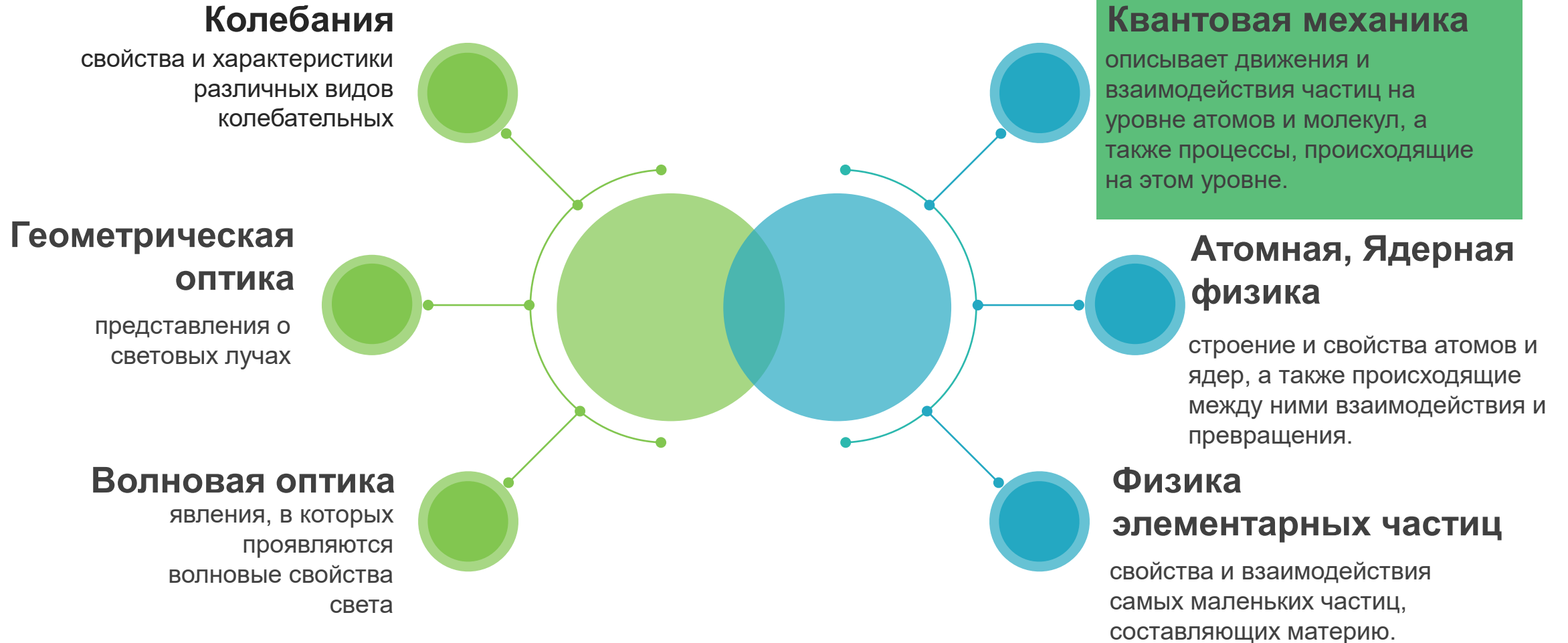


# Физика 3



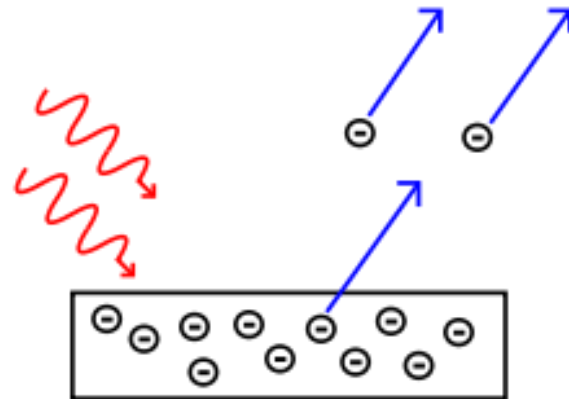
# Лекция 7. Квантовые явления в оптике

---

# Фотоэффект

В 1887 году Г. Герц обнаружил, что при освещении отрицательного электрода ультрафиолетовыми лучами разряд между электродами происходит при меньшем напряжении.

Томпсон и Ф. Леонард, измерив удельный заряд испускаемых телом частиц, установили, что это электроны.



$$|e| = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

$$m = 9,1094 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

# Фотоэффект



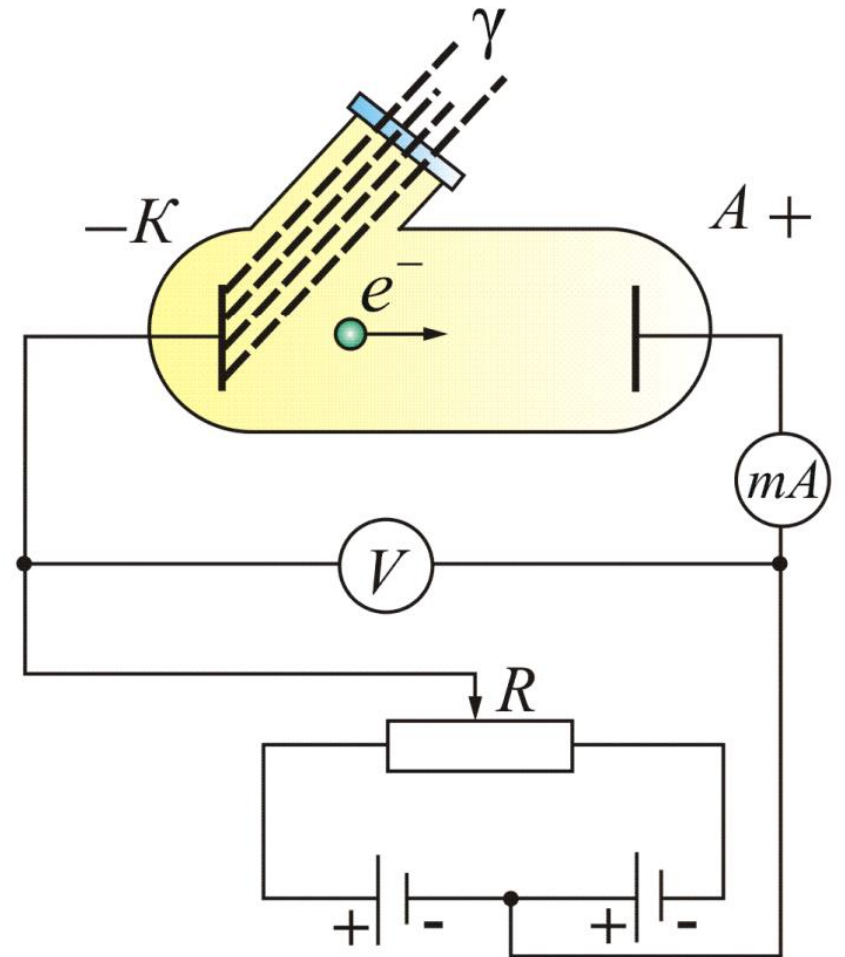
**Внешним фотоэффектом** называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Внешний фотоэффект наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация).

**Внутренний фотоэффект** – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу. В результате концентрация носителей тока внутри тела увеличивается, что приводит к возникновению фотопроводимости (повышению электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении) или к возникновению электродвижущей силы (ЭДС).

# Фотоэффект

схема для исследования фотоэффекта Столетова

Два электрода в вакуумной трубке подключены к батарее так, что с помощью потенциометра  $R$  можно изменять не только значение, но и знак подаваемого на них напряжения. Ток, возникающий при освещении катода монохроматическим светом (через кварцевое стекло), измеряется включенным в цепь миллиамперметром.



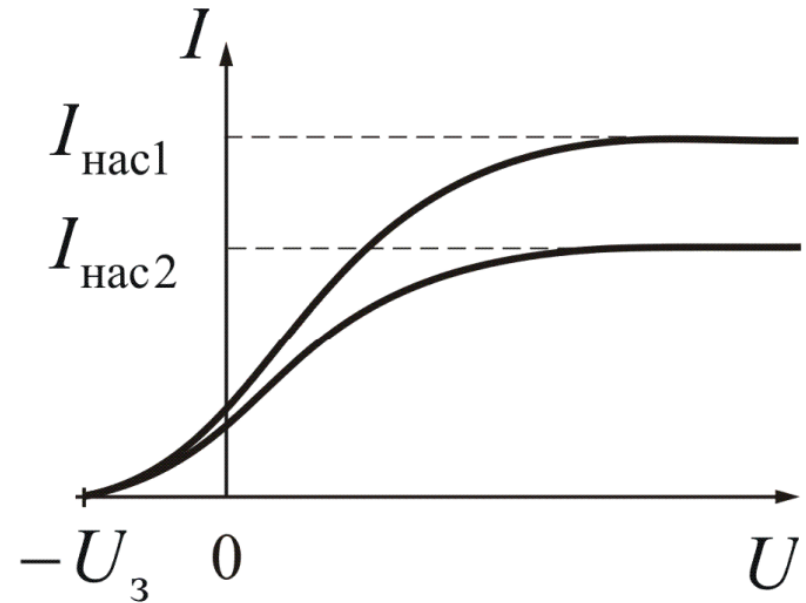
# Фотоэффект

Зависимость соответствует двум различным энергетическим освещенностям катода (частота света в обоих случаях одинакова). По мере увеличения  $U$  фототок постепенно возрастает, т.е. все большее число фотоэлектронов достигает анода.

**Ток насыщения** – Значение тока при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода

$$I_{нас} = ne$$

где  $n$  – число электронов, испускаемых катодом в 1 с.

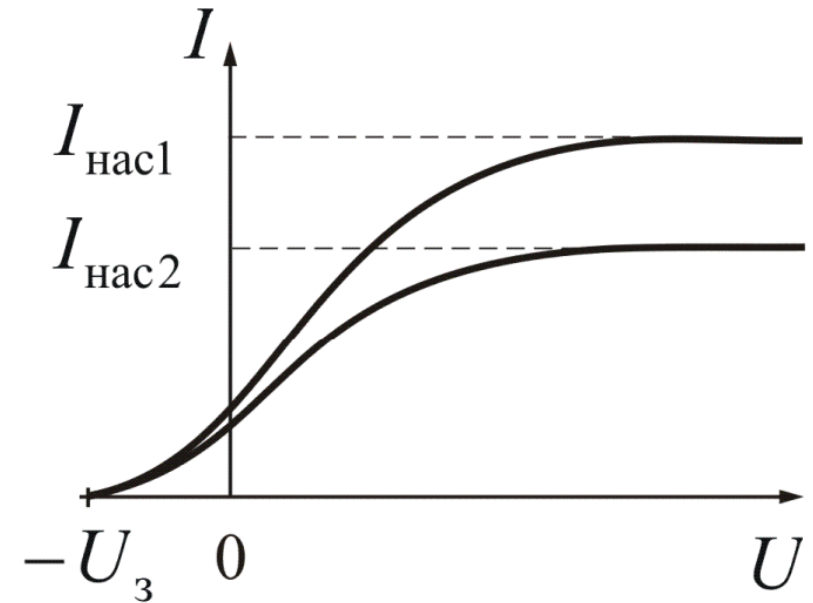


# Фотоэффект

Для того, чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить задерживающее напряжение  $U_3$ .

При  $U = U_3$  ни один из электронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью  $v_{\max}$ , не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3,$$



# Законы внешнего фотоэффекта



**1 закон Фотоэффекта** – При фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила тока насыщения пропорциональна энергетической освещенности  $E_e$  катода).

**2 закон Фотоэффекта** – Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой  $\nu$ .

**3 закон Фотоэффекта** – Для каждого вещества существует **красная граница фотоэффекта**, т.е. минимальная частота  $\nu_{кр}$  света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.



# Фотонная теория света.



Согласно теории Эйнштейна, свет с частотой  $\nu$  не только испускается, как это предполагал Планк, но и распространяется и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых

$$E = h\nu.$$

Таким образом, распространение света нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов, движущихся со скоростью распространения света в вакууме ( $c$ ). Квант электромагнитного излучения получил название **фотон**.

Мы можем измерить энергию вылетевшего электрона, исходя из волновой и фотонной теории.

Какая теория предпочтительнее?

# Фотонная теория света.



Предположим, что пластина освещается монохроматическим светом.

Волновая теория предсказывает, что при изменении этих характеристик происходят следующие явления:

- при увеличении интенсивности света число выбитых электронов и их максимальная энергия должны возрастать,
- частота света не должна влиять на кинетическую энергию выбитых электронов.

# Фотонная теория света.



Предположим, что пластина освещается монохроматическим светом.

**Волновая теория** предсказывает, что при изменении этих характеристик происходят следующие явления:

- при увеличении интенсивности света число выбитых электронов и их максимальная энергия должны возрасти,
- частота света не должна влиять на кинетическую энергию выбитых электронов.

**фотонная (корпускулярная) теория:**

в монохроматическом пучке все фотоны имеют одинаковую энергию (равную  $h\nu$ ). Увеличение интенсивности светового пучка означает увеличение числа фотонов в пучке, но не сказывается на их энергии, если частота остается неизменной.

# Фотонная теория света.

**Работа выхода** – минимальная энергия требуемая для выбивания электрона с поверхности металла.

Если частота  $\nu$  падающего света мала, то  $h\nu < A_0$  и энергии фотона недостаточно для того, чтобы выбить электрон с поверхности металла.

Если же  $h\nu > A_0$ , то электроны вылетают с поверхности металла, причем энергия в таком процессе сохраняется, т.е. энергия фотона ( $h\nu$ ) равна кинетической энергии вылетевшего электрона плюс работе по выбиванию электрона из металла:

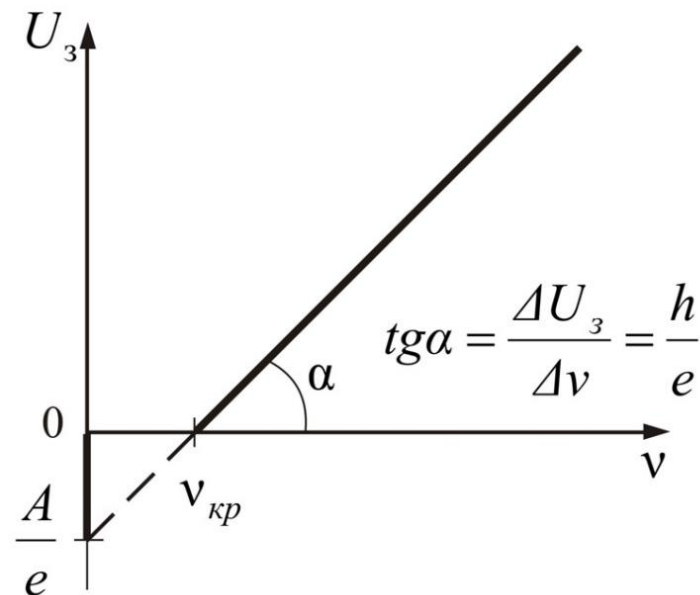
$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A$$

- Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

# Фотонная теория света.

Выводы:

1. Увеличение интенсивности света означает увеличение числа налетающих фотонов, которые выбивают с поверхности металла больше электронов. Но так как энергия фотонов одна и та же, максимальная кинетическая энергия электрона не изменится (подтверждается I закон фотоэффекта).
2. При увеличении частоты падающего света максимальная кинетическая энергия электронов линейно возрастает в соответствии с формулой Эйнштейна. (Подтверждение II закона фотоэффекта).



$$\frac{m\nu_{\max}^2}{2} = h\nu - A$$

$$eU_3 = h(\nu - \nu_{кр})$$

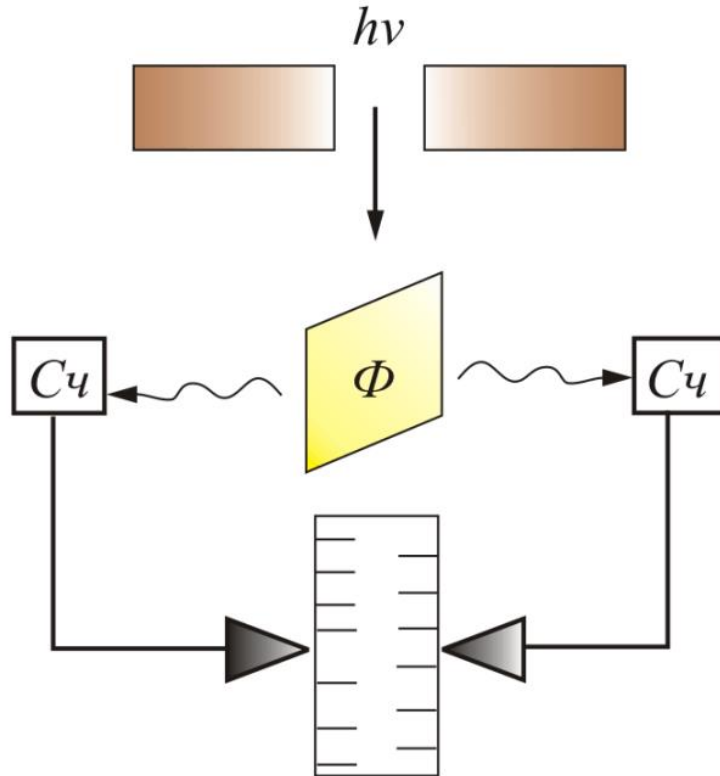
# Фотонная теория света.



3. Если частота  $\nu$  меньше критической частоты  $\nu_{кр}$ , то выбивание электронов с поверхности не происходит (III закон).

Предсказания корпускулярной (фотонной) теории сильно отличаются от предсказаний волновой теории, но очень хорошо совпадают с тремя экспериментально установленными законами фотоэффекта.

# Опыт Боте



Тонкая металлическая фольга  $\Phi$  помещалась между двумя газоразрядными счетчиками  $Cч$ .

Фольга освещалась слабым пучком рентгеновских лучей, под действием которых она сама становилась источником рентгеновских лучей (это явление называется **рентгеновской флуоресценцией**). Вследствие малой интенсивности первичного пучка, количество квантов, испускаемых фольгой, было невелико. При попадании квантов на счетчик механизм срабатывал и на движущейся бумажной ленте делалась отметка.

# Фотонная теория света.

---

Фотон обладает энергией  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ .

Для видимого света длина волны  $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$  и энергия  $E = 2,2 \text{ эВ}$ ,

для рентгеновских лучей  $\lambda = 10^{-6} \text{ мкм}$  и  $E = 0,5 \text{ эВ}$ .

Фотон обладает инертной массой

$$E = mc^2,$$

$$m_{\phi} = E/c^2 = hc/\lambda c^2 = h/c$$

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



# Фотонная теория света.

---

Фотон движется со скоростью света  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .

Подставим это значение скорости в выражение для релятивистской массы:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{1-1}} = \frac{m_0}{0} \rightarrow \infty.$$

Но масса фотона  $m$  – конечна, т.е. получено абсурдное заключение. Получаем:

**Фотон – частица, не обладающая массой покоя. Она может существовать, только двигаясь со скоростью света  $c$ .**

# Фотонная теория света.

---

Релятивистское выражение для импульса и энергии:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Найдем  $v^2$ :

$$p \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = m_0 v; \quad p^2 - \frac{p^2 v^2}{c^2} = m_0^2 v^2;$$

$$p^2 = v^2 \left( \frac{p^2}{c^2} + m_0^2 \right) = v^2 \left( \frac{p^2 + m_0^2 c^2}{c^2} \right);$$



$$v^2 = \frac{p^2 c^2}{p^2 + m_0^2 c^2}.$$

# Фотонная теория света.

Подставим:

$$v^2 = \frac{p^2 c^2}{p^2 + m_0^2 c^2} \quad \longrightarrow \quad E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{p^2 c^2}{(p^2 + m_0^2 c^2) c^2}}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{\frac{p^2 + m_0^2 c^2 - p^2}{p^2 + m_0^2 c^2}}};$$

$$E^2 = \frac{m_0^2 c^4 (p^2 + m_0^2 c^2)}{m_0^2 c^2} = c^2 (p^2 + m_0^2 c^2);$$

$$E = c \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2} \quad \text{или} \quad \frac{E^2}{c^2} = p^2 + m_0^2 c^2.$$

# Фотонная теория света.

---

Но т. к. для покоящегося фотона  $m_0 = 0$ ,  $m_0^2 c^2 = 0$ .

Получим:  $\frac{E^2}{c^2} = p^2$ , или  $p = \frac{E}{c}$ .

Т.к.  $E = h\nu$ , то можно записать:  $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{\hbar\omega}{c}$ .

Пусть  $k = \frac{\omega}{c}$ ,  $k$  — волновое число.

Выразим импульс через волновой вектор  $\vec{k}$  :  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$

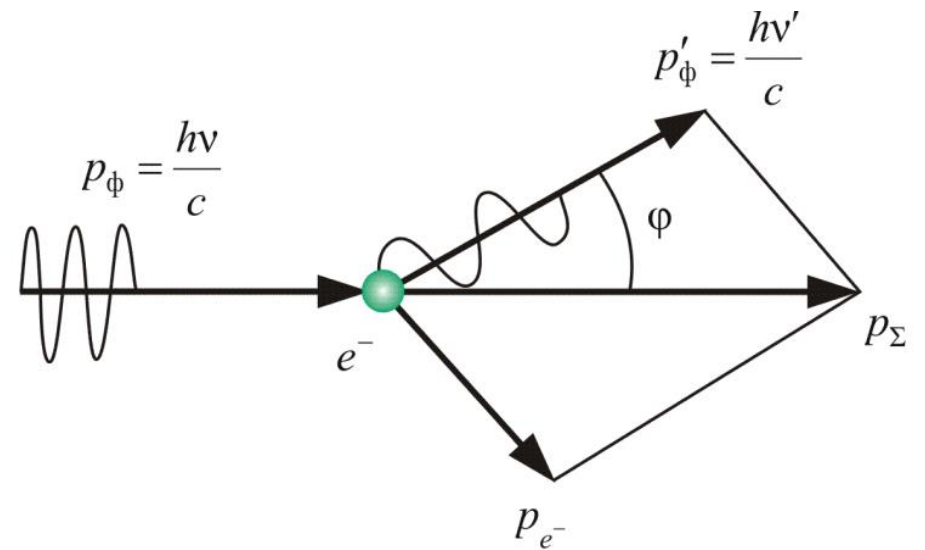
# Эффект Комптона

А.Г. Комптон выяснил:

Что частота рассеянного света  $\nu'$  меньше частоты падающего света  $\nu$ .

Уменьшение частоты указывало на потерю энергии!

**Эффект Комптона** – рассеяние электромагнитного излучения на свободном электроне, сопровождающееся уменьшением частоты излучения



# Эффект Комптона

$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  не зависит от длины волны  $\lambda$  падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния  $\varphi$  :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

где  $\lambda'$  — длина волны рассеянного излучения,

$\lambda_c$  — комптоновская длина волны ( рассеивание фотонов на электронах),

$$\lambda_c = 2,426 \text{ нм.}$$

# Давление света



## Основной постулат корпускулярной теории электромагнитного излучения:

электромагнитное излучение (и в частности свет) – это поток частиц, называемых фотонами.

- Фотоны распространяются в вакууме со скоростью, равной предельной скорости распространения взаимодействия,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с,
- масса и энергия покоя любого фотона равны нулю,
- энергия фотона  $E$  связана с частотой электромагнитного излучения  $\nu$  и длиной волны  $\lambda$  формулой:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

Эта формула связывает корпускулярную характеристику электромагнитного излучения, энергию фотона, с волновыми характеристиками – частотой и длиной волны.

# Давление света



Энергия частицы  $E$  и ее импульс  $p$  связаны формулой

$$E = \sqrt{E_0^2 + (cp)^2},$$

$E_0$  — энергия покоя частицы.

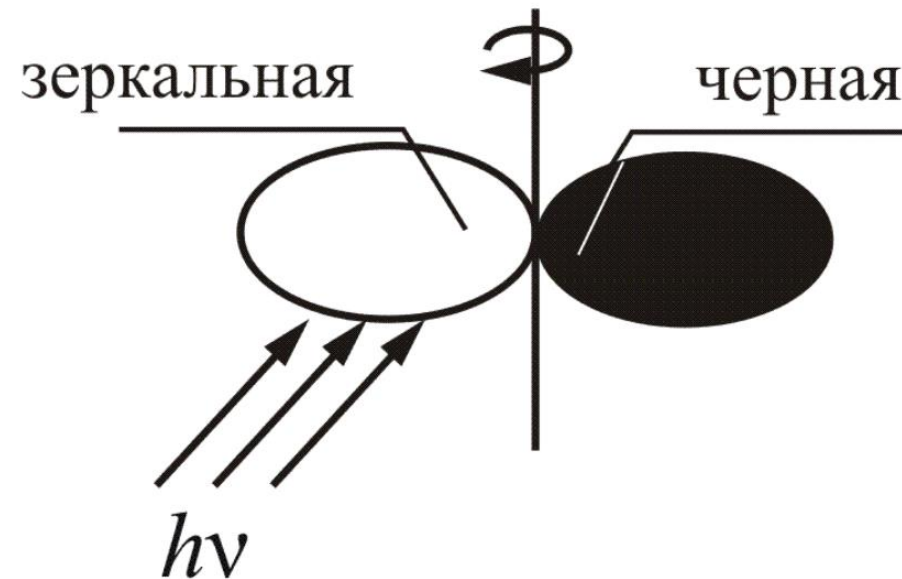
Так как энергия покоя фотона равна нулю, то

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



# Давление света

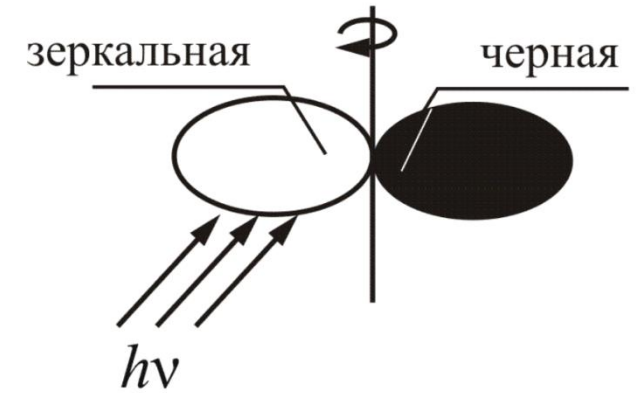
П.Н. Лебедев в 1901 году в своих опытах установил, что давление света зависит от интенсивности света и от отражающей способности тела.



# Давление света

Маленький пропеллер, состоящий из четырех лепестков, расположен на игле, которая накрыта стеклянным колпаком. Если осветить этот пропеллер светом, то он начинает вращаться. Если посмотреть на этот пропеллер в открытом воздухе, когда на него дует ветер, его вращение никого бы не удивило, но в данном случае стеклянный колпак не позволяет потокам воздуха действовать на пропеллер. Поэтому причиной его движения является свет.

Вычислим величину светового давления!



# Давление света

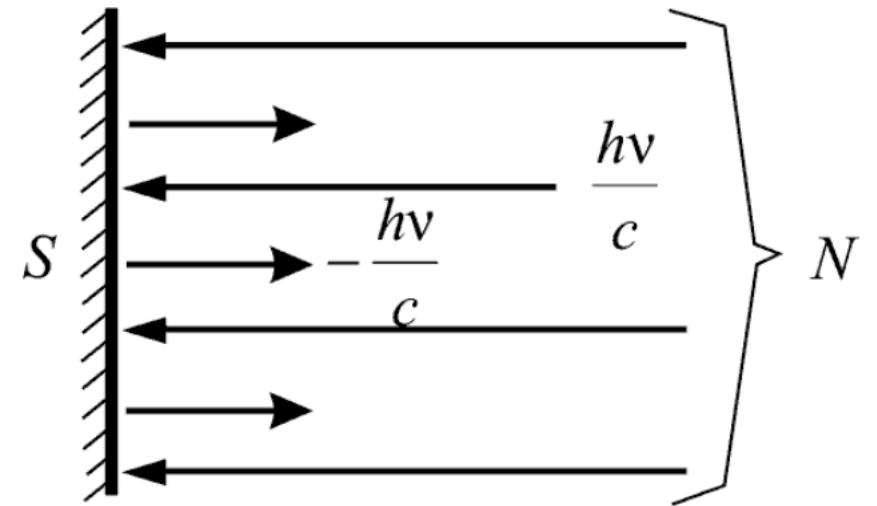
На тело площадью  $S$  падает световой поток с энергией  $E = N h \nu$ ,

Где  $N$  – число квантов.

$K N$  квантов отразится от поверхности;

$(1 - K) N$  – поглотится,

$K$  – коэффициент отражения.



Каждый поглощенный и отраженный фотон передадут

телу импульсы:

$$p_{\text{погл}} = \frac{h\nu}{c} \quad p_{\text{отр}} = \frac{2h\nu}{c} \quad , \quad \text{т.к.} \quad \frac{h\nu}{c} - \left(-\frac{h\nu}{c}\right) = \frac{2h\nu}{c} .$$

# Давление света

В единицу времени все  $N$  квантов сообщают телу импульс  $p$ :

$$p_{отп} = (1 - K)N \frac{h\nu}{c} + \frac{2h\nu}{c} NK.$$

**Сила давления** – сила, отнесенная к единице поверхности.

Тогда давление  $p = F/S$ , или

$$p = \frac{\frac{2h\nu}{c} KN + \frac{h\nu}{c} N(1 - K)}{S} = \frac{h\nu N}{cS} (1 + K) = J \frac{(1 + K)}{c},$$

где  $J$  – интенсивность излучения.

# Давление света

---

В итоге давление света можно рассчитать:

$$P = J \frac{1+K}{c},$$

- если тело зеркально отражает, то  $K = 1$  и  $P = \frac{2J}{c}$ ,
- если полностью поглощает (абсолютно черное тело), то  $K = 0$  и  $P = \frac{J}{c}$ ,

т.е. световое давление на абсолютно черное тело в два раза меньше, чем на зеркальное

# Давление света

**Вывод:** Световое излучение оказывает давление на материальные предметы! Причем величина давления пропорциональна интенсивности излучения.

Одним из следствий давления солнечного света, является то, что кометы, пролетающие вблизи Солнца, имеют «хвосты»

