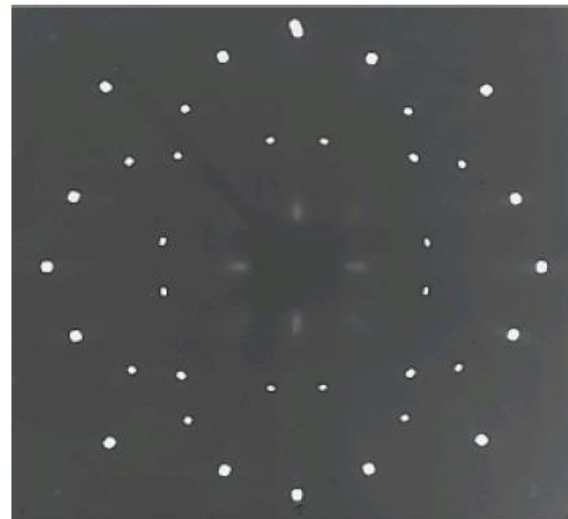
Открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллах (1912)

Нобелевская премия по физике (1914)



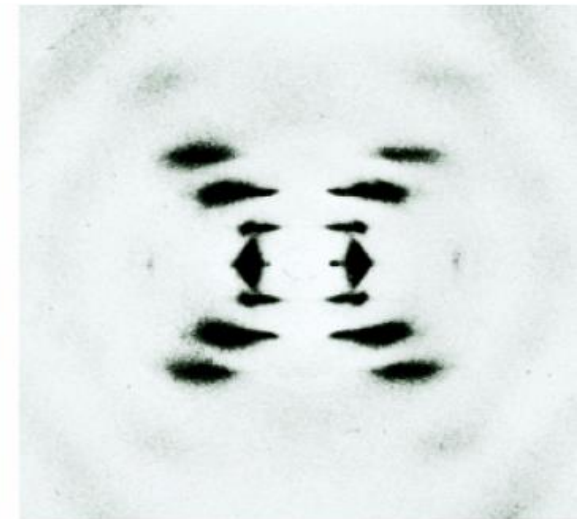
Max Theodore Felix
von Laue
1879 – 1960

NaCl



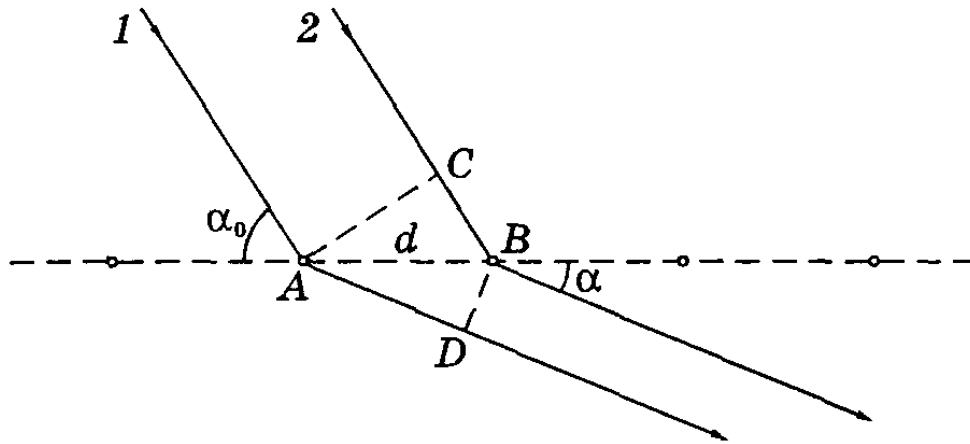
(a)

DNA



(b)

Условие дифракции Лауэ



$$\Delta = AD - CB = d(\cos \alpha - \cos \alpha_0).$$

$$d(\cos \alpha_m - \cos \alpha_0) = \pm m\lambda, \quad m=0, 1, 2, \dots$$

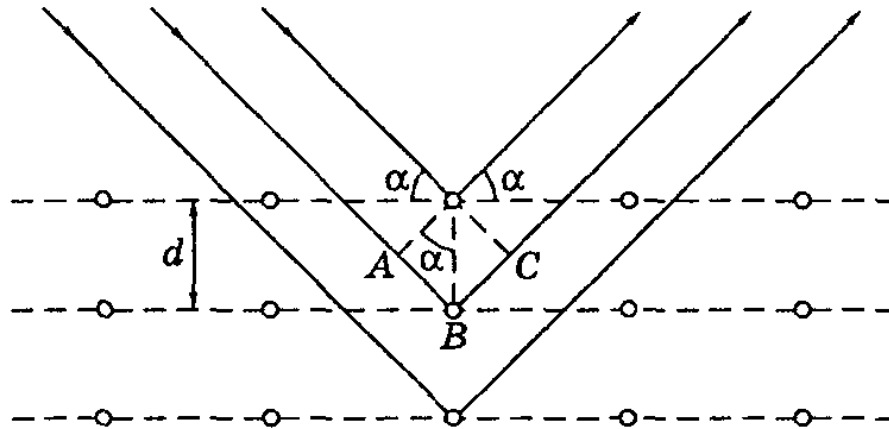
$$d_1(\cos \alpha - \cos \alpha_0) = \pm m_1 \lambda,$$

$$d_2(\cos \beta - \cos \beta_0) = \pm m_2 \lambda,$$

$$d_3(\cos \gamma - \cos \gamma_0) = \pm m_3 \lambda,$$

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1.$$

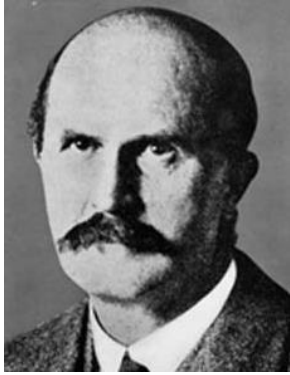
Условие дифракции Вульфа-Брэгга



$$ABC = 2d \sin \alpha$$

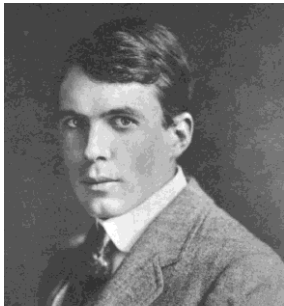
$$2d \sin \alpha = \pm m\lambda, \quad m=1, 2, \dots$$

Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах



Уильям Генри Брэгг

1862 – 1942



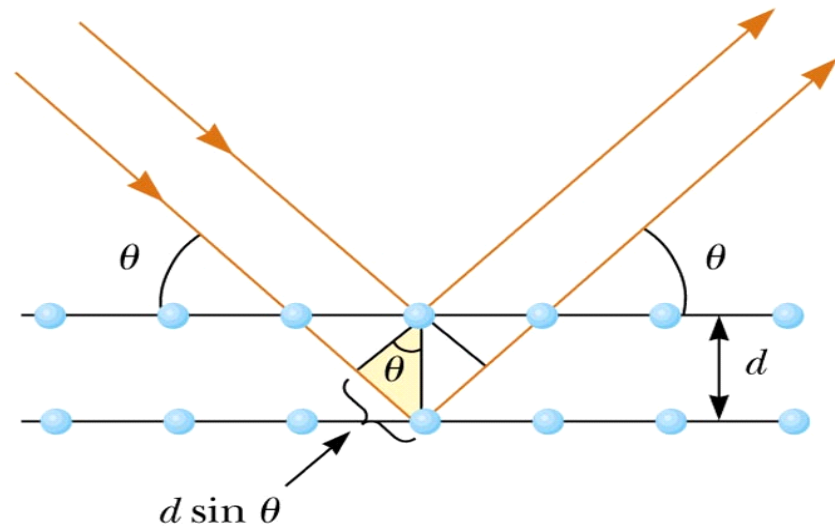
Уильям Лоренс Брэгг

1890 – 1971

Нобелевская премия
по физике (1915)

Incident
beam

Reflected
beam



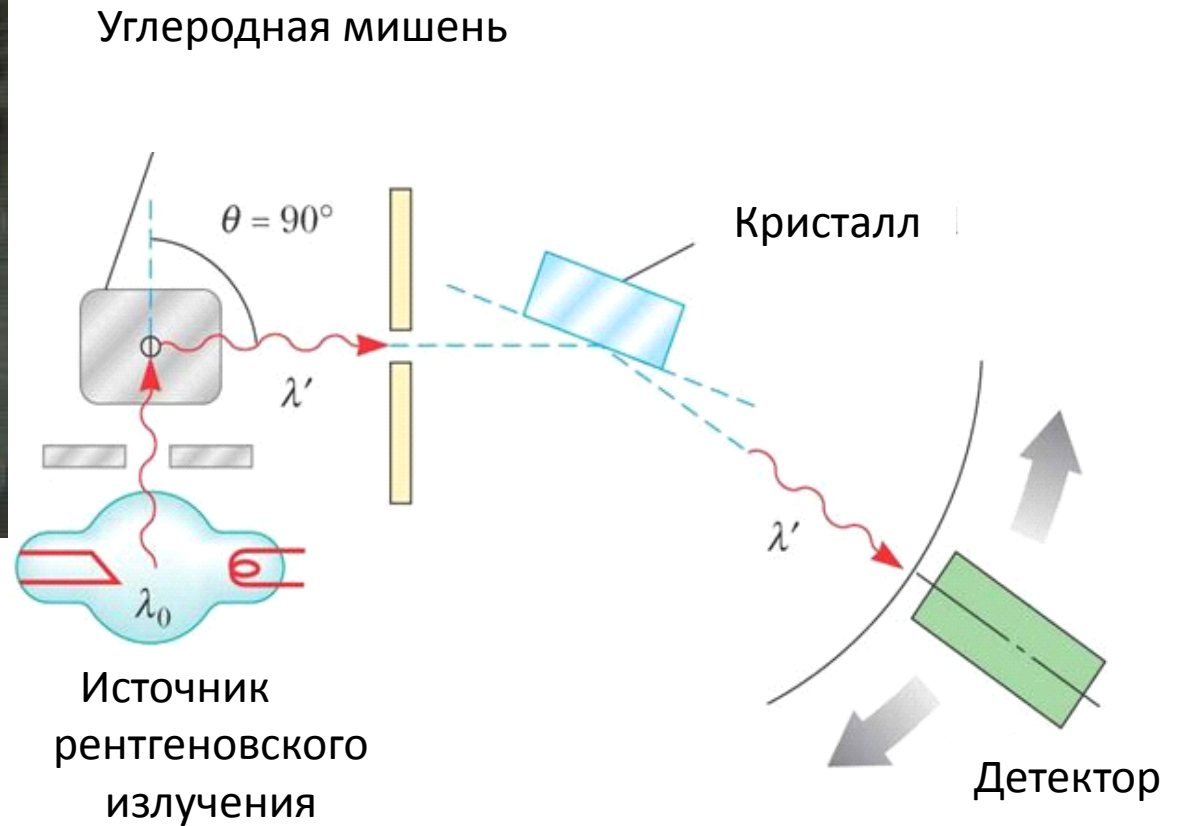
$$2 d \sin \theta = m \lambda \quad (1912)$$

$$m = 1, 2, 3 \dots$$

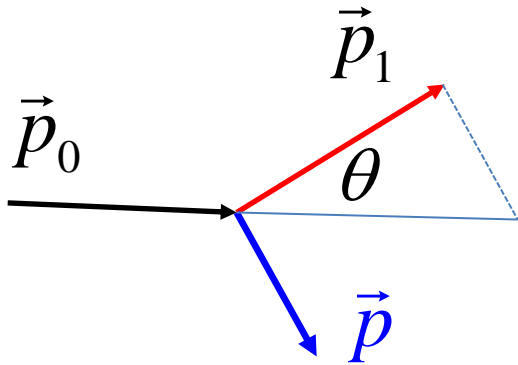
Эффект Комптона



(1922) Артур Комптон
Нобелевская премия
по физике (1927)



Эффект Комптона



$$\begin{cases} cp_0 + mc^2 = cp_1 + E = cp_1 + mc^2 + E_{\kappa} \\ \vec{p}_0 = \vec{p}_1 + \vec{p} \end{cases}$$

$$\begin{cases} cp_0 - cp_1 = E_{\kappa} \\ p^2 = p_0^2 + p_1^2 - 2p_0p_1 \cos \theta \end{cases}$$

$$E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4 \quad \longrightarrow \quad p^2 = \frac{E^2}{c^2} - m^2 c^2 = 2E_{\kappa} m + \frac{E_{\kappa}^2}{c^2} =$$

$$= 2cm(p_0 - p_1) + (p_0 - p_1)^2 = p_0^2 + p_1^2 - 2p_0p_1 \cos \theta$$

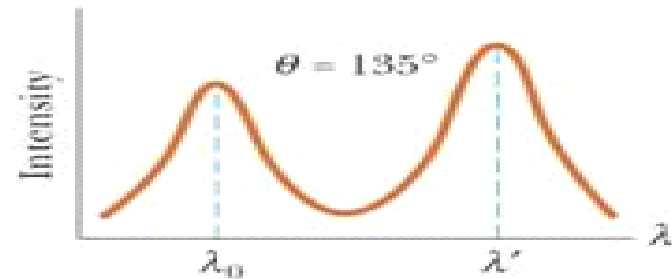
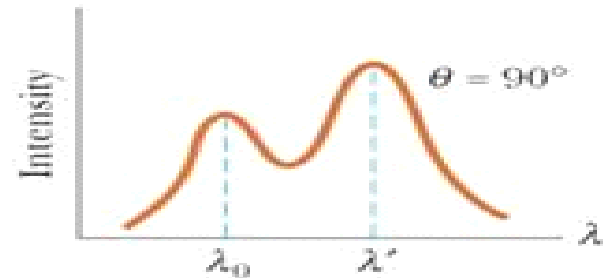
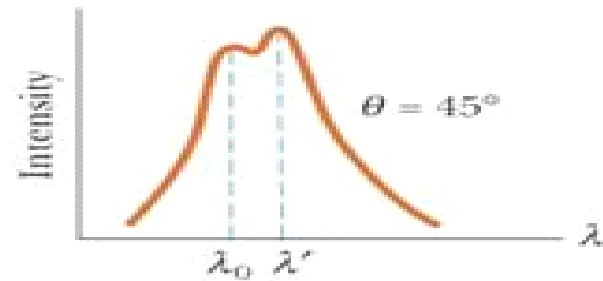
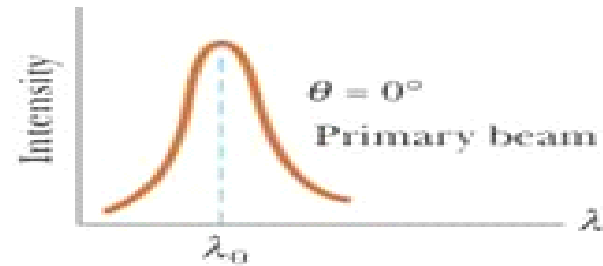
$$cm(p_0 - p_1) = p_0p_1(1 - \cos \theta)$$

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \longrightarrow \quad \lambda_1 - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$$

Эффект Комптона

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e c} = 0.00243 \text{ nm}$$



Давление света

Опыты П.Н. Лебедева



Пётр Николаевич Лебедев
(24.02.1866–01.01.1912) —
основатель первой в России
научной школы физиков, профессор
Московского университета (1900–
1911 гг).

Опыты П.Н. Лебедева

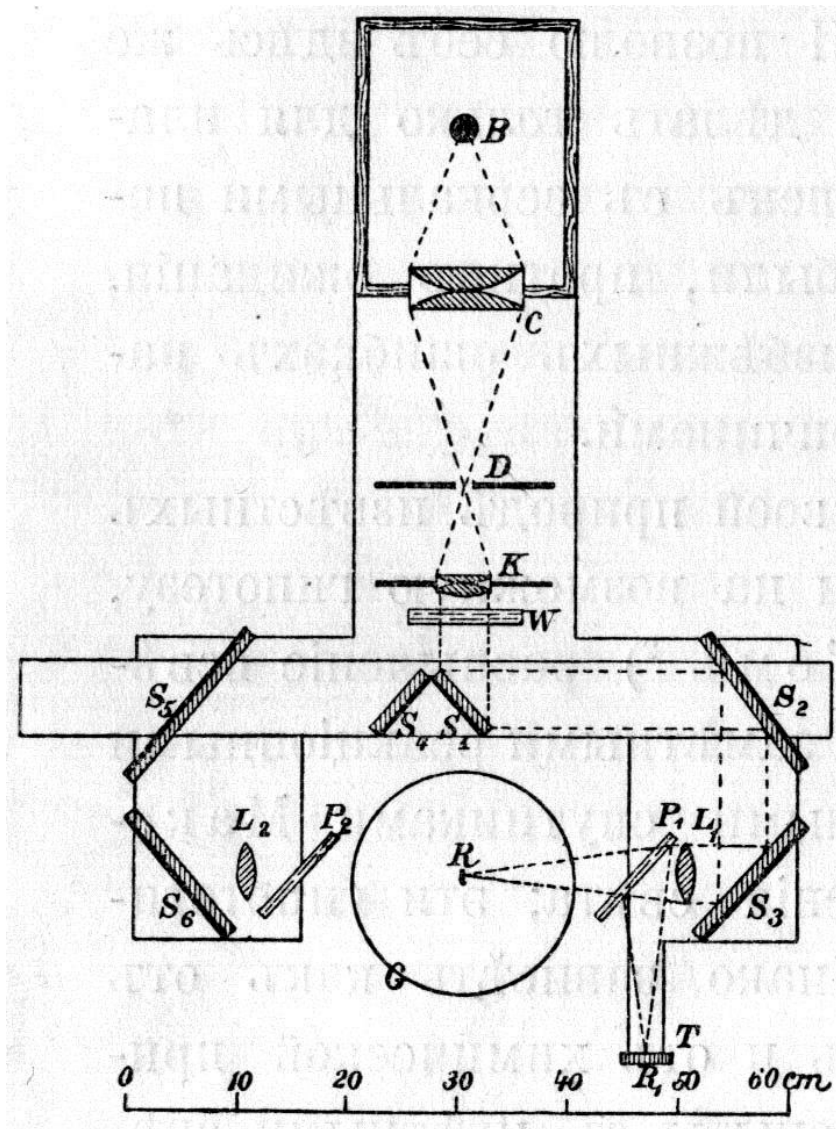
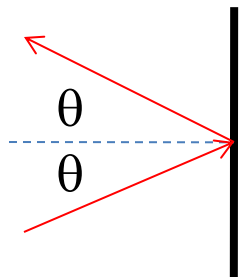
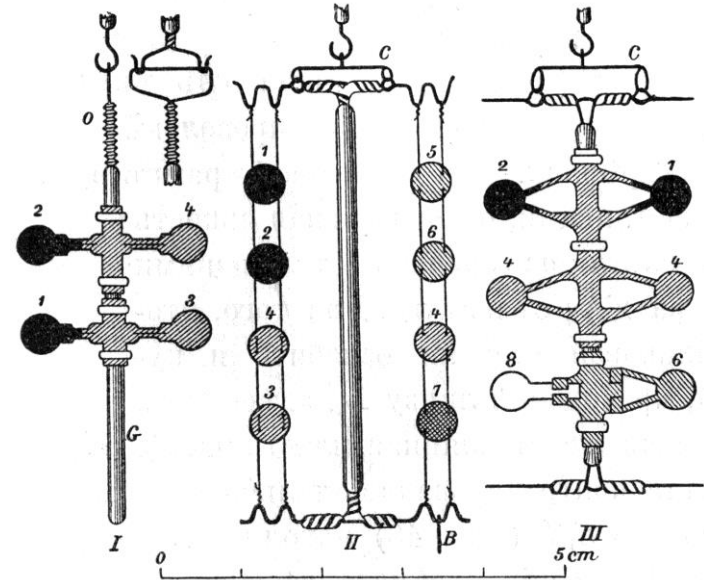


Схема установки по измерению светового давления (из трудов П.Н. Лебедева). Крыльчатка R , находящаяся в вакуумированном сосуде, освещается попеременно справа и слева.

Опыты П.Н. Лебедева



Радиометр Крукса



$$p = \frac{I}{c} (1 + R) \cos^2 \theta$$

$$R = \frac{I_{\text{отп}}}{I}$$

Подвес крутильных весов (из трудов П.Н. Лебедева)

Хвосты комет

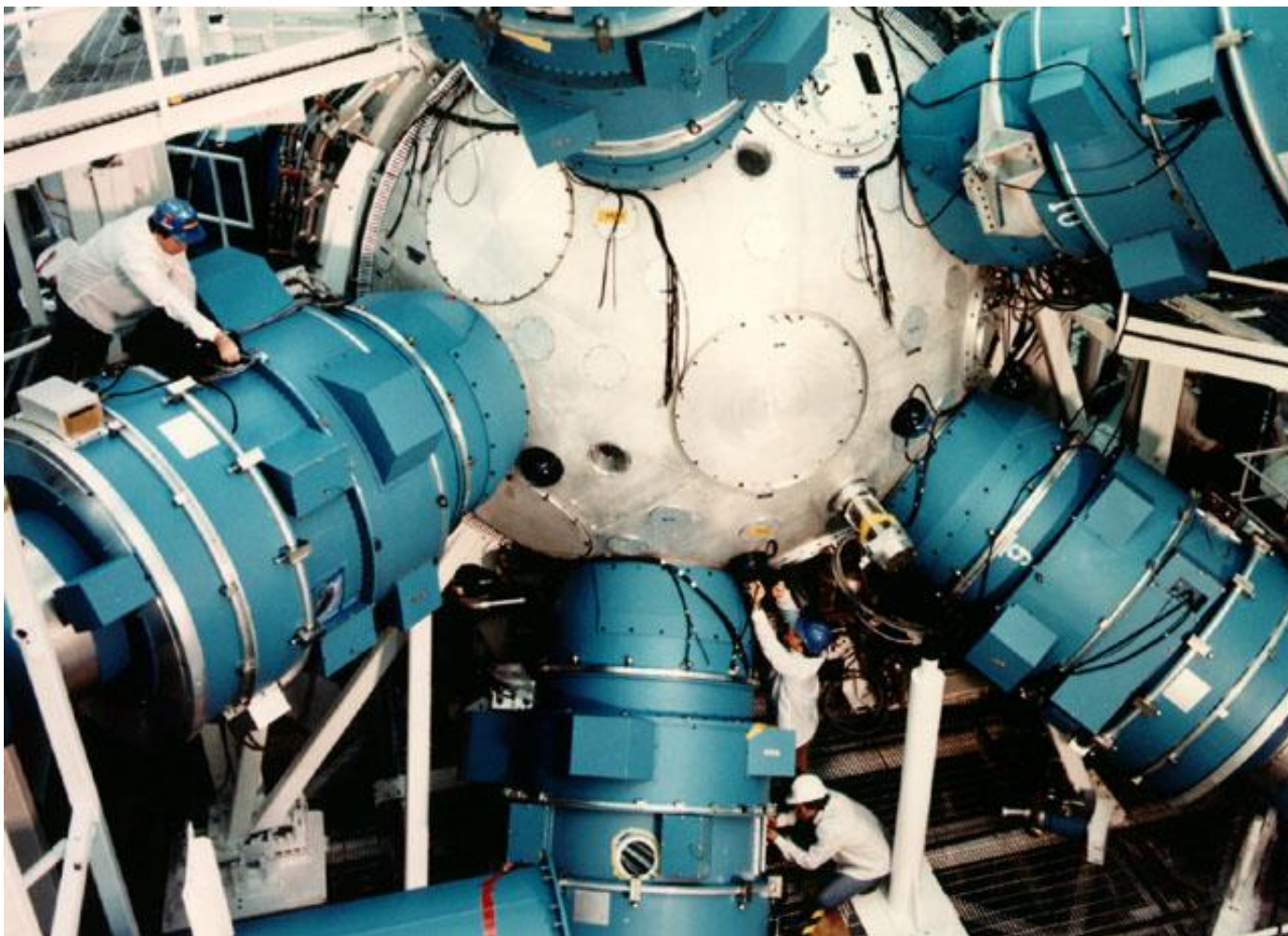


Два хвоста кометы Хейла-Боппа. Голубой ионный хвост состоит из ионизованных молекул различных газов, среди которых особенно выделяются молекулы окиси углерода (угарного газа), которые, воссоединяясь с электронами, испускают голубое сияние. Белый пылевой хвост состоит из мелких пылинок кометного ядра, отталкиваемых давлением солнечного света. Снимок сделан в марте 1997 года.

ХВОСТЫ КОМЕТ



Лазерный термоядерный синтез



Все пучки сходятся в лазерной камере (фото с установки «Шива»).

Лазерный термоядерный синтез



А вот и мишень – капсула 2 мм в диаметре, заполненная смесью дейтерия и трития.