

*Фото-  
электрический  
эффект*

# Домашнее задание

- Г.Н.Степанова, Физика 11(1), § 22,23
- Знать:
  - *Способы наблюдения фотоэффекта,*
  - *Физическую суть явления,*
  - *Цель опытов А.Г.Столетова, схему установки и назначение деталей,*
  - *Вид графика зависимости  $I(U)$  и смысл характерных точек,*
  - *Законы фотоэффекта,*
  - *Свойства фотоэффекта, которые не могут быть объяснены волновой теорией,*
  - *Уравнение Эйнштейна,*
  - *Смысл работы выхода электронов.*

# Домашнее задание

- Г.Н.Степанова, Физика 11(1), § 22,23
- Уметь:
  - анализировать график зависимости  $I(U)$ ,
  - объяснять наличие тока насыщения,
  - законы фотоэффекта на основе уравнения Эйнштейна,
  - объяснять смысл запирающего напряжения,
  - объяснять смысл уравнение Эйнштейна.

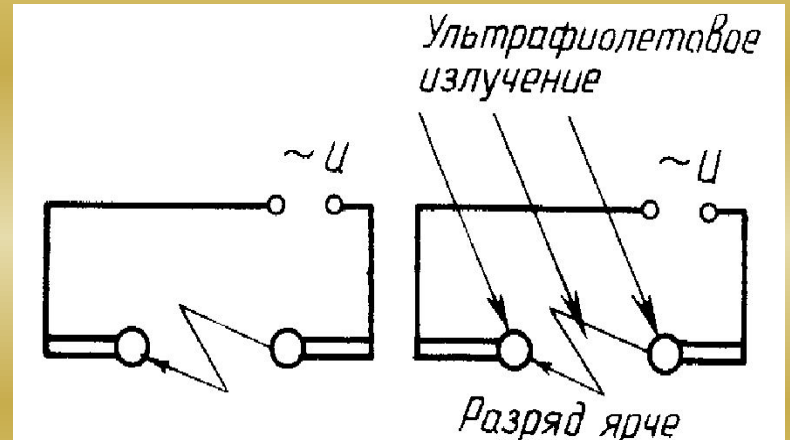
# Открытие фотоэффекта

- *Фотоэлектрический эффект* был открыт в 1887 году немецким физиком Г. Герцем. В 1888–1890 годах экспериментально исследован [А. Г. Столетовым](#).
- Наиболее полное исследование явления фотоэффекта было выполнено [Ф. Ленардом](#) в 1900 г.

# Внешний фотоэффект

- Опыт Г. Герца (1888 г.):

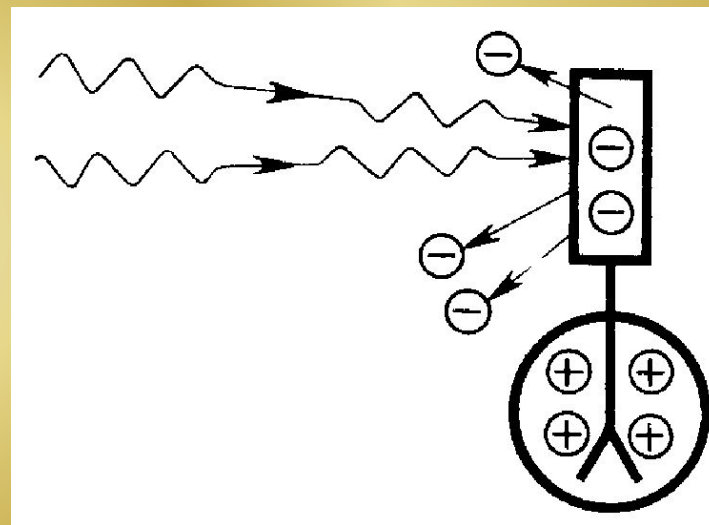
при облучении ультрафиолетовыми лучами электродов, находящихся под высоким напряжением, разряд возникает при большем расстоянии между электродами, чем без облучения.



# *Наблюдение фотоэффекта:*

- **1. Цинковую пластину, соединенную с электроскопом, заряжают отрицательно и облучают ультрафиолетовым светом. Она быстро разряжается.**

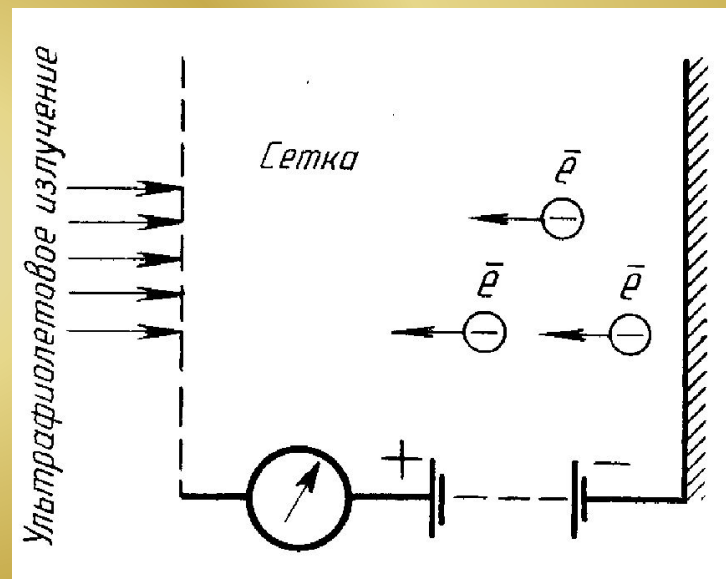
**Если же ее зарядить положительно, то заряд пластины не изменится.**





# Наблюдение фотоэффекта:

- 2. Ультрафиолетовые лучи, проходящие через сетчатый положительный электрод, попадают на отрицательно заряженную цинковую пластину и выбивают из нее электроны, которые устремляются к сетке, создавая **фототок**, регистрируемый чувствительным гальванометром.



# ***Внешний фотоэффект***

- **Фотоэффект** - явление испускания электронов с поверхности металла под действием света.

Т.е. свет выбивает (вырывает) электроны из металла.



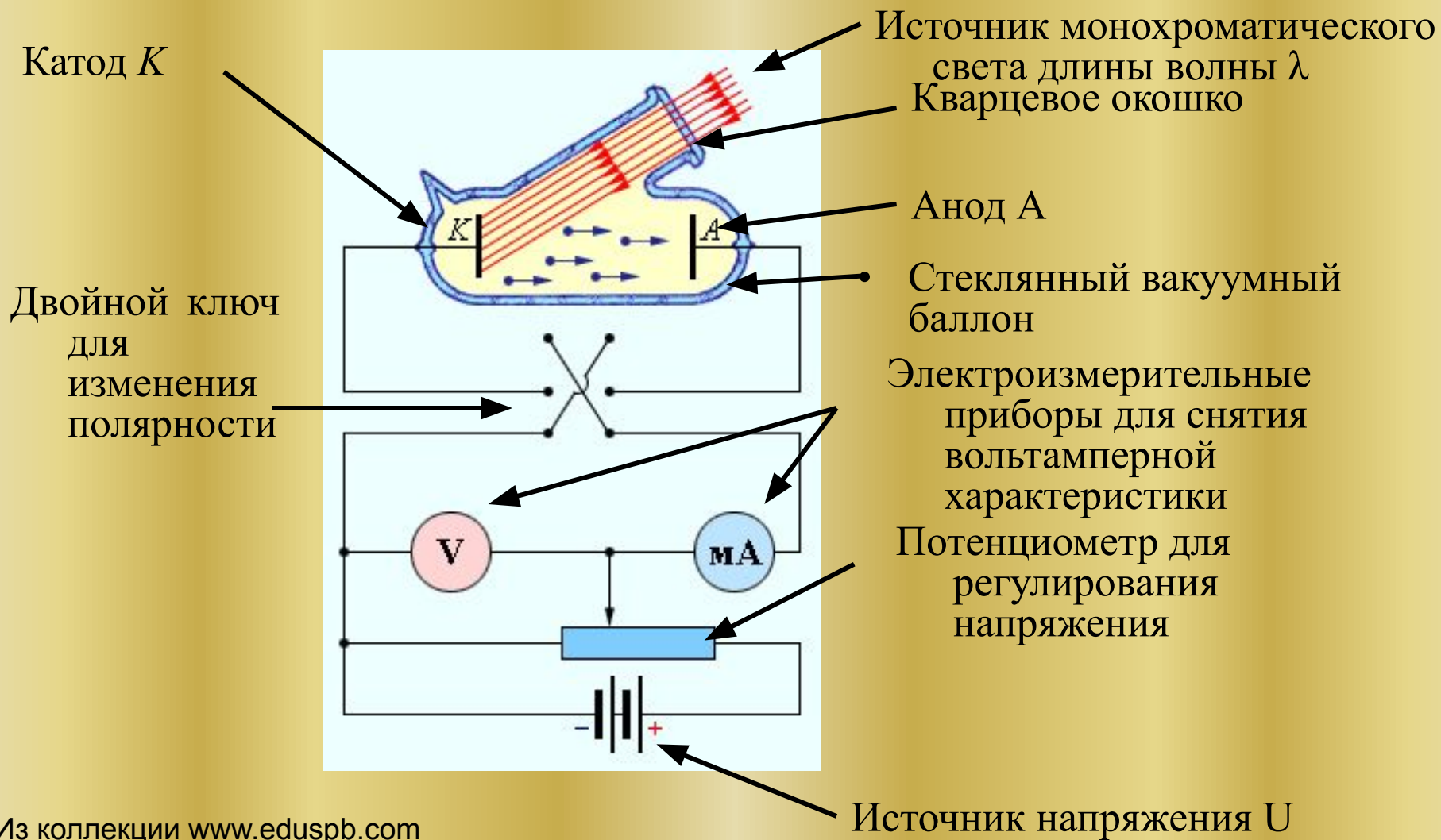
# Столетов

Александр Григорьевич (1839-1896)

- **Количественные закономерности фотоэффекта были установлены А.Г. Столетовым (1888—1889).**



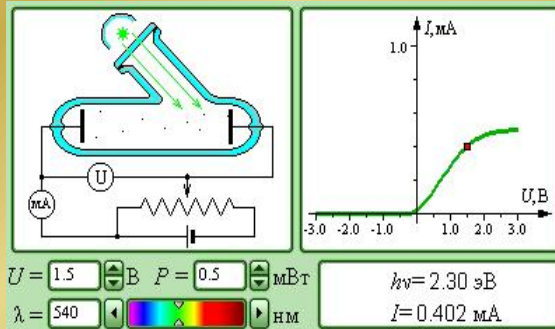
# Схема экспериментальной установки для изучения фотоэффекта.



# *План исследования:*

1. Получить зависимость  $I(U)$ . Выяснить физический смысл характерных точек;
2. Исследовать изменение  $I(U)$  при различных значениях светового потока.
3. Исследовать изменение  $I(U)$  при освещении светом различного спектрального состава.
4. Исследовать изменение  $I(U)$  для разного материала катода

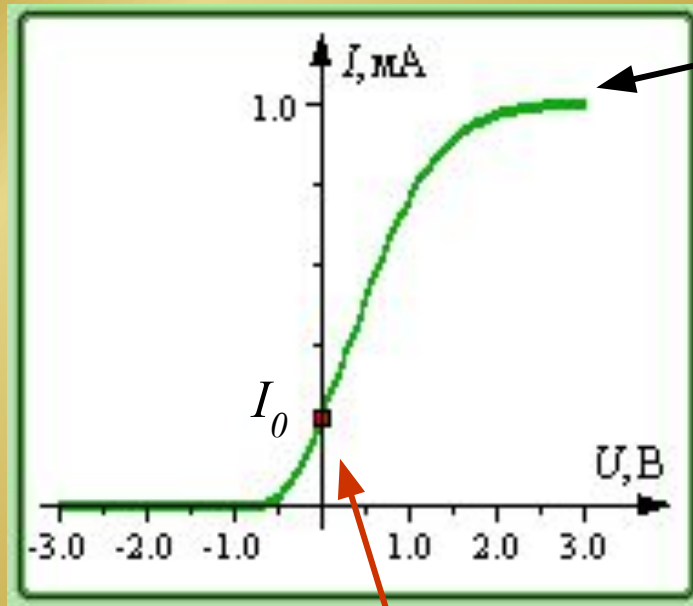
# Задание 1. Получить зависимость $I(U)$ . Выяснить физический смысл характерных точек



Для запуска нажмите на рисунок.

- Установите синий или зеленый светофильтр. Изменяя напряжение, рассмотрите получающуюся вольтамперную характеристику.
- 1. Наблюдается ли ток при  $U=0$ ?
- 2. Что происходит с силой тока при дальнейшем увеличении напряжения?
- 3. Что происходит при смене полярности?
- Сформулируйте гипотезы по результатам наблюдений. Не забудьте учесть, что вы уже знаете, что такое фотоэффект.

# Анализ вольт-амперной характеристики.



Начиная с некоторого значения напряжения сила тока в цепи перестает изменяться, достигнув насыщения.

- При  $U = 0$   $I_0 \neq 0$  следовательно выбитые электроны обладают кинетической энергией.

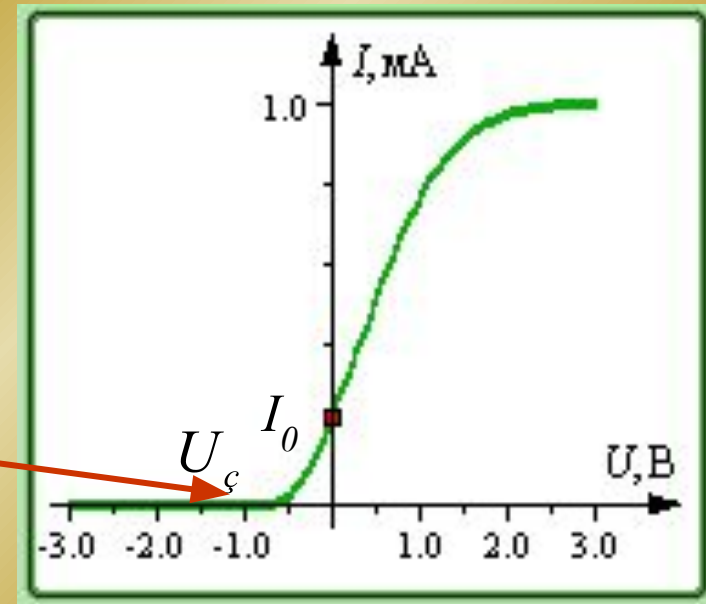
- Сила тока насыщения прямо пропорциональна числу электронов, выбитых светом за 1 с с поверхности катода:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{|e|N}{1с} = const \cdot I_{нас}$$

# Анализ вольт-амперной характеристики.

- При таком значении напряжения сила тока в цепи анода равна нулю.

*Напряжение запирания  
(запирающее напряжение)*



При  $U > U_z$  в результате облучения электроны, выбитые из электрода, могут достигнуть противоположного электрода и создать некоторый начальный ток.



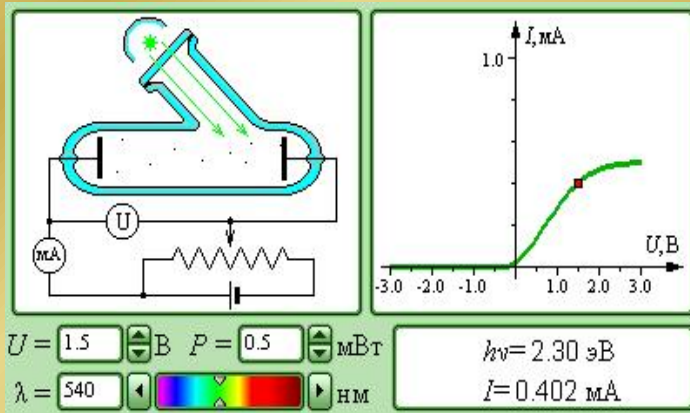
# **Анализ вольт-амперной характеристики.**

- Согласно закону сохранения энергии  $eU_3 = \frac{mv_{\max}^2}{2}$

где  $m$  - масса электрона,

а  $v_{\max}$  - максимальная скорость фотоэлектрона.

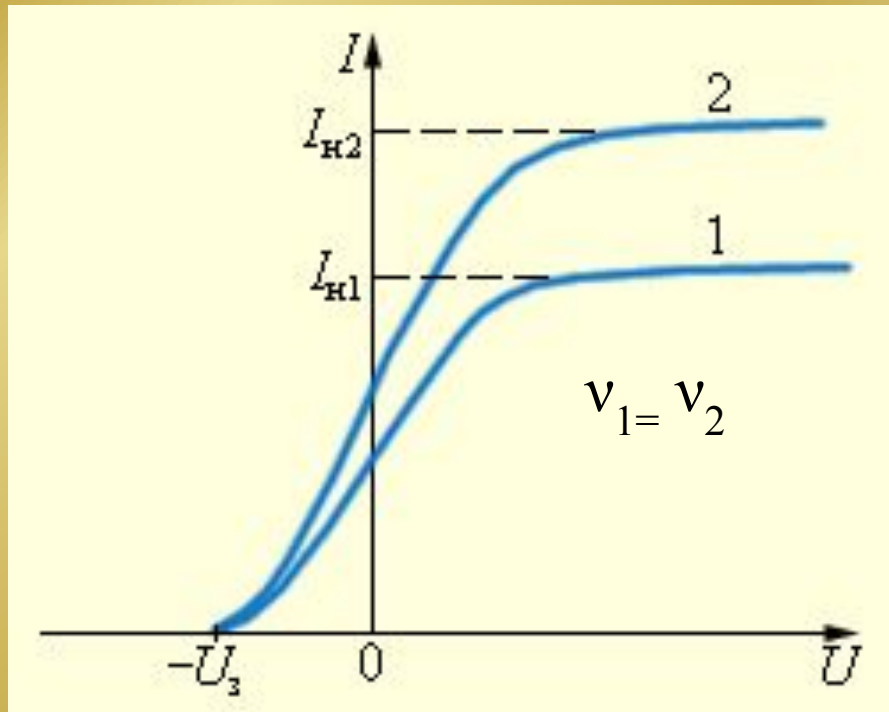
## Задание 2. Исследовать изменение $I(U)$ при различных значениях светового потока.



Для запуска нажмите на рисунок.

- Не изменяя частоту света, поменяйте мощность излучения (световой поток). Как изменяется ВАХ?
- 1. Что происходит с током насыщения?
- 2. Что происходит с запирающим напряжением?
- *Сформулируйте гипотезы по результатам наблюдений. Не забудьте учесть, что вы уже знаете, что такое фотоэффект.*

# Зависимость числа выбитых электронов от светового потока.



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

$$\Phi_2 > \Phi_1$$

- Сила тока насыщения и, следовательно, число выбитых светом за 1 с электронов увеличивается:  $I_{нас,2} > I_{нас,1}$
- Значение запирающего напряжения не меняется!

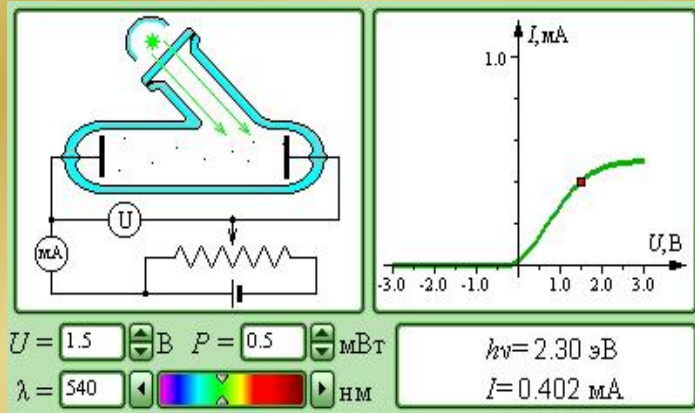
# Первый закон фотоэффекта

- *Фототок насыщения пропорционален световому потоку, падающему на металл.*

ИЛИ

- *Количество фотоэлектронов, выбиваемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.*

### Задание 3. Исследовать изменение $I(U)$ при освещении светом различного спектрального состава.



Для запуска нажмите на рисунок.

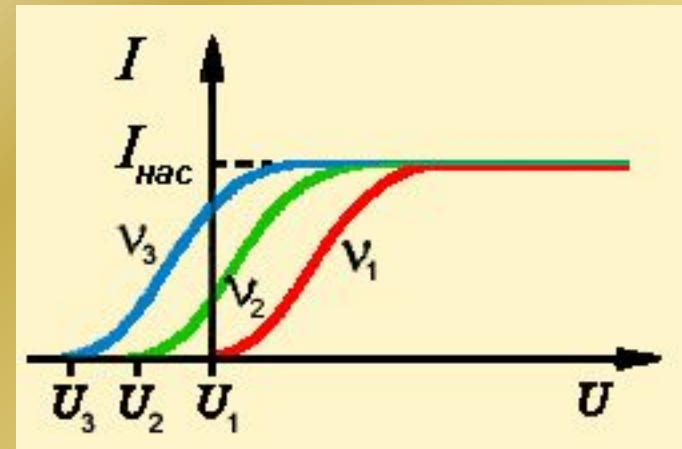
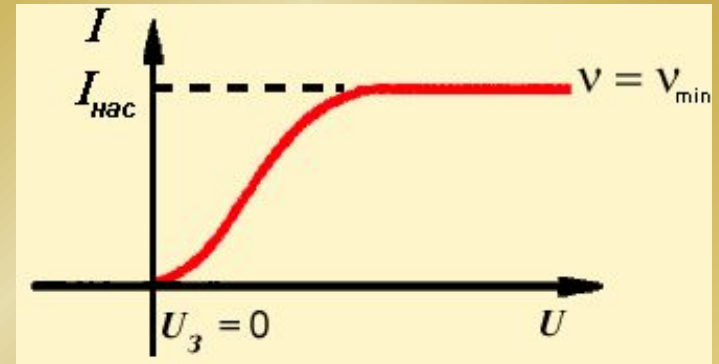
- *Сформулируйте гипотезы по результатам наблюдений.*

- Последовательно меняйте светофильтры.
- 1. При любой ли длине волны (частоте) падающего света наблюдается фотоэффект? Чему равно запирающее напряжение при минимальной частоте (максимальной длине волны)?
- 2. Как меняется запирающее напряжение при увеличении частоты?
- 3. Как меняется ток насыщения при увеличении частоты?



# Влияние спектрального состава света

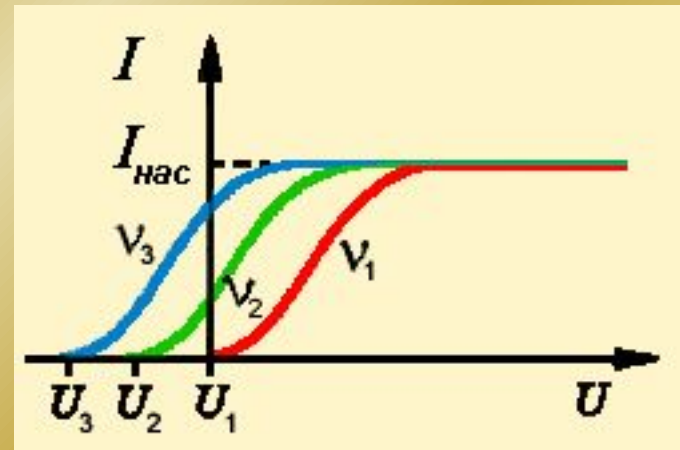
- При частоте  $\nu = \nu_{\min}$  запирающее напряжение равно нулю.
- При частоте  $\nu < \nu_{\min}$  фотоэффект отсутствует.
- Если частоту света увеличить, то при неизменном световом потоке запирающее напряжение увеличивается, а, следовательно, увеличивается и кинетическая энергия фотоэлектронов.



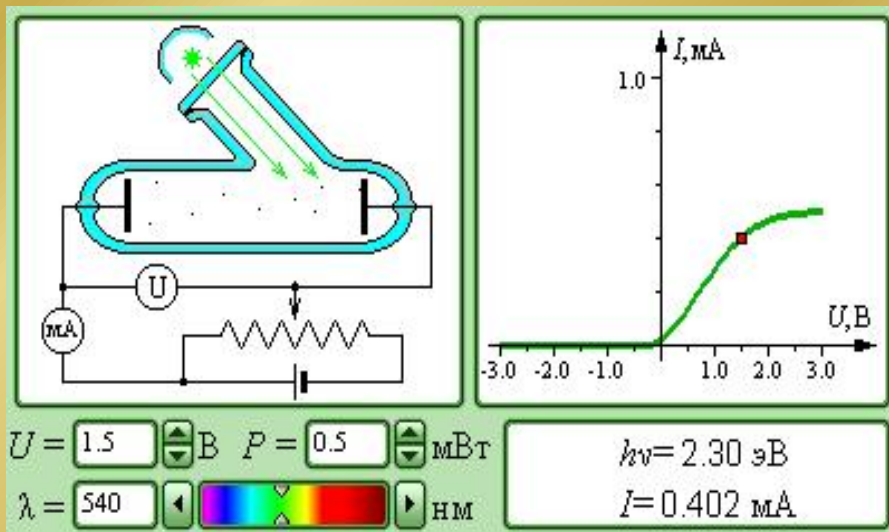


## *Второй закон фотоэффекта:*

- Кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света не зависит от интенсивности падающего света.*



## Задание 4. Исследовать изменение $I(U)$ для разного материала катода



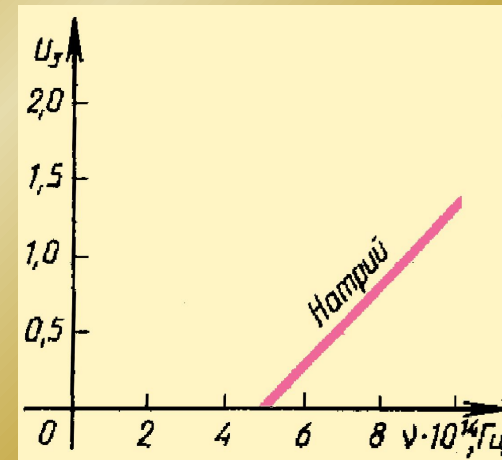
- *Можно ли в рамках данной компьютерной модели провести указанное исследование?*

- *Сформулируйте свою гипотезу по данной проблеме. На чем она базируется?*

# Красная граница фотоэффекта

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

- Т.к.  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ ,  
то *минимальной частоте*  
*света соответствует*  
*максимальная длина волны.*



- Т.к длина волны больше у красного цвета, то максимальную длину волны (минимальную частоту), при которой еще наблюдается фотоэффект, назвали *красной границей фотоэффекта.*

# Третий закон фотоэффекта

- Заменяя в приборе материал фотокатода, Столетов установил, что красная граница фотоэффекта является характеристикой данного вещества.
- *Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. существует наименьшая частота  $\nu_{min}$ , при которой еще возможен фотоэффект.*

# Законы фотоэффекта:

- *Количество фотоэлектронов, выбиваемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.*
- *Кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света не зависит от интенсивности падающего света.*
- *Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. существует наименьшая частота  $\nu_{min}$ , при которой еще возможен фотоэффект.*
- *Фотоэффект практически безынерционен, фототок возникает мгновенно после начала освещения катода при условии, что частота света  $\nu > \nu_{min}$ .*



# Что не могла объяснить волновая теория света:

- Безынерционность фотоэффекта.
  - В волновой модели: электрон при взаимодействии с электромагнитной световой волной постепенно накапливает энергию, и только через значительное время вылетит из катода. Как показывают расчеты, это время должно было бы исчисляться минутами или часами.
- Существование красной границы фотоэффекта.
  - В волновой модели: необходимую энергию можно накопить при любой энергии волны.
- Независимость энергии фотоэлектронов от интенсивности светового потока.
- Пропорциональность максимальной кинетической энергии частоте света.



# Идея Эйнштейна (1905 г.)

- Свет имеет прерывистую дискретную структуру. Электромагнитная волна состоит из отдельных порций – квантов, впоследствии названных фотонами.
- Квант поглощается электроном целиком. Энергия кванта передается электрону. (Один фотон выбивает один электрон.)
- Энергия каждого фотона определяется формулой Планка  $W = E = h\nu$ , где  $h$  – постоянная Планка.

# Уравнение Эйнштейна

- На основании закона сохранения энергии:

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

- **Смысл уравнения Эйнштейна:**
  - энергия кванта тратится на работу выхода электрона из металла и сообщение электрону кинетической энергии.

В этом уравнении:  $\nu$  - частота падающего света,  
 $m$  - масса электрона (фотоэлектрона),  
 $v$  - скорость электрона,  
 $h$  - постоянная Планка,  
 $A$  - работа выхода электронов из металла.

# *Работа выхода*

- **Работа выхода - это характеристика материала (табличная величина см. стр. 112 учебника).**
- **Она показывает, какую работу должен совершить электрон, чтобы преодолеть поверхностную разность потенциалов и выйти за пределы металла.**
- **Работа выхода обычно измеряется в электронвольтах (эВ).**

# Доказательство законов фотоэффекта

- *Количество фотоэлектронов, выбиваемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.*

Число фотонов  $N_{\text{ф}}$  равно числу электронов  $N_{\text{э}}$ .

- Энергия монохроматического

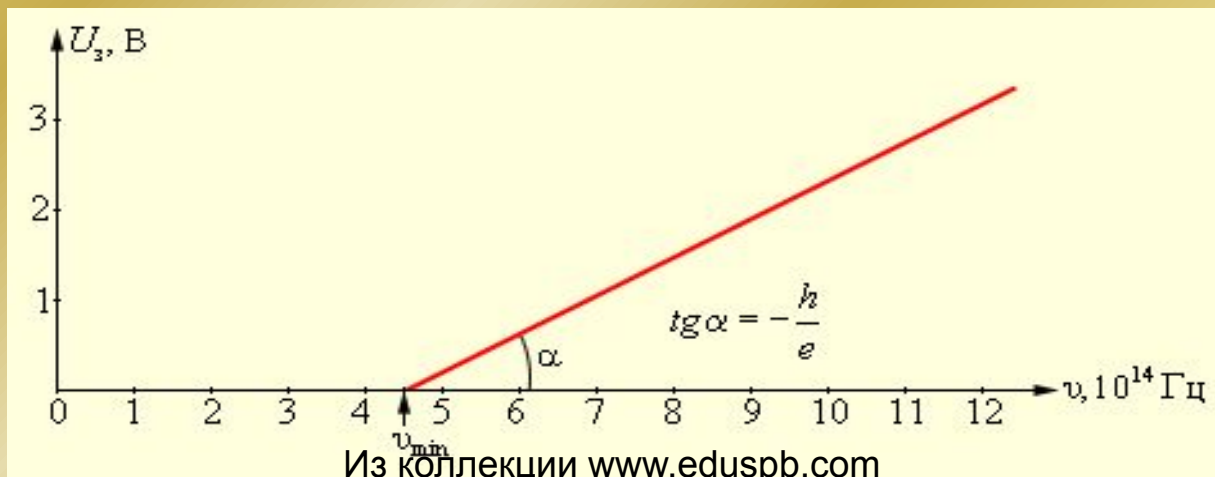
света  $E = N_{\text{ф}} h\nu = N_{\text{э}} h\nu$

- Следовательно,  $N_{\text{э}} = \frac{E}{h\nu}$

# Доказательство законов фотоэффекта

- *Кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света не зависит от интенсивности падающего света.*

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



# Доказательство законов фотоэффекта

- Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. существует наименьшая частота  $\nu_{\min}$ , при которой еще возможен фотоэффект.

**Минимальная частота света соответствует**

$$\text{то } W_{\text{к}} = 0, \\ h\nu_{\min} = A \text{ или } h \frac{c}{\lambda_{\max}} = A .$$

Эти формулы позволяют определить работу выхода  $A$  электронов из металла.



# Работа выхода

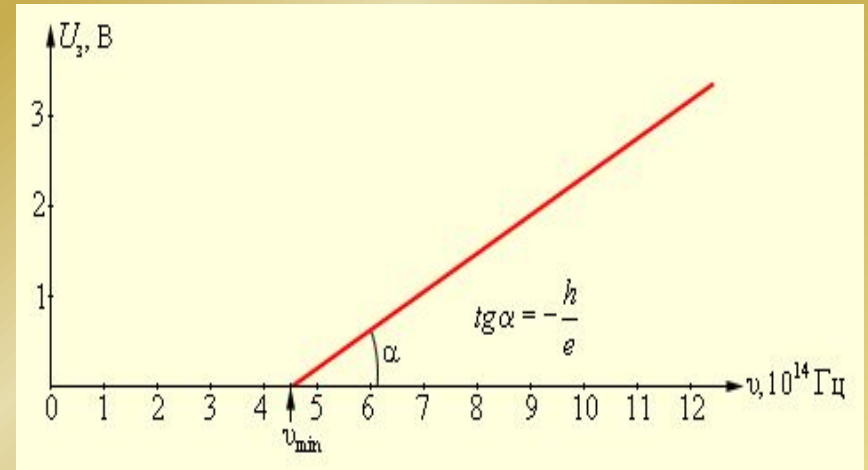
- Среди металлов наименьшей работой выхода обладают щелочные металлы. Например, у натрия  $A = 1,9$  эВ, что соответствует красной границе фотоэффекта  $\lambda_{\text{кр}} \approx 680$  нм.
- Поэтому соединения щелочных металлов используют для создания катодов в **фотоэлементах**, предназначенных для регистрации видимого света.

# Определение постоянной Планка

- Как следует из уравнения Эйнштейна, тангенс угла наклона прямой, выражающей зависимость запирающего потенциала  $U_3$  от частоты  $\nu$ , равен отношению постоянной Планка  $h$  к заряду электрона  $e$ :

$$h(\nu_2 - \nu_1) = e(U_1 - U_2)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_1 - U_2}{\nu_2 - \nu_1} = \frac{h}{e}$$



- Это позволяет экспериментально определить значение постоянной Планка. Такие измерения были выполнены Р. Милликеном (1914 г.) и дали хорошее согласие со значением, найденным Планком.

# *Повторение*

- Внимательно посмотрите фильм.
- Приготовьтесь отвечать на вопросы, связанные с физическим смыслом явления фотоэффекта, описывающих его законов, входящих в них величин.
- Подумайте: где и для чего мы используем явление фотоэффекта.

# Задачи

Задачи из «Открытой Физики 2.5»

# Тесты

Тесты из «Открытой Физики 2.5»