

# Квантовая физика

## Лекция 16

# *Тепловое излучение тел*

- Испускаемый источником свет уносит с собой энергию. Существует много различных механизмов подвода энергии к источнику света. В тех случаях, когда необходимая энергия сообщается нагреванием, т. е. подводом тепла, излучение называется **тепловым** или **температурным**.
- В состоянии равновесия процессы испускания и поглощения энергии каждым телом в среднем компенсируют друг друга, и в пространстве между телами плотность энергии излучения достигает определенного значения, зависящего только от установившейся температуры тел. Это излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с телами, имеющими определенную температуру, называется **равновесным** или **черным излучением**.

- Распределение энергии по длинам волн в излучении абсолютно черного тела при заданной температуре  $T$  характеризуется **излучательной способностью**  $r(\lambda, T)$ , равной мощности излучения с единицы поверхности тела в единичном интервале длин волн. Произведение  $r(\lambda, T)\Delta\lambda$  равно мощности излучения, испускаемого единичной площадкой поверхности по всем направлениям в интервале  $\Delta\lambda$  длин волн. Аналогично можно ввести распределение энергии по частотам  $r(\nu, T)$ . Функцию  $r(\lambda, T)$  (или  $r(\nu, T)$ ) часто называют спектральной светимостью, а полный поток  $R(T)$  излучения всех длин волн, равный

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\lambda, T)d\lambda = \int_0^{\infty} r(\nu, T)d\nu,$$

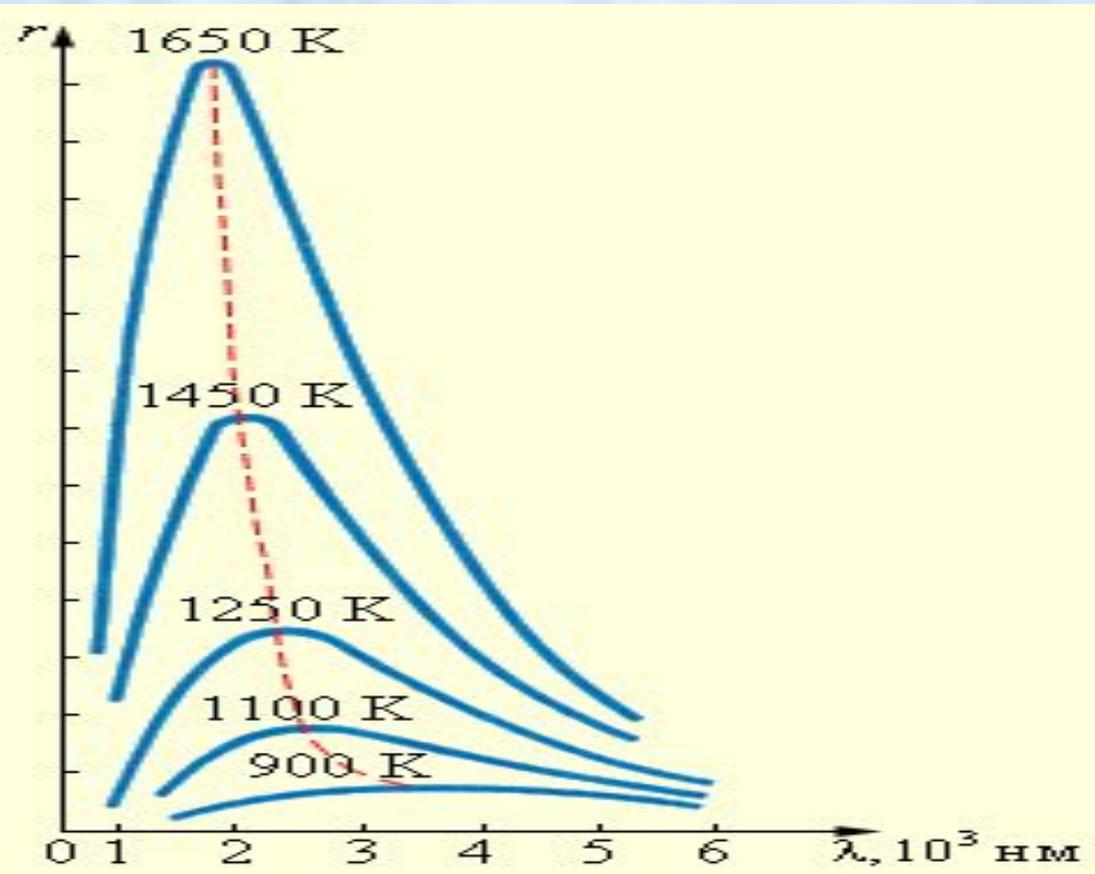
называют **интегральной светимостью** тела.

- В 1879 году Йозеф Стефан на основе анализа экспериментальных данных пришел к заключению, что **интегральная светимость  $R(T)$  абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры  $T$ :**

$$R(T) = \sigma T^4.$$

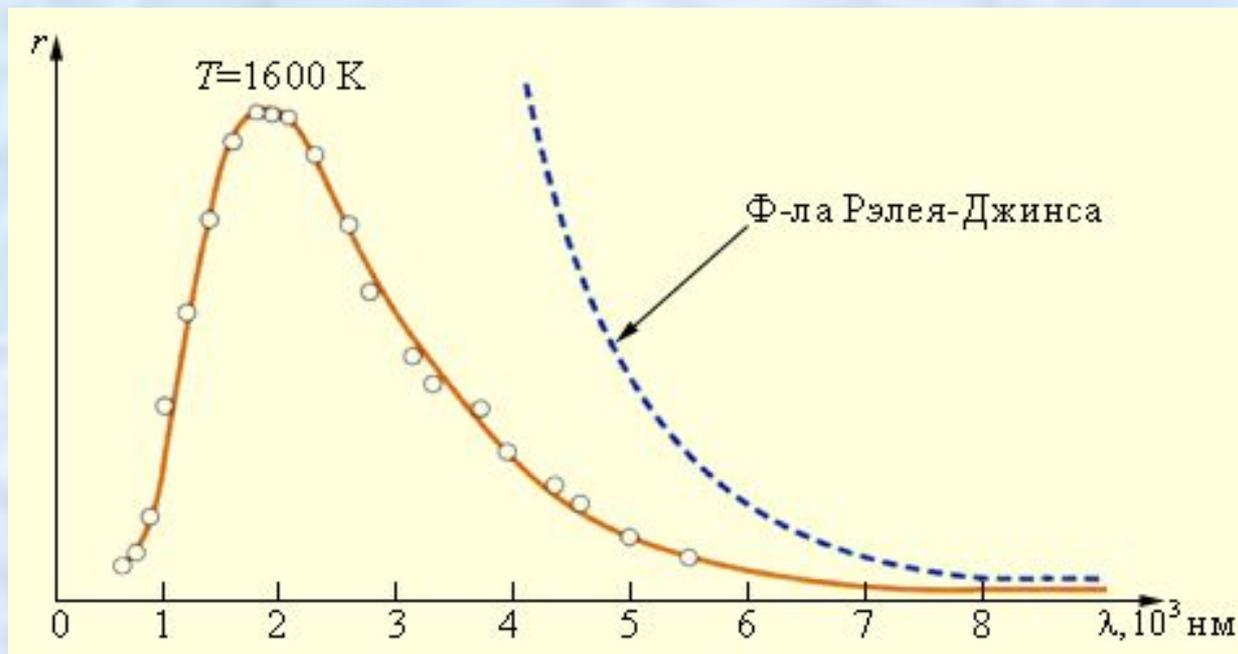
- Этот закон получил название **закона Стефана–Больцмана**. Числовое значение постоянной  $\sigma$ , по современным измерениям, составляет

$$\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К}^4).$$



- Спектральное распределение  $r(\lambda, T)$  излучения черного тела при различных температурах

- С увеличением температуры максимум смещается в область коротких длин волн, причем произведение температуры  $T$  на длину волны  $\lambda_m$ , соответствующую максимуму, остается постоянным:  
 $\lambda_m T = b$  или  $\lambda_m = b / T$ .
- Это соотношение ранее было получено Вином из термодинамики. Оно выражает так называемый **закон смещения Вина**: длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре  $T$ . Значение постоянной Вина  
 $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ .



- зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны  $\lambda$  и температуры  $T$ :  
 $r(\lambda, T) = 8\pi k T \lambda^{-4}$ . Это соотношение называют **формулой Рэлея–Джинса**. Она согласуется с экспериментальными данными только в области достаточно длинных волн.

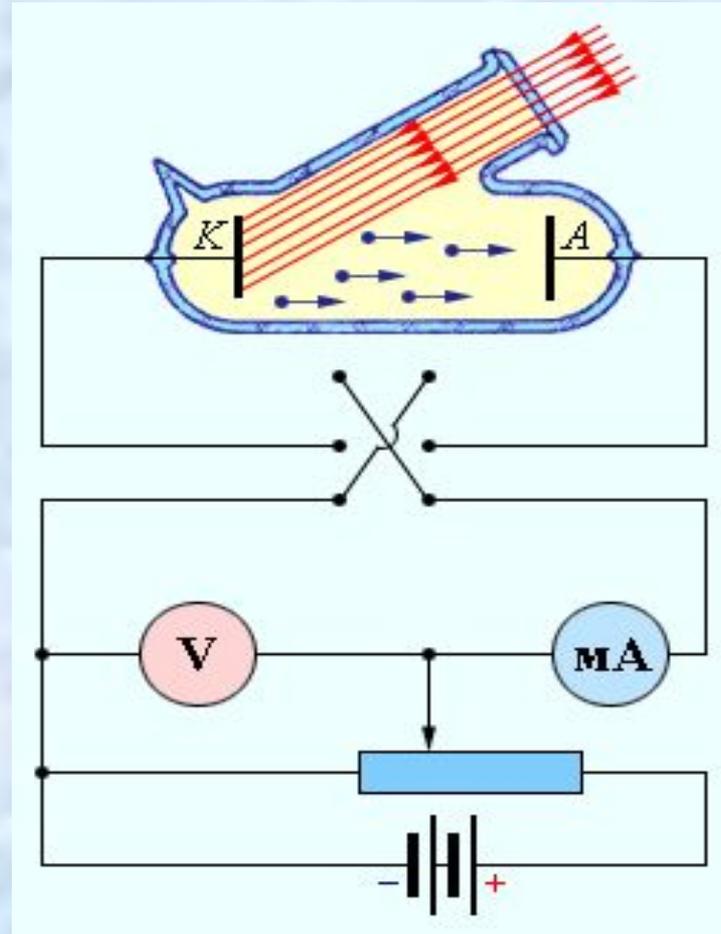
- Процессы излучения и поглощения нагретым телом электромагнитной энергии, происходят не непрерывно, как это принимала классическая физика, а конечными порциями – **квантами**. Квант – это минимальная порция энергии, излучаемой или поглощаемой телом. По теории Планка, энергия кванта  $E$  прямо пропорциональна частоте света:

$E = h\nu$ , где  $h$  – так называемая **постоянная Планка**, равная  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

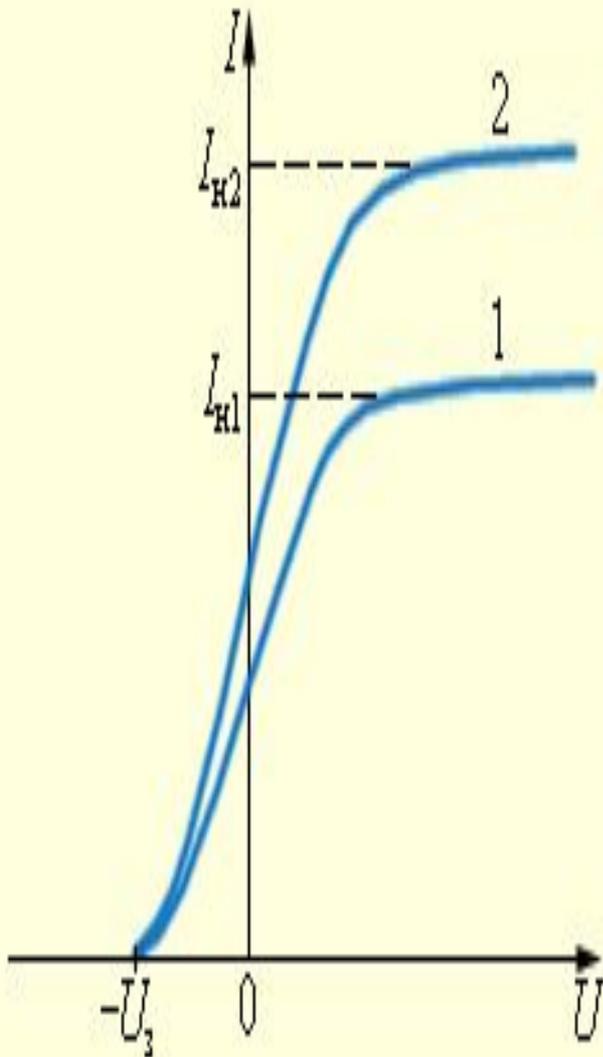
Постоянная Планка – это универсальная константа, которая в квантовой физике играет ту же роль, что и скорость света в СТО.

# Фотоэффект. Фотоны

- **Фотоэлектрический эффект** был открыт в 1887 году немецким физиком Г. Герцем и в 1888–1890 годах экспериментально исследован А. Г. Столетовым. Наиболее полное исследование явления фотоэффекта было выполнено Ф. Леонардом в 1900 г. К этому времени уже был открыт электрон ([Д. Томсон, 1897 г.](#)), и стало ясно, что фотоэффект (или точнее – внешний фотоэффект) состоит в вырывании электронов из вещества под действием падающего на него света.



- Схема экспериментальной установки для изучения фотоэффекта.

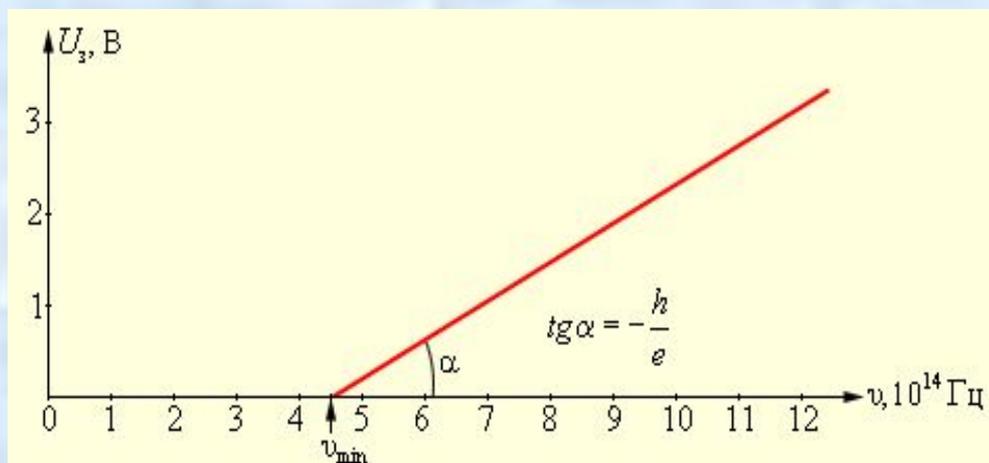


- Зависимость силы фототока от приложенного напряжения. Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока.  $I_{н1}$  и  $I_{н2}$  – токи насыщения,  $U_3$  – запирающий потенциал

- Если напряжение на аноде меньше, чем  $-U_3$ , фототок прекращается. Измеряя  $U_3$ , можно определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$\left( \frac{mv^2}{2} \right)_{\max} = eU_3.$$

- Тщательные измерения показали, что запирающий потенциал линейно возрастает с увеличением частоты  $\nu$  света.



Многочисленными экспериментаторами были установлены следующие основные закономерности фотоэффекта:

- Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты света  $\nu$  и не зависит от его интенсивности.
- Для каждого вещества существует так называемая **красная граница фотоэффекта**, т. е. наименьшая частота  $\nu_{\min}$ , при которой еще возможен внешний фотоэффект.
- Число фотоэлектронов, вырываемых светом из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света.
- Фотоэффект практически безынерционен, фототок возникает мгновенно после начала освещения катода при условии, что частота света  $\nu > \nu_{\min}$ .

- **Свет имеет прерывистую дискретную структуру. Электромагнитная волна состоит из отдельных порций – квантов, впоследствии названных фотонами.** При взаимодействии с веществом фотон целиком передает всю свою энергию  $h\nu$  одному электрону. Часть этой энергии электрон может рассеять при столкновениях с атомами вещества. Кроме того, часть энергии электрона затрачивается на преодоление потенциального барьера на границе металл–вакуум. Для этого электрон должен совершить работу выхода  $A$ , зависящую от свойств материала катода. Наибольшая кинетическая энергия, которую может иметь вылетевший из катода фотоэлектрон, определяется законом сохранения энергии:

$$\left( \frac{mv^2}{2} \right)_{\max} = eU_3 = h\nu - A.$$

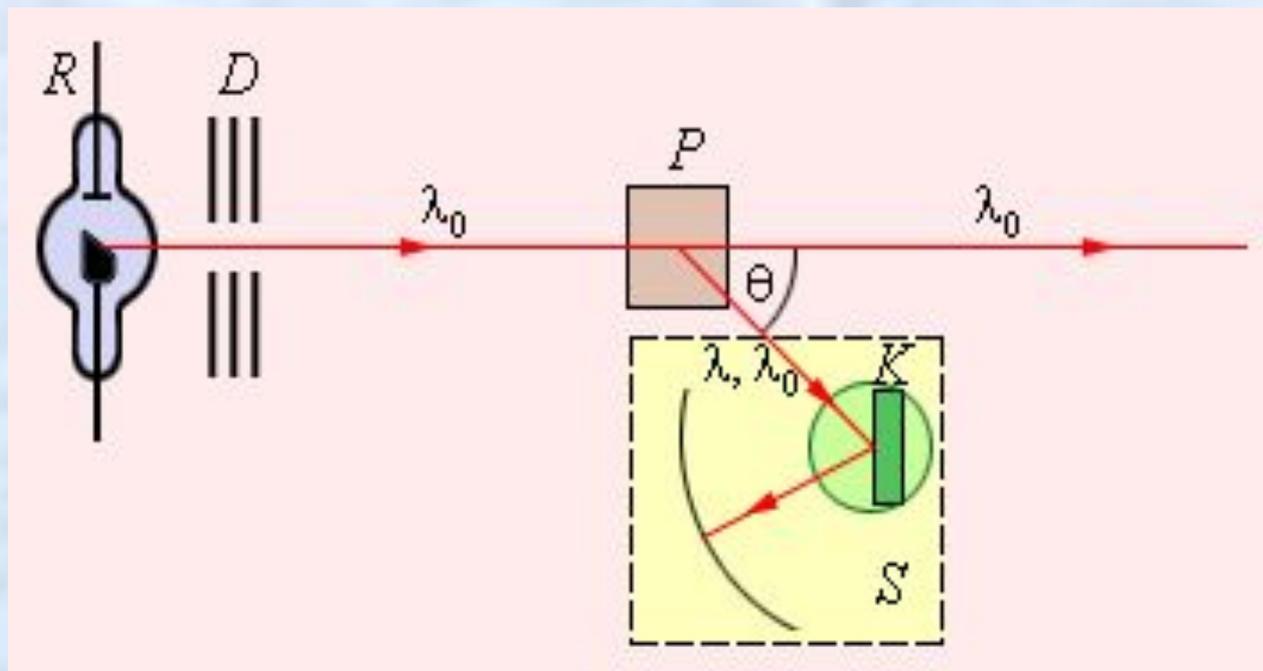
Эту формулу принято называть **уравнением Эйнштейна для фотоэффекта**.

- Фотон движется в вакууме со скоростью  $c$ . Фотон не имеет массы,  $m = 0$ . Из общего соотношения специальной теории относительности, связывающего энергию, импульс и массу любой частицы,
- $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$ , следует, что фотон обладает импульсом

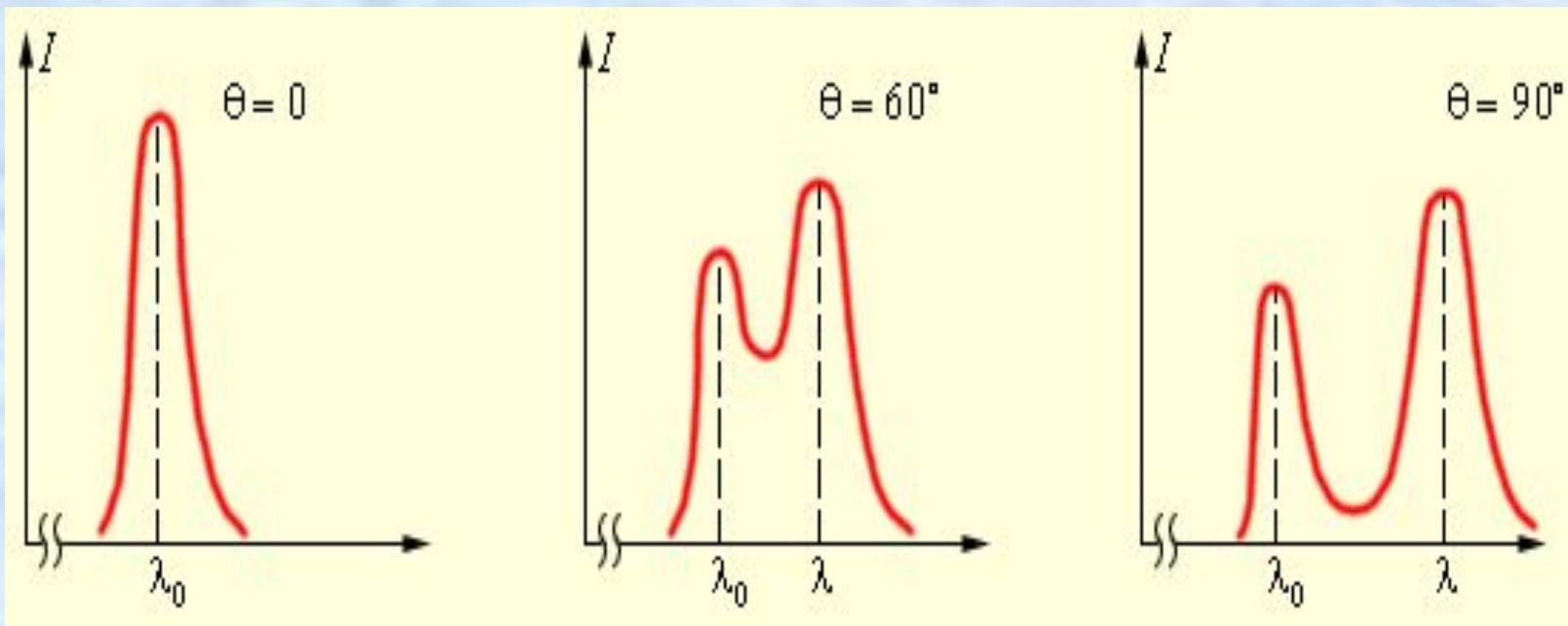
$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}.$$

# Эффект Комптона

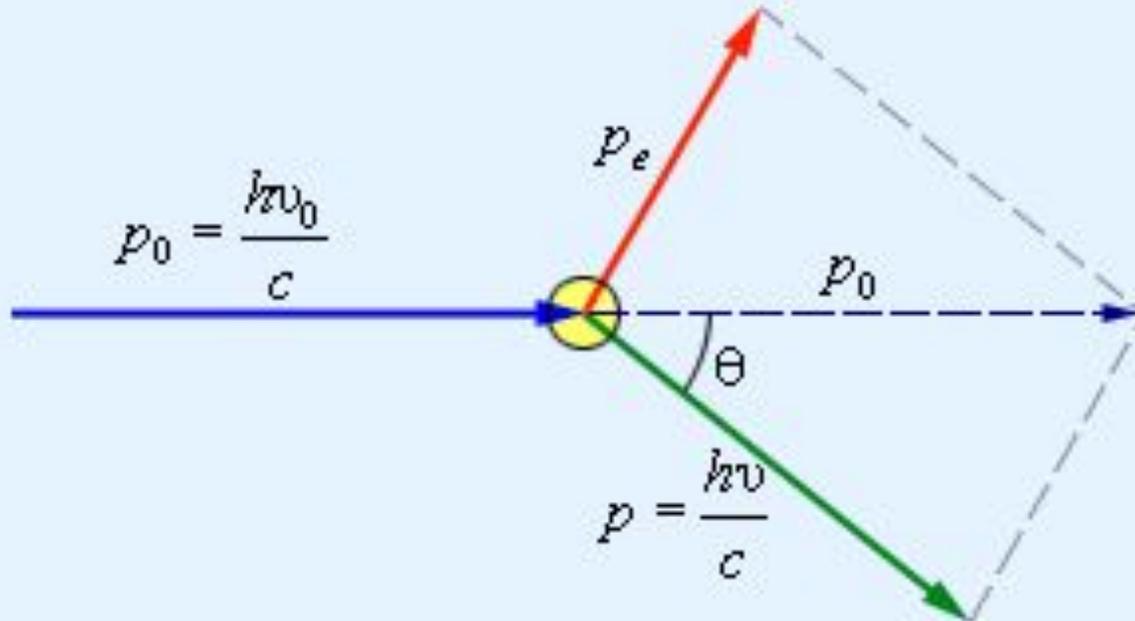
- Комптон исследовал упругое рассеяние коротковолнового рентгеновского излучения на свободных (или слабо связанных с атомами) электронах вещества. Открытый им эффект увеличения длины волны рассеянного излучения, назван впоследствии **эффектом Комптона**.



- Опыт показал, что в рассеянном излучении наблюдается увеличение длины волны  $\Delta\lambda$ , зависящее от угла рассеяния  $\theta$ :
- $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = 2\Lambda \sin^2 \theta / 2$ , где  $\Lambda = 2,43 \cdot 10^{-3}$  нм – так называемая **комptonовская длина волны**, не зависящая от свойств рассеивающего вещества. В рассеянном излучении наряду со спектральной линией с длиной волны  $\lambda$  наблюдается несмещенная линия с длиной волны  $\lambda_0$ .



- Спектры рассеянного излучения



- Диаграмма импульсов при упругом рассеянии фотона на покоящемся электроне

$$p_e^2 = \left(\frac{h\nu_0}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2}\nu_0\nu \cos \theta.$$

- Теоретический расчет, выполненный на основе квантовых представлений, дал исчерпывающее объяснение эффекту Комптона и позволил выразить комптоновскую длину волны  $\Lambda$  через фундаментальные константы  $h$ ,  $c$  и  $m$ :

$$\Lambda = \frac{h}{mc} = 2,426 \cdot 10^{-3} \text{ нм.}$$

# Волновые свойства микрочастиц.

## Дифракция электронов

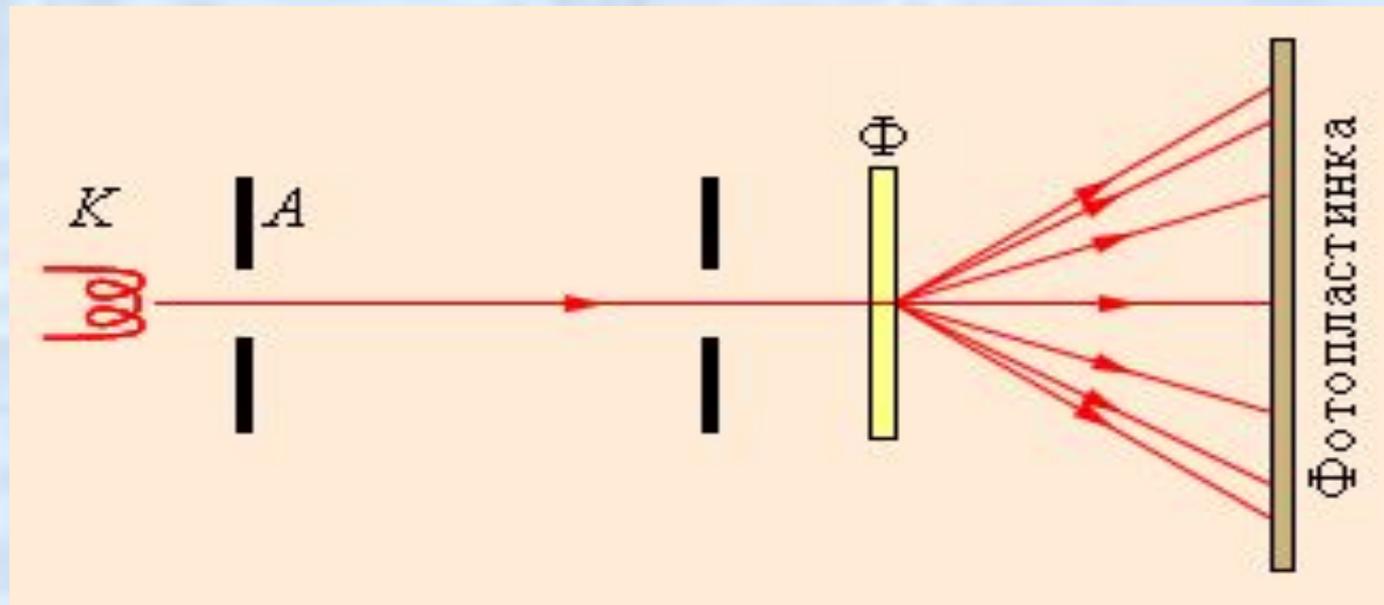
С каждым микрообъектом связаны, с одной стороны, **корпускулярные характеристики** – энергия  $E$  и импульс  $p$ , а с другой стороны, **волновые характеристики** – частота  $\nu$  и длина волны  $\lambda$ .

- Корпускулярные и волновые характеристики микрообъектов связаны такими же количественными соотношениями, как и у фотона:

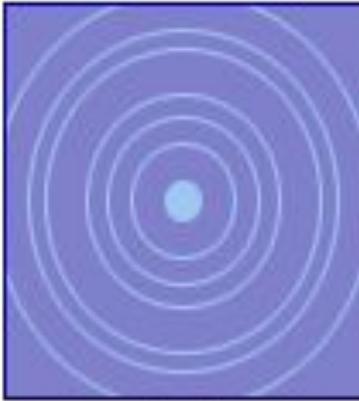
$$E = h\nu, \quad p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

- Гипотеза де Бройля постулировала эти соотношения для всех микрочастиц, в том числе и для таких, которые обладают массой  $m$ . Любой частице, обладающей импульсом, сопоставлялся волновой процесс с длиной волны  $\lambda = h / p$ . Для частиц, имеющих массу,

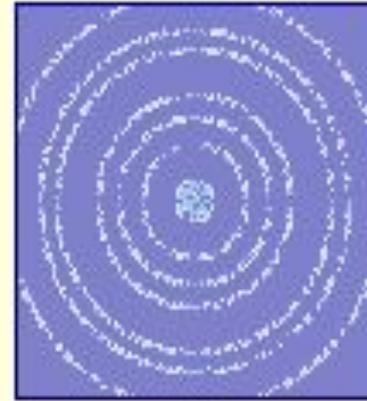
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h\sqrt{1 - v^2 / c^2}}{m}$$



- Упрощенная схема опытов Дж. Томсона по дифракции электронов.  $K$  – накаливаемый катод,  $A$  – анод,  $\Phi$  – фольга из золота.



(a)



(b)

- Картина дифракции электронов на поликристаллическом образце при длительной экспозиции (a) и при короткой экспозиции (b). В случае (b) видны точки попадания отдельных электронов на фотопластинку.

- Таким образом, было экспериментально доказано, что волновые свойства присущи не только большой совокупности электронов, но и каждому электрону в отдельности.
- Впоследствии дифракционные явления были обнаружены также для нейтронов, протонов, атомных и молекулярных пучков. Экспериментальное доказательство наличия волновых свойств микрочастиц привело к выводу о том, что это универсальное явление природы, общее свойство материи. Следовательно, волновые свойства должны быть присущи и макроскопическим телам.
- В квантовой механике для характеристики состояний объектов в микромире вводится понятие **волновой функции  $\Psi$  (пси-функции)**. **Квадрат модуля волновой функции  $|\Psi|^2$  пропорционален вероятности нахождения микрочастицы в единичном объеме пространства.** Конкретный вид волновой функции определяется внешними условиями, в которых находится микрочастица. . Математический аппарат квантовой механики позволяет находить волновую функцию частицы, находящейся в заданных силовых полях. Безграничная монохроматическая волна де Бройля есть волновая функция свободной частицы, на которую не действуют никакие силовые поля.