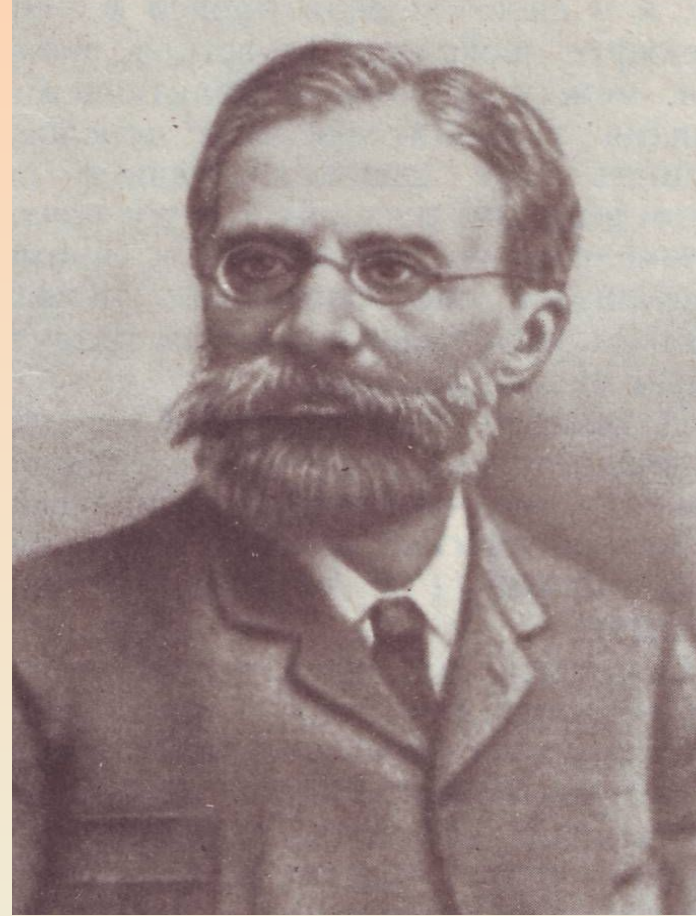
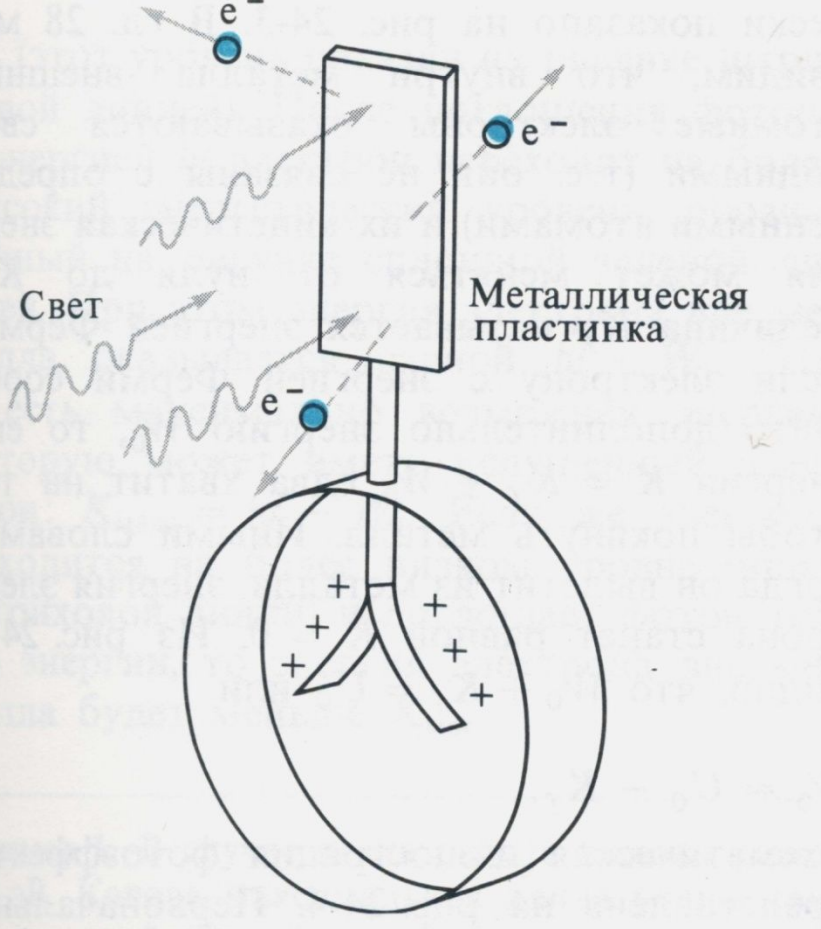


КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОПТИКЕ

1. Фотоэффект и его виды
2. Законы внешнего фотоэффекта
3. Фотонная теория света.
4. Масса, энергия и импульс фотона
5. Давление света
6. Двойственная природа света



Первые фундаментальные исследования фотоэффекта выполнены русским ученым **А.Г. Столетовым**.

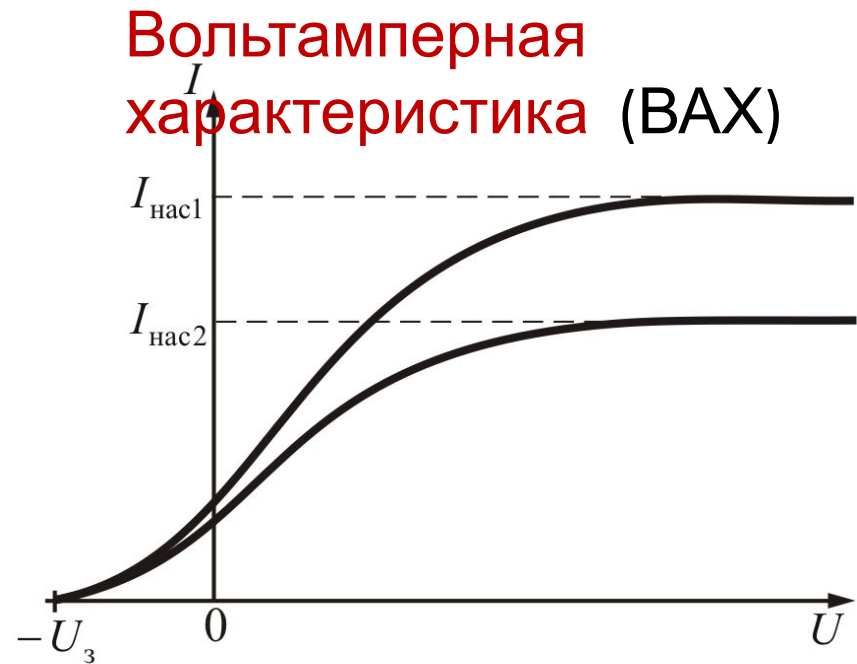
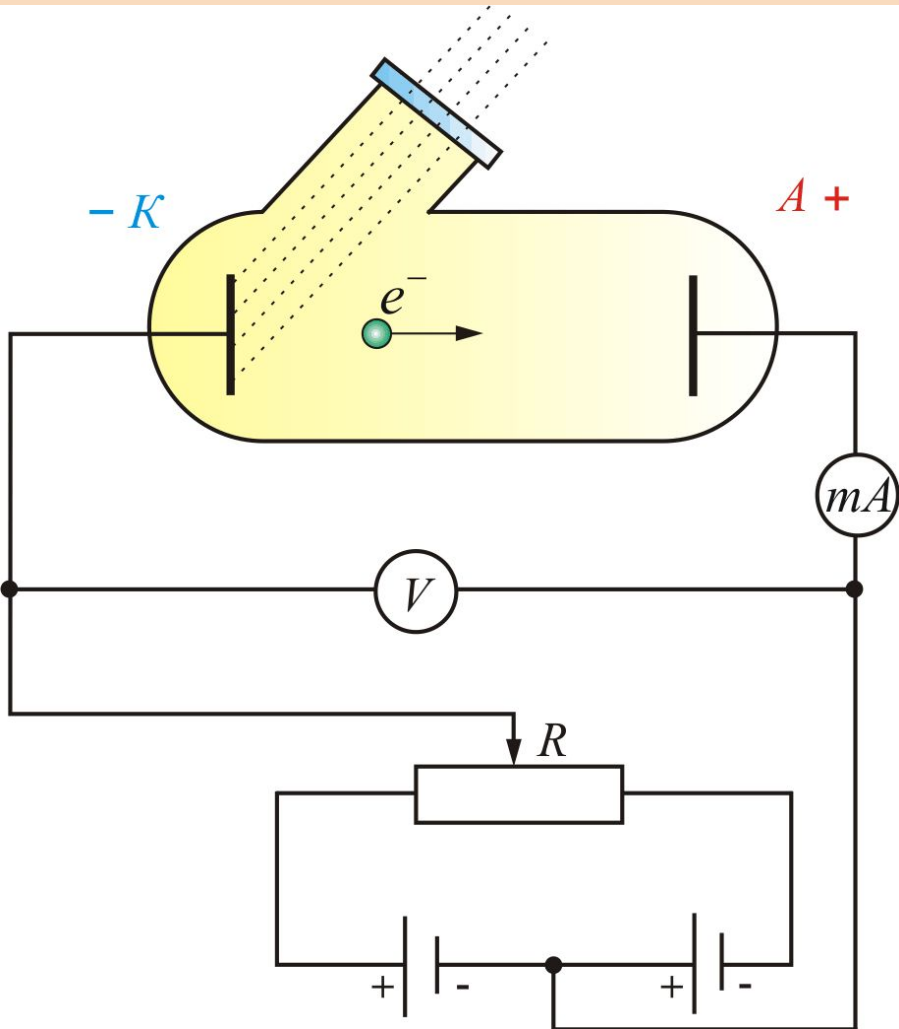
Нейтральный электроскоп, соединен с металлической пластинкой. При освещении пластинки светом из нее выбиваются фотоэлектроны, и листочки заряжаются положительно.

Виды фотоэффекта

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.

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



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 ν** .
3. Для каждого вещества существует **красная граница фотоэффекта**, т.е. минимальная частота ν_0 света, 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).

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

Фотонная теория света. Масса, энергия и импульс фотона

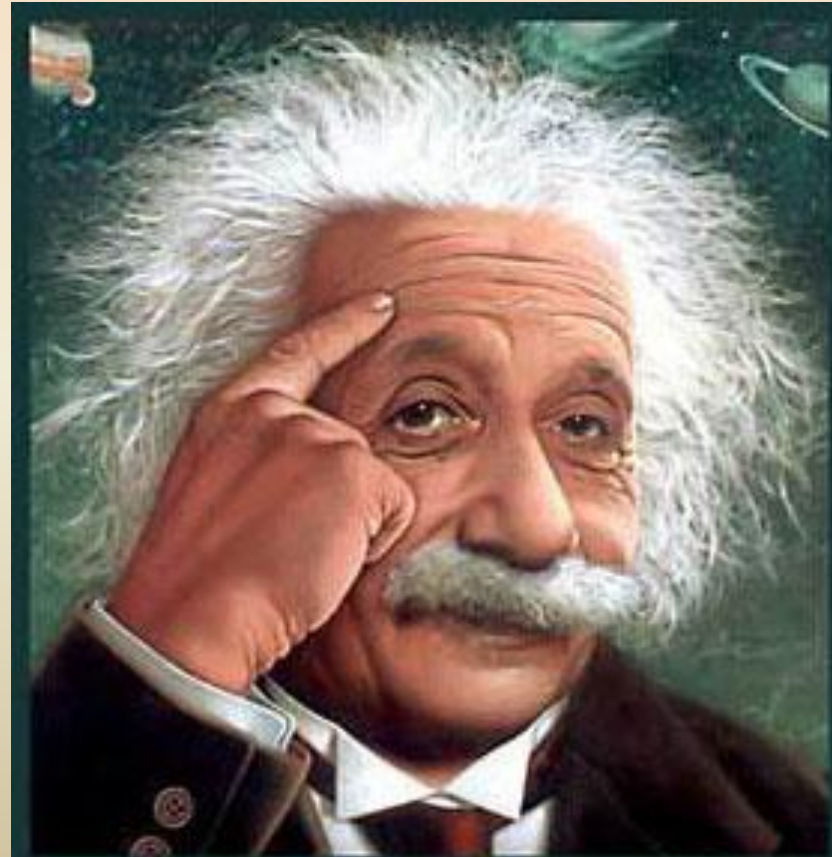
Альберт Эйнштейн
(Albert Einstein)

**14 марта 1879 -
18 апреля 1955**

Важнейшие работы

- теория относительности
- квантовая и статистическая механика
- космология

Нобелевская премия по
физике 1921



Фотонная теория света.

Масса, энергия и импульс фотона

В 1905г. Эйнштейн выдвинул смелую идею.

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

$$\epsilon_0 = h\nu.$$

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

Кванты электромагнитного излучения получили название **фотонов**.

Масса, энергия и импульс фотона

Фотон обладает энергией

$$W = h\nu = hc/\lambda.$$

Фотон обладает инертной массой:

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$$

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

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

Подставим это значение скорости в выражение:

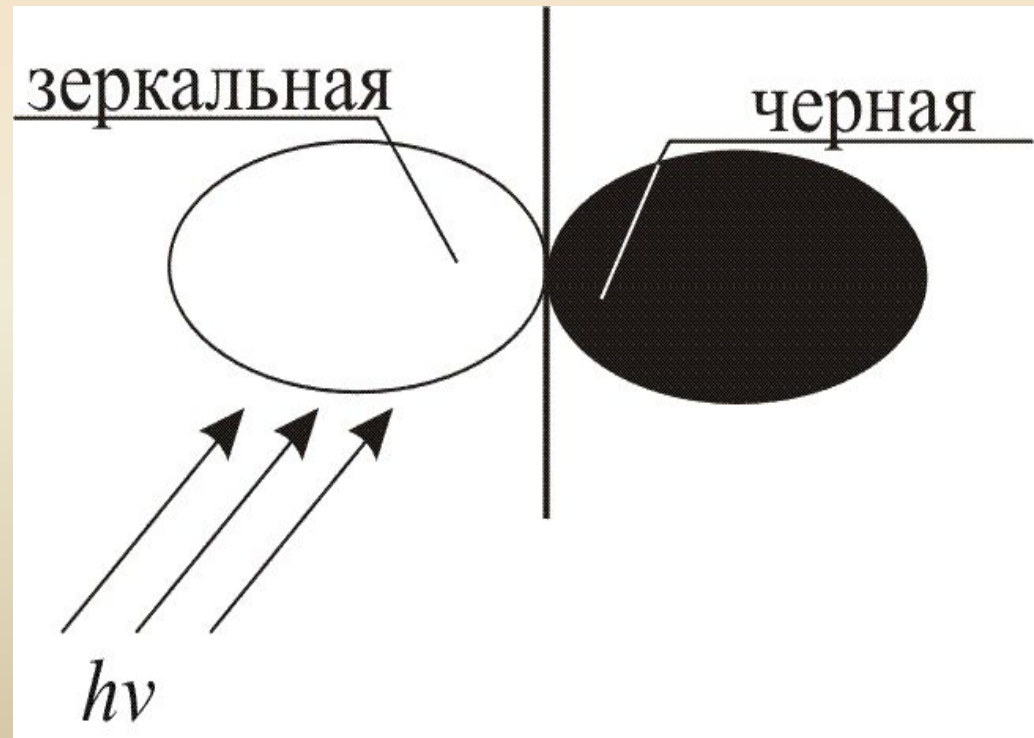
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - 1}} = \frac{m_0}{0} \rightarrow \infty.$$

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

8. 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.



Световое давление может быть найдено по формуле:

$$P = E_e \frac{(1 + \rho)}{c}$$

E_e – энергетическая освещенность, c -скорость света в вакууме, ρ - коэффициент отражения

• если тело *зеркально отражает*, то $\rho = 1$ $P = E_e \frac{2\rho}{c}$

и
• если *полностью поглощает*

(абсолютно черное тело) $\rho = 0$ $E_e \frac{\rho}{c}$

и

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:

Эксперименты прекрасно подтверждают этот вывод:

$$P = E_e \frac{(1 + \rho)}{c}$$

В 1924 г. Луи де Бройль выдвинул смелую гипотезу, что дуализм не является особенностью только оптических явлений, а имеет универсальный характер:

частицы вещества также обладают волновыми свойствами.

Допуская, что частицы вещества наряду с корпускулярными свойствами имеют также и волновые, де Бройль перенес на случай частиц вещества те же правила перехода от одной картины к другой, какие справедливы в случае света.

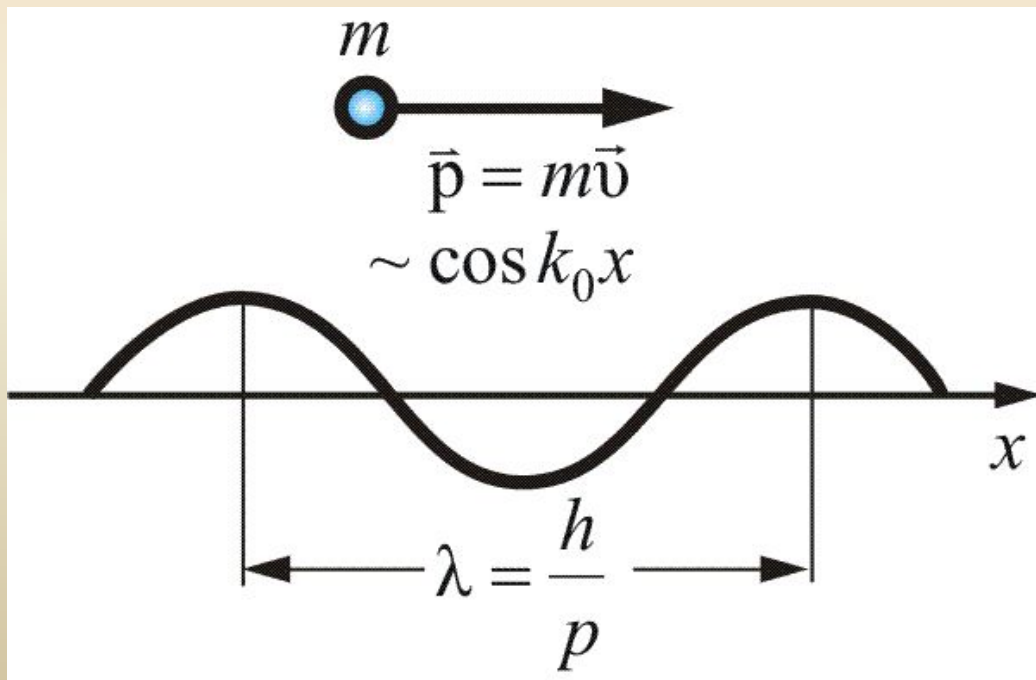


Луи де Бройль (1892 – 1987), французский физик, удостоенный Нобелевской премии 1929 г. по физике за открытие волновой природы электрона.

Предположил, что поток материальных частиц должен обладать и волновыми свойствами, связанными с их массой и энергией (волны де Бройля).

Экспериментальное подтверждение этой идеи было получено в 1927 в опытах по дифракции электронов в кристаллах.

Если фотон обладает энергией $E=h\nu$ и импульсом $p=h/\lambda$, то и частица (например, электрон), движущаяся с некоторой скоростью, обладает волновыми свойствами, т.е. **движение частицы можно рассматривать как движение волны.**



$$p = h/\lambda$$

Согласно квантовой механике, свободное движение **частицы** с массой m и импульсом $p = mv$ можно представить как **плоскую монохроматическую волну**

Ψ_0
с длиной волны

$$\lambda = h/p$$

$$\Psi_0 \sim \cos(kx) \quad - \text{ волна де Бройля}$$

где k – **волновое число**,

волновой вектор:
$$\mathbf{k} = \frac{2\pi}{h} \mathbf{p}$$

- направлен в сторону распространения волны, или вдоль движения частицы.

Физический смысл волн де Бройля

Идея де Бройля о наличии у частиц вещества волновых свойств получила экспериментальное подтверждение.

Обнаружить волновые свойства у макроскопических тел не представляется возможным из-за присущей им малой длины волны.

Волны, связанные с движущимися частицами, не имеют никакого отношения к распространению какого-либо электромагнитного поля, к электромагнитным волнам.

Интенсивность дебройлевской волны оказывается большей там, где имеется большее число частиц.

Другими словами, интенсивность волн де Бройля в данной области пространства определяет число частиц, попавших в эту область. В этом заключается статистическое, вероятностное толкование волн, связанных с движущимися частицами.

Квадрат амплитуды дебройлевской волны в данной точке пространства является мерой вероятности того, что частица находится в этой области.

Квантовая механика устранила абсолютную грань между волной и частицей.

Основным положением квантовой механики, описывающей поведение микрообъектов, является корпускулярно-волновой дуализм, т.е. двойственная природа микрочастиц.

3. Корпускулярно- волновой дуализм микрочастиц вещества

Микрочастицы – это элементарные частицы (электроны, протоны, нейтроны и т.д.), а также сложные частицы, образованные из небольшого числа элементарных (пока *неделимых*) частиц (атомы, молекулы, ядра атомов).

Микрочастицы обладают необычайными свойствами

Называя эти микрочастицы частицами, мы подчеркиваем только одну сторону, правильнее было бы назвать «**частица – волна**».

Определим дебройлевскую длину волны электрона, ускоренного разностью потенциалов 100 В.

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

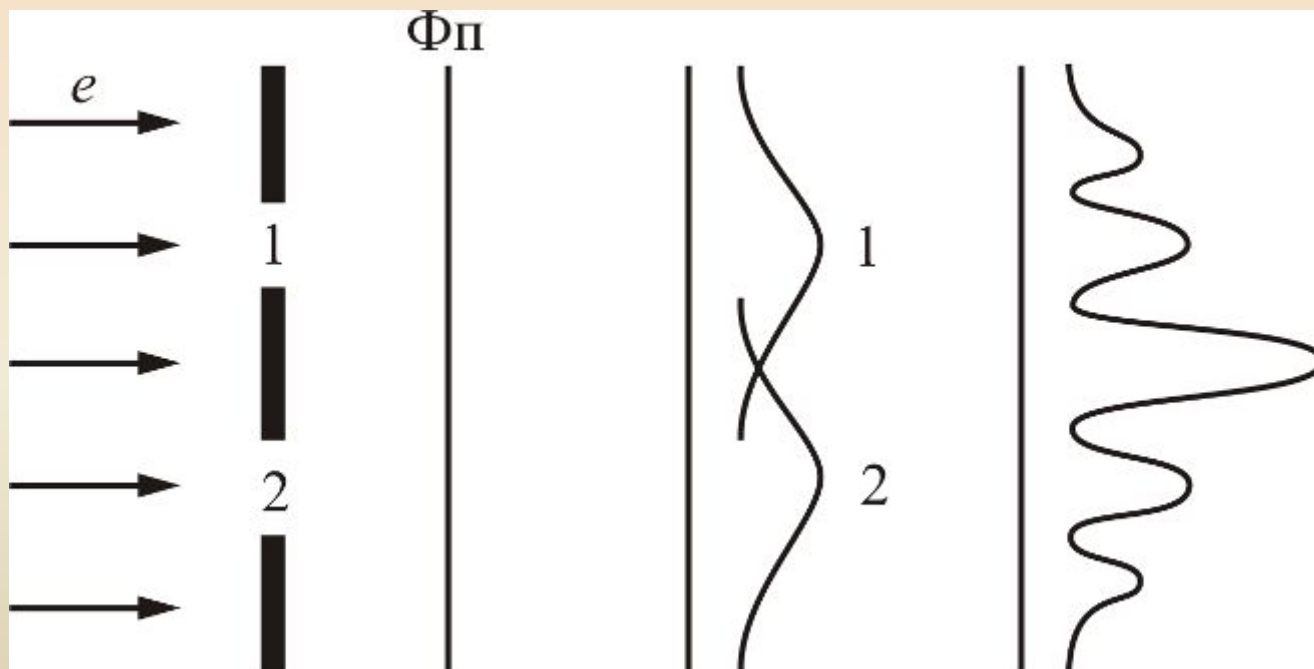
$$\frac{1}{2}mv^2 = eU \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = 5,9 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 5,9 \cdot 10^6} = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

Электрон может соответствовать длине волны 10^{-10} м.

Это очень короткие волны, но их можно обнаружить экспериментально: межатомные расстояния в кристалле того же порядка величины (10^{-10} м) и регулярно расположенные атомы кристалла можно использовать в качестве дифракционной решетки, как в случае рентгеновского излучения.

Направим на преграду с двумя узкими щелями параллельный пучок моноэнергетических (т.е. обладающих одинаковой кинетической энергией) электронов за преградой поставим фотопластинку ФП.



а

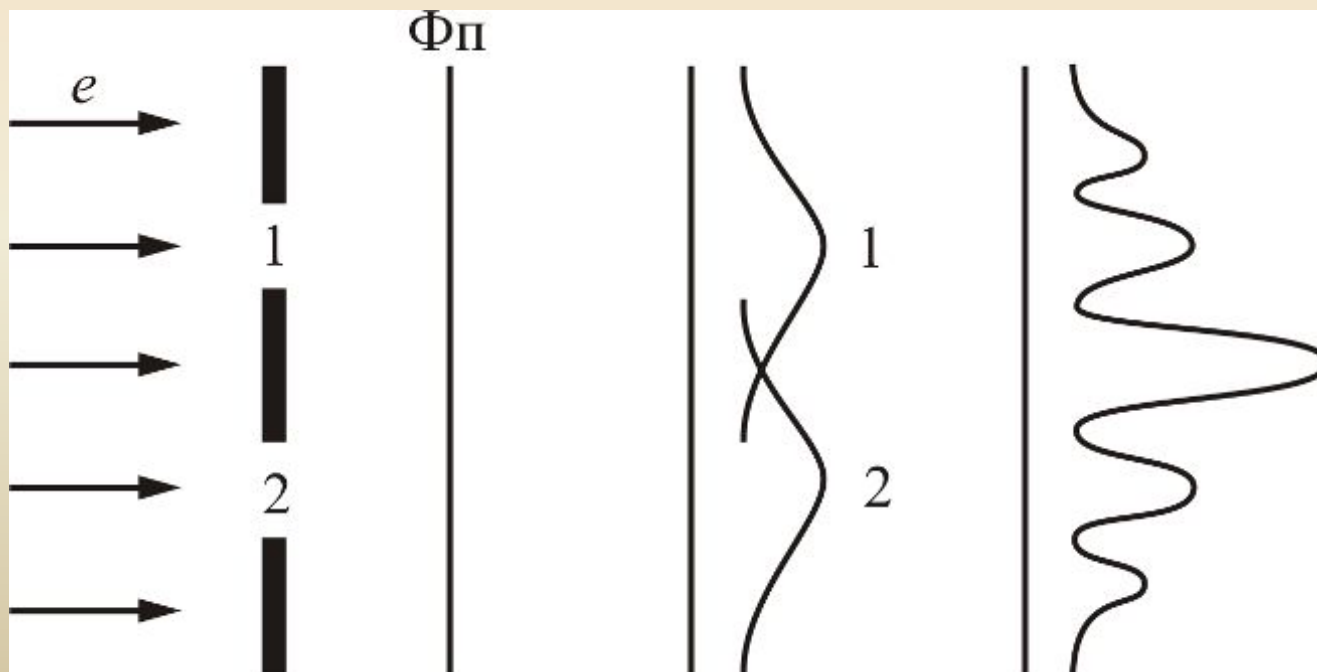
б

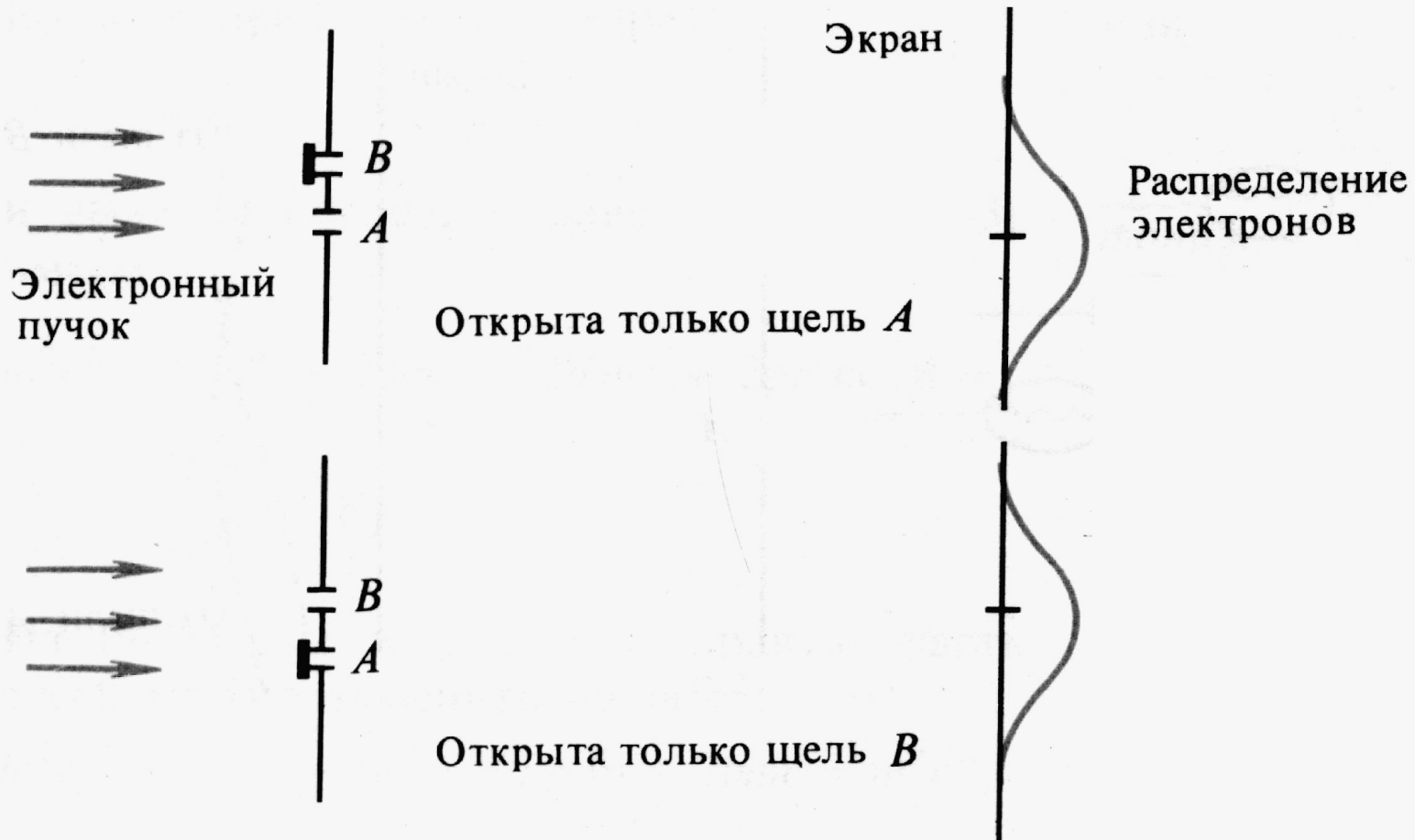
в

В начале закроем вторую щель и произведем экспонирование в течение времени t . Почернение на обработанной Фп будет характеризоваться кривой 1 на рисунке б.

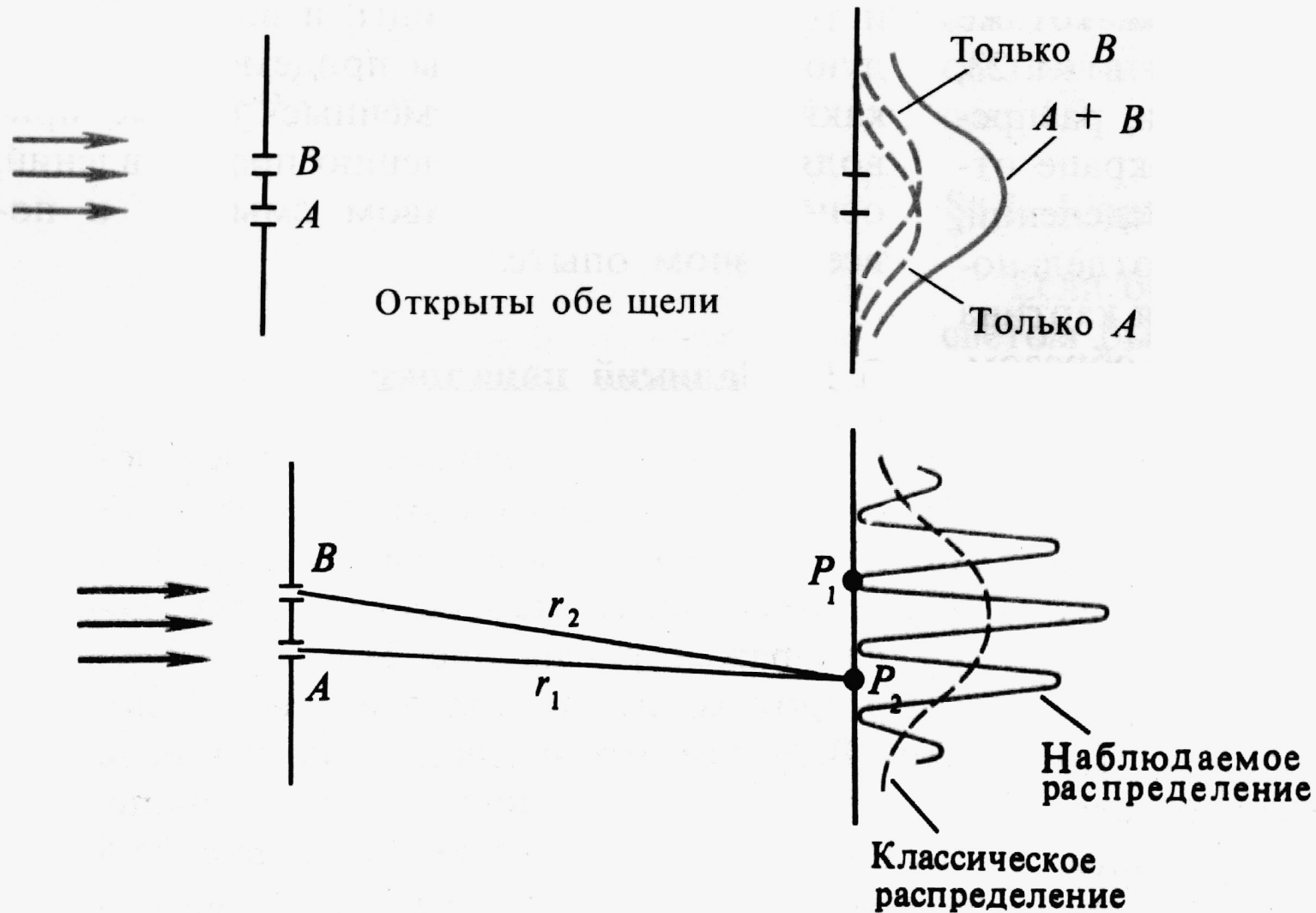
Затем закроем первую щель и произведем экспонирование второй фотопластины. Характер почернения передается в этом случае кривой 2 на рисунке б.

Наконец откроем обе щели и подвергнем экспонированию в течение времени t третью пластину.

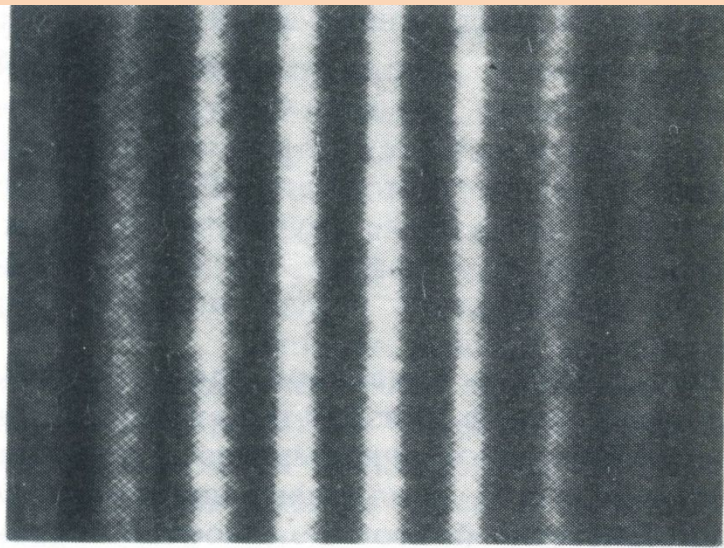




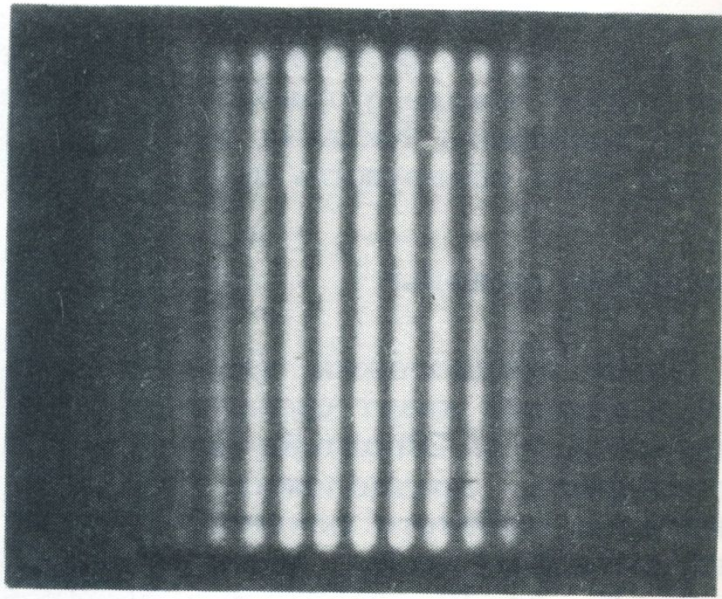
Распределение интенсивности электронов согласно классической физике



Распределение интенсивности электронов согласно квантовой теории



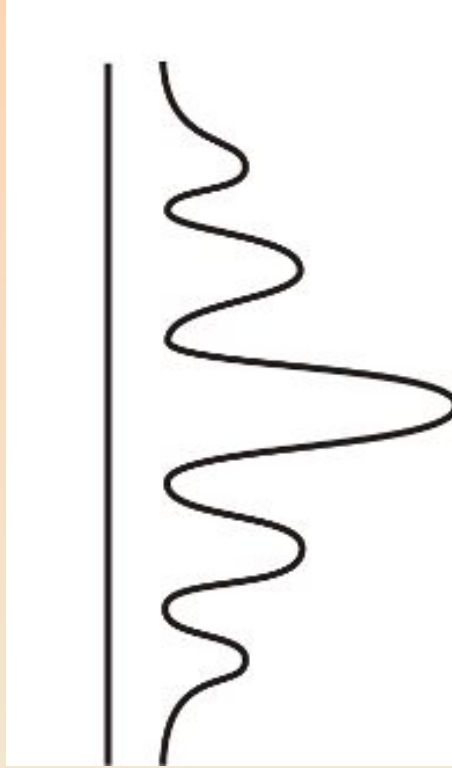
а



б

а – интерференционная картина от двух щелей в случае электронов, каждое из зерен негатива образовано отдельным электроном;

б – интерференционная картина от двух щелей в случае света, на этом фото каждое из зерен негатива образовано отдельным фотоном.



Картина почернения, получающаяся в последнем случае, изображена на рисунке.

Эта картина не эквивалентна положению первых двух. Полученная картина оказывается аналогичной картине, получающейся при интерференции двух когерентных световых волн.

Характер картины свидетельствует о том, что на движение каждого электрона оказывает влияние оба отверстия.

Явление дифракции доказывает, что в прохождении каждого электрона участвуют оба отверстия – и первое, и второе.

Таким образом, дифракция электронов и других микрочастиц доказывает справедливость гипотезы де Бройля и подтверждает корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц вещества.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга

Согласно двойственной корпускулярно-волновой природе частиц вещества, для описания микрочастиц используются то волновые, то корпускулярные представления.

Необходимо внести некоторые ограничения в применении к объектам микромира понятий классической механики.

В классической механике состояние материальной точки (классической частицы) определяется заданием значений координат, импульса, энергии и т.д. перечисленные величины называются динамическими переменными.

Для макрообъектов можно одновременно задать $r(t)$ и $P(t)$

Микрообъекту не могут быть приписаны указанные динамические переменные.

Для микрочастиц нельзя одновременно
знать x и P

Корпускулярно-волновая двойственность свойств частиц, изучаемых в квантовой механике, приводит к тому, что оказывается невозможным одновременно характеризовать частицу ее положением в пространстве (координатами) и скоростью (или импульсом).

Так, например, электрон (и любая другая микрочастица) не может иметь одновременно точных значений координаты x и импульса p_x .

Неопределенности значений x и p_x удовлетворяют соотношению

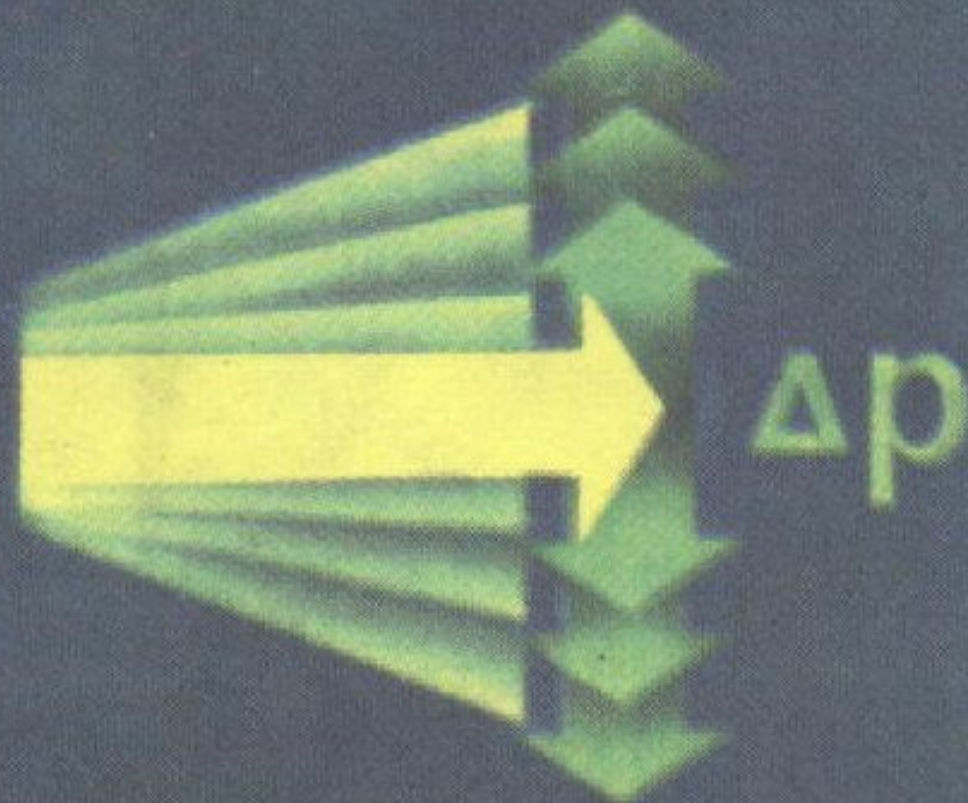
$$\Delta x \Delta p_x \geq h$$

где h – постоянная Планка.

Из формулы следует, что чем меньше неопределенность одной величины (x или p_x), тем больше неопределенность другой. Если $\Delta x=0$, то $\Delta p \rightarrow \infty$.

Для микрочастицы не существует состояний, в которых ее координаты и импульс имели бы одновременно точные значения.

Отсюда вытекает и фактическая **невозможность одновременного с любой наперед заданной точностью изменить координату и импульс микрообъекта.**



Энергия и время являются канонически сопряженными величинами. Поэтому для них также справедливо соотношение неопределенностей

$$\Delta E \Delta t \geq h$$

это соотношение означает, что определение энергии с точностью ΔE должно занять интервал времени, равный, по меньшей мере

$$\Delta t \sim \frac{h}{\Delta E}$$

Соотношение неопределенностей получено при одновременном использовании классических характеристик движения частицы (координаты, импульса) и наличии у нее волновых свойств.

Соотношение неопределенностей является квантовым ограничением применимости классической механики к микрообъектам.

Соотношение неопределенностей указывает, **в какой мере**, возможно, пользоваться понятиями классической механики применительно к **микрочастицам**, в частности, с какой степенью точности можно говорить о траекториях микрочастиц.

Движение по траектории характеризуется вполне определенными значениями координат и скорости в каждый момент времени.

Подставив в (1) вместо p_x произведение mv_y , получим соотношение

$$\Delta x \Delta v_x \geq h / m$$

Чем **больше масса** частицы, тем **меньше неопределенность ее координаты и скорости**, следовательно, с тем **большой точностью** можно применять к этой частице **понятие траектории**.

Для пылинки массой 10^{-12} кг и линейными размерами 10^{-6} м, координата которой определена с точностью до 0,01 ее размеров ($\Delta x = 10^{-8}$ м), неопределенность скорости

$$\Delta v_x = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{10^{-8} \cdot 10^{-12}} \text{ м/с} = 6,62 \cdot 10^{-14} \text{ м/с},$$

$$\Delta v_x = 6,62 \cdot 10^{-14} \text{ м/с},$$

Для макроскопических тел их волновые свойства не играют ни какой роли; координаты и скорости могут быть измерены достаточно точно.

Это означает, что для описания движения макротел с абсолютной достоверностью можно пользоваться законами классической механики.

Пучок электронов движется вдоль оси x со скоростью $u=10^8$ м/с, определяемой с точностью до 0,01% ($\Delta u_x \approx 10^4$ м/с). Точность определения координаты электрона равна:

$$\Delta x = \frac{h}{m\Delta v_x} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 10^4} = 7,27 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Положение электрона может быть определено с точностью до тысячных долей миллиметра.

Такая точность достаточна, чтобы можно было говорить о движении электронов по определенной траектории, иными словами, описывать их движения законами классической механики.

Применим соотношение неопределенностей к электрону, двигающемуся в атоме водорода.

Допустим, что неопределенность координаты электрона $\Delta x \approx 10^{-10}$ м (порядка размеров самого атома), тогда

$$\Delta v = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-10}} = 7,27 \cdot 10^7 \text{ м/с}$$

Так как скорость электрона вокруг ядра по круговой орбите радиуса $0,5 \cdot 10^{-10}$ м равна $v \approx 2,3 \cdot 10^6$ м/с, то очевидно, что **в данном случае нельзя говорить о движении электронов в атоме по определенной траектории, иными словами, для описания движения электронов в атоме нельзя пользоваться законами классической физики.**

Понятие о волновой функции

Экспериментальное подтверждение идеи де Бройля, ограниченность применения классической механики к микрообъектам, а также противоречия ряда экспериментов привели к созданию квантовой механики, описывающей законы движения и взаимодействия микрочастиц с учетом их волновых свойств.

Ее создание и развитие охватывает период с 1900 г. до 20-х годов XX века и связано, прежде всего, с работами австрийского физика Э. Шредингера, немецкого физика В. Гейзенберга и английского физика П. Дирака.