

ЛЕКЦИЯ 4

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Гипотеза де Бройля. Дифракция электронов.
2. Микрочастица в двухщелевом интерферометре.
3. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.

Недостатки и противоречия теории Бора указывали на необходимость пересмотра представлений о природе микрочастиц. Вопрос №1: *насколько общими являются представления о микрочастице как малой механической частице, которая характеризуется определенными координатами и определенной скоростью.*

Из анализа накопленных знаний о природе света: существуют физические явления, в которых свет проявляет свойства, свидетельствующие о его волновой природе (*интерференция, дифракция*).

В то же время имеются и другие явления, в которых обнаруживается корпускулярная природа света (*фотоэффект, эффект Комптона*).

В оптических явлениях обнаруживается своеобразный дуализм.

ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ.

В 1924 году французский физик де Бройль высказал гипотезу:

установленный ранее для квантов свете – фотонов корпускулярно-волновой дуализм присущ и всем частицам вещества – электронам, протонам, атомам и т.д., причем количественные соотношения между волновыми и корпускулярными характеристиками свободных частиц те же, что и для фотонов.

Таким образом, если частица имеет корпускулярные характеристики: *энергию W* и *импульс*, модуль которого равен p , то соответствующие волновые характеристики частицы – *частота и длина волны* связаны с корпускулярными соотношениями:

$$\omega = \frac{W}{\hbar} \quad \lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}$$

Волны, которые ассоциируются со свободно движущимися частицами, получили название *волн де Бройля*.

ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ.

Для частиц не очень высокой энергии ($v \ll c$) $p = mv$ и $\lambda = \frac{h}{mv}$, где m и v – масса и скорость частицы.

Следовательно, длина волны де Бройля тем меньше, чем больше масса частицы и ее скорость.

Пример: частице с массой в 1 г, движущейся со скоростью 1 м/с, соответствует волна де Бройля с длиной 10^{-30} м, что лежит за пределами области, доступной для наблюдения.

Поэтому волновые свойства частицы несущественны и никак не проявляются в механике макроскопических тел.

Для электронов же с энергиями от 10 эВ до 10^4 эВ длины волн де Бройля лежат в интервале $\approx (0,1 - 10) \cdot 10^{-10}$ м, что соответствует диапазону длин волн рентгеновского излучения.

Поэтому волновые свойства таких электронов должны проявляться, например, при их рассеянии на кристаллах, на которых наблюдается дифракция рентгеновских лучей.

ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ.

Первое экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля было получено в 1927 году в опытах К.Девиссона и Л.Джермера (американские физики).

Пучок электронов ускорялся до энергии 100 – 150 эВ (что соответствует длине волны $\approx 10^{-10}$ м) и падал на кристалл никеля, играющий роль пространственной дифракционной решетки.

Было установлено, что электроны дифрагируют на кристалле, причем так, как должно быть для волн, длина которых определяется соотношением де Бройля.

В этом же году английский физик Томсон и независимо от него советский физик Тартаковский получили дифракционную картину при прохождении электронного пучка через металлическую фольгу.

Пучок электронов, ускоренный до энергии порядка нескольких десятков кэВ, проходил через металлическую фольгу толщиной порядка 1 мкм и попадал на фотопластинку.

ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ.

Электрон при ударе о фотопластинку действует на нее как и фотон.

Полученная электронограмма золота полностью совпадала с полученной в аналогичных условиях рентгенограммой золота.

В предыдущих экспериментах дифракционная картина исследовалась для потока электронов.

Необходимо было доказать что волновые свойства присущи не и каждому электрону в отдельности.

Опыты советского физика В.А.Фабриканта (1948 год):

эксперименты со слабым электронным пучком. Каждый электрон проходил через прибор независимо от других (промежуток времени между двумя электронами был в 10^4 раз больше времени прохождения электроном прибора).

Возникающая при длительной экспозиции дифракционная картина не отличалась от картин, полученных при короткой экспозиции для интенсивного потока электронов.

Дифракционные явления обнаружили также для нейтронов, протонов, атомных и молекулярных пучков. Это окончательно доказывало наличие волновых свойств у микрочастиц.

МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Микрочастицами называют элементарные частицы (электроны, протоны, нейтроны, фотоны и т.д.), а также сложные частицы, образованные из сравнительно небольшого числа элементарных частиц (ядра атомов, атомы, молекулы и т.д.)

При изучении свойств микрочастиц возникает серьезная трудность – отсутствие наглядности.

Микрообъект не может действовать на органы чувств: его нельзя видеть, осязать. Поэтому при изучении квантовой физики невозможно составить наглядный образ объекта или процесса. (*)

Всякая наглядная модель неизбежно будет действовать по классическим законам, следующим из нашего непосредственного опыта и обыденной интуиции.

Микротела сочетают в себе свойства частицы и волны, поэтому не ведут себя ни как волна, ни как частица.

Микрочастицы не обладают одновременно определенными значениями координаты и импульса, понятие траектории применительно к ним теряет смысл.

МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Для того чтобы понять своеобразие поведения микрочастицы со столь необычными свойствами, можно попытаться провести «мысленный эксперимент» о прохождении электрона через двухщелевой интерферометр.

В классическом виде такой эксперимент описал Р.Фейнман.

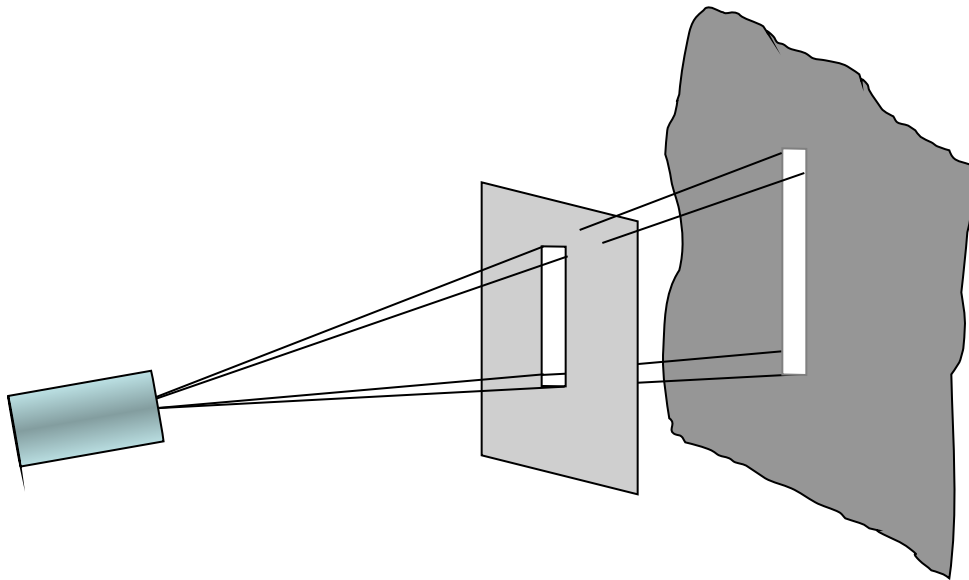
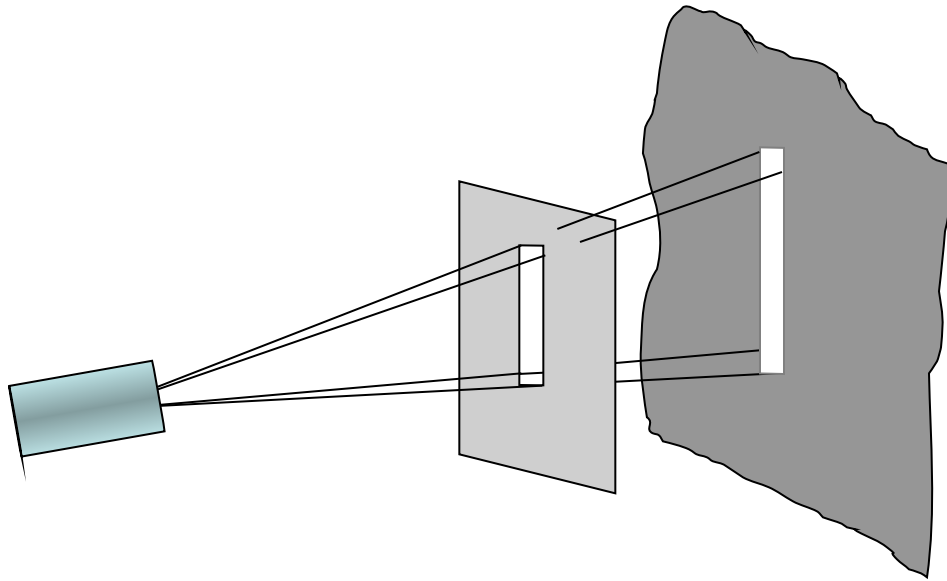


Схема эксперимента.

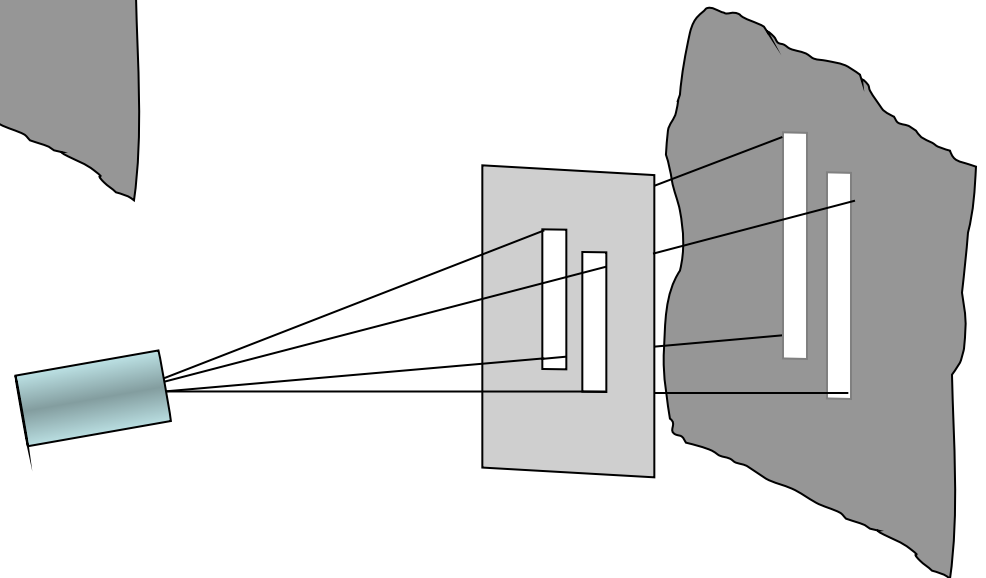
1. Пескоструйный аппарат, грязная стена, одна щель на пути прямолинейно летящих песчинок.

МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ



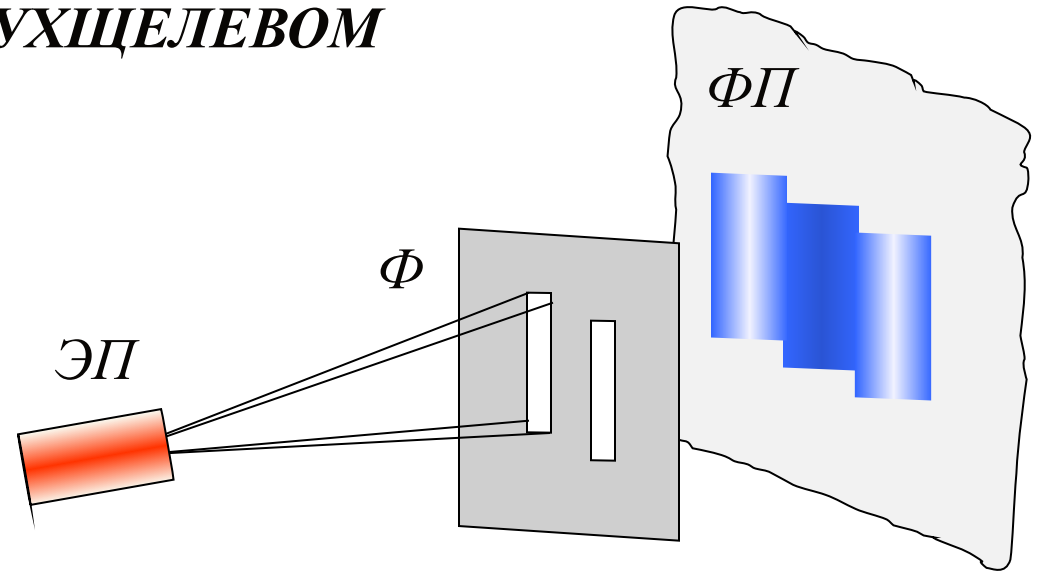
На стене будут две светлые полосы независимо от того, будут открыты обе прорези одновременно или сначала одна, а потом другая.

2. Пескоструйный аппарат, грязная стена, две щели на пути прямолинейно летящих песчинок.

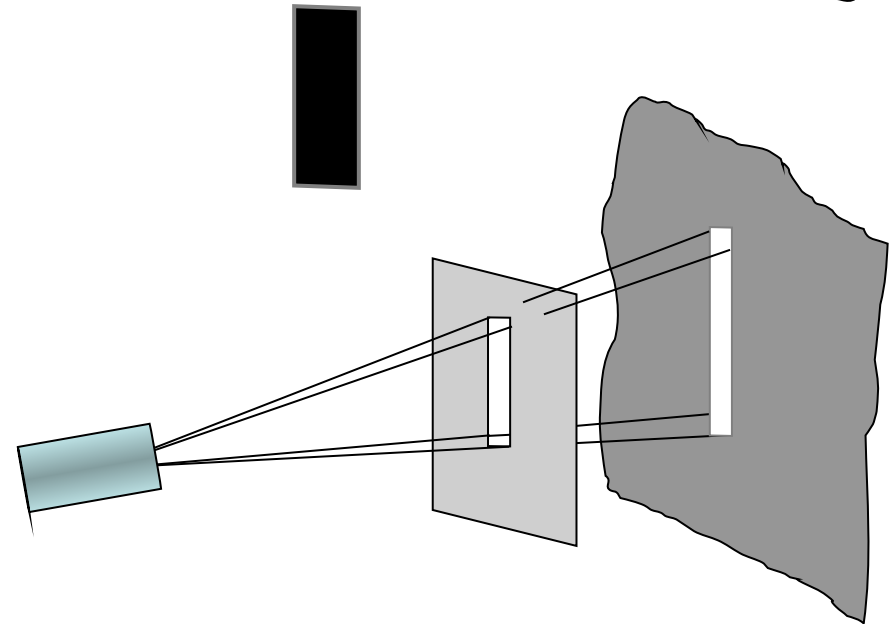


МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

3. Пескоструйный аппарат заменим электронной пушкой ЭП, которая выстреливает электроны с одной и той же скоростью в одном и том же направлении.



Вместо железного листа с прорезями используем тонкую фольгу Φ с двумя узкими «щелями», вместо стены — фотопластинку $\Phi\Pi$. Закроем одну щель, включим пушку.



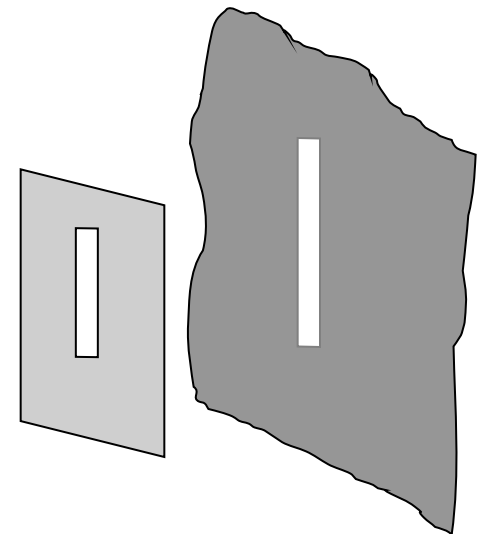
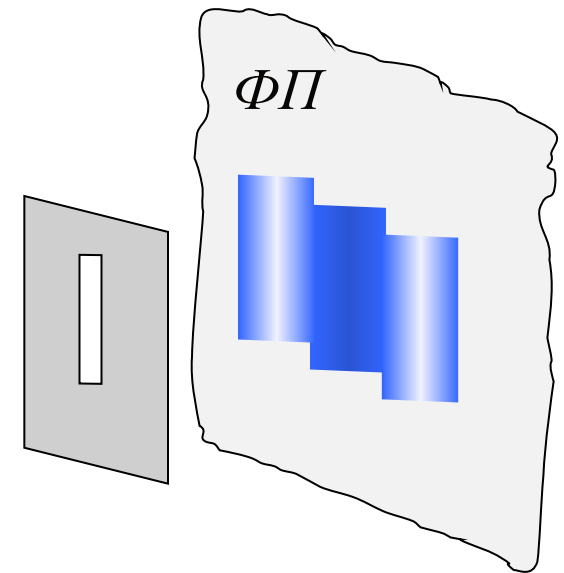
МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Картинка на фотопластинке резко отличается от картинке, полученной пескоструйным аппаратом на стене.

Электроны попадают на фотопластинку не только в место, расположенное против открытой «щели», но и на некотором расстоянии от нее по бокам.

Кажется, что часть электронов при прохождении через «щель» отклоняется от прямолинейной траектории на строго определенные углы.

Для того чтобы убедиться, что получающаяся картина не связана с потоком электронов, нужно провести опыт, подобный опыту физика В.А. Фабриканта



МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

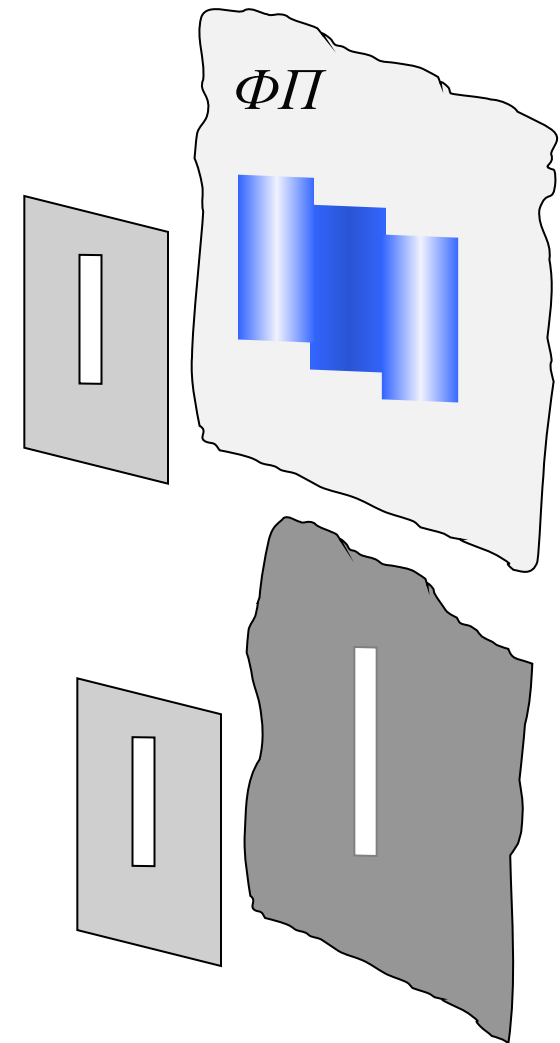
Необходимо снизить частоту выстрелов из электронной пушки настолько, чтобы электроны вылетали из нее поодиночке.

При этом пластинку нужно облучать столько времени, чтобы общее число попавших на нее электронов осталось таким же, как в первом случае.

Результат такого опыта — картина на фотопластинке в точности повторится.

Иначе, несмотря на то, что электроны вылетают из пушки с одной и той же скоростью в одном и том же направлении, ни один вылетевший электрон не имеет определенной траектории.

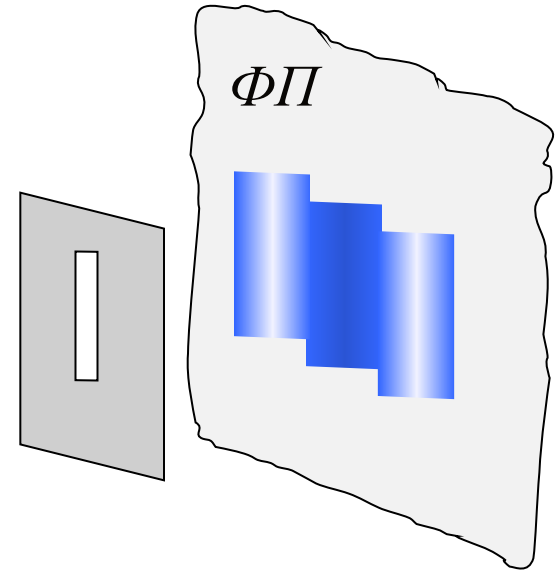
Каждый из них может попасть в любую точку затемненной области фотопластинки.



МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

С позиций классических представлений в этом видна явная неопределенность в движении электрона.

Но: электроны попадают только в затемненную область, и ни один электрон не может попасть в незатемненную область. А это уже закономерность движения электрона.



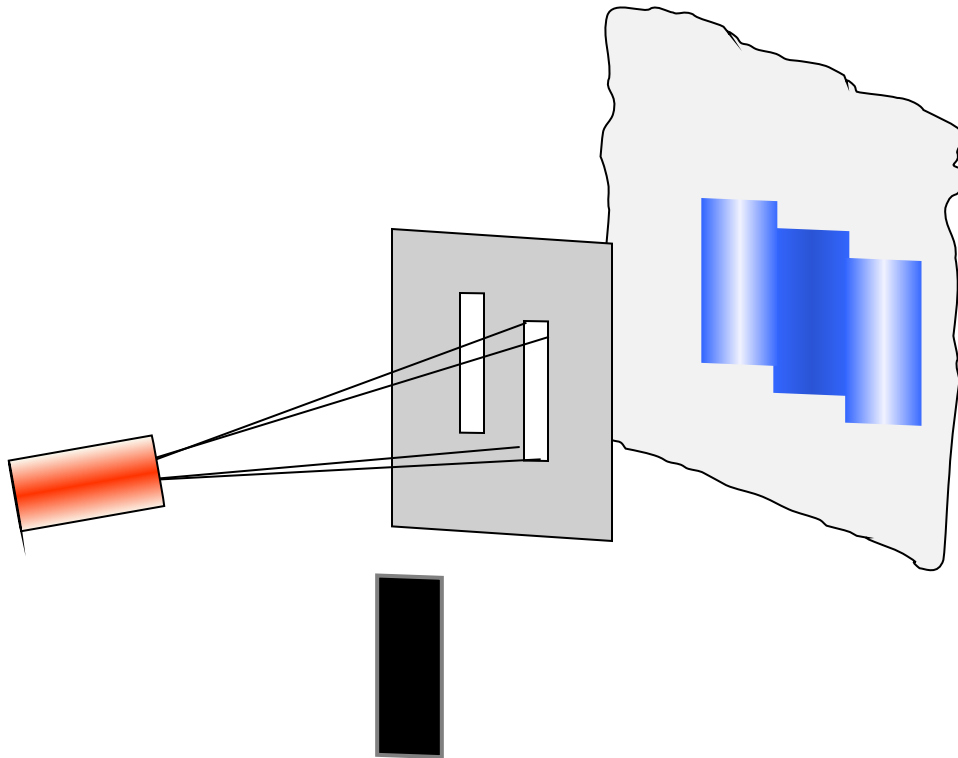
Электрон движется так, что его координаты на пластинке можно указать не однозначно, а только с *некоторой вероятностью*.

Вероятность попадания электрона в темные места на фотопластинке велика, в более светлые мала, в светлые – равна нулю.

Важно: сколько бы раз не проводился эксперимент, результат будет всегда получаться один и тот же

МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

4. Продолжим опыт, открыв ранее закрытую «щель» и закрыв первую.



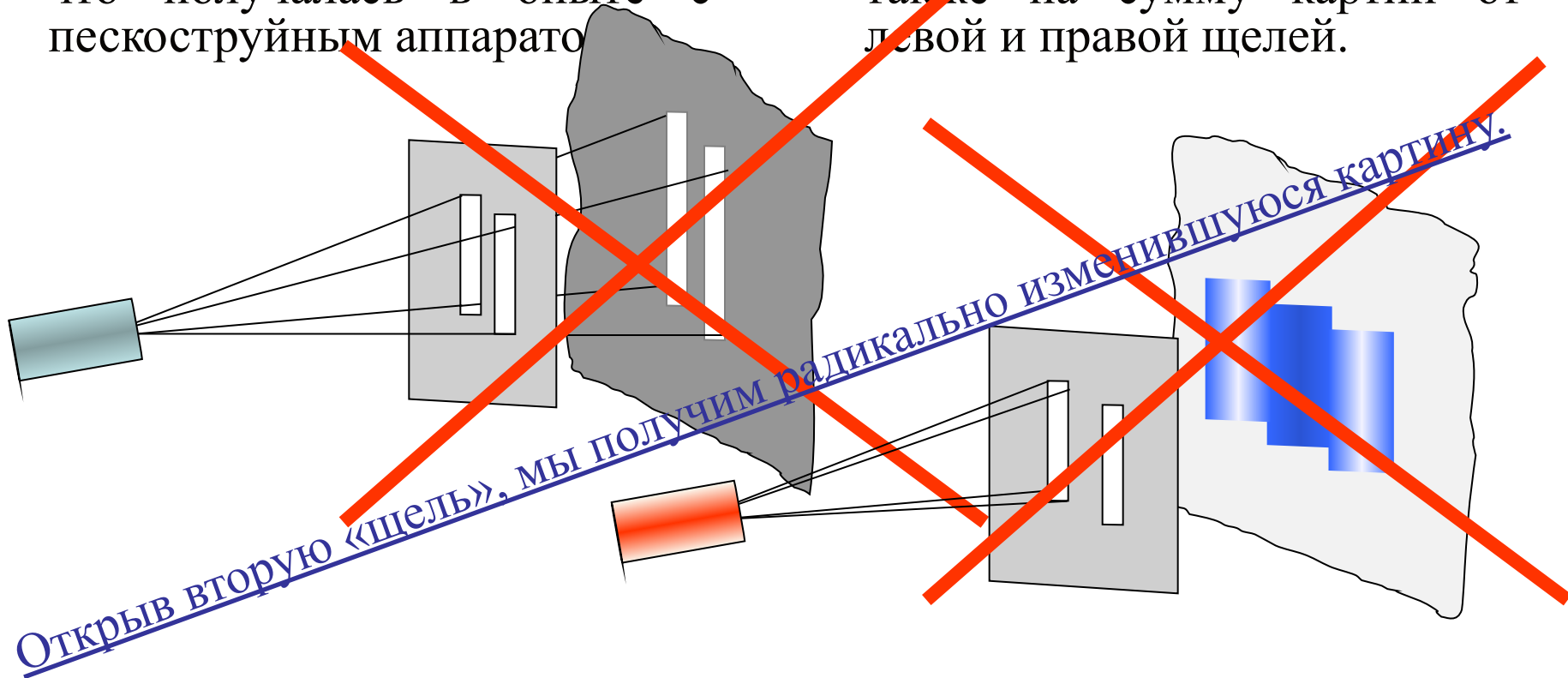
Сместится лишь центр
картины, установившись
напротив открытой
«щели».

МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

5. Откроем обе «щели». **Что будет?**

Очевидно, нельзя ожидать, что картина будет похожа на ту, что получалась в опыте с пескоструйным аппаратом

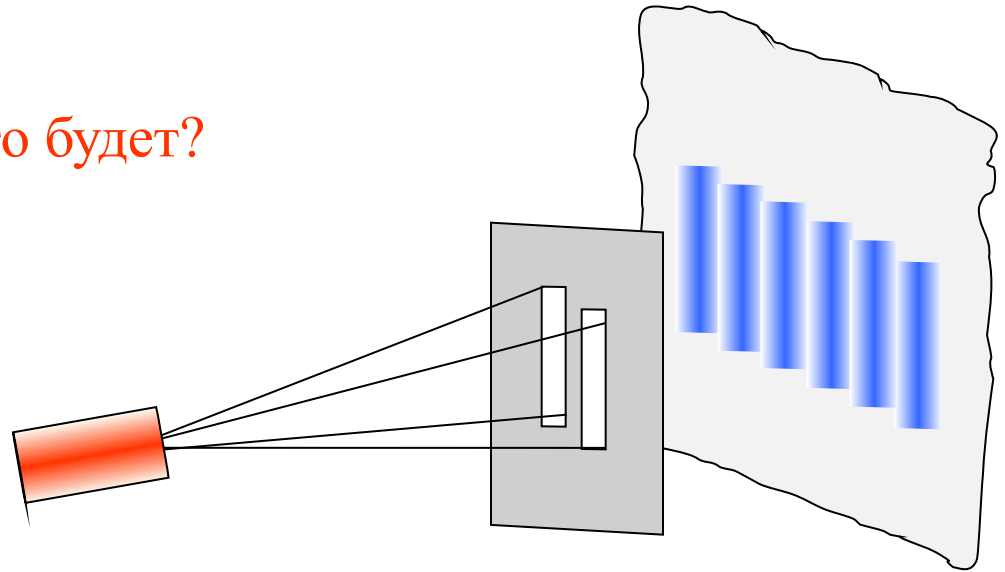
Однако она не будет похожа и на картину от одной щели, а также на сумму картин от левой и правой щелей.



МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

5. Откроем обе «щели». **Что будет?**

И эта новая картина вновь повторится, если заставить электроны вылетать из пушки поодиночке.



Таким образом, и в этом случае каждый электрон движется вполне закономерно, сохраняя при этом неопределенность в движении.

Неопределенность проявляется в том, что нельзя предсказать, в какое конкретно место попадет конкретный электрон.

Кроме того, нельзя предсказать, через какую именно «щель» пролетит конкретный электрон.

Поскольку картина получается характерной именно для двух «щелей», следовательно, каждый электрон движется так, как будто он *одновременно проходит через обе «щели»*.

МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Изображения на фотопластинке напоминают дифракционные картинку для света.

Расчет показывает, что от пучка электронов, имеющих скорость v (импульс $p = m_0 v$), получается такая же дифракционная картина, как и от монохроматического излучения с длиной волны

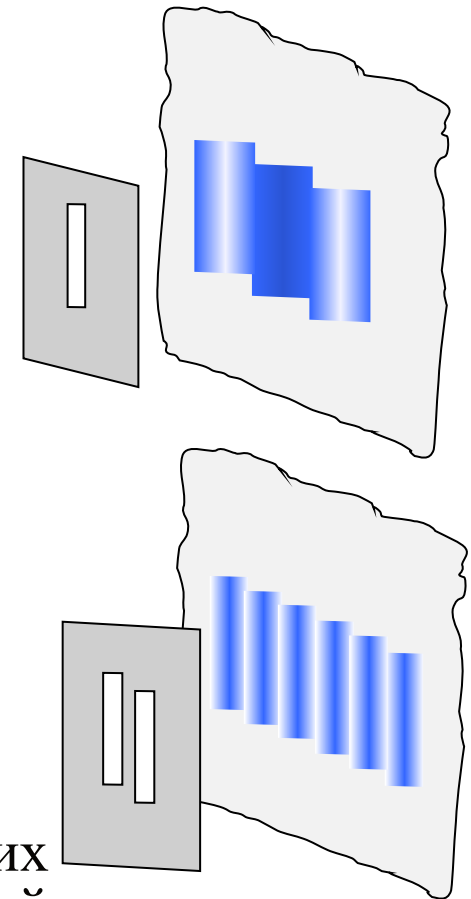
$$\lambda = 2\pi\hbar / p$$

Таким образом, движение электронов носит волновой характер.

Дифракция наблюдается, когда ширина щели соизмерима с λ .

Следовательно, ширина «щели» в наших экспериментах должна быть соизмерима с длиной волны де Бройля, т.е. быть порядка 10^{-10} м.

Смысл проведенного «мысленного эксперимента» –повысить «наглядность» опытов К.Девиссона и Л.Джермера, В.А.Фабриканта и других ученых, исследовавших свойства микрочастиц.



ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В классической механике всякая частица движется по определенной траектории. Ее состояние определяется заданием значений координат, импульса, энергии и т.д.

Микрочастица из-за наличия у нее волновых свойств принципиально отличается от классической частицы.

Одно из основных различий: *нельзя говорить о движении микрочастицы по определенной траектории и невозможно говорить об одновременных точных значениях ее координаты и импульса.*

Так, например, электрон не может иметь одновременно точных значений координаты x и компоненты импульса p_x .

Неопределенности значений x и p_x удовлетворяют соотношению:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$$

Из этого выражения следует, что чем меньше неопределенность одной из переменных (x или p_x), тем больше неопределенность другой.

ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$$

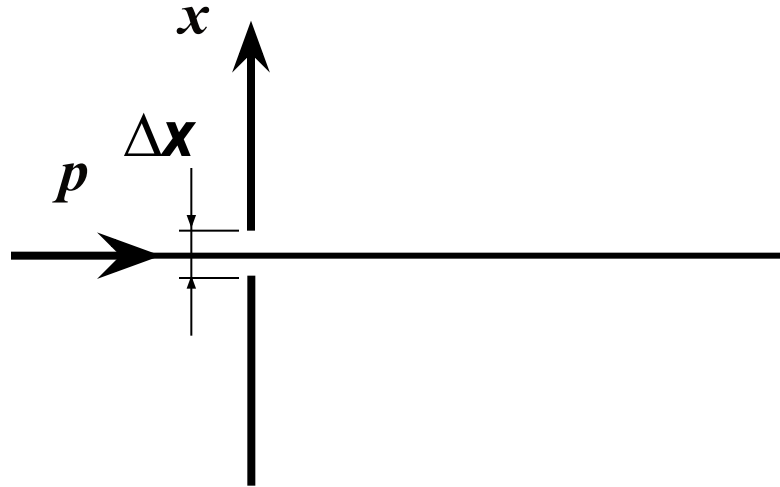
Крайний случай – одна из переменных имеет точное значение, а другая при этом оказывается совершенно неопределенной (ее неопределенность равна бесконечности).

Приведенное соотношение имеет место для ряда других пар величин и называется принципом (соотношением) неопределенности Гейзенберга.

Рассмотрим пример, поясняющий принцип неопределенности.

Определим значение координаты свободно летящей микрочастицы, поставив на ее пути щель шириной Δx , расположенную перпендикулярно к направлению движения частицы

ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ



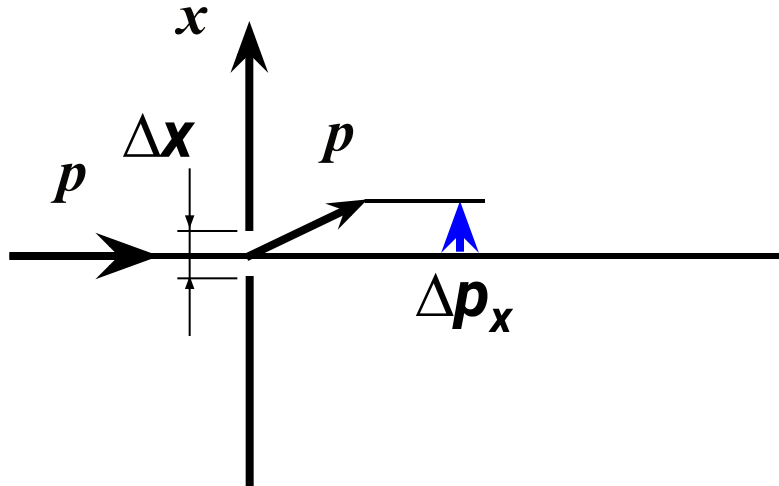
$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar / 2$$

До прохождения частицы через щель:

- составляющая импульса p_x имеет точное значение, равное нулю (щель перпендикулярна к импульсу). Это означает, что $\Delta p_x = 0$.
- координата x частицы является совершенно неопределенной.

ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$$

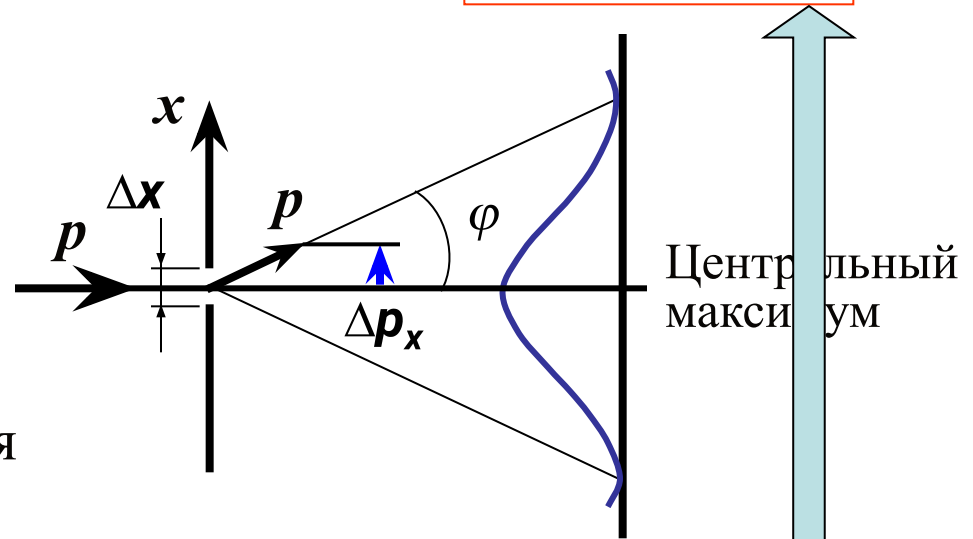


В момент прохождения частицы через щель:

- вместо полной неопределенности координаты x появляется неопределенность Δx ,
- при этом утрачивается определенность значения p_x

ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Из-за дифракции имеется вероятность того, что частица будет двигаться в пределах угла 2φ , (φ - угол, соответствующий границе центрального дифракционного максимума).



Таким образом, появляется неопределенность

$$\Delta p_x = p \sin \varphi$$

Условие первого минимума при дифракции на щели:

$$\sin \varphi = \lambda / \Delta x$$

Следовательно, $\Delta p_x \sim p \frac{\lambda}{\Delta x}$

Поскольку $\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}$, получим $\Delta x \cdot \Delta p_x \sim p\lambda = 2\pi\hbar$.

Это согласуется с принципом неопределенности.

ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Соотношение неопределенностей указывает, в какой мере можно пользоваться понятиями классической механики применительно к микрочастицам.

Например, с какой точностью можно говорить о траекториях микрочастиц.

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

Подставив в формулу $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$ вместо p_x произведение mv_x , получим соотношение

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \geq \hbar/2m$$

Видно, что чем больше масса, тем меньше неопределенности координаты и скорости частицы и, следовательно, тем с большей точностью применимо понятие траектории.

Пример: для макрочастицы с размерами 1 мкм неопределенности значений x и v_x оказываются за пределами точности измерения этих величин.

Это означает, что движение этой макрочастицы будет неотличимо от движения по траектории.