

По следам лекции 1.
АЧТ: важные порядки величин и
несколько примеров

Кривые спектральной плотности

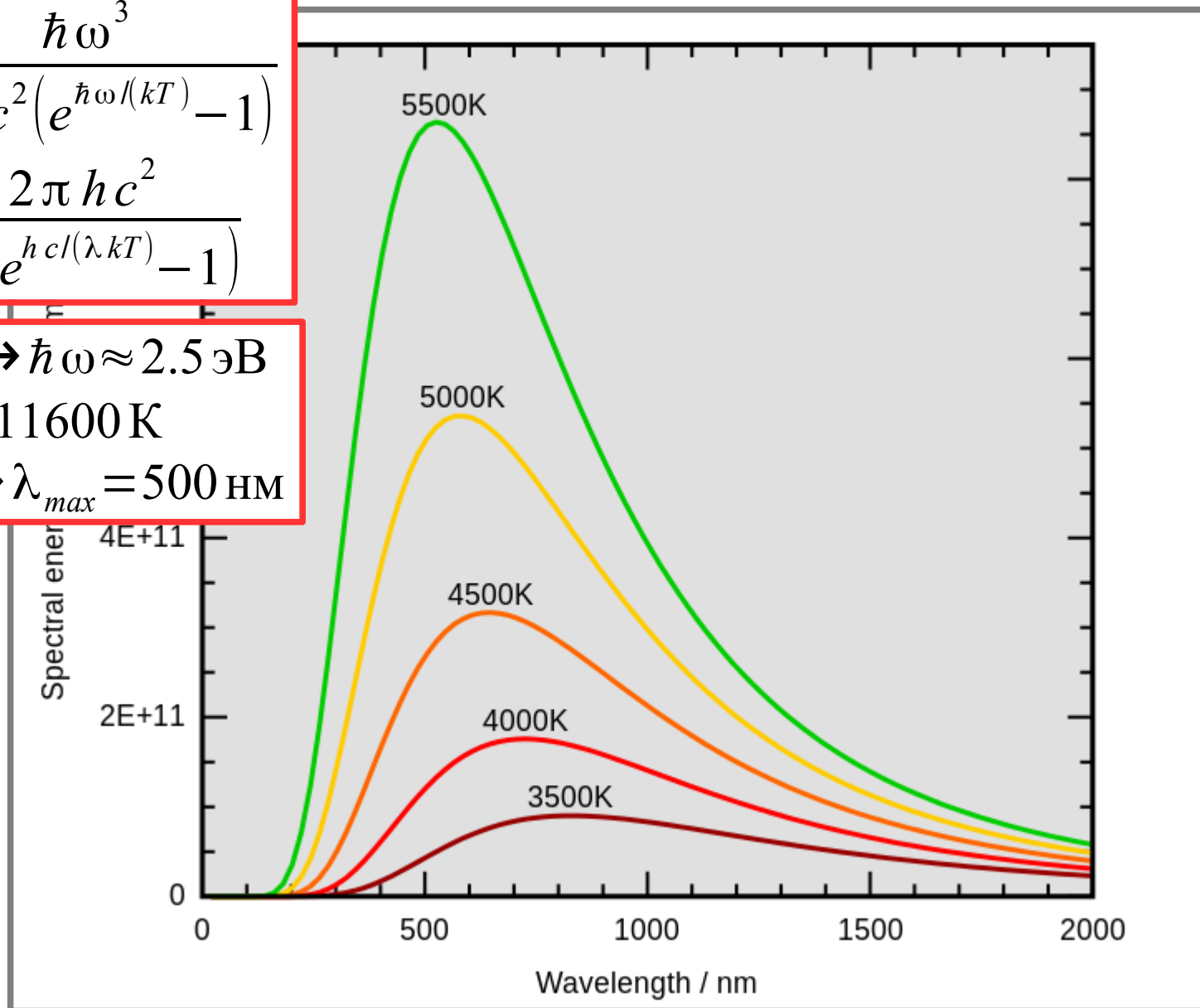
$$\rho(\omega) = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 c^2 (e^{\hbar \omega / (kT)} - 1)}$$

$$\rho(\lambda) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{hc / (\lambda kT)} - 1)}$$

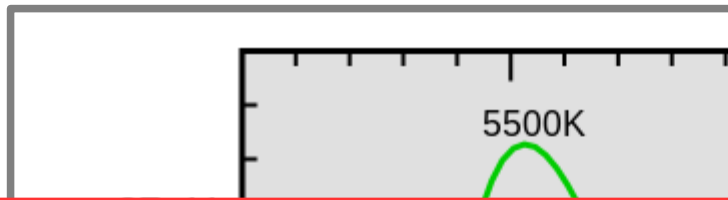
$$\lambda = 500 \text{ нм} \rightarrow \hbar \omega \approx 2.5 \text{ эВ}$$

$$1 \text{ эВ} = 11600 \text{ К}$$

$$T = 6000 \text{ К} \rightarrow \lambda_{\text{max}} = 500 \text{ нм}$$



Длинноволновый и коротковолновый пределы



длинноволновый предел

$$\hbar \omega \ll k T \quad \lambda \gg \frac{h c}{k T} \approx 5 \lambda_{max}$$

$$\omega \ll 2.8 \omega_{max}$$

$$\rho(\omega) \propto \omega^2 \times (k T)$$

$$\rho(\lambda) \propto (k T) / \lambda^4$$

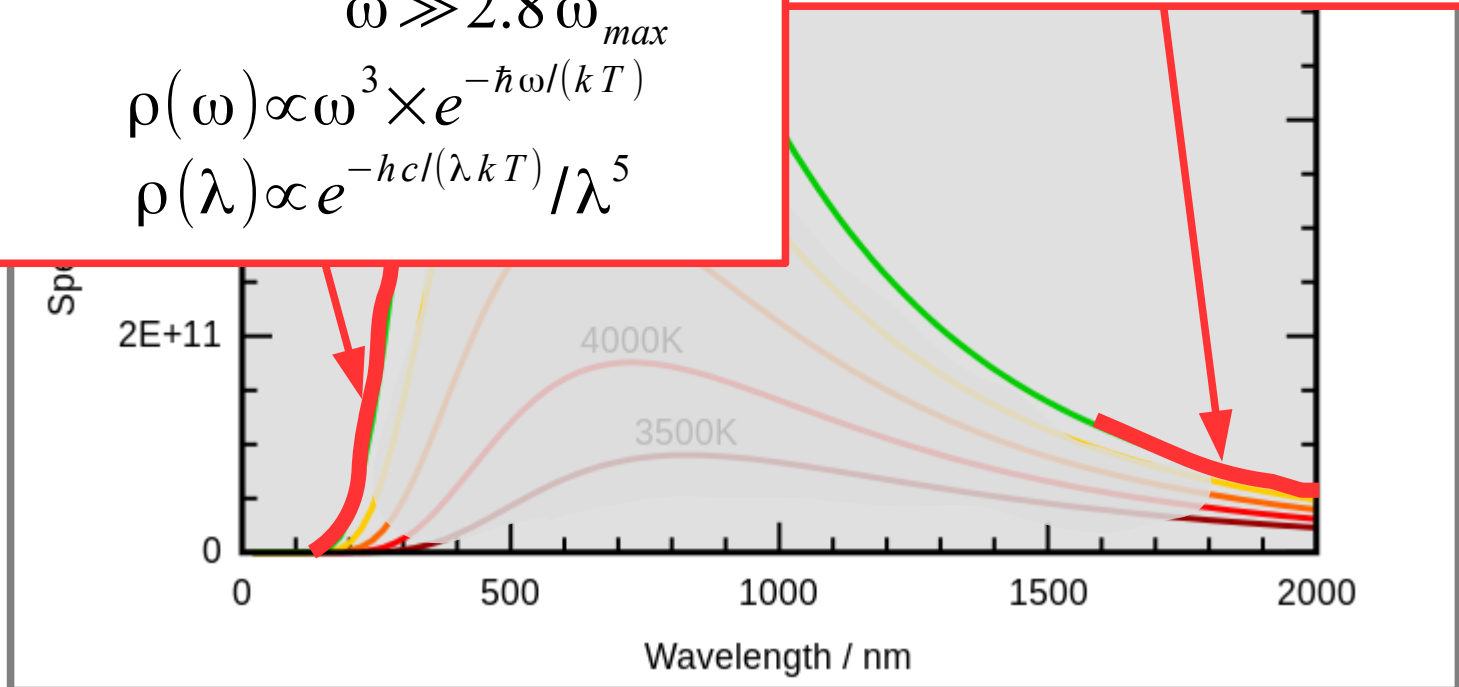
коротковолновый предел

$$\hbar \omega \gg k T \quad \lambda \ll \frac{h c}{k T} \approx 5 \lambda_{max}$$

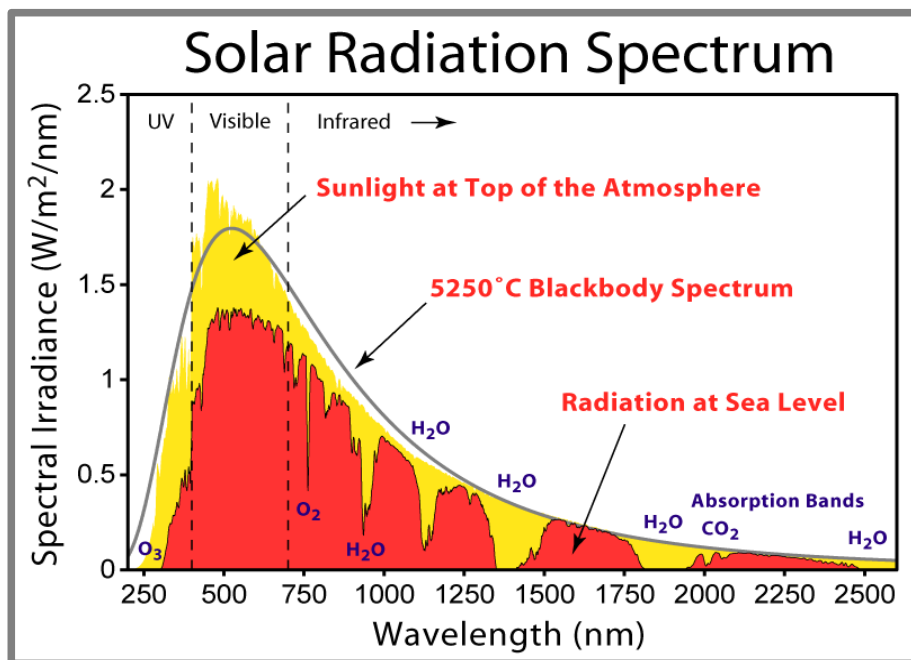
$$\omega \gg 2.8 \omega_{max}$$

$$\rho(\omega) \propto \omega^3 \times e^{-\hbar \omega / (k T)}$$

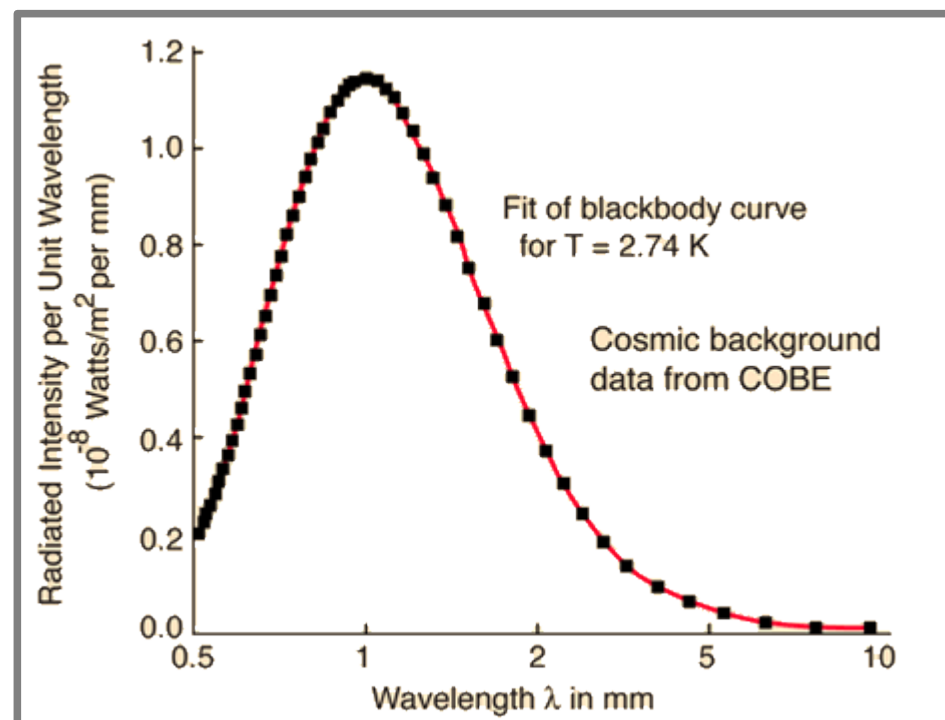
$$\rho(\lambda) \propto e^{-h c / (\lambda k T)} / \lambda^5$$



Спектры АЧТ в природе

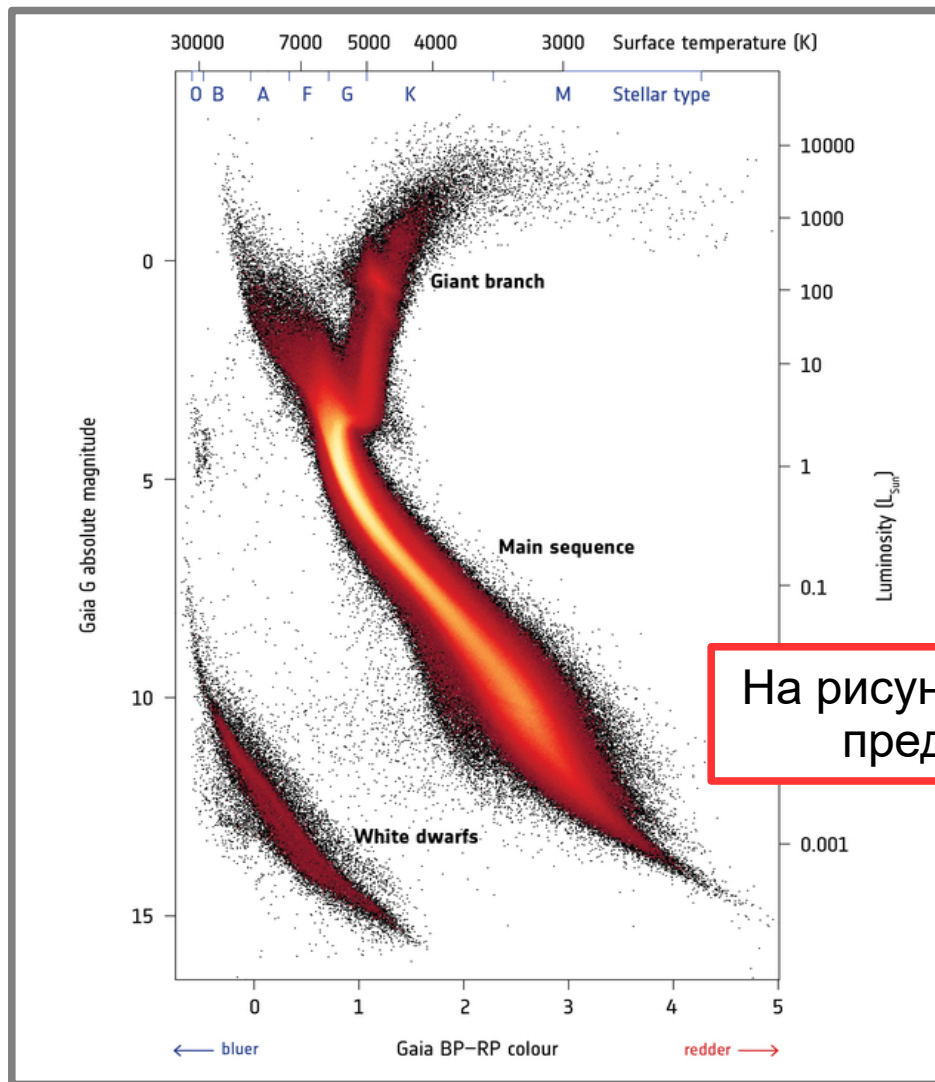


wikipedia.org: Solar Spectrum

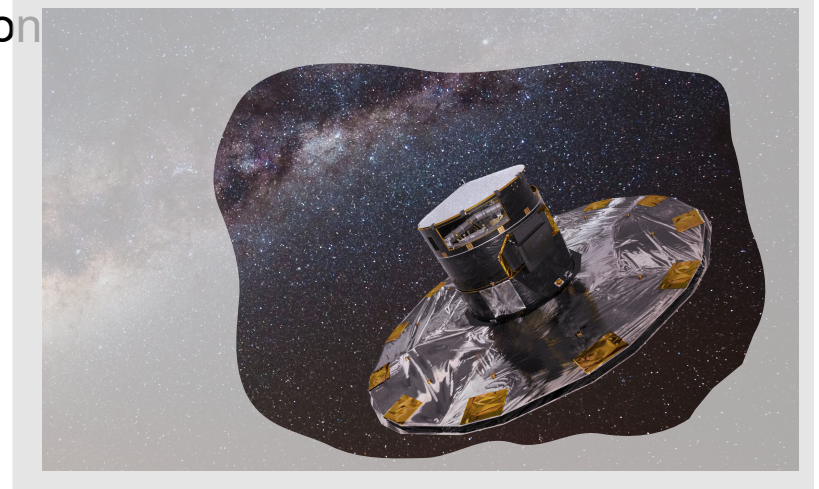


(источник: Hyperphysics Project)

АЧТ и диаграмма Герцшпрунга-Рассела



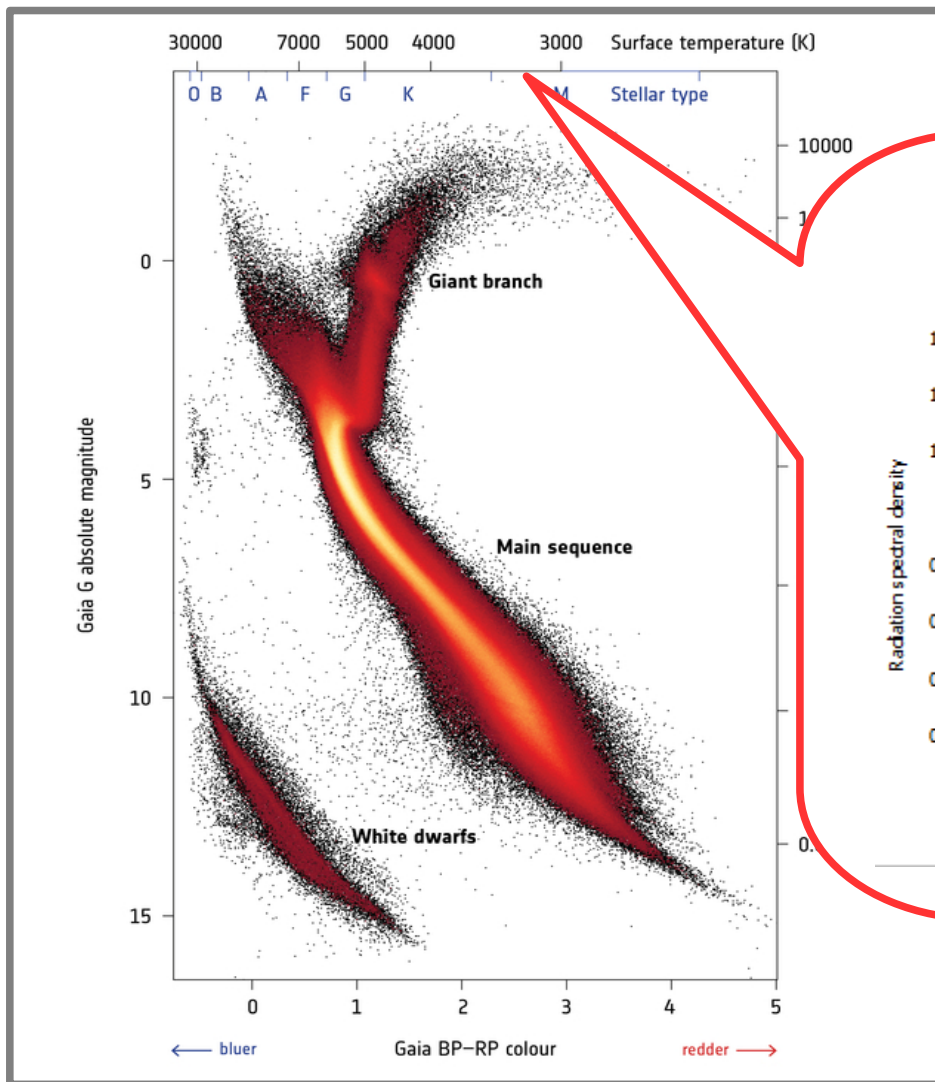
<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/the-mission>



На рисунке — более 4,000,000 звёзд в пределах 5,000 св.лет от нас

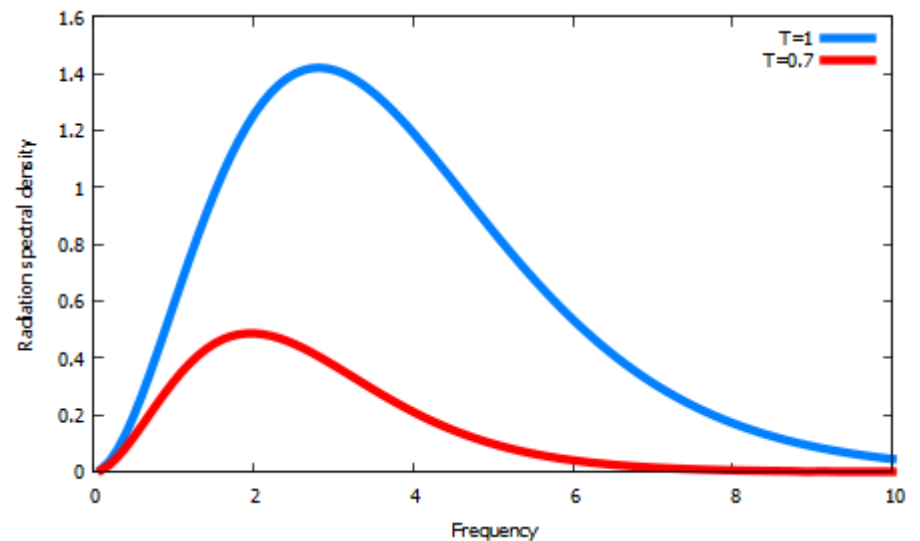
<https://sci.esa.int/web/gaia/-/60198-gaia-hertzsprung-russell-diagram>

АЧТ и диаграмма Герцшпрунга-Рассела



<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/the-mission>

Температура (или цвет)
«поверхности» звезды

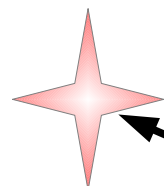


<https://sci.esa.int/web/gaia/-/60198-gaia-hertzsprung-russell-diagram>

АЧТ и диаграммы

Полная интенсивность
излучения звезды

зла



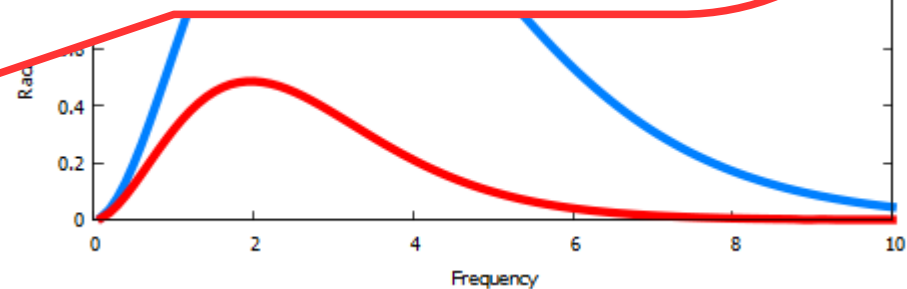
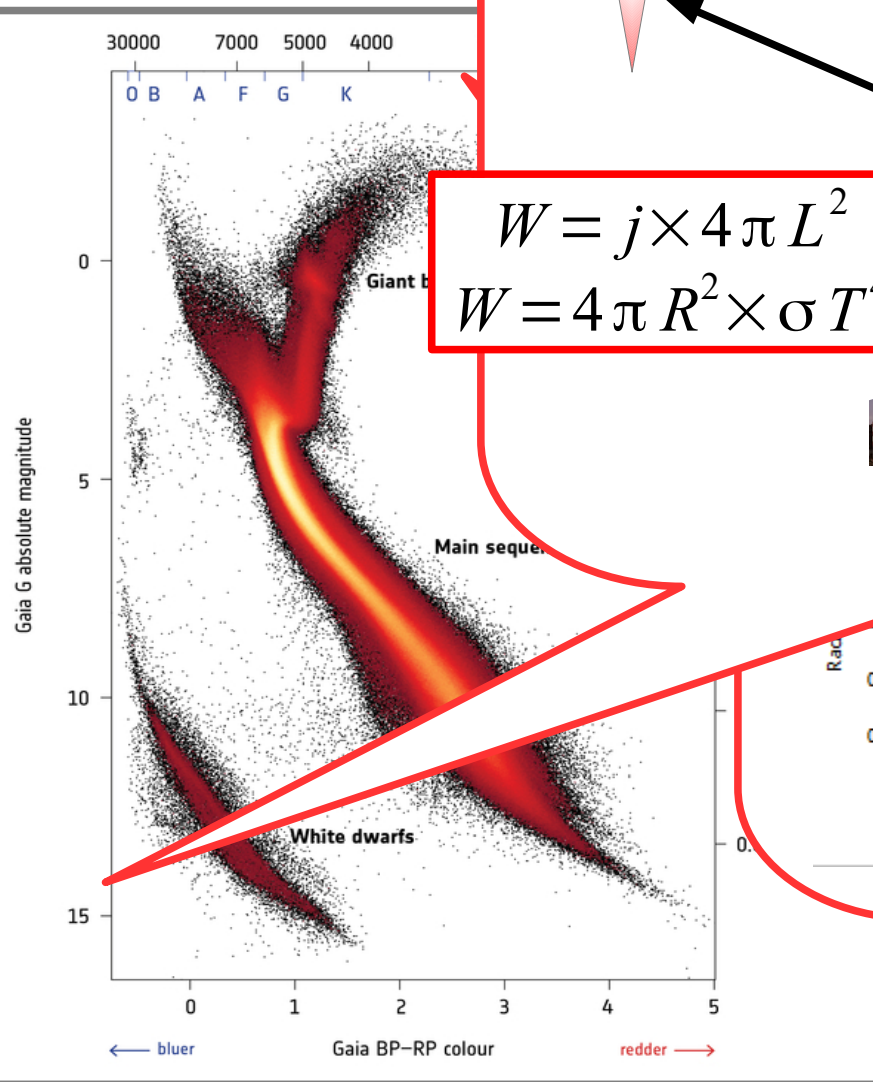
L

$j, \text{ Вт/м}^2$



$$W = j \times 4\pi L^2$$

$$W = 4\pi R^2 \times \sigma T^4$$



Детектирование реликтового излучения

Реликтовое излучение:

- $T=3\text{K}$
- Первое детектирование на $\lambda=7\text{cm}$

Детектирование реликтового излучения

Реликтовое излучение:

- $T=3\text{K}$
- Первое детектирование на $\lambda=7\text{cm}$

$$6000\text{ K} \Leftrightarrow \lambda_{\max} \approx 500\text{ нм}$$

$$6\text{ K} \Leftrightarrow \lambda_{\max} \approx 500\text{ мкм}$$

$$3\text{ K} \Leftrightarrow \lambda_{\max} \approx 1\text{ мм}$$

Детектирование реликтового излучения

Реликтовое излучение:

- $T=3\text{K}$
- Первое детектирование на $\lambda=7\text{см}$

$$6000\text{ K} \Leftrightarrow \lambda_{\max} \approx 500\text{ нм}$$

$$6\text{ K} \Leftrightarrow \lambda_{\max} \approx 500\text{ мкм}$$

$$3\text{ K} \Leftrightarrow \lambda_{\max} \approx 1\text{ мм}$$

длинноволновый предел

Детектирование реликтового излучения

Нобелевская премия 1978 (Пенциас и Вильсон)



Изображения:
[https://en.wikipedia.org/wiki/
Discovery_of_cosmic_microwave_background_radiation](https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery_of_cosmic_microwave_background_radiation)

Детектирование реликтового излучения

параболическое
зеркало (300К)

атмосфера
(~300К)

волноводный
тракт (300К)
+холодный
детектор



Изображения:
[https://en.wikipedia.org/wiki/
Discovery_of_cosmic_microwave_background_radiation](https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery_of_cosmic_microwave_background_radiation)

Детектирование реликтового излучения

параболическое
зеркало (300К)

атмосфера

Детектор принимает:

- Реликтовое излучение
- Излучение зеркала
- Излучение атмосферы
- Излучение передающего тракта
- Излучение самого детектора

+холодный
детектор



Изображения:

[https://en.wikipedia.org/wiki/](https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery_of_cosmic_microwave_background_radiation)

Discovery_of_cosmic_microwave_background_radiation

Детектирование реликтового излучения

параболическое
зеркало (300К)

атмосфера

Детектор принимает:

- Реликтовое излучение
- Излучение зеркала
- Излучение атмосферы
- Излучение передающего тракта
- Излучение самого детектора

$$\hbar \omega \ll k T$$

$$\rho(\lambda) \propto (k T) / \lambda^4$$

$$T_{eff} = T_1 + T_2 + T_3 + \dots$$

Детектирование реликтового излучения



Детектор принимает:

- Реликтовое излучение
- Излучение зеркала
- Излучение атмосферы
- Излучение передающего тракта
- Излучение самого детектора

НО!!!

- вклад атмосферы ослаблен её прозрачностью;
- вклад стенок антенны ослаблен их зеркальностью

Изображения:

[https://en.wikipedia.org/wiki/](https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery_of_cosmic_microwave_background_radiation)

Discovery_of_cosmic_microwave_background_radiation

Детектирование реликтового излучения



	New Throat		Old Throat
He Temp.	4.22	4.22	
Calculated Contribution from Cold Load Waveguide Attenuator Setting for Balance	.38	.70 ± 0.2	
	<u>2.73</u>	<u>2.40 ± 0.1</u>	
Total C.L.	7.33	7.32 ± 0.3	6.7 ± 0.3
Atmosphere	2.3 ± 0.3		2.3 ± 0.3
Waveguide and			
Antenna loss	1.8 ± 0.3		.9 ± 0.3
Back lobes	<u>.1 ± 0.1</u>		<u>.1 ± 0.1</u>
Total Ant.	4.2 ± 0.7		3.3 ± 0.7
Background	3.1 ± 1		3.4 ± 1

Fig. 10 Results of our 3965 measurements of the microwave background. "Old Throat" and "New Throat" refer to the original and a replacement throat section for the 20 foot horn-reflector.

$$T_{eff} = T_1 + T_2 + T_3 + \dots$$

Лекция 2.

Кванты света и волны материи

Гипотеза Планка и квант энергии

Задачу о спектре равновесного излучения АЧТ удалось решить привлечением гипотезы Планка о дискретности запасенной в монохроматической волне энергии.

Одна порция - «квант энергии»

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

Часть 1. Фотоэффект



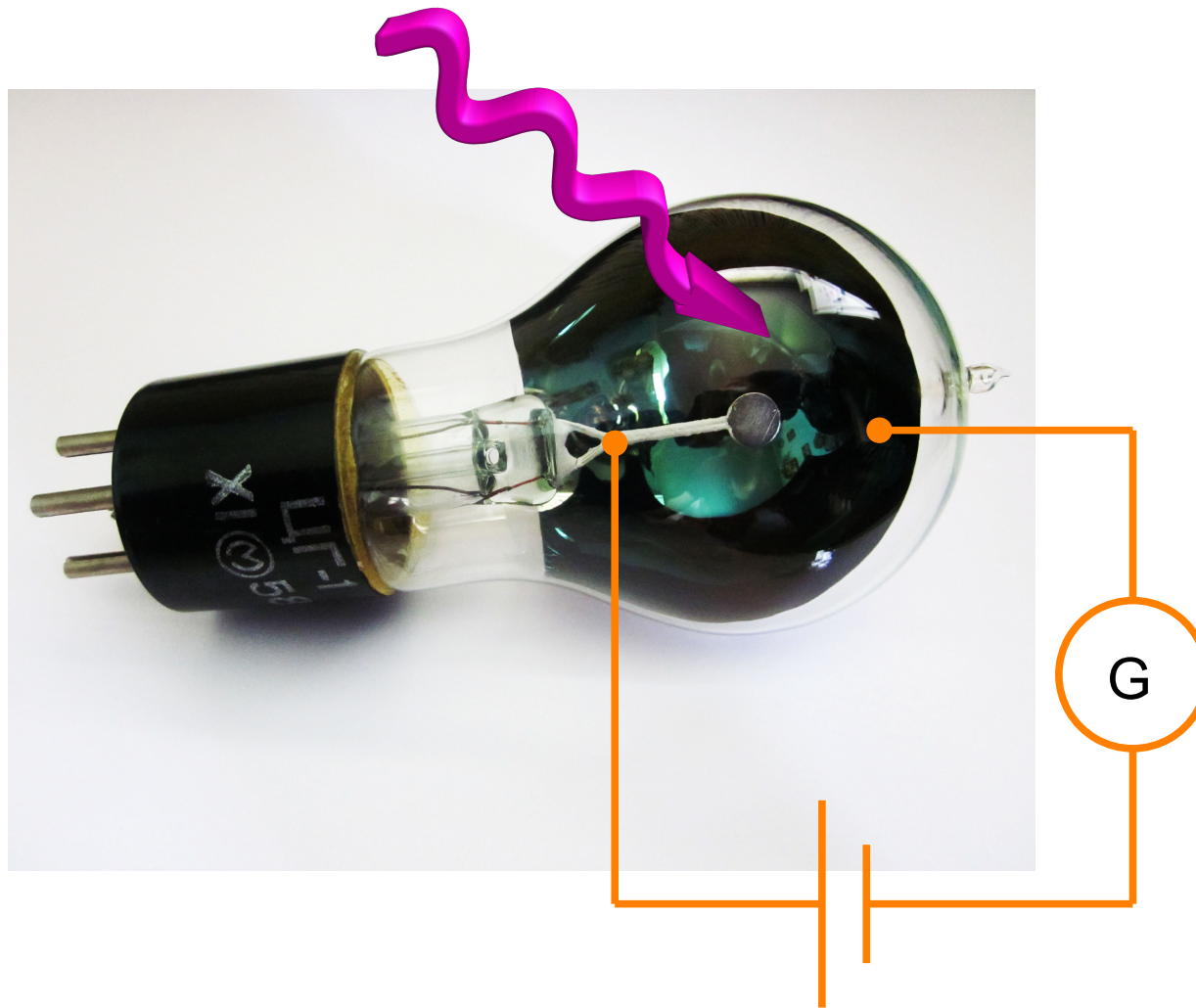
Внешний одноквантовый фотоэффект

Часть 1. ~~Фотоэффект~~



Внешний одноквантовый фотоэффект

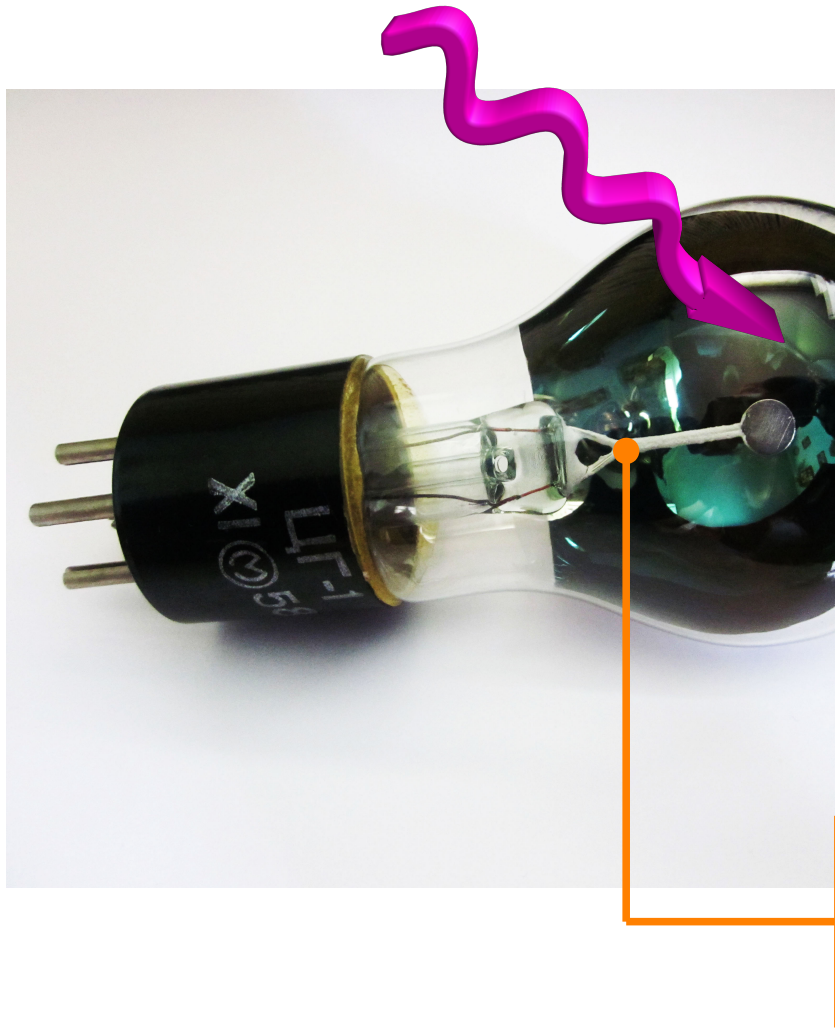
Часть 1. ~~Фотоэффект~~



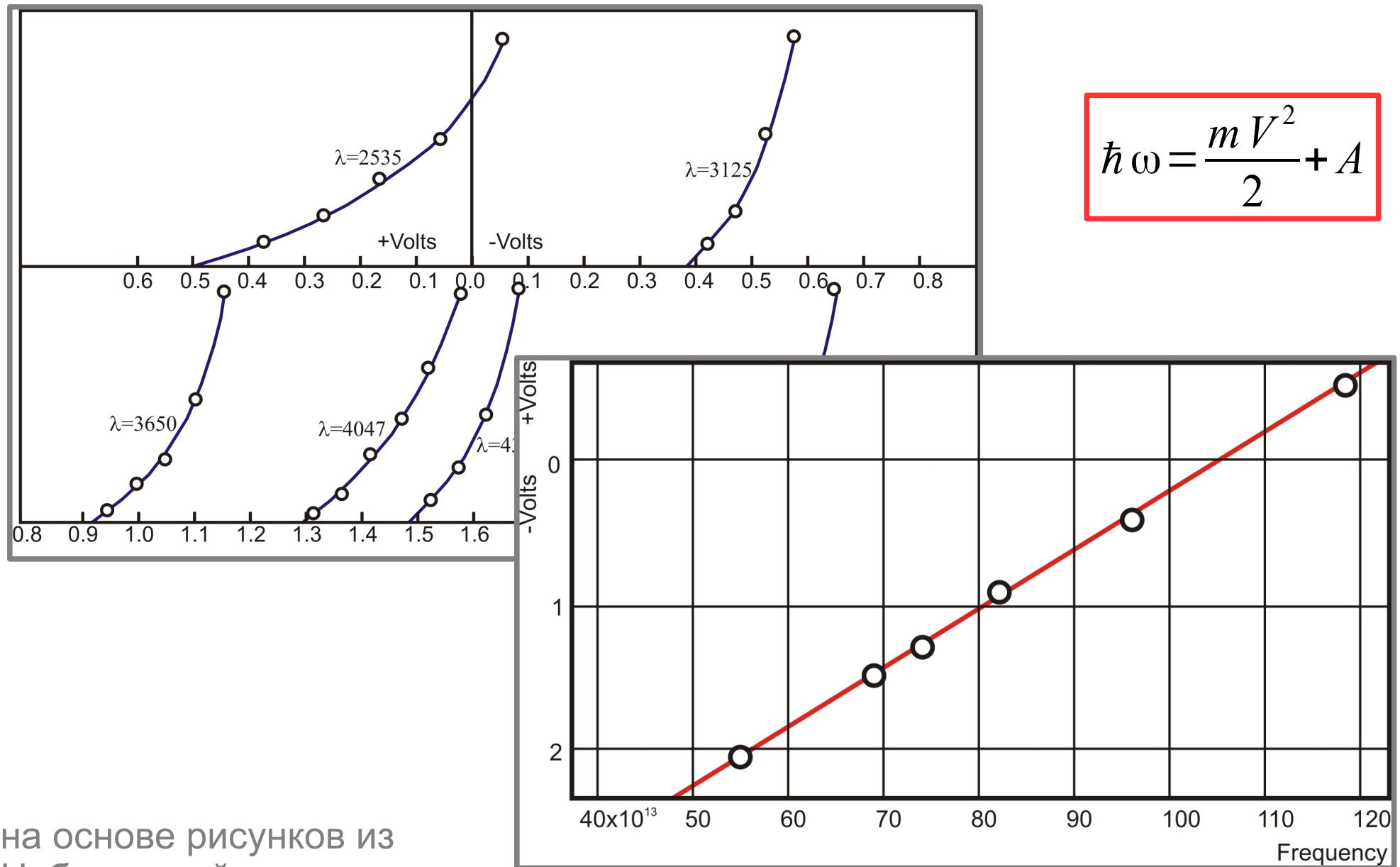
Внешний фотоэффект

Часть 1. Эксперимент

- При облучении электрода выбиваются электроны
- Максимальный фототок пропорционален интенсивности
- Фототок возникает и прекращается безинерционно
- Максимальная энергия фотоэлектронов определяется только частотой падающего света
- Существует красная граница фотоэффекта



Уравнение Эйнштейна и опыты Милликена



на основе рисунков из
Нобелевской лекции
Милликена, 1923

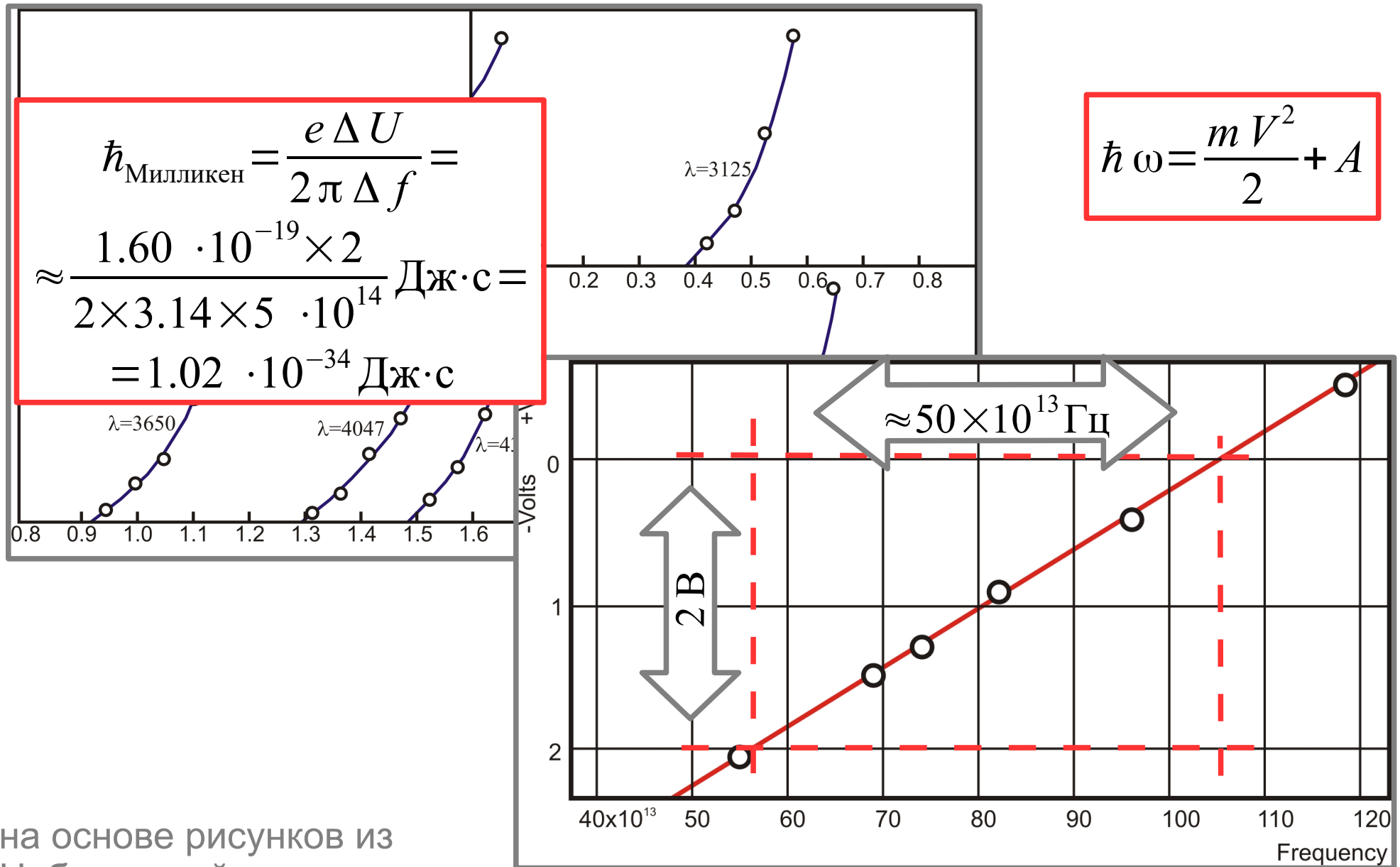
Уравнение Эйнштейна и опыты Милликена

$$\hbar_{\text{Милликен}} = \frac{e \Delta U}{2 \pi \Delta f} =$$

$$\approx \frac{1.60 \cdot 10^{-19} \times 2}{2 \times 3.14 \times 5 \cdot 10^{14}} \text{ Дж} \cdot \text{с} =$$

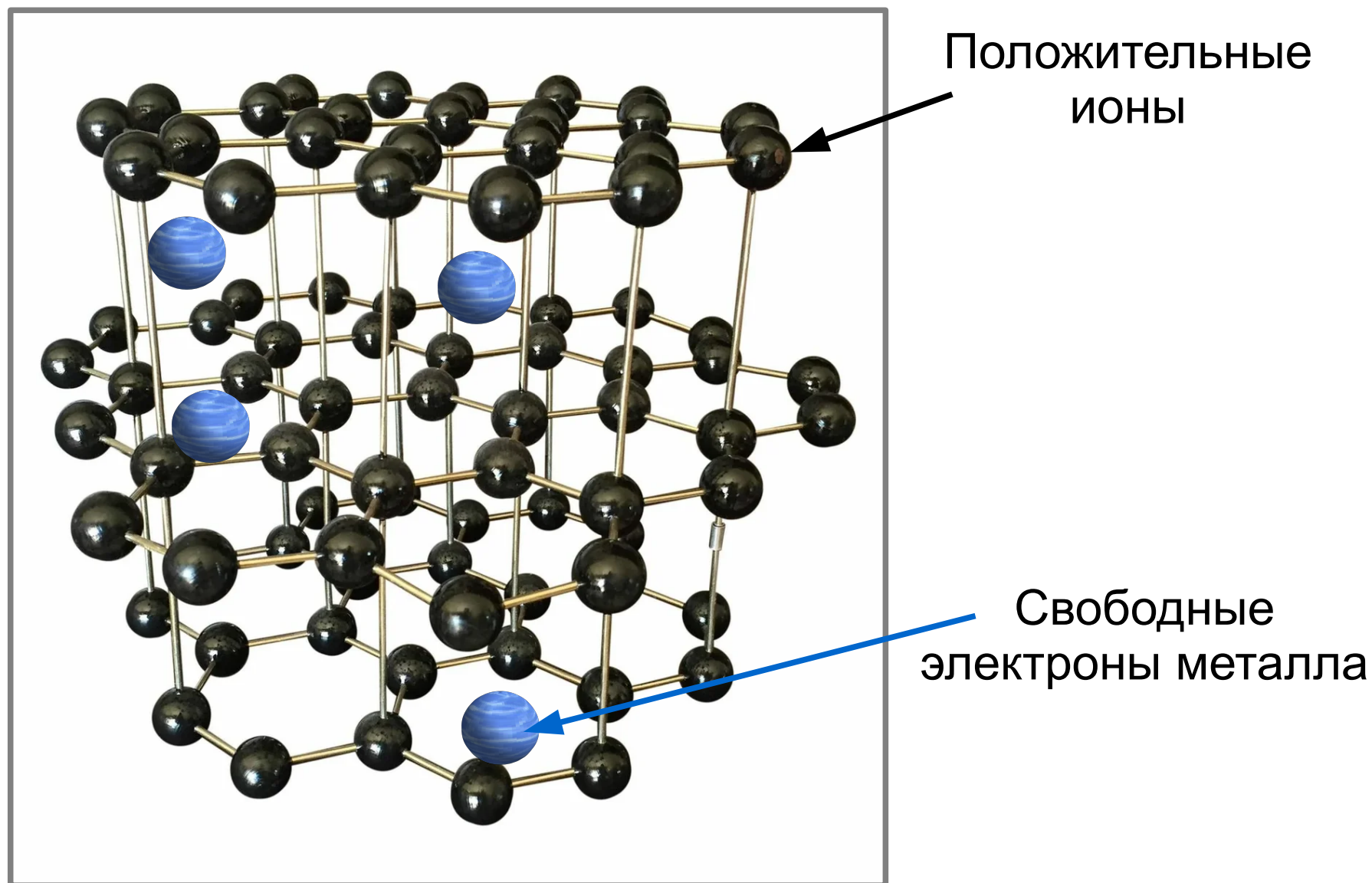
$$= 1.02 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\hbar \omega = \frac{m V^2}{2} + A$$

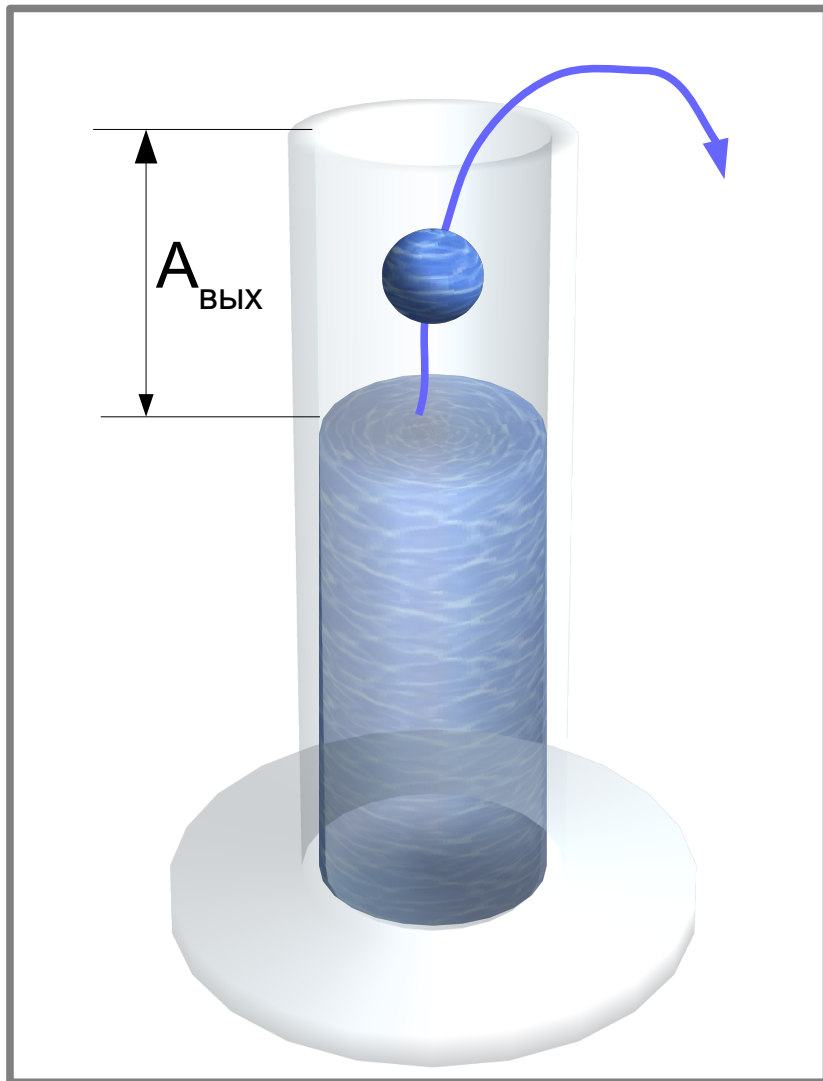


на основе рисунков из
Нобелевской лекции
Милликена, 1923

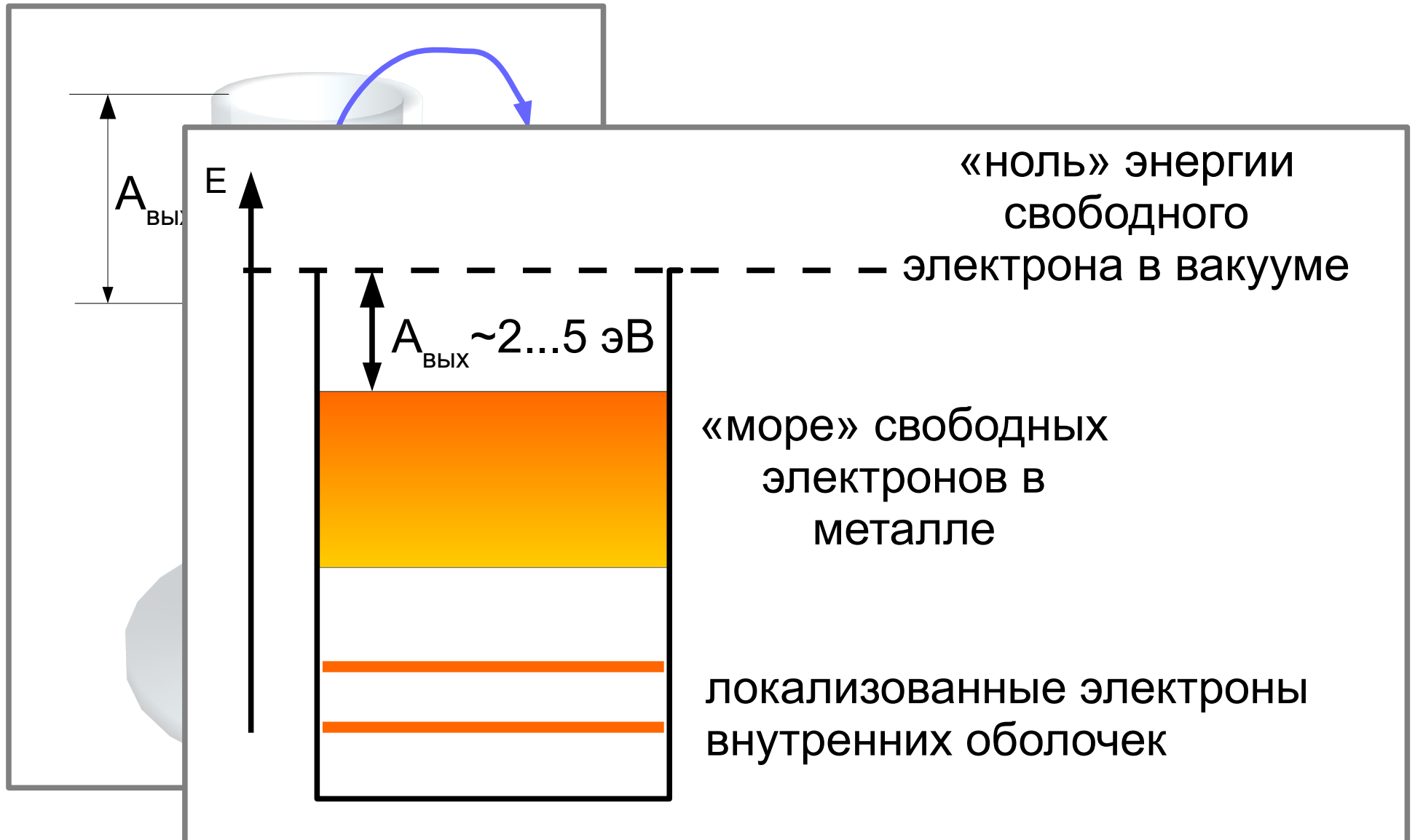
Работа выхода: что это?



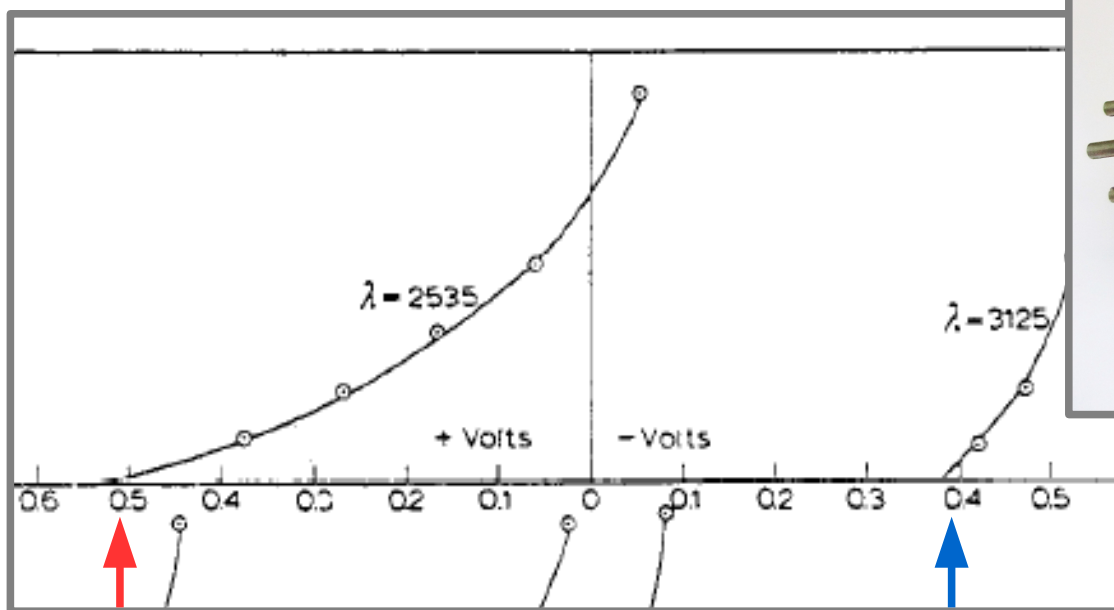
Работа выхода: что это?



Работа выхода: что это?

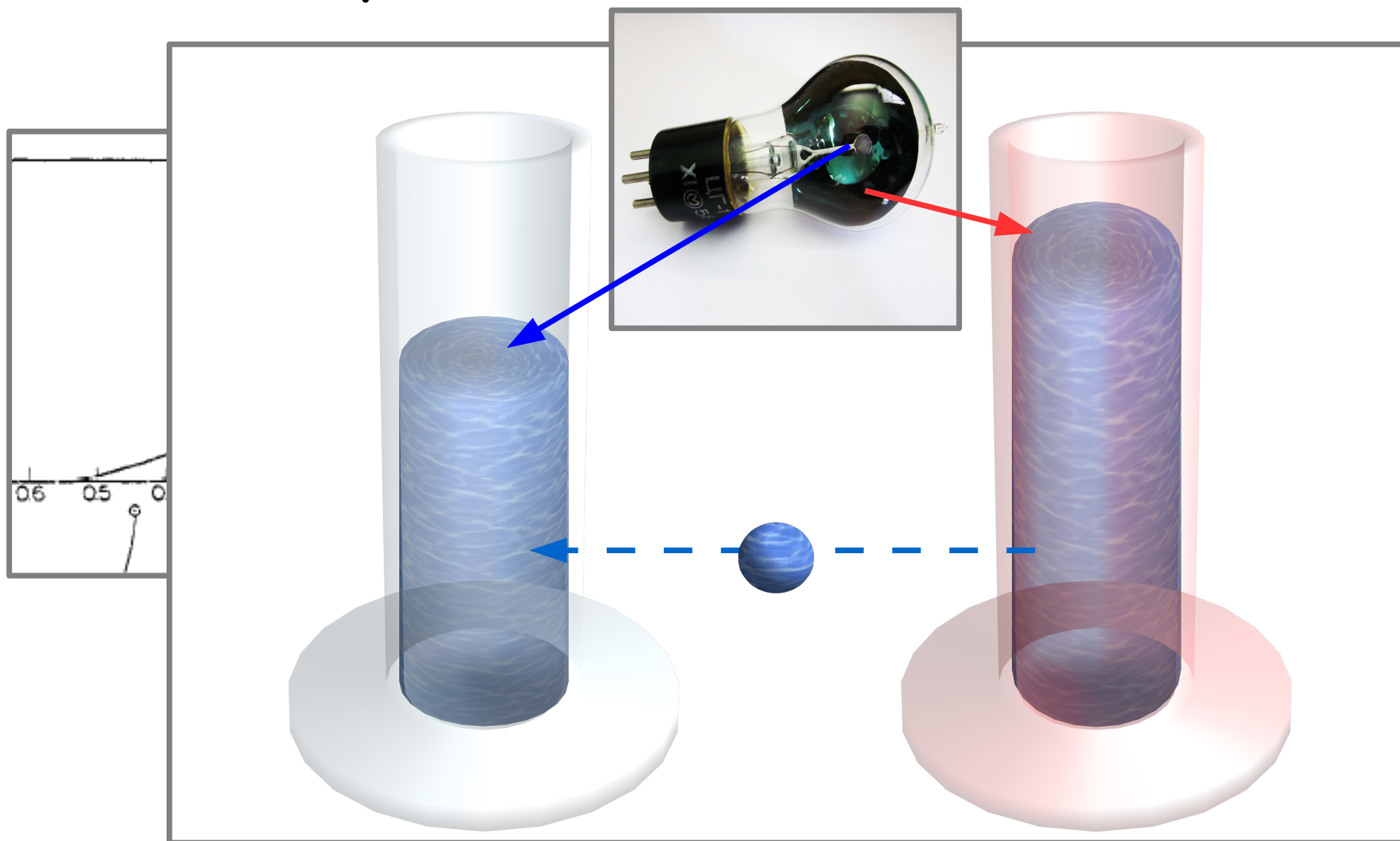


Электроды из разнородных материалов — последствия...



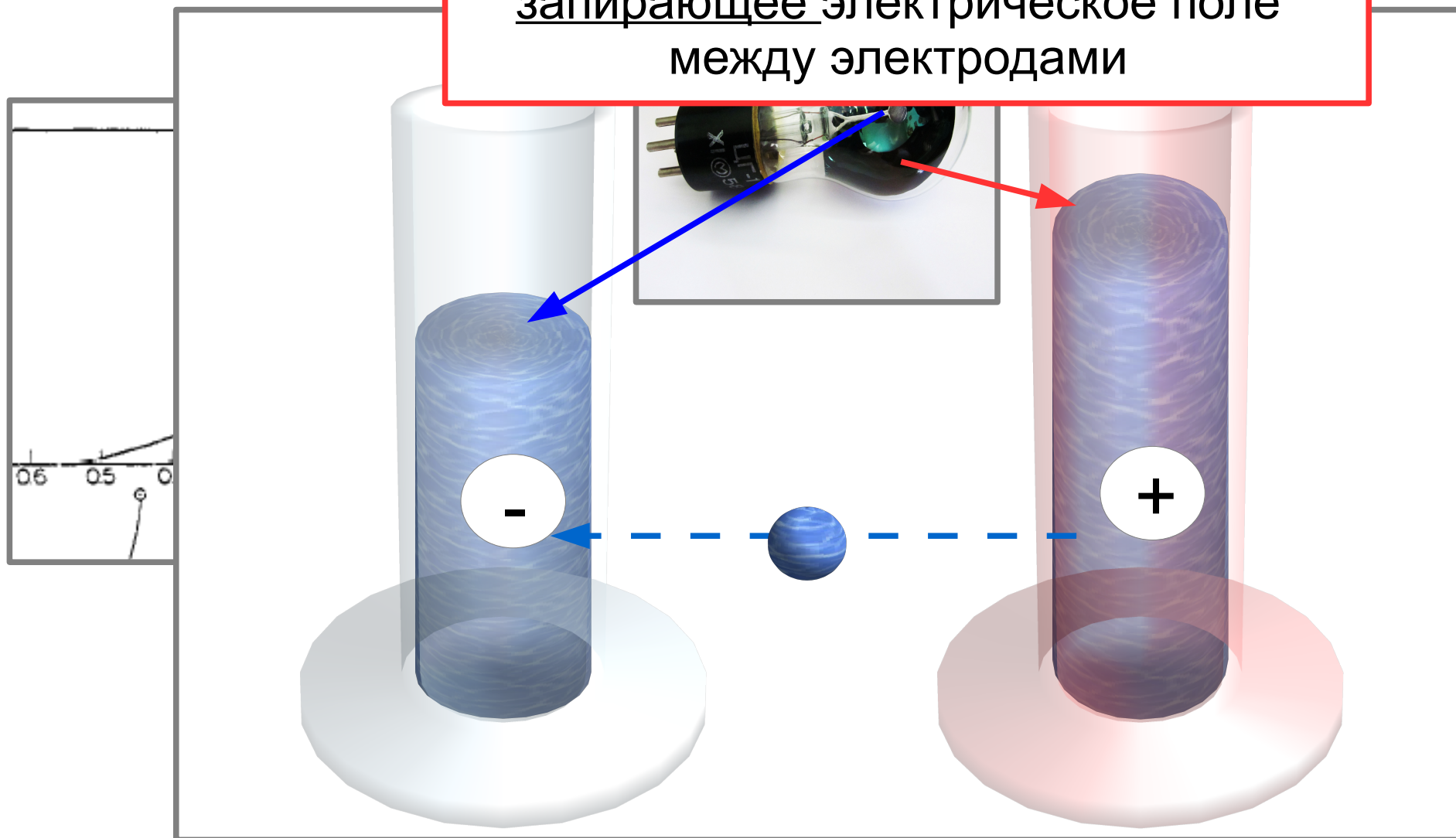
**ВНИМАНИЕ: сменилась полярность
запирающего напряжения!?**

Электроды из разнородных материалов — последствия...

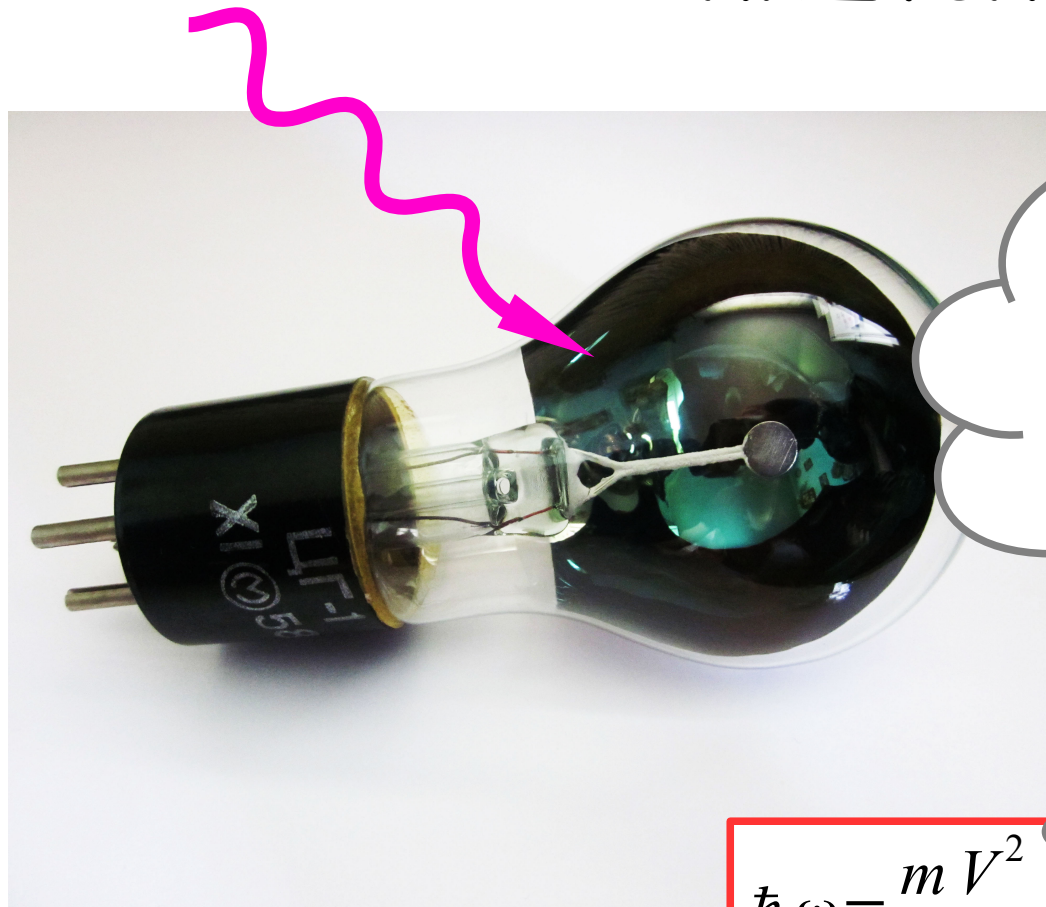


Электроды из разнородных матери

Возникает *контактная разность потенциалов* и «дополнительное» запирающее электрическое поле между электродами



Что именно написано в уравнении Эйнштейна?



Возможен ли фотоэффект на частоте НИЖЕ красной границы?

$$\hbar \omega = \frac{m V^2}{2} + A$$
$$\hbar \omega_{кр} = A$$

Что именно написано в уравнении Эйнштейна?

Многоквантовый фотоэффект

$$N \cdot \hbar \omega = \frac{m V^2}{2} + A$$

$$\omega_{кр}^{(N)} = \frac{\omega_{кр}}{N}$$

$$\hbar \omega = \frac{m V^2}{2} + A$$

$$\hbar \omega_{кр} = A$$

Возможен ли фотоэффект на частоте НИЖЕ красной границы?

Что именно написал Эйнштейн

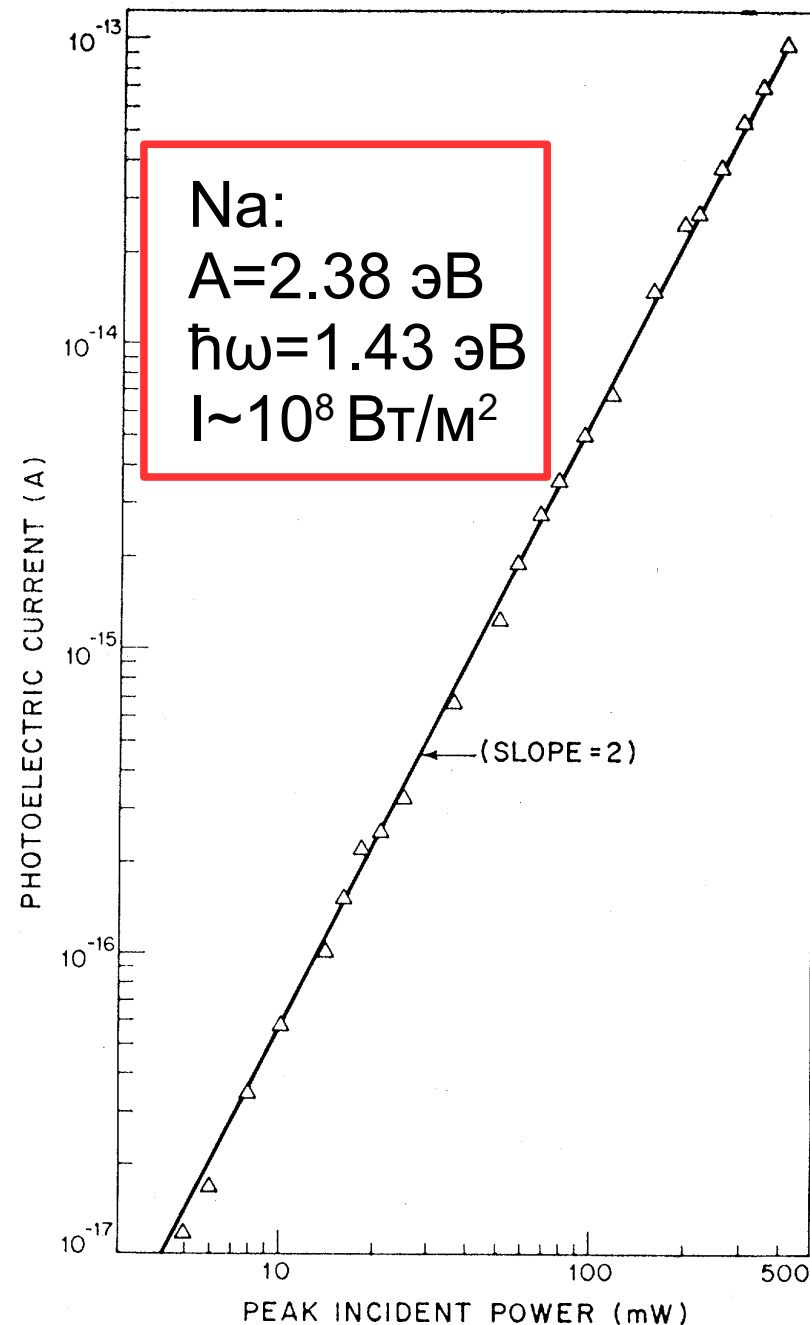
Многоквантовый
фотоэффект

$$N \cdot \hbar \omega = \frac{m V^2}{2} + A$$

$$\omega_{кр}^{(N)} = \frac{\omega_{кр}}{N}$$

$$\hbar \omega = \frac{m V^2}{2}$$

$$\hbar \omega_{кр} = A$$



Часть 2. Импульс кванта электромагнитной волны

Импульс кванта электромагнитной ВОЛНЫ

Классическая электродинамика:
поток энергии и поток импульса в электромагнитной волне однозначно связаны друг с другом

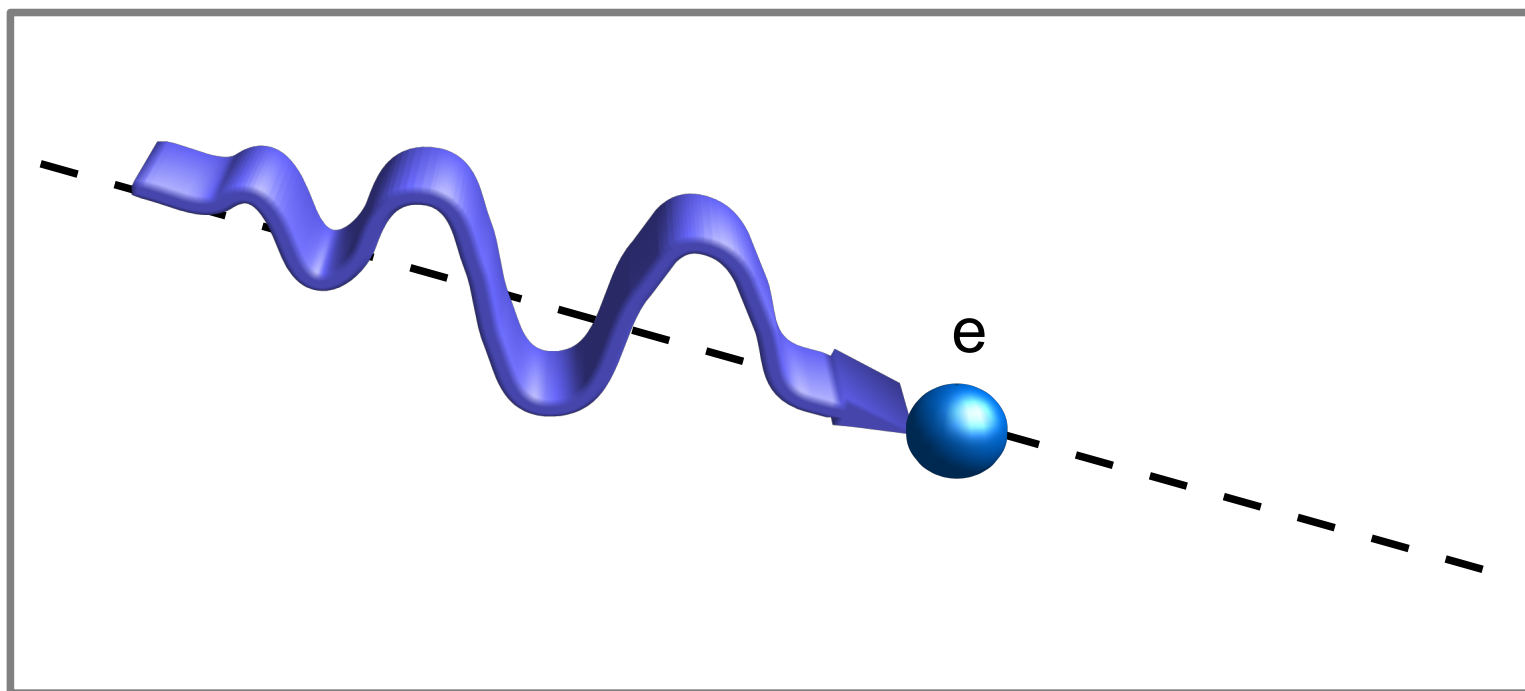
$$\vec{j}_p = \frac{\vec{j}_E}{c}$$

Рассматривая плоскую электромагнитную волну как поток планковских квантов, мы обязаны каждому кванту сопоставить импульс

$$p = \frac{E}{c} = \frac{\hbar \omega}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

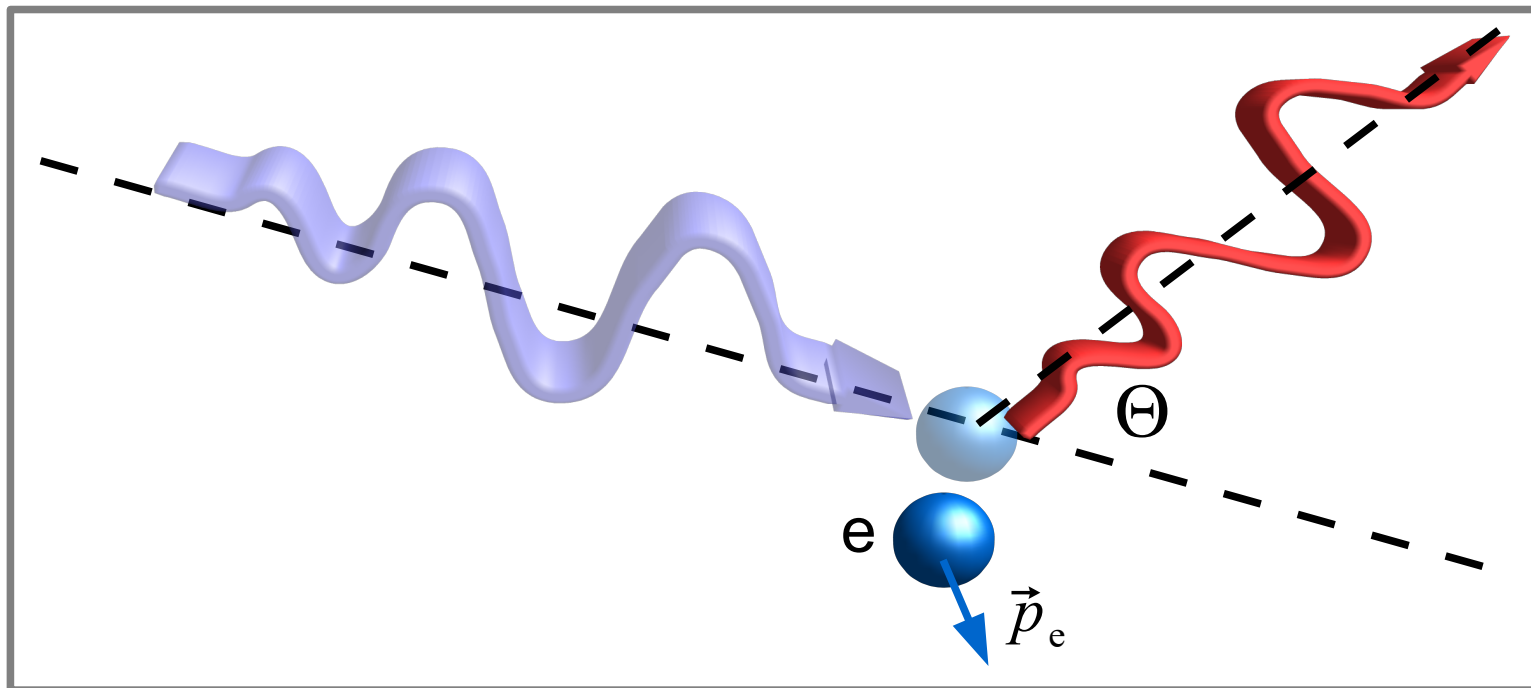
Эффект Комптона

Рассеяние кванта электромагнитной волны на электроне



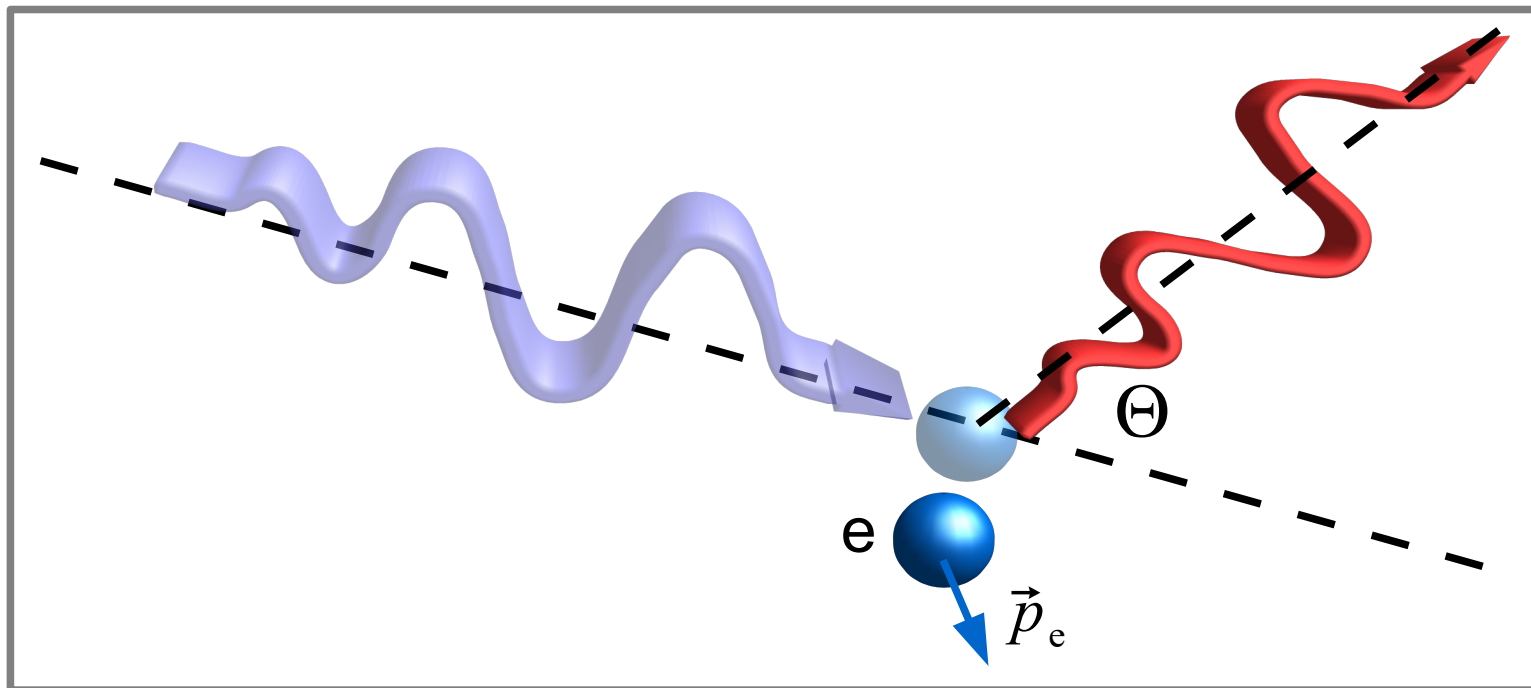
Эффект Комптона

Рассеяние кванта электромагнитной волны на электроне



Эффект Комптона

Рассеяние кванта электромагнитной волны на электроне



Опыт Комптона (Нобелевская премия 1927):

- падающее излучение $0.708\text{\AA}$
- при рассеянии назад наблюдается «красное смещение» на $0.044\text{\AA}$

Эффект Комптона

$$\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \Theta)$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m c} = 0.0024 \text{ нм} = 2.4 \text{ пм} \text{ (для электрона)}$$

- По сути — рассеяние безмассовой частицы на массивной. То же будет и для рассеяния фотонов на других заряженных частицах, но для легких электронов сдвиг самый сильный
- Рассеяние «почти безмассового» нейтрино будет описываться также
- Ответ для «красного смещения» рассеянной волны не зависит от начальной длины волны

Где взять свободный покоящийся электрон для эффекта Комптона?

Где взять свободный покоящийся электрон для эффекта Комптона?

Необходимо, чтобы энергия, переданная электрону была велика по сравнению с энергией связи электрона в атоме!

$$T_e = h c \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_0 + \Delta \lambda} \right) = (\text{рассеяние назад}) = h c \frac{2 \lambda_c}{\lambda_0 (\lambda_0 + 2 \lambda_c)}$$

Где взять свободный покоящийся электрон для эффекта Комптона?

Необходимо, чтобы энергия, переданная электрону была велика по сравнению с энергией связи электрона в атоме!

$$T_e = h c \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_0 + \Delta \lambda} \right) = (\text{рассеяние назад}) = h c \frac{2 \lambda_c}{\lambda_0 (\lambda_0 + 2 \lambda_c)}$$

$$\lambda_0 \ll \lambda_c : T_e = \frac{h c}{\lambda_0} \frac{1}{1 + \lambda_0 / (2 \lambda_c)} \approx \frac{h c}{\lambda_0} - \frac{m c^2}{2} \gg m c^2 \gg E_{св}$$

видно в некоторых лабораторных

Где взять свободный покоящийся электрон для эффекта Комптона?

Необходимо, чтобы энергия, переданная электрону была велика по сравнению с энергией связи электрона в атоме!

$$T_e = hc \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_0 + \Delta\lambda} \right) = (\text{рассеяние назад}) = hc \frac{2\lambda_c}{\lambda_0(\lambda_0 + 2\lambda_c)}$$

$$\lambda_0 \ll \lambda_c : T_e = \frac{hc}{\lambda_0} \frac{1}{1 + \lambda_0/(2\lambda_c)} \approx \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{mc^2}{2} \gg mc^2 \gg E_{св}$$

видно в некоторых лабораторных

$$\lambda_0 \gg \lambda_c : T_e \approx \frac{2hc\lambda_c}{\lambda_0^2} = 2 \frac{E_0^2}{mc^2} \gg 10 \text{ эВ}$$

случай опытов Комптона

О чём может «рассказать» электрон после рассеяния?

$$T_e = hc \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_0 + \Delta\lambda} \right) = (\text{рассеяние назад}) = hc \frac{2\lambda_c}{\lambda_0(\lambda_0 + 2\lambda_c)}$$

$$\lambda_0 \ll \lambda_c : T_e = \frac{hc}{\lambda_0} \frac{1}{1 + \lambda_0/(2\lambda_c)} \approx \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{mc^2}{2} \gg mc^2$$

О чём может «рассказать» электрон после рассеяния?

$$T_e = hc \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_0 + \Delta\lambda} \right) = (\text{рассеяние назад}) = hc \frac{2\lambda_c}{\lambda_0(\lambda_0 + 2\lambda_c)}$$

$$\lambda_0 \ll \lambda_c : T_e = \frac{hc}{\lambda_0} \frac{1}{1 + \lambda_0/(2\lambda_c)} \approx \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{mc^2}{2} \gg mc^2$$

Релятивистский электрон, может
двигаться *быстрее* скорости
света в среде

О чём может «рассказать» электрон после рассеяния?

$$T_e = hc \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_0 + \Delta\lambda} \right) = (\text{рассеяние назад}) = hc \frac{2\lambda_c}{\lambda_0(\lambda_0 + 2\lambda_c)}$$

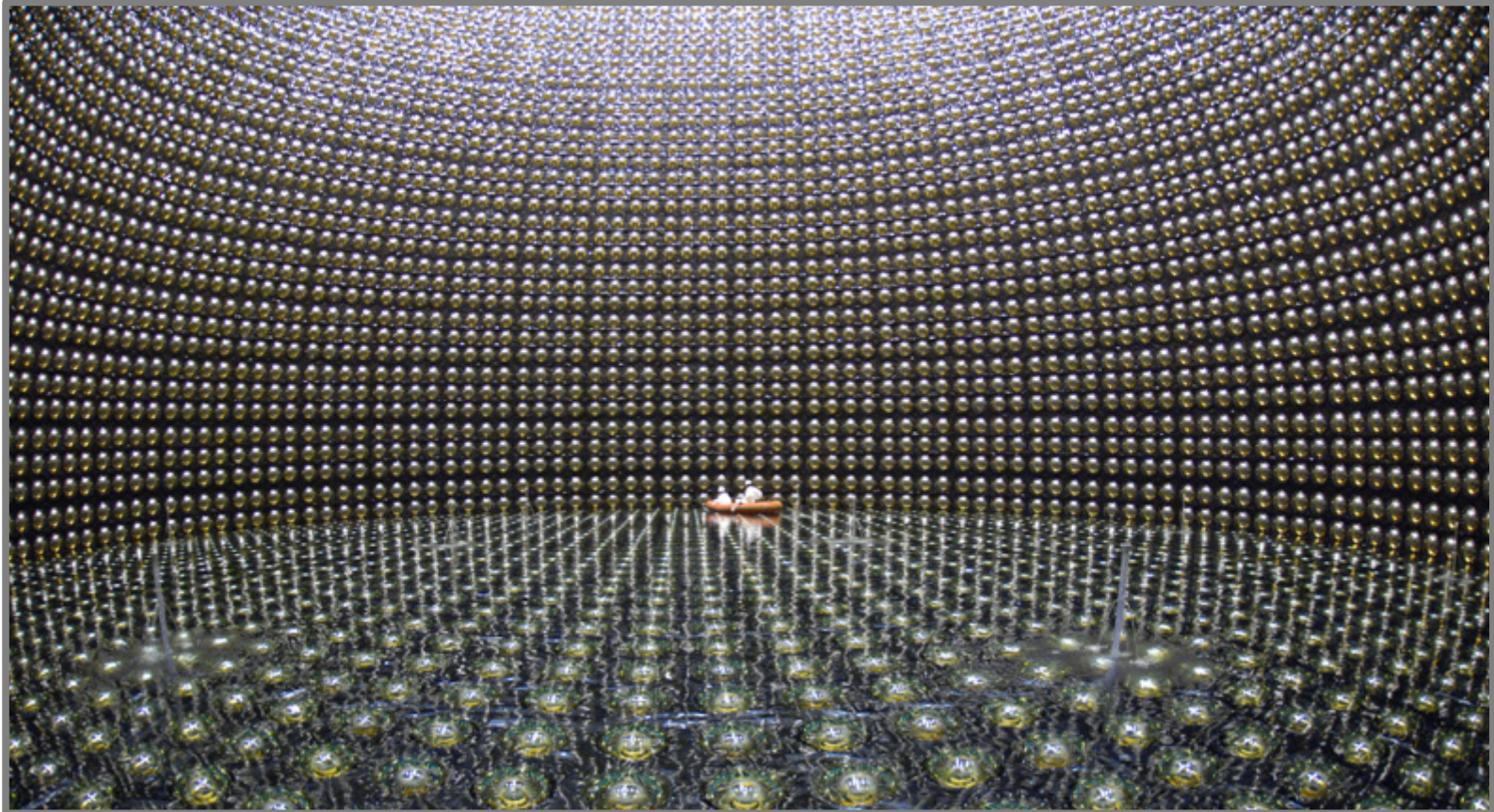
$$\lambda_0 \ll \lambda_c : T_e = \frac{hc}{\lambda_0} \frac{1}{1 + \lambda_0/(2\lambda_c)} \approx \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{mc^2}{2} \gg mc^2$$

Релятивистский электрон, может двигаться *быстрее* скорости

Возникнет излучение Черенкова, направление движения самых энергичных электронов близко к направлению движения исходной безмассовой частицы.

Способ детектирования нейтрино!

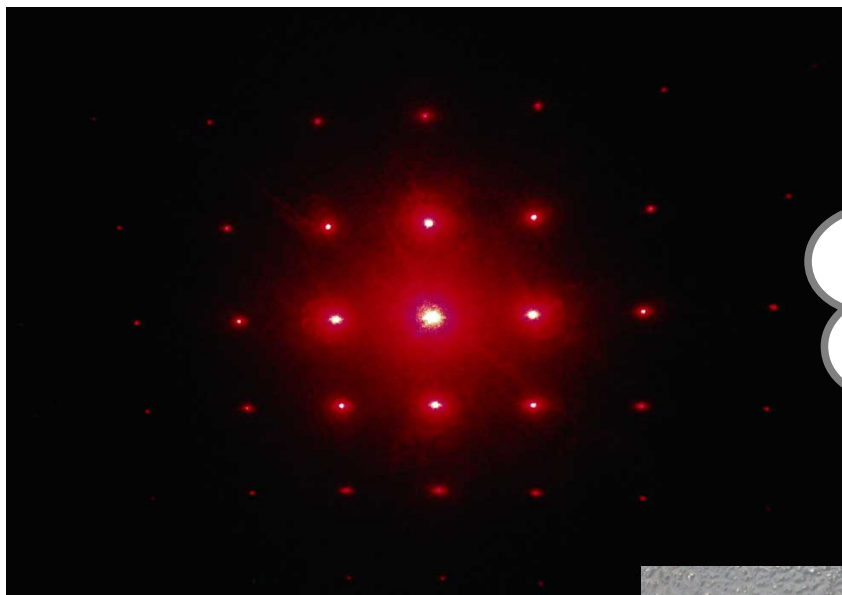
Super Kamiokande



1000 метров под землей
размер ~40 метров, 50000 тонн воды,
~10000 ФЭУ

Часть 3. От волн к частицам и обратно

Воспоминания из волновой оптики



<http://www.animations.physics.unsw.edu.au/diffraction/diffraction-labs.html>

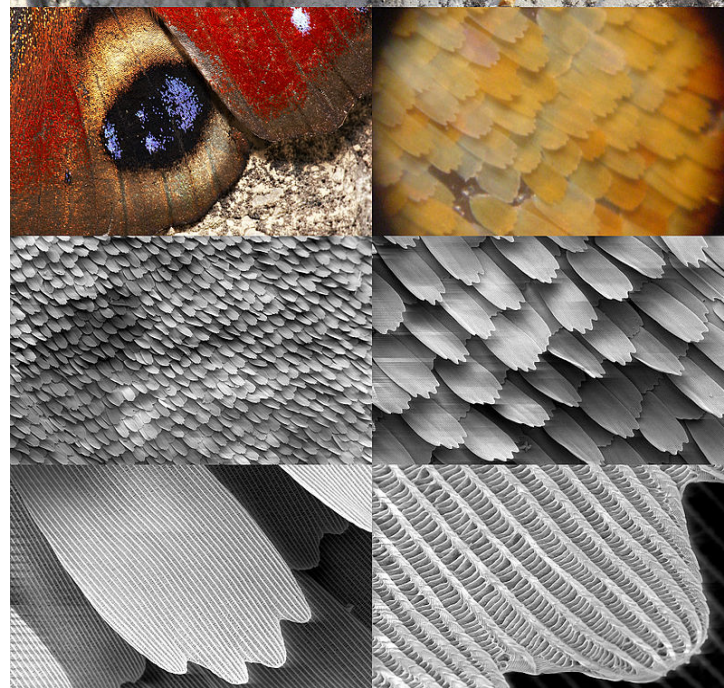
Дифракция и
интерференция
волн



Л.Свистов, Мыльные пузыри в
фотографиях, Квант, 4, 2 (2015)



Hyperphysics Project, Oil Film Interference,
2017,
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/oilfilm.html>



wikipedia.org, Structural coloration, 2017,
https://en.wikipedia.org/wiki/Structural_coloration

Гипотеза де Бройля

«Waves and Quanta», Comptes Rendus **177**, 507 (1923)

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

- По аналогии с «корпускулярными» свойствами света предположим, что и «настоящим» частицам соответствует какой-то волновой процесс
- Так как ультрарелятивистская частица «механически» от фотона не отличается, естественно ожидать, что для длины волны будет та же связь с импульсом, что и у фотона
- Групповая скорость таких волн де Бройля должна совпадать со скоростью частицы

Гипотеза де Б

«Waves and Quanta», Comptes Rendus

Как проверить?

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

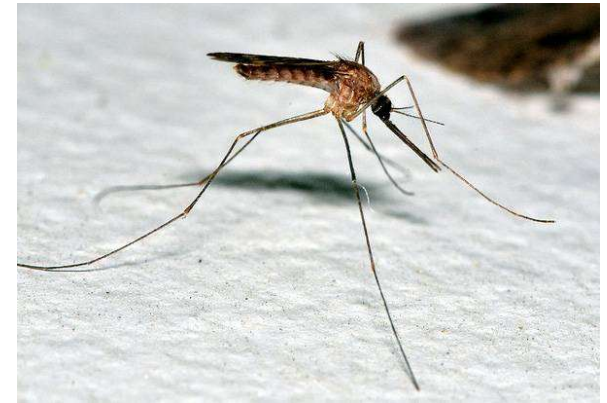
- По аналогии с «корпускулярными» свойствами света предположим, что и «настоящим» частицам соответствует какой-то волновой процесс
- Так как ультрарелятивистская частица «механически» от фотона не отличается, естественно ожидать, что для длины волны будет та же связь с импульсом, что и у фотона
- Групповая скорость таких волн де Бройля должна совпадать со скоростью частицы

Порядки величины для длины волны де Бройля

В быту:

1 миллиграмм, 1 м/сек

$$\lambda = \frac{h}{m V} \simeq \frac{6 \times 10^{-34}}{10^{-6}} \text{ м} \sim 10^{-27} \text{ м}$$



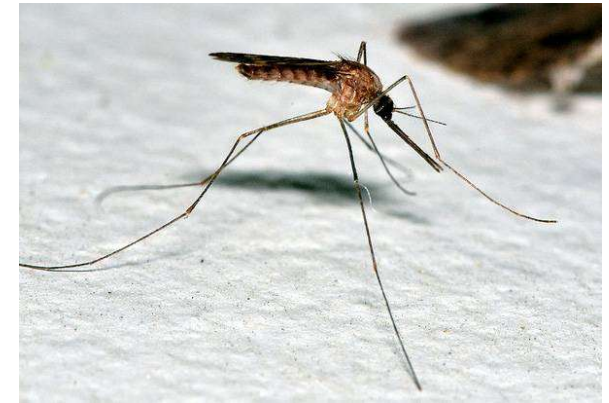
<https://zooclub.ru/attach/6982.jpg>

Порядки величины для длины волны де Бройля

В быту:

1 миллиграмм, 1 м/сек

$$\lambda = \frac{h}{m V} \simeq \frac{6 \times 10^{-34}}{10^{-6}} \text{ м} \sim 10^{-27} \text{ м}$$

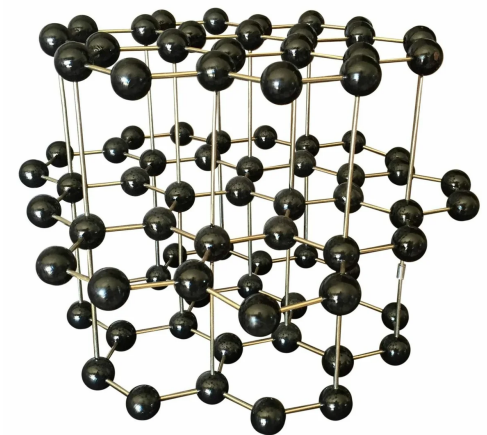


<https://zooclub.ru/attach/6982.jpg>

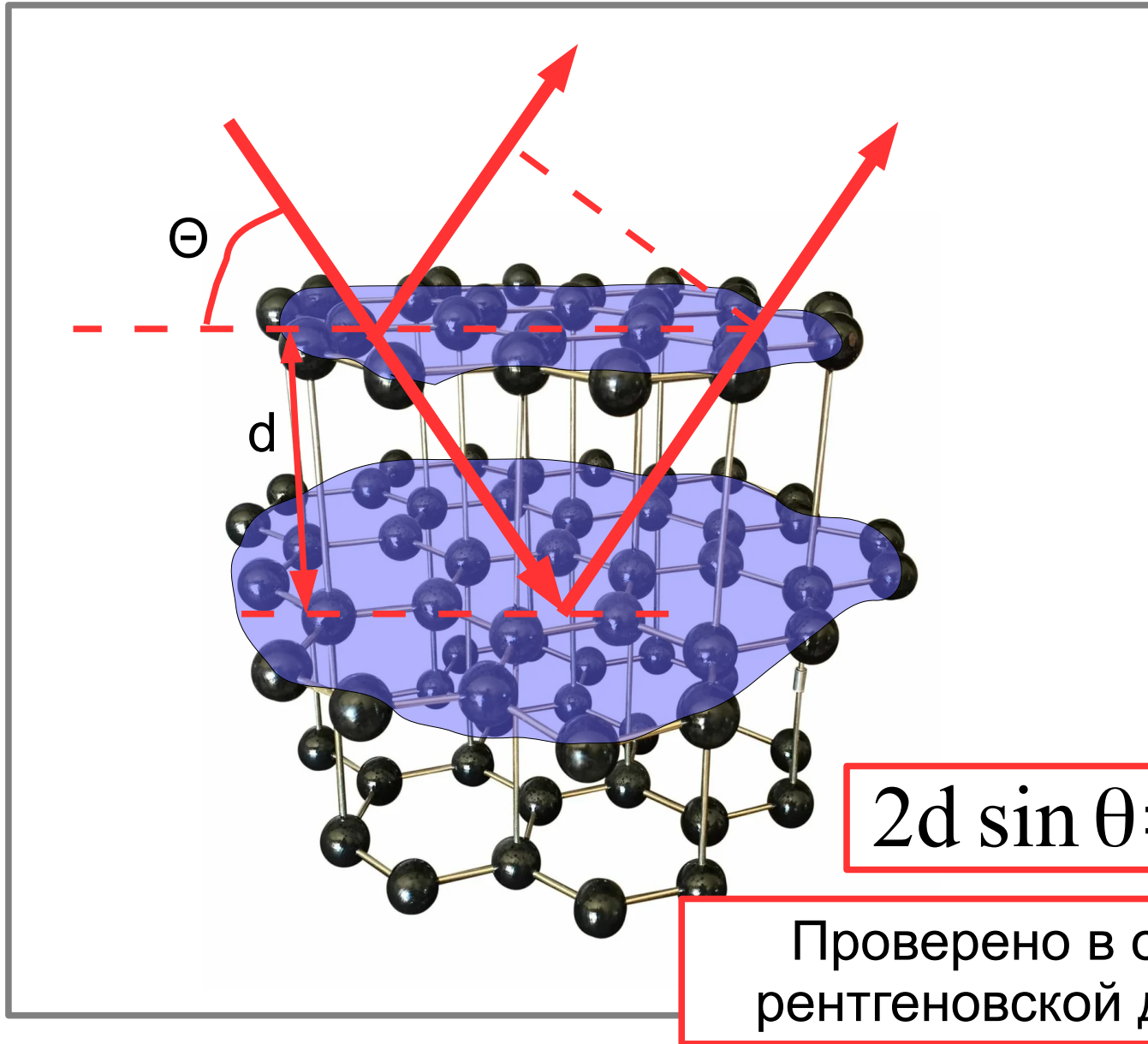
В микромире:

Электрон, разность потенциалов 100 В

$$\lambda = \frac{h}{m V} = \frac{h}{\sqrt{2 m e U}} \sim 10^{-10} \text{ м}$$



3-мерная дифракционная решётка. Условие Брэгга-Вульфа



Опыты Дэвиссона-Гермера

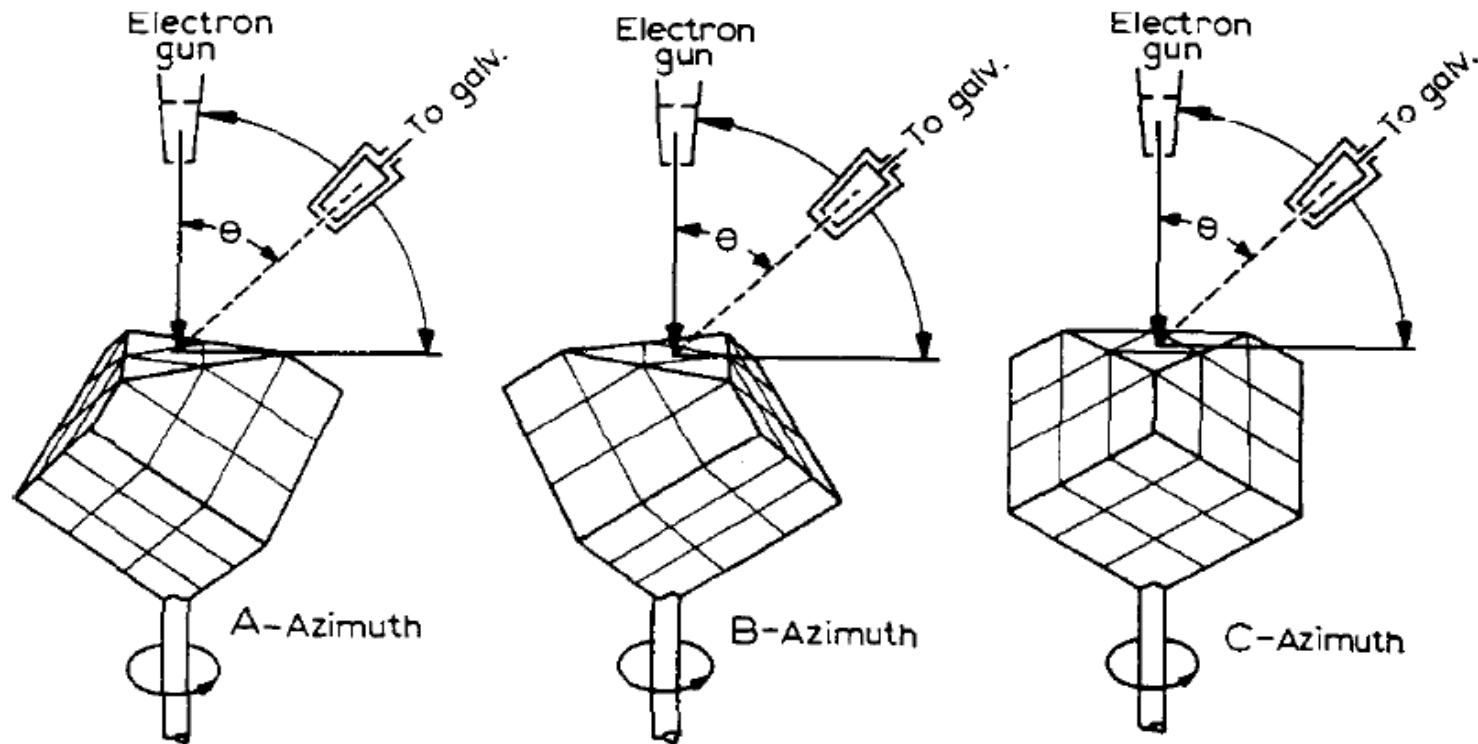


Fig. 1. Schematic diagram showing disposition of primary beam, nickel crystal, and collector. Crystal shown revolved to bring one principal azimuth after another into plane of observation.

C. Davisson, Nobel prize lecture, ,
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1937/index.html

Пучок электронов рассеивается на кристалле никеля,
энергии ~ 100 эВ

Опыты Дэвиссона-Гермера

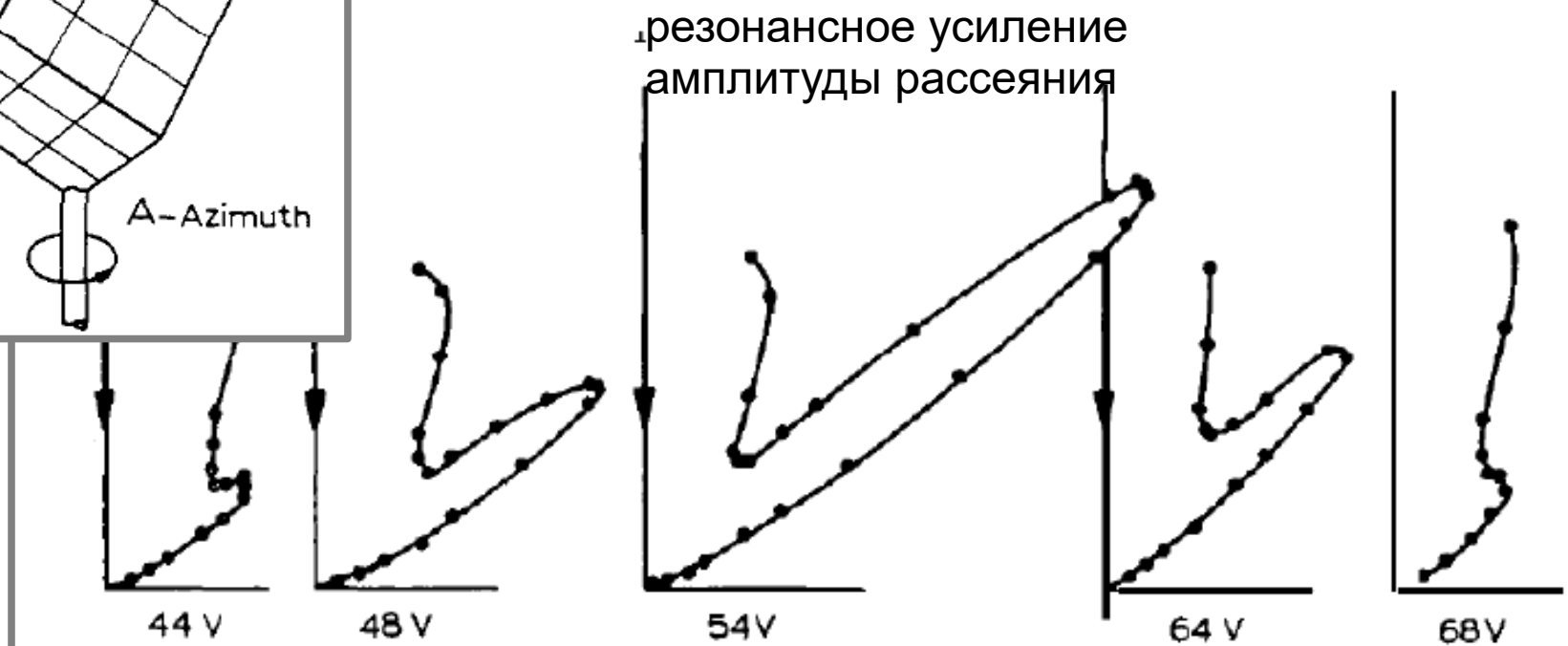
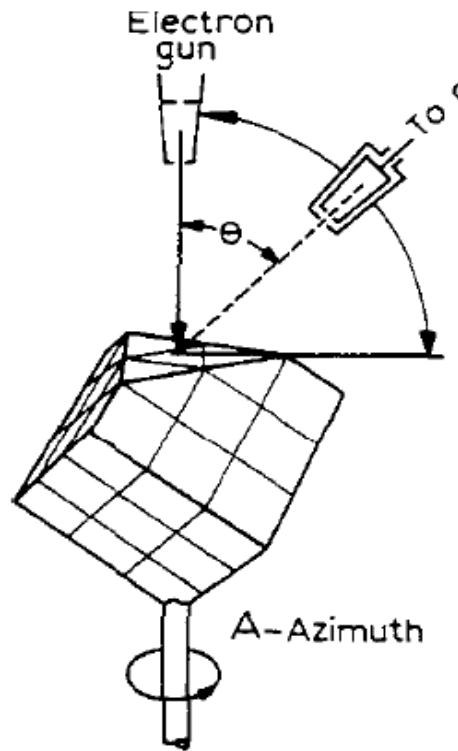


Fig. 2. Polar diagram showing intensity of elastic scattering in A-azimuth (Fig. 1) as function of latitude angle, for series of primary-beam voltages.

C. Davisson, Nobel prize lecture, ,

<https://www.nobelprizes/physics/laureates/1937/index.html>

$$\lambda = \frac{h}{mV} = \frac{h}{\sqrt{2meU}} \simeq 10^{-10} \text{ M}$$

Опыт Дэвиссона-Гермера: результат

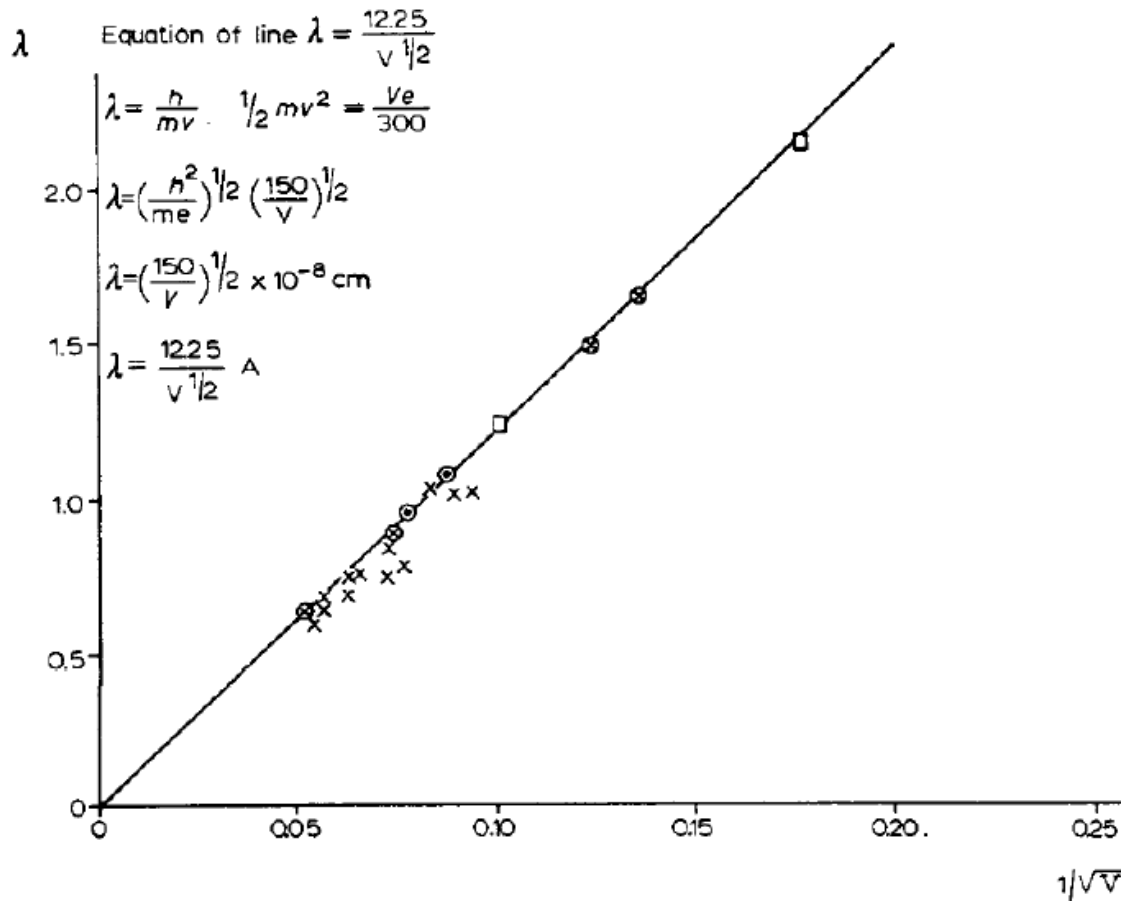


Fig. 4. Test of the de Broglie formula $\lambda = k/p = h/mv$. Wavelength computed from diffraction data plotted against $1/\sqrt{V}$, (V , primary-beam voltage). For precise verification of the formula all points should fall on the line $\lambda_s = 12.25/\sqrt{V}$ plotted in the diagram. (x From observations with diffraction apparatus; o same, particularly reliable; □ same, grazing beams. o From observations with reflection apparatus.)

Опыт Томсона

$U \sim 10 \text{ кЭВ}$

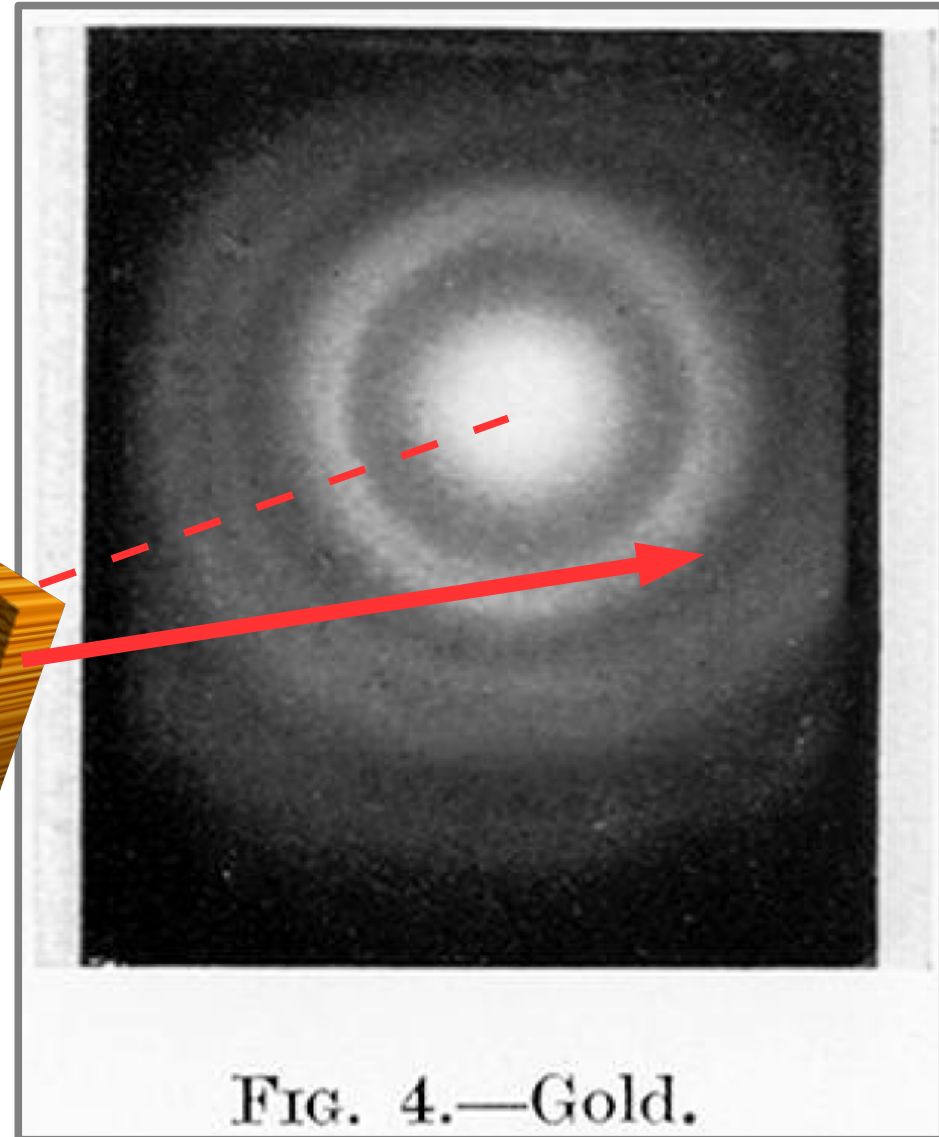
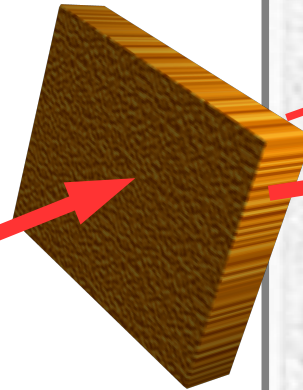
$$\lambda = \frac{12.25 \text{ \AA}}{\sqrt{E[\text{эВ}]} } \sim 0.1 \text{ \AA}$$

Отклонение на малые углы

$$\Theta \sim \frac{d}{\lambda} \sim 10^{-2}$$



<https://marketplace.seconlife.com/>

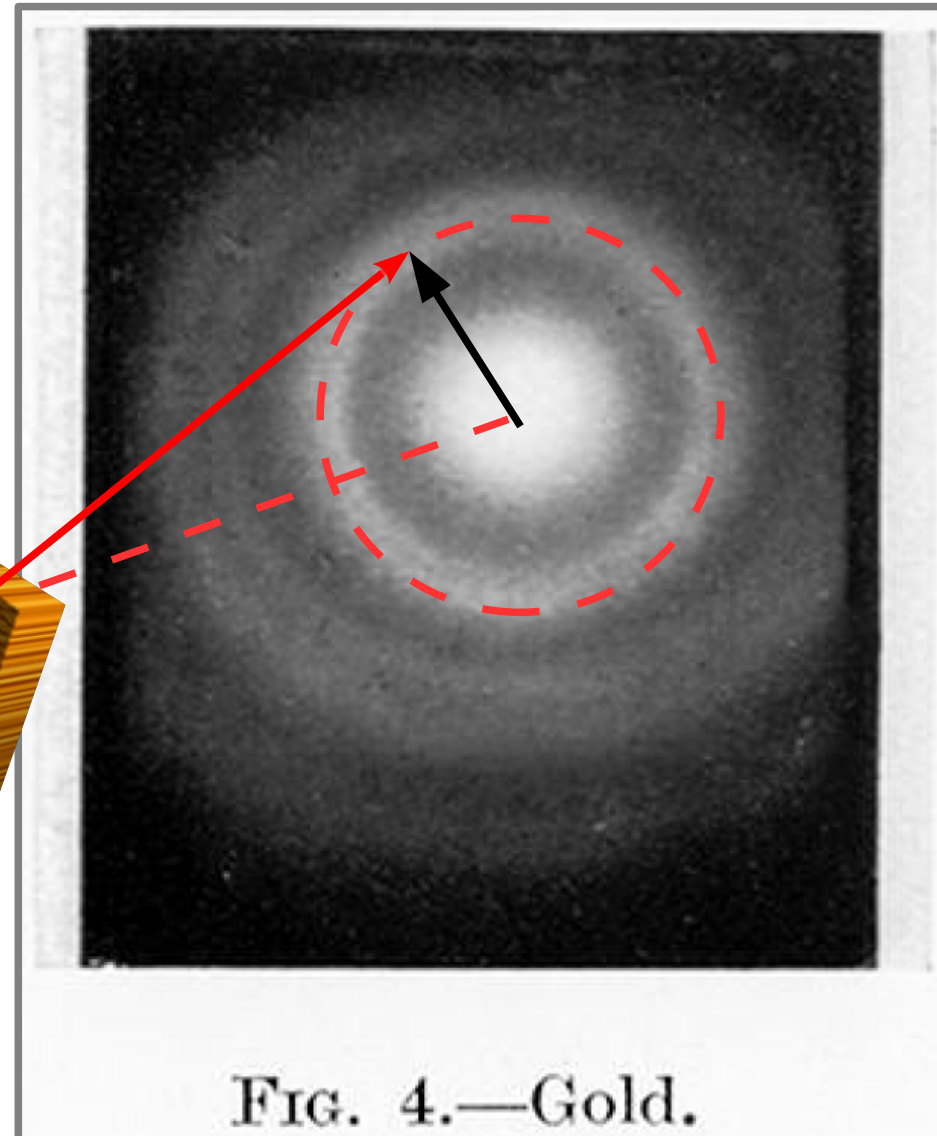
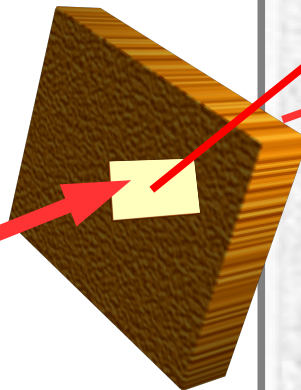


G. P. Thomson, Experiments on the Diffraction of Cathode Rays,
Proc. R. Soc. Lond. A, 117, 600 (1928)

Опыт Томсона

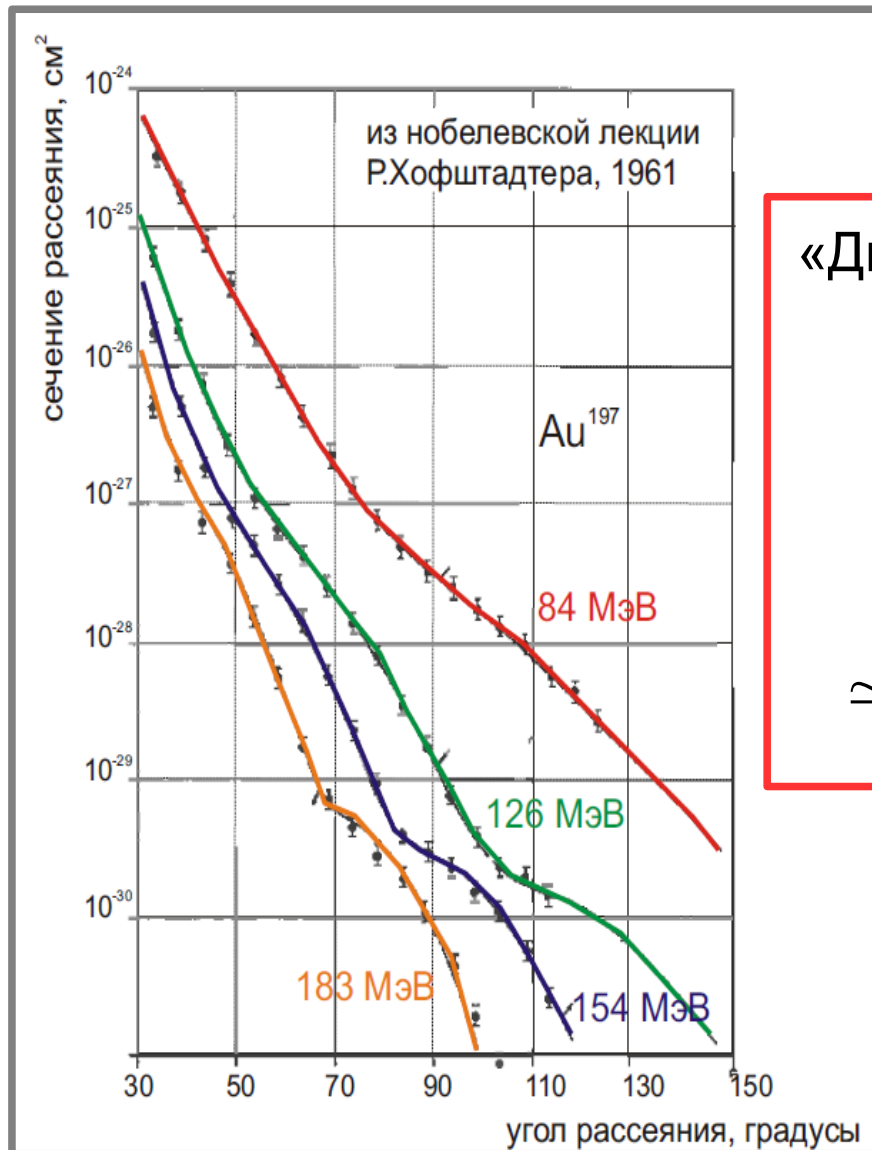
$$2 d \sin \Theta = n \lambda$$

$$R_n = L \tan 2 \Theta_n \approx 2 L \Theta_n = \frac{n \lambda L}{d}$$



G. P. Thomson, Experiments on the Diffraction of Cathode Rays,
Proc. R. Soc. Lond. A , 117, 600 (1928)

Опыты Хофштадтера



«Дифракция на диске»
возникает при:

$$E \simeq 100 \text{ МэВ}$$

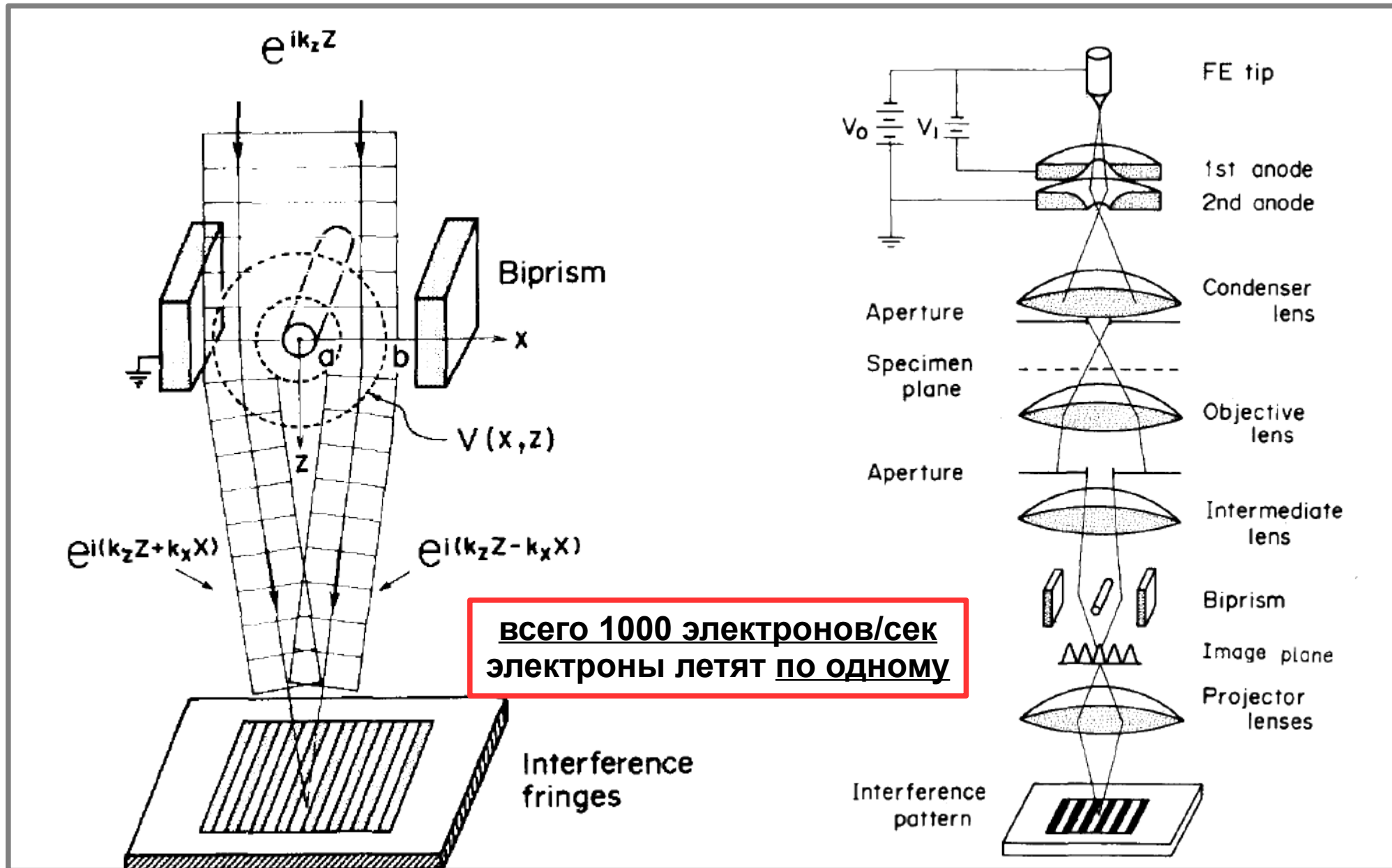
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{pc}$$

$$\simeq \Lambda \frac{mc^2}{E} \simeq 10 \text{ фм}$$

размер
ядра
атома

Часть 4. Сколько электронов нужно
для дифракции?

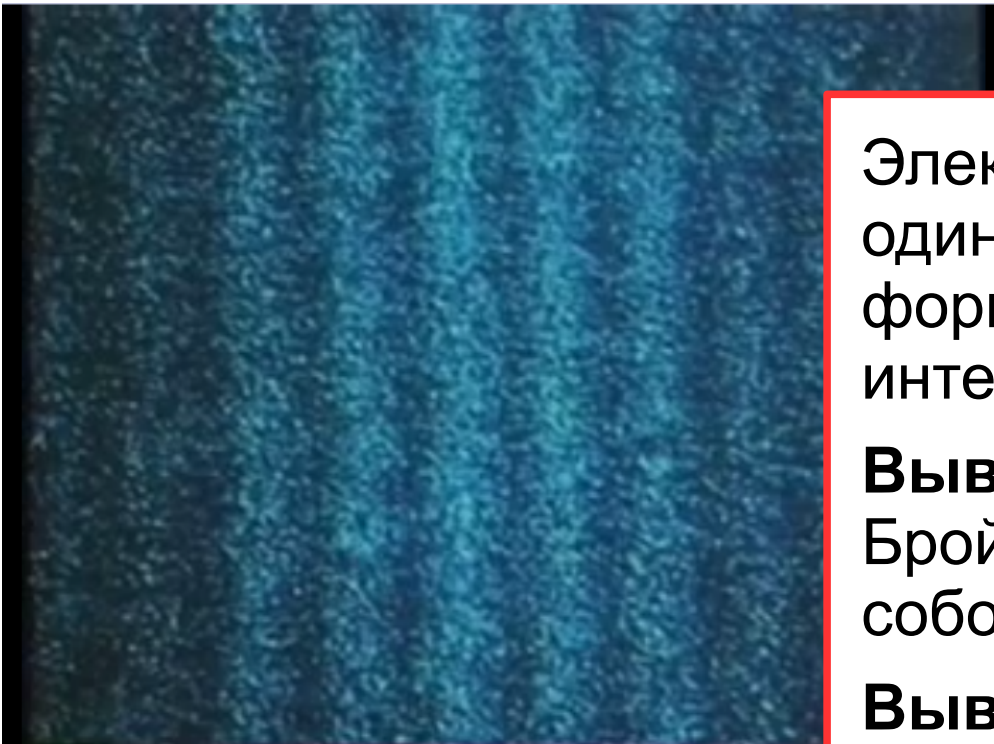
HITACHI Experiment (Опыт типа опыта Юнга с электронами)



HITACHI Experiment: результат



С кем интерферирует электрон?



Электроны пролетают «по одиночке». Но *статистически* формируется картина интерференции

Вывод 1: электрон (его волна де Бройля) интерферирует “сам с собой”

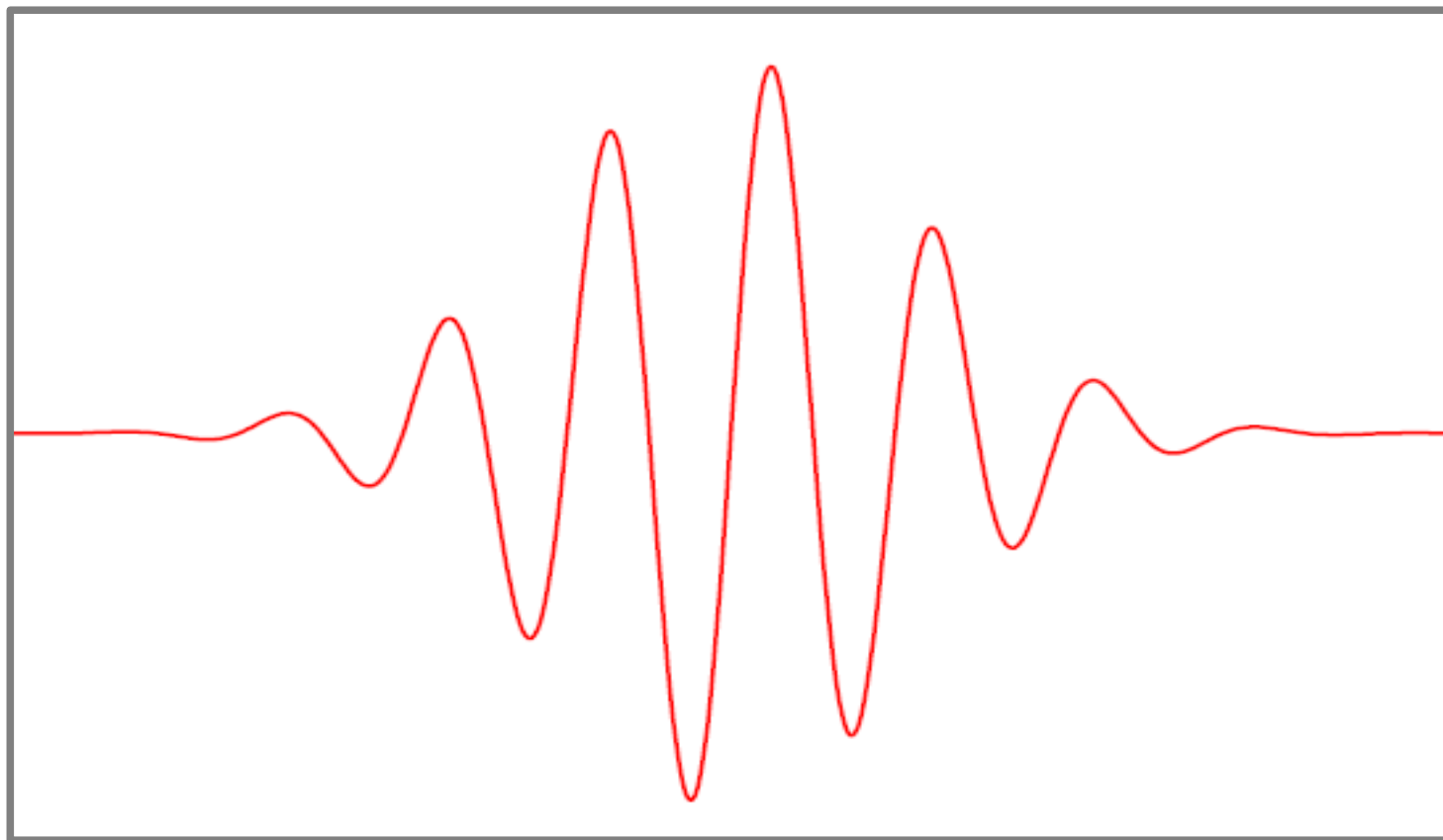
Вывод 2: мы в принципе не можем сказать с какой стороны от проволоочки электронной бипризмы пролетела частица

Часть 5. Волновая функция, её вероятностная интерпретация, соотношения неопределённости

Волновая функция

$$\Psi(x)$$

$$w(a < x < b) = \int_a^b \Psi^* \Psi dx$$

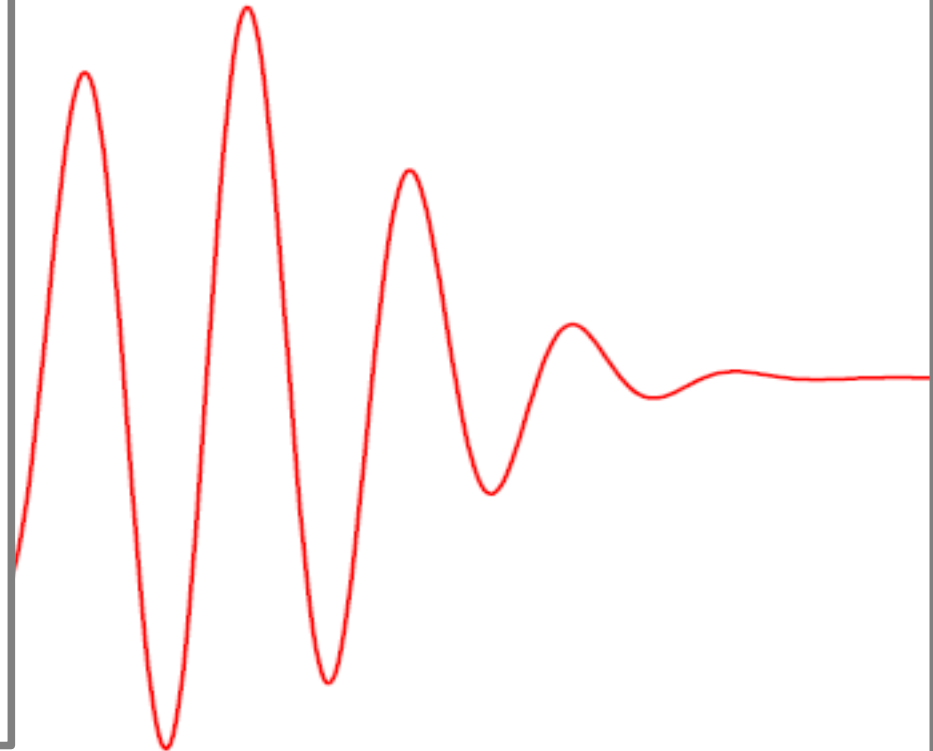


Волновая функция

$$\Psi(x)$$

$$w(a < x < b) = \int_a^b \Psi^* \Psi dx$$

Наблюдается дифракция:



Волновая функция

$$\Psi(x)$$

$$w(a < x < b) = \int_a^b \Psi^* \Psi dx$$

Наблюдается дифракция:

1) Свободная частица

$$\Psi(x, t) = A e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}$$



Волновая функция

$$\Psi(x)$$

$$w(a < x < b) = \int_a^b \Psi^* \Psi dx$$

Наблюдается дифракция:

1) Свободная частица

$$\Psi(x, t) = A e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}$$

2) Принцип суперпозиции

$$\Psi = \alpha \Psi_a + \beta \Psi_b$$



Главное на лекции

$$\hbar \omega = \frac{m V^2}{2} + A$$

$$\Delta \lambda = \lambda_c (1 - \cos \Theta)$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m c} = 0.0024 \text{ нм (для электрона)}$$

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

