

# *Квантовая физика*

The background of the slide is a vibrant red and purple gradient. On the left, there is a glowing blue wave with a small blue sphere at its peak. In the center, a magnifying glass is positioned over a glowing blue circuit board. The overall aesthetic is scientific and futuristic.

*Фотоэффект*

*Теория фотоэффекта*



# Завершение классической физики

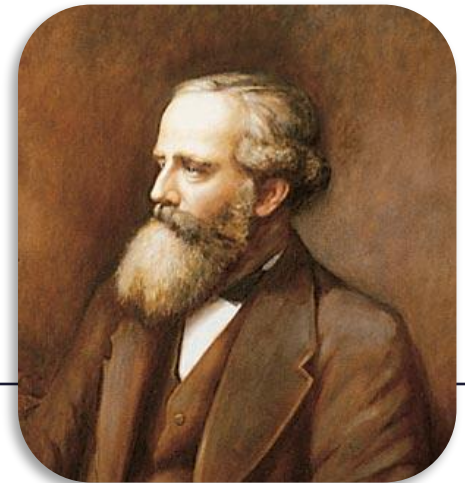
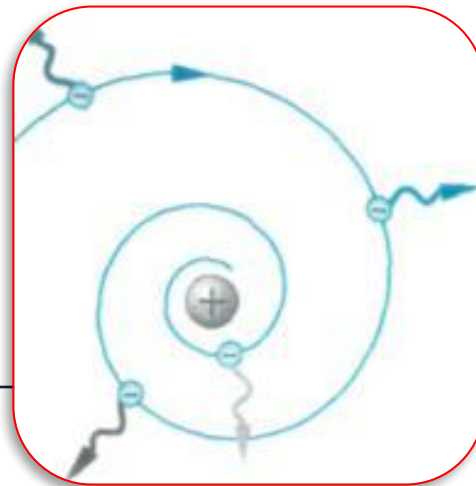
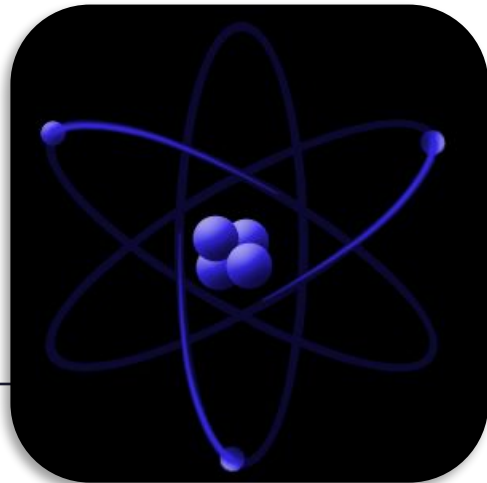
**В конце XIX в. многие ученые считали, что развитие физики завершилось по следующим причинам:**

- 1. Больше 200 лет существуют законы механики, теория всемирного тяготения.
  - 2. Разработана МКТ.
  - 3. Подведен прочный фундамент под термодинамику.
  - 4. Завершена максвелловская теория электромагнетизма.
  - 5. Открыты фундаментальные законы сохранения (энергии, импульса момента импульса, массы и электрического заряда).
-

# Физические проблемы начала XX в.

## 1. Устойчивость атома

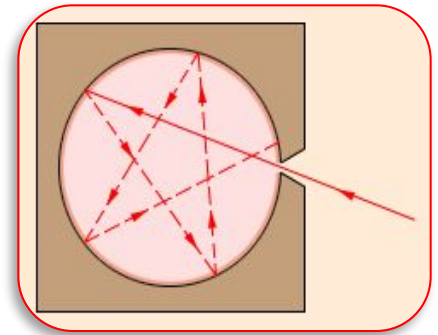
- Согласно теории Максвелла движущиеся электроны вокруг ядер должны непрерывно излучать энергию и двигается по спирали к ядру.



# Физические проблемы начала XX в.

## 2. Абсолютно черное тело –

- мысленная *модель тела* полностью поглощающего электромагнитные волны любой длины (и излучающего все длины электромагнитных волн).



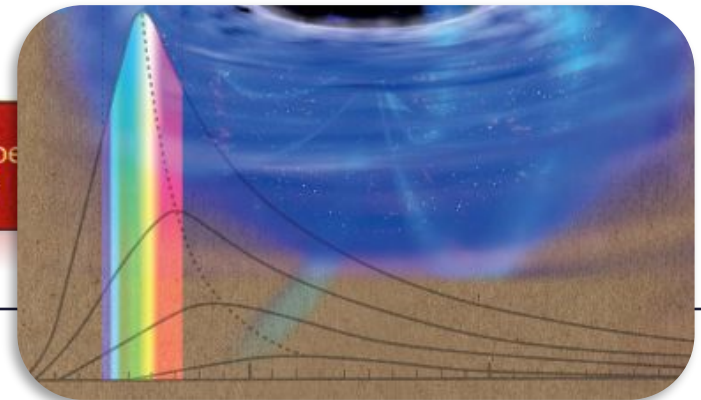
Модель абсолютно  
черного тела –  
небольшое отверстие в  
замкнутой полости

*Проблема сводится к изучению спектрального состава излучения абсолютно черного тела. Решить эту проблему классическая физика оказалась не в состоянии.*

# Физические проблемы начала XX в.

## 3. Ультрафиолетовая катастрофа

- По теории Максвелла максимум электромагнитного излучения в спектре солнца должен находиться в **ультрафиолетовой части** спектра, а он находится **в видимой части**.

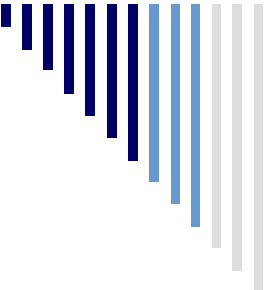


# Физические проблемы начала XX в.

## 4. Холодное свечение

- По теории Максвелла видимое излучение возникает только при высоких температурах. т.е. холодного свечения не должно быть

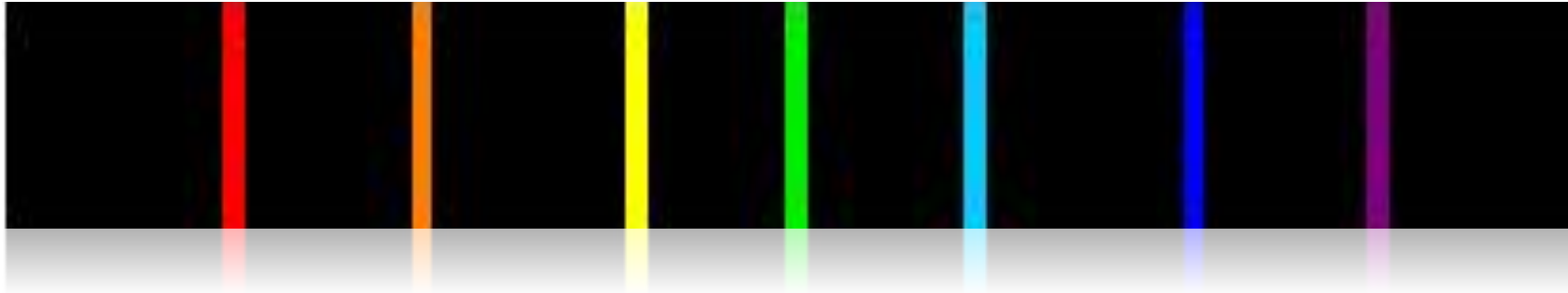




# Физические проблемы начала XX в.

## 5. Линейчатые спектры излучения

- Раскаленные газы дают постоянный линейчатый спектр.





---

# Вывод

- Классическая физика не давала ответов на вопросы, что привело к созданию ***квантовой теории***.
-



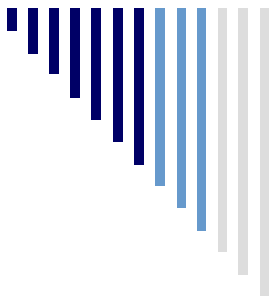


# Гипотеза Планка (1900 г.)

- *Атомы испускают электромагнитную энергию отдельными порциями — **квантами**.*
- *Энергия  $E$  каждой порции прямо пропорциональна частоте излучения:*

$$E = h\nu$$

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка.



$$E = h\nu = \hbar \omega$$

$$\omega = 2\pi \nu$$

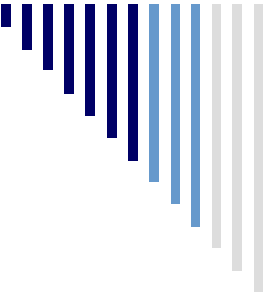
$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 6,59 \cdot 10^{-16} \text{ эВ} \cdot \text{с}$$



**постоянная Дирака или приведённая постоянная Планка.**

**(1 эВ - энергия, которую приобретает элементарный заряд, проходя ускоряющую разность потенциалов 1 В)**

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$



**М. Планк** указал путь выхода из трудностей, с которыми столкнулась теория теплового излучения, после чего начала развиваться современная физическая теория, называемая *квантовой физикой*





## *Повторение*

1. Какие из физических явлений не смогла объяснить классическая физика?

### ***Макс Планк.***

Великий немецкий физик – теоретик, основатель квантовой теории – современной теории движения, взаимодействия и взаимных превращений

***строение атома, происхождение линейчатых спектров, тепловое излучение***

2. Кто является основоположником квантовой физики?  
микроскопических частиц.



## *Повторение*

3. Как атомы испускают энергию согласно гипотезе Планка?

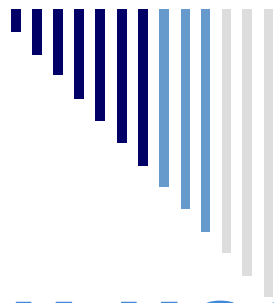
*отдельными порциями - квантами*

4. Чему равна эта энергия?

$$E = h\nu$$

5. Чему равна постоянная Планка?

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



# История открытия и исследования фотоэффекта

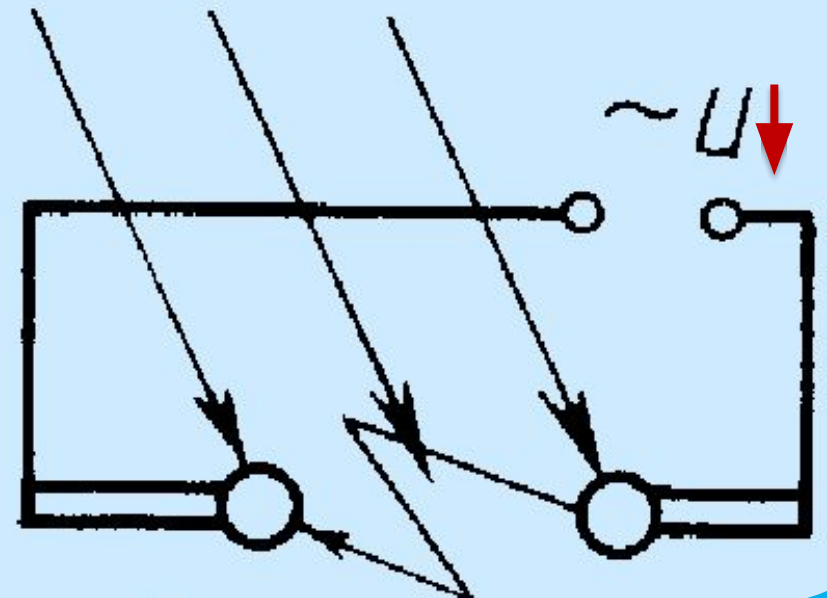
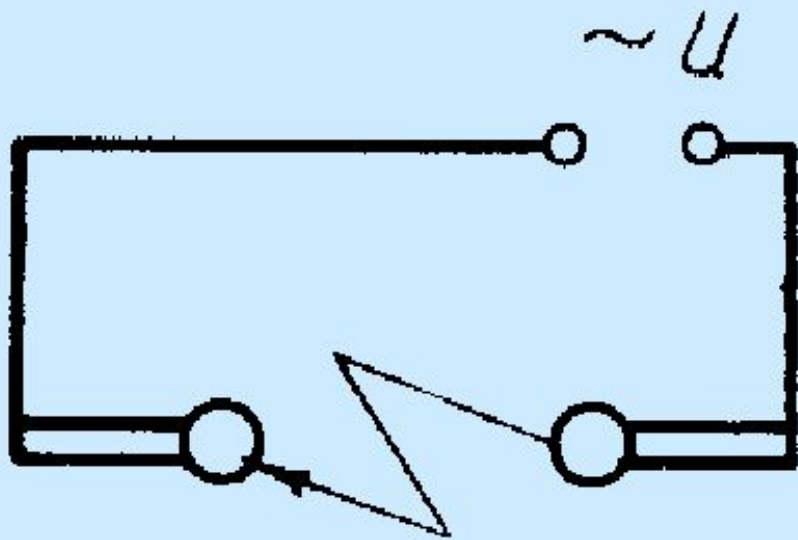
- Открыт в 1887 году немецким физиком Генрихом Герцем
- Экспериментально исследован в 1888-1890 годах русским физиком А.Г. Столетовым
- Теоретически объяснен в 1905 году Альбертом Эйнштейном

# Наблюдение фотоэффекта

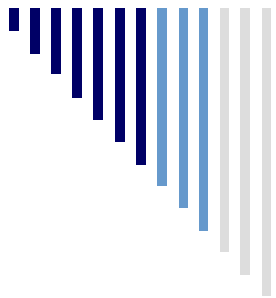


- Г. Герц, **1887г**
- Обнаружил, что при освещении ультрафиолетовыми лучами электродов, находящихся под высоким напряжением, разряд наступает при меньшем напряжении.
- Объяснить не мог

# Ультрафиолетовое излучение





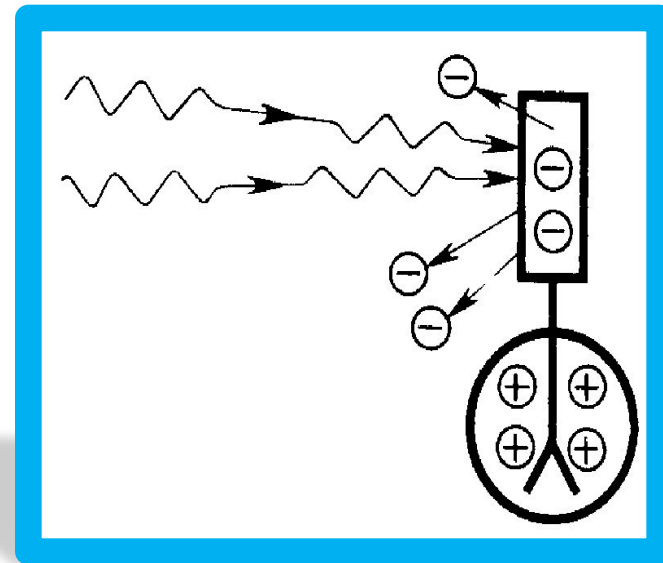


- Влияние излучения на электрические явления назвали ***фотоэлектрическим эффектом.***

# Эксперимент

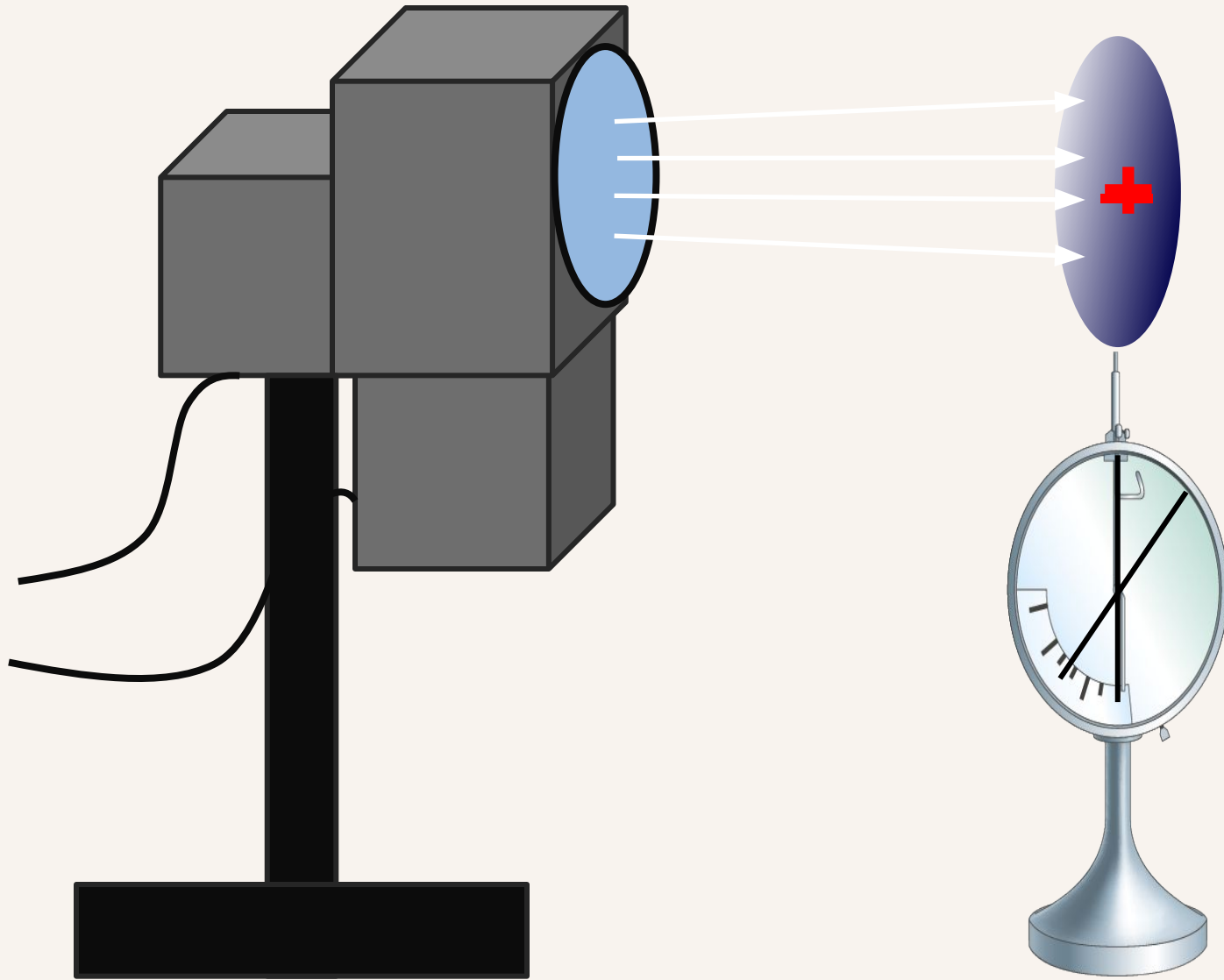
**№ 1.** Цинковую пластину, соединенную с электроскопом, заряжают **отрицательно** и облучают ультрафиолетовым светом. Она быстро разряжается.

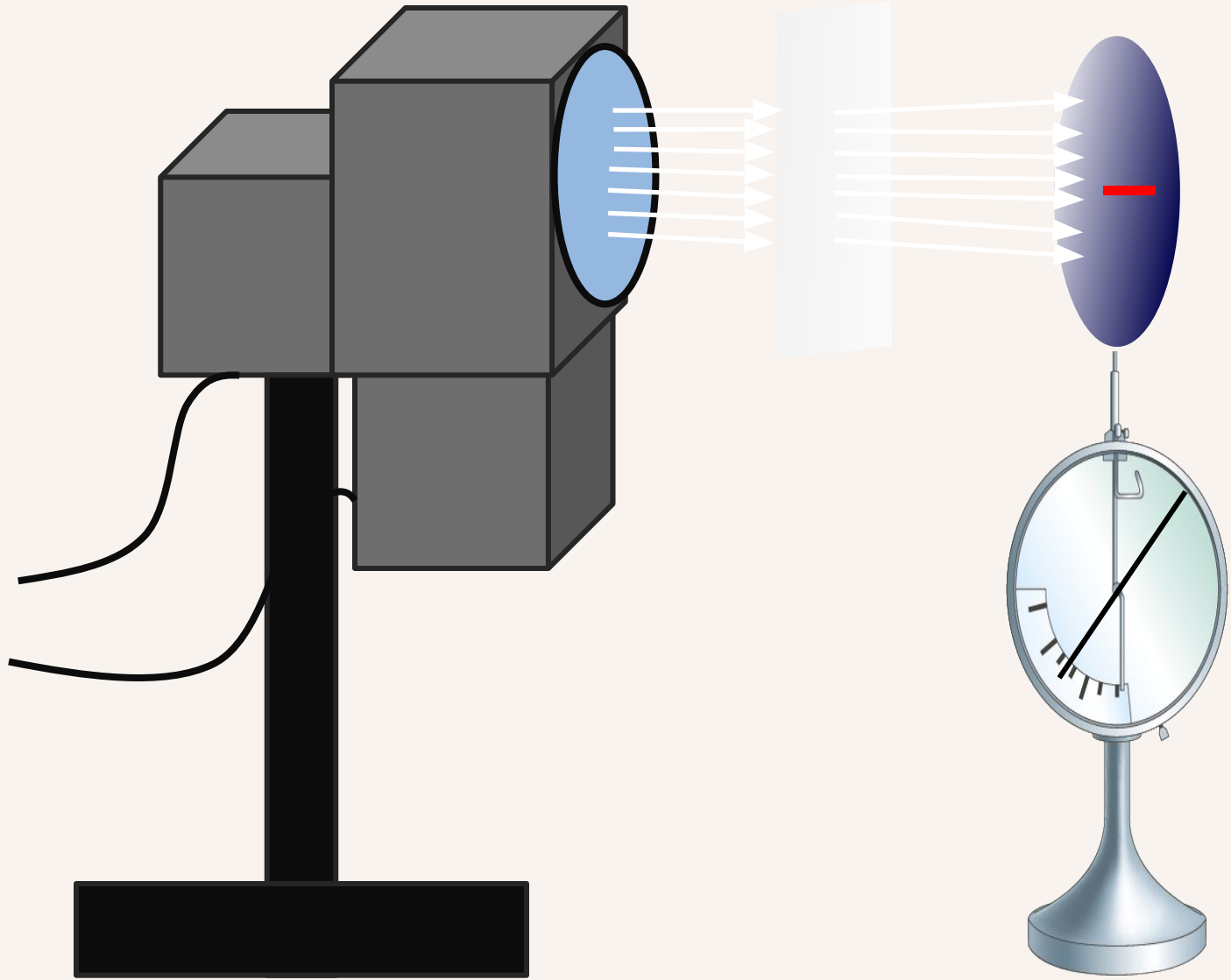
**№ 2.** Если же её зарядить **положительно**, то заряд пластины не изменится.

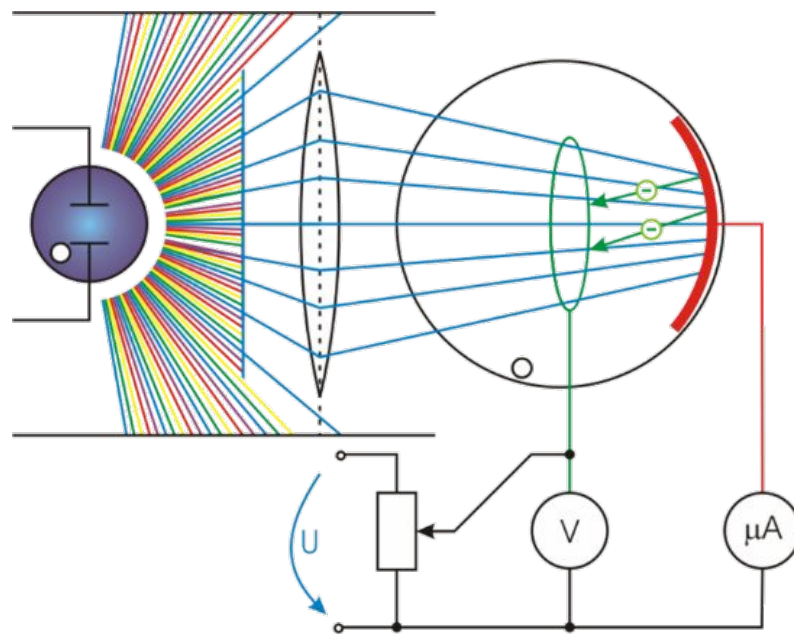


**Вывод**

**Свет вырывает электроны с поверхности пластины**



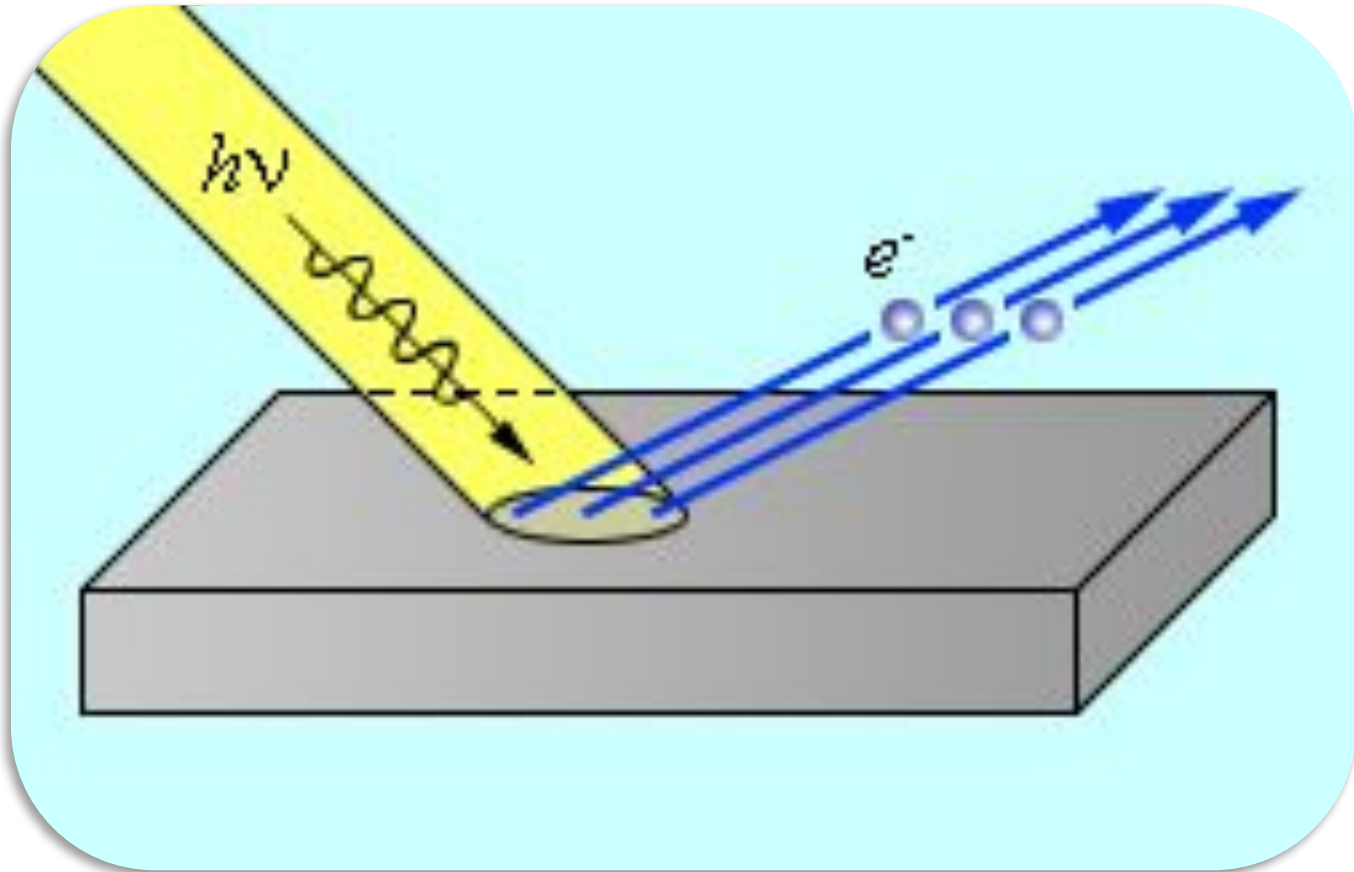




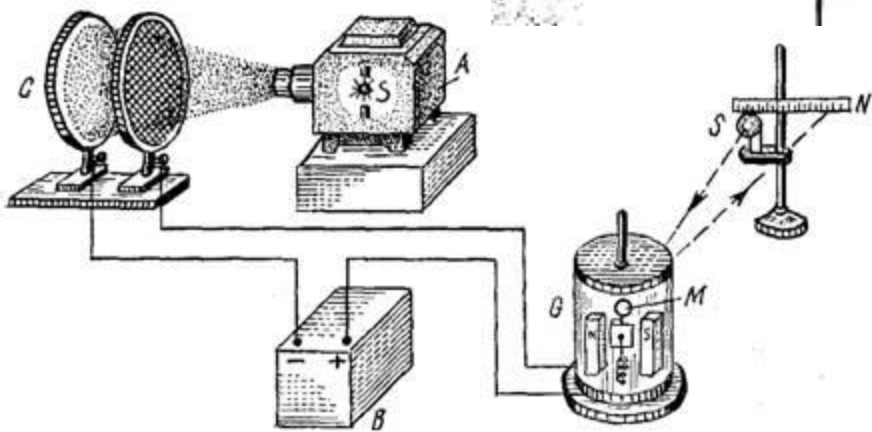
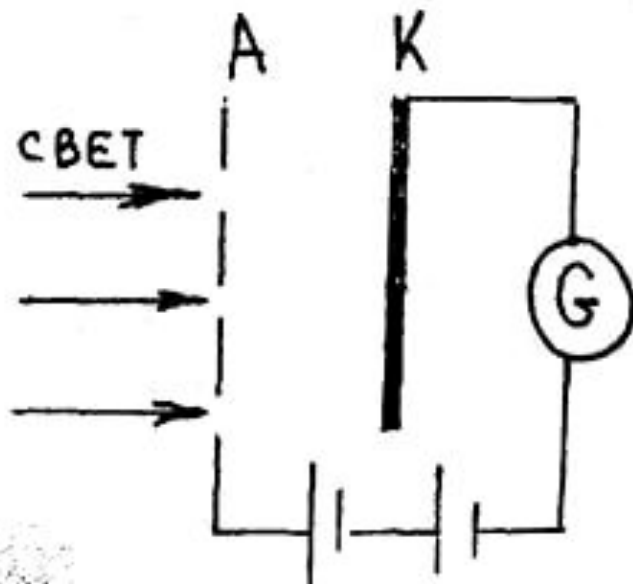
# Фотоэффект

– это вырывание электронов  
с поверхности металла под действием  
света

# Наблюдение фотоэффекта

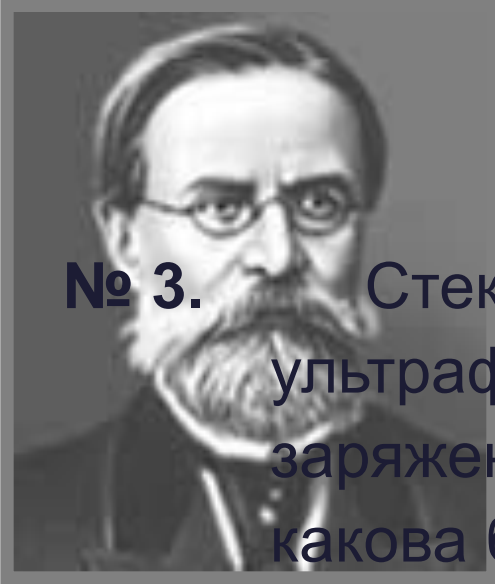


# Схема опыта Столетова, 1888г.



Количественные закономерности фотоэффекта (1888 - 1889) были установлены Русским физиком А.Г. Столетовым

# Эксперимент



**№ 3.** Стекло к экрану перекрывает источник ультрафиолетового излучения. Отрицательно заряженная пластина уже не теряет электроны, какова бы ни была интенсивность излучения. Количественные закономерности фотоэффекта были установлены русским физиком А. Г. Столетовым.

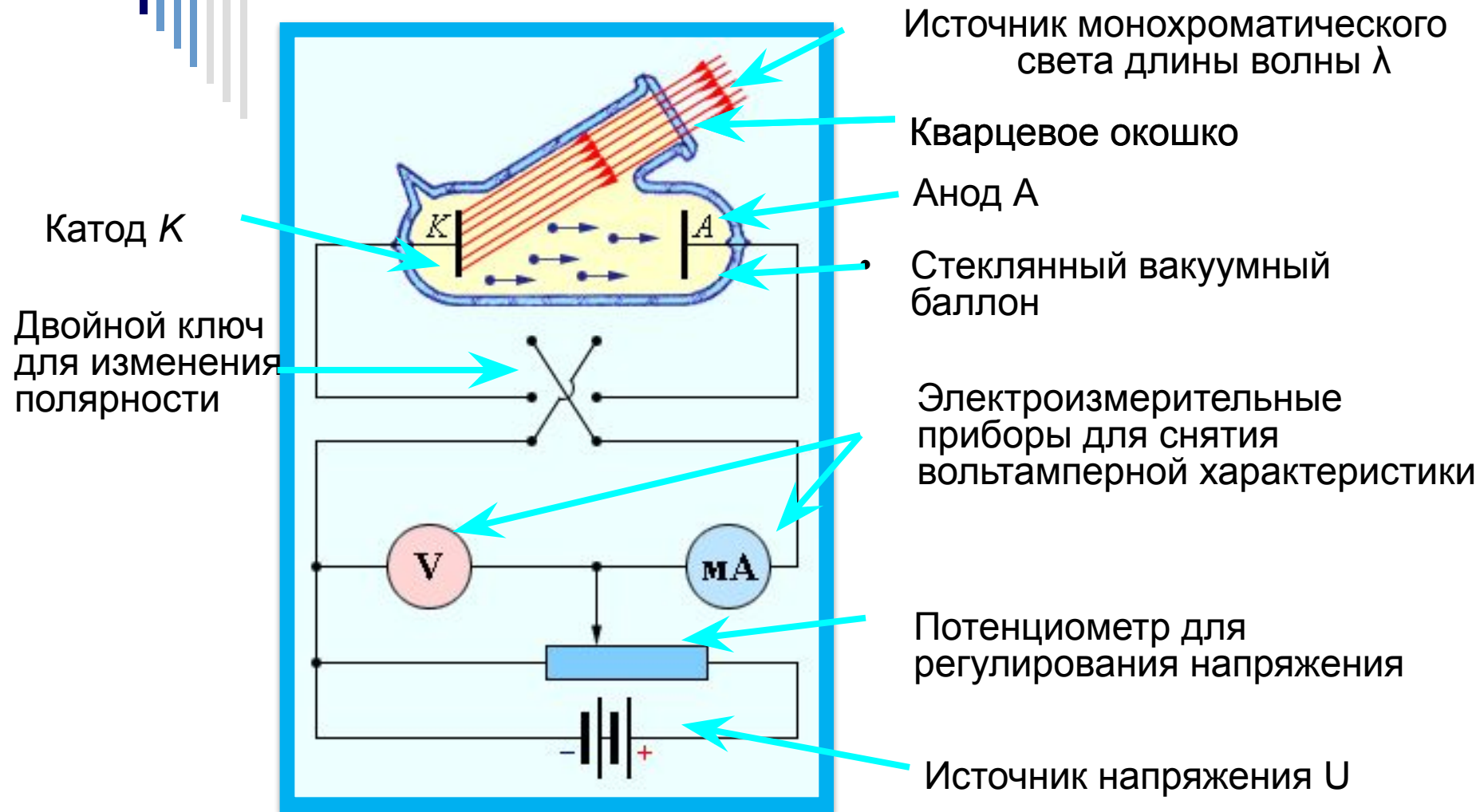


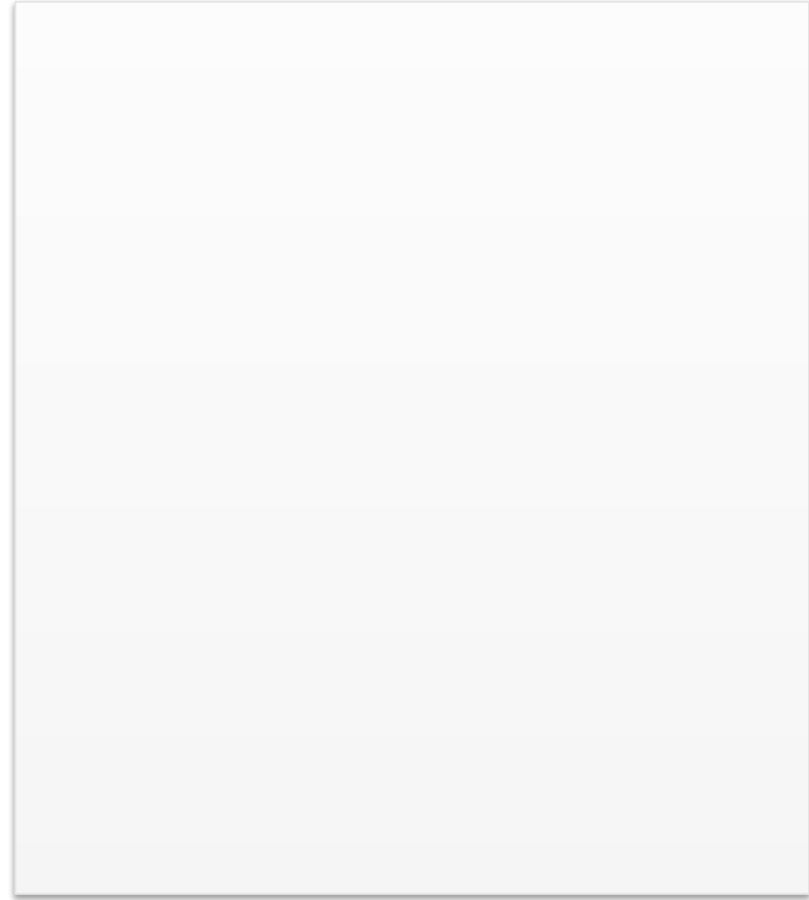
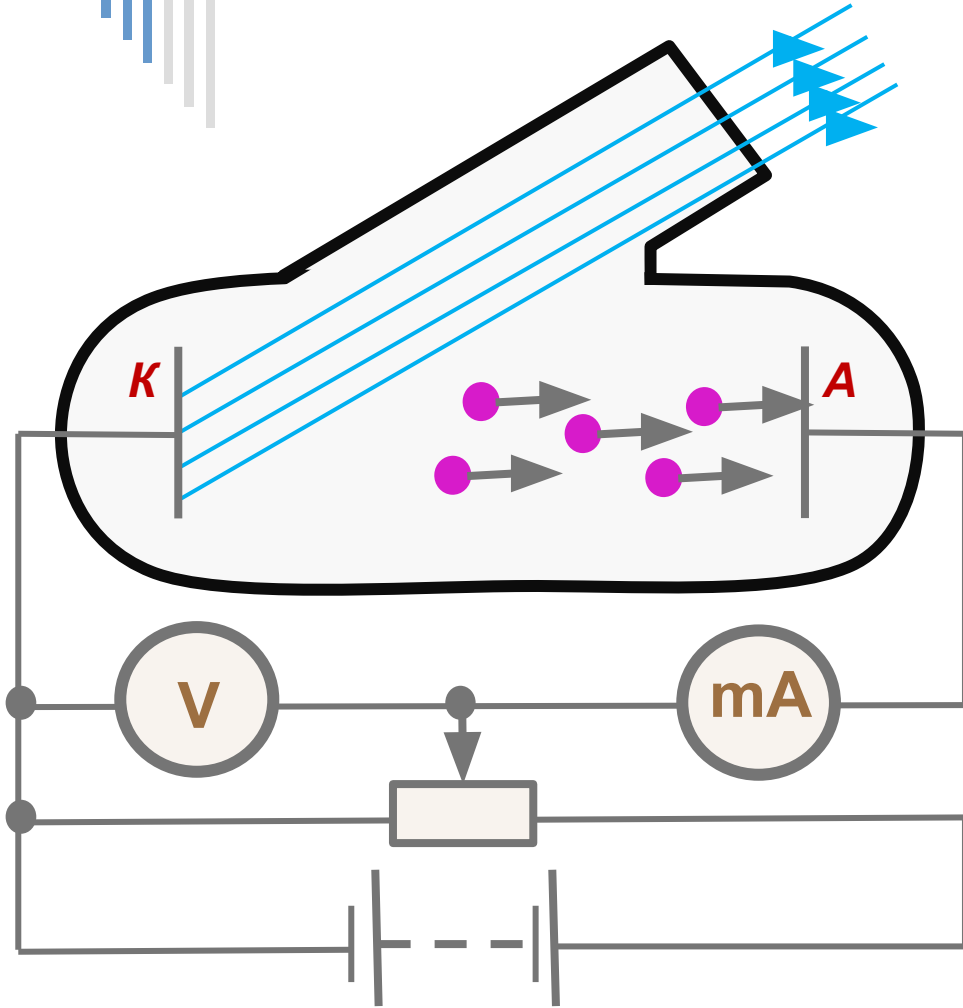
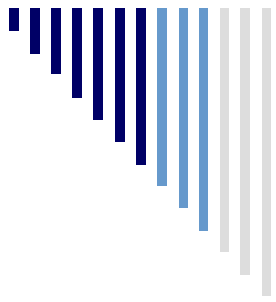
Почему световые волны малой частоты не могут вырывать электроны, если даже амплитуда волны велика и, следовательно, велика сила, действующая на электрон?

***Этот факт нельзя объяснить на основе волновой теории света.***



# Схема экспериментальной установки





# Законы фотоэффекта

Фототок насыщения  
прямопропорционален световому  
потoku.

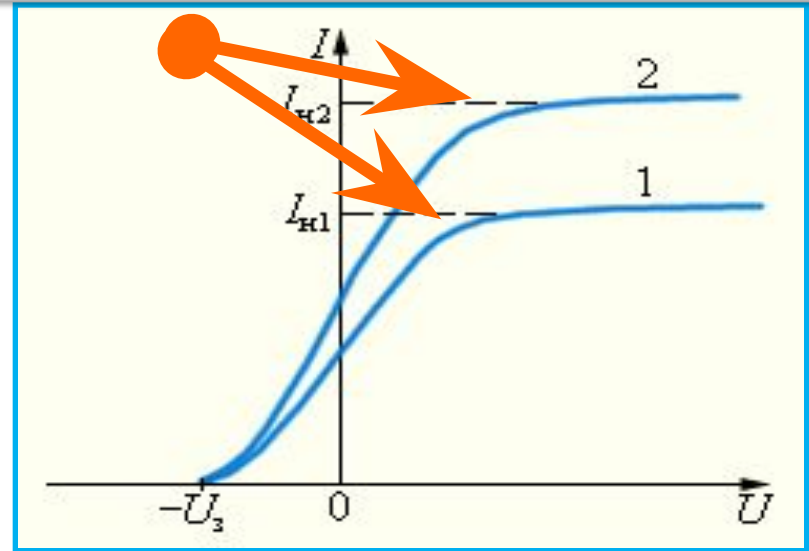
$$I_{нас} \sim \Phi$$

**Пока ничего удивительного нет:**

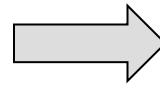
**чем больше энергия светового пучка,  
тем эффективнее его действие**

Максимальное значение силы тока называется **током насыщения**.

Ток насыщения определяется количеством электронов, испущенных за 1 секунду освещенным электродом.



$$eU_3 = \frac{mv^2}{2}$$



$$v = \sqrt{\frac{2eU_3}{m}}$$

# Законы фотоэффекта

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

$$E_k \neq f(\Phi)$$

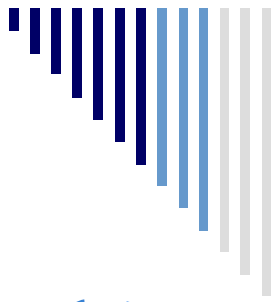
$$E_k = f(\nu)$$

**Чем больше интенсивность света, тем большие силы действуют на электроны со стороны электромагнитного поля волны, тем большая энергия должна передаваться электронам**

**Волновая  
теория**

**2  
закон**

# Законы фотоэффекта



## 3 ЗАКОН

Для каждого вещества существует максимальная длина волны, при которой фотоэффект еще наблюдается, при больших длинах волн фотоэффекта нет.

**Волновая  
теория**

*Е для вырывания электронов можно  
получить от излучения любой длины  
волны*

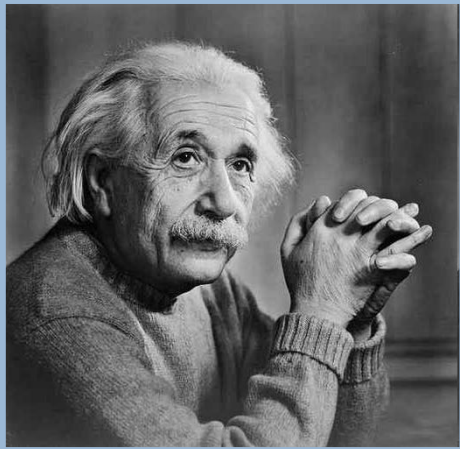
# Законы фотоэффекта

- фотоэффект практически  
безынерционен

Волновая  
теория

Вырывание электрона является  
результатом его раскачивания в поле  
электромагнитной волны, на раскачку  
нужно время.

4 закон



# Теория фотоэффекта

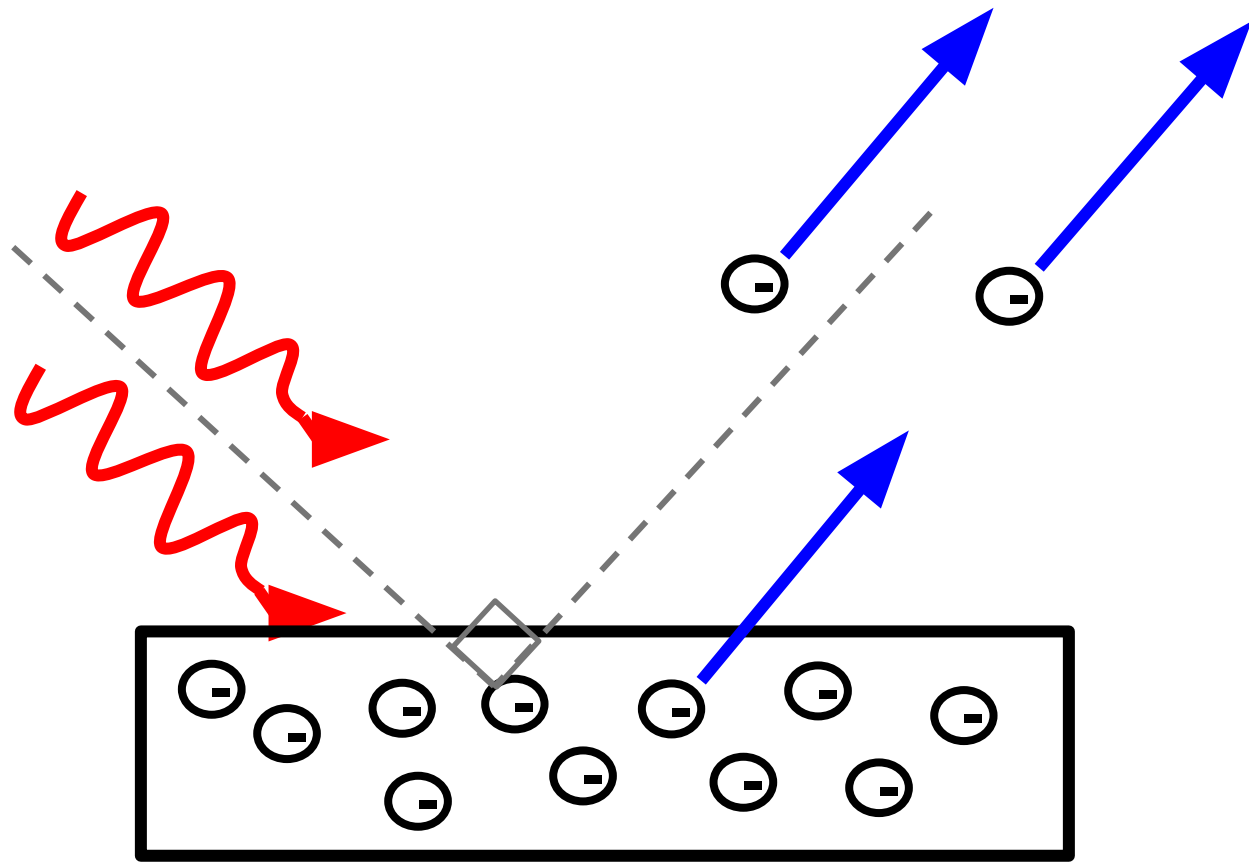
**А. Эйнштейн 1905 год**

Свет имеет прерывистую структуру  
и поглощается отдельными порциями - квантами

*Поглотив квант света,  
электрон получает  
от него энергию  $h\nu$ ,  
совершая работу выхода,  
покидает вещество.*

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







# Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

*A - работа выхода*

*E = hν - энергия порции излучения*

$\frac{mv^2}{2}$  - кинетическая энергия электрона

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



---

# Объяснение законов фотоэффекта

- 1. Чем больше интенсивность света, тем больше порций света падает на электрод, тем больше вырывается электронов.
-



# Объяснение законов фотоэффекта

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

$$V = \sqrt{\frac{2(h\nu - A)}{m}}$$



### 3. Красная граница фотоэффекта

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

*Минимальная частота света соответствует  $W_k = 0$*

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h} \quad \longrightarrow \quad h \frac{c}{\lambda_{\max}} = A$$

# Предельная частота фотоэффекта



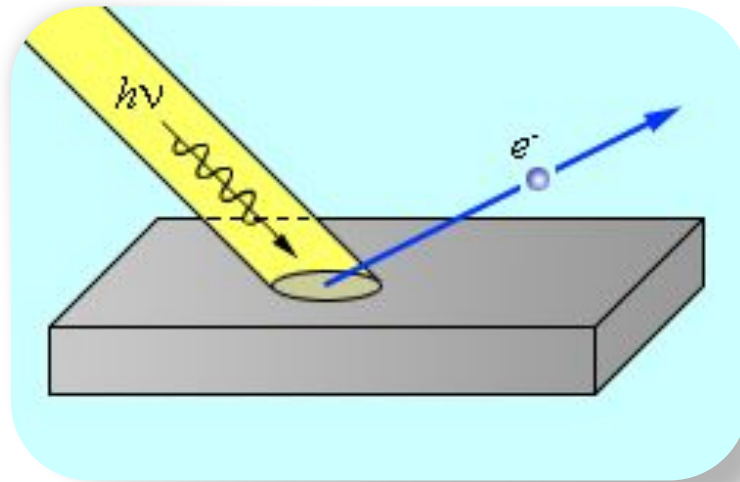
$$\lambda_{max} = 3,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$



$$\lambda_{max} = 6,8 \cdot 10^{-34} \text{ м}$$

# Объяснение законов фотоэффекта

- 4. Порция света практически мгновенно вырывает из вещества один электрон



# Экспериментальное определение постоянной Планка

Как следует из уравнения Эйнштейна, это позволяет экспериментально определить тангенс угла наклона прямой, выражающей значение постоянной Планка.

Такие измерения были выполнены Ш. Р. Милликеном, в 1914 г. и дали хорошее согласие со значением, найденным Планком. равно отношению постоянной Планка  $h$  к заряду электрона  $e$ .



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





# Решение задач

## Часть А – базовый уровень

1. В каком случае электроскоп, заряженный отрицательным зарядом, быстрее разрядится при освещении:

1. рентгеновским излучением;
2. ультрафиолетовым излучением?

1. 1.

2. 2.

3. Одновременно.

4. Электроскоп не разрядится в обоих случаях.



## Часть А – базовый уровень

2. Как изменится скорость электронов при фотоэффекте, если увеличить частоту облучающего света, не изменяя общую мощность излучения?

1. Увеличится.

2. Не изменится.

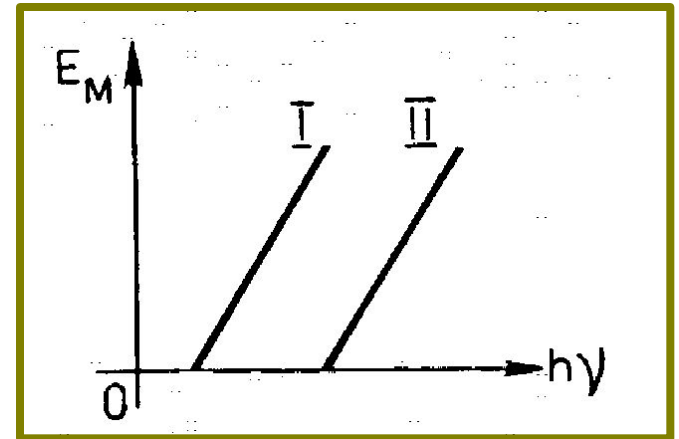
3. Уменьшится.

4. Ответ неоднозначен.



## Часть А – базовый уровень

3. На рисунке приведены графики зависимости максимальной энергии фотоэлектронов от энергии падающих на фотокатод фотонов. В каком случае материал катода фотоэлемента имеет меньшую работу выхода?



1. I.

2. II.

3. Одинаковую.

4. Ответ неоднозначен.



## Часть А – базовый уровень

4. При освещении катода вакуумного фотоэлемента потоком монохроматического света происходит освобождение фотоэлектронов. Как изменится максимальная энергия фотоэлектронов при уменьшении частоты в 2 раза?

1. Не изменится.
2. Уменьшится в 2 раза.
3. Уменьшится более чем в 2 раза.
4. Уменьшится менее чем в 2 раза.



## Часть А – базовый уровень

**5.** Длина волны рентгеновского излучения равна  $10^{-10}$  м. Во сколько раз энергия одного фотона этого излучения превосходит энергию фотона видимого света с длиной волны  $4 \cdot 10^{-7}$  м?

1. 25

2. 40

3. 2500

4. 4000



## Часть А – базовый уровень

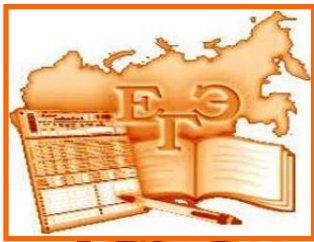
**6.** Для опытов по фотоэффекту взяли пластину из металла с работой выхода  $3,4 \cdot 10^{-19}$  Дж и стали освещать ее светом частоты  $6 \cdot 10^{14}$  Гц. Затем частоту уменьшили в 2 раза, одновременно увеличив в 1,5 раза число фотонов, падающих на пластину за 1 с. В результате этого число фотоэлектронов, покидающих пластину за 1 с,

1. увеличилось в 1,5 раза

2. стало равным нулю

3. уменьшилось в 2 раза

4. уменьшилось более чем в 2 раза



## Часть А – повышенный уровень



Один из способов измерения постоянной Планка связан с определением максимальной кинетической энергии электронов при фотоэффекте с помощью измерения напряжения, задерживающего их. В таблице представлены результаты одного из первых таких опытов.

Задерживающее напряжение $U$ , в	0,4	0,9
Частота света, $\nu \cdot 10^{14}$ , Гц	5,5	6,9

Постоянная Планка по результатам этого эксперимента равна

1.  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с

2.  $5,7 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с

3.  $6,3 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с

4.  $6,0 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с



## Решение задачи № 1

$$\left. \begin{array}{l} hv_1 = A + \frac{mv^2}{2} \\ hv_2 = A + \frac{mv^2}{2} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} hv_1 = A + eU_{31} \\ hv_2 = A + eU_{32} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{вычитаем} \\ \Downarrow \end{array}$$
$$\frac{mv^2}{2} = eU_3 \quad h(v_2 - v_1) = e(U_{32} - U_{31})$$

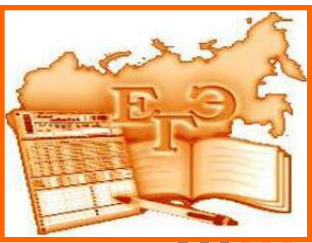
$$v_2 - v_1 = \frac{e\Delta U}{h}$$

$$h = \frac{e\Delta U}{\Delta v}$$

**ОТВЕТ**

$$h = 5,7 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$





## Часть А – повышенный уровень

2. Фотоэффект наблюдают, освещая поверхность металла светом фиксированной частоты. При этом задерживающая разность потенциалов равна  $U$ . После изменения частоты света задерживающая разность потенциалов увеличилась на  $\Delta U = 1,2$  В.

Насколько изменилась частота падающего света?

1.  $1,8 \cdot 10^{14}$  Гц

3.  $6,1 \cdot 10^{14}$  Гц

2.  $2,9 \cdot 10^{14}$  Гц

4.  $1,9 \cdot 10^{15}$  Гц



Обратите **ВНИМАНИЕ**  
– стандартные и очень схожие задачи.

Встречаются во многих вариантах ЕГЭ.

$$\left. \begin{aligned} hv_1 &= A \\ hv_2 &= A + \frac{mv^2}{2} \end{aligned} \right\} \text{вычитаем} \Rightarrow h(v_2 - v_1) = e(U_{32} - U_{31})$$

$$v_2 - v_1 = \frac{e\Delta U}{h}$$

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3$$

**ОТВЕТ**

$$v_2 - v_1 = 2,9 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$



## Решение задачи № 2

$$\left. \begin{aligned} h\nu_1 &= A + \frac{mv^2}{2} \\ h\nu_2 &= A + \frac{mv^2}{2} \end{aligned} \right\} \text{вычитаем} \quad \Rightarrow \quad h(\nu_2 - \nu_1) = e(U_{32} - U_{31})$$

$$\nu_2 - \nu_1 = \frac{e\Delta U}{h}$$

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3$$

**Ответ**

$$\nu_2 - \nu_1 = 2,9 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$



## Часть А – повышенный уровень

**3.** Красная граница фотоэффекта исследуемого металла соответствует длине волны  $\lambda_{кр} = 600$  нм. При освещении этого металла светом длиной волны  $\lambda$  максимальная кинетическая энергия выбитых из него фотоэлектронов в 3 раза меньше энергии падающего света.

Какова длина волны  $\lambda$  падающего света?

1. 133 нм

2. 300 нм

3. 400 нм

4. 1200 нм



## Решение задачи № 3

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

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$\frac{m\nu^2}{2} = \frac{h\nu}{3}$$

$\Rightarrow$

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{hc}{3\lambda}$$

$$A = \frac{hc}{\lambda_{кр}}$$

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_{кр}} + \frac{hc}{3\lambda}$$

$$\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{3\lambda} = \frac{1}{\lambda_{кр}}$$

$$\frac{2}{3\lambda} = \frac{1}{\lambda_{кр}}$$

$$\lambda = \frac{2\lambda_{кр}}{3}$$

**ОТВЕТ**

$$\lambda = 400 \text{ нм}$$



## Решение задачи № 3

$$\left. \begin{array}{l} h\nu = A + \frac{m\nu^2}{2} \\ \nu = \frac{c}{\lambda} \\ \frac{m\nu^2}{2} = \frac{h\nu}{3} \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \frac{hc}{\lambda} = A + \frac{hc}{3\lambda} \\ A = \frac{hc}{\lambda_{кр}} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = \frac{2\lambda_{кр}}{3}$$

**Ответ**

$$\lambda = 400 \text{ нм}$$



## Часть С

1. Фотон с длиной волны, соответствующей красной границе фотоэффекта, выбивает электрон из металлической пластинки (катода) сосуда, из которого откачан воздух. Электрон разгоняется однородным электрическим полем напряженностью  $E = 5 \cdot 10^4$  В/м. Какой путь пролетел в этом электрическом поле электрон, если он приобрел скорость  $3 \cdot 10^6$  м/с. Релятивистские эффекты не учитывать.
-



## Решение задачи № 1

$$\nu_0 = 0, \text{ т.к. } \lambda = \lambda_{\text{кр}}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{A} &= \frac{m\nu^2}{2} \\ A &= FS = eES \end{aligned} \right\} \Rightarrow S = \frac{m\nu^2}{2eE}$$

**ОТВЕТ**

$$S \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$





## Решение задачи № 1

$$\nu_0 = 0, \text{ т.к. } \lambda = \lambda_{\text{кр}}$$

$$\left. \begin{array}{l} A = \frac{m\nu^2}{2} \\ A = FS = eES \end{array} \right\} \Rightarrow S = \frac{m\nu^2}{2eE}$$

**Ответ**

$$S \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$



## Часть С

- 2.** Какова максимальная скорость электронов, выбиваемых из металлической пластины светом с длиной волны  $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$  м, если красная граница фотоэффекта  $\lambda_{кр} = 540$  нм?
-



## Решение задачи № 2





--



## Часть С

- 3.** Красная граница фотоэффекта для вещества фотокатода  $\lambda_{\text{кр}} = 290$  нм. При облучении катода светом с длиной волны  $\lambda$  фототок прекращается при напряжении между анодом и катодом  $U = 1,5$  В.

Определите длину волны  $\lambda$ .

---



## Решение задачи № 3




--

--

--

*Летим!*



**И вы обязательно будете  
развлекаться**