

Тема “ Квантовые свойства света “

- 1. Законы теплового излучения.**
- 2. Внешний фотоэффект.**
- 3. Квантовая природа света. Фотоны.**
- 4. Эффект Комптона.**

Литература

- 1. Трофимова Т. И. Курс физики. - § 197 – 207.**
- 2. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 5, гл.1, гл.2 [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 384 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/708>.**

Введение. Электромагнитное излучение во многих природных явлениях проявляет волновые свойства и его можно рассматривать как электромагнитные волны.

Однако, в действительности электромагнитное излучение, и свет в том числе, - это более сложное явление, и при определённых условиях его следует рассматривать как поток особых частиц – квантов или фотонов, не обладающих массой покоя. Как говорят, свет проявляет квантовые (дискретные) свойства.

Квантовые свойства света были обнаружены при изучении теплового излучения нагретых тел и некоторых других явлений.

Вопрос 1

Электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами за счёт энергии теплового движения атомов и молекул вещества (своей внутренней энергии), называется **тепловым.**

Источники теплового излучения - любые нагретые тела (лампа накаливания, утюг, печь, паяльник, отопительная батарея, ...)

Источники нетеплового излучения - светодиод, лазер, люминесцентная лампа, экран телевизора).

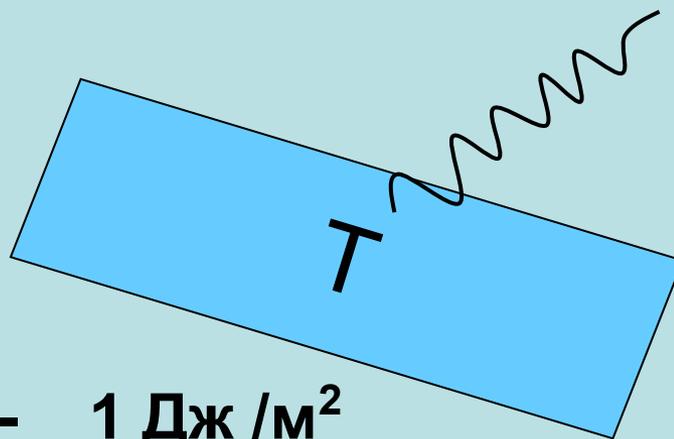
Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром излучения, положение максимума которого зависит от температуры тела.

Характеристики теплового излучения

Спектральная плотность энергетической светимости тела $R_{\nu, T}$ - величина, равная энергии электромагнитного излучения, испускаемой за единицу времени с единицы площади поверхности тела в единичном интервале частот.

$$R_{\nu, T} = \frac{dW}{d\nu}$$

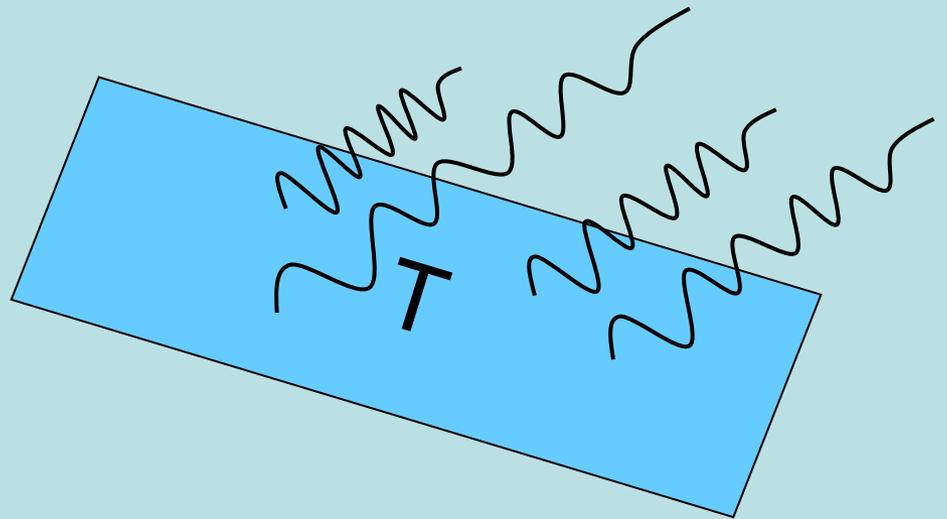
Единица измерения - 1 Дж / м²



Энергетическая светимость R_T - величина, равная энергии электромагнитных волн всевозможных частот, излучаемых за единицу времени с единицы площади поверхности тела.

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

Ед. измерения - 1 Вт/м²

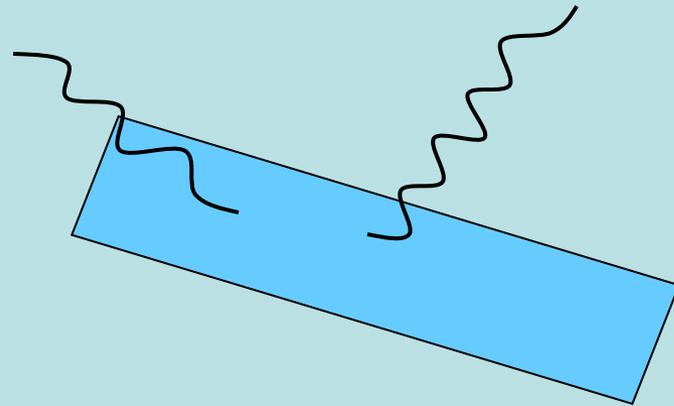


Спектральная поглощательная способность тела

$A_{\nu, T}$ - величина, показывающая какая доля энергии электромагнитных волн в диапазоне частот от

ν до $\nu + d\nu$, падающих на единицу площади поверхности тела за единицу времени, полностью поглощается этим телом.

$$A_{\nu, T} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}} \leq 1$$

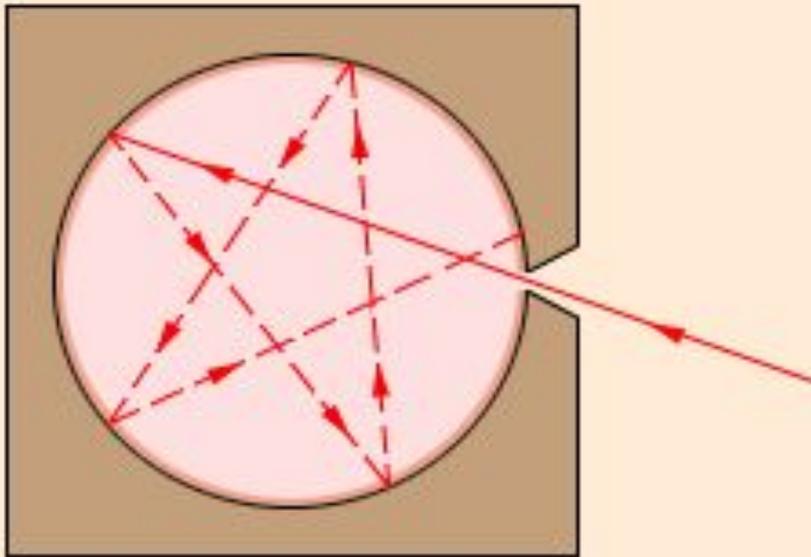


Величины $R_{\nu, T}$ и $A_{\nu, T}$ зависят от природы тела, его температуры T и частоты излучения.

Законы теплового излучения были открыты для абстрактного тела (модели) - абсолютно чёрного тела.

Абсолютно черное тело - тело, которое полностью поглощает все падающее на него электромагнитное излучение.

Модель – почти замкнутая полость с небольшим отверстием. Для этого тела



$$A(\nu, T) = 1$$

Законы теплового излучения

Закон Кирхгофа: отношение спектральной энергетической светимости к спектральной поглотительной способности не зависит от природы тела, оно является для всех тел универсальной функцией частоты (длины λ) волны и температуры.

$$\frac{R(\nu, T)}{A(\nu, T)} = r(\nu, T)$$

$r(\nu, T)$ – *спектральная энергетическая светимость абсолютно чёрного тела*

Это означает, что чёрное тело излучает больше любого нечёрного. Поэтому закопчённый чайник остывает быстрее блестящего.

Закон Стефана – Больцмана

Энергетическая светимость R_{ε} абсолютно черного тела пропорциональна его абсолютной температуре в четвертой степени

$$R_{\varepsilon} = \sigma \cdot T^4$$

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

Закон смещения Вина

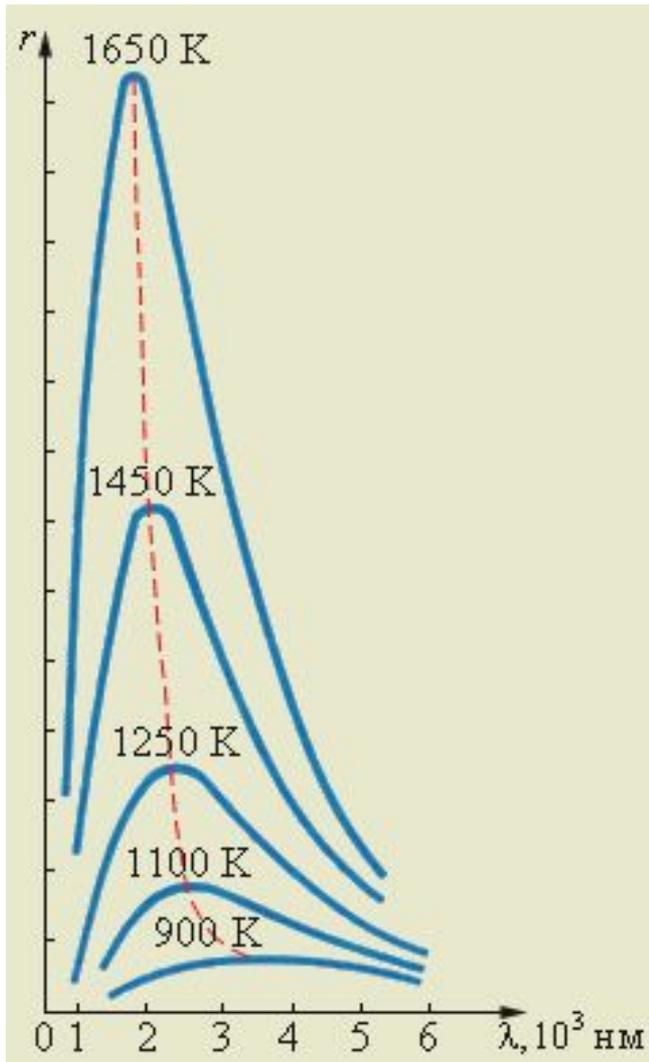
Произведение длины волны λ_m , на которую приходится максимум мощности излучения (спектральной энергетической светимости) абсолютно черного тела, на его термодинамическую температуру есть величина постоянная.

$$\lambda_m \cdot T = b$$

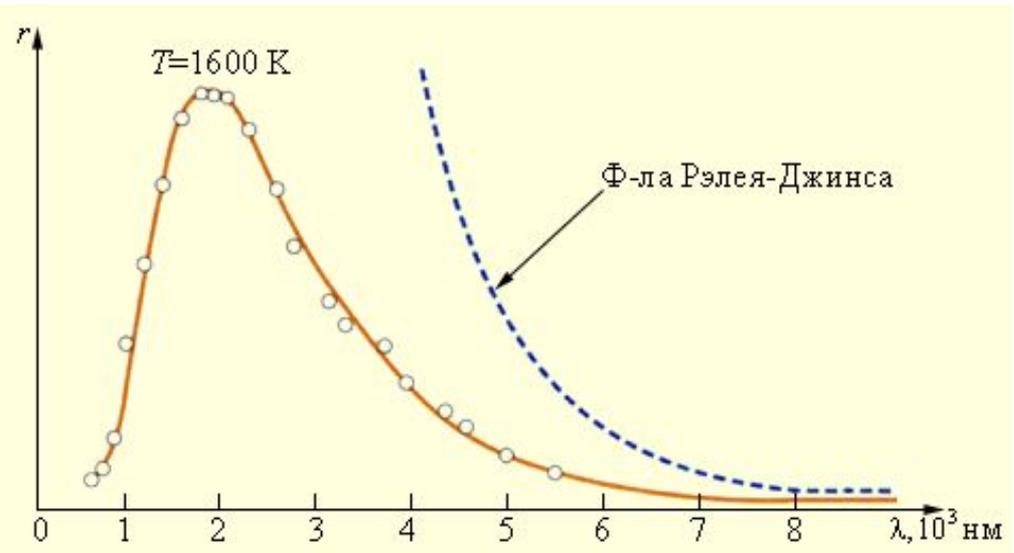
$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

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



$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$



Попытки объяснить законы теплового излучения, используя классическую физику, были неудачны. Предлагаемые теории предполагали, что электромагнитная энергия может излучаться непрерывно, в любых количествах.

В 1900 г. немецкий учёный Макс Планк выдвинул революционную гипотезу, которая позволила ему объяснить экспериментальные законы и построить квантовую теорию света.

Гипотеза Планка

Атомные излучатели (осцилляторы) излучают энергию (электромагнитные волны) не непрерывно, а дискретными порциями – квантами.

Энергия кванта электромагнитного излучения пропорциональна излучения.

$$\varepsilon = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

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

Формула Планка, описывающая зависимость мощности излучения абсолютно чёрного тела от частоты и температуры

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

Вопрос 2. Внешний фотоэлектрический эффект

Другим явлением, которое свидетельствует о квантовых (корпускулярных) свойствах света является внешний фотоэлектрический эффект.

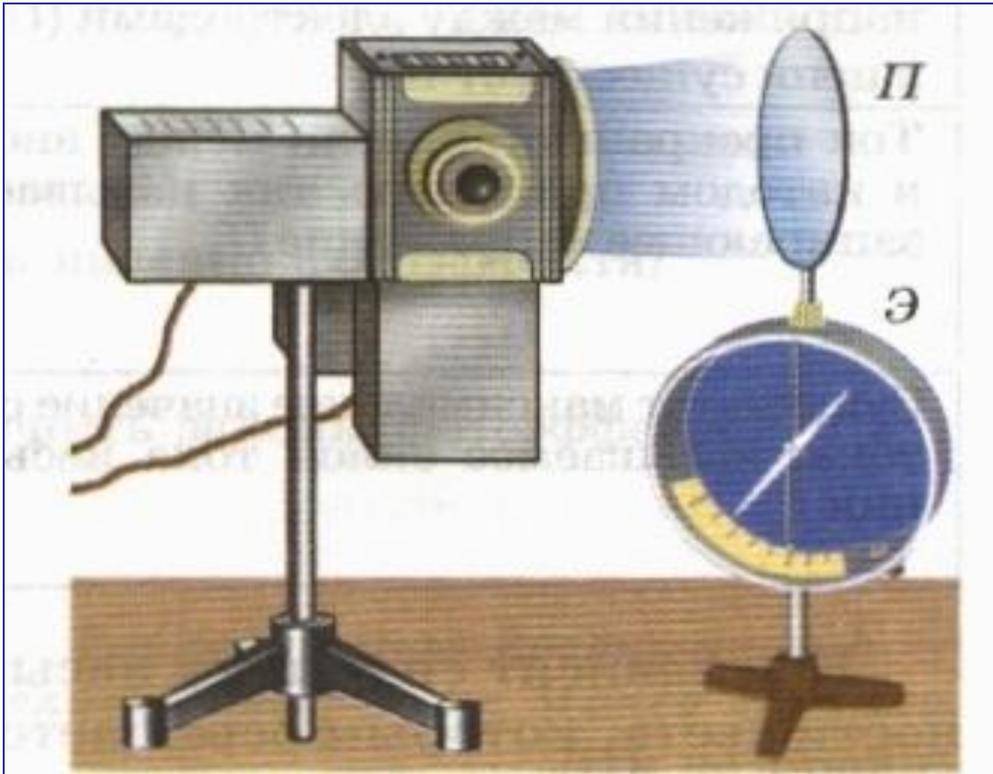
Внешний фотоэффект – испускание электронов с поверхности вещества под действием света.

Наблюдается в твердых телах и газах.

Обнаружен в 1887 г. Генрихом Герцем, исследован Столетовым, Ленардом и др.

Обнаружение внешнего фотоэффекта, 1887 г.

Облучение светом электрической дуги (УФ-свет) отрицательно заряженной цинковой пластины приводило к уменьшению заряда пластины. Э-электрометр.



**Возникновение внешнего фотоэффекта
(происходит взаимодействие световой
волны с электронами вещества)**

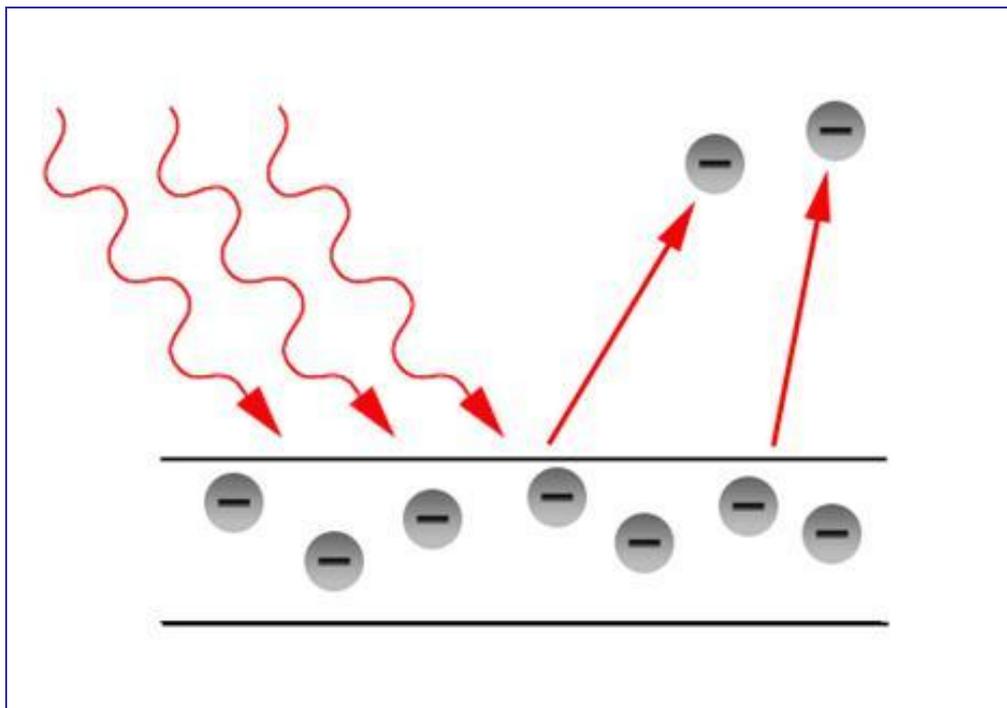
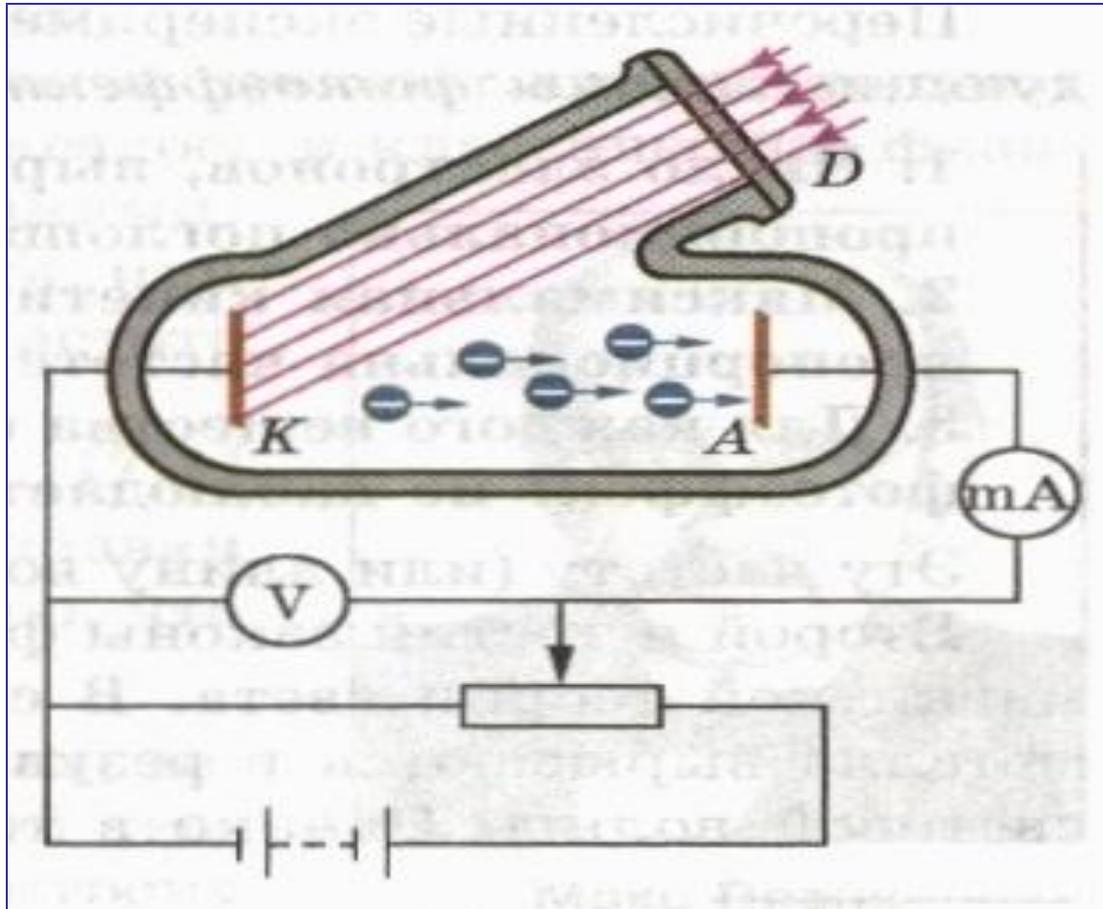


Схема установки для исследования внешнего фотоэффекта

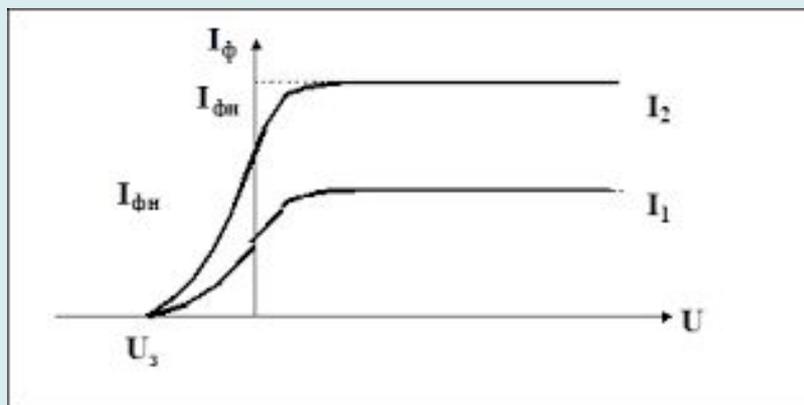


K - отрицательный электрод, катод

A - положительный электрод, анод

D - световой поток, падающий на катод

Зависимость фототока, образуемого потоком электронов, испускаемых под действием света, от напряжения U для двух различных освещённостей катода.



- 1. Электроны вылетают из катода с разными скоростями.**
- 2. Максимальное значение фототока определяется таким напряжением U , при котором все фотоэлектроны достигают анода**
- 3. При $U = 0$ фототок не исчезает. Электроны обладают некоторой скоростью и в вакууме могут достичь анода без внешнего поля.**

Для того, чтобы фототок стал равным нулю, надо приложить такое отрицательное задерживающее напряжение U_3 , при котором даже электроны с максимальной кинетической энергией не могут преодолеть задерживающего поля и достичь анода. Это возможно, если максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов равна работе сил тормозящего, задерживающего поля согласно уравнению

$$e \cdot U_3 = \frac{m v_{\text{макс}}^2}{2}$$

Три закона внешнего фотоэффекта

- 1. Число электронов, вырываемых светом с поверхности вещества за единицу времени прямо пропорционально интенсивности падающего света.**
- 2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только частотой света.**

3. Для каждого вещества существует минимальная частота света, называемая **красной** или **длинноволновой границей** $\nu_{кр}$ фотоэффекта, ниже которой фотоэффект невозможен.

Эта частота зависит от вида вещества (материала фотокатода) и состояния его поверхности.

Внешний фотоэффект и его законы объясняет квантовая теория, созданная А. Эйнштейном в 1905 г.

Квантовая теория фотоэффекта

А. Эйнштейна

1. Свет распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых равна $\varepsilon = h\nu$
2. Каждый фотон поглощается одним электроном.
3. Передача энергии фотона электрону происходит почти мгновенно.
4. Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода **A** и на сообщение электрону кинетической энергии.

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A + \frac{m v_{\text{макс}}^2}{2}$$

$$\nu_{\text{мин}} = \nu_{\text{кр}} = \frac{A}{h}$$

Красная граница фотоэффекта

h - постоянная Планка

ν - частота падающего света

A - работа выхода электронов из вещества

$v_{\text{макс}}$ - максимальная скорость фотоэлектрона

3. Квантовая природа света. Фотоны.

Современная квантовая физика представляет свет как распространение квантов света - фотонов (микрочастиц света). Свойства фотонов:

Фотон - квант электромагнитного излучения

Энергия $\varepsilon = h \nu$

Заряд $Q = 0$

Скорость $c = 300\,000 \text{ км / с}$

Масса покоя $m_0 = 0$

Масса фотона $m = h \nu / c^2$

Импульс фотона $p = m \cdot c = h / \lambda$

Здесь ν - частота, h - постоянная Планка

Свет, падающий на тело оказывает на его поверхность давление, равное импульсу, который передают поверхности за 1 с N фотонов

Давление света P при нормальном его падении на поверхность тела равно:

$$P = \frac{h\nu}{c} \cdot N \cdot (1 + R) = \frac{P}{c} \cdot (1 + R)$$

$$R = \frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}} - \text{коэффициент отражения}$$

света от поверхности

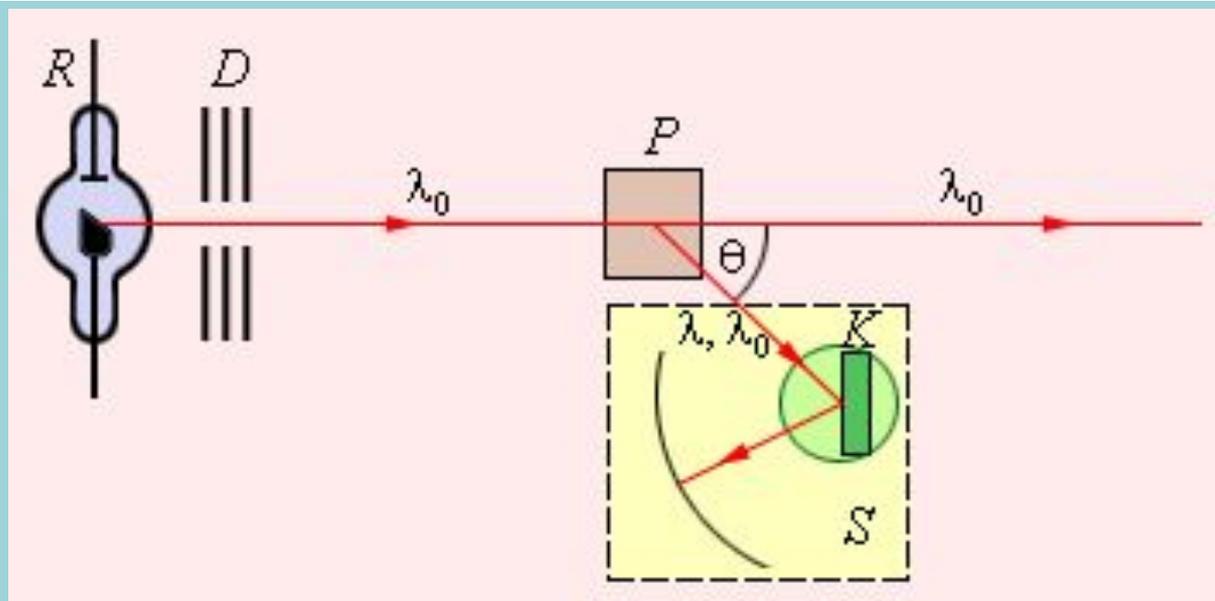
Вопрос 4. Наиболее полно квантовые (корпускулярные) свойства света проявляются в эффекте Комптона.

Эффект Комптона - упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского) на свободных электронах, сопровождающееся увеличением длины волны излучения.

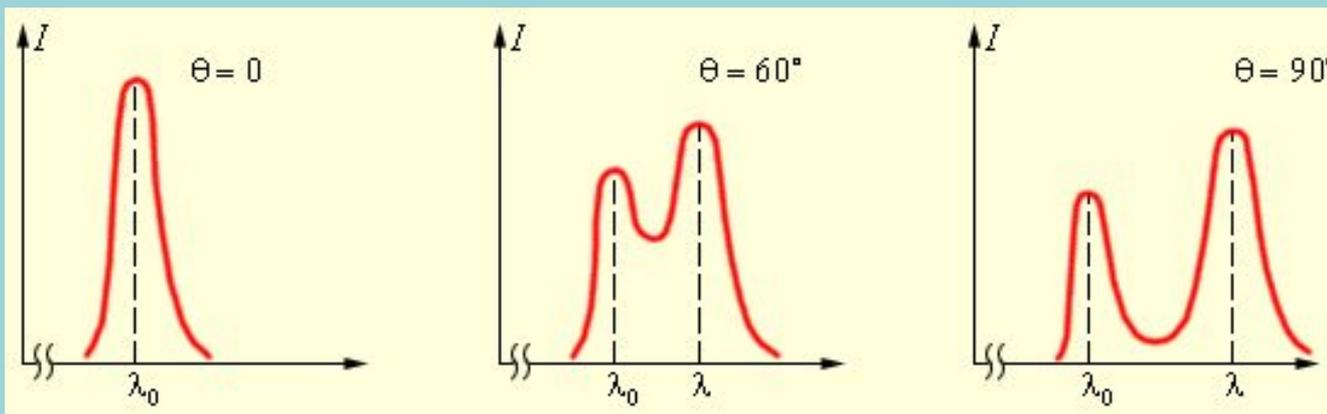
В 1923 г. Комптон исследовал рассеяние рентгеновского излучения различными веществами. Он обнаружил, что в рассеянном излучении наряду с излучением первоначальной длины волны λ_0 содержится более длинноволновое излучение λ .

Разность $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ не зависит от длины волны падающего излучения и природы вещества, а определяется углом рассеяния θ .

Схема эксперимента Комптона



Спектры рассеянного излучения



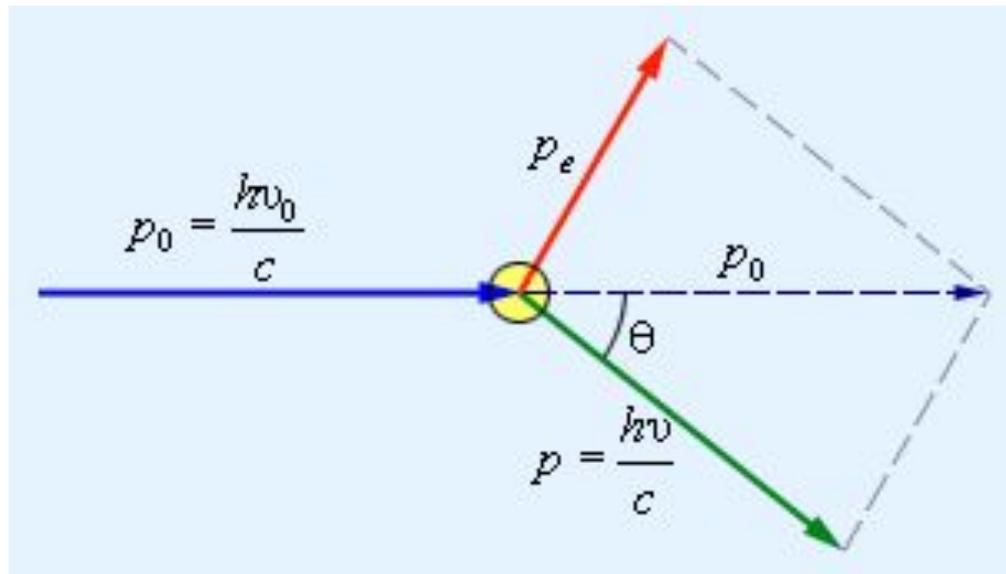
По квантовой теории при эффекте Комптона происходит упругое столкновение двух частиц - налетающего фотона, обладающего импульсом p_0 и энергией $h\nu_0$ с покоящимся электроном.

Фотон, столкнувшись с электроном, передаёт ему часть своей энергии и импульса и изменяет направление движения (рассеивается).

Уменьшение энергии фотона означает увеличение длины волны рассеянного излучения. При каждом столкновении выполняются законы сохранения энергии и импульса.

Диаграмма импульсов при упругом рассеянии фотона на покоящемся электроне (жёлтый шарик):

синяя стрелка – вектор импульса исходного фотона,
чёрная стрелка -- вектор импульса рассеянного фотона,
красная стрелка -- вектор импульса электрона отдачи (отскочившего при столкновении с налетающим фотоном)



Выражение для разности длин волн, полученное из квантовых представлений о свете и законов сохранения энергии и импульса.

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = 2\lambda_C \text{Sin}^2(\theta / 2) = \lambda_C (1 - \cos \theta)$$

λ_0 – длина волны падающего излучения

λ – длина волны рассеянного излучения

$\lambda_C = \frac{h}{m_0 c}$ – комptonовская длина волны

$\lambda_C = 2,426 \text{ нм}$ – комptonовская длина волны
электрона

Корпускулярно - волновой дуализм света

В результате углубления представлений о природе света выяснилось, что свет обладает двойственной природой, получившей название корпускулярно – волнового дуализма света.

Выяснилось, что свет одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и свойствами дискретных фотонов.

Волновые свойства света определяют распространение света, интерференцию, дифракцию, поляризацию,

а корпускулярные свойства - взаимодействие света с веществом !

Контрольные вопросы

1. Какого цвета « абсолютно чёрное тело» ?
2. Что такое фотон? Напишите формулу его энергии.
3. Две звезды. Одна излучает голубоватый свет, другая с красным оттенком. У какой из них поверхностная температура выше? Какой закон надо использовать, чтобы ответить?
4. Какой фундаментальный закон использован в уравнении Эйнштейна для внешнего фотоэффекта?
5. Чему равны заряд и масса покоя фотона?
6. Что означает выражение «корпускулярно-волновой дуализм света» ?