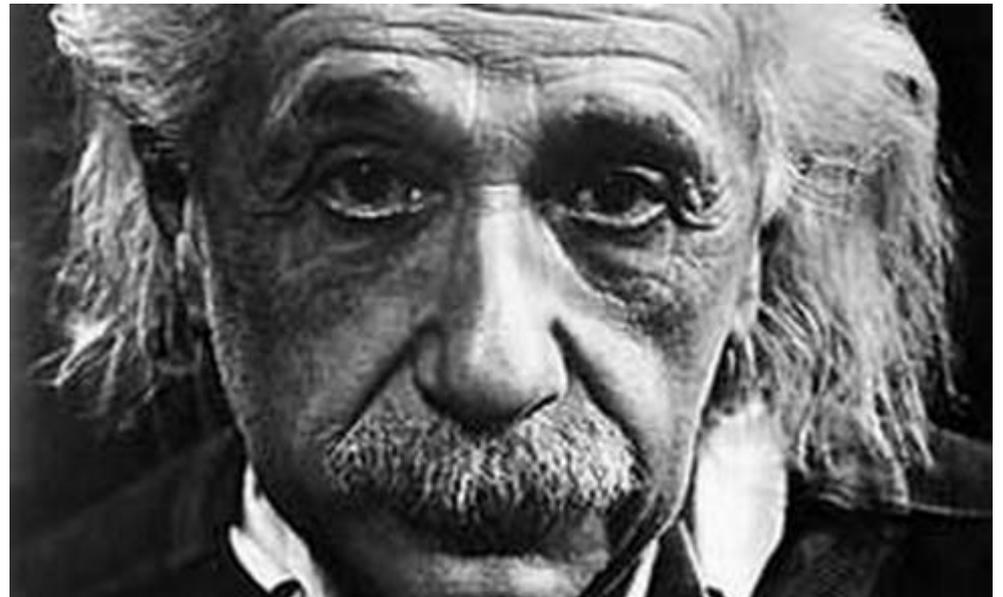


ЛЕКЦИЯ №13 **Введение в квантовую физику**

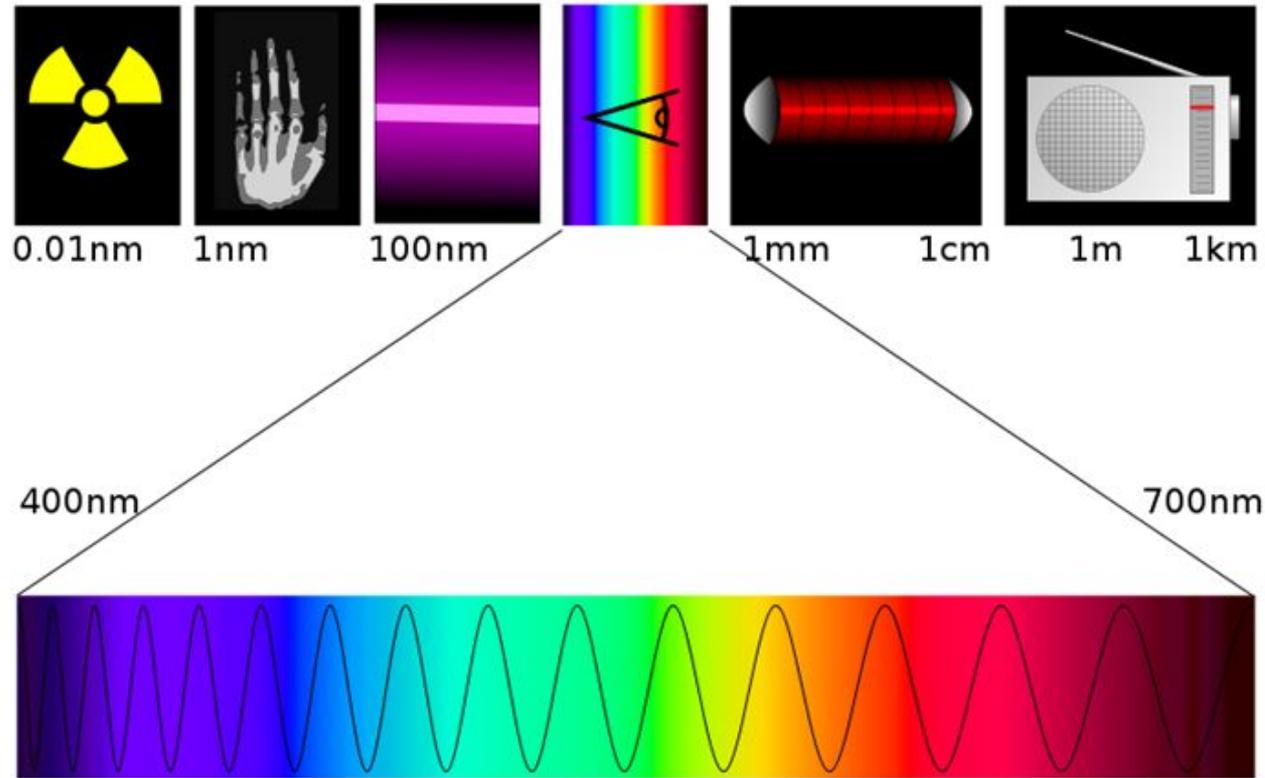
Элементы содержания: Тепловое излучение и его характеристики. Спектральный коэффициент поглощения. Абсолютно черное тело. Законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана и Вина. Формула Релея-Джинса. Гипотеза и формула Планка. Фотоэффект и его законы. Гипотеза и формула Эйнштейна. Корпускулярно-волновой дуализм природы света. Эмпирические закономерности в атомных спектрах. Формула Бальмера.

Литература: Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2000. С. 317-333, 335-336.



Тепловым называется излучение, которое возникает в результате теплового возбуждения атомов и молекул.

Тепловое излучение свойственно **всем телам** при $T > 0$ К и имеет **сплошной спектр**, т.е. содержит электромагнитные волны всех длин волн от 0 до ∞ .



Характеристики теплового излучения

Поток излучения, Φ_e – физическая величина, численно равная энергии, переносимой излучением в единицу времени, $[\Phi_e]=\text{Вт}$:

$$\Phi_e = W_e / t \quad , \quad (13.1)$$

где W_e - энергия излучения.

Энергетическая светимость, M_e - физическая величина, численно равная потоку излучения, переносимому с единицы площади излучающей поверхности, $[M_e]=\text{Вт} / \text{м}^2$:

$$M_e = \Phi_e / S \quad . \quad (13.2)$$

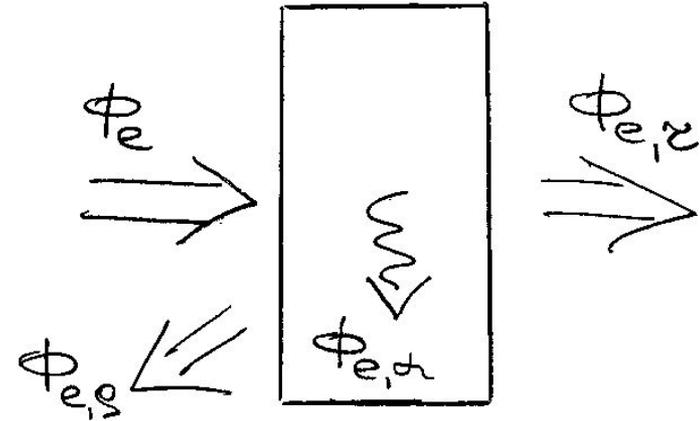
Спектральная плотность энергетической светимости, $M_{e,\lambda}$ - физическая величина, характеризующая распределение излучения по длинам волн и численно равная отношению энергетической светимости, излучаемой телом в узком спектральном диапазоне $[\lambda, \lambda+d\lambda]$, к ширине этого диапазона, $[M_{e,\lambda}]=\text{Вт} / \text{м}^3$:

$$M_{e,\lambda} = dM_e / d\lambda \quad . \quad (13.3)$$

Если поток излучения падает на какое-либо тело, то часть его отражается поверхностью тела, часть поглощается и часть может проходить через это тело:

$$\Phi_e = \Phi_{e,\alpha} + \Phi_{e,\tau} + \Phi_{e,\rho} \quad , \quad (13.4)$$

где Φ_e - поток излучения, падающий на данное тело, $\Phi_{e,\alpha}$, $\Phi_{e,\tau}$ и $\Phi_{e,\rho}$ - соответственно, поглощенный, прошедший и отраженный данным телом потоки излучения.



Спектральный коэффициент поглощения – физическая величина, характеризующая способность тел поглощать падающее на них излучение на данной длине волны и численно равная отношению монохроматического поглощенного потока к монохроматическому падающему потоку на этой длине волны:

$$\alpha_\lambda = \Phi_{e,\alpha,\lambda} / \Phi_{e,\lambda} \quad . \quad (13.5)$$

Абсолютно черное тело и его реализация

Абсолютно черным (излучателем Планка) называется тело, полностью поглощающее весь падающий на него поток независимо от направления падения, спектрального состава и поляризации излучения.

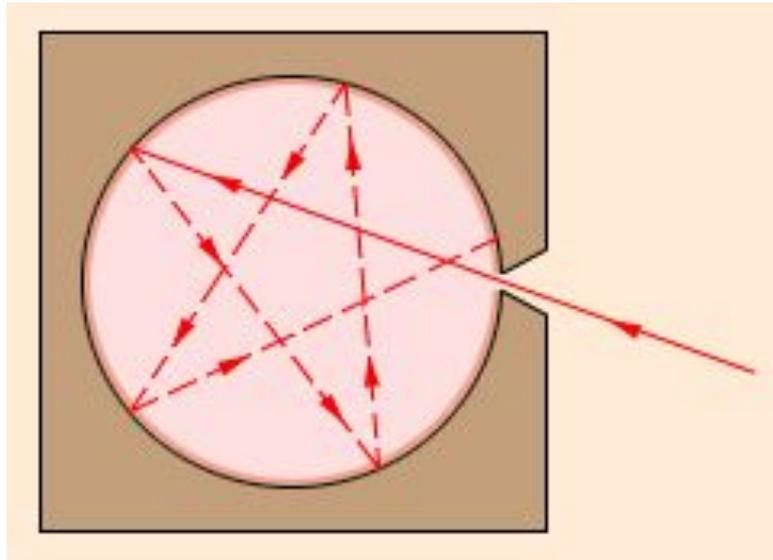
Абсолютно черных тел в природе не существует. Однако некоторые тела в ограниченных интервалах длин волн весьма близки к абсолютно черным. Например, в видимом диапазоне излучения коэффициенты поглощения сажи, платиновой черни и черного бархата мало отличаются от единицы.



Абсолютно черное тело и его реализация

В физике для экспериментального исследования теплового излучения используется модель, максимально приближенная к абсолютно черному телу. Она представляет собой замкнутую оболочку с небольшим отверстием.

Свет, попадающий внутрь оболочки сквозь отверстие, после многократных отражений будет полностью поглощён, и отверстие снаружи будет выглядеть совершенно чёрным. Но при нагревании оболочки из ее отверстия будет исходить излучение, близкое к тепловому излучению абсолютно черного тела.



Законы теплового излучения

Закон Кирхгофа (немецкий физик Густав Кирхгоф, 1859 г.): отношение спектральной плотности энергетической светимости тел к их спектральному коэффициенту поглощения не зависит от физической природы тел, а является для всех тел универсальной функцией длины волны и температуры

$$\frac{M_{e,\lambda}}{\alpha_\lambda} = f(\lambda, T) \quad , \quad (13.6)$$

где $f(\lambda, T)$ - универсальная функция Кирхгофа.

Для абсолютно черного тела $\alpha_\lambda \equiv 1$, поэтому универсальная функция Кирхгофа - это спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела: $f(\lambda, T) = M_{e,\lambda}^0$.

Центральная задача теории теплового излучения: найти функциональный вид зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от температуры тела и длины волны излучения .

Закон Стефана-Больцмана (австрийские физики Йозеф Стефан, 1879 г. и Людвиг Больцман, 1884 г.): энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры:

$$M_e^0 = \sigma T^4 , \quad (13.7)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

Реальные источники теплового излучения при той же самой температуре обладают меньшей энергетической светимостью, чем абсолютно черное тело. Для них закон Стефана-Больцмана принимает вид

$$M_e = \varepsilon \sigma T^4 , \quad (13.8)$$

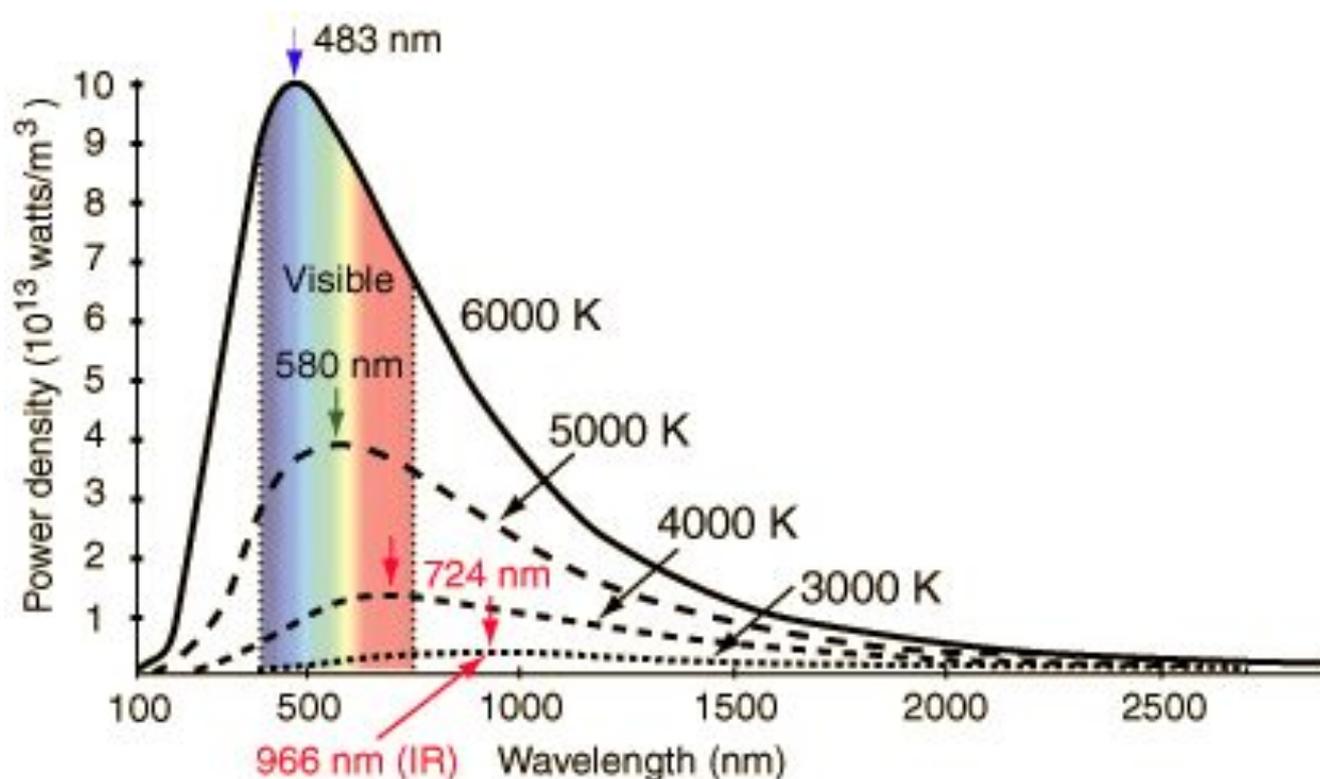
где ε - коэффициент теплового излучения реального тела.

Относительные спектральные распределения потока излучения «серого» излучателя и абсолютно черного тела совпадают, но от «серого» излучателя исходит несколько меньший поток излучения ($\varepsilon < 1$).

Закон смещения Вина (немецкий физик Вильгельм Вин, 1893 г.; В 1911 г. получил Нобелевскую премию по физике «За открытие законов теплового излучения»): длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре:

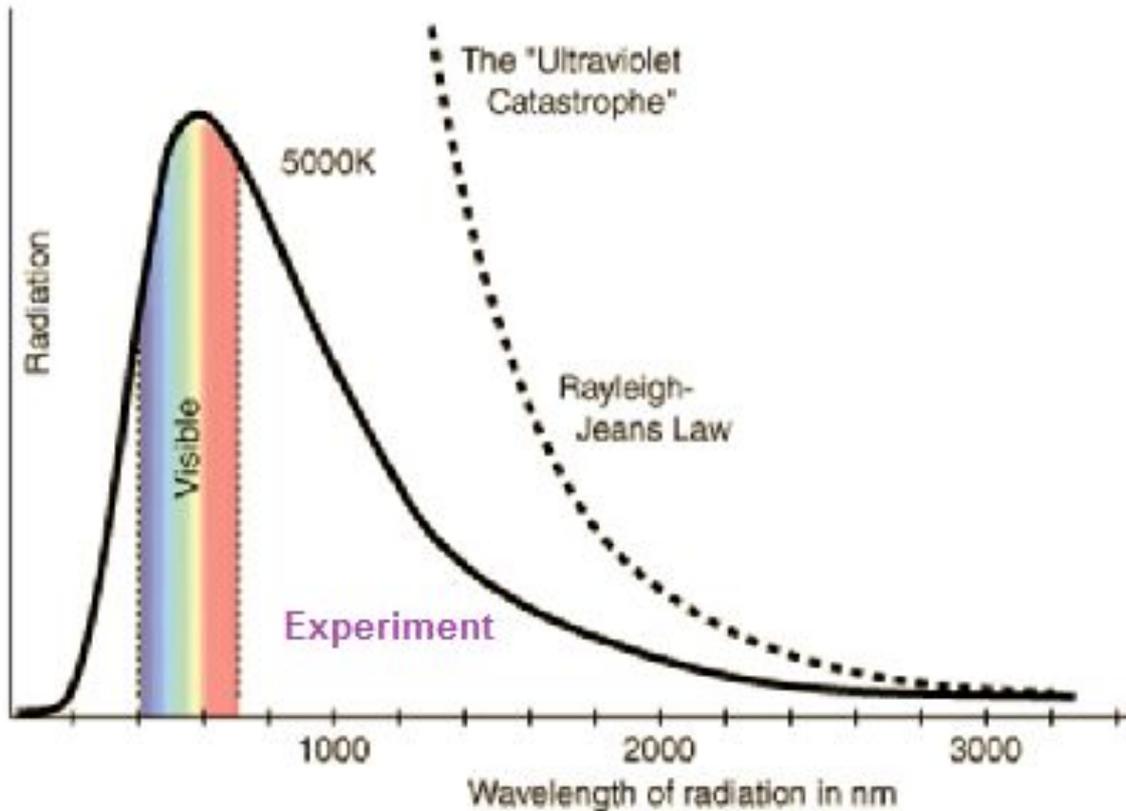
$$\lambda_m = b/T, \quad (13.9)$$

где $b=2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К – постоянная Вина.



Последний шаг в теории теплового излучения, находясь в рамках классической физики, сделали Джон Рэлей (1900 г.) и Джеймс Джинс (1905 г.). Они получили следующую формулу для спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела

$$M_{e,\lambda}^0 = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT \quad (13.10)$$



Вывод: в рамках классической физики не удастся объяснить закон распределения энергии в спектре абсолютно черного тела.

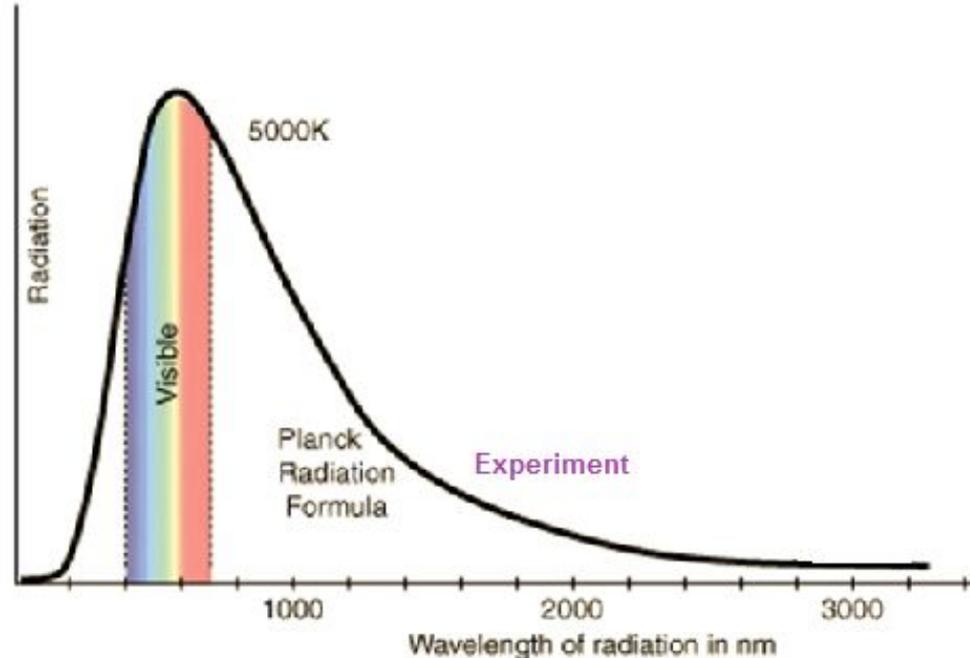
Гипотеза Планка (Макс Планк, 14 декабря 1900 г.): при тепловом излучении тело испускает энергию не непрерывно, а дискретными порциями или квантами. Величина наименьшей порции энергии (энергия кванта)

$$\varepsilon = hf = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda} \quad (13.11)$$

где $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка; $\hbar=h/2\pi= 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Формула Планка:

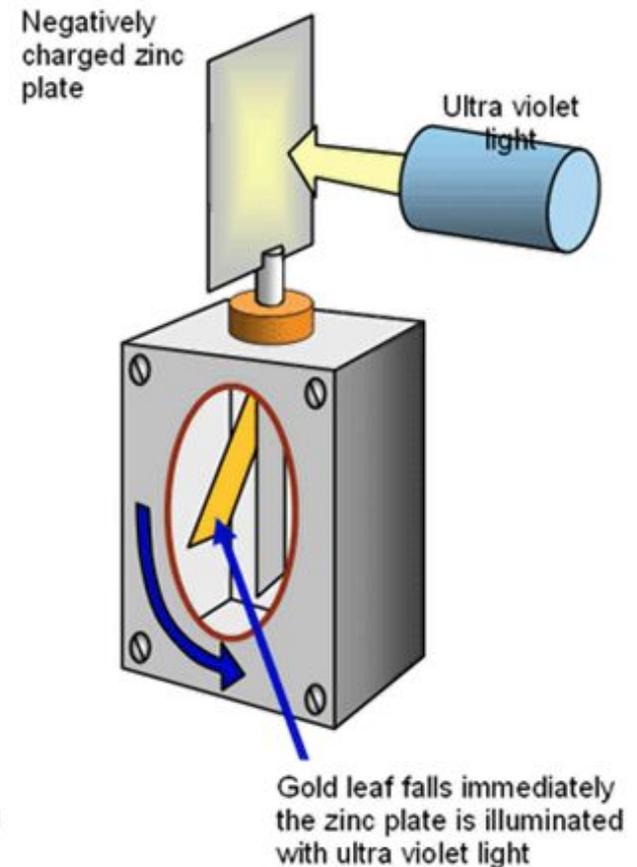
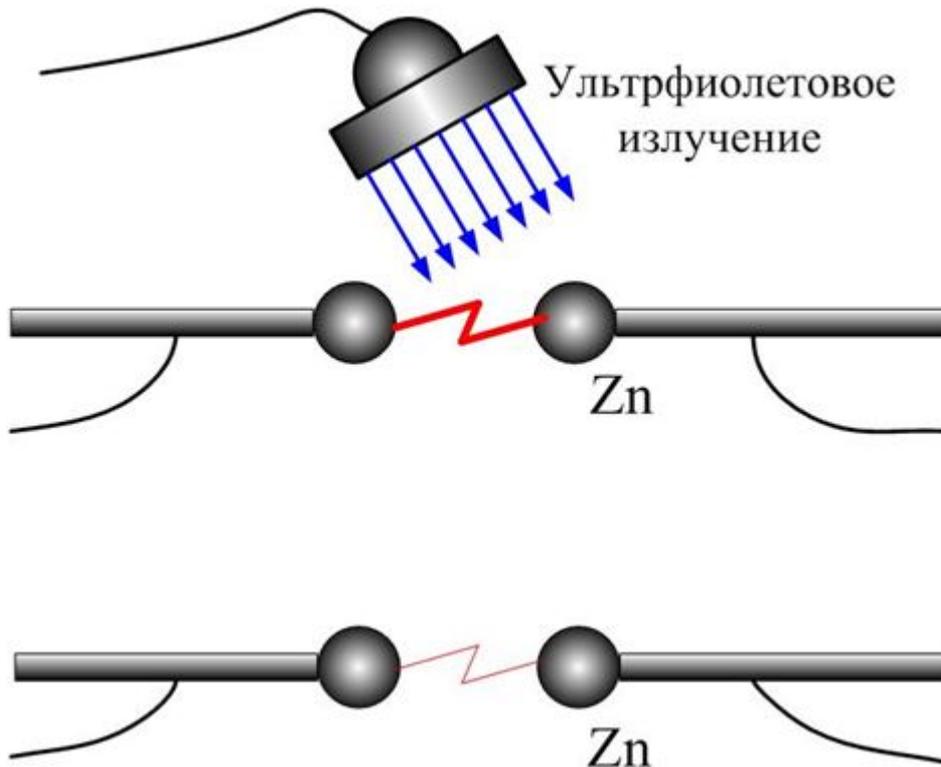
$$M_{e,\lambda}^0 = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (13.12)$$



Фотоэффект

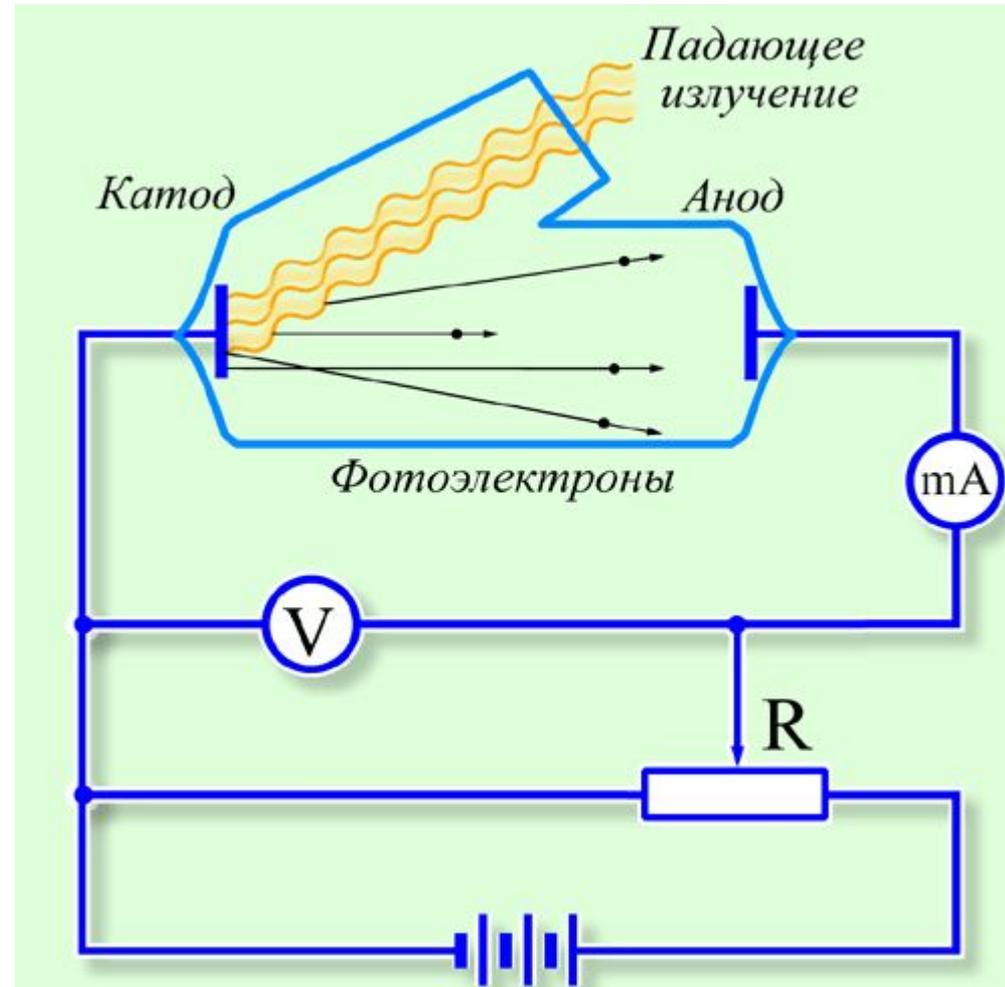
Фотоэффект – явление вырывания электронов под действием света (электромагнитного излучения).

Открыт **Генрихом Герцем** в 1887 г., который экспериментально установил, что ультрафиолетовое излучение усиливает электрический разряд между цинковыми электродами.



В 1888-90 гг. российский физик Александр Столетов исследовал фотоэффект более детально. Он, в частности, обнаружил, что под действием электромагнитного излучения вырываются отрицательно заряженные частицы и открыл первый закон фотоэффекта (закон Столетова).

Немецкий физик Филипп Ленард (1899-1902 г.г.) продолжил исследования этого явления, доказал, что вырываемыми отрицательно заряженными частицами при фотоэффекте являются электроны, а также открыл второй и третий законы фотоэффекта.

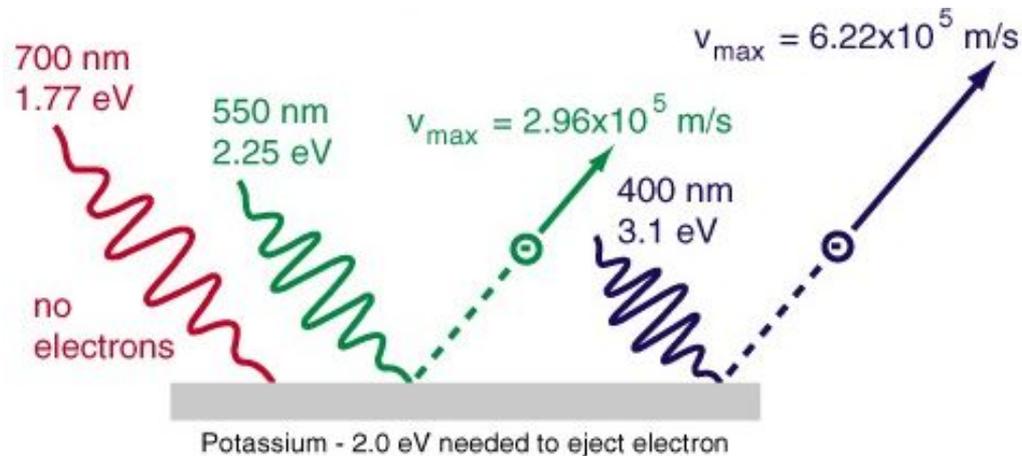


Законы фотоэффекта

Первый закон: при неизменной частоте излучения, падающего на поверхность вещества, число вырываемых электронов прямо пропорционально интенсивности излучения.

Второй закон: максимальная скорость вырванных с поверхности вещества электронов не зависит от интенсивности излучения, а определяется лишь его частотой.

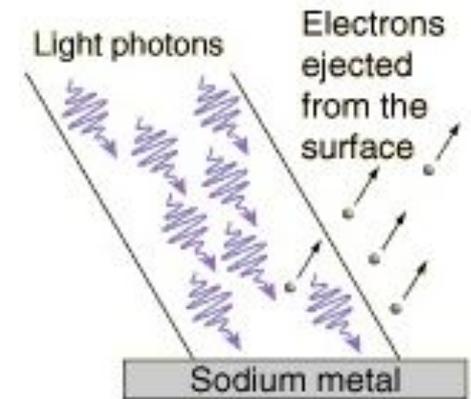
Третий закон: для каждого вещества существует минимальная частота (и, соответственно, максимальная длина волны) падающего электромагнитного излучения («красная» граница фотоэффекта), начиная с которой возможен фотоэффект.



В рамках классической физики второй и третий законы фотоэффекта объяснить не удастся.

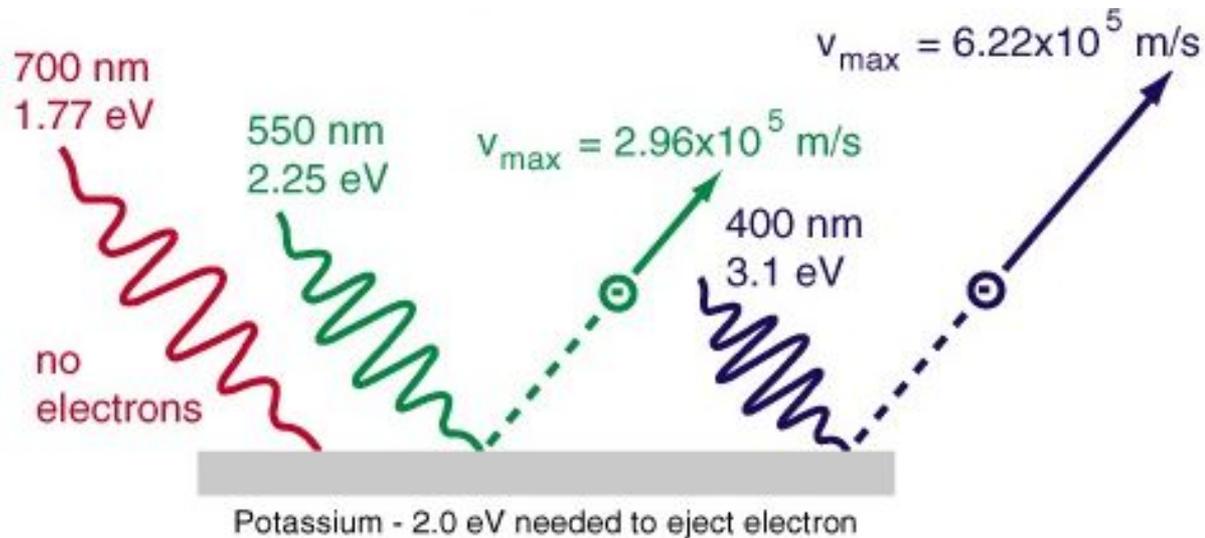
Немецкий физик Альберт Эйнштейн (1905 г.) объяснил второй и третий законы фотоэффекта, предположив, что свет – это поток фотонов. Энергия фотона:

$$\varepsilon = hf = \frac{hc}{\lambda} .$$

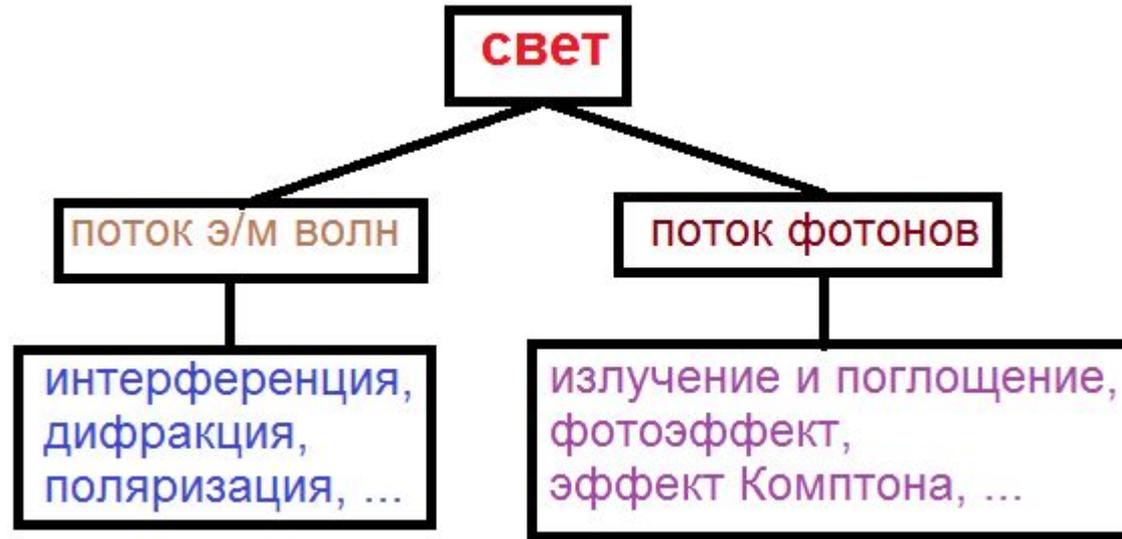


Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$hf = A + \frac{mv_{\max}^2}{2} . \quad (13.13)$$



Свет имеет двойственную корпускулярно-волновую природу: в одних явлениях свет ведет себя как поток электромагнитных волн, в других – как поток частиц (фотонов).



Двойственная природа света математически выражается с помощью соотношений, связывающих волновые свойства света (частоту и длину волны) и его корпускулярные свойства (энергию, импульс и массу):

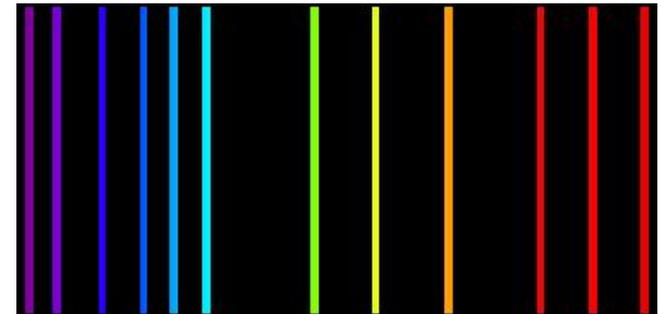
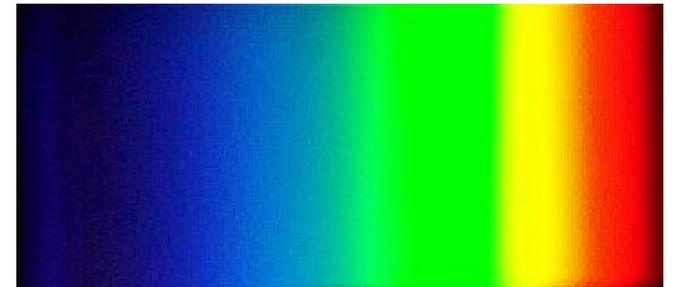
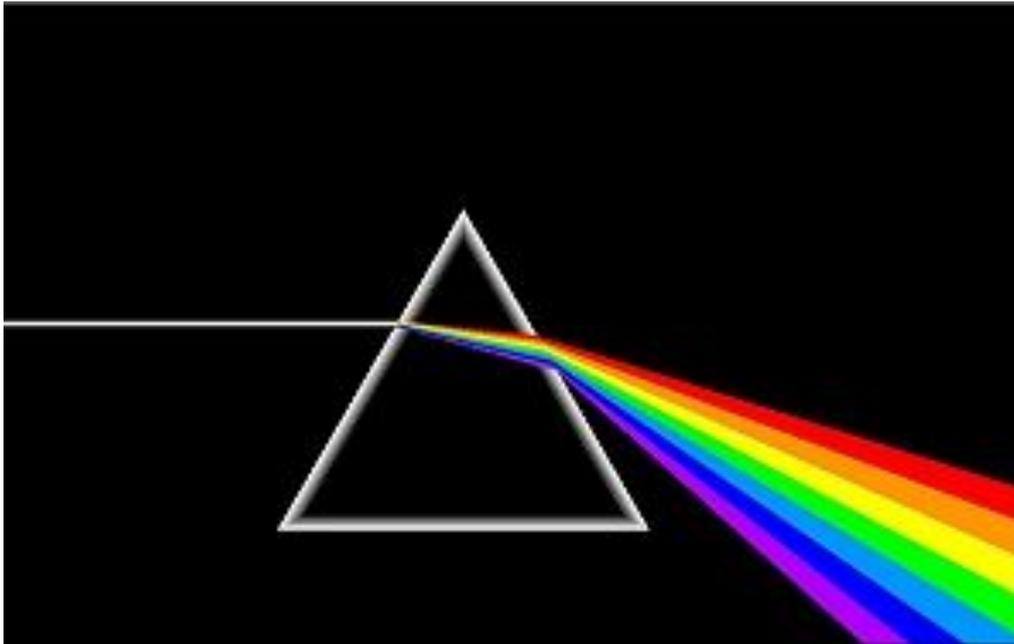
$$\varepsilon = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad m = \frac{hf}{c^2} = \frac{h}{c\lambda} \quad . \quad (13.14)$$

Наблюдение спектров

Спектр - это последовательность спектральных цветов, упорядоченная по возрастанию длины волны.

Дисперсия - зависимость показателя преломления вещества от длины волны света (частоты света). Явление дисперсии открыл чешский ученый Ян Марци (1648 г.).

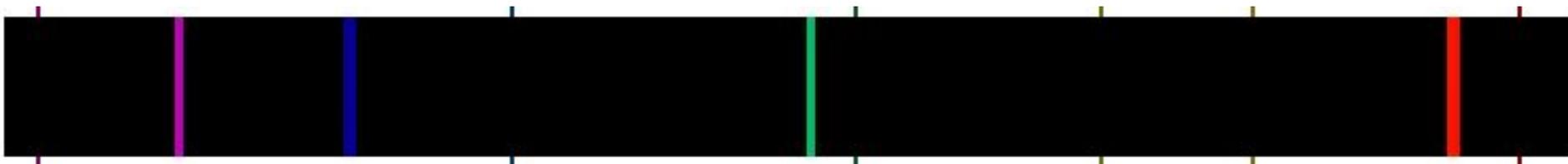
Благодаря дисперсии пучок белого света при прохождении через призму разлагается в спектр:



Спектр атома водорода

Еще в начале XIX века были открыты дискретные спектральные линии в излучении атома водорода в видимой области (так называемый линейчатый спектр).

Спектр атома водорода в видимой области



Впоследствии закономерности, которым подчиняются длины волн (или частоты) линейчатого спектра, были хорошо изучены количественно (швейцарский физик Иоган Бальмер, 1885 г.). Совокупность спектральных линий атома водорода в **видимой** части спектра была названа **серией Бальмера**.

Позже аналогичные серии спектральных линий были обнаружены в **ультрафиолетовой** области (**серия Лаймана**) и три серии в **инфракрасной** области спектра (**серии Брэкетта, Пашена и Пфунда**).

Формула Ридберга

В 1890 г. шведский физик Эрик Ридберг получил эмпирическую формулу, позволяющую рассчитать частоту спектральных линий атома водорода, принадлежащих различным сериям:

$$f = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (13.15)$$

где $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ – постоянная Ридберга; n_1 и n_2 – целые числа, n_1 – номер серии спектральных линий ($n_1 = 1$ – серия Лаймана, $n_1 = 2$ – серия Бальмера, $n_1 = 3$ – серия Брэкета, $n_1 = 4$ – серия Пашена); для каждой серии $n_2 = n_1 + 1$, $n_2 = n_1 + 2$, $n_2 = n_1 + 3$ и т.д.

Формула Ридберга была подтверждена экспериментально с очень высокой точностью. В то время, как с точки зрения классической физики спектр атома водорода должен быть сплошным и никаких серийных закономерностей в нем не должно быть.