

Лекция 26

5. Оптика

5.3. Квантовая оптика

Тепловое излучение, его характеристики. Абсолютно черное тело. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела. Законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Вина. Ультрафиолетовая катастрофа. Гипотеза и формула Планка. Фотоэффект. Виды и законы фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна. Корпускулярно-волновой дуализм. Энергия и импульс фотона. Световое давление. Опыт Лебедева.

Источники излучения света

Излучение – потеря источником света энергии. Способ пополнения:

- 1) Химические реакции – хемилюминисценция (гнилушки);
- 2) Внешнее облучение – фотолюминисценция (фосфор);
- 3) Электрическое поле – электролюминисценция (разряды в газах);
- 4) Нагревание (передача тепла) – **тепловое излучение**.

Тепловое излучение

Тепловым излучением называется испускание нагретыми телами электромагнитных волн за счет их внутренней энергии, т.е. за счет теплового движения атомов и молекул.

Особенности (свойства) теплового излучения

- 1) Присуще всем телам при температуре выше 0°K .
- 2) Имеет сплошной спектр частот, положение максимума которого, однако, зависит от температуры (степени нагретости тела).
- 3) При низких температурах испускаются длинные (инфракрасные) волны, вызванные колебаниями массивных (медленных) ионов.
- 4) При высоких температурах испускаются короткие (видимые и ультрафиолетовые) волны, вызванные колебаниями электронов.
- 5) Интенсивность возрастает с повышением температуры, поэтому единственный тип излучения, которое является **равновесным**.

Равновесное тепловое излучение

Излучение является равновесным, если тело в единицу времени поглощает энергии столько же, сколько и излучает. Температура тела при этом изменяться не будет (в замкнутой системе тел).

Поток излучения

Поток излучения – скалярная физическая величина, равная количеству энергии, излучаемой нагретым телом за единицу времени со всей его поверхности (мощность излучения тела).

$$\Phi_T = \frac{dW}{dt} = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{сек}} \right] = [\text{Вт}]$$

Энергетическая светимость тела

Энергетическая светимость – скалярная физическая величина, равная количеству энергии, излучаемой нагретым телом за единицу времени с единицы площади поверхности (во всем интервале частот или длин волн).

$$R_T = \frac{d\Phi_T}{dS} = \frac{dW}{dS dt} = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

Испускательная способность

Испускательная способность – скалярная физическая величина, равная количеству энергии, излучаемой нагретым телом за единицу времени с единицы площади его поверхности в интервале длин волн единичной ширины. Прежнее название:

спектральная плотность энергетической светимости.

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_T}{d\lambda} = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \right] \qquad R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda$$

Абсолютно черное тело (Кирхгоф, 1862)

Поток излученной энергии Φ_T , падая на любое тело, делится на три части: Φ_τ пропускается телом, Φ_α поглощается, Φ_ρ отражается.

$$\Phi_T = \Phi_\tau + \Phi_\alpha + \Phi_\rho \quad \longrightarrow \quad 1 = \frac{\Phi_\tau}{\Phi_T} + \frac{\Phi_\alpha}{\Phi_T} + \frac{\Phi_\rho}{\Phi_T}$$

Обозначим соответственно τ, α и ρ – коэффициенты пропускания, поглощения и отражения.

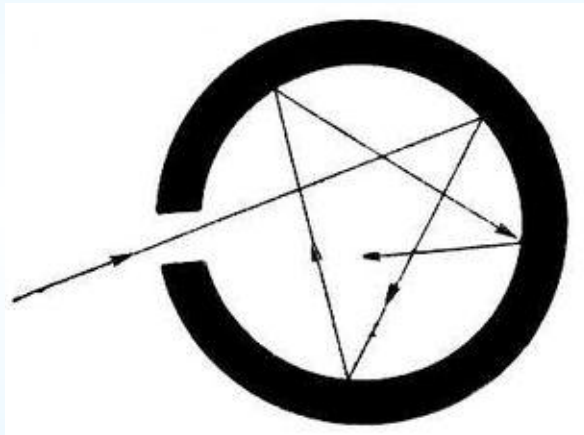
$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi_T} \quad \alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi_T} \quad \rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi_T} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\tau + \alpha + \rho = 1}$$

Для непрозрачных тел $\tau = 0 \rightarrow \alpha + \rho = 1$

Если тело не отражает $\rho = 0 \rightarrow \alpha = 1$

Тело, которое поглощает все падающие лучи (для всех длин волн) и ничего не отражает, называется абсолютно черным. $\alpha^* = 1$

Сажа 99%, черный бархат, замкнутая полость с отверстием.



Тело, полностью отражающее упавшее на него излучение всех длин волн, называется абсолютно белым.

Тело, для которого поглощательная способность одинакова для всех длин волн и зависит только от температуры, называется серым.

$$\alpha_{\lambda, T}$$

Поглощательная способность тела

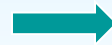
Поглощательная способность (коэффициент поглощения) – **безразмерная** физическая величина, показывающая, какая доля энергии, падающая в единицу времени на единицу поверхности тела в интервале длин волн единичной ширины, им поглощается.

Закон Кирхгофа (1859)

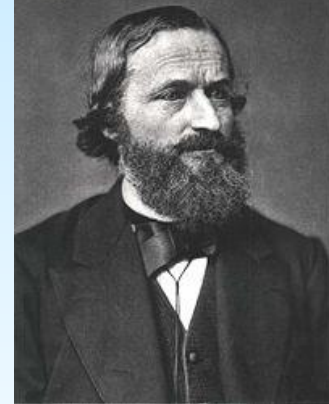
Отношение испускательной способности любого тела к его поглотительной способности при данной длине волны и температуре не зависит от природы тела и является величиной постоянной для всех тел.

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = C_{\lambda,T}$$

$$\frac{r_{\lambda,T}^*}{\cancel{\alpha_{\lambda,T}^*}} = C_{\lambda,T}$$



$$C_{\lambda,T} = r_{\lambda,T}^*$$



Густав Роберт
Кирхгоф
1824-1887

$C_{\lambda,T}$ – универсальная функция Кирхгофа, которая оказалась испускательной способностью абсолютно черного тела при той же температуре и длине волны.

Из закона Кирхгофа следует, что чем больше тело поглощает, тем больше оно и излучает энергии (той же длины волны).

Кроме того, если тело не поглощает излучение какой-либо длины волны (частоты), то оно его и не излучает.

Пример: если раскаленную белую чашку с черным рисунком быстро достать из печи в светлой комнате, то сначала темный рисунок будет светиться ярче белого фона – увидите белый рисунок на черном фоне.

Из закона Кирхгофа видно, что основной задачей при описании теплового излучения является нахождение зависимости испускательной способности абсолютно черного тела от температуры и длины волны, так как она универсальна для всех тел.

Интерес представляла и зависимость энергетической светимости абсолютно черного тела от температуры.

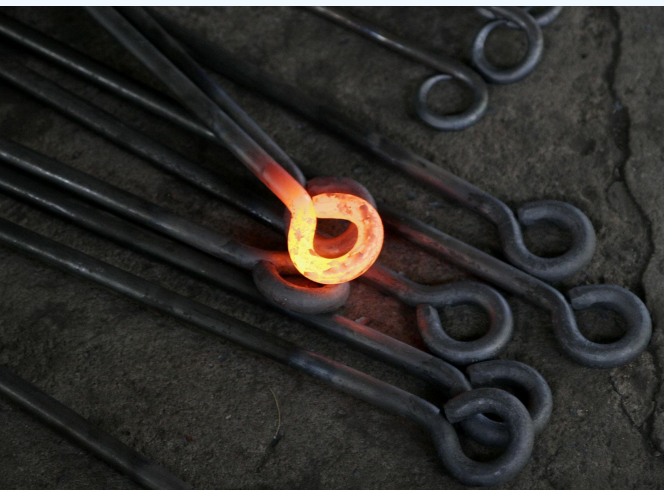
Закон Стефана–Больцмана (1879–1884)

Энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры.

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная

Стефана-Больцмана (найденная экспериментально).

$$R_T^* = \sigma T^4$$



Если тело не абсолютно черное, то вводится некоторый коэффициент:

$$R_T = a\sigma T^4 \quad a < 1$$



Йозеф
Стефан
1835-1893



Людвиг
Больцман
1844-1906

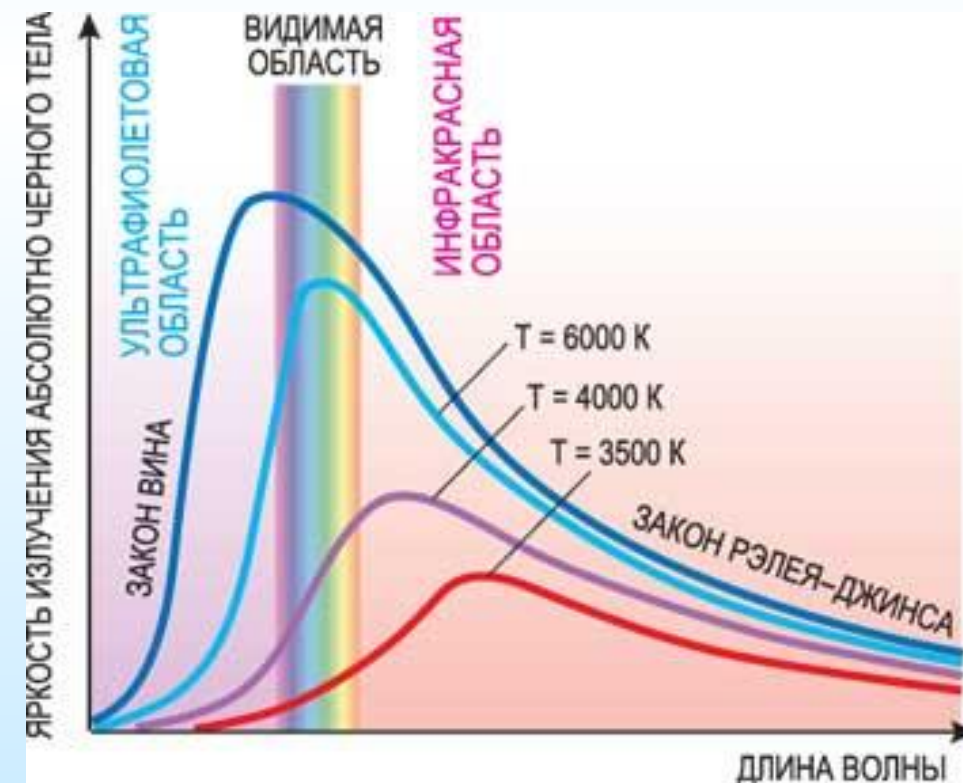
Закон смещения Вина (1893)

Длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре этого тела.

$b = 28,96 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

$$\lambda_{\max}^* = \frac{b}{T}$$

Объясняет, почему свечение тела переходит от красного к белому (голубому) с ростом температуры.



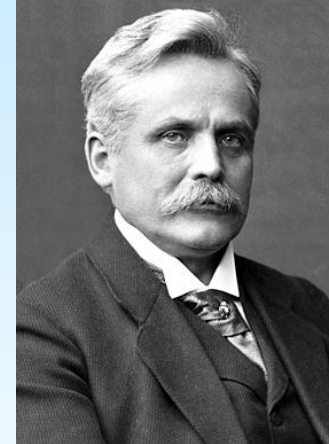
$$\left(r_{\lambda,T}^*\right)_{\max} = BT^5$$

$$B = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$$

– постоянная Вина.

Второй закон Вина (1896)

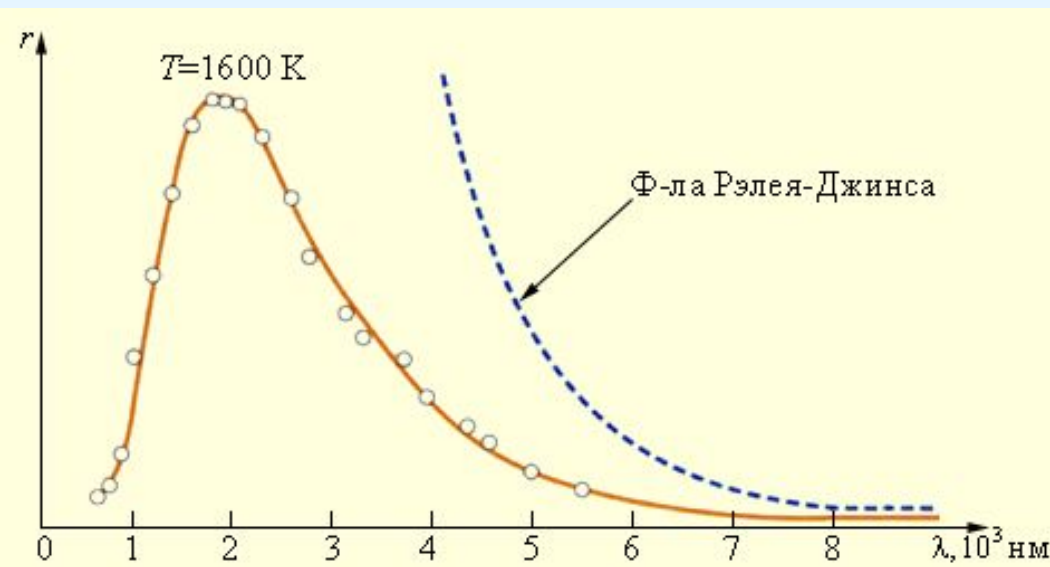
Максимальное значение излучательной способности абсолютно черного тела, пропорционально пятой степени абсолютной температуры тела.



Вильгельм
Карл Вернер
Отто Фриц
Франц
Вин
1864-1928
Ноб. лаур.
1911

Формула Рэля–Джинса (1900)

Попытка описать излучение абсолютно чёрного тела исходя из классических принципов термодинамики и электродинамики приводит к закону Рэля – Джинса:



$$r_{\nu,T}^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

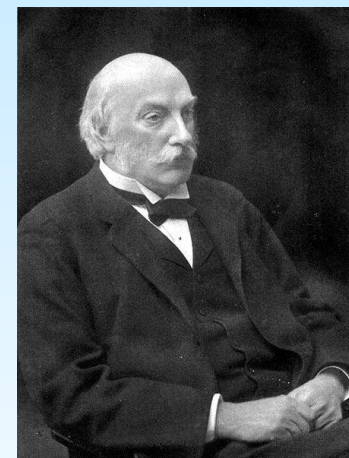
$$r_{\nu,T}^* = r_{\lambda,T}^* \frac{\lambda^2}{c}$$

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT$$

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda = \infty$$

Ультрафиолетовая катастрофа

На практике такой закон означал бы невозможность термодинамического равновесия между веществом и излучением, поскольку согласно ему вся тепловая энергия должна была бы перейти в энергию излучения коротковолновой области спектра.



Джон Уильям
Стретт
лорд Рэлей
1842–1919

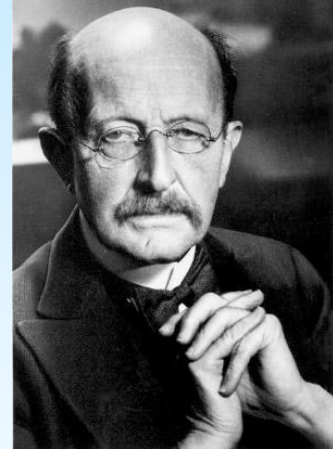


Джеймс
Хопвуд Джинс
1877–1946

Гипотеза и формула Планка (1900)

Планк отказался от одного из основных положений классической физики, согласно которому энергия любой системы может изменяться непрерывно, т.е. принимать любые, сколь угодно близкие значения.

Гипотеза Планка: атомы тела излучают энергию не непрерывно в виде волн, а отдельными порциями – **квантами** с энергией, пропорциональной частоте света. Поэтому энергия световых волн может принимать значения только кратные энергии одного кванта.



Макс Карл
Эрнст Людвиг
Планк
1858-1947
Ноб. лаур.
1918

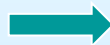
$$\varepsilon = h\nu$$

$$E = m(h\nu)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

$h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·сек – постоянная Планка.

$$r_{\nu,T}^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$



$$r_{\nu,T}^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \left(\frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \right)$$

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \left(\frac{h}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \right)$$

Формула
Рэлея – Джинса

Формула
Планка

Формула Планка (1900)

Формула Планка – полное решение основной задачи теплового излучения, поставленной Кирхгофом, она блестяще согласуется со всеми экспериментальными данными по распределению энергии в спектре абсолютно черного тела во всем интервале частот (длин волн) и температур.

Из нее можно получить все законы теплового излучения:

1) Закон Стефана-Больцмана:

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \left(\frac{h}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \right) \quad \longrightarrow \quad R_T^* = \int_0^\infty r_{\lambda,T}^* d\lambda = \left(\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \right) T^4 = \sigma T^4$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана.

2) Закон Рэлея-Джинса:

В случае $h\nu \ll kT$, т.е. в области малых частот (больших длин волн):

$$e^{h\nu/kT} - 1 \approx 1 + h\nu/kT - 1 = h\nu/kT$$

$$r_{\nu,T}^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \left(\frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \right) \quad \longrightarrow \quad r_{\nu,T}^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

3) Закон смещения Вина

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \left(\frac{h}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \right) \quad \frac{\partial r_{\lambda,T}^*}{\partial \lambda} = 0 \quad \longrightarrow \quad \lambda_{max}^* = \left(\frac{hc}{4.965k} \right) \frac{1}{T} = \frac{b}{T}$$

$b = 28,96 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

4) Второй закон Вина

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \left(\frac{h}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \right) \quad \lambda_{max}^* = \frac{b}{T} \quad \longrightarrow \quad (r_{\lambda,T}^*)_{max} = BT^5$$

$B = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$ – постоянная Вина.

Теоретический вывод этой формулы Макс Планк изложил 14 декабря 1900 г. на заседании немецкого физического общества. Этот день ознаменовал рождение квантовой физики.

Фотоэффект (Герц, 1887)

Фотоэффектом (внешним) называется явление испускания электронов веществом (металлами) под действием света.

Внутренний фотоэффект – явление увеличения электропроводности полупроводников и диэлектриков под действием света.

Опыты Столетова (1888–1890)

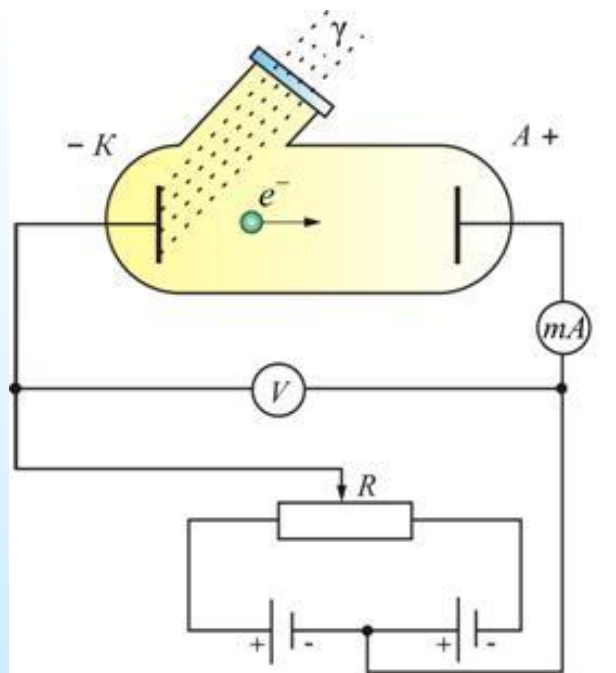
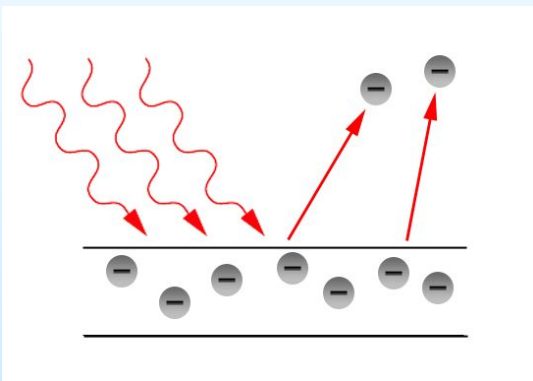
Вещество теряет только отрицательные заряды.

Более эффективное действие оказывает ультрафиолет.

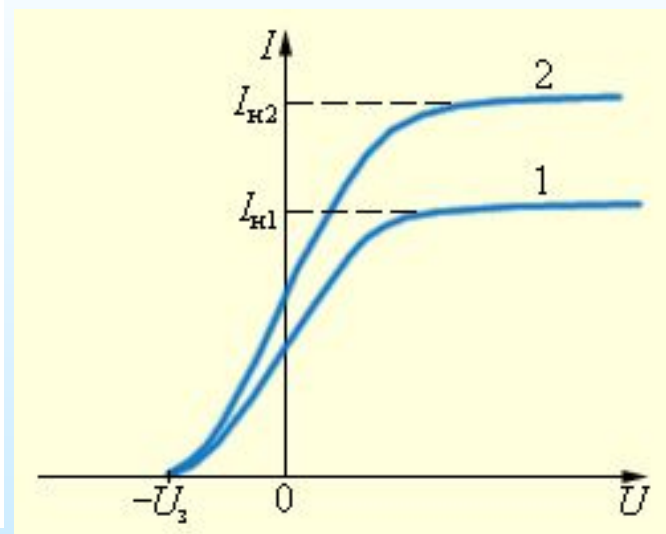


Алекса́ндр
Григо́рьевич
Столе́тов
1839-1896

$$\frac{m_e v_{max}^2}{2} = eU_3$$



Вольт-амперная
характеристика

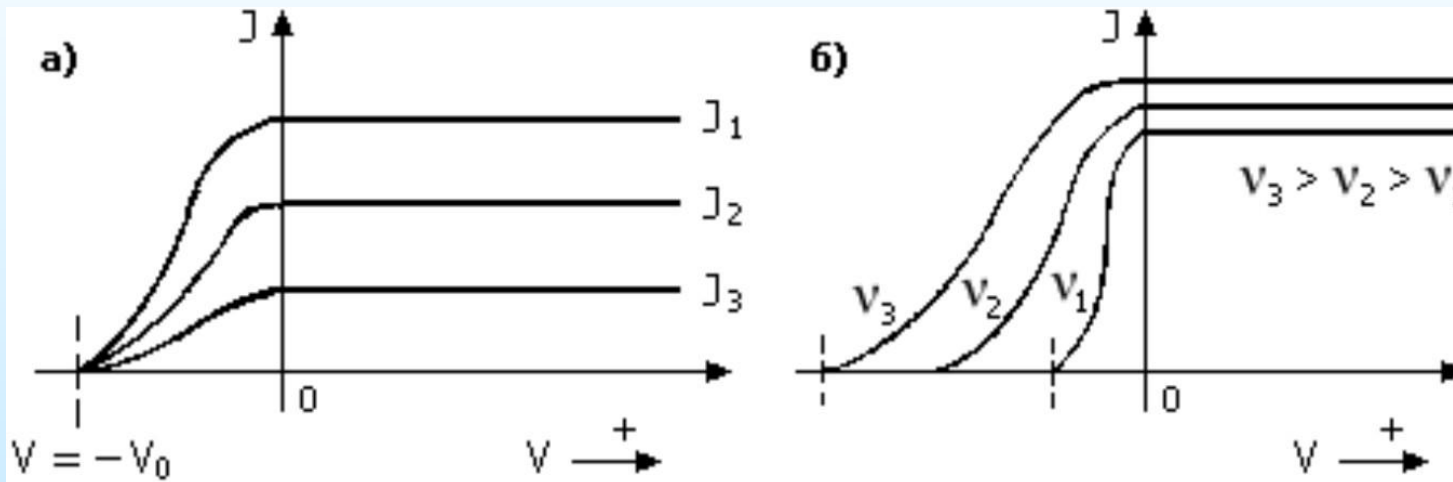


Законы фотоэффекта

1) При фиксированной частоте падающего света ($\nu = \text{const}$) число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, прямо пропорционально интенсивности света (световому потоку) – **закон Столетова.**

2) Максимальная кинетическая энергия вырванных светом электронов (их максимальная начальная скорость) не зависит от интенсивности падающего света (светового потока), а определяется только его частотой.

3) Для каждого вещества существует характерная для него такая минимальная частота света – максимальная длина волны (красная граница фотоэффекта), ниже которой фотоэффект не наступает. Зависит от природы металла и состояния его поверхности.

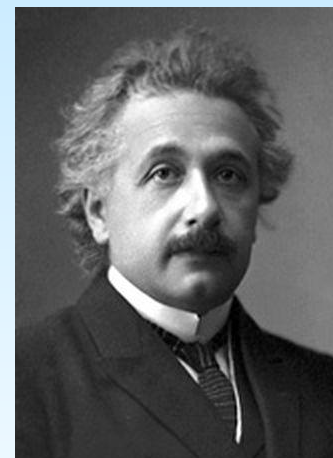


Красная
граница
фотоэффекта

$$\nu_{кр} = \nu_{min}$$

Уравнение Эйнштейна (1905)

- 1) Свет не только излучается, но и поглощается веществом в виде отдельных порций (квантов энергии).
- 2) Кванты передают всю свою энергию электронам, причем каждый квант поглощается только одним электроном.
- 3) Передача энергии при столкновении происходит почти мгновенно, поэтому фотоэффект безинерционен.
- 4) Энергия кванта затрачивается на работу выхода электрона из металла (преодоление притяжения ионов) и кинетическую энергию вылетающего электрона.



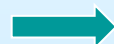
Альберт
Эйнштейн
1879-1955
Ноб. лаур.
1921

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$$

$$U_3 = \frac{h\nu - A_{\text{вых}}}{e}$$

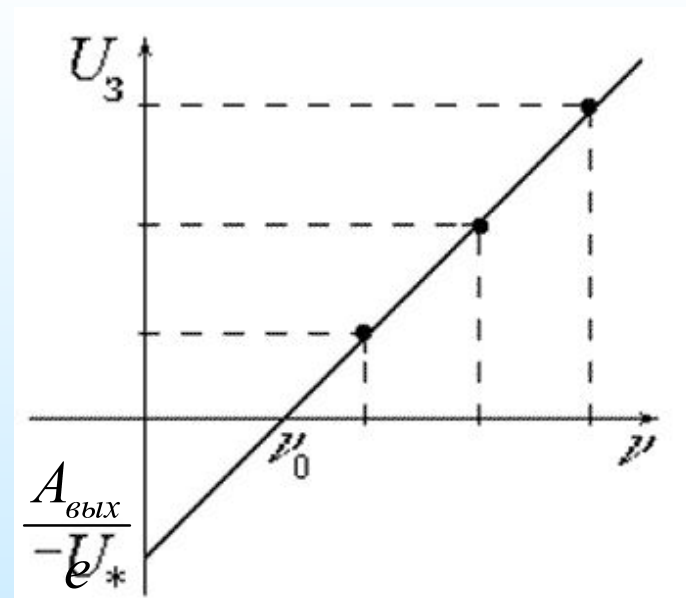
Красная граница фотоэффекта

$$h\nu_{\text{min}} = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} \rightarrow 0$$



$$\nu_{\text{min}} = A_{\text{вых}} / h$$

$$\lambda_{\text{max}} = hc / A_{\text{вых}}$$

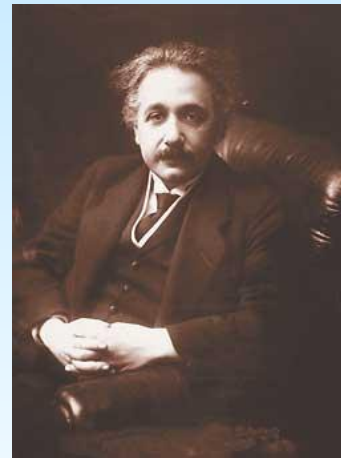


Корпускулярно-волновой дуализм света

1) Свет излучается порциями (квантами) – тепловое излучение (Планк).

2) Свет поглощается порциями (квантами) – фотоэффект (Эйнштейн).

3) Свет распространяется порциями (квантами) – Эйнштейн.



Альберт
Эйнштейн
1879-1955
Ноб. лаур.
1921

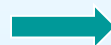
Фотоны

Свет представляет собой поток отдельных частиц – фотонов. Главная особенность – фотон, попадая в атом, отдает свою энергию полностью, что несовместимо с понятием волны.

Частица должна иметь энергию, массу и импульс.

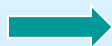
$$E_{\phi} = h\nu$$

$$E_{\phi} = m_{\phi} c^2$$



$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \infty$$



$$m_0 = 0$$

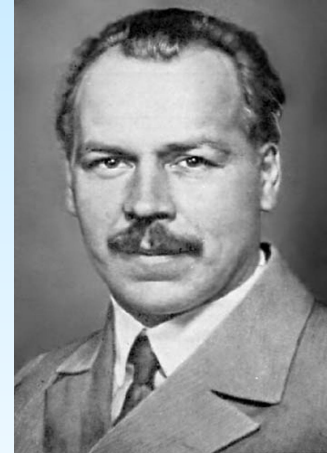
$$p_{\phi} = m_{\phi} c = \frac{h\nu}{c^2} c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Опыт Вавилова

Наблюдал флуктуации световых потоков. Глаз очень чувствителен к числу фотонов, начинает реагировать на свет начиная с ~ 200 фотонов/сек. Вспышки света длительностью 0,1 сек.

Опыт Иоффе (1911-1913)

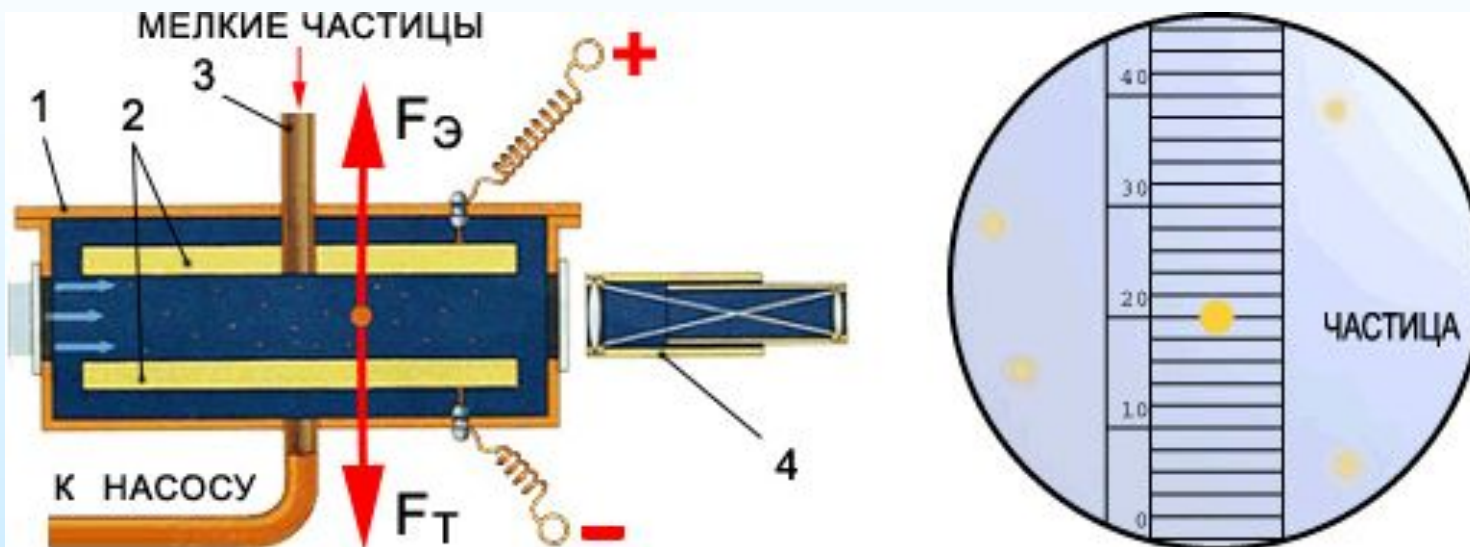
В конденсаторе подвешена висмутовая пылинка так, что сила тяжести уравновешивается электрической. При освещении рентгеновскими лучами время от времени пылинка теряла равновесие, когда квант света вырывал электрон. Определил заряд электрона.



Вавилов
Николай
Иванович
1887–1943



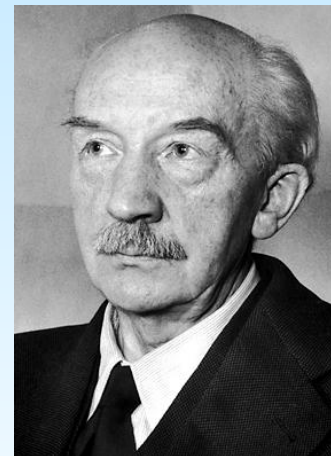
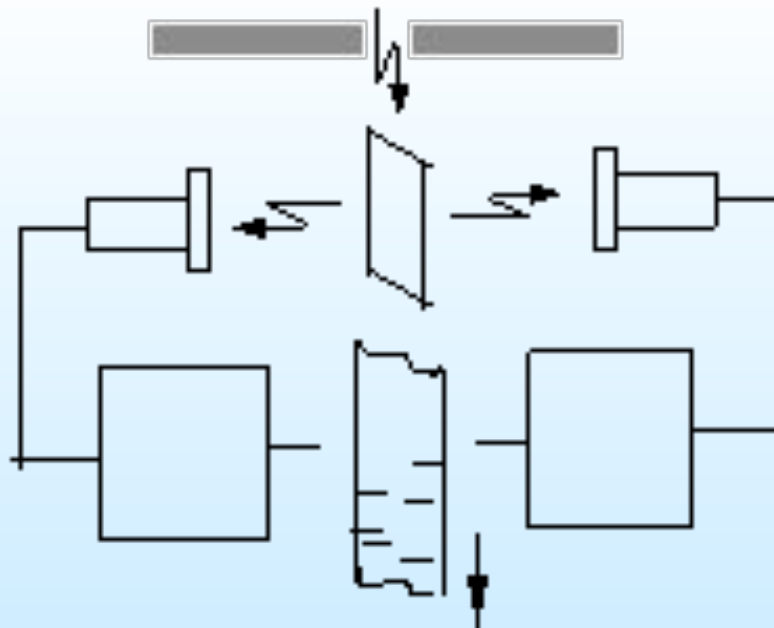
Иоффе
Абрам
Фёдорович
1880-1960



Опыт Боте (1925)

Тонкая фольга облучалась слабым рентгеновским излучением, в результате чего она сама становилась излучателем рентгеновских лучей (рентгеновская флюоресценция). Два независимых счетчика Гейгера фиксировали фотоны (кванты рентгеновского излучения), в момент поглощения фотона на самописце ставилась метка. Если бы излучаемая энергия (волна) равномерно распространялась в обе стороны, то счетчики срабатывали бы одновременно, однако метки не совпадали во времени.

Это соответствует частицам, летящим произвольно в определенном направлении - к тому или иному счетчику.



Вальтер
Вильгельм
Георг
Боте
1891-1957
Ноб. лаур.
1954

Давление света

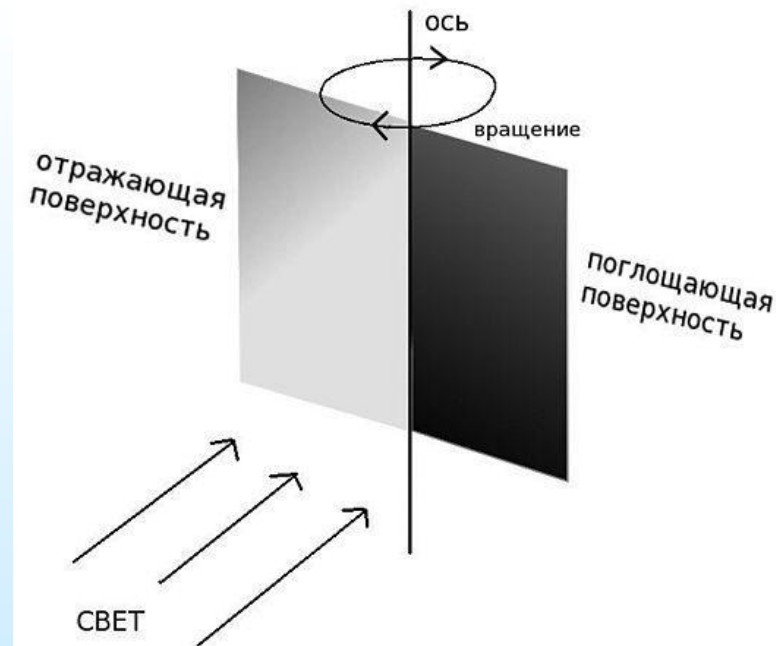
Свет должен оказывать давление, равное импульсу, сообщаемому фотонами единице площади поверхности тела в единицу времени.

$$P = \frac{\Delta p}{\Delta t \Delta S} = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t \Delta S}$$

Пусть в единицу времени на единицу площади поверхности падает N фотонов. При коэффициенте отражения ρ света от поверхности ρN фотонов отразится, а $(1-\rho)N$ фотонов – поглотится.



Пётр
Никола́евич
Лебе́дев
1866-1912



$$p_{\phi \text{ погл}} = \frac{h\nu}{c} \quad p_{\phi \text{ отр}} = 2 \frac{h\nu}{c}$$

$$P = 2\rho N \frac{h\nu}{c} + (1-\rho)N \frac{h\nu}{c} = (1+\rho) \frac{N h\nu}{c}$$

$$P = (1+\rho) \frac{\Phi}{c}$$

Опыт Лебедева (1899)

Солнечный свет – $4 \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}^2$.

Давление солнечного света

Впервые гипотеза о существовании светового давления была высказана И. Кеплером в XVII веке для объяснения поведения хвостов комет при пролете их вблизи Солнца.



Иоганн
Кеплер
1571-1630

