

Сегодня: \*



## Краткий курс лекций по физике

Кузнецов Сергей Иванович  
доцент к. ОФ ЕНМФ ТПУ

## **Тема 2. КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОПТИКЕ**

**2.1. Фотоэффект и его виды**

**2.2. Законы внешнего фотоэффекта**

**2.3. Фотонная теория света.  
Масса, энергия и импульс фотона**

**2.4. Эффект Комптона**

**2.5. Тормозное рентгеновское излучение**

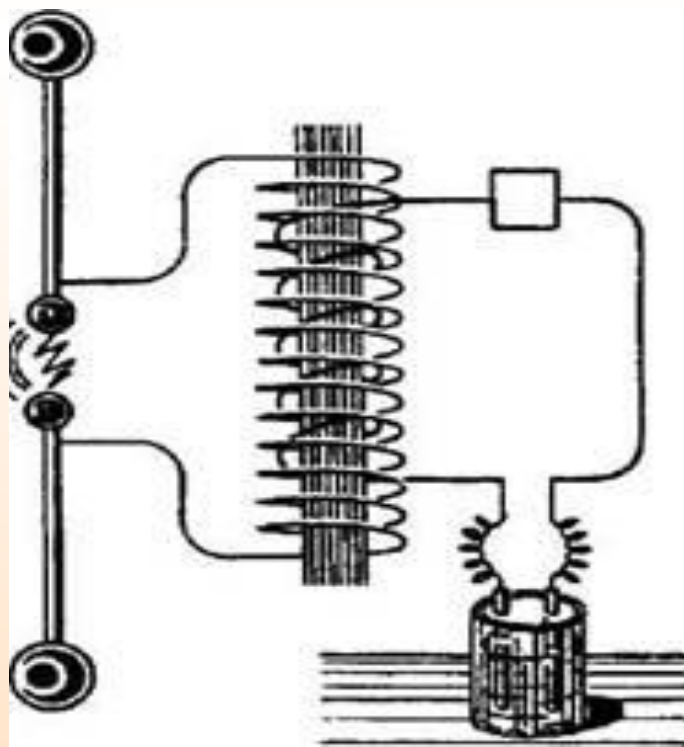
**2.6. Характеристическое рентгеновское  
излучение**

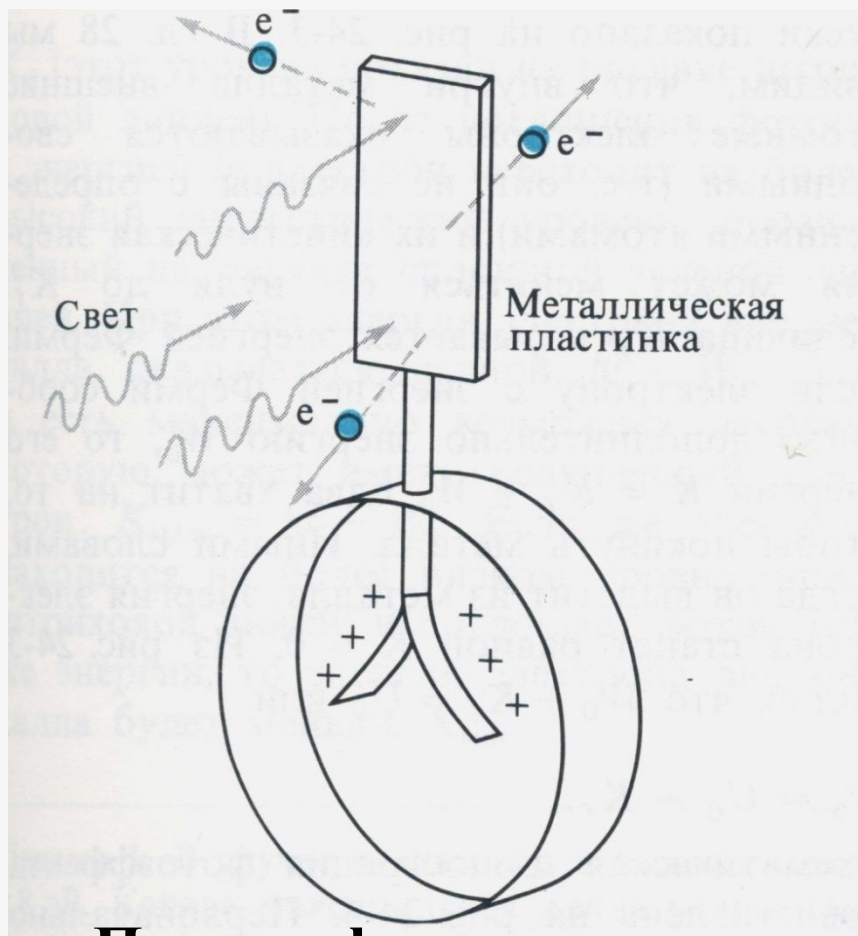
**2.7. Давление света**

**2.8. Двойственная природа света**

## 2.1. Фотоэффект и его виды

Открыт Г. Герцем в 1887 – проскакивание искры между цинковыми шариками разрядника заметно **увеличивается**, если один из шариков осветить УФ лучами.





**Первые фундаментальные исследования фотоэффекта выполнены русским ученым**

**А.Г. Столетовым.**

**Нейтральный электроскоп, соединен с металлической пластинкой. При освещении пластинки светом из нее выбиваются фотоэлектроны, и листочки заряжаются положительно**

# Виды фотоэффекта

Различают *фотоэффект внешний, внутренний, вентильный и многофотонный.*

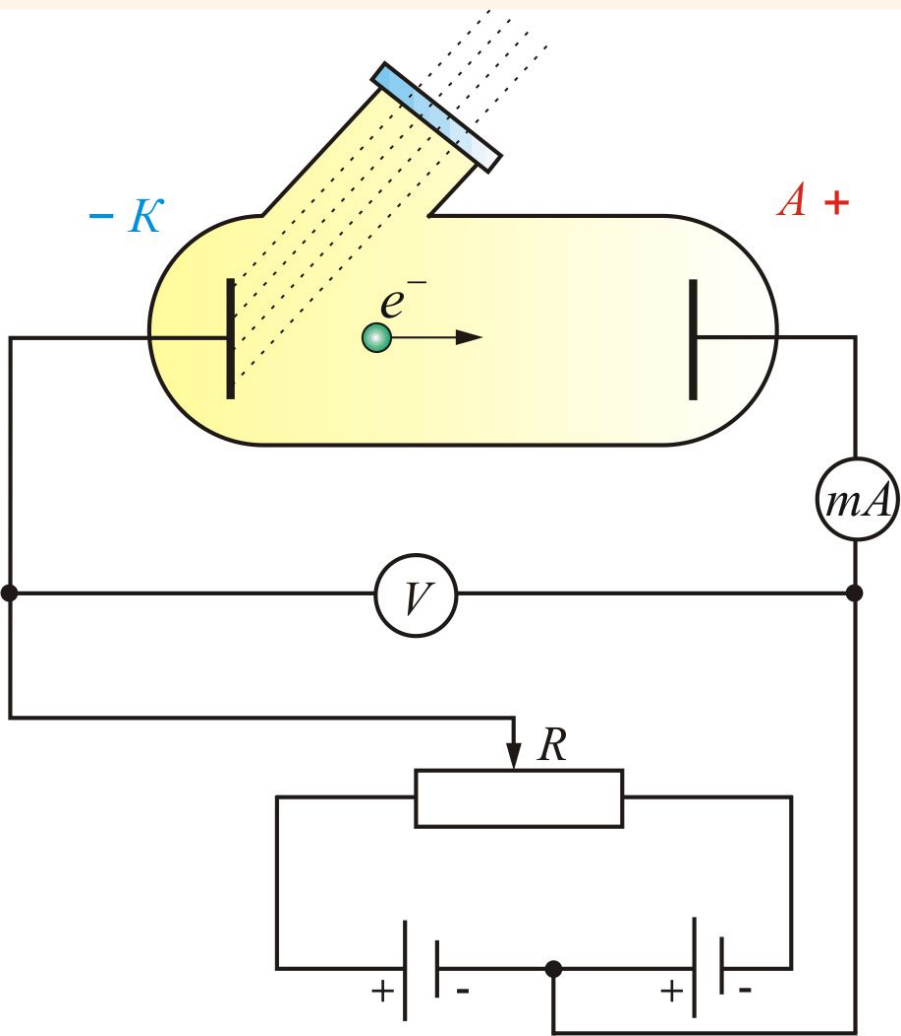
***Внешним фотоэффектом*** называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.

***Внутренний фотоэффект*** – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу.

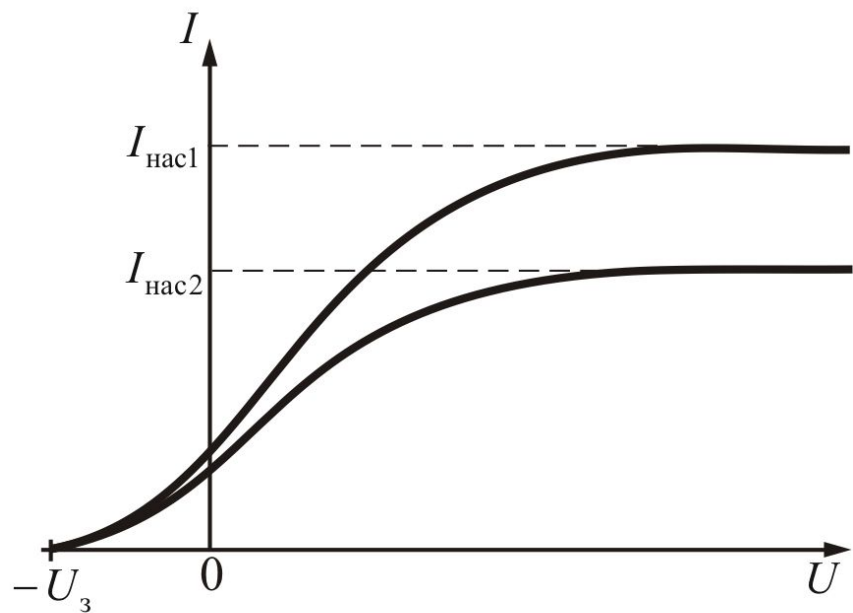
***Вентильный фотоэффект,*** – возникновение эдс (фото-эдс) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля).

***Многофотонный фотоэффект*** возможен, если интенсивность света очень большая (при использовании лазерных пучков). При этом электрон, испускаемый металлом, может одновременно получить энергию не от одного, а от нескольких фотонов.

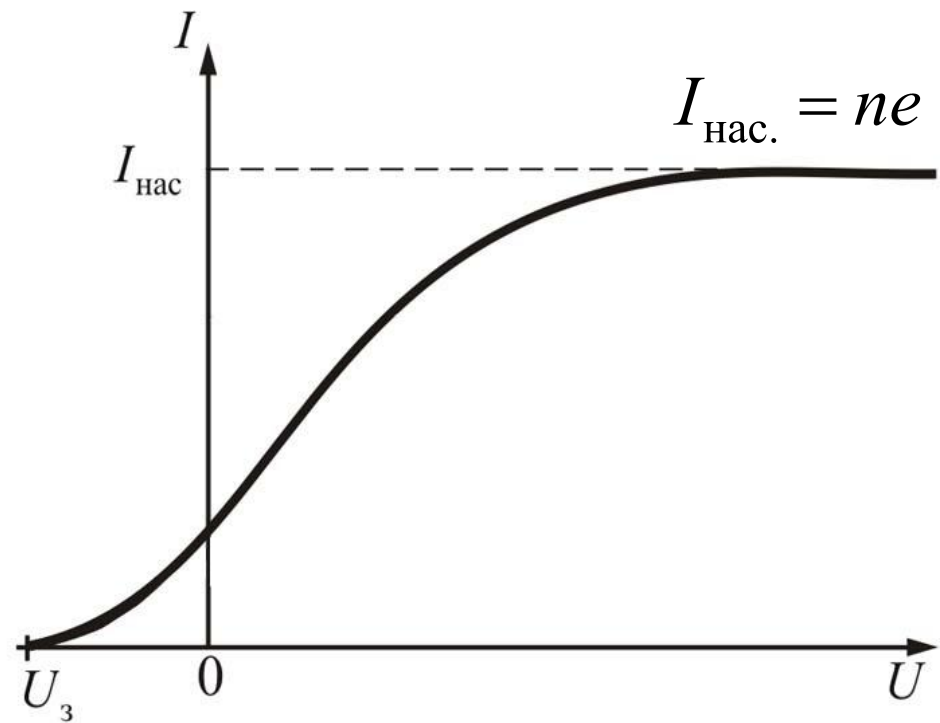
В 1899 Дж. Дж. Томпсон и Ф. Ленард доказали, что при фотоэффекте **свет выбивает из вещества электроны.**



**Вольтамперная характеристика (ВАХ)**



Максимальное значение тока  $I_{\text{нас.}}$  — **фототок насыщения** — определяется таким значением  $U$ , при котором **все электроны, испускаемые катодом, достигают анода**:  $I_{\text{нас.}} = ne$ , где  $n$  — число электронов испускаемых катодом в 1 с



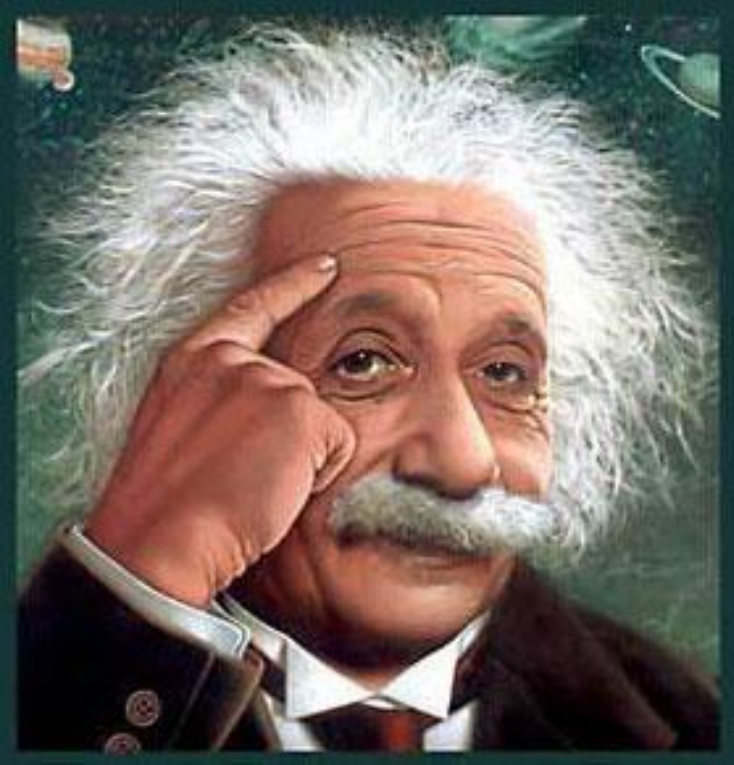
Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить **задерживающее напряжение**  $U_3$  
$$\frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2} = eU_3$$



# Законы фотоэффекта:

1. **Закон Столетова:** при фиксированной частоте падающего света **число фотоэлектронов**, вырываемых из катода в единицу времени, **пропорционально интенсивности света**.
2. **Максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой  $\nu$ .**
3. **Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота  $\nu_0$  света** (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), **ниже которой фотоэффект невозможен:**  
$$\nu \geq \nu_0 = \frac{A}{h}$$





Объяснение наблюдаемых экспериментально закономерностей было дано Эйнштейном:

Свет не только испускается (Планк), но и распространяется, и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых :  
 $\varepsilon = h\nu.$

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

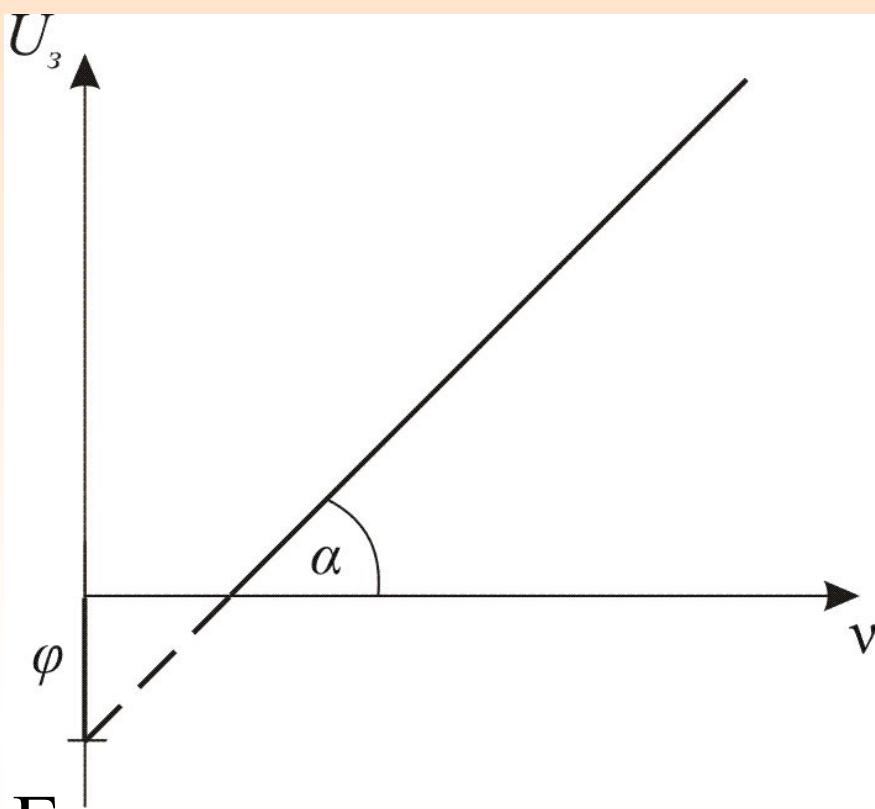
$$h\nu = \frac{mV_{\max}^2}{2} + A.$$

$A$  – работа выхода электронов.

## Из теории Эйнштейна для фотоэффекта следует:

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 (подтверждение I закона фотоэффекта).
2. При увеличении частоты падающего света максимальная кинетическая энергия электронов возрастает линейно по формуле Эйнштейна (т.е. II закон фотоэффекта).

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



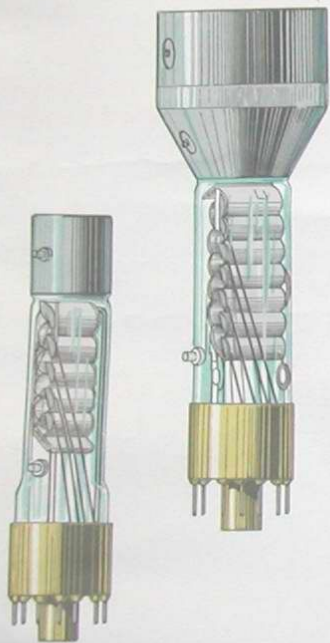
$$\frac{mv_{\text{макс.}}^2}{2} = h\nu - A$$

$$eU_3 = h(\nu - \nu_0)$$

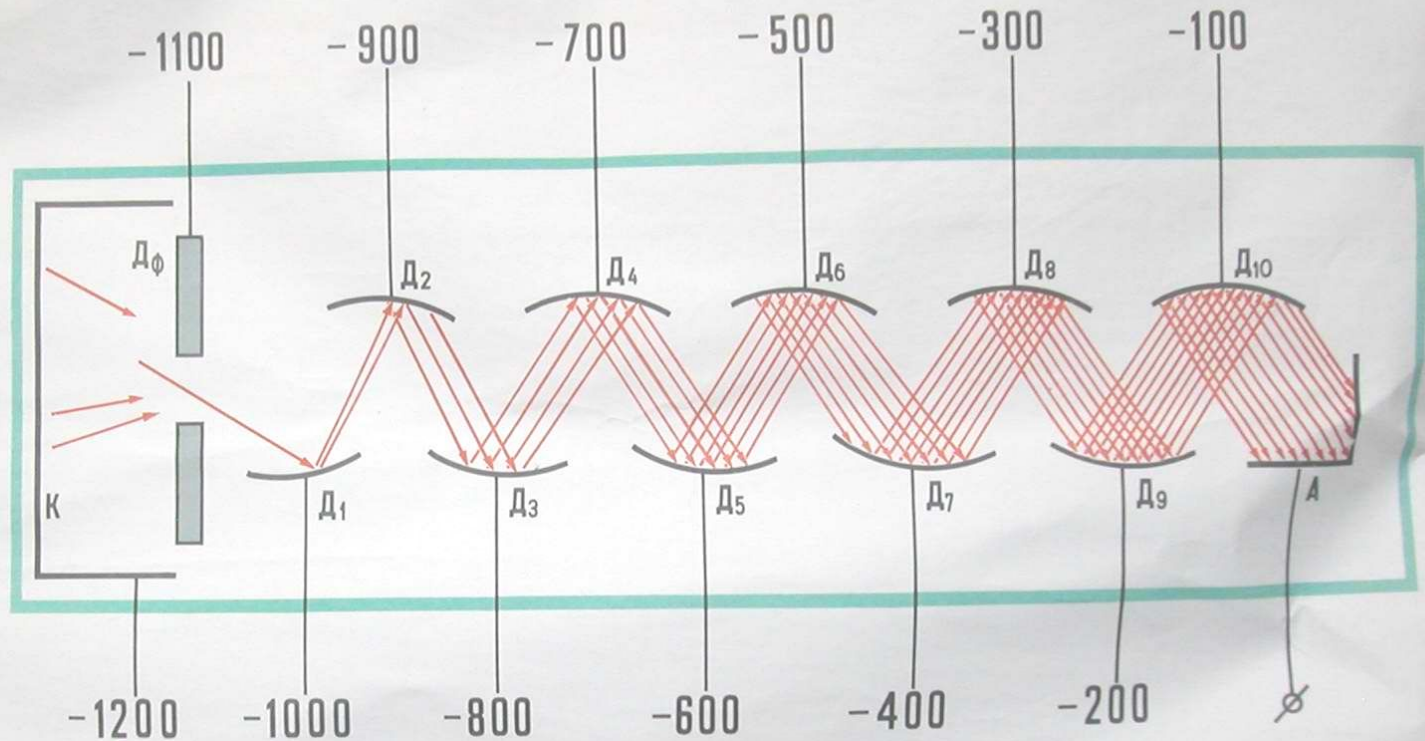
3. Если частота  $\nu$  меньше частоты  $\nu_0$ , при которой  $h\nu_0 = A$ , то выбивание электронов с поверхности не происходит. (III закон).

Уравнение Эйнштейна было подтверждено опытами Милликена, выполненными в 1913 – 1914 гг.

# ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ



ВНЕШНИЙ  
ВИД  
ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

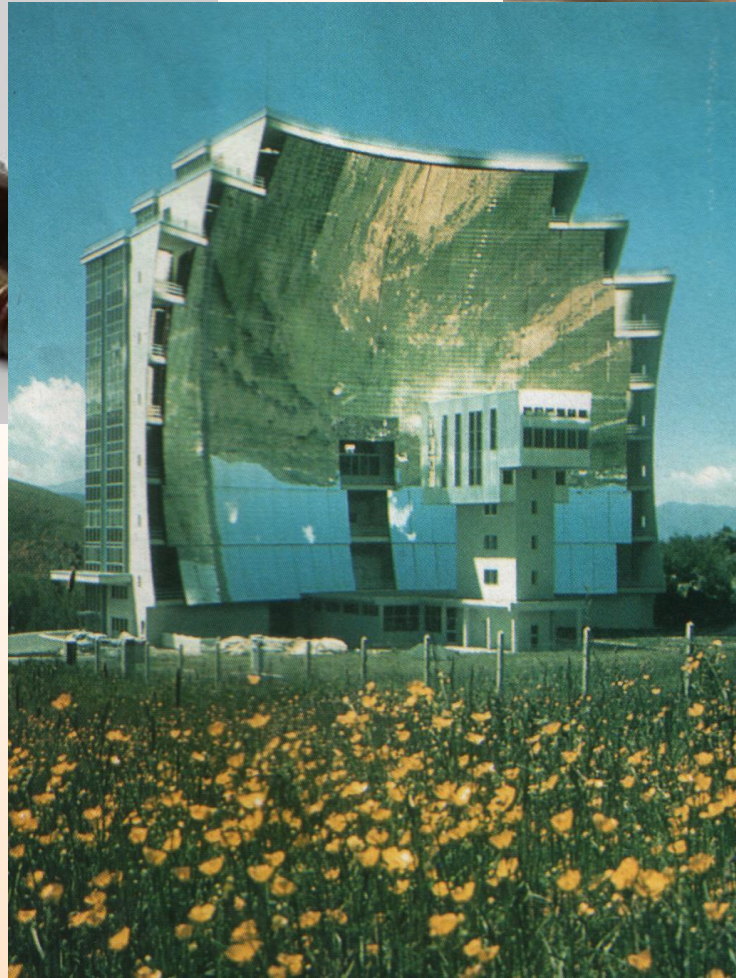
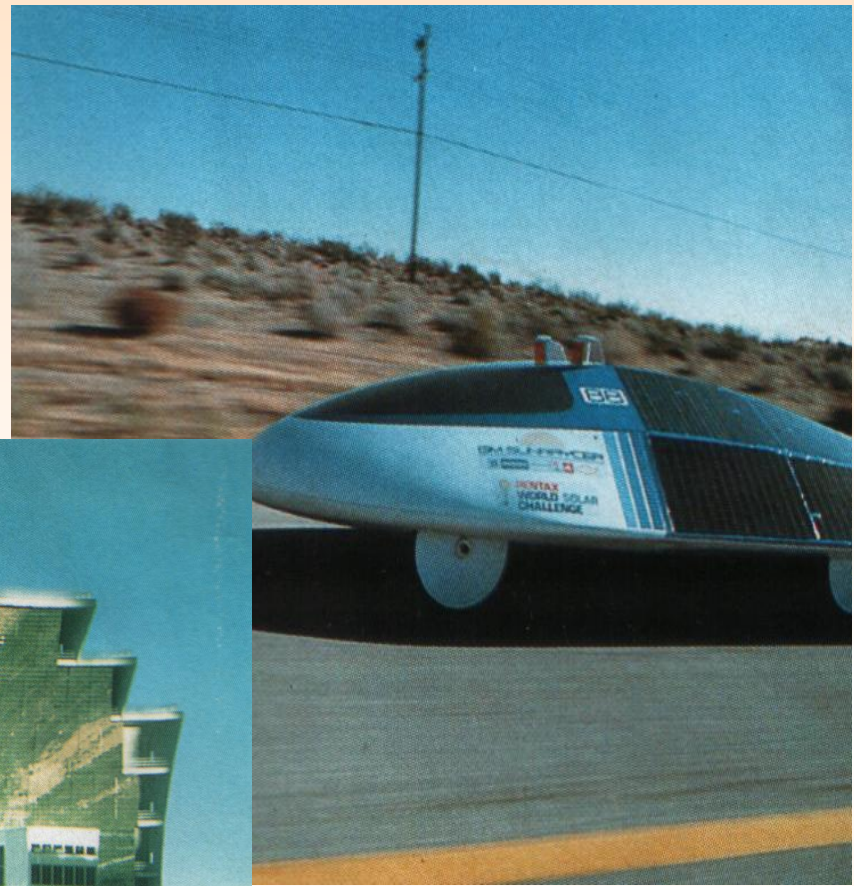


К - КАТОД  
 Д<sub>Ф</sub> - ФОКУСИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОД  
 Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub>, Д<sub>3</sub> ... - ДИНОДЫ (ЭМИТТЕРЫ)  
 А - АНОД (КОЛЛЕКТОР)

МАТЕРИАЛ КАТОДА:  
*Sb-Cs* или *Bi-Ag-Cs*  
 МАТЕРИАЛ ЭМИТТЕРА:  
 АМГК или *Cu-Al-Mg*

РАБОЧЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ ДО 2500 В  
 ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДО  $1000 \alpha/\text{ЛМ}$   
 КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ  $\sim 10^8$   
 ВРЕМЯ НАРАСТАНИЯ ИМПУЛЬСА  $\sim 10^{-9}$  СЕК  
 МАКСИМАЛЬНЫЙ ТОК В ИМПУЛЬСЕ  $\sim 0.5 - 1.5 \alpha$







## 2.3. Фотонная теория света. Масса, энергия и импульс фотона

В 1905г. Эйнштейн выдвинул смелую идею, обобщавшую гипотезу квантов, и положил ее в основу новой теории света (квантовой теории фотоэффекта).

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

$$\varepsilon_0 = h\nu.$$

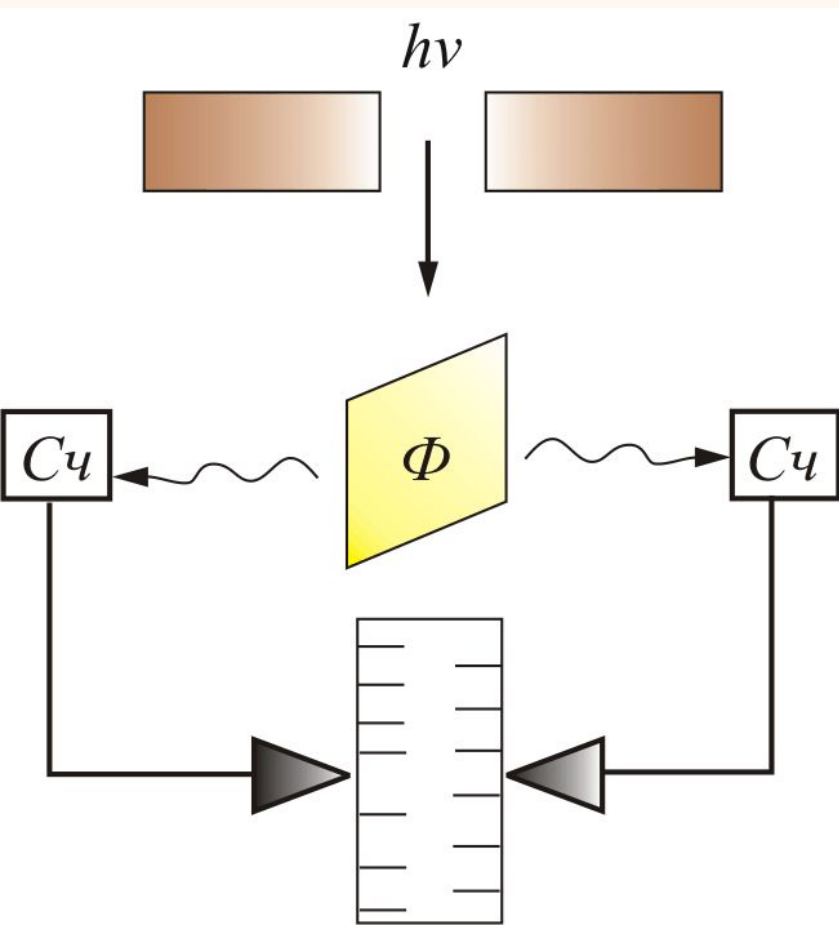
Таким образом, распространение света нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов, движущихся со скоростью  $c$  распространения света в вакууме

*Кванты электромагнитного излучения* получили название *фотонов*.



## Опыт Боте.

подтверждающий  
гипотезу Эйнштейна



Тонкая металлическая фольга  $\Phi$  помещена между двумя газоразрядными счетчиками  $Cu$ .

При облучении рентгеновскими лучами  $\Phi$  становится источником рентгеновского излучения.

При попадании рентгеновских лучей счетчик срабатывает и с помощью спец. устройства делает метку на движущейся ленте.

Метки располагались на ленте **хаотично**, что свидетельствует о квантовой природе излучения – в каждом акте испускания направление движения частиц свое

## Масса, энергия и импульс фотона

**Фотон обладает энергией**  $W = h\nu = h(c/\lambda)$ .

Для видимого света  $\lambda = 500 \text{ \AA}$  и  $W = 2,2 \text{ эВ}$ ,  
для рентгеновских лучей  $\lambda = 10^{-4} \text{ \AA}$  и  $W = 0,5 \text{ эВ}$ .

**Фотон обладает инертной массой:**

$$W = mc^2 \Rightarrow m_{\phi} = W/c^2 = hc/\lambda c^2 = h/c\lambda; \quad m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$$

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

Подставим это значение скорости в выражение:

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

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

*Релятивистское выражение для импульса:*  $p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

*И для энергии:*  $E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ .

*Отсюда связь :*

$$E = c \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}$$

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

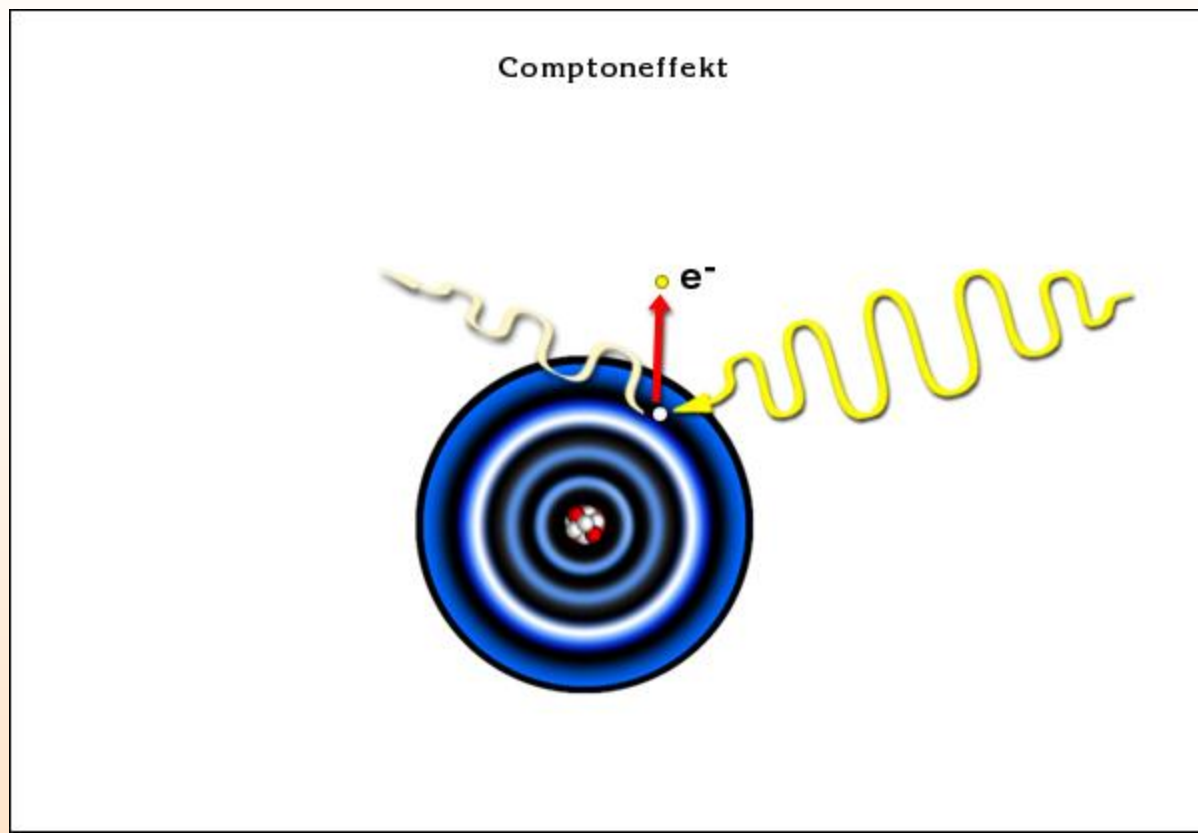
$$p = \frac{h}{\lambda}, \quad k = \frac{\omega}{c} \quad \text{— волновое число}$$

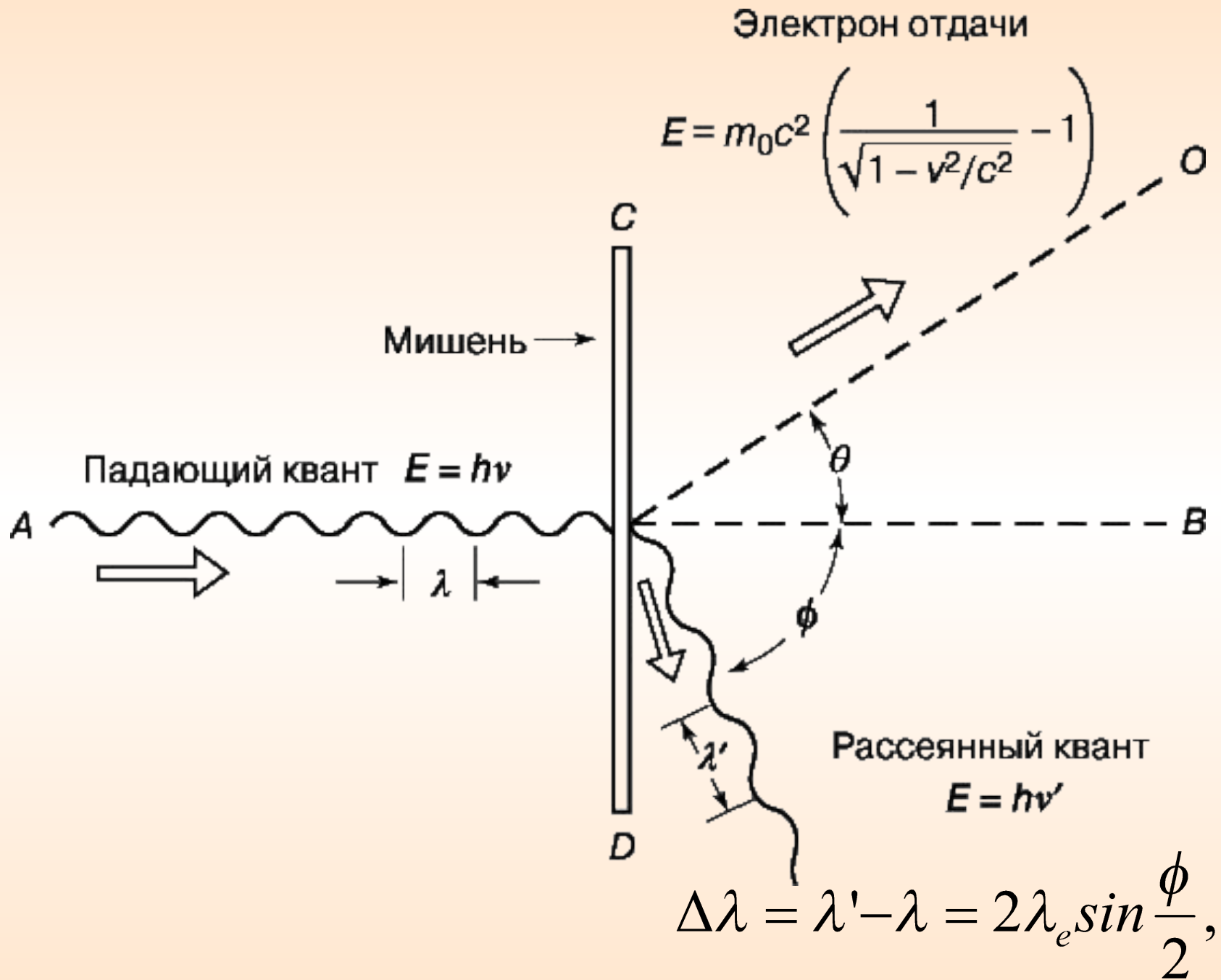
$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}$$

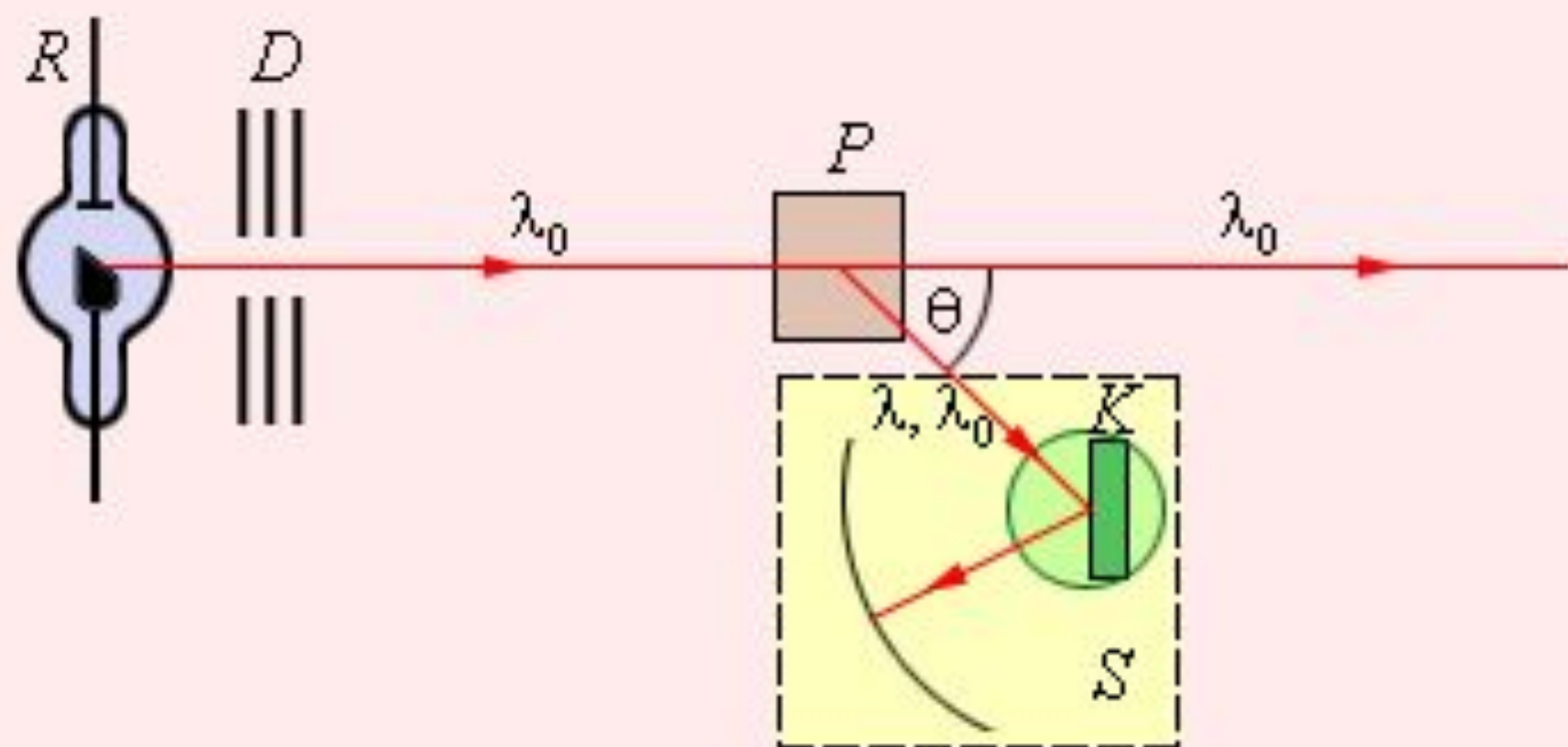
$\mathbf{k}$  — волновой вектор фотона.

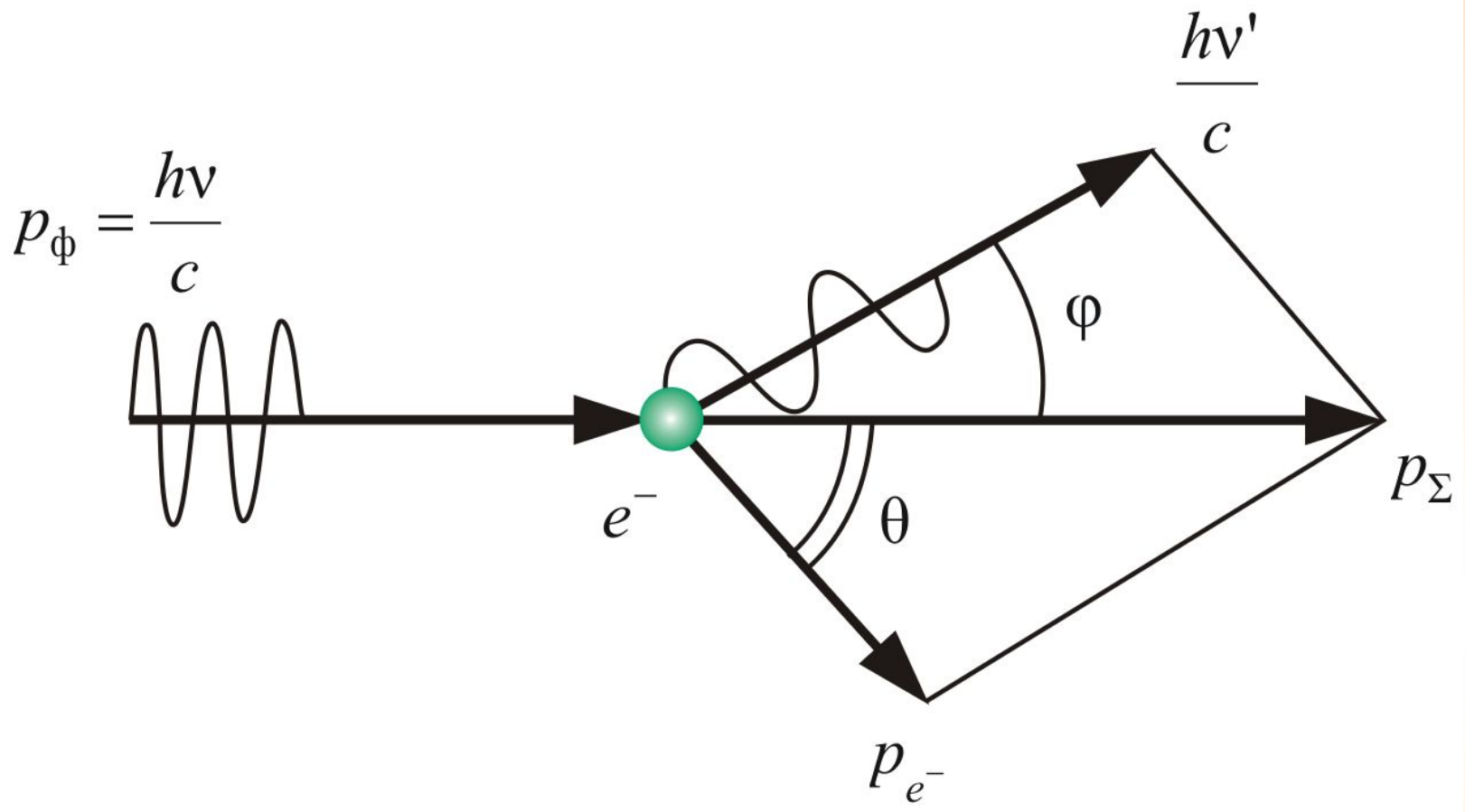
## 2.4. Эффект Комптона

А.Г. Комpton занимался изучением рассеяния рентгеновского излучения различными веществами и обнаружил, что частота рассеянного света меньше частоты падающего света.





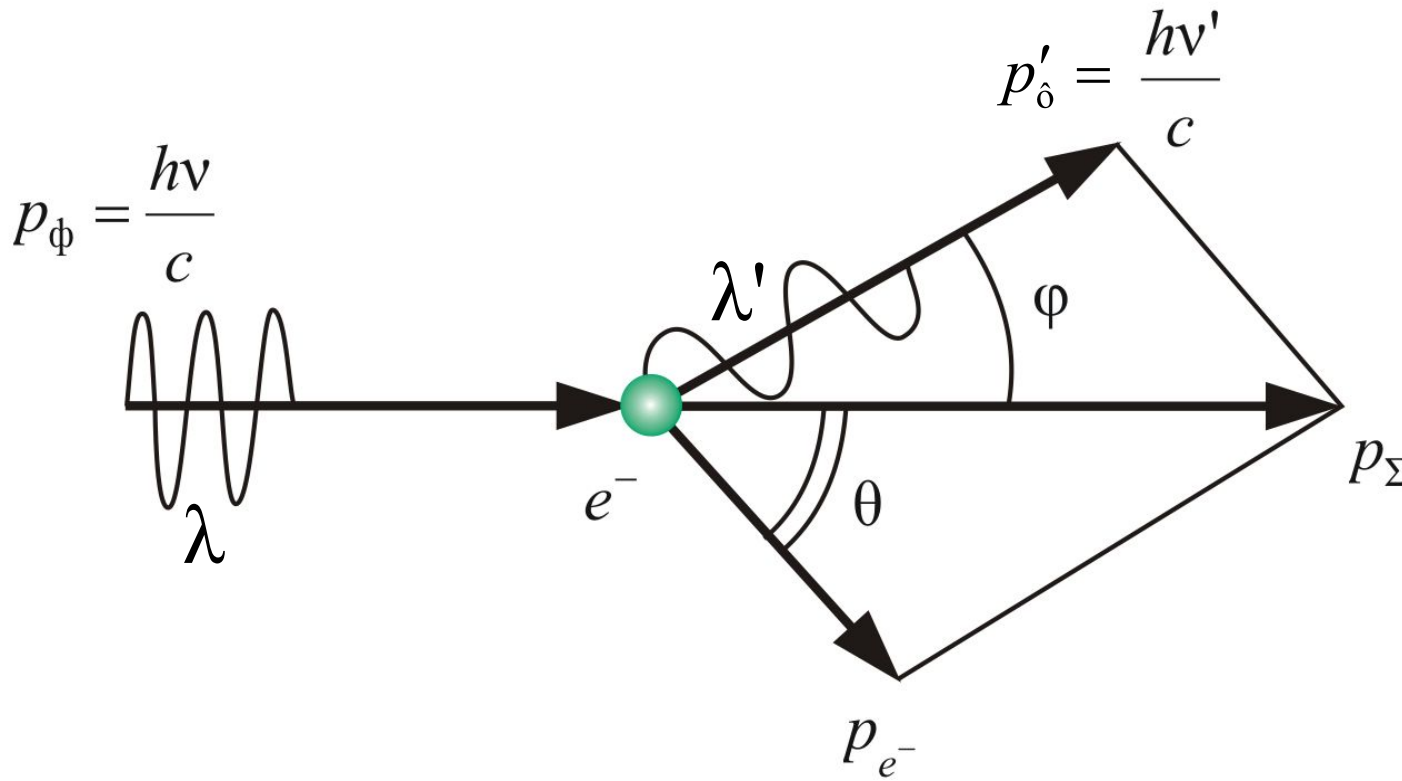




$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_c \sin \frac{\phi}{2},$$



Объяснение явления возможно, если рассматривать *рассеяние как процесс упругого столкновения фотона со слабо связанными электронами атома:*



При рассеянии на покоящемся электроне фотон отдает ему часть энергии.

$p_\phi$  – импульс фотона до столкновения;

$p_{e^-}$  – импульс электрона;

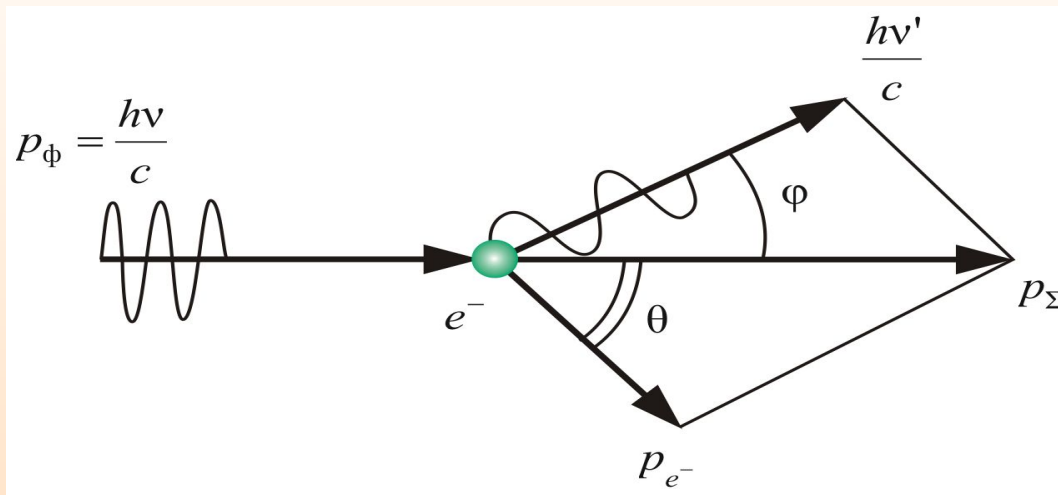
$p_\Sigma$  – суммарный импульс фотона и электрона после столкновения;

$\theta$  – угол рассеяния.

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

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

$\lambda'$  – длина волны рассеянного излучения,  
 $\lambda_e$  – комптоновская длина волны  
(при рассеянии фотона на электроне  $\lambda_e = 2,426$  пм).



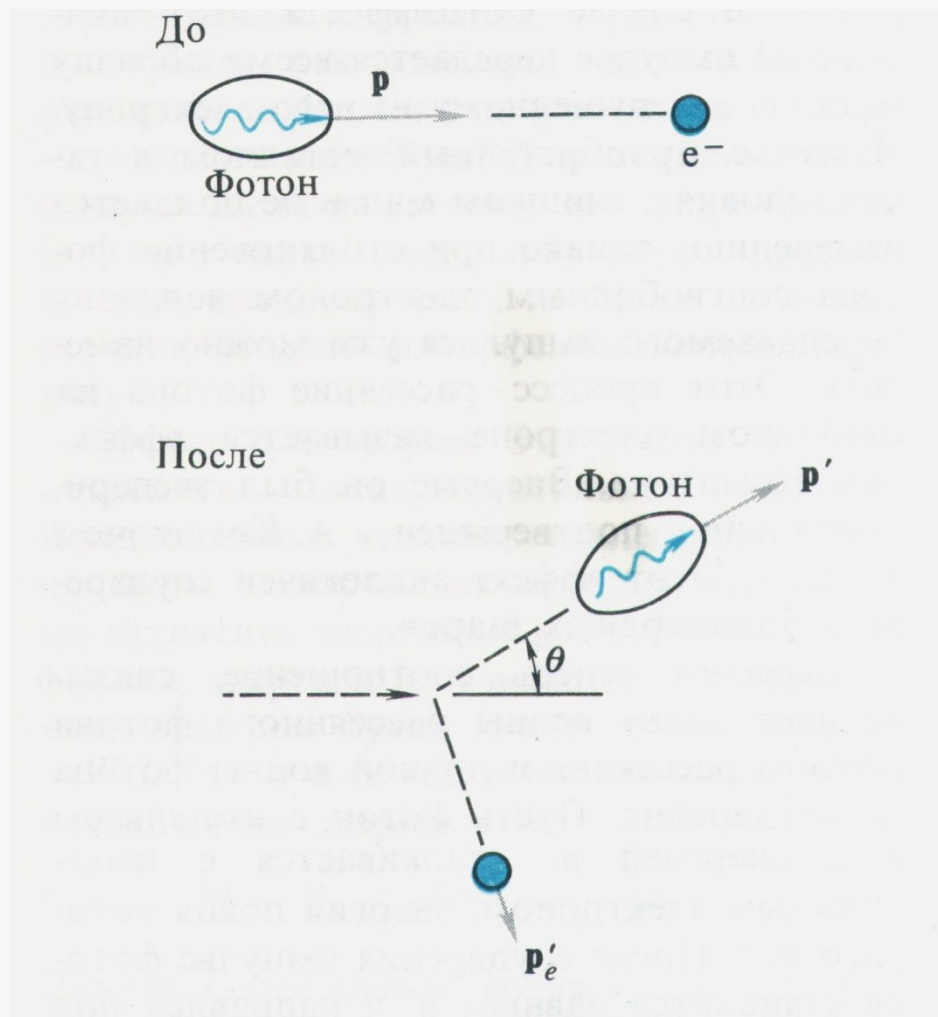
Опытным путем Комптон установил, что  $\Delta\lambda$ -разность длин волн рассеянного и падающего излучения не зависит от материала рассеивателя, а определяется только величиной угла рассеяния  $\theta$ :

$$\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos\theta).$$

– формула Комптона.

Значение постоянной  $\lambda_c = 2,426 \cdot 10^{-12}$  м Комптон определил экспериментально.

Выведем соотношение, связывающее длину волны рассеянного фотона с углом рассеяния и длиной волны фотона до соударения.



**Рис. 6. Эффект Комптона.  
Соударение фотона со  
свободным электроном.**

Пусть фотон с импульсом  $\mathbf{p}$  и энергией  $pc$  сталкивается с неподвижным электроном.

Энергия покоя электрона  $mc^2$ .

После соударения импульс фотона  $\mathbf{p}'$  и направлен под углом  $\theta$ .

Импульс электрона отдачи  $\mathbf{p}'_e$ , а полная релятивистская энергия  $E'_e$ .

Запишем законы сохранения энергии и импульса до и после столкновения:

Закон сохранения энергии:

$$pc + mc^2 = p'c + E'_e$$

$$(p - p' + mc)^2 = (E'_e / c)^2$$

Закон сохранения импульса

$$\mathbf{p} - \mathbf{p}' = \mathbf{p}'_e$$

Откуда находим

$$p' = \frac{p}{1 + \frac{p}{mc} (1 - \cos \theta)}$$

Воспользовавшись тем, что  $p = h/\lambda$ , получаем

$$\frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)}$$

или

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

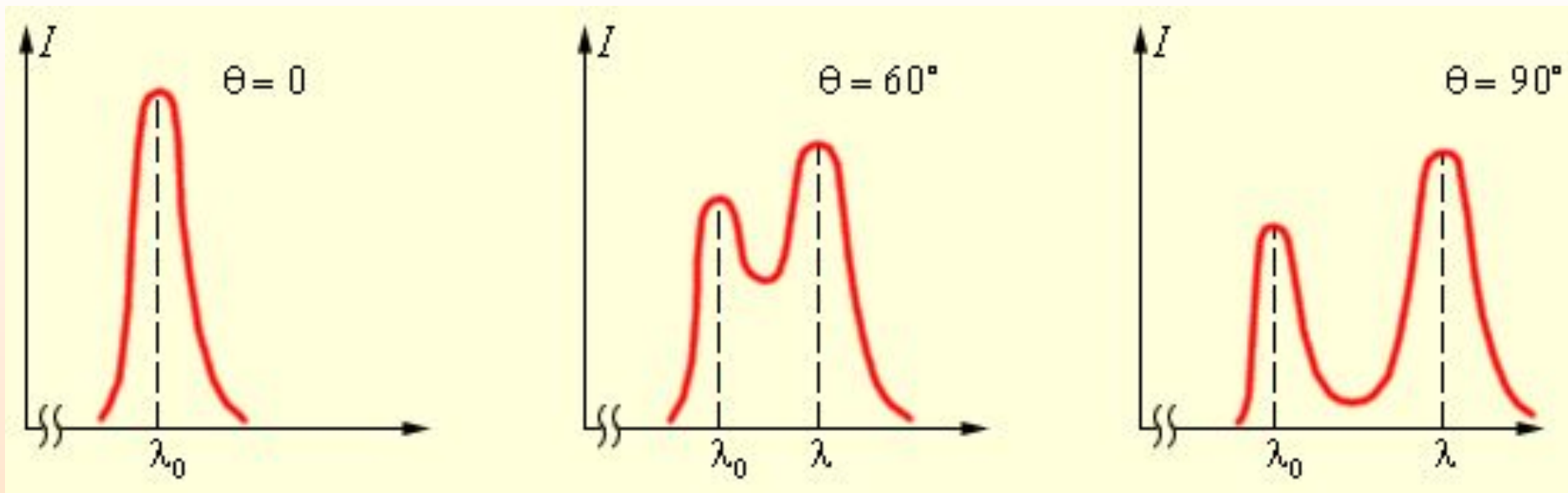


Здесь  $\lambda_0 = \frac{h}{mc} = 0,024 \text{ \AA}$  – постоянная Комптона.

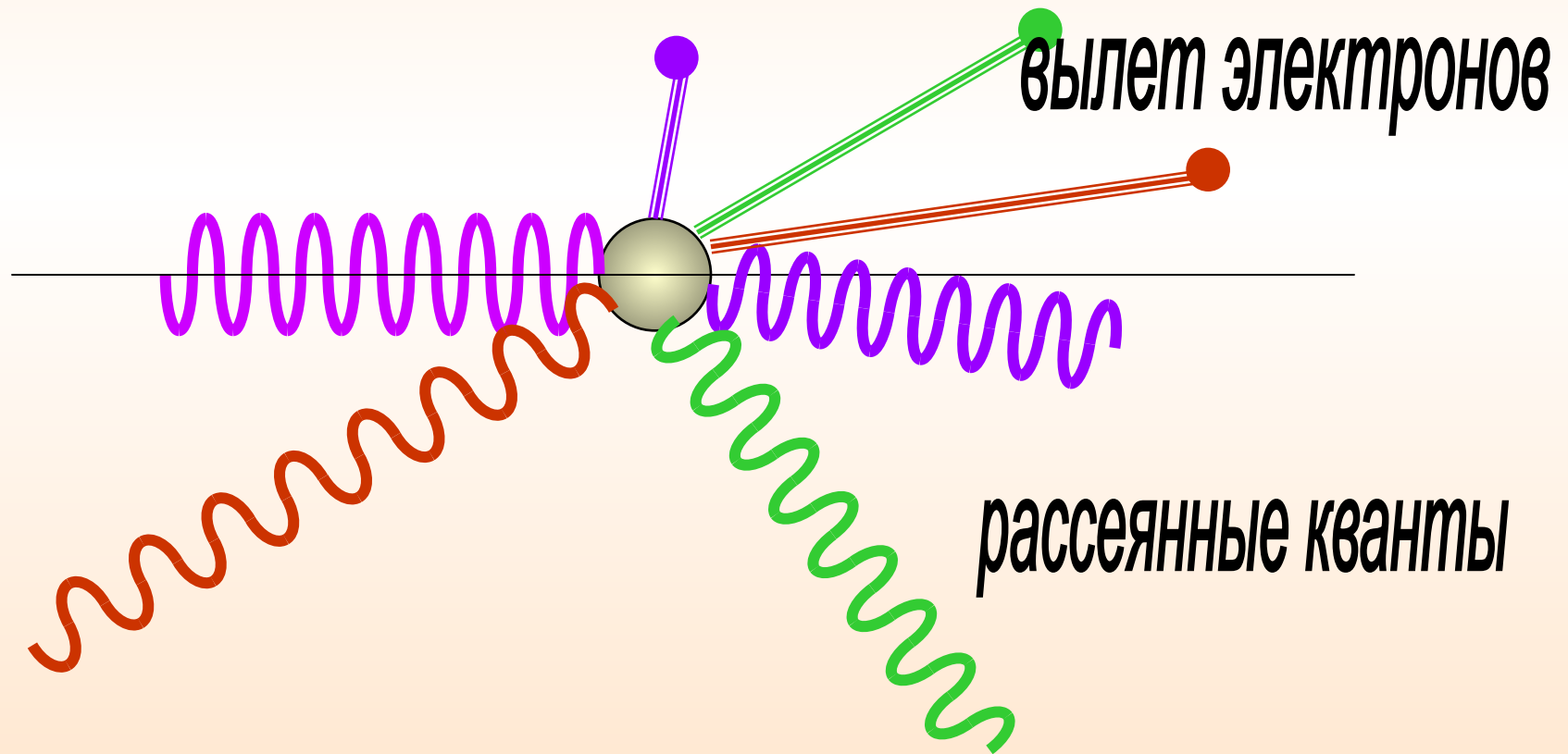
В диапазоне энергий квантов 0,1–10 МэВ комптон–эффект является основным физическим механизмом энергетических потерь  $\gamma$ –излучения при его распространении в веществе.

# Моделирование эффекта Комптона

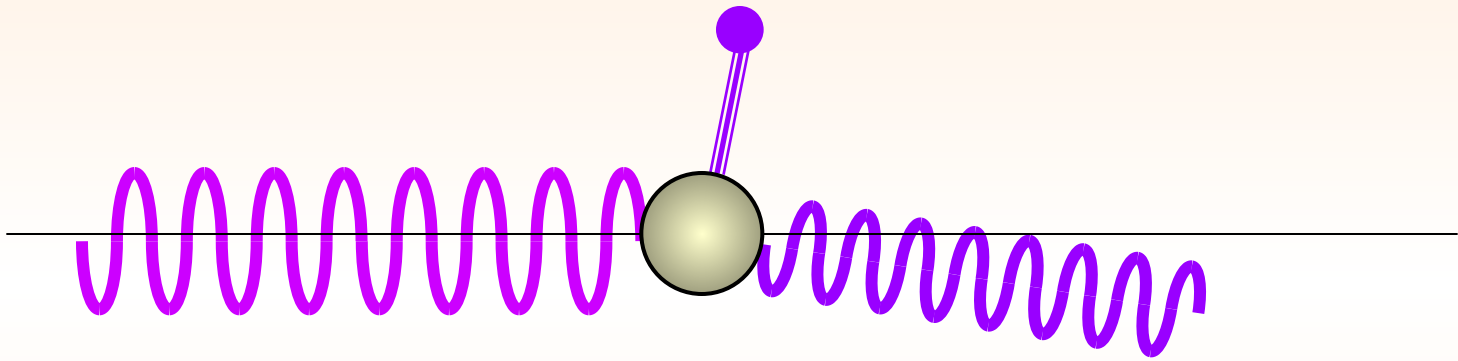
*Разность  $\Delta\lambda$  не зависит от длины волны  $\lambda$  падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния  $\varphi$*



# моделирование эффекта Комптона

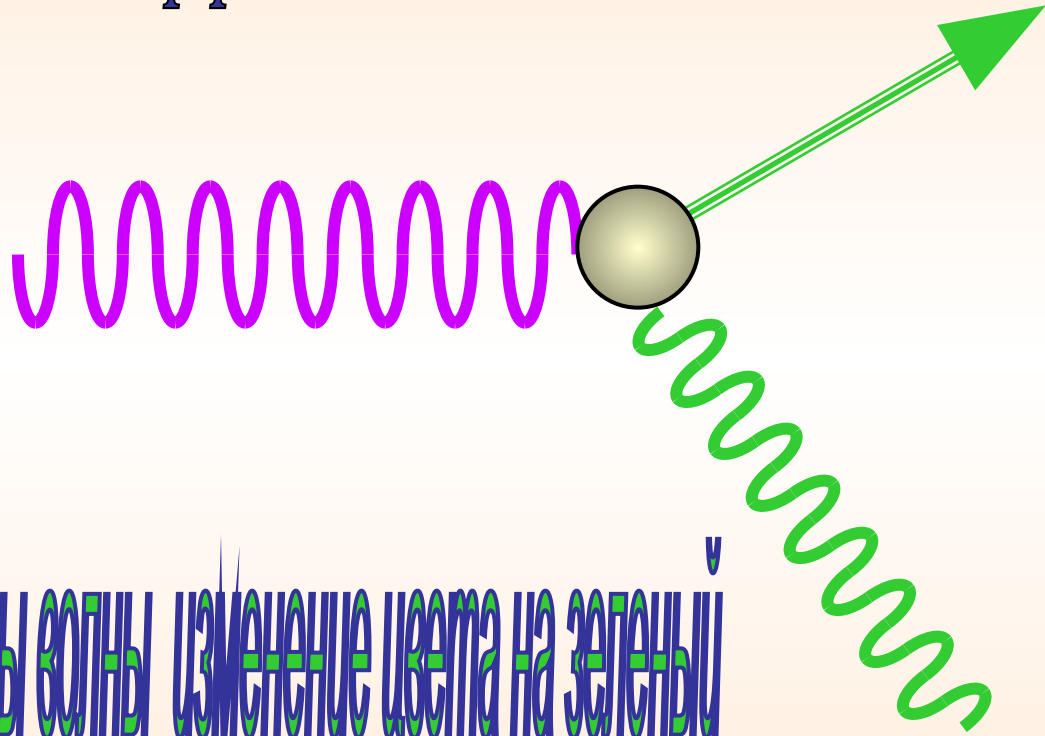


# моделирование эффекта Комптона



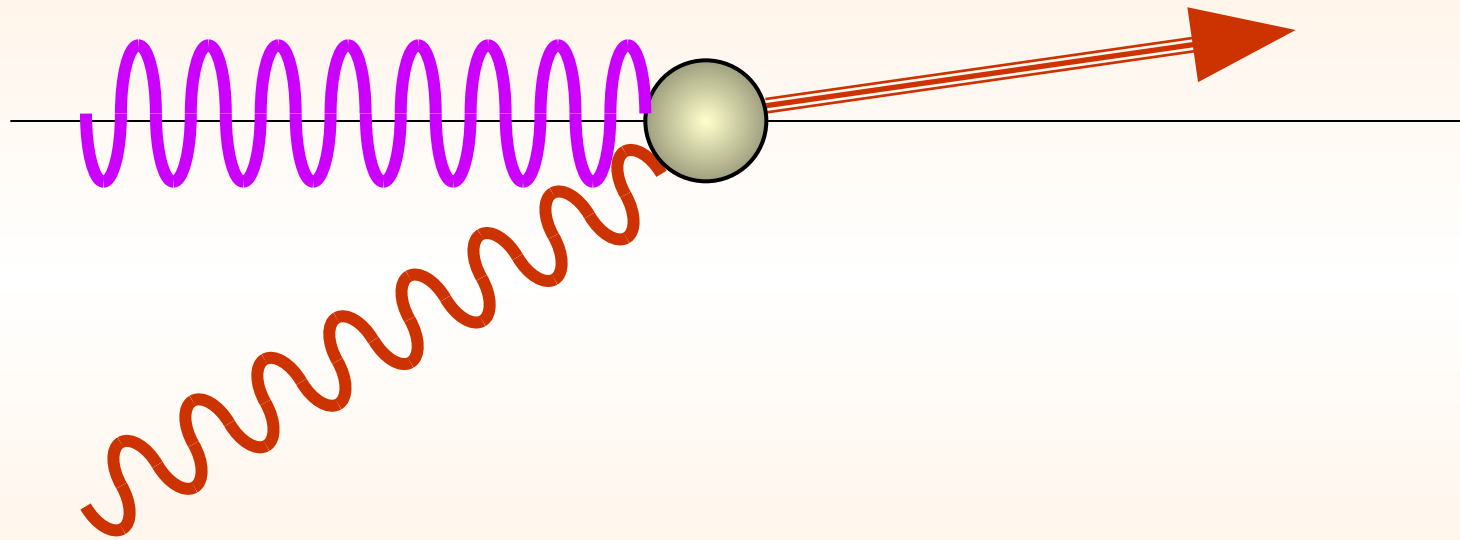
короткая длина волны синий цвет

# моделирование эффекта Комптона



увеличение длины волны изменение цвета на зеленый

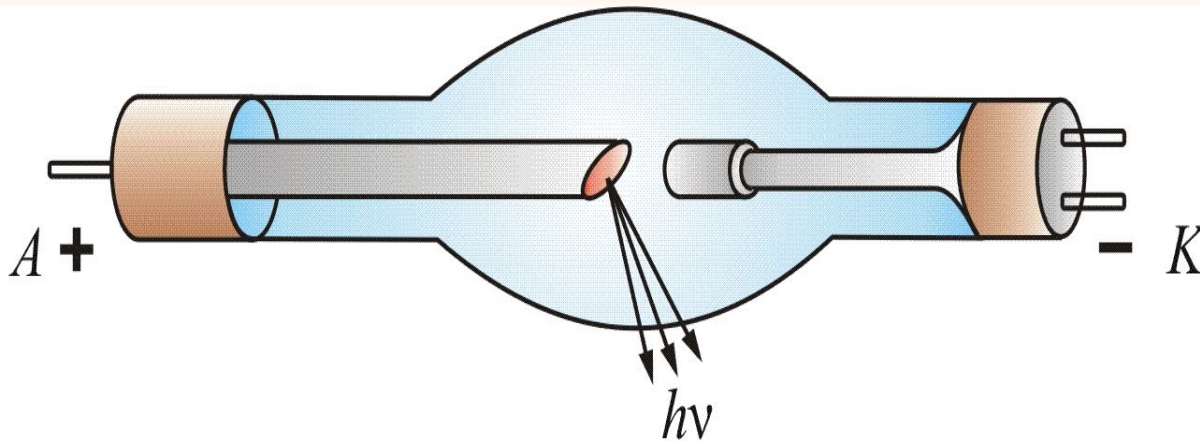
# моделирование эффекта Комптона



еще большее увеличение длины волны  
изменение цвета на красный

## 2.5. Тормозное рентгеновское излучение

Квантовая природа излучения подтверждается также *существованием коротковолновой границы тормозного рентгеновского спектра.*



За время торможения электрон излучает энергию

$$W = U\tau = e^2 a^2 \tau = \frac{e^2 v_0^2}{\tau}$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

– начальная скорость электрона.



Заметное излучение наблюдается при резком торможении быстрых электронов, начиная с  $U \sim 50$  кВ, при этом  $\nu_0 \approx 0,4 c$  ( $c$  – скорость света).

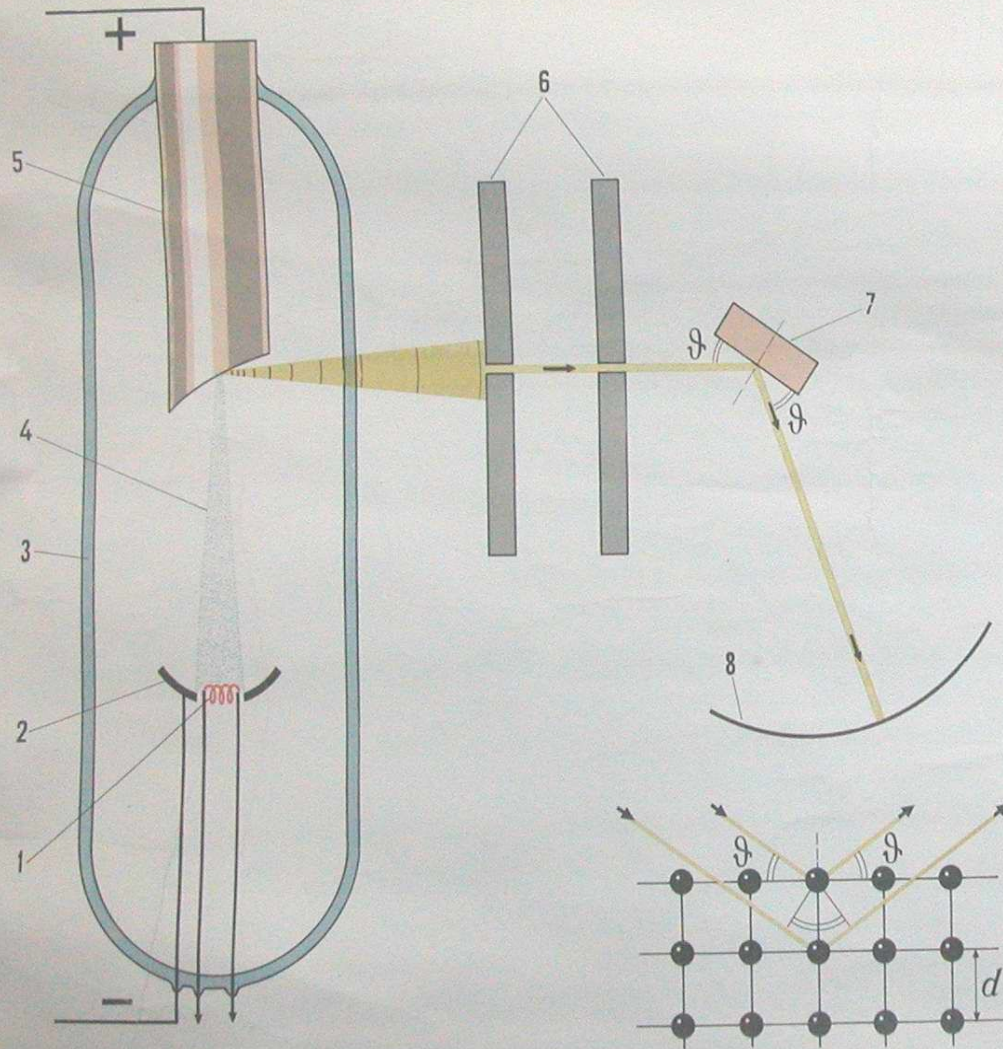
В индукционных ускорителях электронов – **бетатронах**, электроны приобретают энергию до 50 МэВ,  $v = 0,99995 c$ .

Направив такие электроны на твердую мишень, получим **рентгеновское излучение с малой длиной волны**.

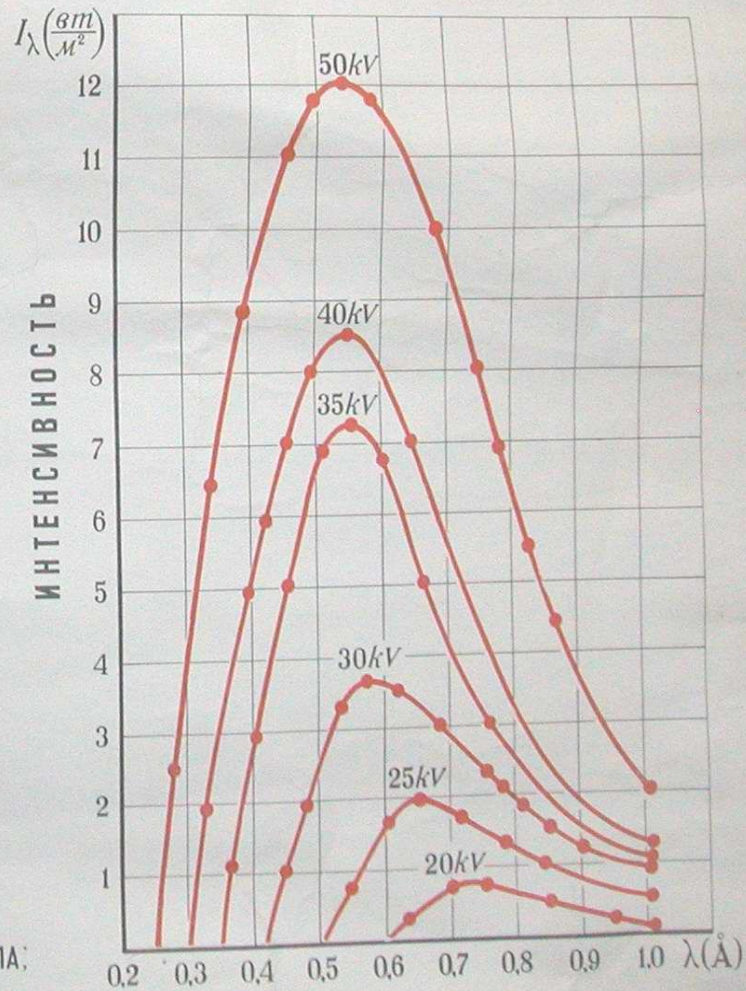
Это излучение обладает большой проникающей способностью.

# РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

## СПЛОШНОЙ (ТОРМОЗНОЙ) СПЕКТР



ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ  $I_\lambda$   
 ДЛЯ ВОЛЬФРАМОВОГО АНОДА ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ  $\lambda$   
 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ



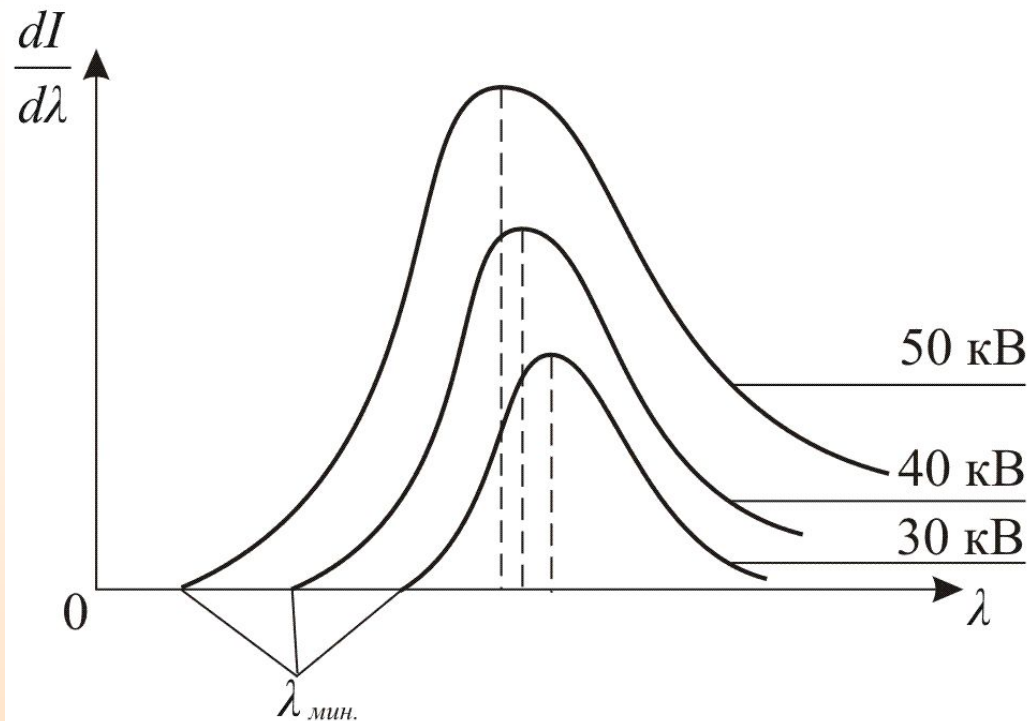
$$n\lambda = 2d \sin \vartheta$$

$\lambda$  - длина волны;  $d$  - постоянная решетки кристалла;  
 $\vartheta$  - угол скольжения;  $n$  - порядок отражения;

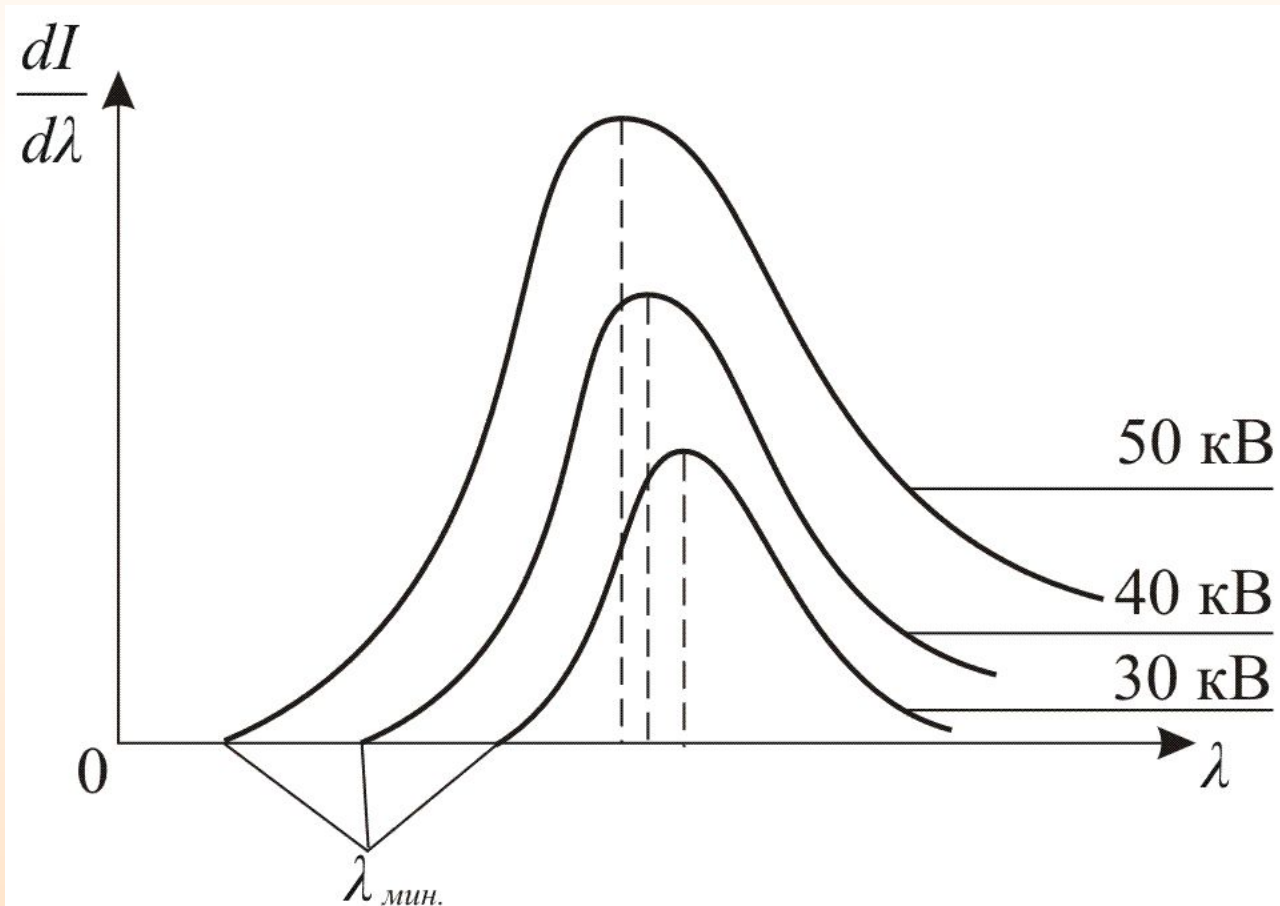
1-НИТЬ НАКАЛА; 2-ФОКУСИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОД;  
 3-СТЕКЛЯННАЯ ВАКУУМНАЯ КАМЕРА; 4-ПУЧЕК  
 ЭЛЕКТРОНОВ; 5-АНТИКАТОД; 6-СВИНЦОВЫЕ  
 ДИАФРАГМЫ; 7-КРИСТАЛЛ НА ПЛАТФОРМЕ;  
 8-ФОТОПЛЕНКА;



Согласно *классической электродинамике*, при торможении электрона, должны возникать излучения *всех длин волн* от нуля до бесконечности. *Длина волны, на которую приходится максимум мощности излучения, должна уменьшиться по мере увеличения скорости электронов*. что подтверждается на опыте



Однако, есть принципиальное **отличие от классической теории**: нулевые распределения мощности не идут к началу координат, а **обрываются при конечных значениях  $\lambda_{\min}$** . ЭТО **коротковолновая граница рентгеновского спектра**.



Экспериментально установлено, что

$$\lambda_{\text{к}} = (\text{Å}) = \frac{12390}{U(\text{В})} = \frac{\text{const}}{U}$$

Существование коротковолновой границы непосредственно вытекает из квантовой природы излучения. Действительно *если излучение возникает за счёт энергии, теряемой электроном при торможении, то энергия кванта  $h\nu$  не может превысить энергию электрона  $eU$*  т.е.  $h\nu \leq eU$

$$\nu = \frac{eU}{h}$$

ИЛИ

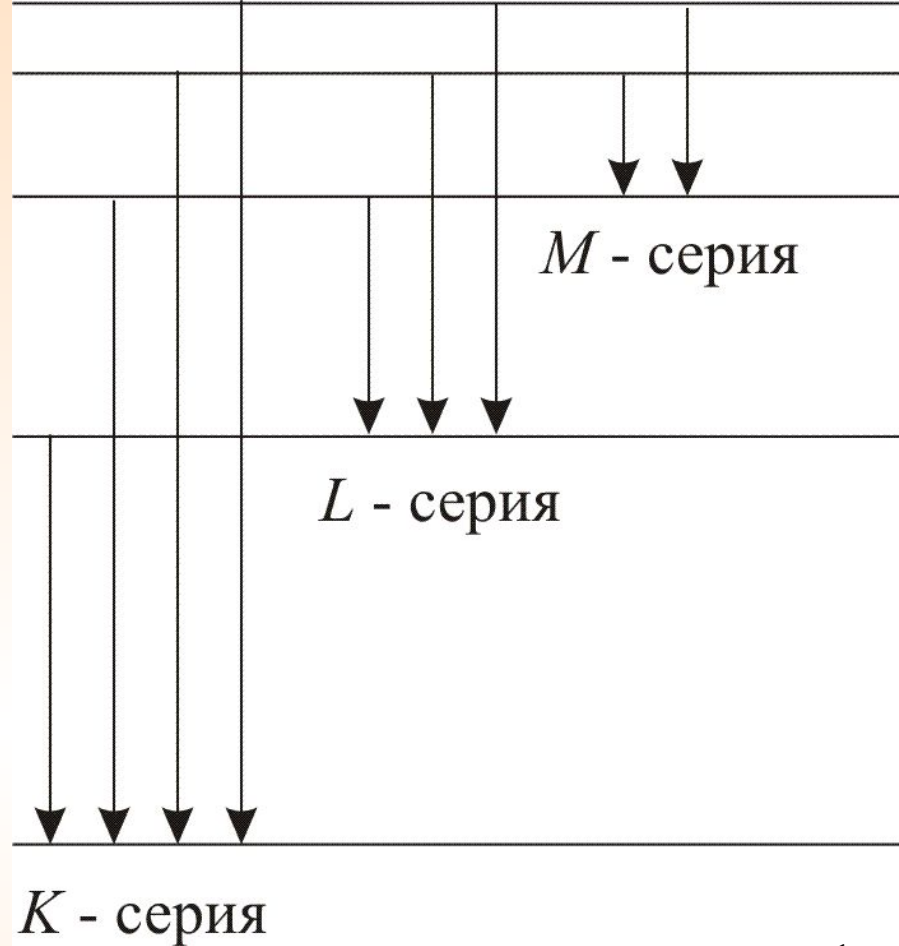
$$\lambda_{\text{к}} = \frac{c}{\nu_{\text{к}}} = \frac{ch}{eU}$$

## 2.6. Характеристическое рентгеновское излучение

Состояние атома с вакансией во внутренней оболочке неустойчиво. Электрон одной из внешних оболочек может заполнить эту вакансию, и атом при этом испускает избыток энергии в виде *фотона характеристического излучения*

$$\nu = \frac{W_1 - W_2}{h}$$

Все переходы на  $k$  – оболочку образуют  $K$  – серию, соответственно, на  $L$  и  $M$  – оболочки –  $L$  и  $M$  – серии



Английский физик **Генри Мозли** в 1913 году установил закон, названный его именем, связывающий частоты линий рентгеновского спектра с атомным номером  $Z$  испускающего их элемента

$$\omega_x = R''(Z - 1)^2 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ где } n = 3, 4, 5 \dots$$

$$\omega_x = R''(Z - 7,5)^2 \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

## Закон Мозли:

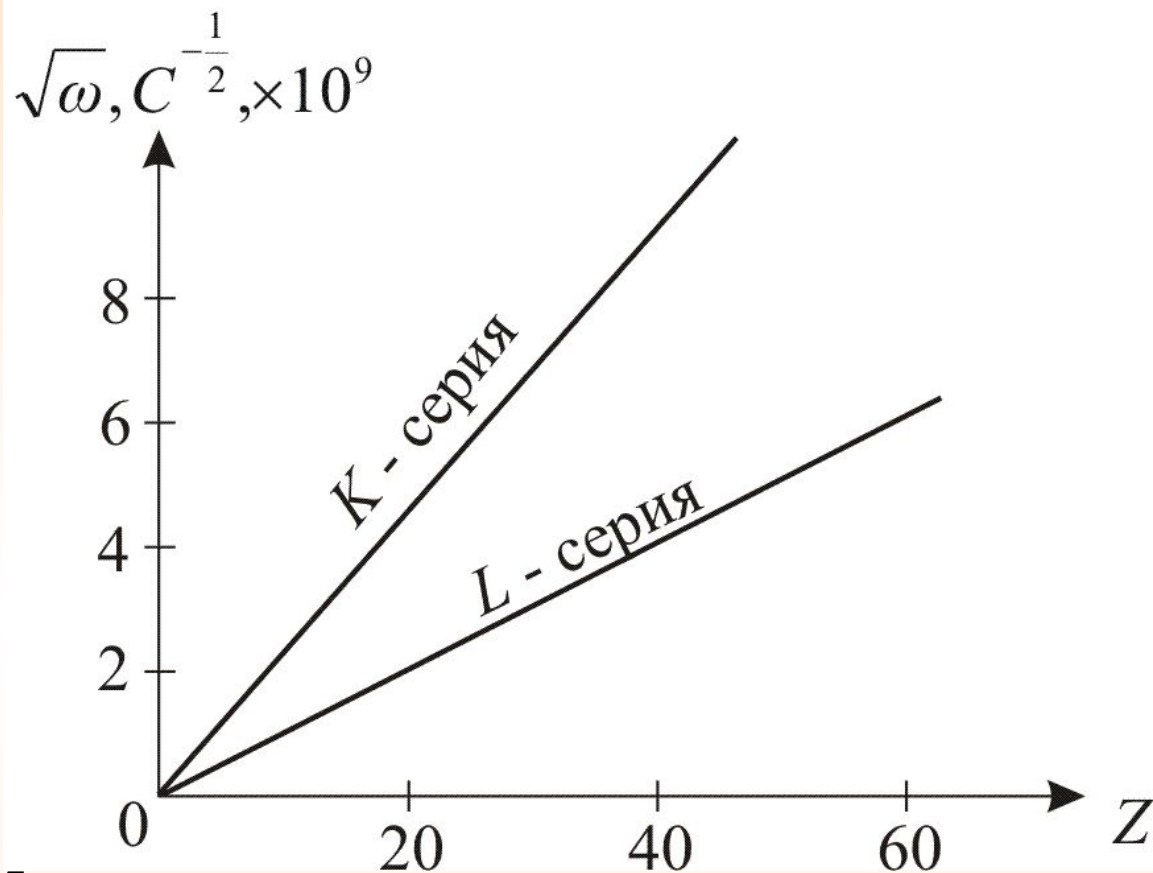
$$\omega = R''(Z - \sigma)^2 \left( \frac{1}{K^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$R'' = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-2}$  – постоянная Ридберга

$\sigma$  – постоянная учитывающая экранирующую роль электронов



Графическая часть закона показана на рисунке



Закон Мозли позволил по измерению длин волн

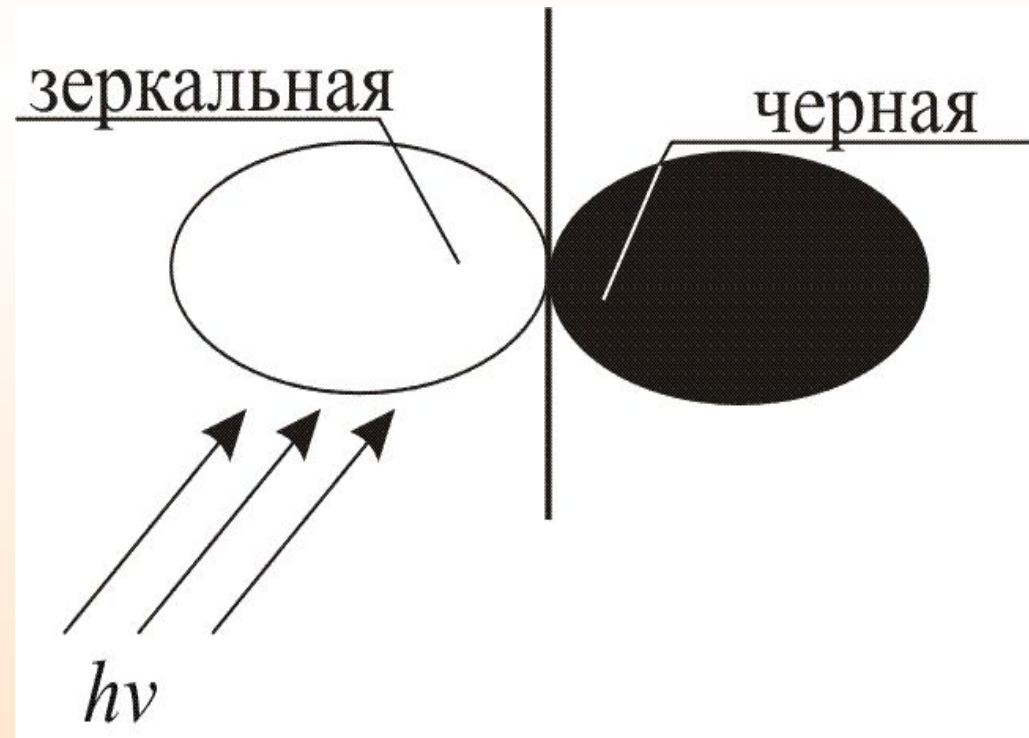
$\lambda$  рентгеновских лучей **точно установить атомный номер элемента.**

Он сыграл большую роль при размещении элементов в таблице Менделеева.

## 2.7. Давление света

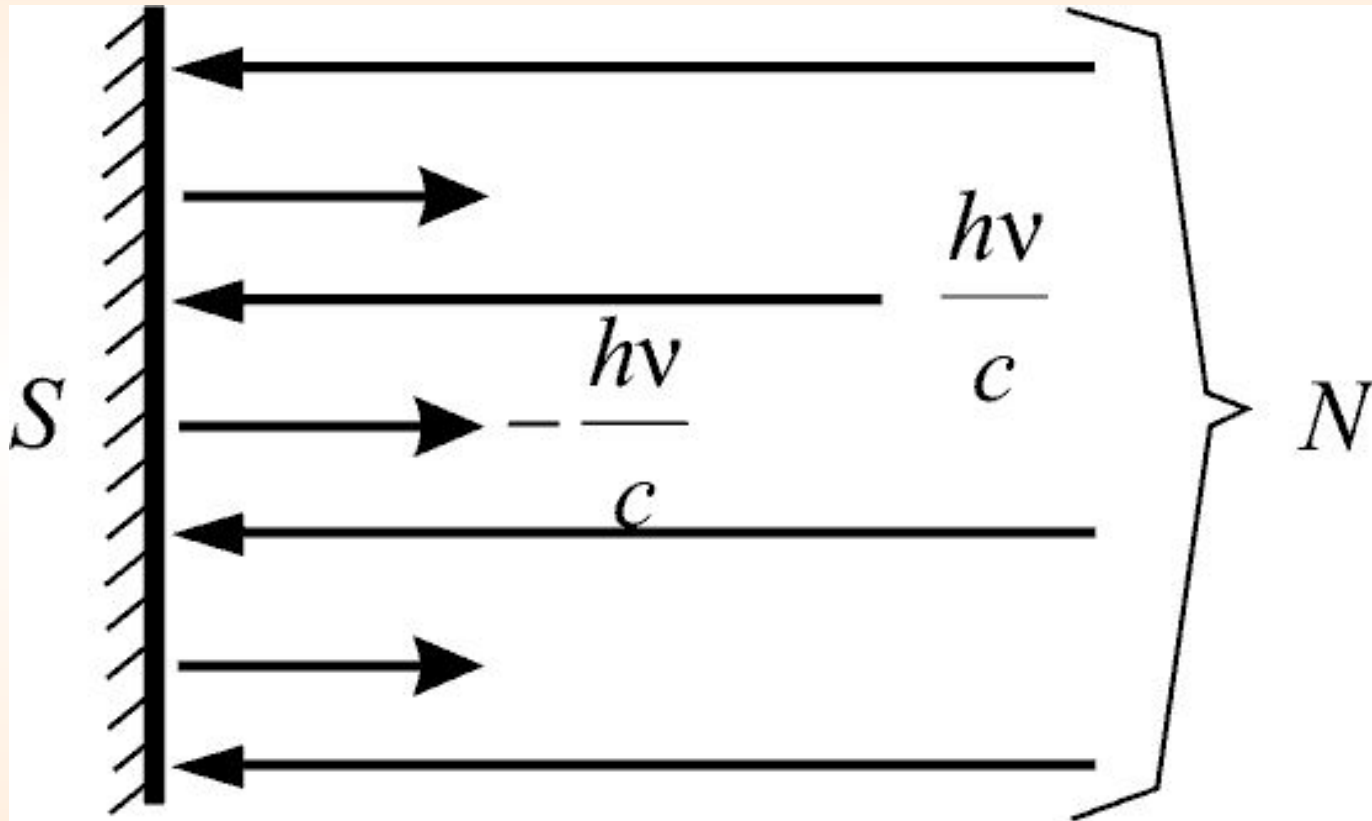
Исследовано *Лебедевым П.Н. в 1901 году.*

В своих опытах он установил, что *давление света зависит от интенсивности света и от отражающей способности тела.*



Вычислим величину светового давления.

На тело площадью  $S$  падает световой поток с энергией  $E = N h \nu$ , где  $N$  – число квантов.



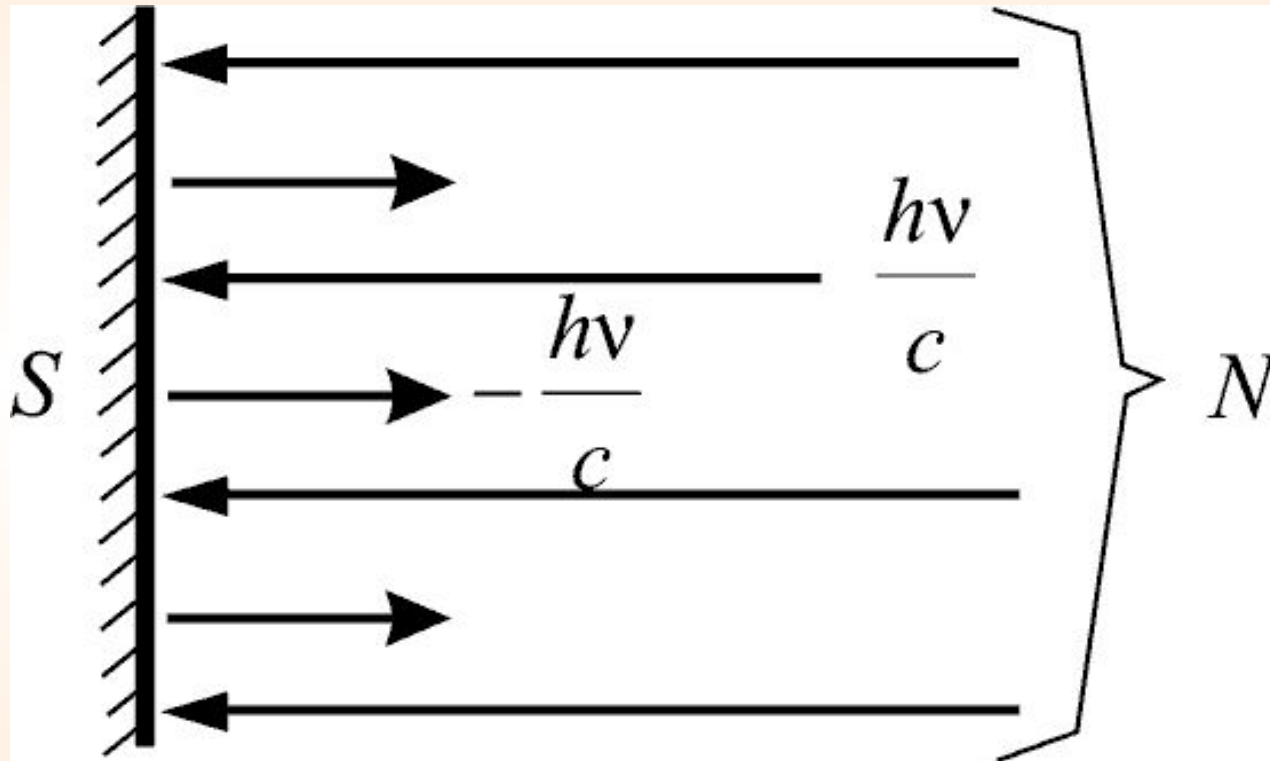
$KN$  – квантов отразится от поверхности;

$(1 - K)N$  – поглотится,

$K$  – коэффициент отражения.

Каждый **поглощенный фотон** передаст телу импульс

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



Каждый **отраженный фотон** передаст телу импульс:

$$p_{\text{отд}} = \frac{2h\nu}{c}$$

(доказать самостоятельно)

В единицу времени все  $N$  квантов сообщают телу импульс  $p$ :  $p_{\text{ид}} = (1 - K)N \frac{h\nu}{c} + \frac{2h\nu}{c} NK$

Давление  $P = F / S$   $J$  – интенсивность излучения

$$P = \frac{h\nu N}{cS} (1 + K) = J \frac{(1 + K)}{c},$$

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

**Световое  
давление**

• если тело **зеркально отражает**, то  $K = 1$  и  $P = \frac{2J}{c}$ ,

• если **полностью поглощает**  
(абсолютно черное тело)  $K = 0$   $P = \frac{J}{c}$

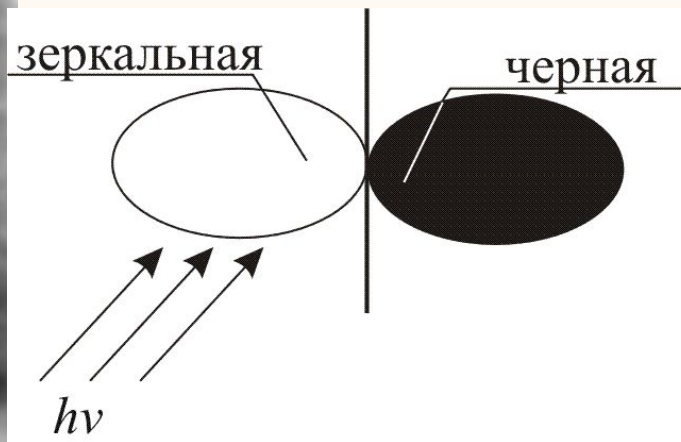
**т.о. световое давление на абсолютно черное тело в два раза меньше, чем на зеркальное.**

Из корпускулярной теории электромагнитного излучения следует, что

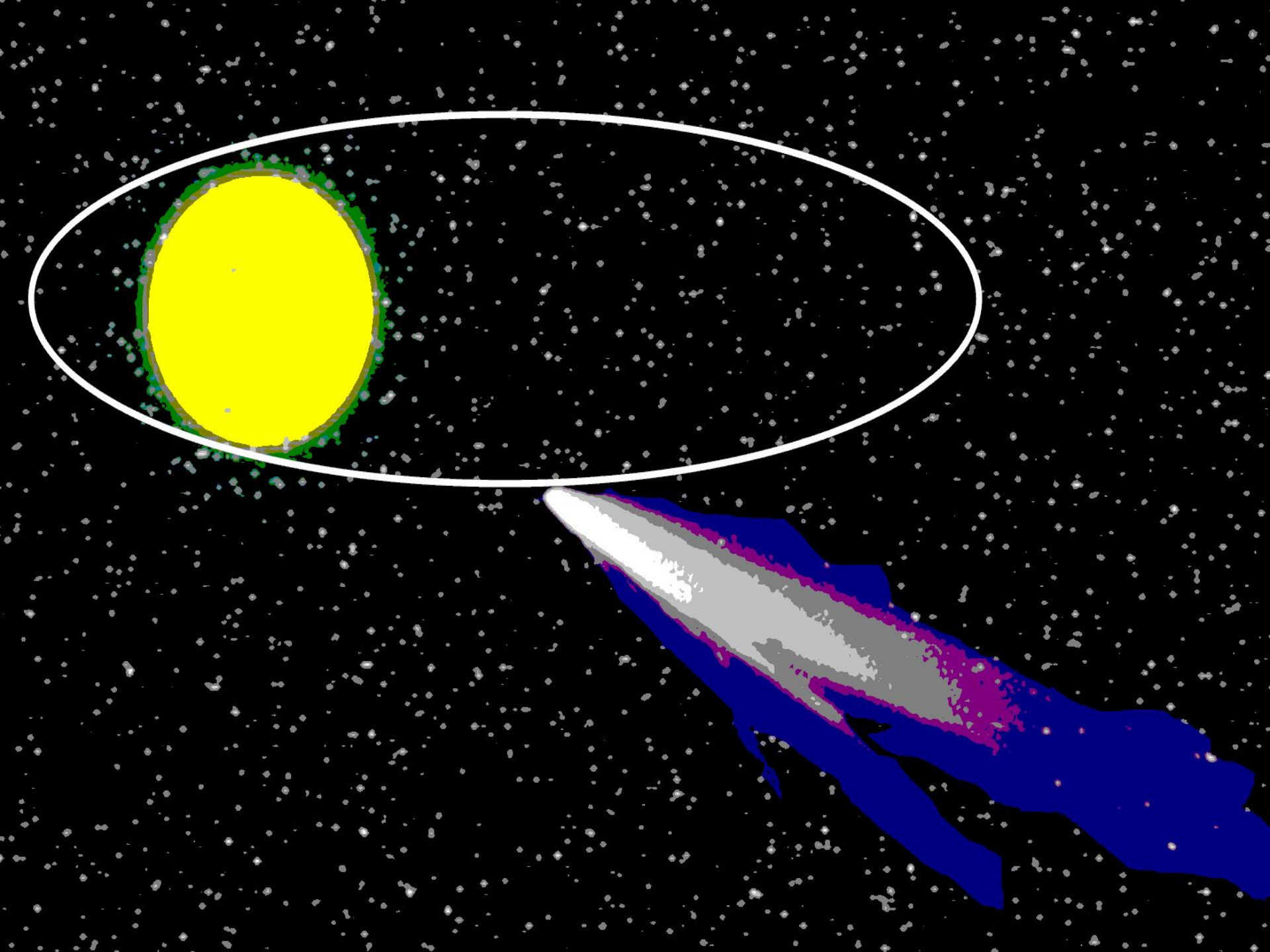
*световое излучение оказывает давление на материальные предметы, причем величина давления пропорциональна интенсивности излучения:*

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

*Эксперименты прекрасно подтверждают этот вывод:*







## 2.8. Двойственная природа света

*Основной постулат корпускулярной теории электромагнитного излучения, звучит так:*

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

*Фотоны* распространяются в вакууме со скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

*Масса и энергия покоя* фотона равны *нулю*.  
*Энергия фотона*  $E$  *связана с частотой* электромагнитного излучения  $\nu$  *и длиной волны*  $\lambda$  *формулой:*

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



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

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

Она представляет собой **МОСТИК** между корпускулярной и волновой теориями. Существование этого мостика неизбежно, т. к. и фотон, и электромагнитная волна, это *две модели одного и того же реально существующего объекта — электромагнитного излучения*.

Всякая движущаяся частица (*корпускула*) обладает импульсом, причём согласно теории относительности энергия частицы  $E$  и ее импульс  $p$  связаны формулой:

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

$$E = cp$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

*Свет – диалектическое единство противоположных свойств: он одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн и дискретных фотонов.*

*При уменьшении длины волны все явственнее проявляются **корпускулярные свойства**.*

Волновые свойства коротковолнового излучения проявляются слабо (например, рентгеновское излучение).

*Наоборот, у длинноволнового (инфракрасного) излучения квантовые свойства проявляются слабо.*

Взаимодействие фотонов с веществом (например, при прохождении света через дифракционную решетку) приводит к *перераспределению* фотонов в пространстве и возникновению дифракционной картины на экране.

*Очевидно, что освещенность экрана в различных точках экрана прямо пропорциональна вероятности попадания фотонов в различные точки экрана.*

Но с другой стороны, *из волновых представлений видно, что освещенность пропорциональна интенсивности света  $I$ , а та в свою очередь, пропорциональна квадрату амплитуды  $A^2$ .*

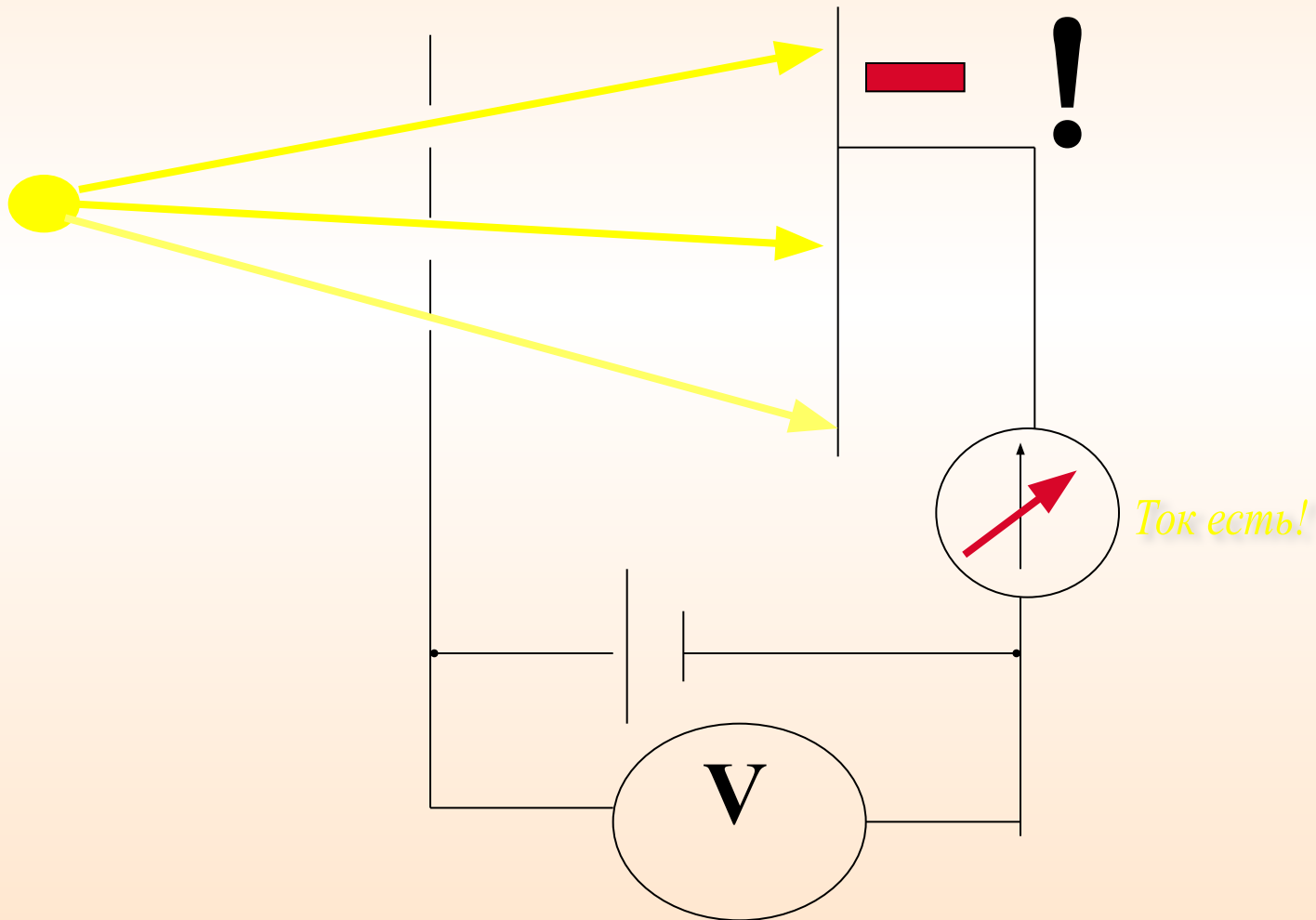
**Вывод:** *Квадрат амплитуды световой волны, в какой либо точке есть мера вероятности попадания фотонов в эту точку.*



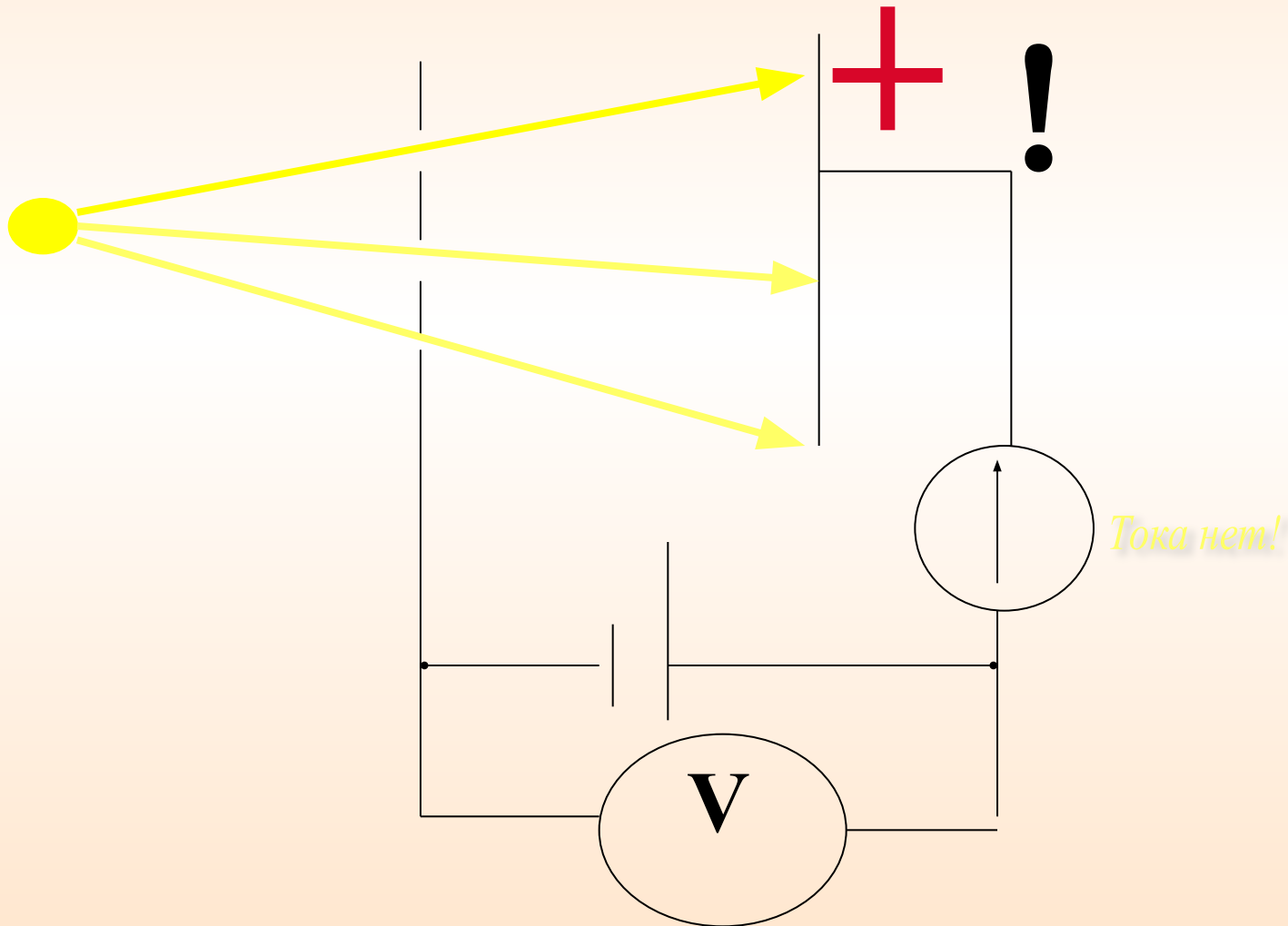
*Лекция окончена!!!*

# Схема установки Столетова

## 1-й вариант опыта



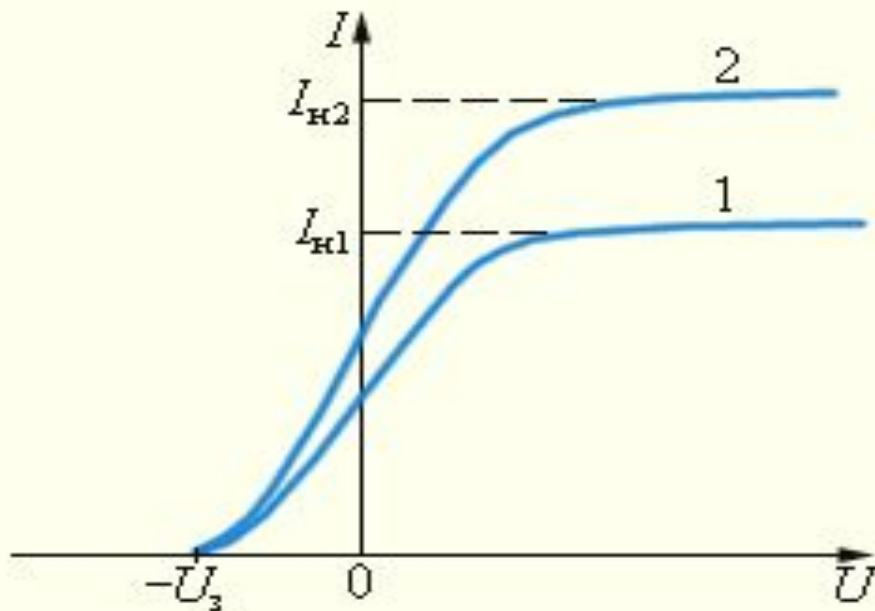
# Схема установки Столетова 1-й вариант опыта





# Первый закон фотоэффекта

Сила тока насыщения (фактически, число выбиваемых с поверхности электронов за единицу времени) прямо пропорциональна интенсивности светового излучения, падающего на поверхность тела.  $I_{\text{нас}} \sim$  световому потоку!



Внимание!  
Световой поток, падающий на фотокатод, увеличивается, а его спектральный состав остается неизменным:

$$\Phi_2 > \Phi_1$$

# Второй закон фотоэффекта

Если частоту света увеличить, то при неизменном световом потоке запирающее напряжение увеличивается, а, следовательно, увеличивается и кинетическая энергия фотоэлектронов.

**Максимальная скорость фотоэлектронов зависит только от частоты падающего света и не зависит от его интенсивности.**

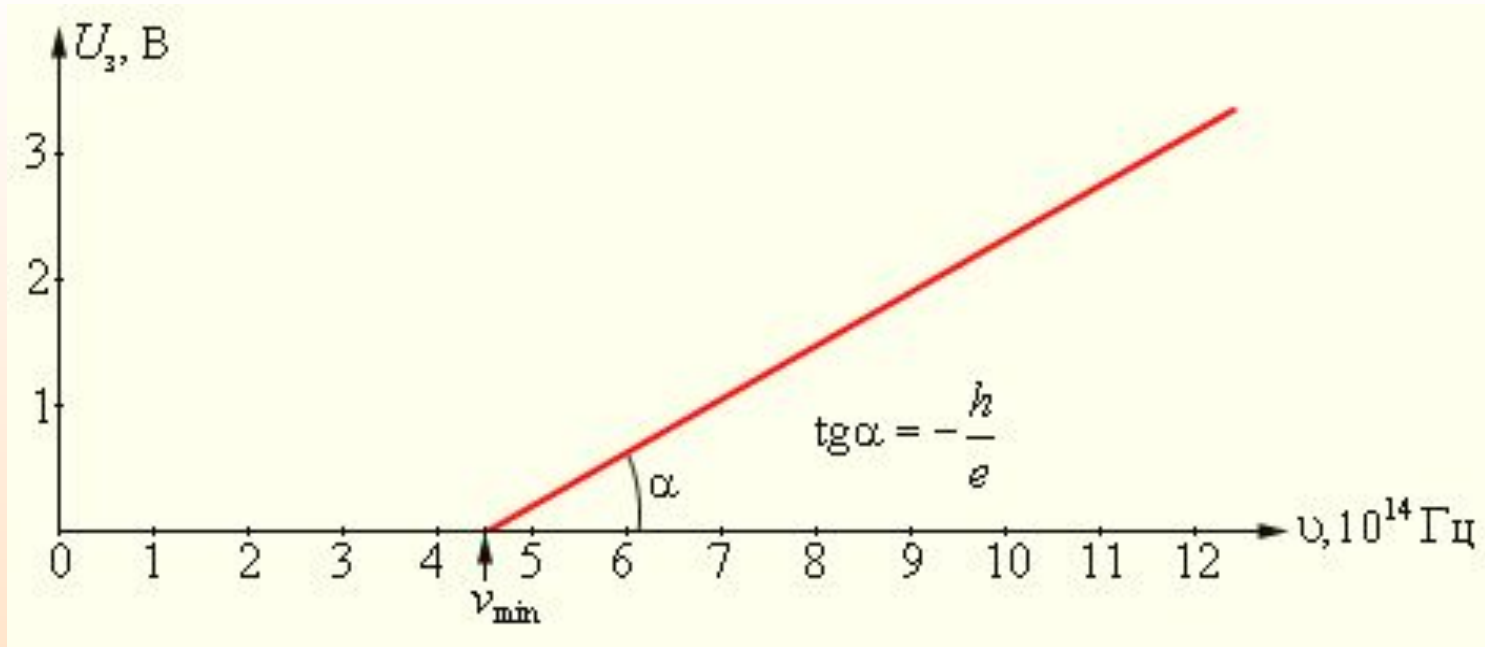
Важно!

По модулю запирающего напряжения можно судить о скорости фотоэлектронов и об их кинетической энергии!

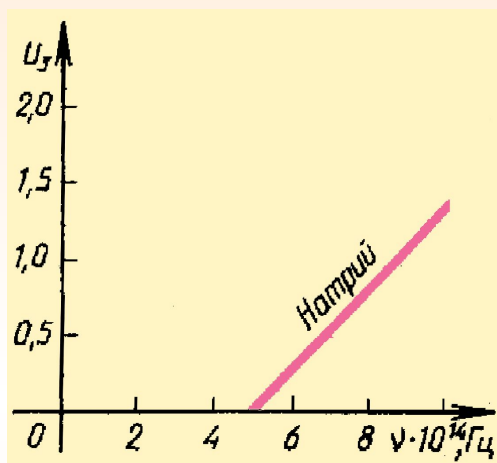
$$eU = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v_m = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$$

# Третий закон фотоэффекта

Для каждого вещества существует минимальная частота (так называемая красная граница фотоэффекта), ниже которой фотоэффект невозможен.



# Красная граница фотоэффекта



При  $\nu < \nu_{\min}$  ни при какой интенсивности волны падающего на фотокатод света фотоэффект не произойдет!

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}$$

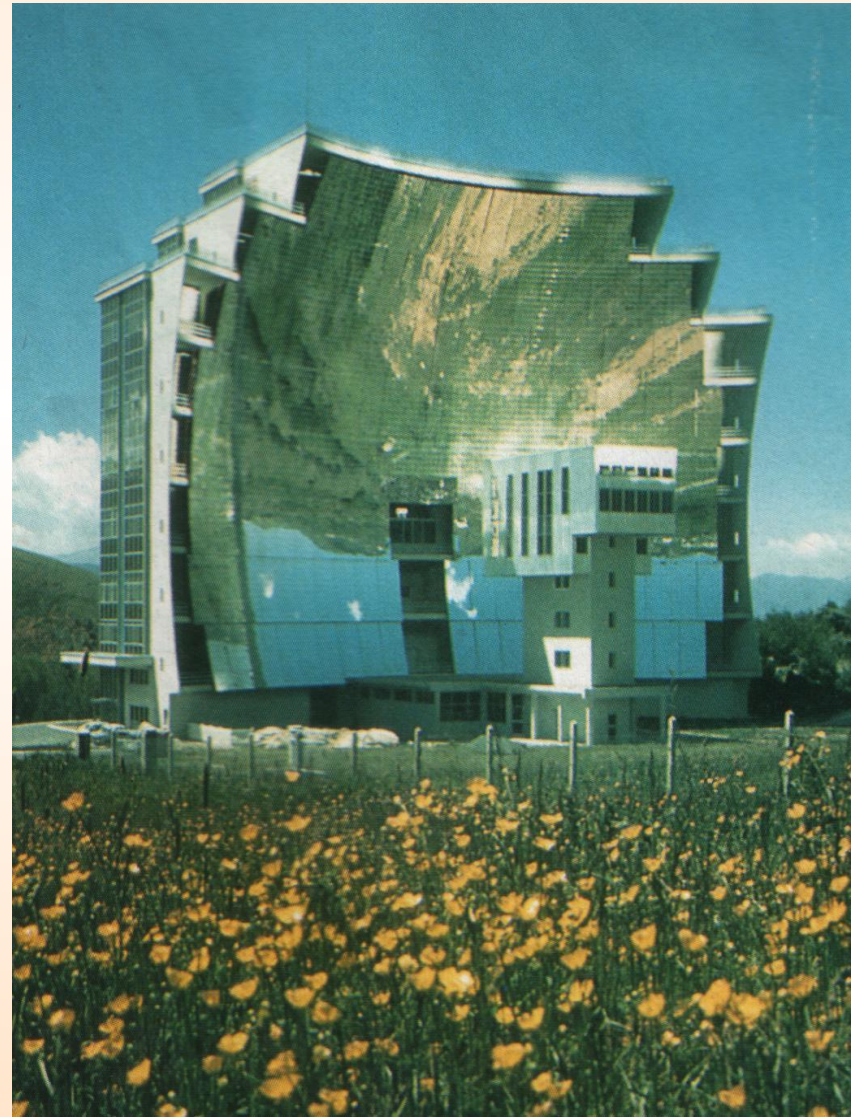
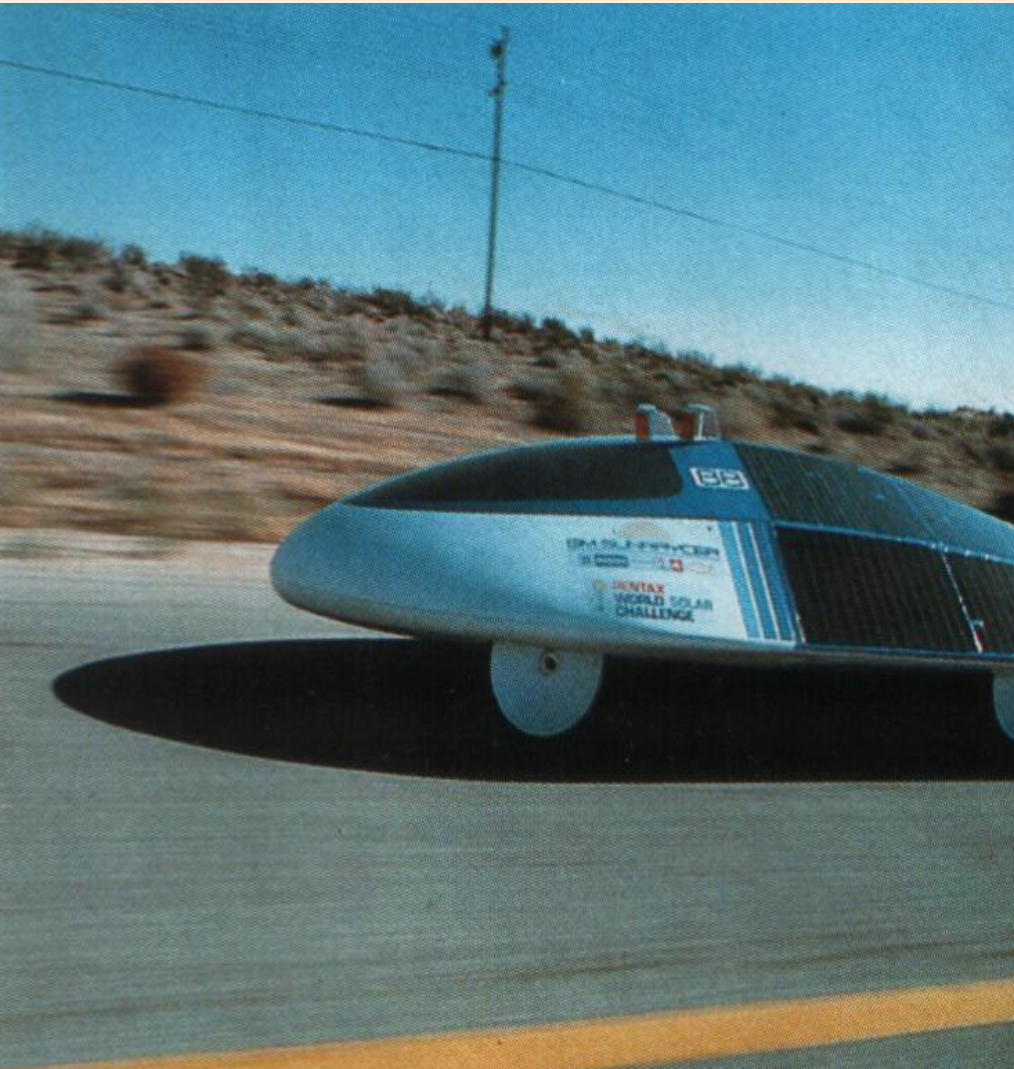
*Для каждого вещества своя!!!*

Такие батареи уже в течение многих лет работают на космических спутниках и кораблях. Их КПД приблизительно 10% и, как показывают теоретические расчеты, может быть доведён до 22%, что открывает широкие перспективы их использования в качестве источников для бытовых и производственных нужд.





# Солнцемобиль, солнечная станция



# *Контрольный блок*



Проверочные тесты



№1: Какому из нижеприведенных выражений соответствует единица измерения постоянной Планка в СИ?

а) Дж · с

б) кг · м/с<sup>2</sup>

в) кг · м/с

г) Н · м

д) кг/м<sup>3</sup>

№2: По какой из нижеприведенных формул, можно рассчитать импульс фотона? ( E- энергия фотона; c- скорость света)

$$Ec \quad \text{A)}$$

$$Ec^2 \quad \text{B)}$$

$$c/E \quad \text{C)}$$

$$c^2/E \quad \text{D)}$$

$$E/c \quad \text{E)}$$

№3 Как изменится работа выхода, при увеличении длины волны падающего излучения на катод, в четыре раза?

- А) Увеличится в четыре раза.
- В) Уменьшится в четыре раза.
- С) Увеличится в два раза.
- Д) Уменьшится в два раза.
- Е) Не изменится.

№4 Какое из нижеприведенных утверждений  
( для данного электрода) справедливо?

- А) Работа выхода зависит от длины волны падающего излучения.
- В) «Запирающее» напряжение зависит от работы выхода.
- С) Увеличение длины волны падающего излучения приводит к увеличению скорости вылетающих фотоэлектронов.
- Д) Максимальная скорость вылетающих фотоэлектронов, зависит только от работы выхода.
- Е) Увеличение частоты падающего излучения, приводит к увеличению скорости фотоэлектронов.

№5. Пластина изготовлена из материала, «красная граница» для которого попадает в голубую область спектра. При освещении какими лучами данной пластины наблюдается фотоэффект?

- А) Инфракрасными.
- В) Ультрафиолетовыми.
- С) Желтыми.
- Д) Красными.
- Е) Оранжевыми.

№6: Как изменится работа выхода, при увеличении длины волны падающего излучения на катод, в четыре раза?

- А) Увеличится в четыре раза.
- В) Уменьшится в четыре раза.
- С) Увеличится в два раза.
- Д) Уменьшится в два раза.
- Е) Не изменится.

№7 Какое из нижеприведенных утверждений справедливо? Кинетическая энергия вылетающих фотоэлектронов зависит от:

- А) Только от частоты падающего излучения.
- В) Только от температуры металла.
- С) Только от интенсивности излучения.
- Д) От частоты и интенсивности падающего Излучения.
- Е) От температуры металла и интенсивности излучения.