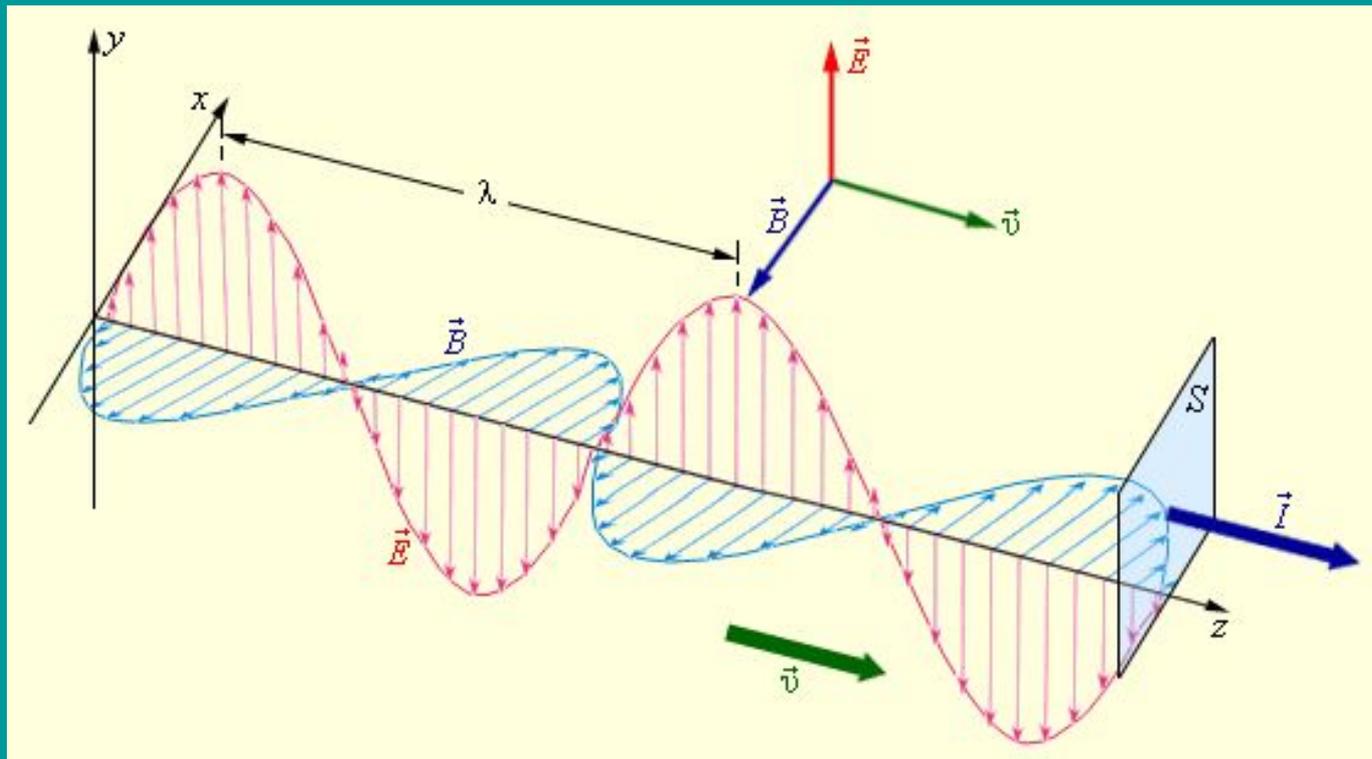


Тема 1. Развитие квантовых представлений

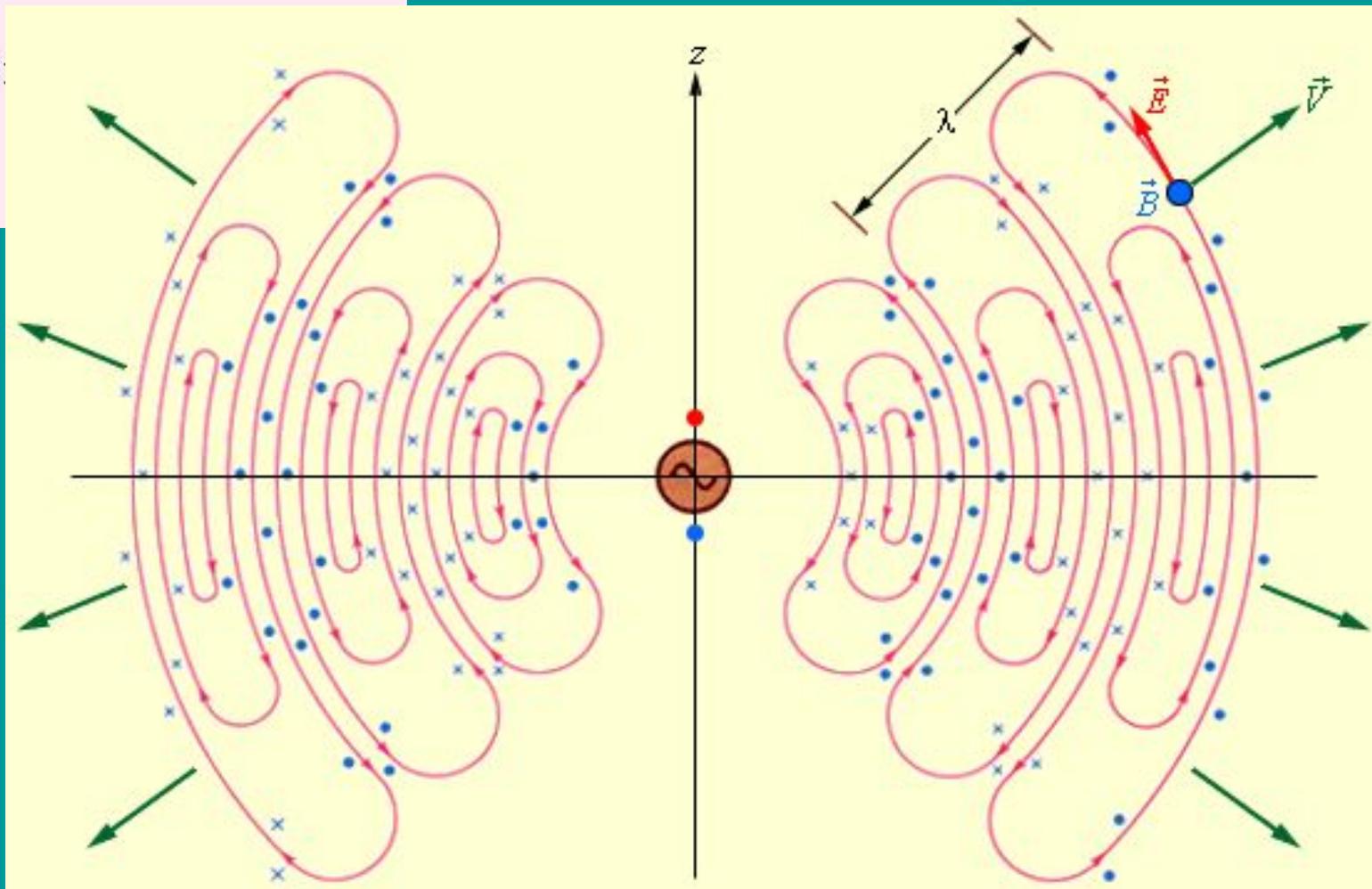
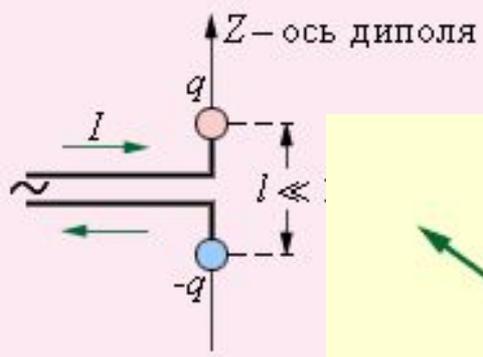
Лекция 1. Квантовые свойства излучения и вещества

- 1.1. Квантовая гипотеза **Планка**, спектральное распределение энергии теплового излучения. Флуктуации светового потока
- 1.2. Квантовые закономерности фотоэффекта и тормозного рентгеновского излучения
- 1.3. Эффект **Комптона**
- 1.4. Корпускулярно-волновой дуализм в оптике. Эффект **Доплера**
- 1.5. Локализация импульса фотона. Эффект **Мессбауэра**

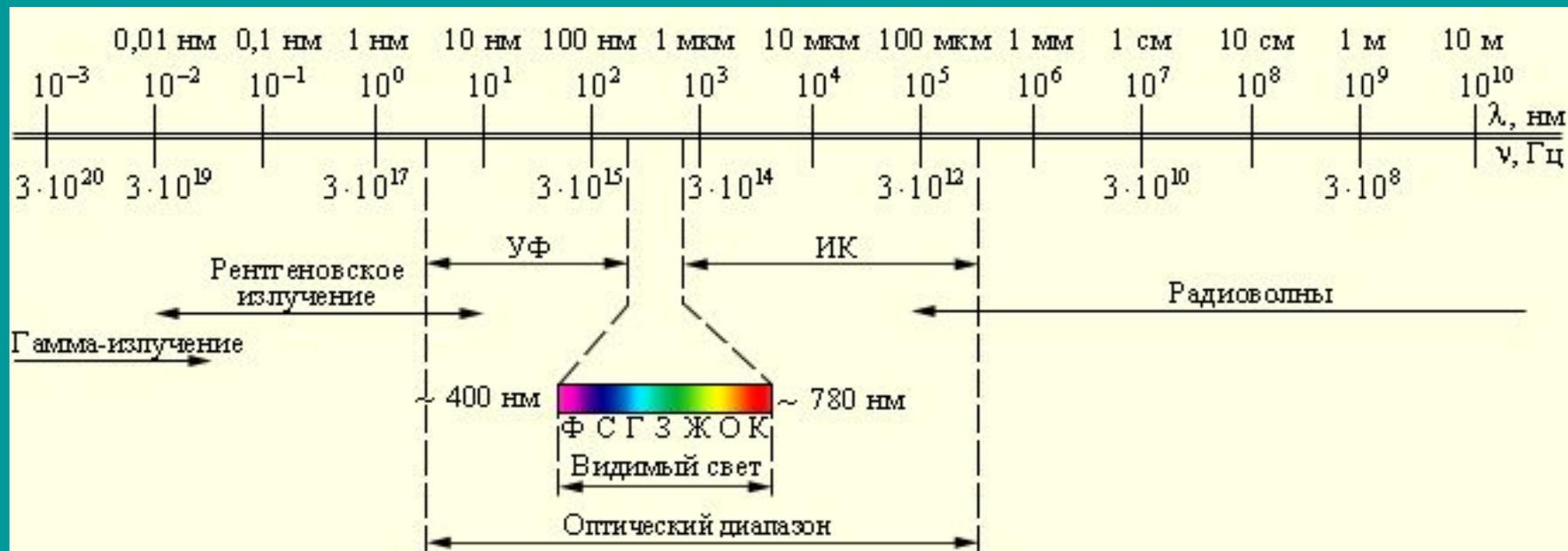


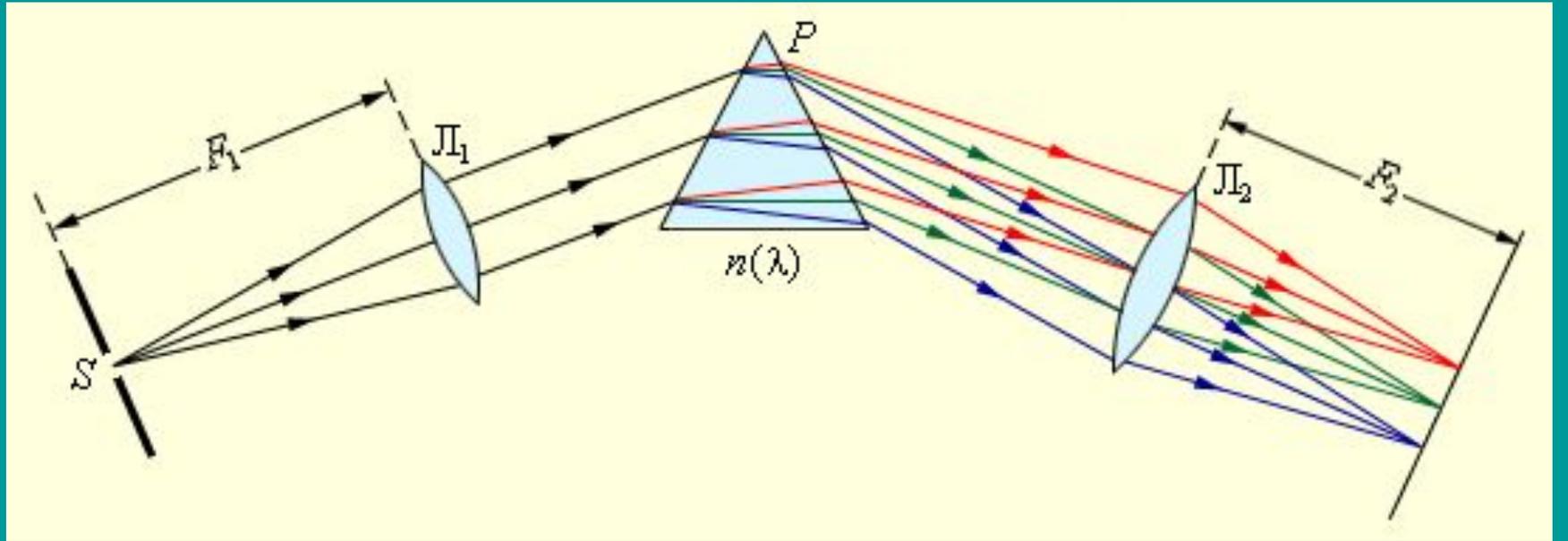
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}$$

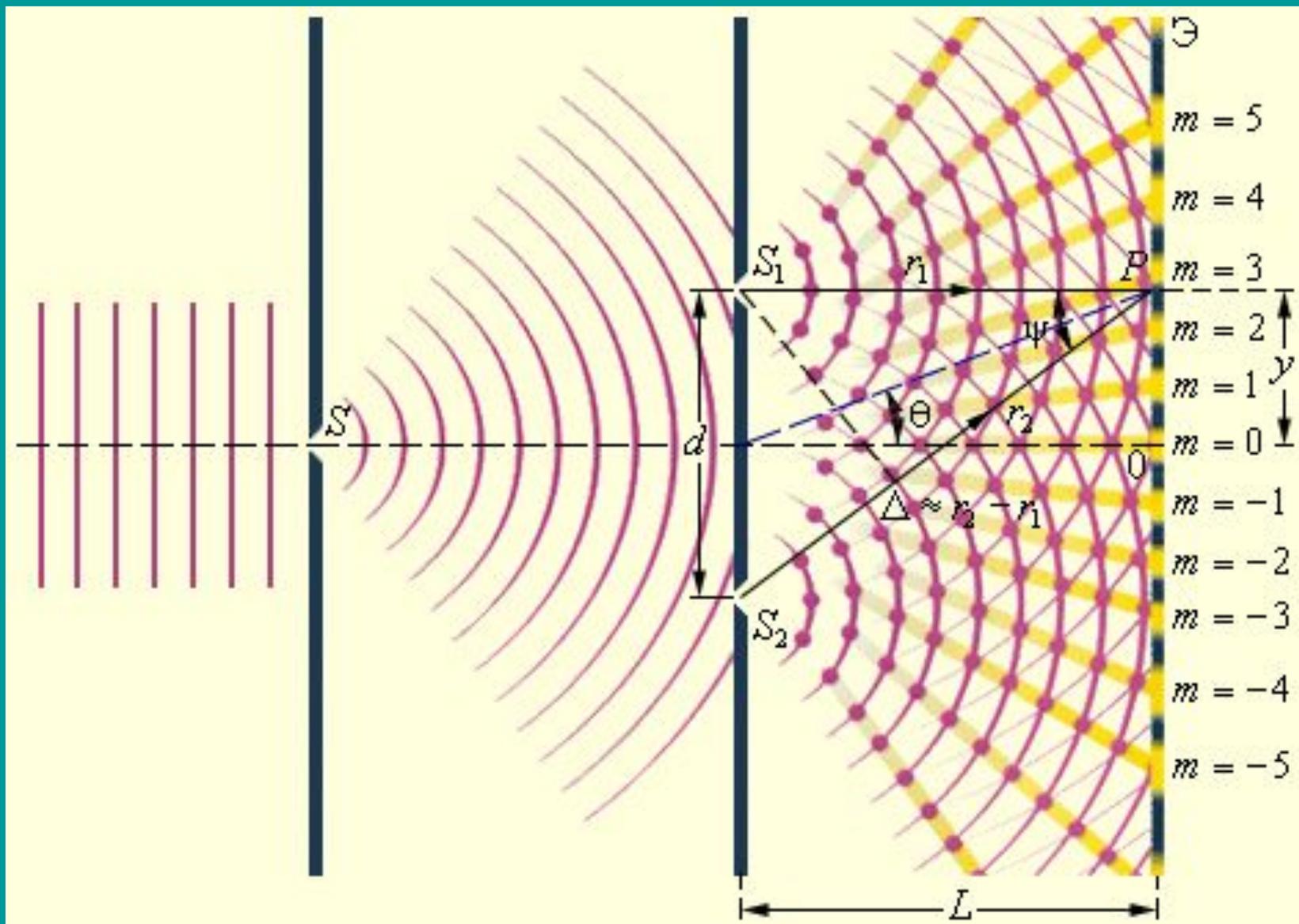
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/c} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/c.}$$

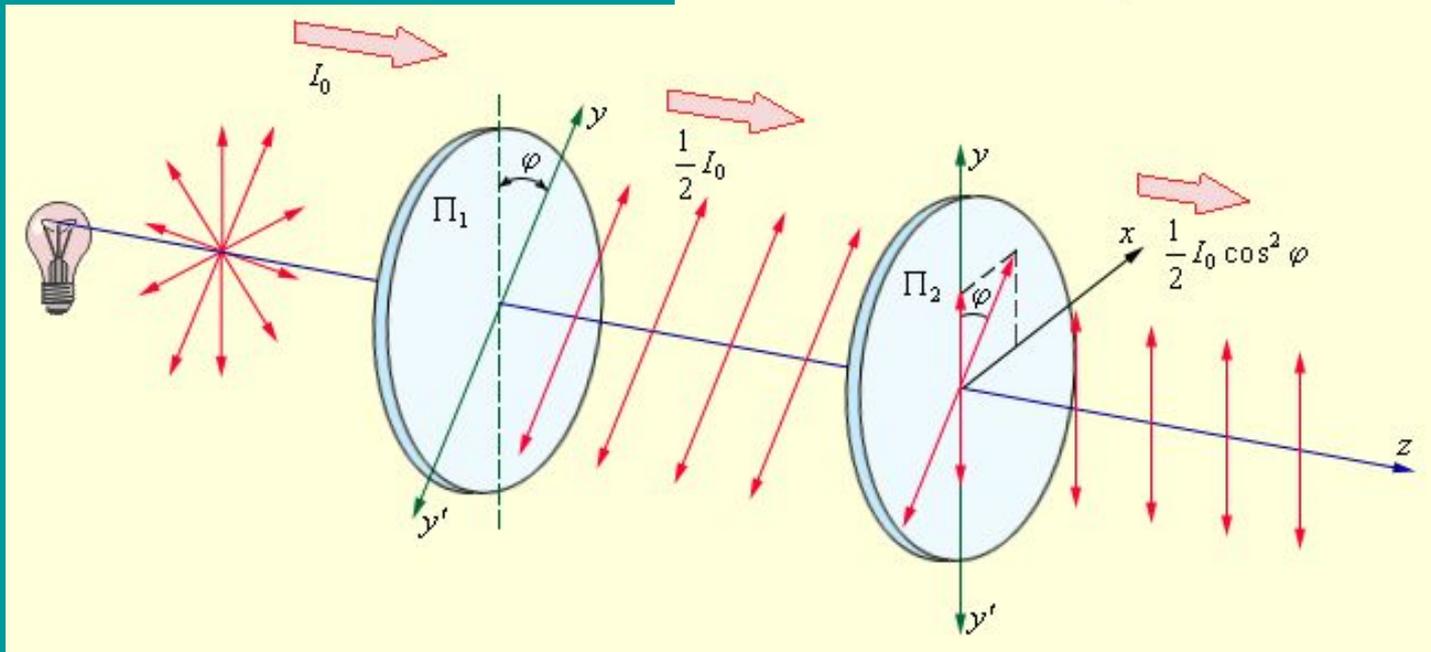
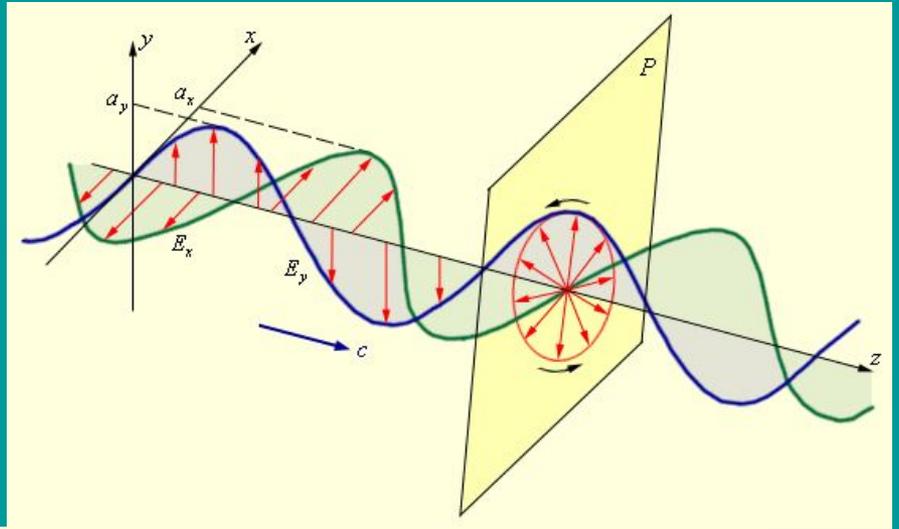
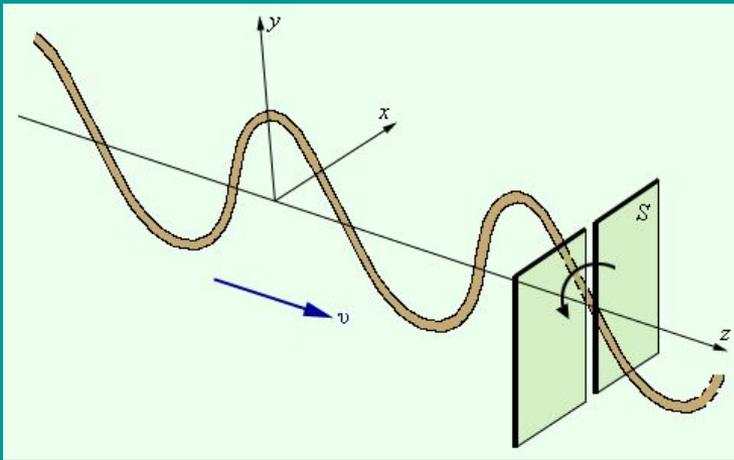


Простейший генератор Герца – источник электромагнитных волн









Волновая природа света

Квантовая природа света

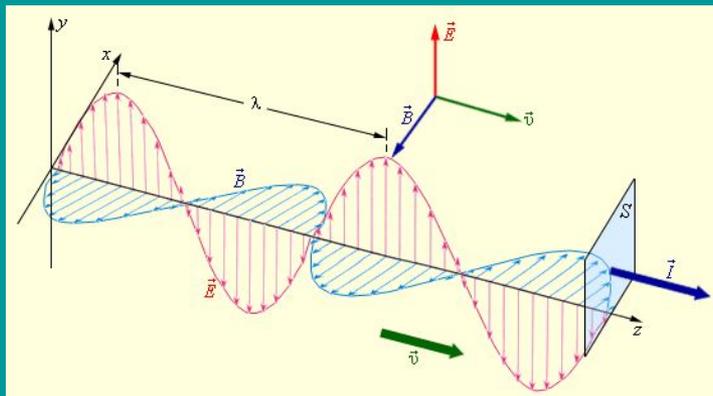
Интерференция

Дифракция

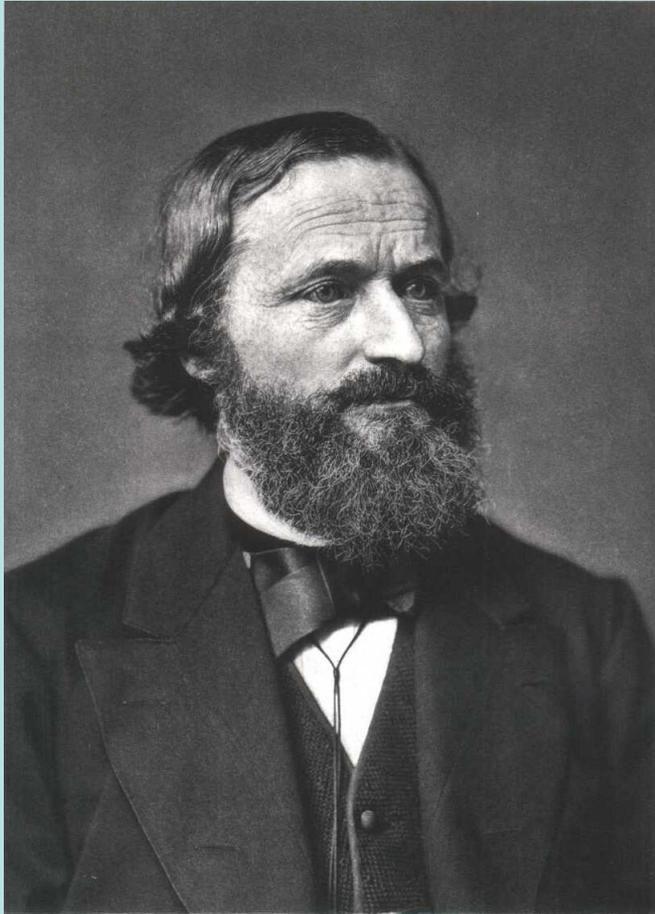
Дисперсия

Поляризация

?



Закон теплового излучения Кирхгофа (1859)



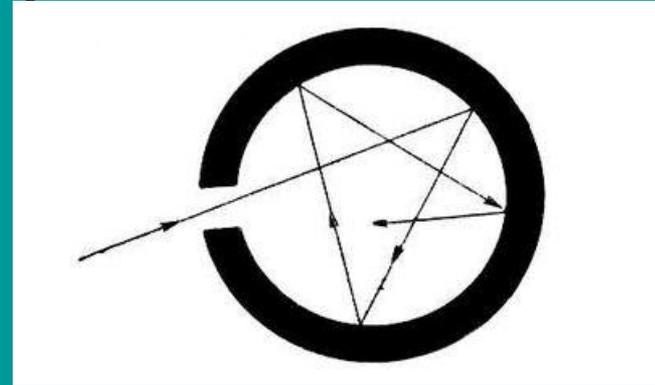
Густав Кирхгоф
(Gustav Robert Kirchhoff)
1824 – 1887

$$\frac{E_{\lambda}}{A_{\lambda}} = I_{\lambda} = \frac{c}{8\pi} \rho_{\lambda}$$

- E_{λ} – испускательная способность тела (т.е. энергия, излучаемая единицей площади за единицу времени)
- A_{λ} – поглощательная способность тела (доля всей падающей на тело энергии, которая остаётся внутри тела и превращается в тепло)
- I_{λ} – поверхностная яркость тела, находящегося в равновесии с излучением
- ρ_{λ} – спектральная плотность равновесного излучения
- Т.к. I_{λ} и ρ_{λ} не зависят от природы тела, то отношение E_{λ}/A_{λ} является универсальной функцией температуры T и длины волны излучения λ (или частоты ν)

Абсолютно чёрное тело (АЧТ)

- АЧТ – тело, поглощающее всё падающее на него излучение
- Для АЧП $A_\lambda = 1$ и поэтому $E_\lambda = I_\lambda$
- Т.о., если в случае равновесного излучения для АЧТ известна испускательная способность E_λ , то можно найти универсальную функцию ρ_λ





1.1. Квантовая гипотеза *Планка*, спектральное распределение энергии теплового излучения. Флуктуации светового потока

- Квантовая гипотеза *Планка*. Кванты света.
- 1. Фотон - квант электромагнитного излучения, обладающий энергией, импульсом и гравитационной массой.
- а) Энергия фотона в вакууме:
- б) Импульс фотона в вакууме:
- 2. Формула *Планка*.

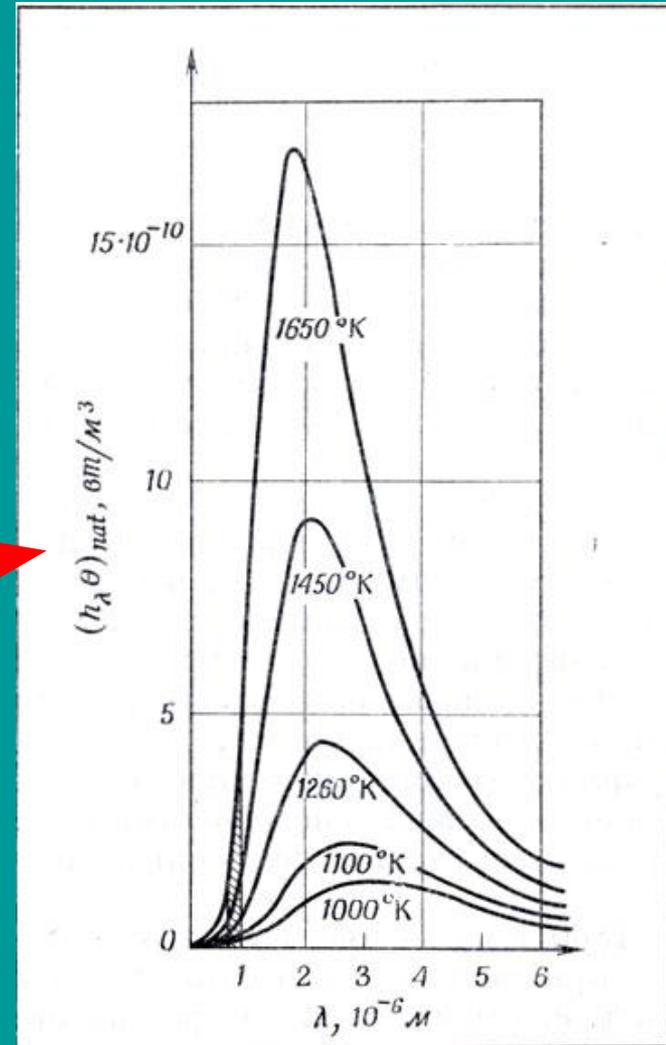
$$E = h\nu$$

$$p = h\nu / c$$

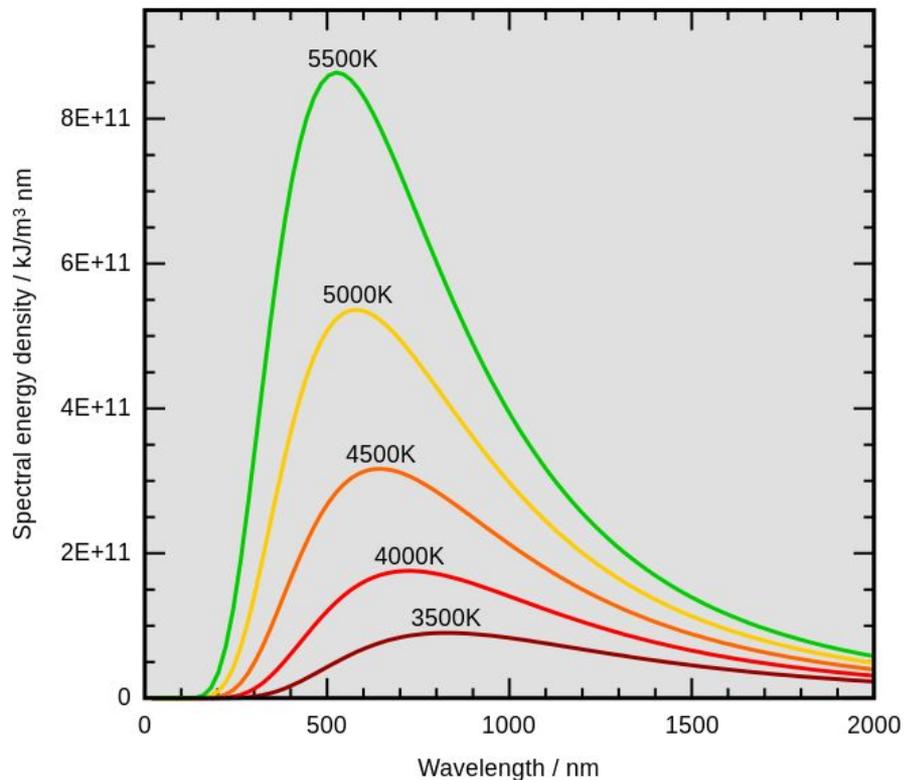
$$\rho_{\nu, T} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

Абсолютно чёрное тело

- Спектр излучения АЧТ зависит только от температуры
- Экспериментальные спектры излучения чёрного тела при различных температурах



Цветовой тон излучения абсолютно чёрного тела при его определённой температуре



Температурный интервал в кельвинах	Цвет
до 1000	Красный
1000—2000	Оранжевый
2000—3000	Жёлтый
3000—4500	Бледно-жёлтый
4500—5500	Желтовато-белый
5500—6500	Чисто белый
6500—8000	Голубовато-белый
8000—15000	Бело-голубой
15000 и более	Голубой



росприбор

Высокоточные абсолютно черные тела



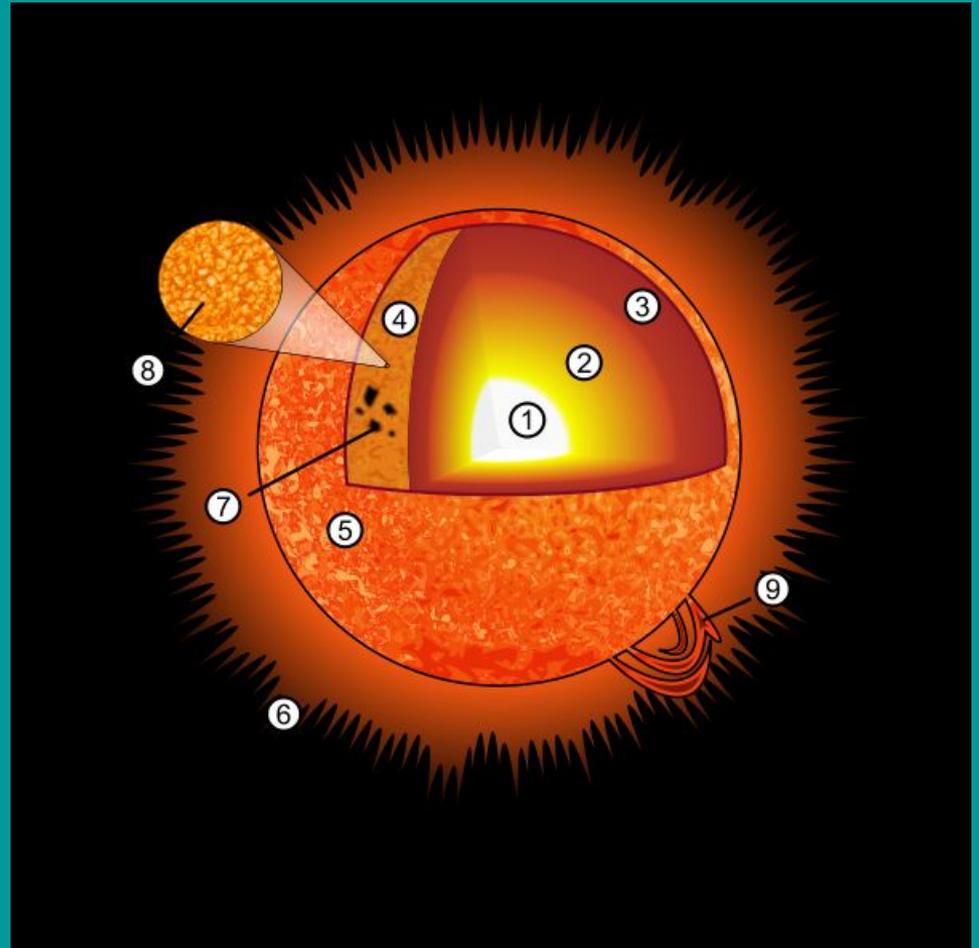
Черное тело для моделирования
температуры человека BMED



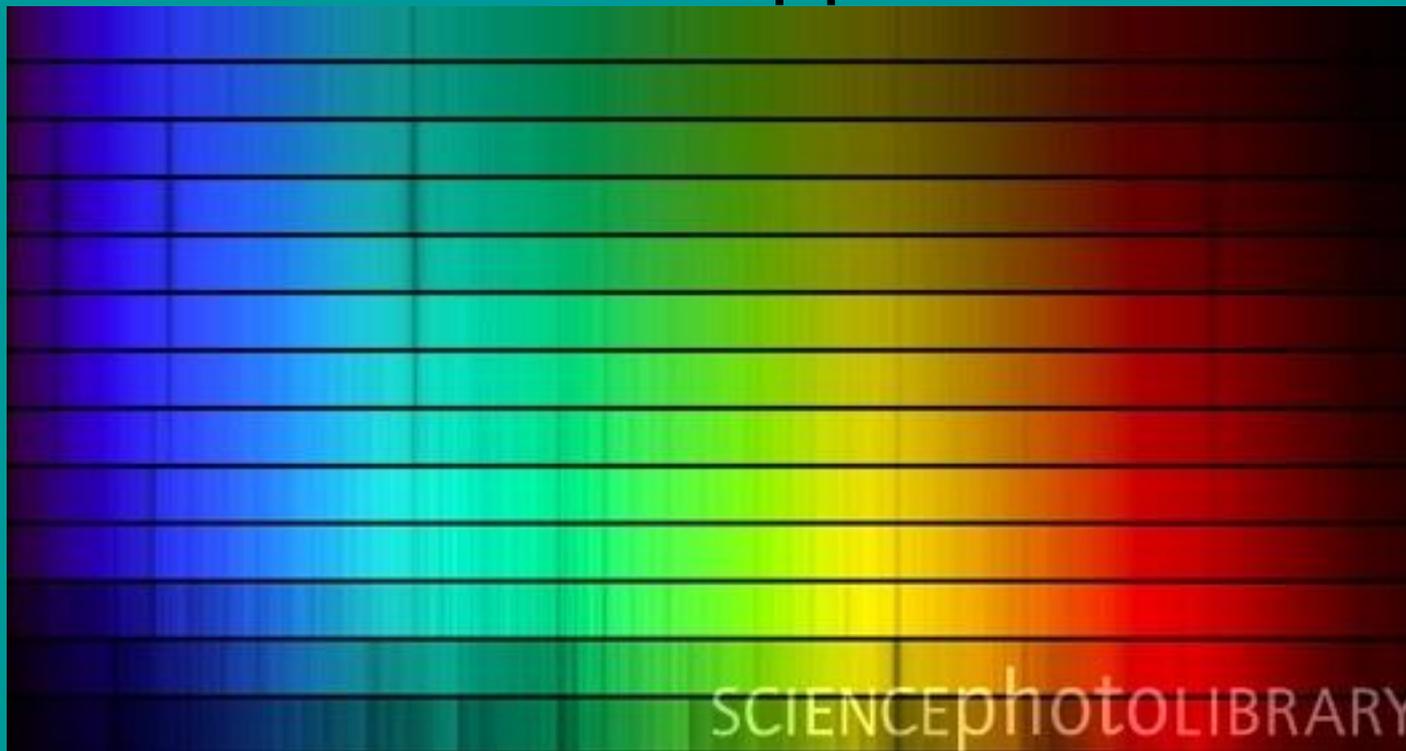
Набор абсолютно черных тел BNUC для
двухточечной компенсации
неоднородности тепловизоров

Строение Солнца

- 1 – ядро
- 2 – зона лучистого равновесия
- 3 – конвективная зона
- 4 – фотосфера
- 5 – хромосфера
- 6 – корона
- 7 – пятна
- 8 – грануляция
- 9 – протуберанец

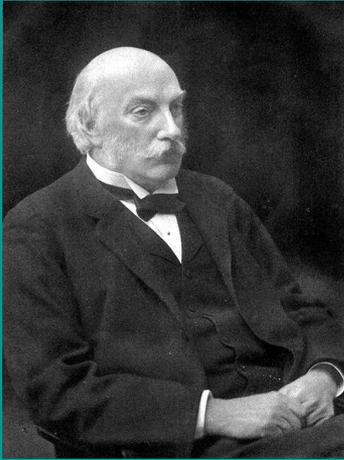


Спектральная классификация звёзд

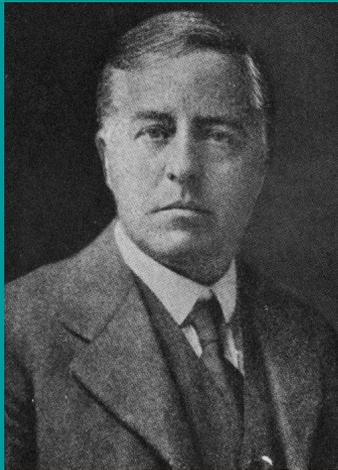


- Спектры испускания 13 типов звёзд в области 400–700 нм (сверху вниз, в порядке уменьшения температуры поверхности): O6, B0, B6, A1, A5, F0, F5, G0, G5, K0, K5, M0, M5.
- Солнце относится к типу G2.
- Наиболее «горячие» (~25 000 K) звёзды с максимумом плотности излучения в голубой области спектра относятся к типу O. Красные «холодные» (~3 500 K) звёзды относятся к типу M.

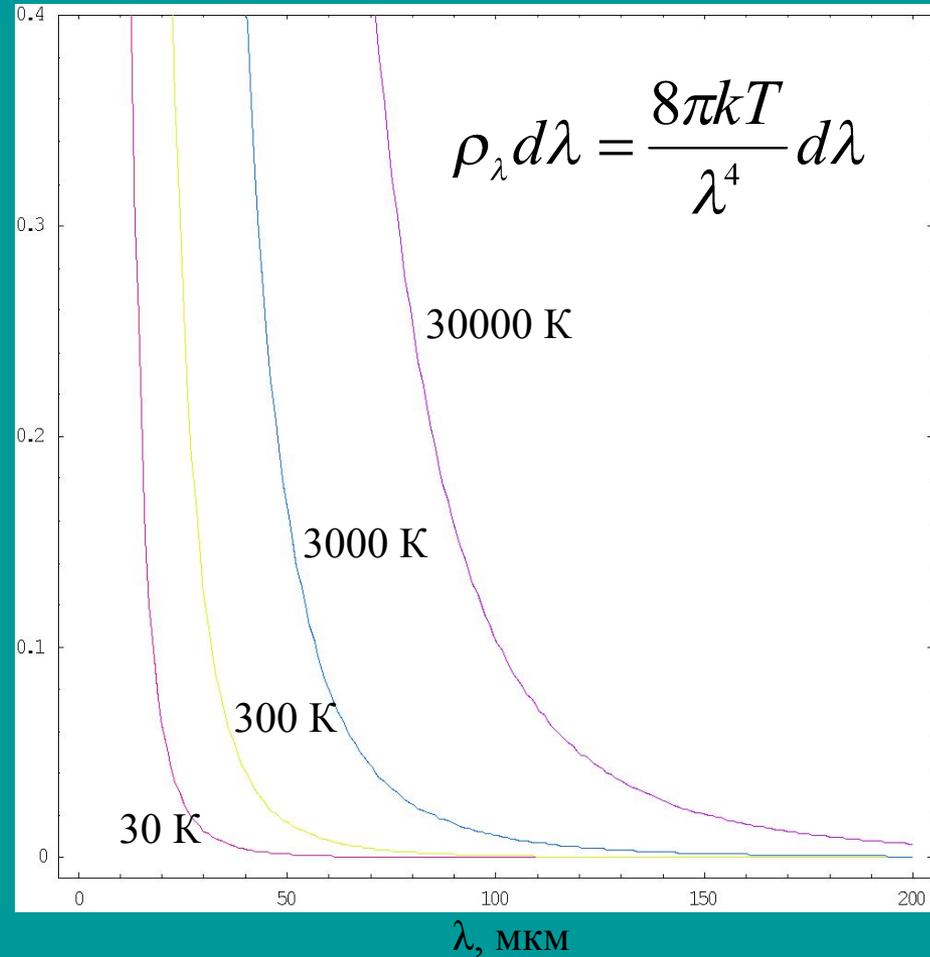
Закон Рэля – Джинса



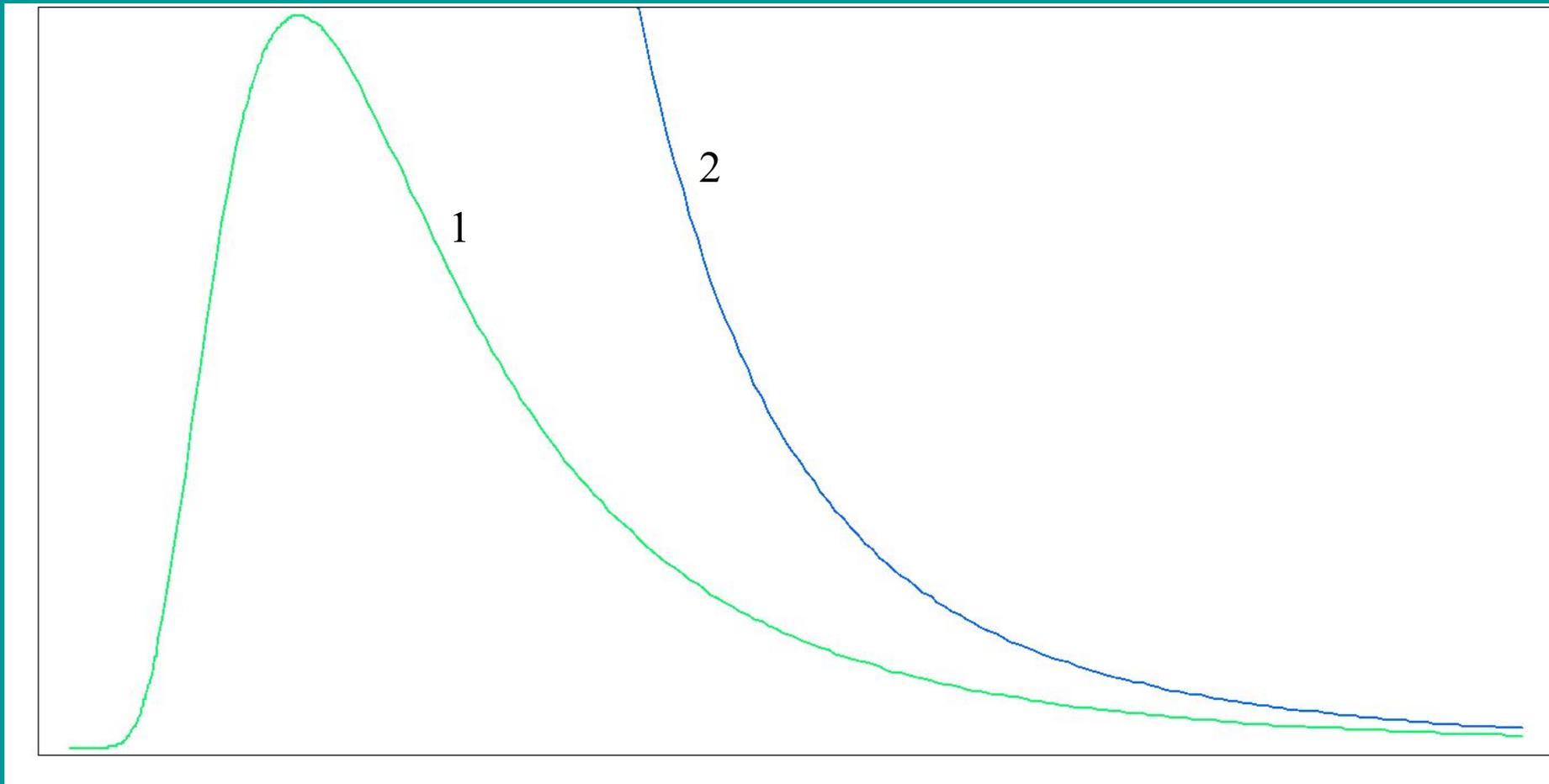
Джон Стретт (лорд Рэлей)
(John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh)
1842 – 1919



Джеймс Джинс
James Horwood Jeans
1877 – 1946



Закон Рэлея – Джинса



Зависимости спектральной плотности энергии от длины волны в мкм при $T = 1650$ К.

1 – эксперимент, 2 – расчёт по Рэлею – Джинсу



1900 г.

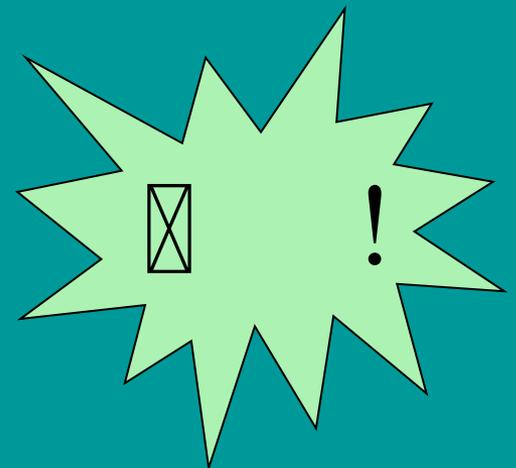
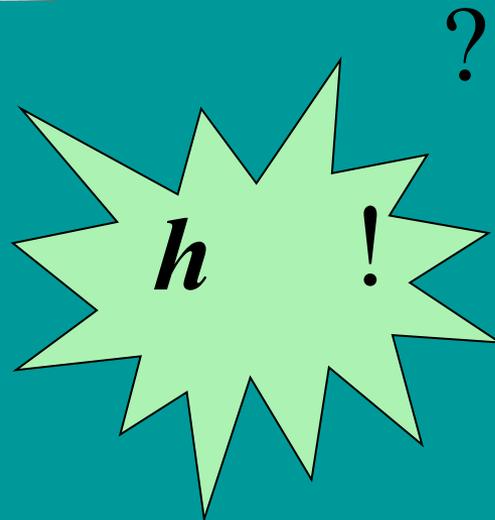
Макс Планк

$$E = h \cdot \nu$$

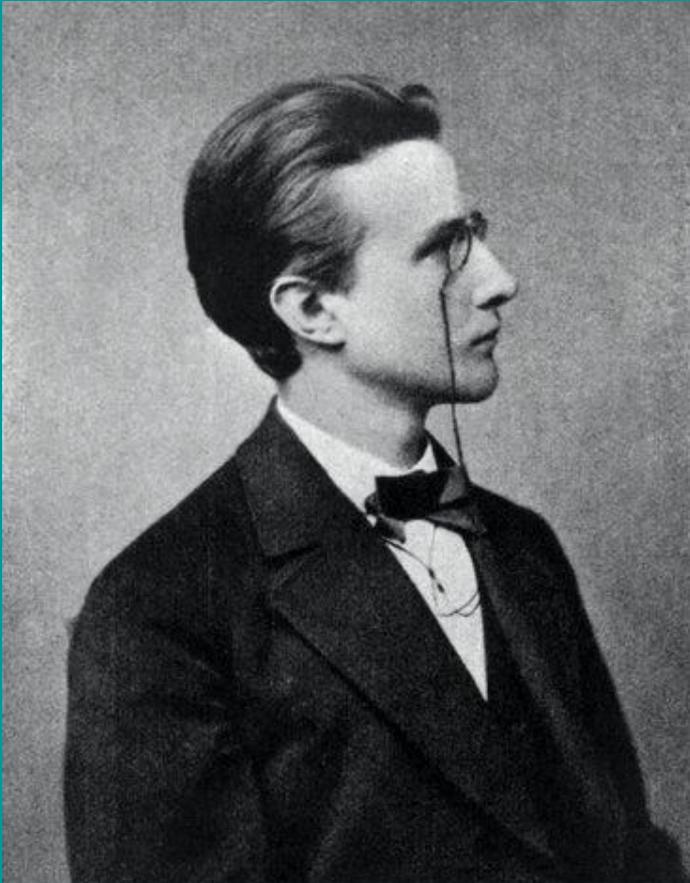
$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$E = \hbar \cdot \omega$$

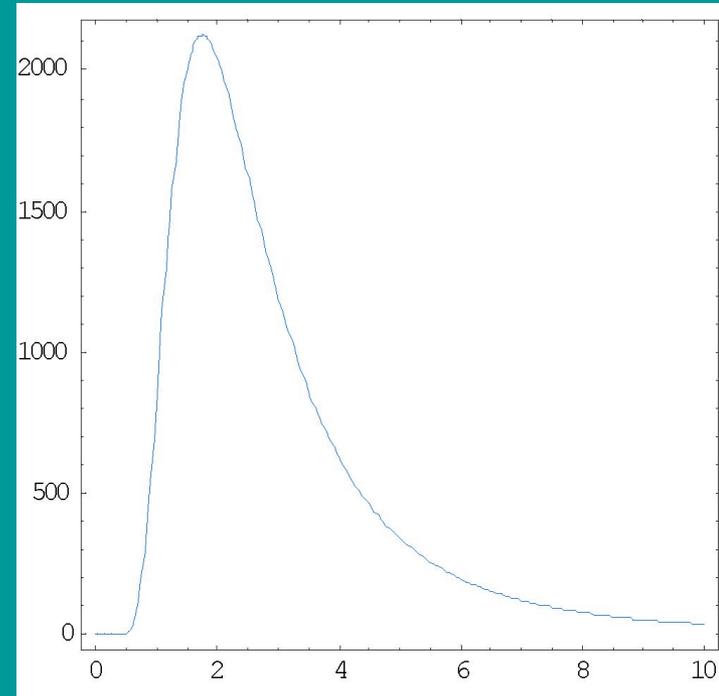
$$\hbar = h / 2\pi$$



Закон Планка

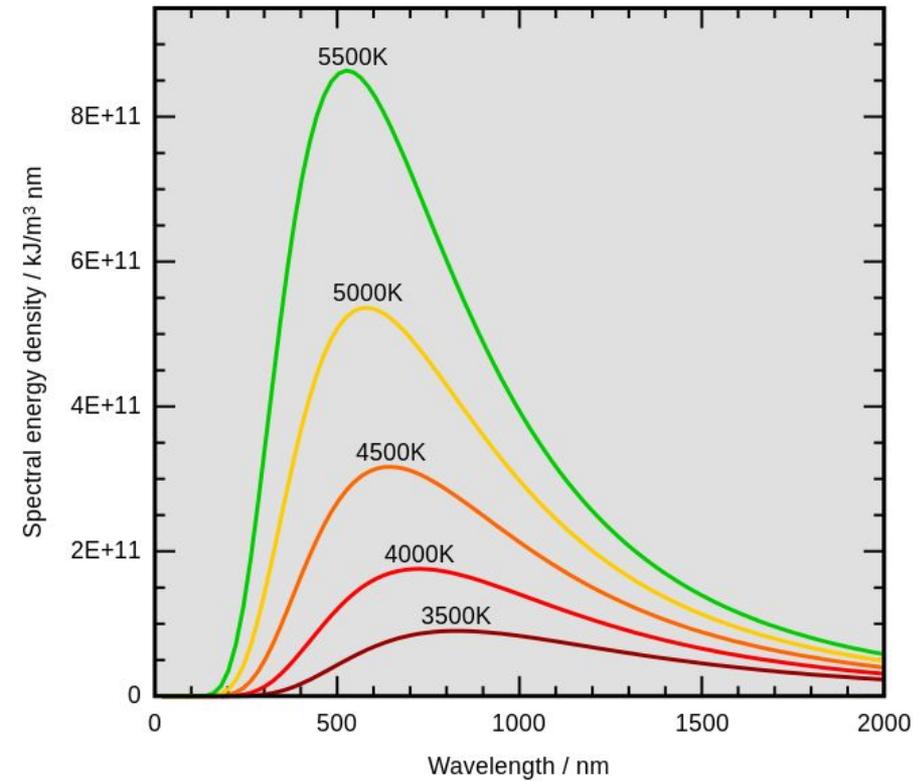


Макс Планк
(Max Karl Ernst Ludwig Planck)
1858–1947
(Нобелевская премия по физике
1918)



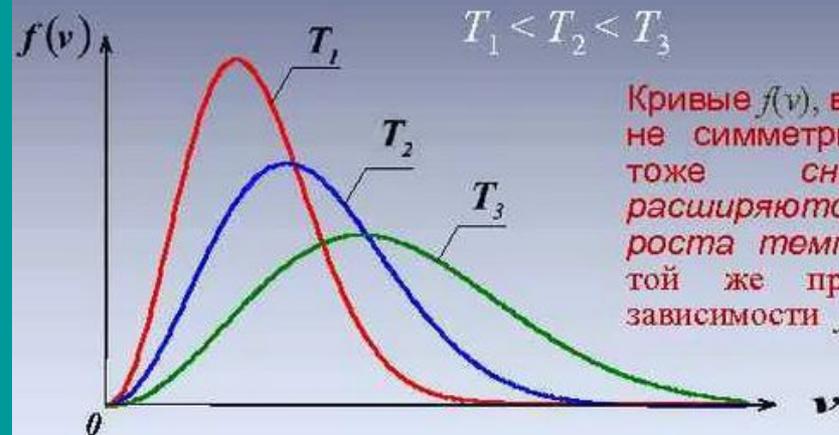
$$\rho_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

$$\rho_{\nu}(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$



Распределение Максвелла

Функции распределения Максвелла для модуля скорости



Кривые $f(v)$, в отличие от $f(v_x)$, не симметричны. Но они тоже снижаются и расширяются по мере роста температуры – по той же причине, что и зависимости $f(v_x)$.

Формула Планка

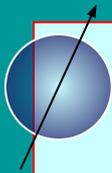
$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Формула Рэля-Джинса

$$\rho(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

$$E = h \cdot \nu$$

$$f(E) = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

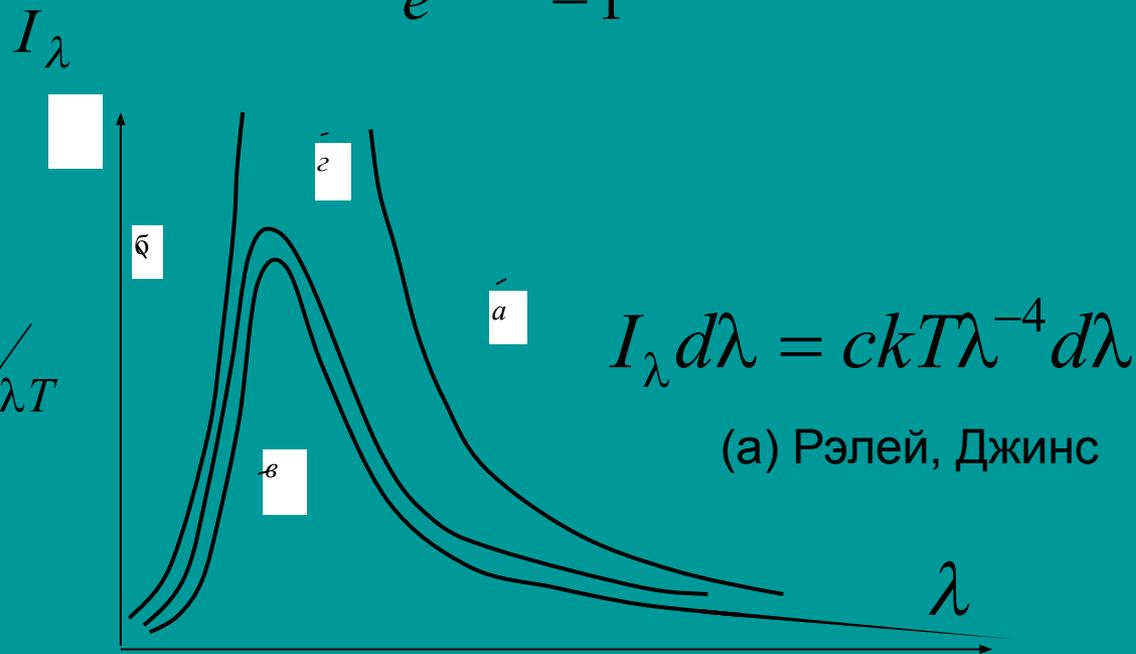


1.1. Световые кванты. Тепловое излучение. Формула Планка. Флуктуации светового потока

$$I_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (\text{г) Планк}$$

$$I_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}$$

(б) Вин



(а) Рэлей, Джинс

Спектральное распределение поверхностной яркости теплового излучения:

Волновая природа света

Квантовая природа света

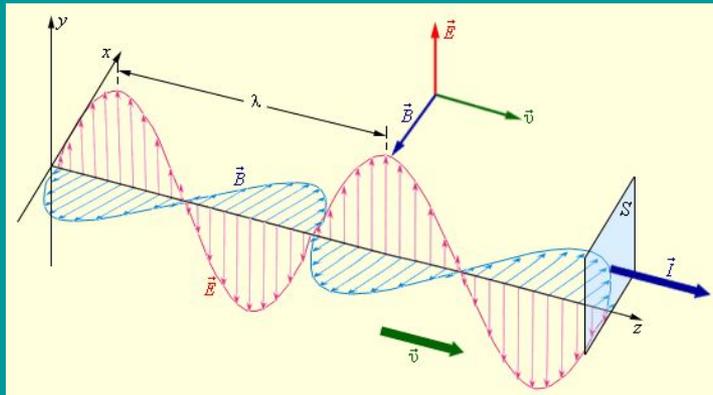
Интерференция

Дифракция

Дисперсия

Поляризация

Законы теплового излучения



Гипотеза квантов Планка

элементарные излучатели представляют собой осцилляторы, которые могут находиться только в некоторых избранных состояниях, в которых их энергия является целым кратным наименьшего количества энергии

при излучении или поглощении осцилляторы переходят из одного

состояния в другое скачком, минуя промежуточные состояния

Флуктуации светового потока, Вавилов, 1943 г.

Флуктуации слабых световых потоков были обнаружены С. И. Вавиловым и его сотрудниками. Они установили, что в области наибольшей чувствительности ($\lambda = 0,555 \text{ мк}$) глаз начинает реагировать на свет при попадании на зрачок примерно 100 фотонов в секунду. При такой интенсивности Вавилов наблюдал флуктуации светового потока, носившие отчетливо выраженный статистический характер.



1.2. Квантовые закономерности фотоэффекта и тормозного рентгеновского излучения

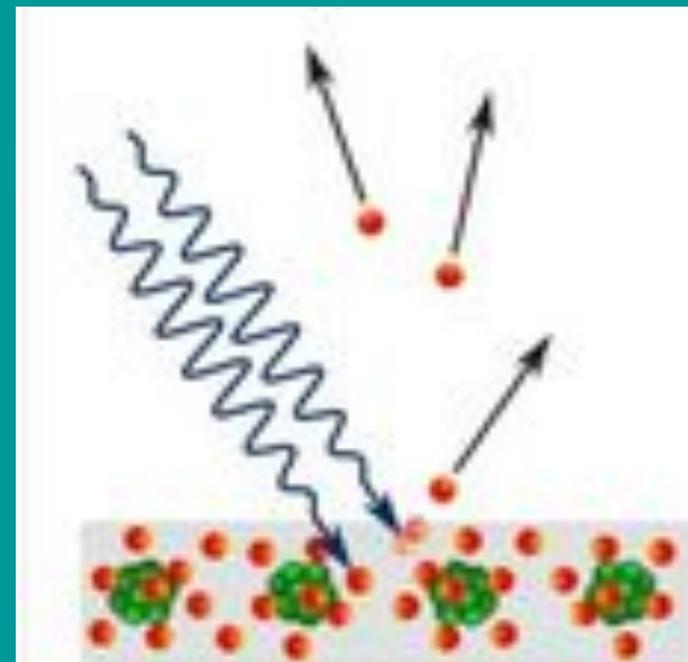
Фотоэффект

Внутренний фотоэффект

Внешний фотоэффект

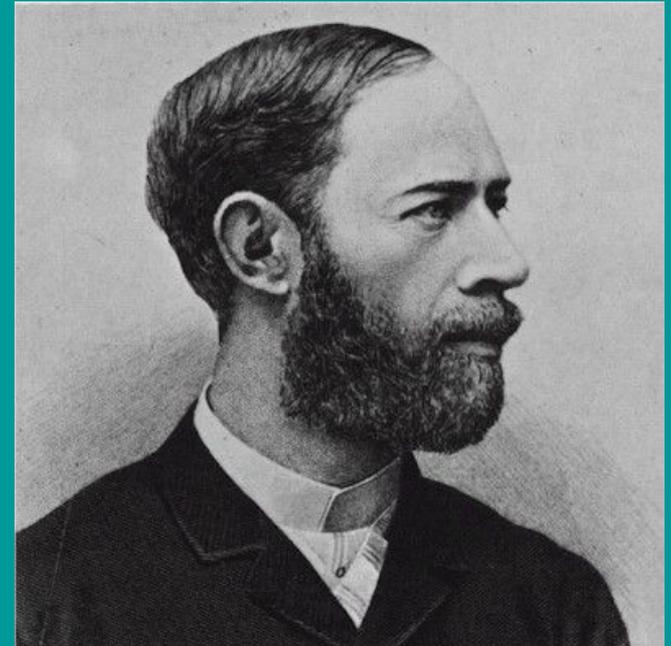
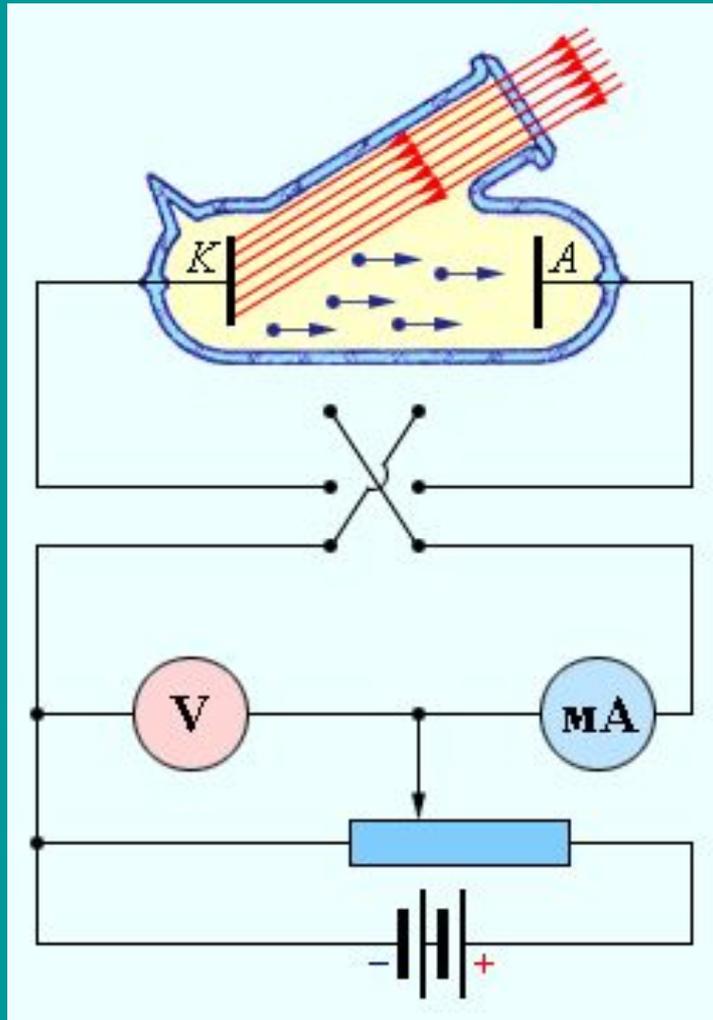
Внутренний фотоэффект - явление перераспределения электронов внутри чистого полупроводника под действием света.

На его основе работают **фоторезисторы**.



Фотоэффект

- 1887 Генрих Герц

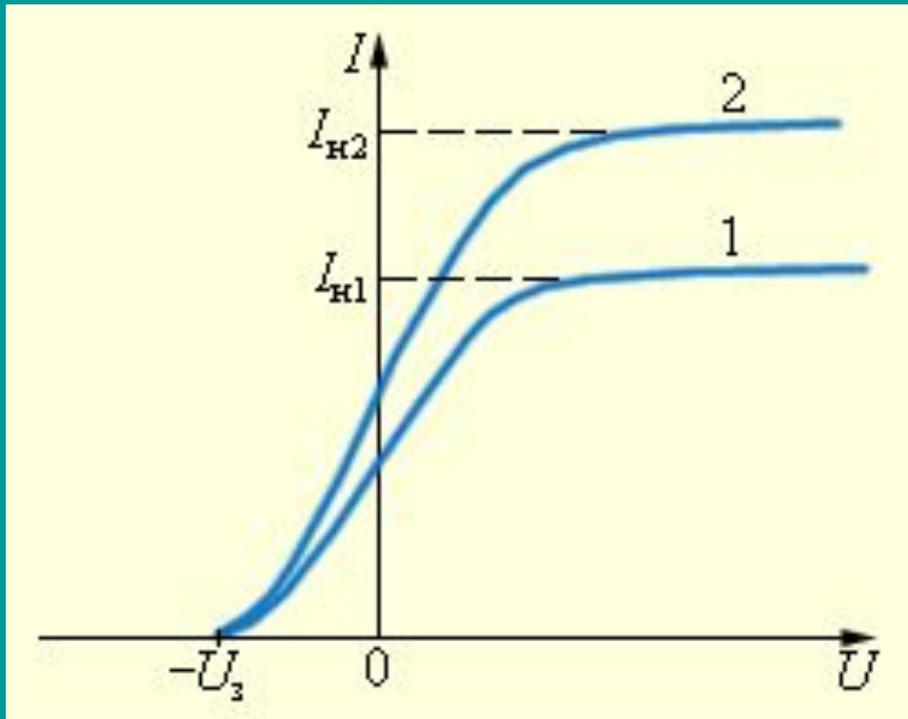


Основные законы фотоэффекта

✓ Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты света ν и не зависит от его интенсивности.

✓ Для каждого вещества существует так называемая **красная граница фотоэффекта**, т. е. наименьшая частота ν_{\min} , при которой еще возможен внешний фотоэффект.

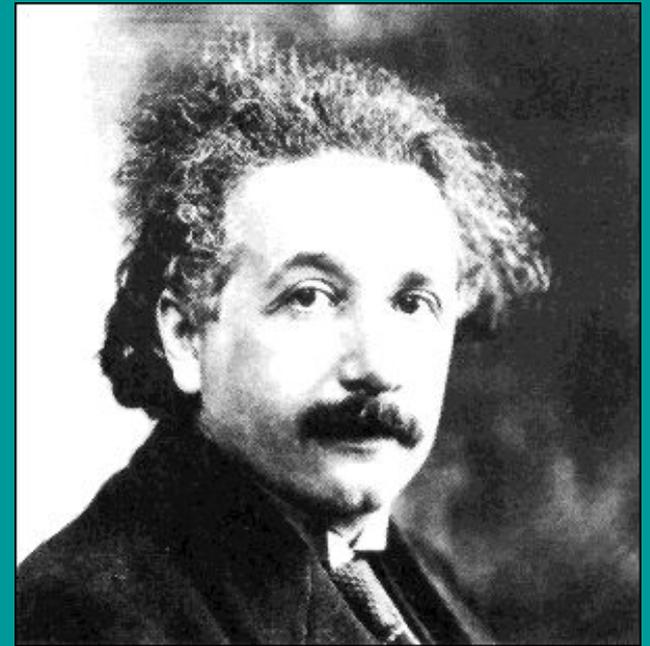
✓ Число фотоэлектронов, вырываемых светом из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света.



1905 г.

Альберт Эйнштейн

$$h\nu = A + \frac{m_e V_{\max}^2}{2}$$



Волновая природа света

Квантовая природа света

Интерференция

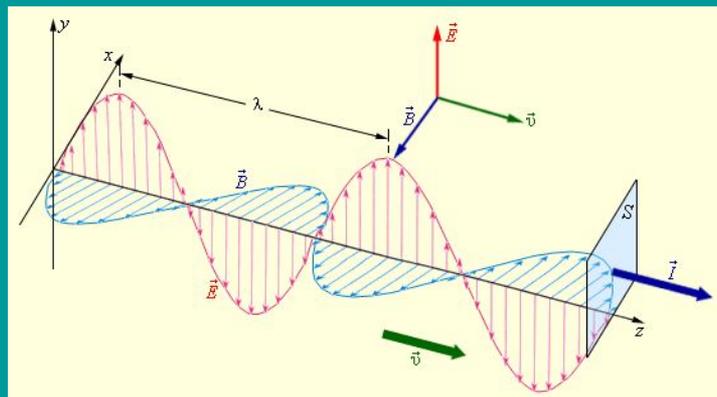
Законы теплового излучения

Дифракция

Фотоэффект

Дисперсия

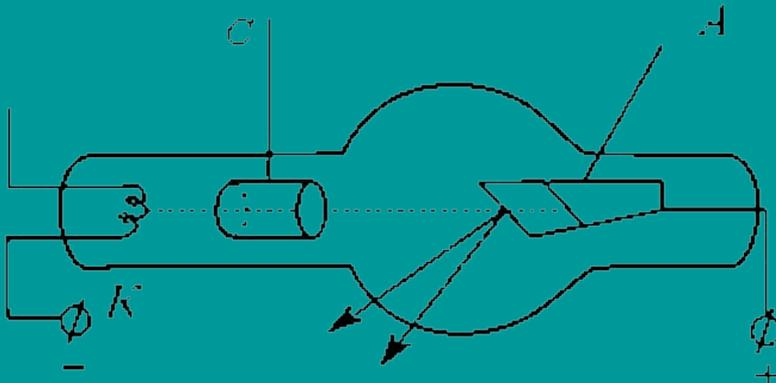
Поляризация



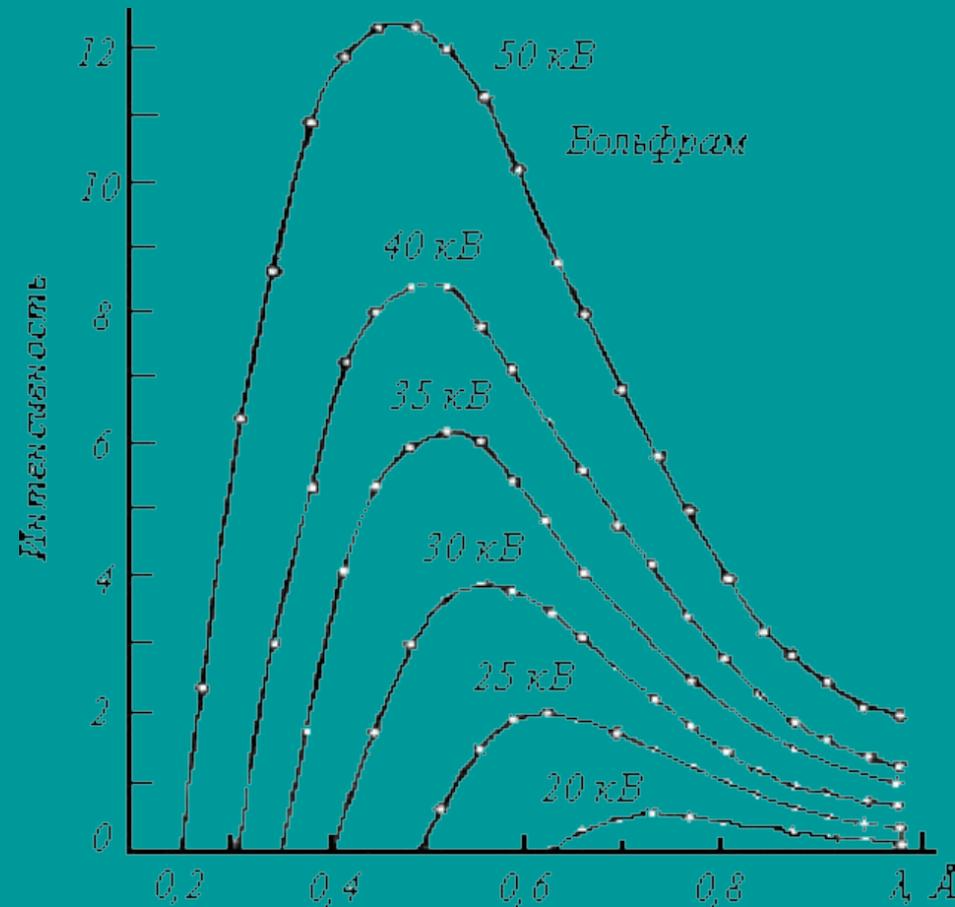


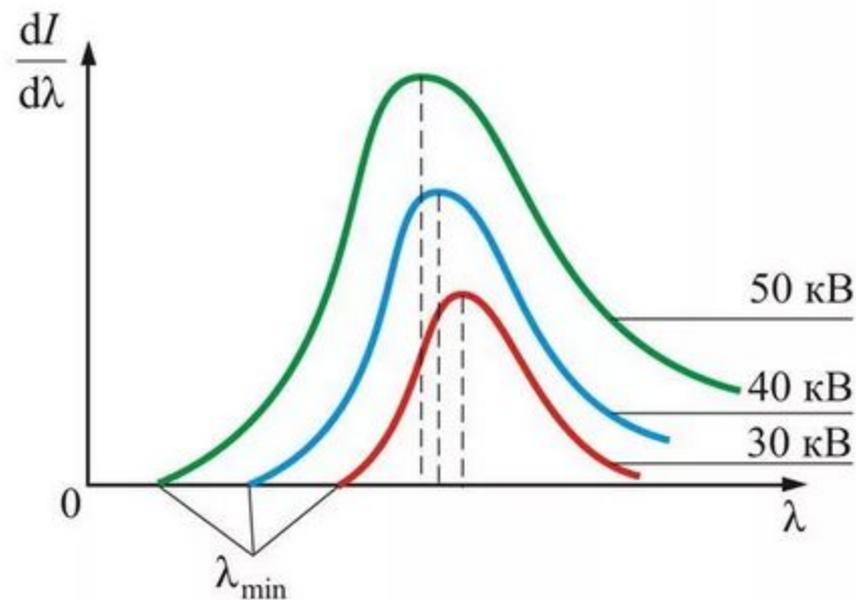
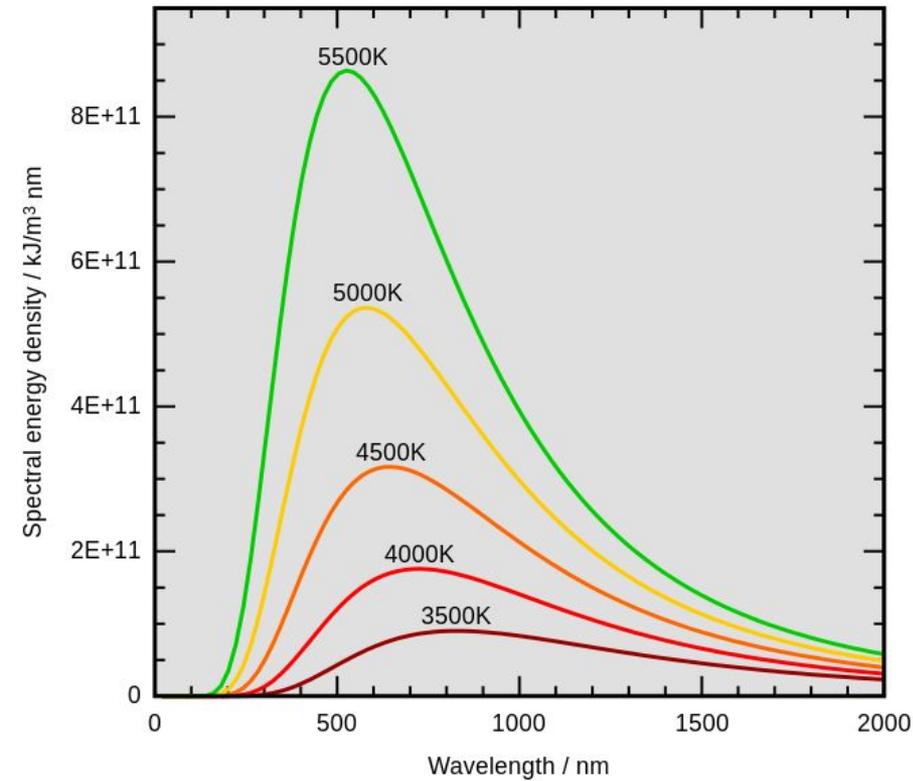
1.2. Квантовые закономерности фотоэффекта и тормозного рентгеновского излучения

Схема рентгеновской трубки



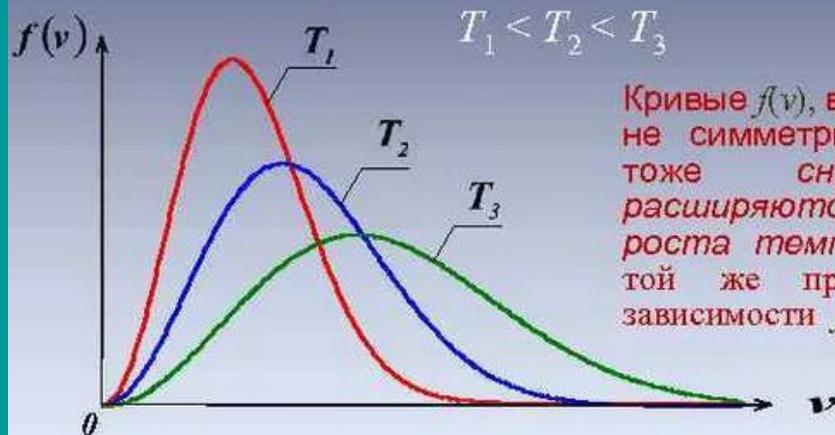
$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eU}$$





Распределение Максвелла

Функции распределения Максвелла для модуля скорости



Кривые $f(v)$, в отличие от $f(v_x)$, не симметричны. Но они тоже снижаются и расширяются по мере роста температуры – по той же причине, что и зависимости $f(v_x)$.

Волновая природа света

Квантовая природа света

Интерференция

Законы теплового излучения

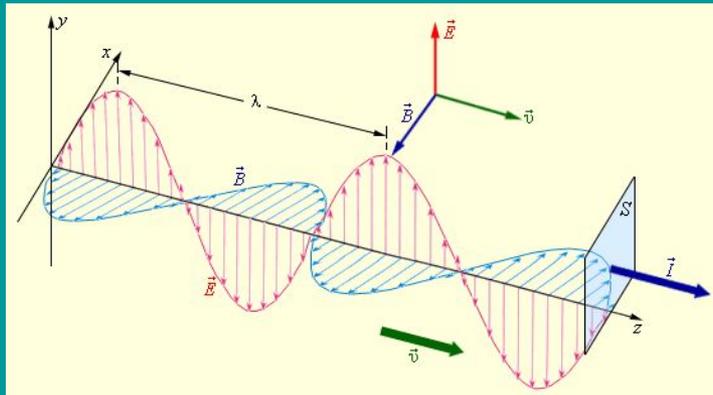
Дифракция

Фотоэффект

Дисперсия

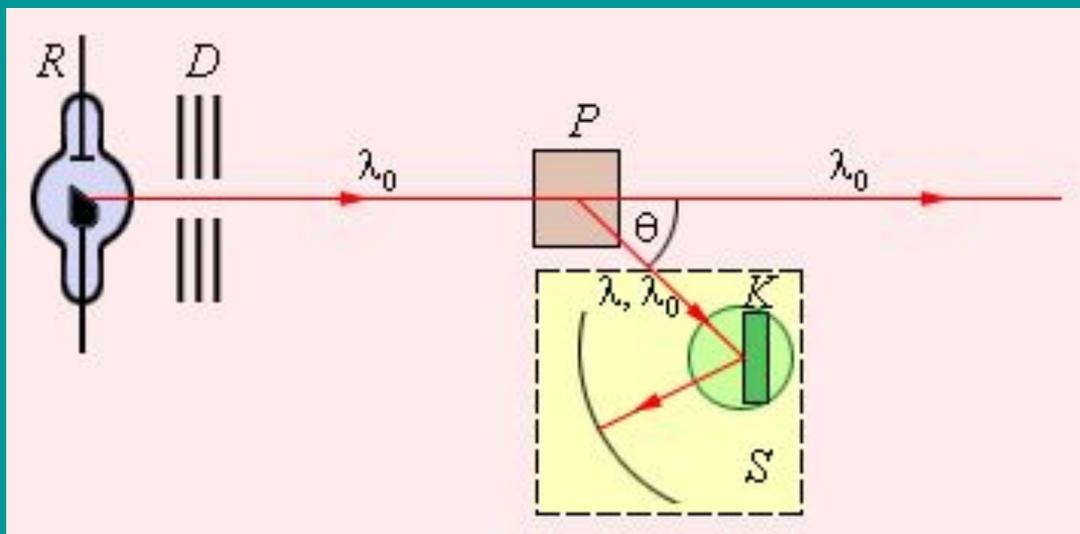
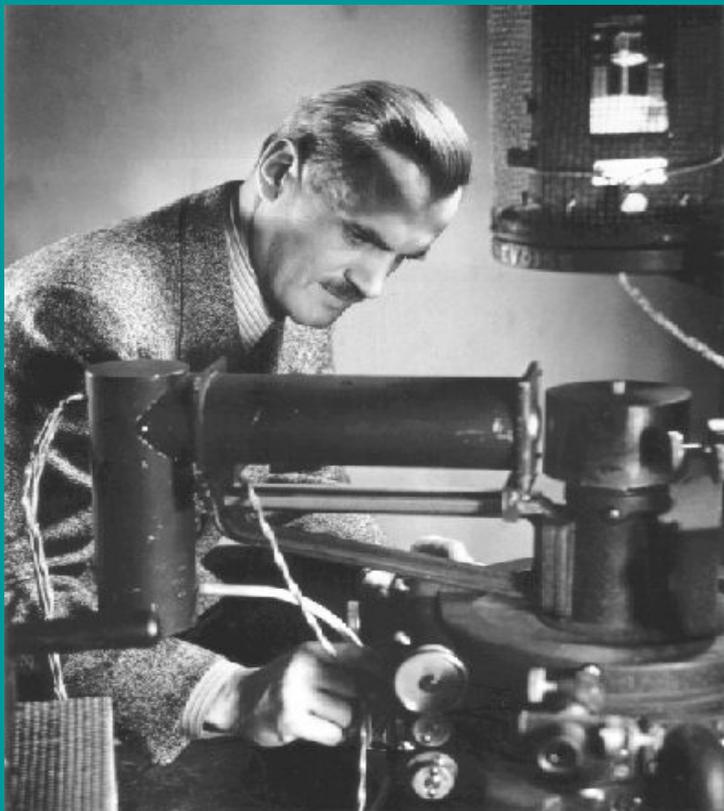
Тормозное рентгеновское излучение

Поляризация



1922.

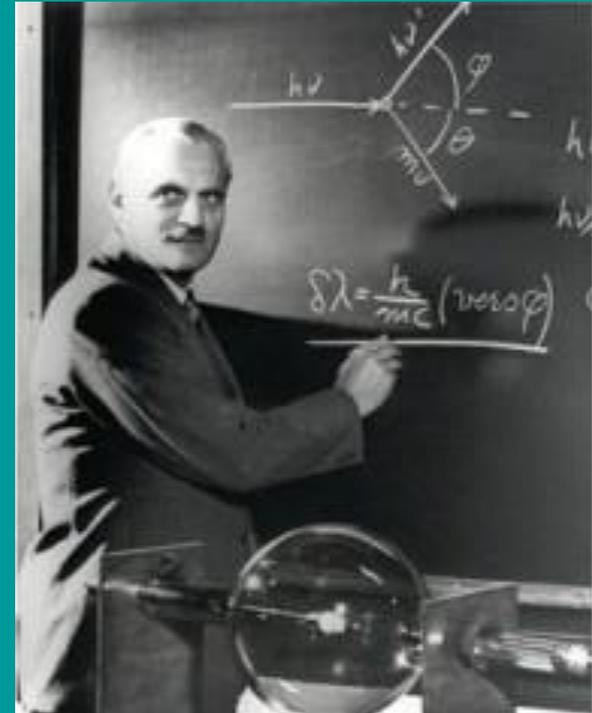
Артур Комптон исследовал рассеяние рентгеновских лучей на электронах и доказал существование фотона.





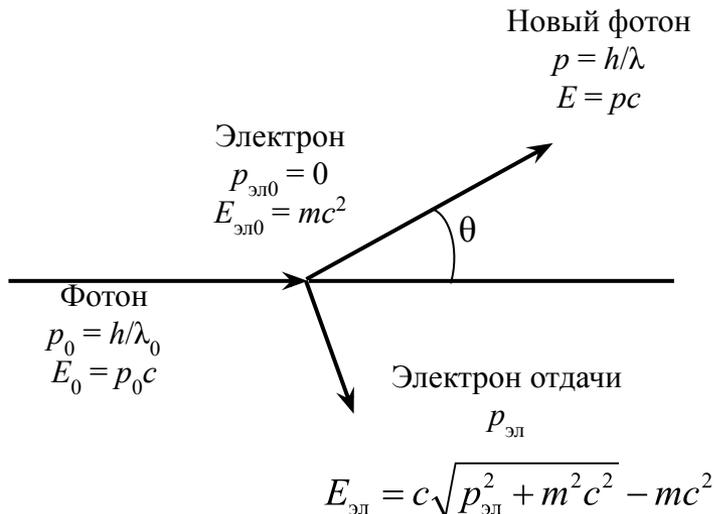
1.3. Эффект Комптона

Эффект Комптона (1923)
– изменение длины
волны
электромагнитного
излучения в
результате рассеяния
на свободных



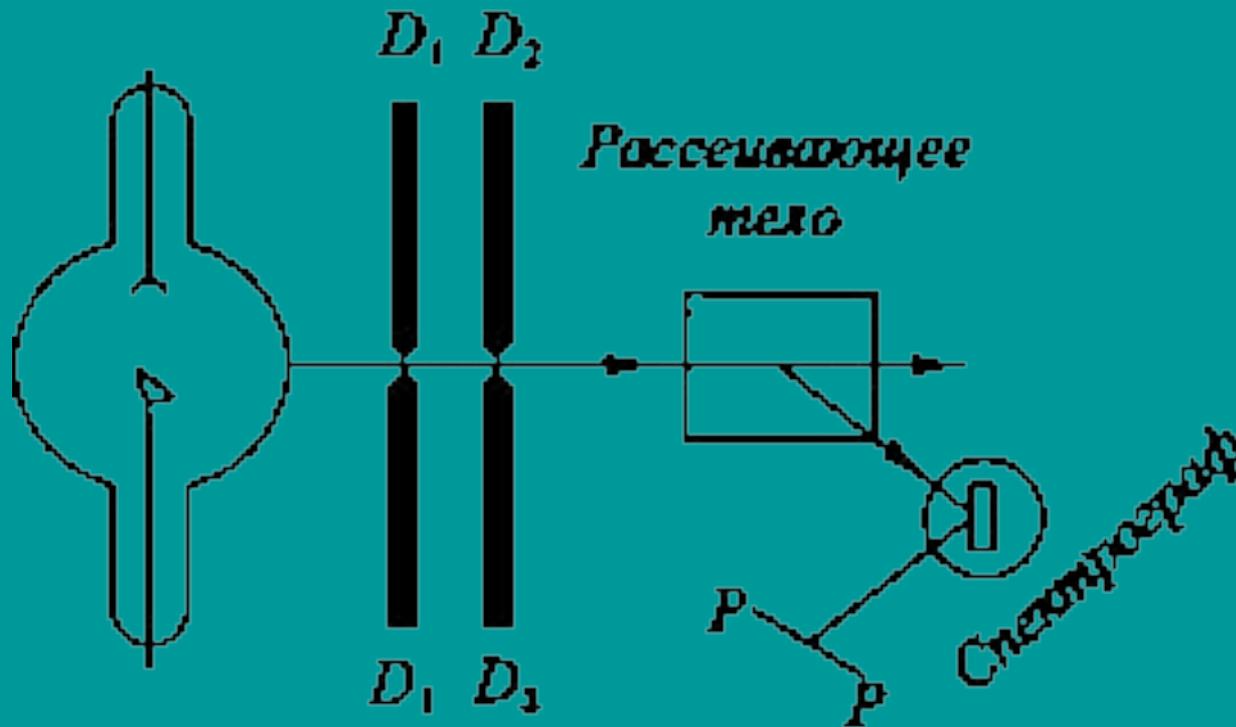
Артур Комптон
(Arthur Holly Compton)
1892–1962

(Нобелевская премия по физике 1927)





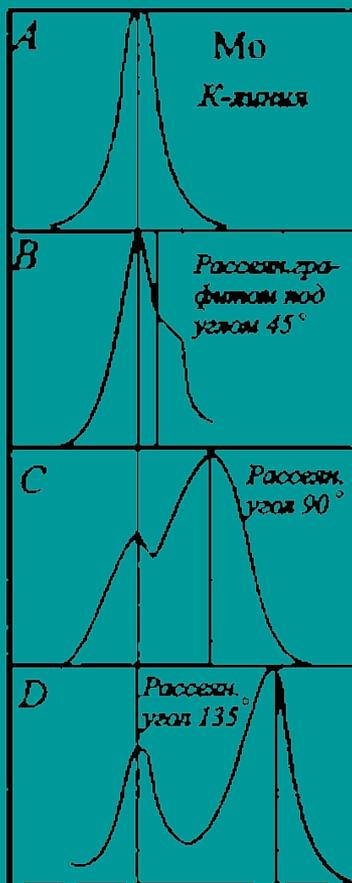
1.3. Эффект Комптона

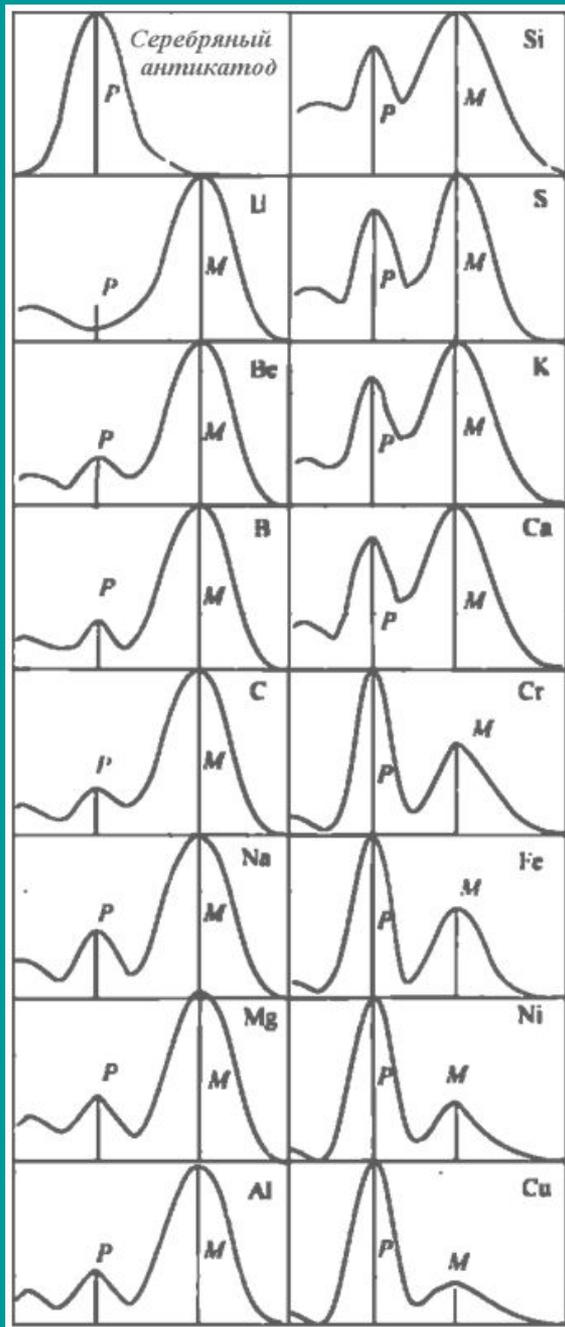




1.3. Эффект Комптона

- Эффект *Комптона* на графите.





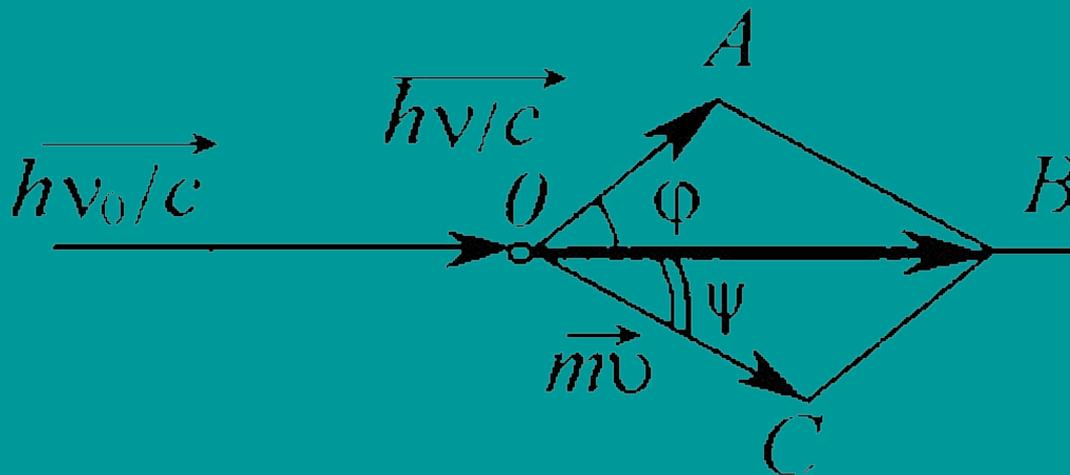
Эффект Комптона для различных веществ



1.3.Эффект Комптона

- 1) в рассеянном излучении присутствуют как первоначальная длина волны возбуждающего излучения, так и длина волны, смещенная в сторону длинных волн
- 2) величина смещения зависит от угла рассеяния, а именно, она возрастает при увеличении этого угла
- 3) при увеличении угла рассеяния интенсивность несмещенной линии падает, а интенсивность смещенной линии возрастает

1.3. Эффект Комптона



$$h\nu_0 + mc^2 = h\nu + \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$$

$$\vec{p}_0 = \vec{p}_\phi + m\vec{\nu}$$

...

$$\begin{bmatrix} p_0 = h\nu_0/c \\ p_\phi = h\nu/c \end{bmatrix}$$

$$\Delta\lambda = 2\Lambda \sin^2 \frac{\phi}{2} = 0,048 \cdot \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad \Lambda = \frac{h}{mc}$$

Волновая природа света

Квантовая природа света

Интерференция

Дифракция

Дисперсия

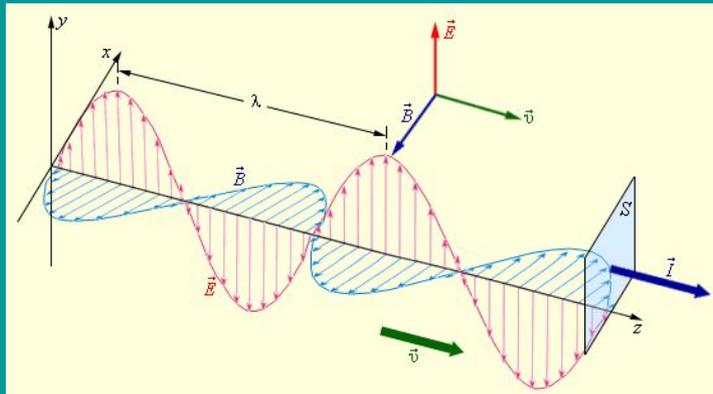
Поляризация

Законы теплового излучения

Фотоэффект

Тормозное рентгеновское излучение

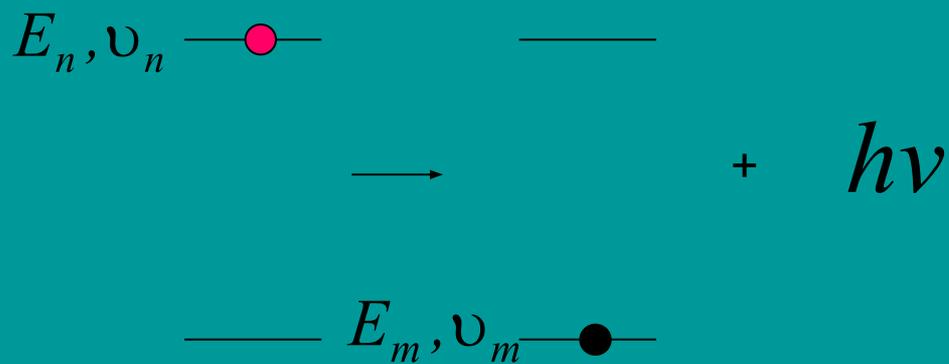
Эффект Комптона





1.4. Корпускулярно-волновой дуализм в оптике

Эффект Доплера



$$Mv_n - Mv_m = \frac{hv}{c},$$

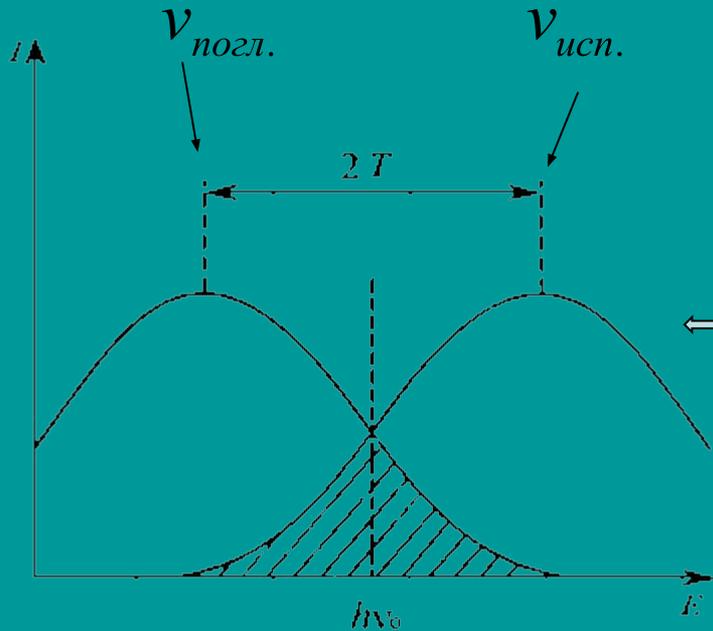
$$E_n + \frac{1}{2}Mv_n^2,$$

$$E_m + \frac{1}{2}Mv_m^2,$$

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{v}{c} \cos \theta .$$

$$hv_0 = E_n - E_m ,$$

1.5. Локализация импульса фотона Эффект Мессбауэра



$$h\nu_{\text{исп.}} = E_n - E_m - T = h\nu_0 - T$$

$$h\nu_{\text{погл.}} = E_n - E_m + T = h\nu_0 + T$$

$$\nu_{\text{погл.}} - \nu_{\text{исп.}} = 2T$$

$$T = \frac{|P|^2}{2M}; \quad |P| = p_\phi = \frac{h\nu_0}{c};$$

$$T = \frac{(h\nu_0)^2}{2Mc^2} = \frac{h^2}{2M\lambda^2};$$

$$M = 1,7 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$$

$$1. \quad \lambda_1 = 500 \text{ нм}; \quad T = 1,7 \cdot 10^{-11} \text{ эВ}$$

$$2. \quad \lambda_2 = 2,5 \text{ нм}; \quad T = 1,25 \text{ эВ}$$