

# Великие «шутят»

➤ «...Если это правильно, то это означает конец физики как науки.»

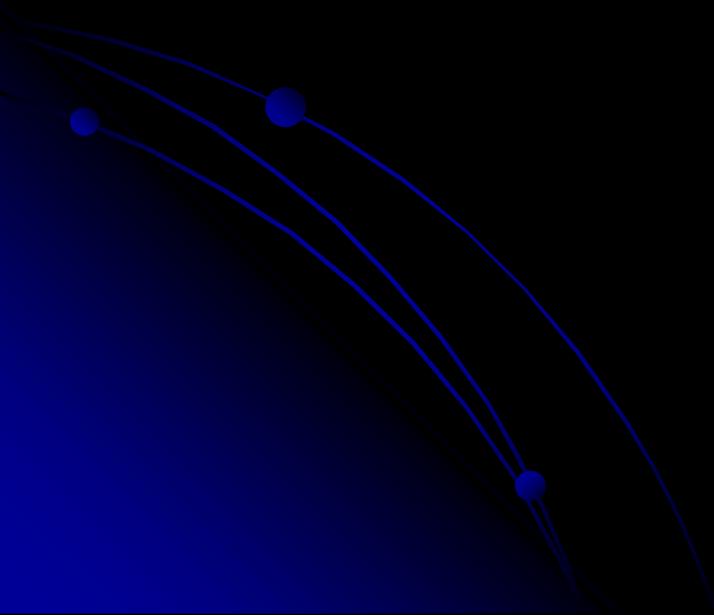
➤ А. Эйнштейн

➤ «...Физика теперь снова зашла в тупик. Во всяком случае для меня она слишком сложна и я предпочел бы быть комиком в кино... и не слышать ничего о физике.»

➤ В. Паули

# Тема 1. Корпускулярно-волновой дуализм

- 1.1. Противоречия классической физики



Пространство-время

Законы сохранения

$E$

$\vec{p}$

$\vec{J}$

Частицы

Уравнения динамики

МТ, АТТ, СС

Поля

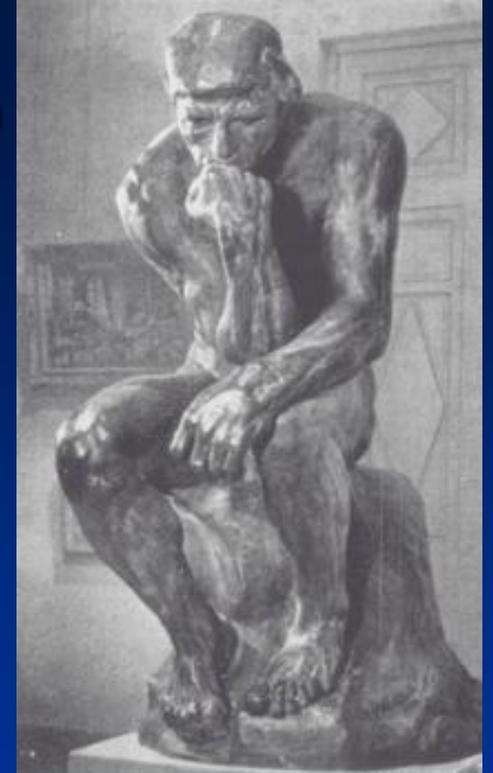
Уравнения Максвелла

Поляризация,  
интерференция,  
дифракция, дисперсия

# Античные мыслители о делимости яблока.



Демокрит (4 в.д.н.э.)  
Деление яблока  
возможно только до  
«атомов».  
(материя дискретна)



Аристотель (4 в.д.н.э.)  
Возможно  
бесконечное деление  
яблока.  
(материя непрерывна)

# Первые проявления атомизма

- Лавуазье ввел понятие элемента (конец 18 в.)
- Дальтон вскоре установил минимальную порцию элемента – атом
- Фарадей открыл электрон (конец 19 в.)
- Затем был открыт протон

# Противоречия модели Бора-Резерфорда

## АТОМЫ

- Размеры атомов примерно одинаковы
- Атомы одного элемента неразличимы
- Внешнее воздействие практически не меняет размеров атомов
- Ускоренное движение электронов должно приводить к его падению на ядро

## ПЛАНЕТЫ

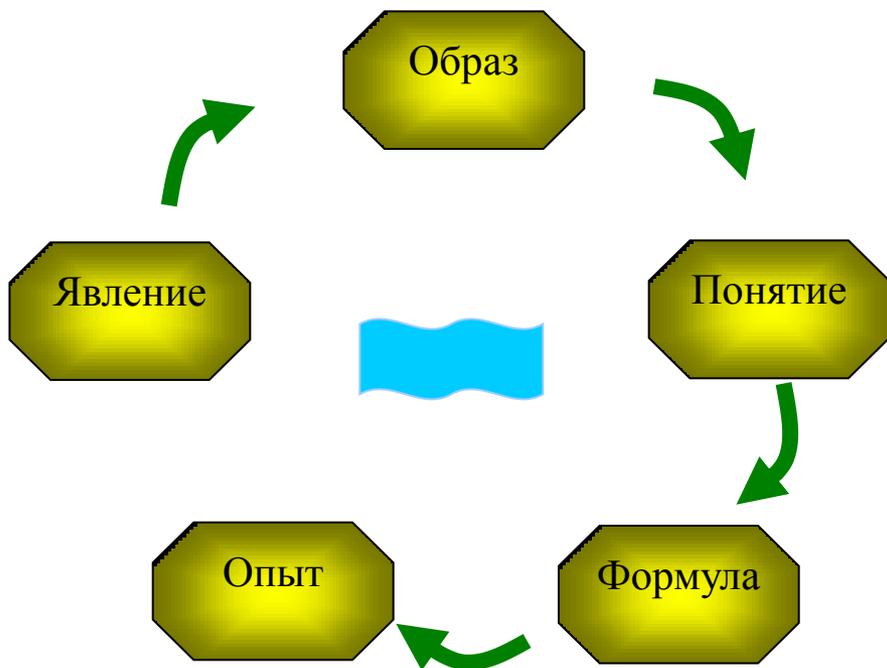
- Размеры планетных систем могут сильно различаться
- Нет одинаковых планетных систем
- Внешнее воздействие может изменить планетную систему

# Пространство-время и физические теории

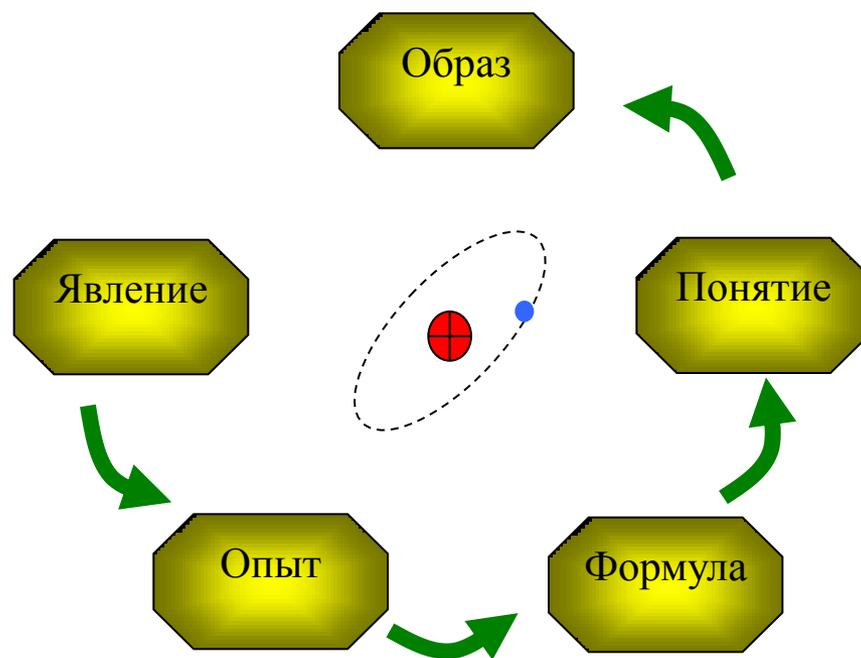


# Схемы познания

макромир



микромир





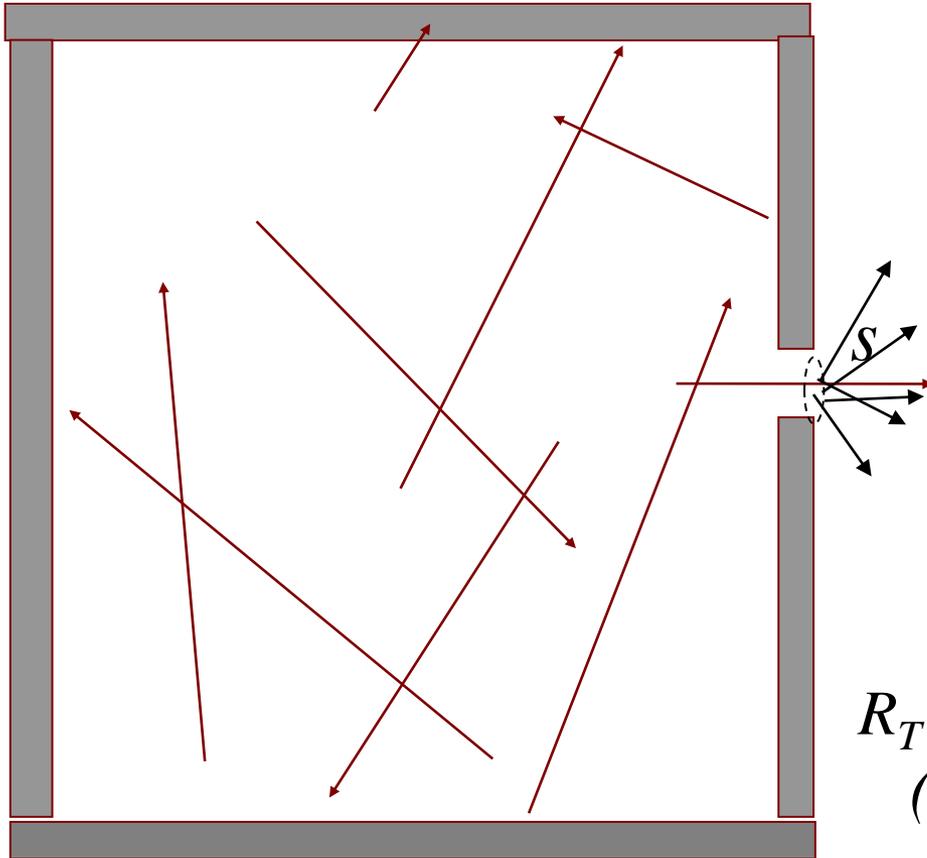
# Тема 1. Корпускулярно-волновой дуализм

- 1.1. Противоречия классической физики
- 1.2. Гипотеза Планка о квантовом характере излучения



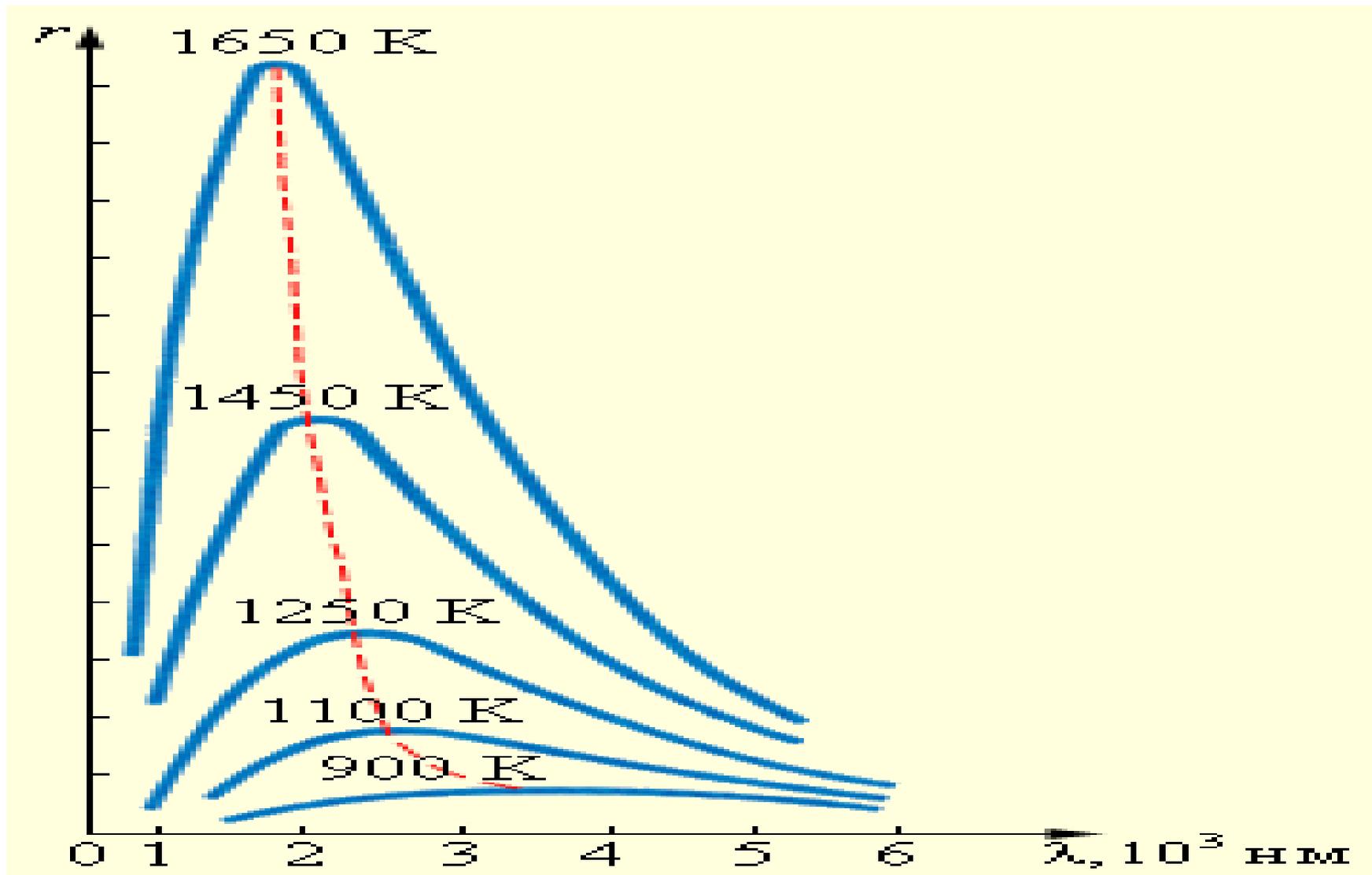
**Планк Макс**  
(23.IV.1858–4.X.1947)

# Модель абсолютно черного тела

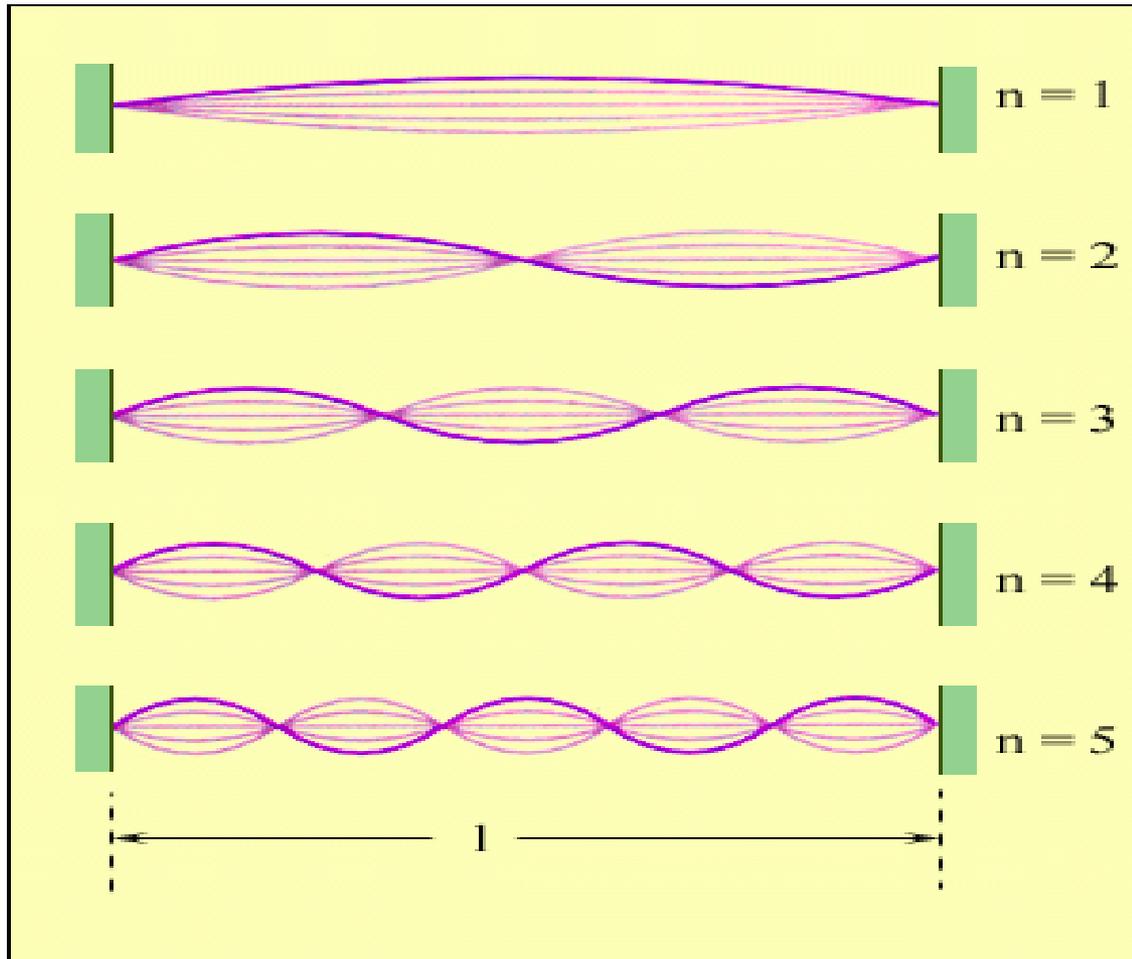


$R_T$  - энергетическая светимость  
(поток энергии, испускаемый  
единицей поверхности  
по всем направлениям  
в пределах телесного угла  $2\pi$ )

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

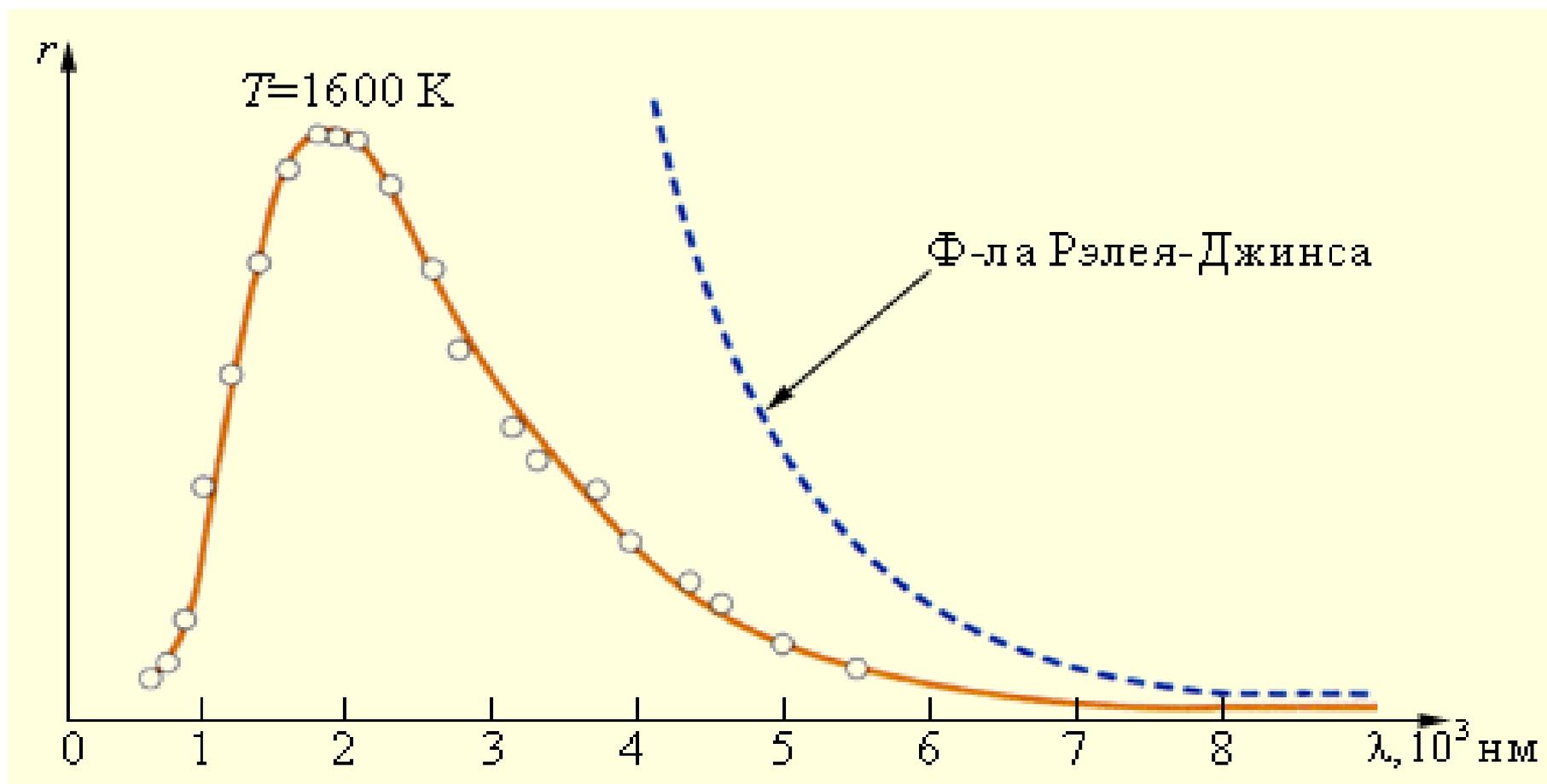


Первые пять нормальных мод колебаний струны, закрепленной на обоих концах.

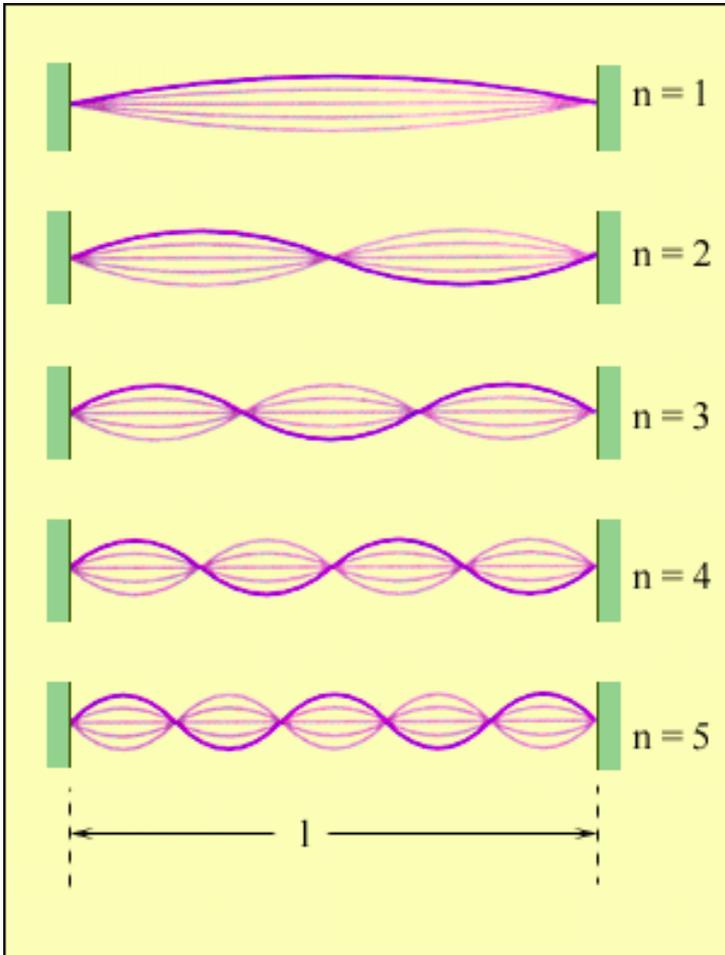


$$E_n = \frac{1}{2} kT$$

Сравнение закона распределения энергии по длинам волн  $r(\lambda, T)$  в излучении абсолютно черного тела с формулой Рэля–Джинса при  $T = 1600$  К.



# Гипотеза Планка (1900 г.)

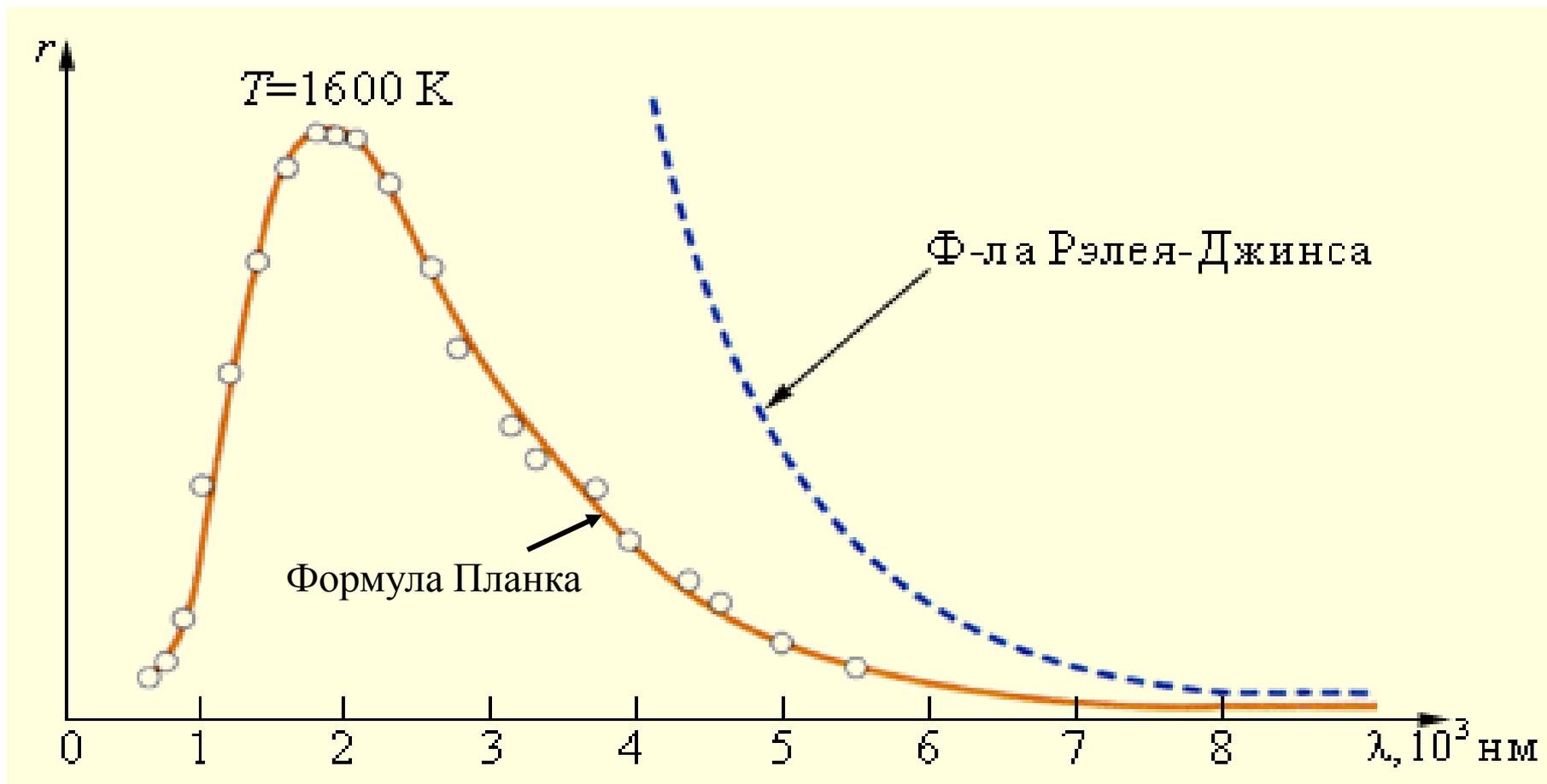


$$E_m = m\hbar\omega, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\Delta E = \hbar\omega$$

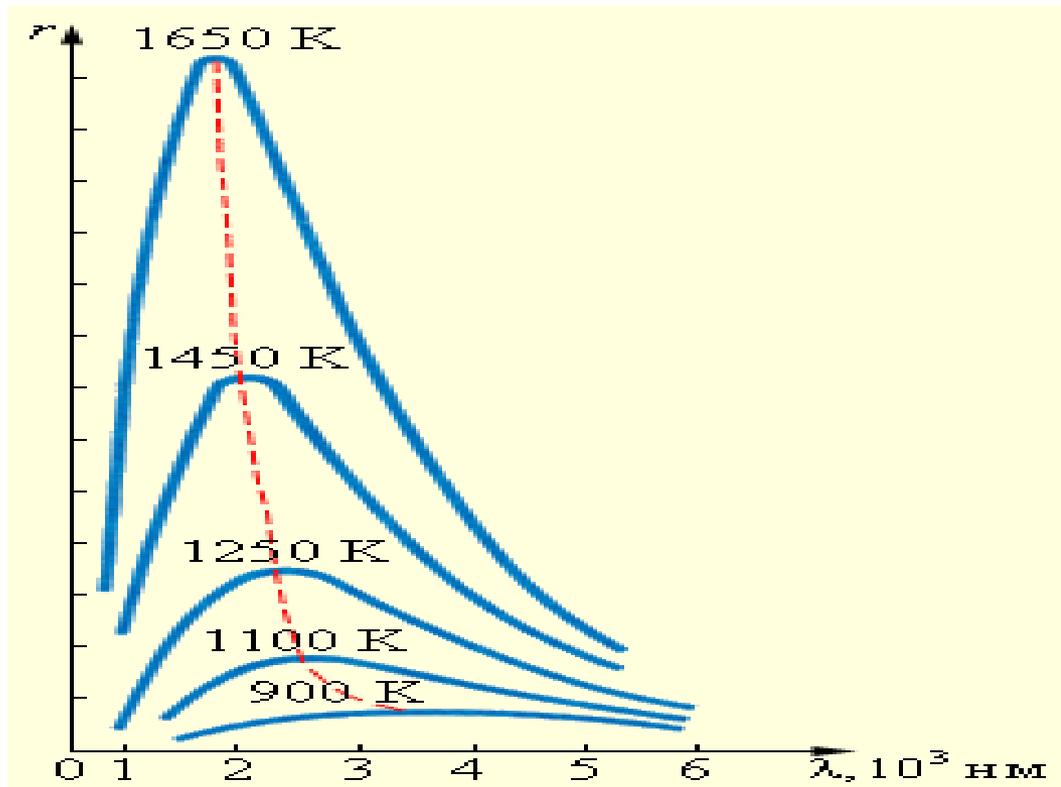
$$\Delta E = h\nu$$

Сравнение закона распределения энергии по длинам волн  $r(\lambda, T)$  в излучении абсолютно черного тела с формулами Планка и Рэля–Джинса при  $T = 1600$  К.



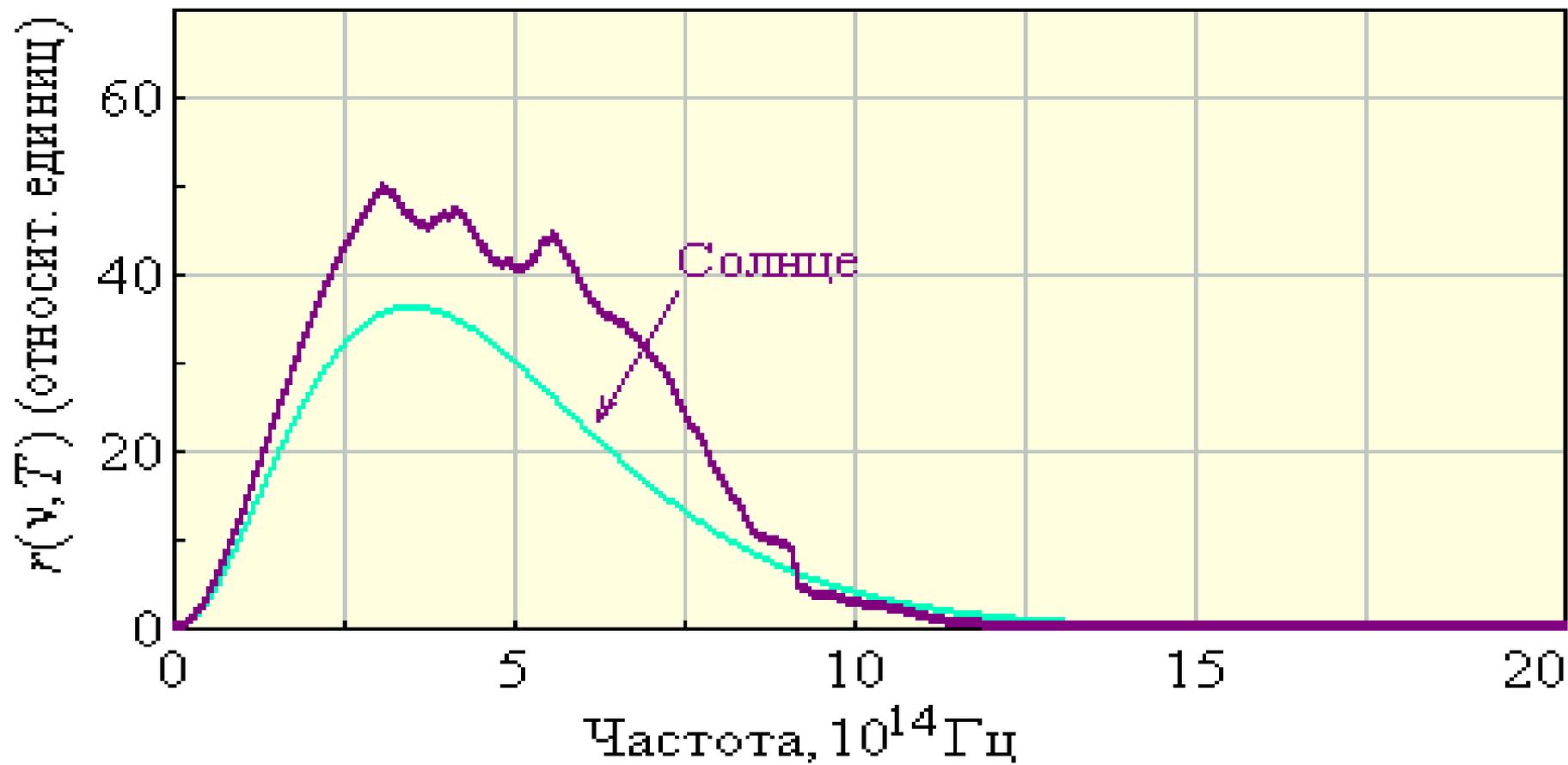
# Закон Стефана-Больцмана

$$R^* = \sigma T^4$$

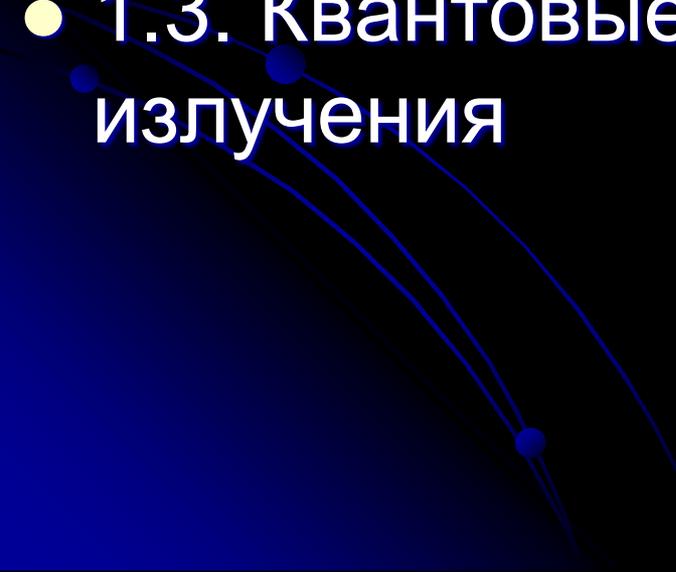


# Закон Вина

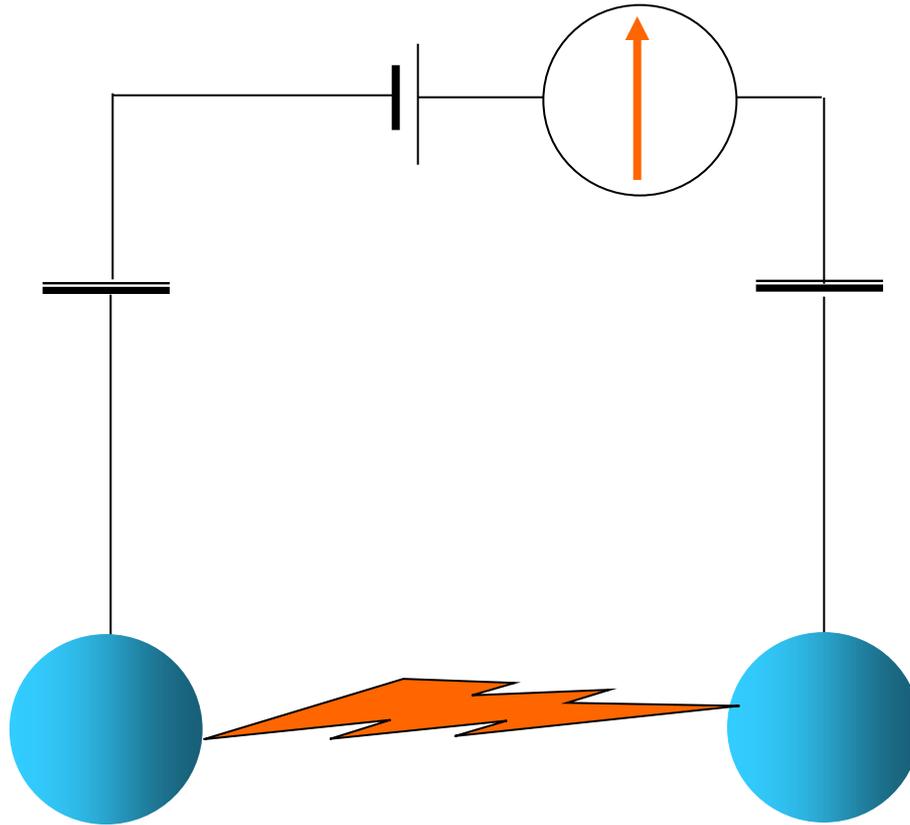
$$T\lambda_m = b$$



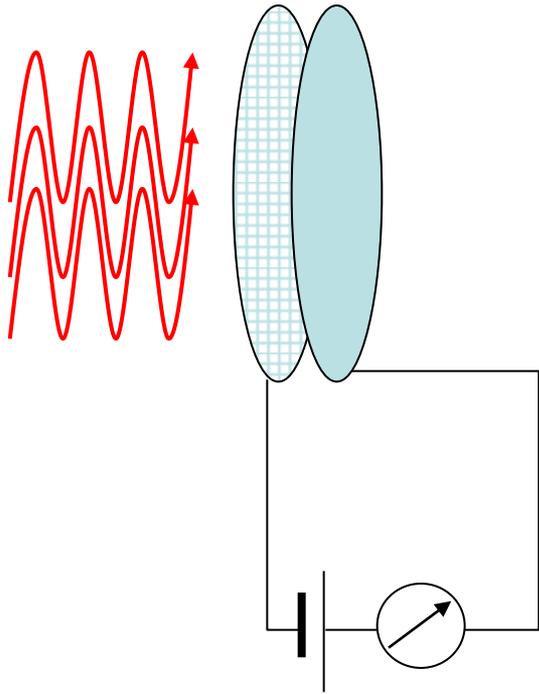
# Тема 1. Корпускулярно-волновой дуализм

- 1.2. Гипотеза Планка о квантовом характере излучения
  - 1.3. Квантовые свойства электромагнитного излучения
- 

# Опыты Герца (1887 г.)

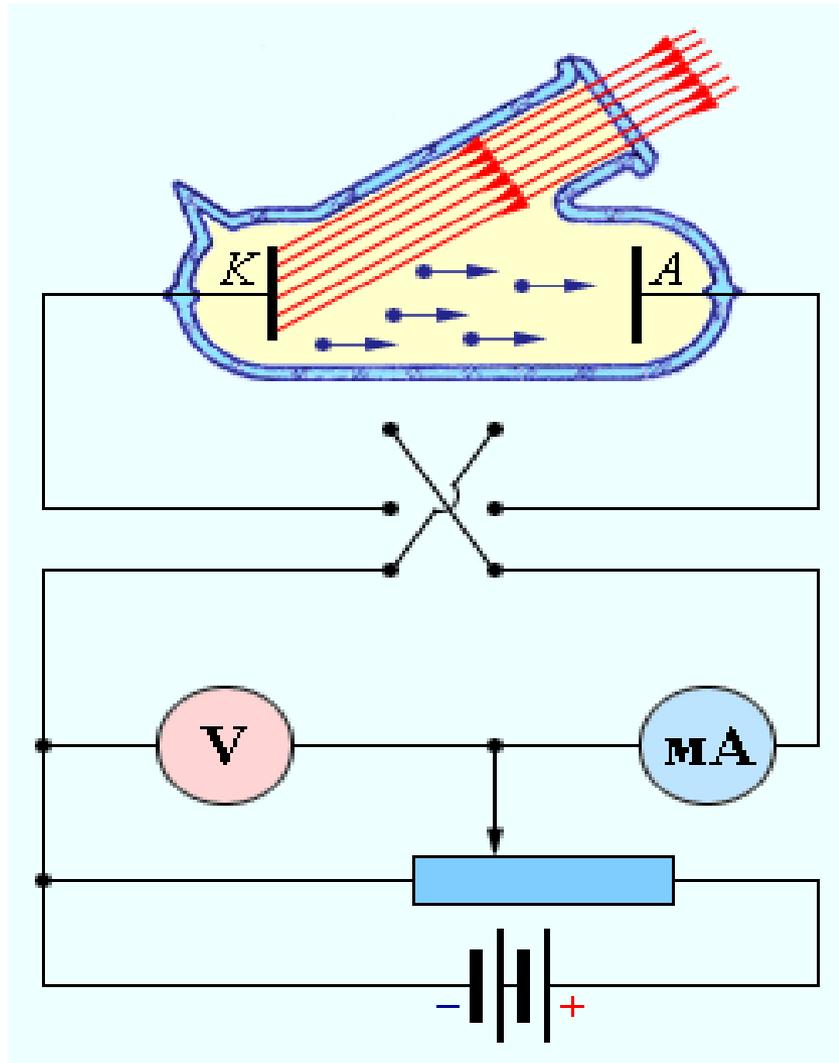


# Опыты Столетова (1888 г.)

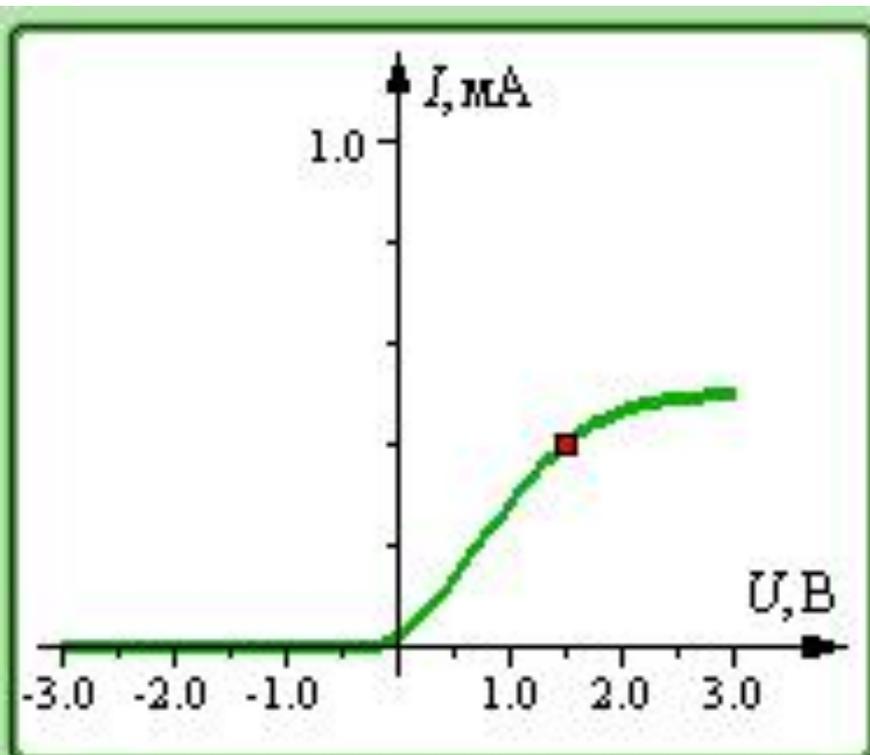
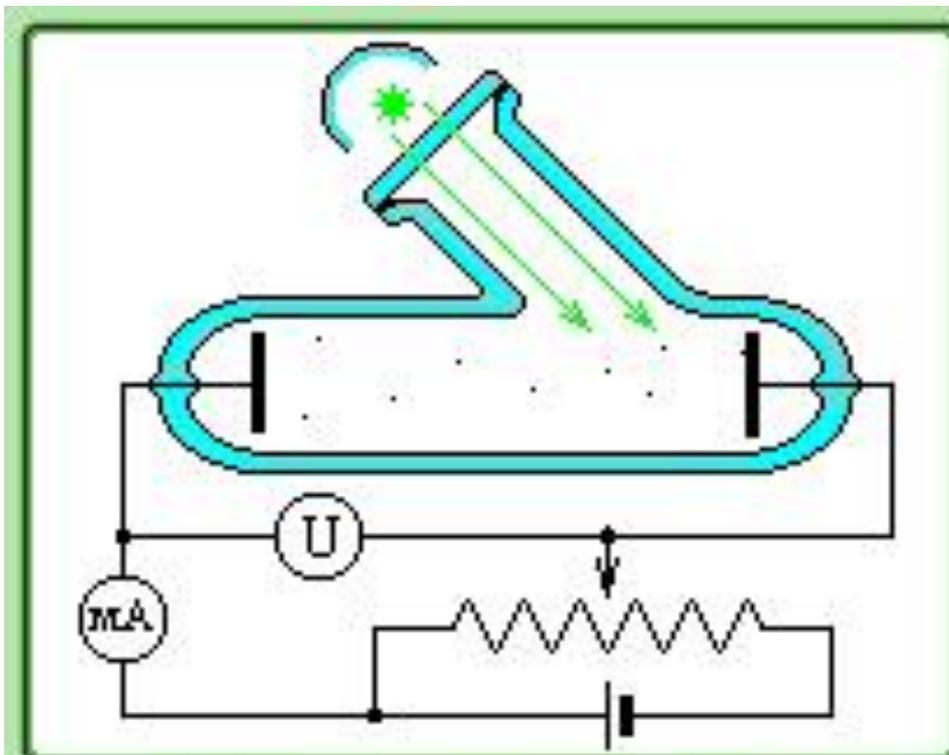


- Фототок пропорционален интенсивности света
- Испускаются электроны
- Максимальный эффект при облучении УФ светом

# Схема экспериментальной установки Ленарда и Томсона для изучения фотоэффекта (1898 г.)



# Модель. Фотоэффект



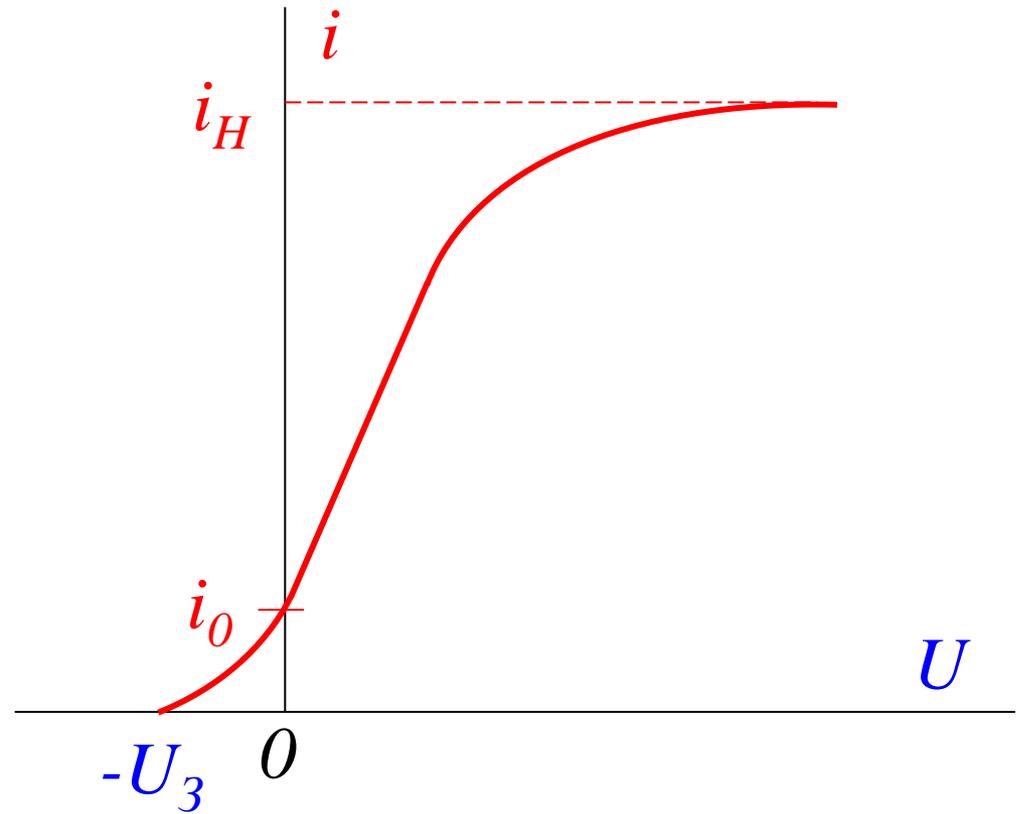
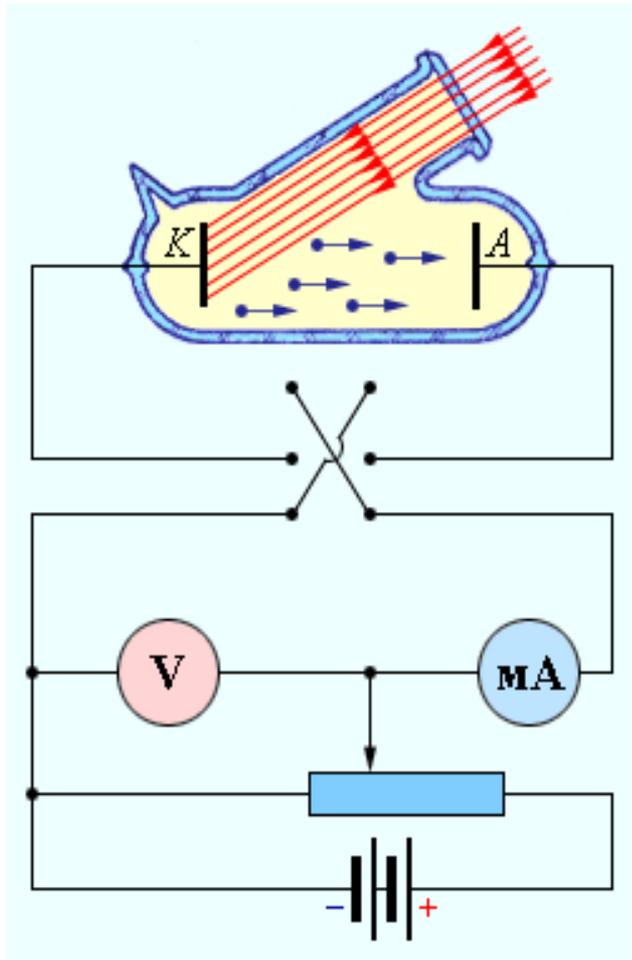
$U = 1.5$  B    $P = 0.5$  мВт

$\lambda = 540$  нм

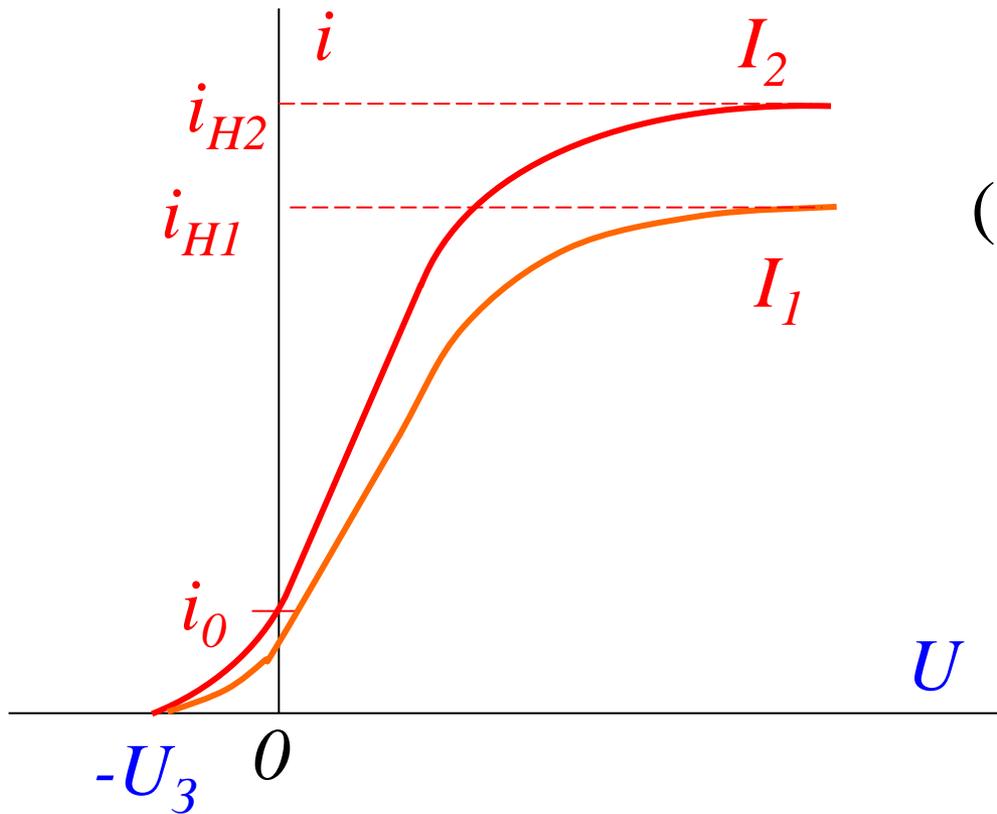
$$h\nu = 2.30 \text{ эВ}$$

$$I = 0.402 \text{ мА}$$

# 1. Зависимость силы фототока от приложенного напряжения



Зависимость силы фототока  $i$  от приложенного напряжения при двух значениях интенсивности света  $I_2 > I_1$



Т.е.  $i_H \sim I$   
(см. закон Столетова)

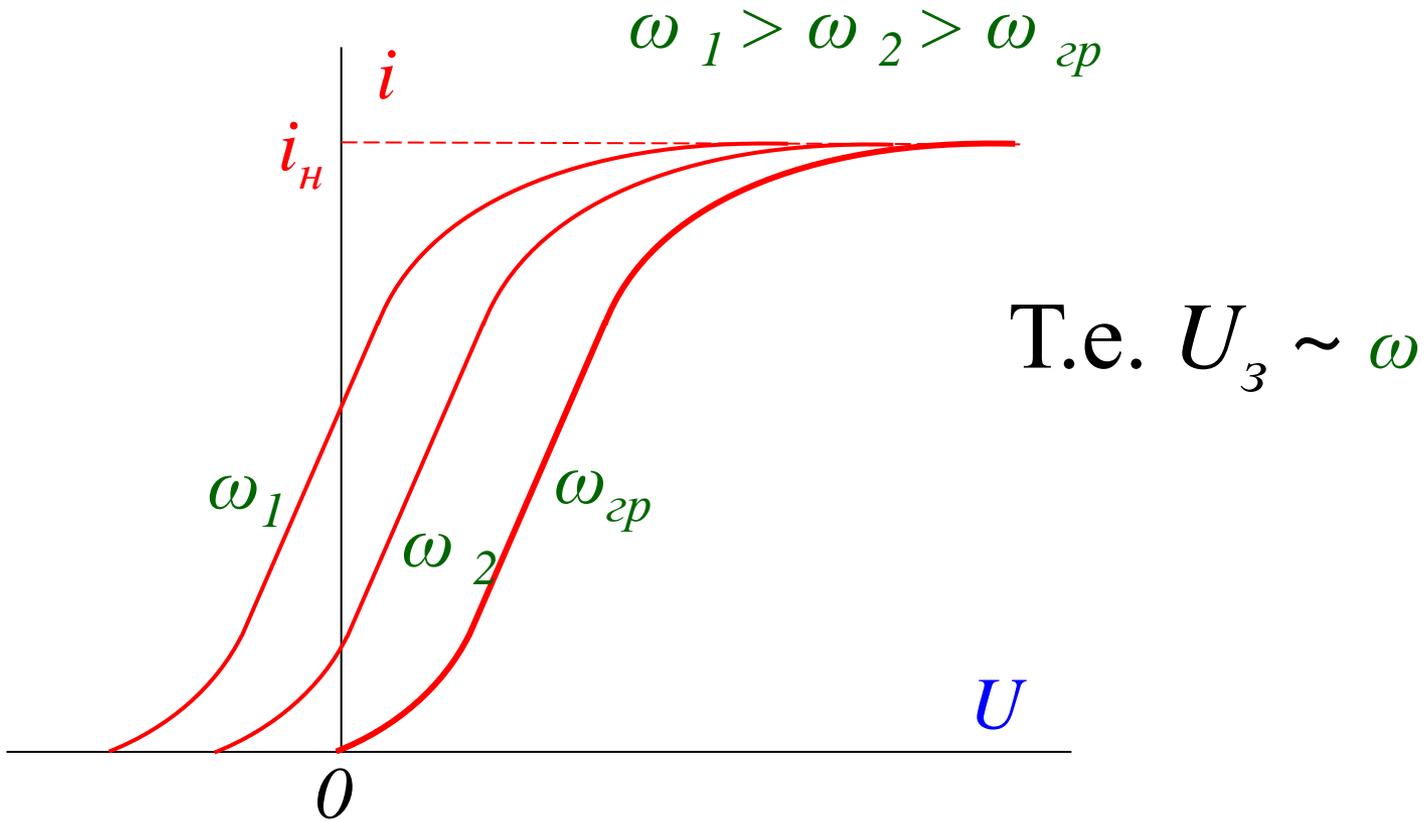
Но  $U_3 \not\sim I$

# По классической теории См. п.14.1 (Дисперсия)

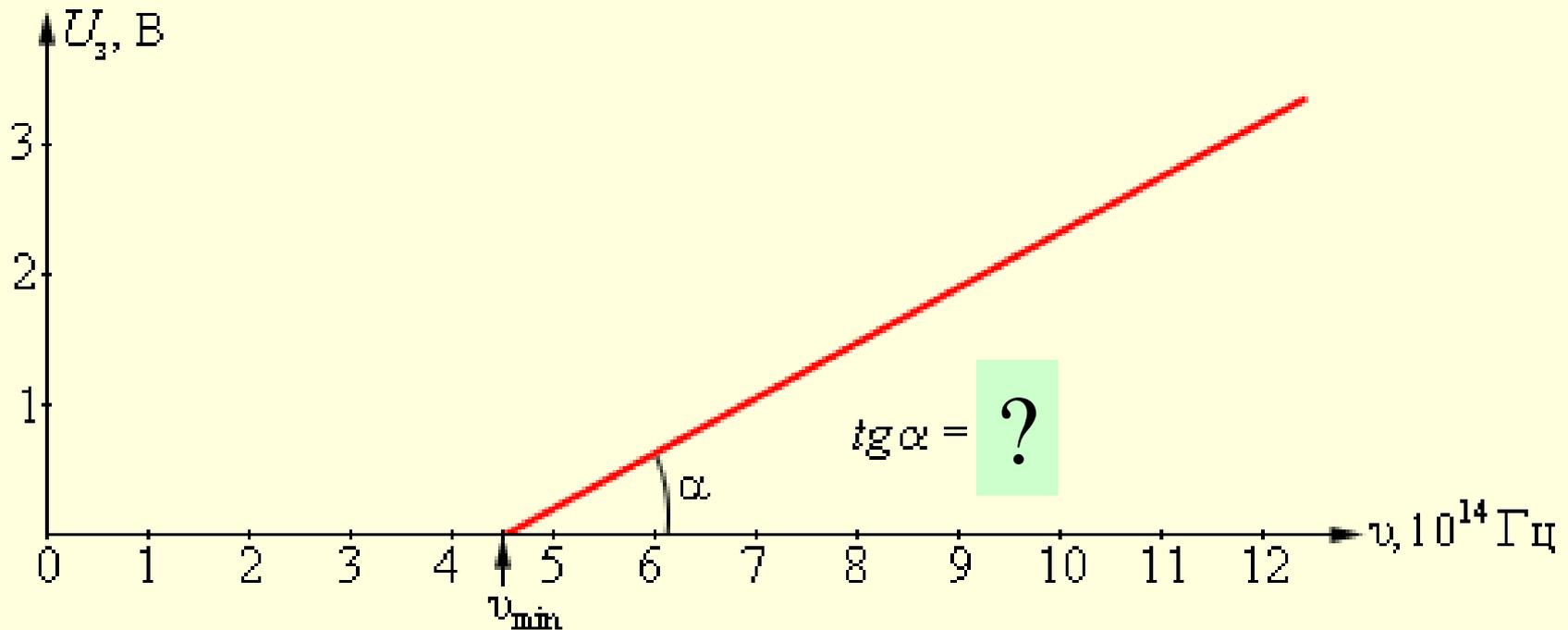
$$\vec{r}_0 = \frac{\frac{e}{m} \vec{E}_0}{\left( -\omega^2 + i \frac{\omega}{\tau} + \omega_0^2 \right)} \Rightarrow \vec{r}_0 = \frac{e \vec{E}_0}{m \omega^2}$$

Т.е.  $U_3 \sim I$

## 2. Зависимость фототока от напряжения при разных частотах света



# Зависимость запирающего потенциала $U_3$ от частоты $\nu$ падающего света

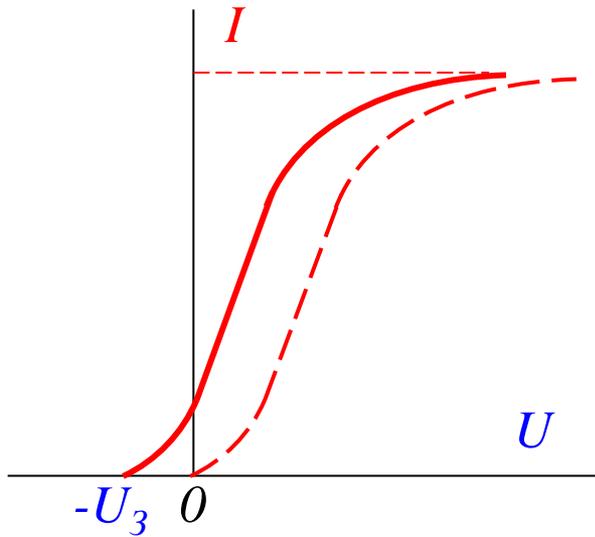


По «классике»  $U_3 \sim \frac{1}{\omega^2}$

# Основные закономерности фотоэффекта:

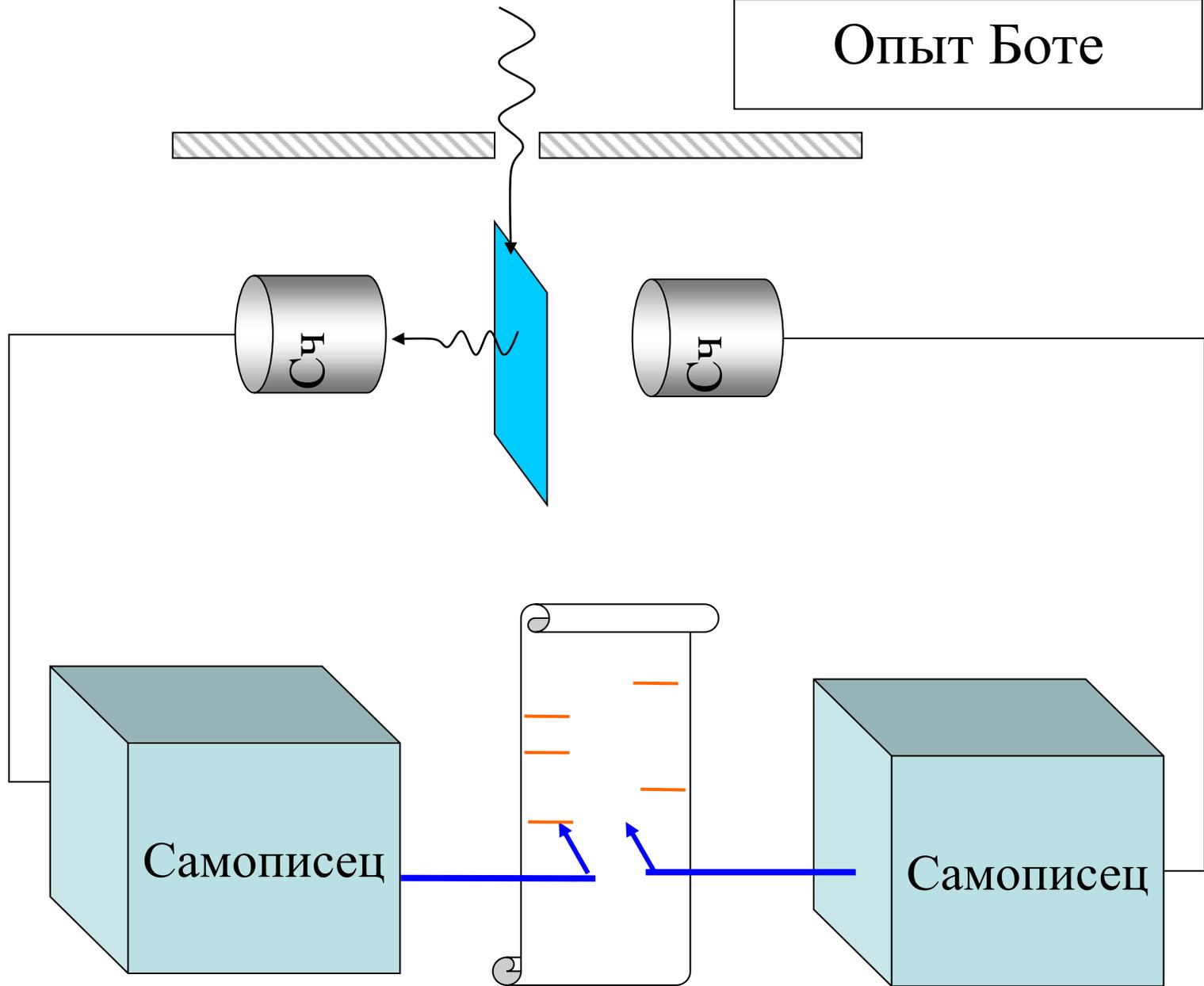
- Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты света  $\nu$  и не зависит от его интенсивности.
- Для каждого вещества существует так называемая **красная граница фотоэффекта**, т. е. наименьшая частота  $\nu_{\min}$ , при которой еще возможен внешний фотоэффект.
- Число фотоэлектронов, вырываемых светом из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света.
- Фотоэффект практически безинерционен, фототок возникает мгновенно после начала освещения катода при условии, что частота света  $\nu > \nu_{\min}$ .

Формула Эйнштейна для  
фотоэффекта

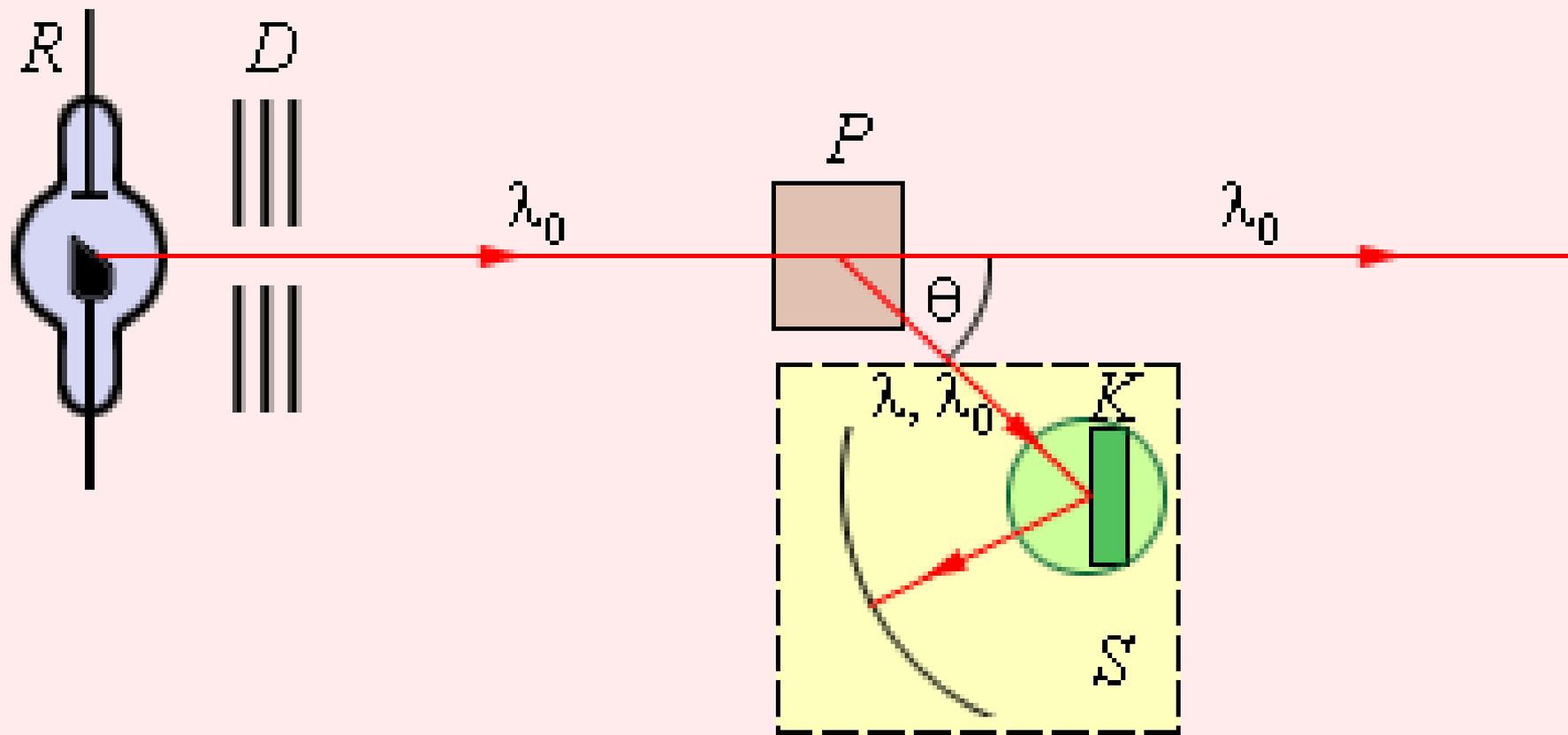


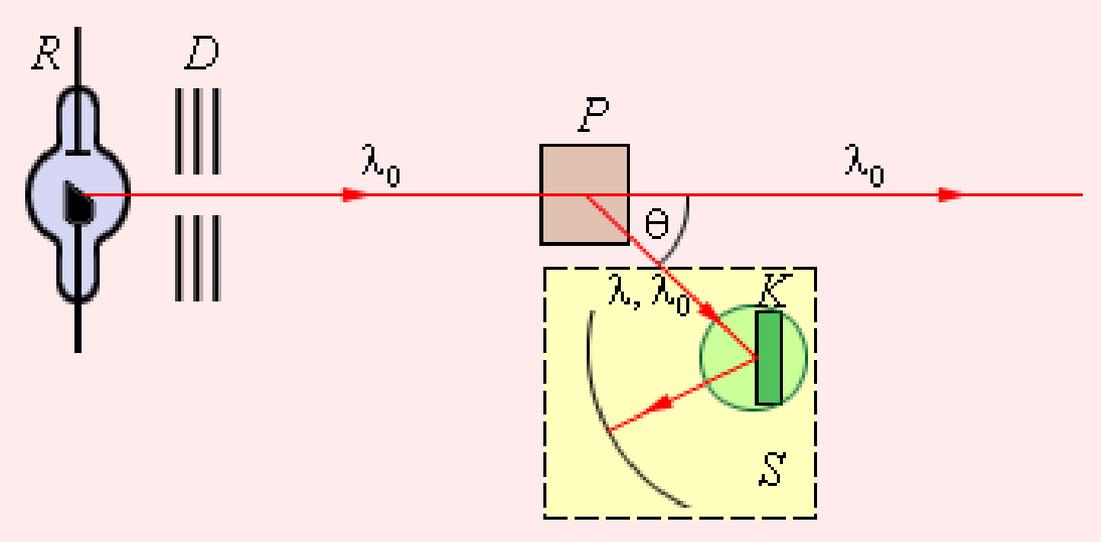
$$E_{\Phi} = A_{\text{выл}} + E_{\text{max}}$$

# Опыт Боте

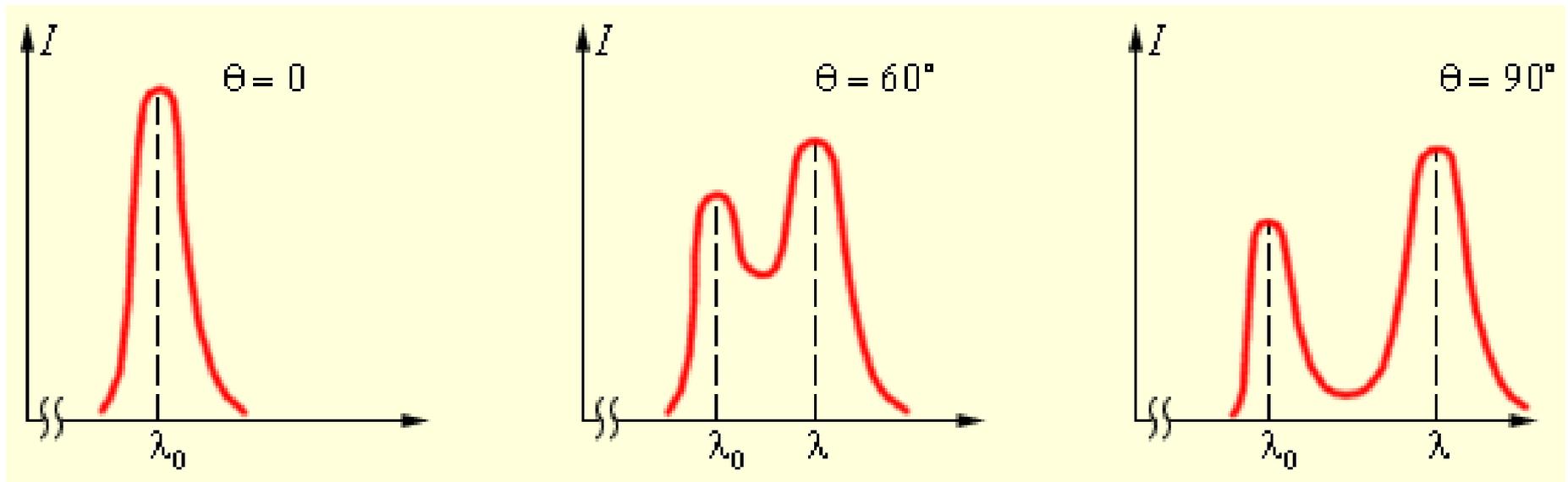


# Схема эксперимента Комптона.





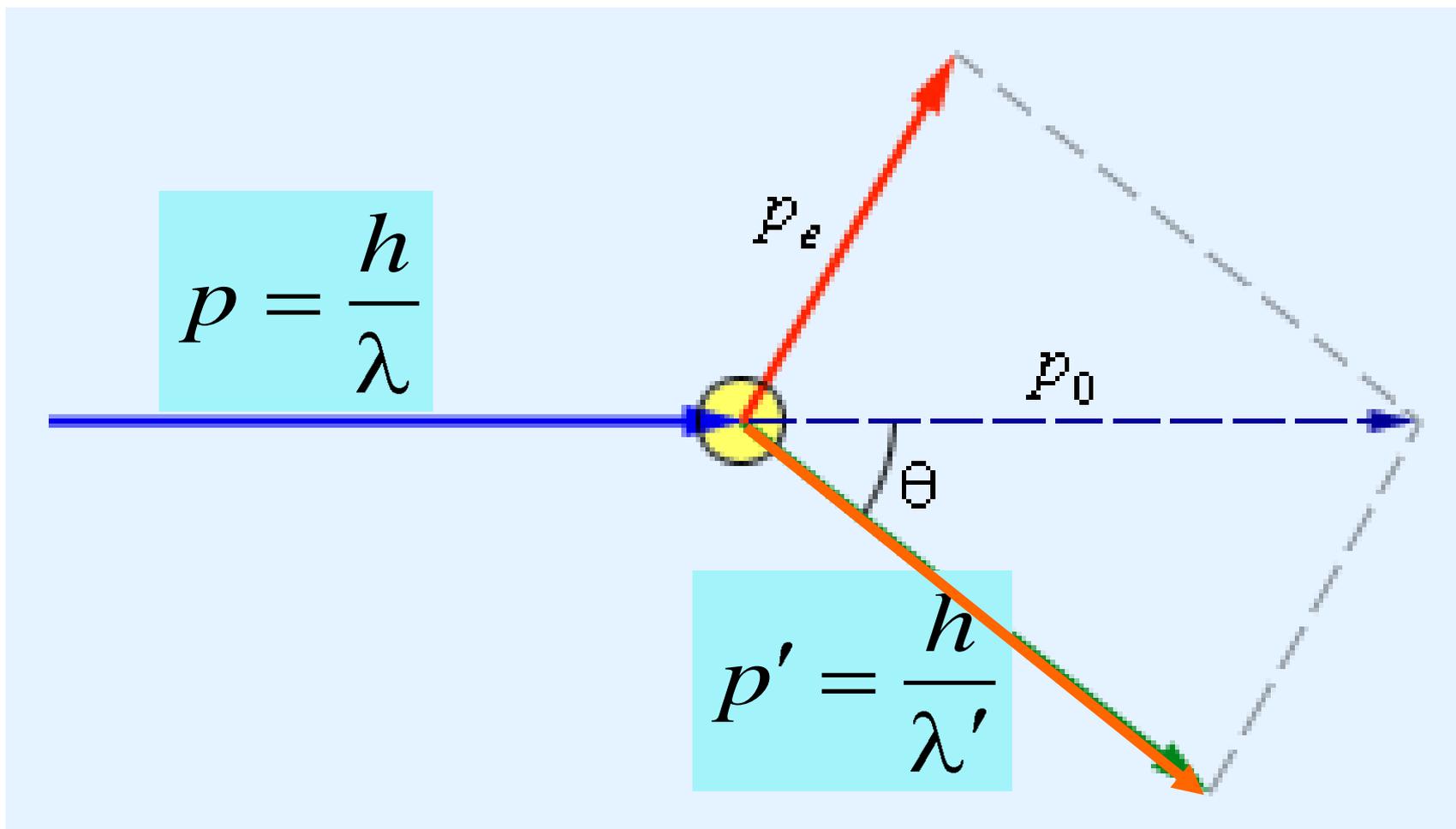
## Результаты эксперимента



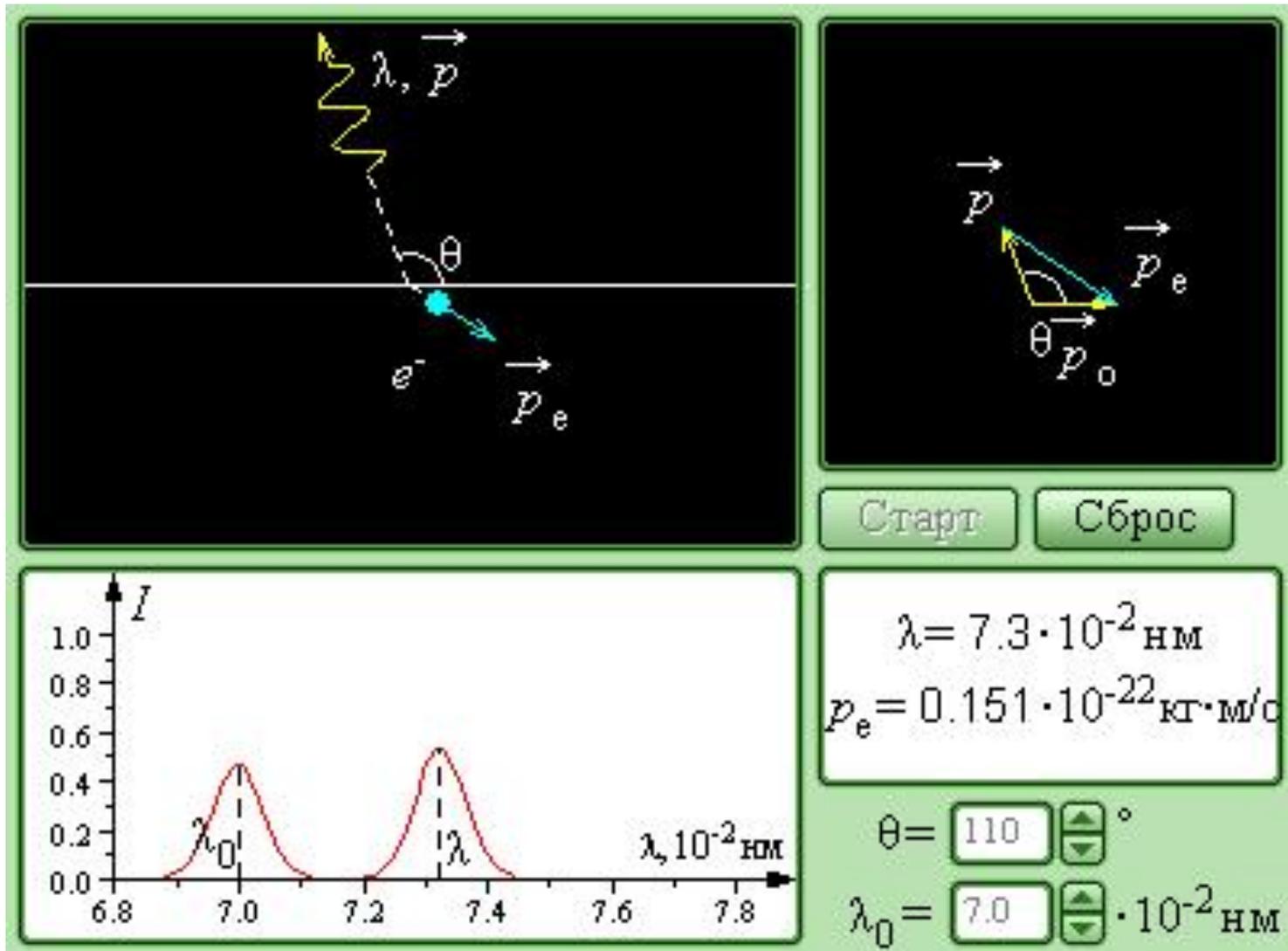
$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_c (1 - \cos\theta)$$

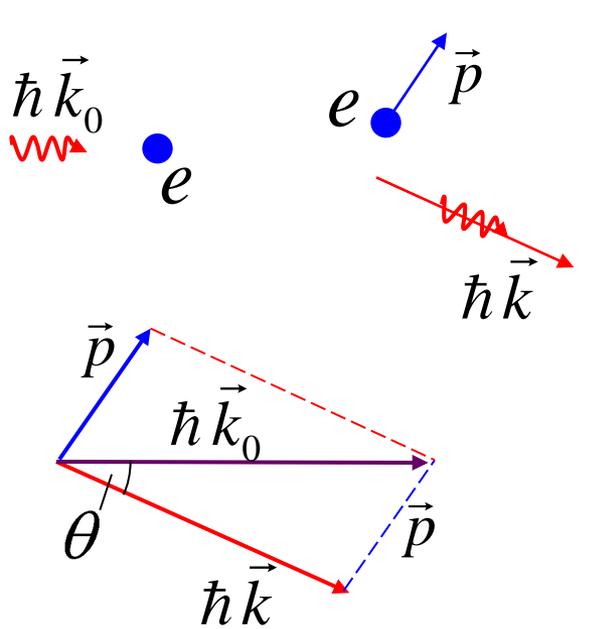
$$\lambda_c = 0,024 \text{ \AA}$$

# Диаграмма импульсов при упругом рассеянии фотона на покоящемся электроне



# Модель. Комптоновское рассеяние.





$$\begin{cases} \hbar \vec{k}_0 = \hbar \vec{k} + \vec{p} \\ \hbar \omega_0 + m_e c^2 = \hbar \omega + \sqrt{p^2 c^2 + m_e^2 c^4} \end{cases}$$

$$\underline{(\hbar k_0)^2} + \underline{(\hbar k)^2} - 2\hbar^2 k_0 k \cos \theta = p^2 \quad (1)$$

$$\omega = ck$$

$$(\hbar ck_0 + m_e c^2 - \hbar ck)^2 = p^2 c^2 + m_e^2 c^4$$

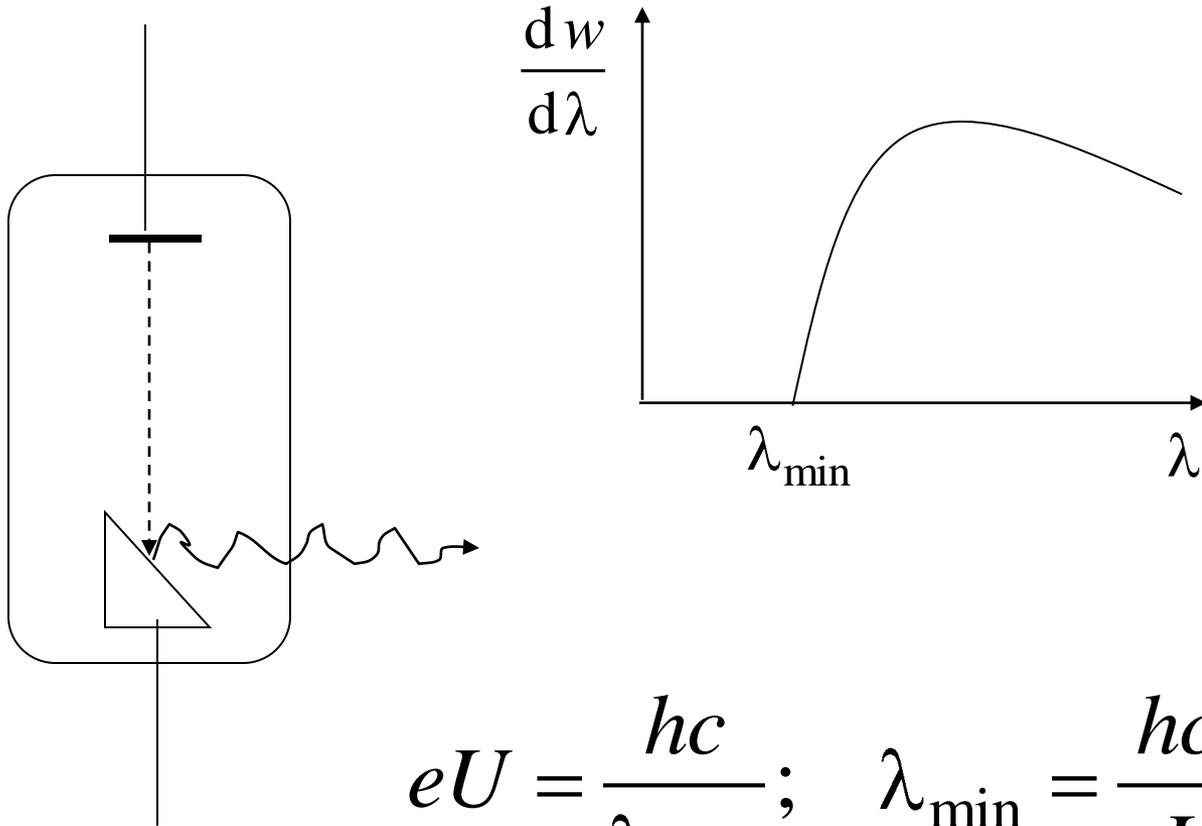
$$\underline{\hbar^2 k_0^2} + \cancel{m_e^2 c^2} + \underline{\hbar^2 k^2} + 2\hbar k_0 m_e c - 2\hbar^2 k_0 k - 2\hbar k m_e c = p^2 + \cancel{m_e^2 c^2} \quad (2)$$

$$k_0 m_e c - \hbar k_0 k - k m_e c = -\hbar k_0 k \cos \theta \quad (2)$$

$$\frac{m_e c}{k} - \frac{m_e c}{k_0} = \hbar(1 - \cos \theta); \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad \frac{h}{m_e c} = \lambda_c = 0,024 \text{ \AA}$$

# Тормозное рентгеновское излучение



$$eU = \frac{hc}{\lambda_{\min}}; \quad \lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}$$

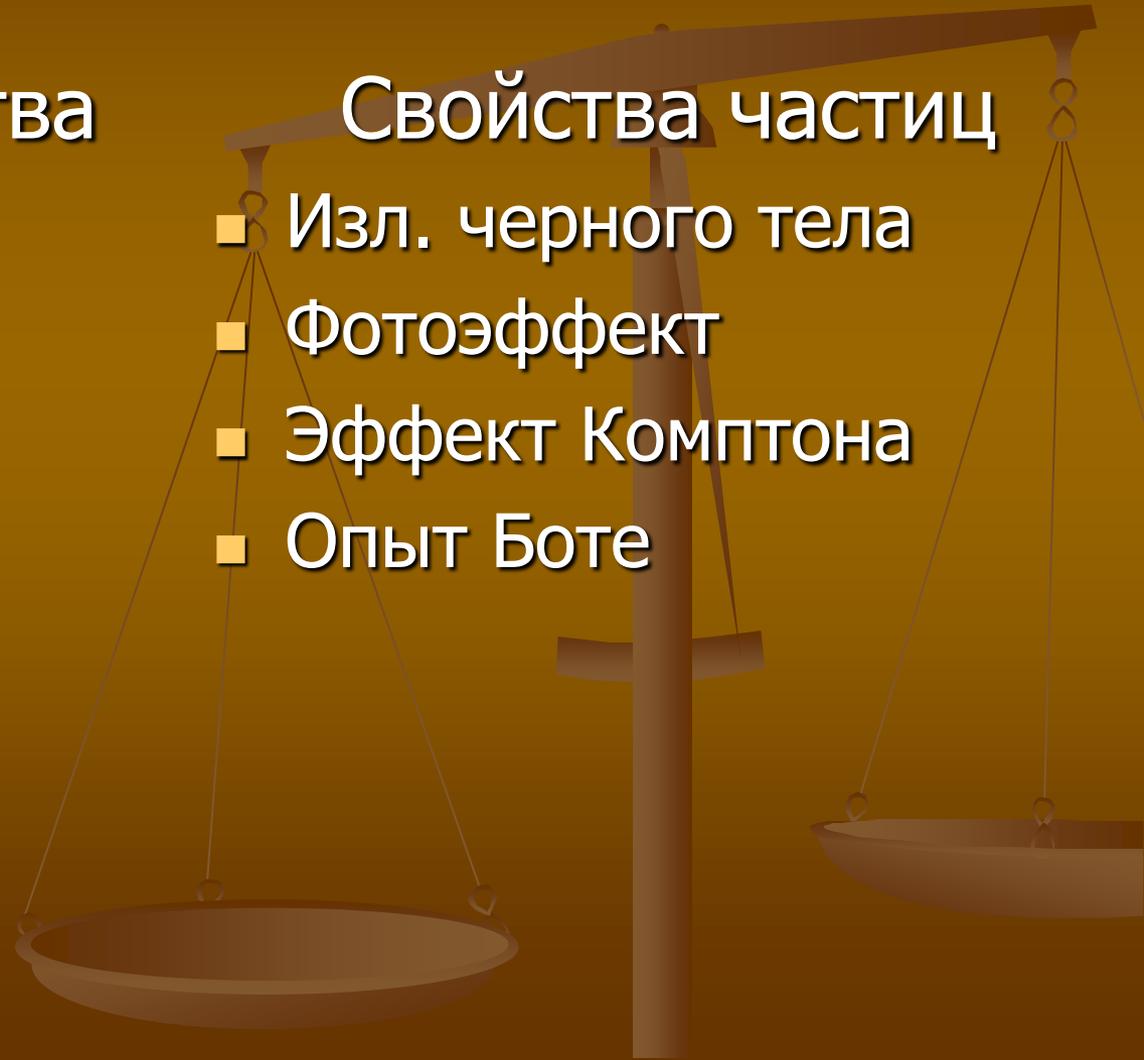
# Корпускулярно-волновой дуализм света

## Волновые свойства

- Интерференция
- Дифракция
- Поляризация
- Дисперсия

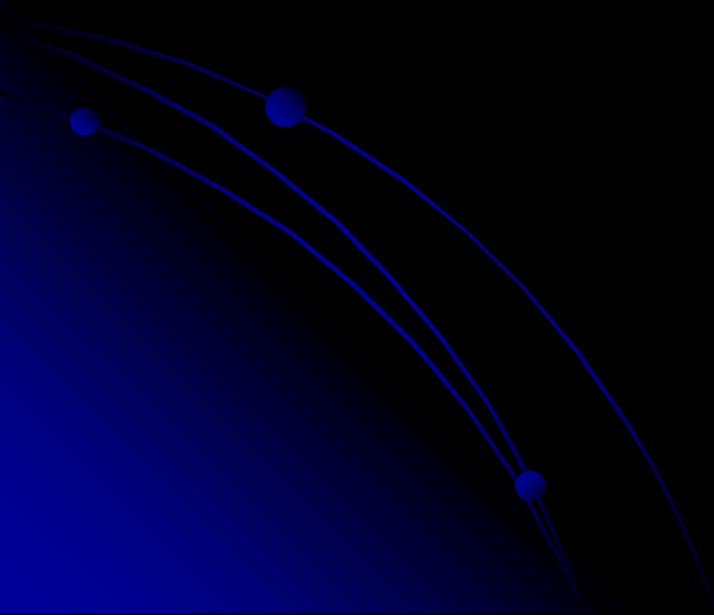
## Свойства частиц

- Изл. черного тела
- Фотоэффект
- Эффект Комптона
- Опыт Боте



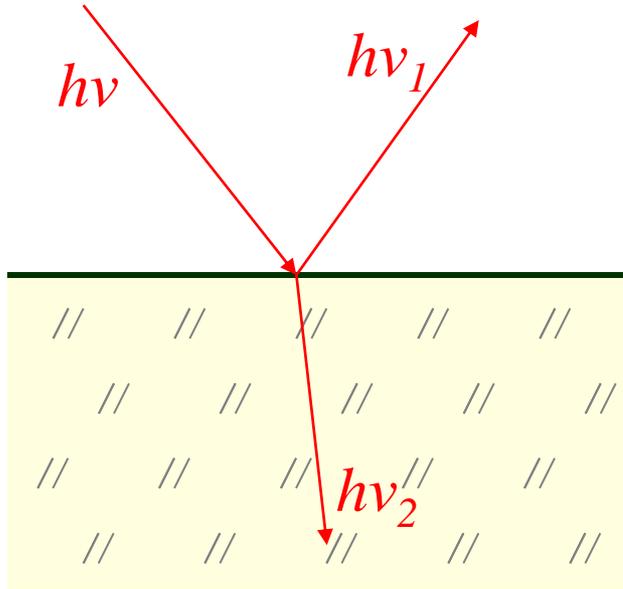
# Тема 1. Корпускулярно-волновой дуализм

- 1.3. Квантовые свойства электромагнитного излучения
- 1.4. Корпускулярно-волновой дуализм фотонов



Свет - ВОЛНА  
ИЛИ ЧАСТИЦЫ?

1)



$$I_0 = I_1 + I_2$$

$$N_0 = N_1 + N_2;$$

Если фотоны летят по одному:

$$h\nu_1 + h\nu_2 = h\nu \quad (?)$$

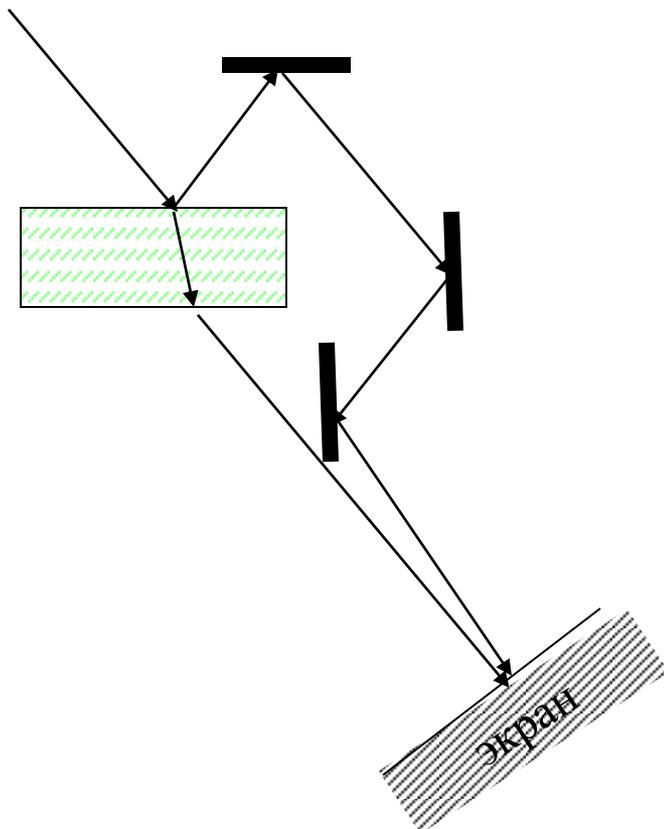
$$\text{Но } \nu_1 = \nu_2 = \nu \quad (!)$$

Статистическая трактовка М. Борна (1926 г.)

$$N_0 = N_1 + N_2; \quad N_1 \approx P_1 N_0; \quad N_2 \approx P_2 N_0$$

$$P_1 = \frac{I_1}{I_0}; \quad P_2 = \frac{I_2}{I_0}$$

2)



$$I_0 \neq I_1 + I_2$$

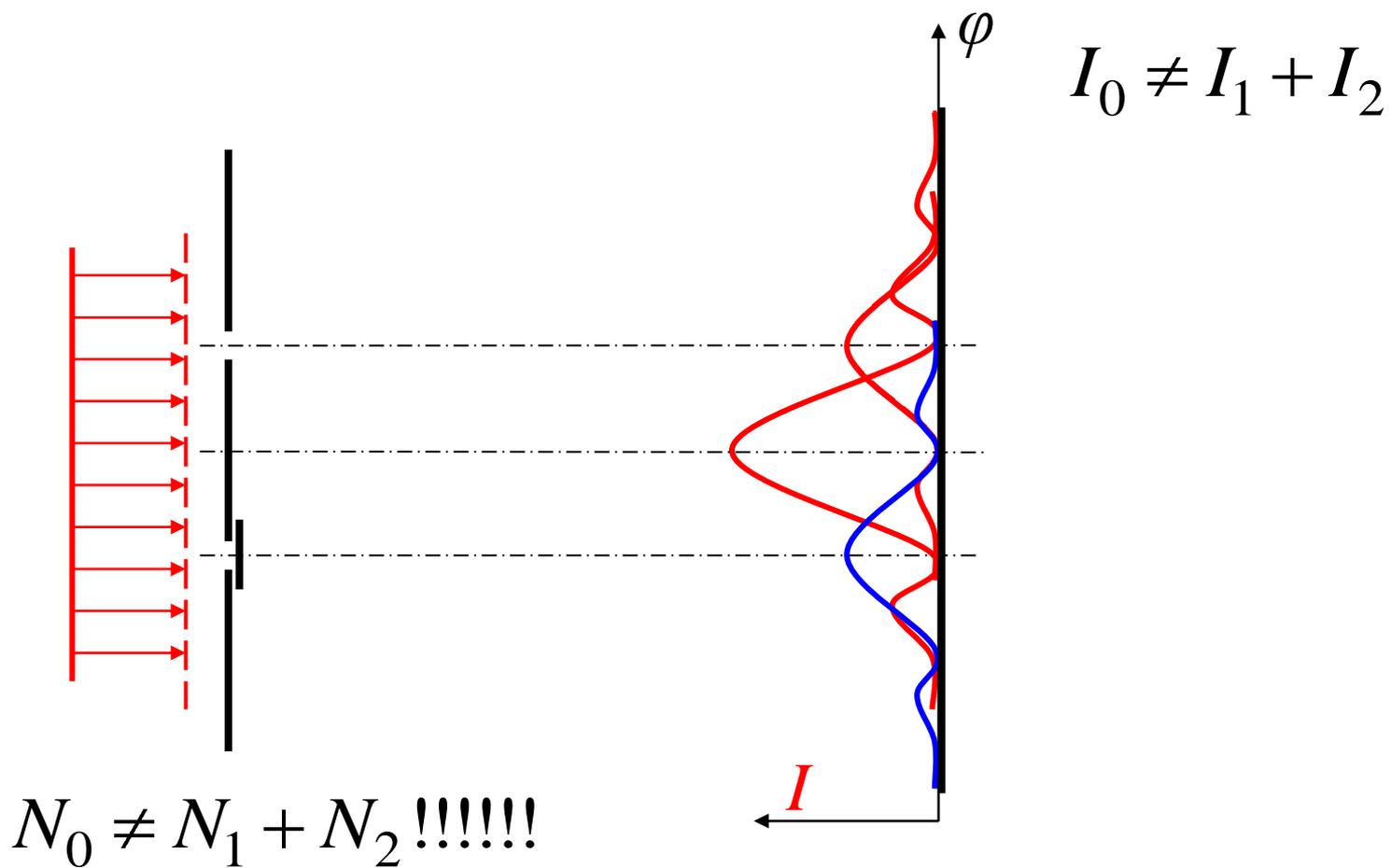
$$N_0 \neq N_1 + N_2 !!!!!$$

Если фотоны летят по одному:

Интерференция

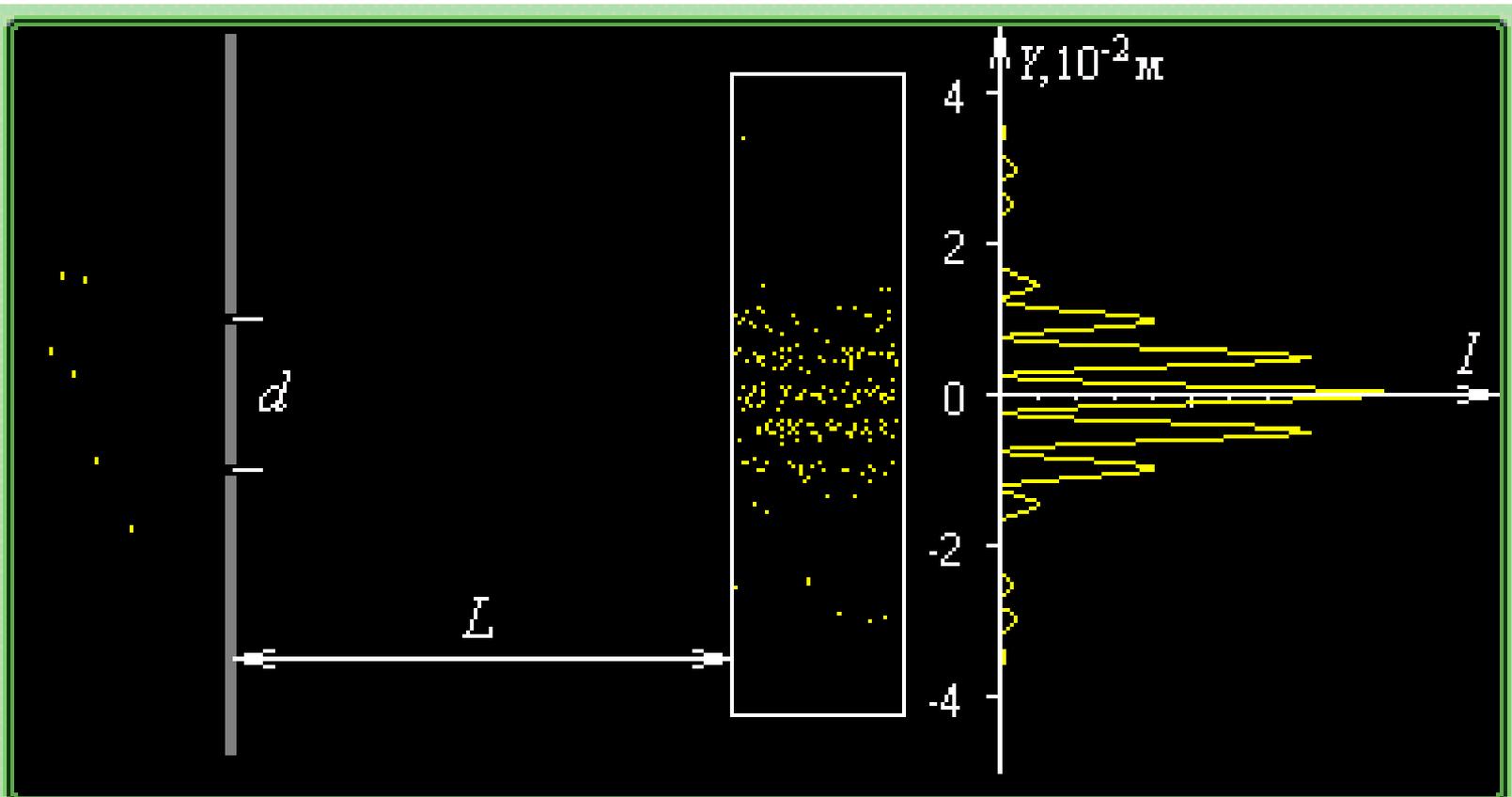
?!?!?!

3)



Если фотоны летят по одному:

# Модель 5.3. Дуализм фотонов



Ширина  $\Delta x =$      $\cdot 10^{-10}$  м

$\lambda = h/p = 0.40 \cdot 10^{-10}$  м

$L = 0.1$  м

Интерф. макс:  $d \cdot \sin \theta_m = m \lambda$

$Y_m \approx L \cdot \theta_m \approx (m \lambda / d) L$

Одна щель  Две щели

# Принцип суперпозиции:

- В области наблюдения фотон находится в суперпозиционном состоянии, т.е. частично в состоянии движения по одному пути и частично по другому. По двум путям распространяется его волновая характеристика, но регистрируется фотон всегда как целый.

# Выводы:

- К фотону нельзя применить понятие траектории
  - Волновые характеристики фотона способны разлагаться на части и складываться в соответствии с принципом суперпозиции
  - Корпускулярные характеристики фотона неразделимы и обнаруживаются на опыте как целые с некоторой вероятностью
- 