

Квантовая физика



A decorative graphic consisting of a large blue arc on the left side of the slide and a blue triangle on the right side, both pointing towards the center. The background is a dark blue gradient.

Квантовая природа излучения

Тепловое излучение и его характеристики



Спектральная плотность энергетической светимости (излучательности) тела – мощность излучения с единицы площади поверхности тела в единичном интервале частот:

$$R_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu+d\nu}^{\text{изл}}}{d\nu} \quad 1 [R_{\nu, T}] = 1 \text{ Дж/м}^2$$

Энергетическая светимость тела:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_{\nu, T} d\nu$$

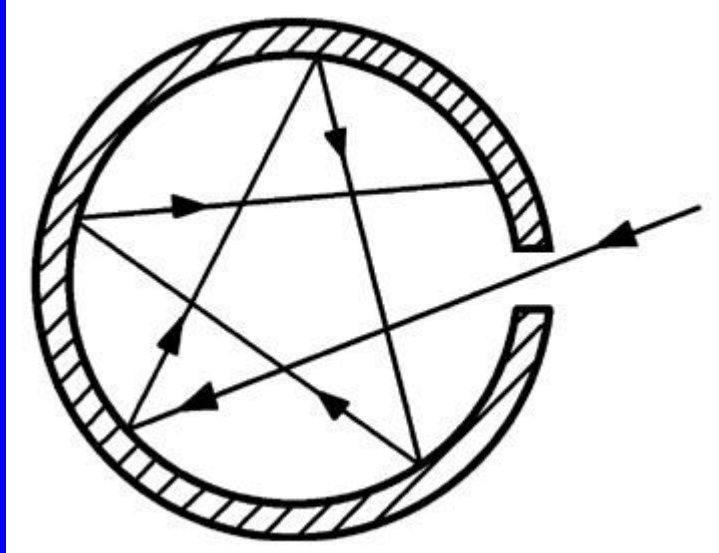
Спектральная поглощательная способность – способность тел поглощать падающее на них излучение:

$$A_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu+d\nu}^{\text{изл}}}{dW_{\nu, \nu+d\nu}}$$

- **Тепловое излучение** – испускание ЭМВ за счет внутренней энергии атомов и молекул вещества, оно присуще всем объектам, обладающим $T > 0$. Отличительная особенность - его *равновесность* .

Абсолютно черное тело

Модель абсолютно черного тела
(предложена Кирхгофом в 1862 г.):



- Абсолютно черное тело – тело, способное полностью поглощать все падающее на него излучение при любой температуре (сажа, платиновая чернь). $A_{\nu, T} \equiv 1$ – для абсолютно черного тела.

Серое тело – тело, поглощательная способность которого меньше 1, одинакова для всех частот и зависит от температуры, материала и состояния поверхности тела.

$A_T = \text{const} < 1$ – для серого тела

- Абсолютно белое тело – тело, которое отражает все падающее на него излучение.
- $A_{\nu, T} \equiv 0$ – для абсолютно белого тела.
- Отметим, что абсолютно белое и абсолютно черные тела – абстракции.

Закон Кирхгофа (1856 г.)

Отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглотительной способности не зависит от природы тела; оно является для всех тел универсальной функцией частоты и температуры:

$$r_{\nu,T} = R_{\nu,T} / A_{\nu,T}$$



- **Кирхгоф Густав Роберт** (1824 -1887 гг.) — немецкий физик. Занимался изучением проблем электричества, механики, гидродинамики, оптики. Создал общую теорию движения тока в проводниках. Развил строгую теорию дифракции. Установил один из основных законов теплового излучения.

Для черного тела $A_{\nu,T} \equiv 1 \Rightarrow$

$$R_{\nu,T} = r_{\nu,T}$$

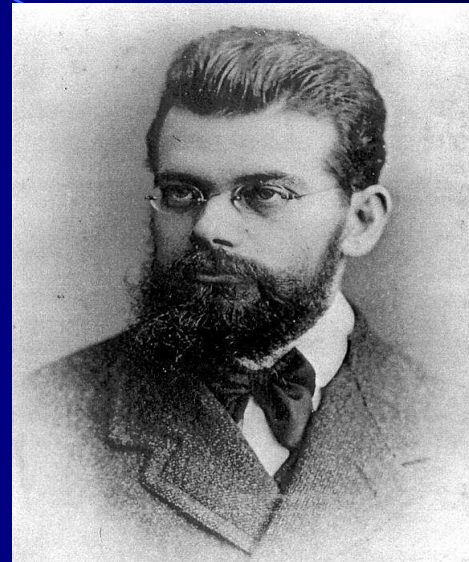
Универсальная функция Кирхгофа — это спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела.

Закон Кирхгофа описывает только тепловое излучение, являясь таким образом надежным критерием для определения природы излучения.

Закон Стефана-Больцмана (1879 г. и 1884 г.)



Йозеф Стефан (1835 – 1893 гг.) – австрийский физик занимался вопросами оптики, акустики, гидродинамики, теории теплового излучения.

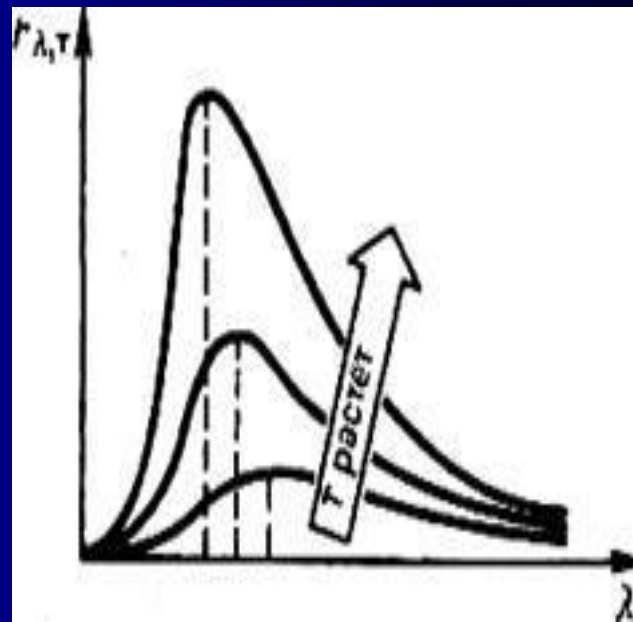


Людвиг Больцман (1844 – 1906 гг.) – австрийский физик-теоретик, основатель статистической физики и молекулярно-кинетической теории.

- Энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры:

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

постоянная Стефана - Больцмана



Площадь под кривой $r_{\lambda, T}(\lambda)$ пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры



Закон смещения Вина (1893 г.)

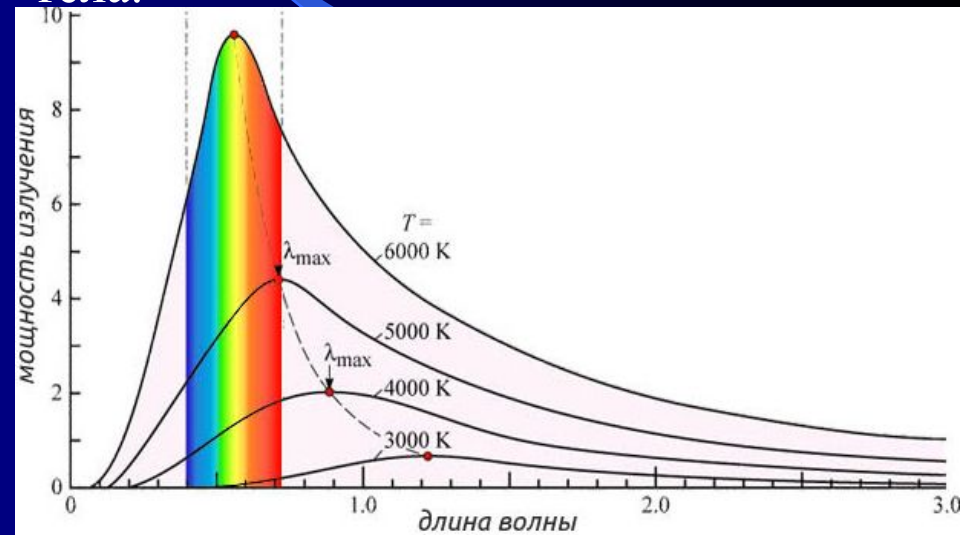
Вильгельм Карл Вин (1864 – 1928 гг.) – немецкий физик, Нобелевский лауреат за открытие закон в области теплового излучения.

Закон Стефана-Больцмана не дает ответа по поводу спектрального состава излучения абсолютно черного тела.

- Длина волны λ_{max} , соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda,T}$ абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре:

$$\lambda_{max} = b/T,$$

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



- Закон Вина показывает смещение положения максимума функции $r_{\lambda,T}$ по мере возрастания температуры в область коротких длин волн и объясняет, почему при понижении температуры нагретых тел в их спектре все заметнее преобладает длинноволновое излучение (переход белого каления в красное).

Формула Рэля – Джинса (1905 г.)



Лорд Джон Уильям Стретт Рэлей (1842 – 1919 гг.) – английский физик, барон, лауреат Нобелевской премии, занимался вопросами теории колебаний, открыл аргон.



Джеймс Холвуд Джинс (1877 – 1946 гг.) – английский физик и астрофизик, занимался изучением кинетической теории газов и теории теплового излучения, вопросами квантовой теории, теории относительности и т.д.

Ученые воспользовались методами статистической физики (закон равномерного распределения энергии по степеням свободы) и получили формулу для спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle \mathcal{E} \rangle = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT, \text{ где}$$

$\langle \mathcal{E} \rangle = kT$ – средняя энергия осциллятора с собственной частотой ν .



Ультрафиолетовая катастрофа. Формула Планка.

Попытка получения закона Стефана – Больцмана из формулы Рэля-Джинса вела к так называемой «ультрафиолетовой катастрофе»:

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu, T} d\nu = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty$$

- По закону Стефана-Больцмана $R_e \sim T^4$. Данное расхождение не удалось объяснить с точки зрения классической физики. В области больших частот хорошо согласуется с опытом формула Вина, полученная из теоретических соображений:

$$r_{\nu, T} = C \nu^3 A e^{-\frac{A\nu}{T}}$$

- , где $r_{\nu, T}$ – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела;
- $C = const$; $A = const$.

Согласующееся с опытом выражение спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела было получено в 1900 г. М. Планком. Он предположил, что атомные осцилляторы излучают энергию не непрерывно (как это принято в рамках классической теории), а дискретными порциями – **квантами**:

$$\epsilon_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

, $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с –

постоянная Планка

- Макс Планк (1858 – 1947 гг.)** – немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики, лауреат Нобелевской премии (1918 г.)



Фотоэффект

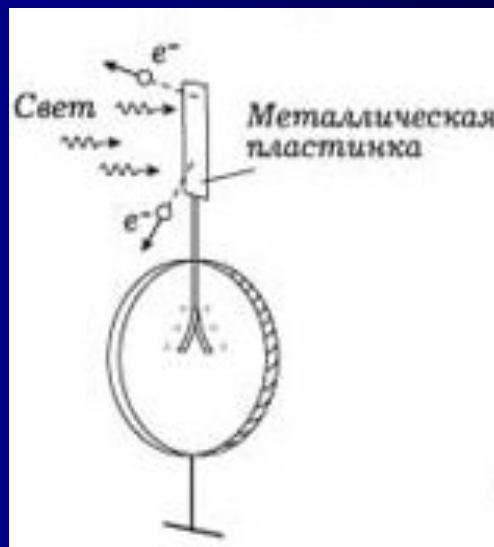
Виды фотоэффекта:

- *внешний* – испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения;
- *внутренний* – вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без выхода наружу => концентрация носителей тока внутри тела увеличивается – фотопроводимость);
- *вентильный* (разновидность внутреннего) – возникновение ЭДС (фото-ЭДС) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля).

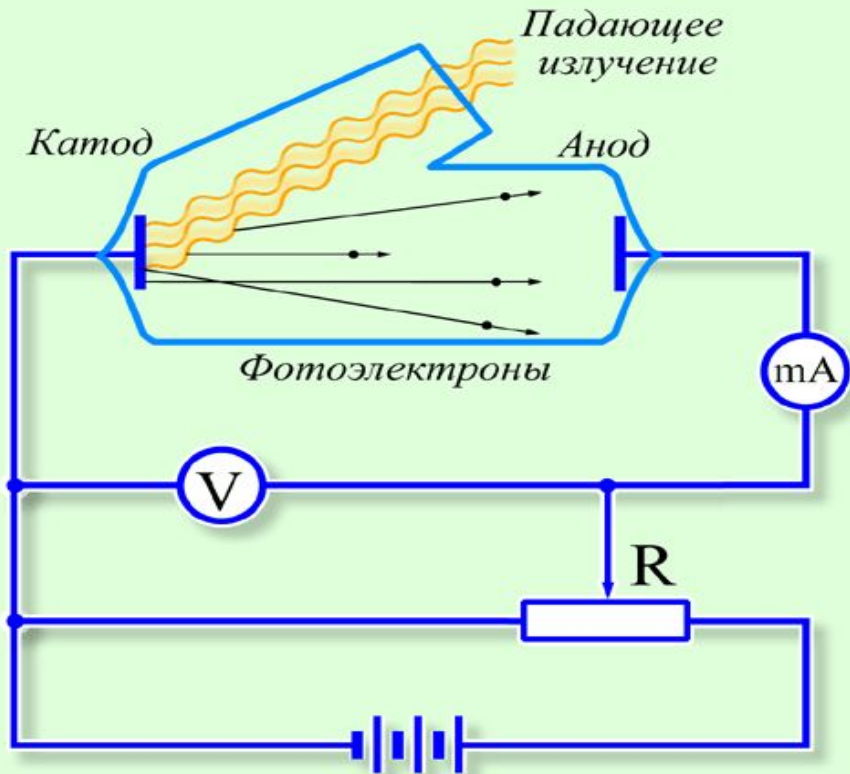
Значение в науке:

подтверждение гипотезы Планка.

Фотоэффект впервые обнаружен одним из основателей электродинамики немецким физиком **Г. Герцем** (1857 – 1894 гг.) в 1887 г. – усиление процесса разряда при облучении искрового промежутка УФ-излучением.



Законы внешнего фотоэффекта



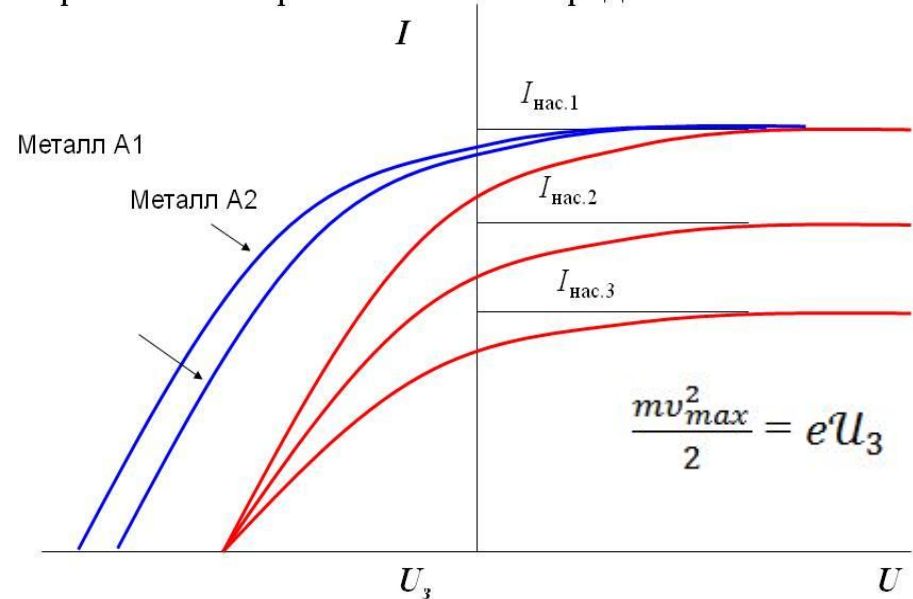
Александр Григорьевич Столетов (1839 – 1896 гг.) - русский физик, занимавшийся вопросами намагничивания железа критического состояния, внешним фотоэффектом.

I. Закон Столетова: при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырывааемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности катода).

II. Максимальная начальная скорость (кинетическая энергия) фотоэлектронов на зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν .

III. Для каждого вещества существует **красная граница фотоэффекта** – минимальная частота ν_0 света (зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) фотоэффекта – зависимость фототока I , образуемого потоком электронов от напряжения на электродах.



Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта(1905 г.)

Эйнштейн: свет частотой ν не только *испускается*, но и *распространяется* в пространстве и *поглощается* веществом отдельными порциями (квантами). Кванты назвали *фотонами*.

Объяснение

- **I закона фотоэффекта (Столетова):** один квант поглощается одним электроном \Rightarrow число вырванных фотоэлектронов \sim интенсивности света.
- **II закона фотоэффекта:** максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно растет с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от его интенсивности (числа фотонов).
- **III закона фотоэффекта:** т.к. с уменьшением частоты света кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается (для данного металла $A = const$), то при достаточно малой частоте ν_0 кинетическая энергия $= 0$ и фотоэффект прекращается.

Энергия падающего фотона расходуется на совершение работы выхода A по вырыванию электрона из катода и сообщение ему кинетической энергии:

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

Красная граница фотоэффекта

зависит от работы выхода электрона, т.е. от химической природы вещества и состояния поверхности:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}$$

Уравнение Эйнштейна для многофотонного фотоэффекта:

$$N h \nu = A + \frac{mv_{max}^2}{2}$$

Характеристики фотона.

Давление света.



Петр Николаевич Лебедев

(1866 – 1912 гг.) – русский физик – экспериментатор

Характеристики фотона

Энергия фотона: $\epsilon_0 = h\nu$

Скорость фотона:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

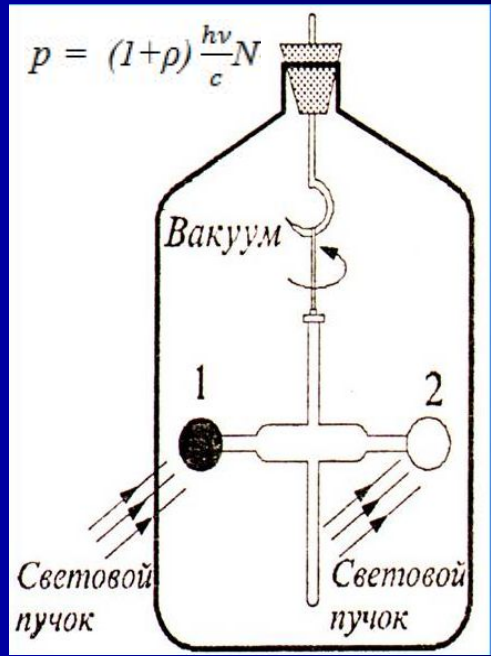
\Rightarrow

Масса фотона: $m = 0$

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

Импульс фотона:

$$p = \frac{\epsilon_0}{c} = \frac{h\nu}{c}$$



Давление света. Опыты Лебедева.

N – число фотонов, падающих в единицу времени на единицу поверхности;

ρ – коэффициент отражения от поверхности;

ρN – число фотонов, отражающихся от поверхности;

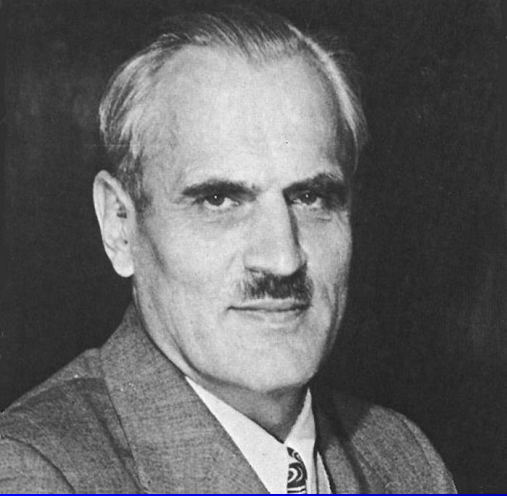
$(1 - \rho)N$ – число фотонов, поглощающихся поверхностью;

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

- импульс, передаваемый поверх-ти одним фотоном;

$$2p = \frac{2h\nu}{c}$$

- импульс, передаваемый отраженным фотоном;

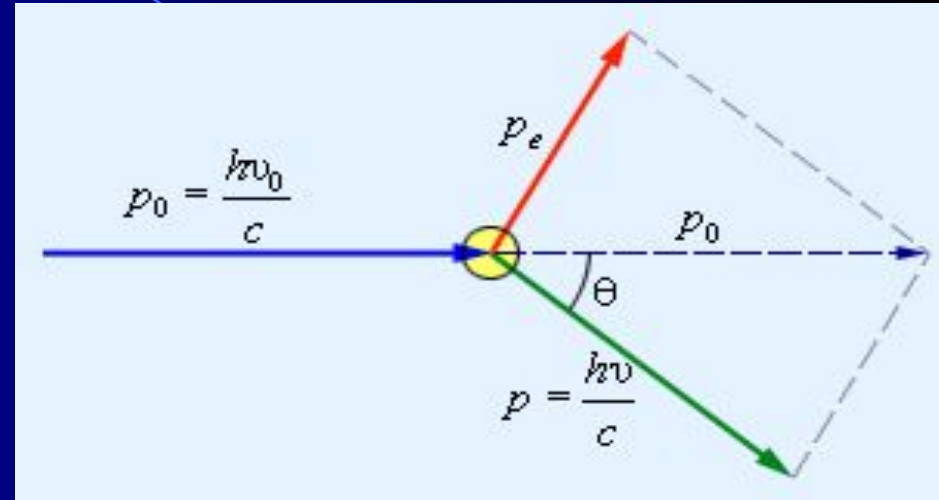


Артур Холли Комптон

(1892 – 1962 гг.) –
американский
ученый, лауреат
Нобелевской премии
(1927 г.)

Эффект Комптона (1923 г.)

- Наиболее отчетливо корпускулярные свойства вещества проявляются при рассмотрении эффекта Комптона – упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского и γ – излучений) на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны. Этот эффект может быть объяснен только с точки зрения квантовой теории, т.к. согласно волновой теории электрон под действием поля световой волны колеблется и излучает волны с такой же частотой.



Комптон наблюдал рассеяние монохроматического рентгеновского излучения веществами с легкими атомами (парафин, бор) и обнаружил, что в составе рассеянного излучения наряду с излучением первоначальной длины волны наблюдается более длинноволновое излучение.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}, \text{ где } \lambda' - \text{длина волны рассеянного излучения.}$$

Единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения

Доказательства волновой природы света:

- ✓ интерференция;
- ✓ дифракция;
- ✓ поляризация.

Доказательства квантовой (корпускулярной) природы света:

- ✓ излучение черного тела;
- ✓ фотоэффект;
- ✓ эффект Комптона.

Явления, которые подтверждают и волновые, и квантовые свойства света:

- ✓ давление света;
- ✓ преломление света.

Формулы энергии $\varepsilon_0 = h\nu$ и импульса фотона

показывают связь корпускулярных (энергия и импульс)

и волновых (частота или длина волны) свойств электромагнитного излучения.

$$p = \frac{\varepsilon_0}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

- Чем больше λ , тем меньше энергия и импульс фотона, тем труднее обнаружить квантовые свойства света (существует красная граница фотоэффекта). Чем меньше λ , тем больше энергия и импульс фотона, тем труднее обнаруживаются волновые свойства света (дифракция рентгеновского излучения открыта после применения в качестве дифракционной решетки кристаллов).
- Взаимосвязь между двойственными корпускулярно - волновыми свойствами света можно объяснить, если использовать статистический подход к рассмотрению закономерностей распределения света. Дифракция света на щели состоит в том, что при прохождении света через щель происходит перераспределение фотонов в пространстве. Так как вероятность попадания фотонов в различные точки экрана неодинакова, то и возникает дифракционная картина. Освещенность экрана зависит от вероятности попадания фотонов на единицу площади экрана. По волновой теории освещенность пропорциональна квадрату амплитуды световой волны в этой точке экрана \Rightarrow квадрат амплитуды световой волны в данной точке пространства является мерой вероятности попадания фотонов в данную точку.