

ЛЕКЦИЯ 12

ПЛАН ЛЕКЦИИ

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

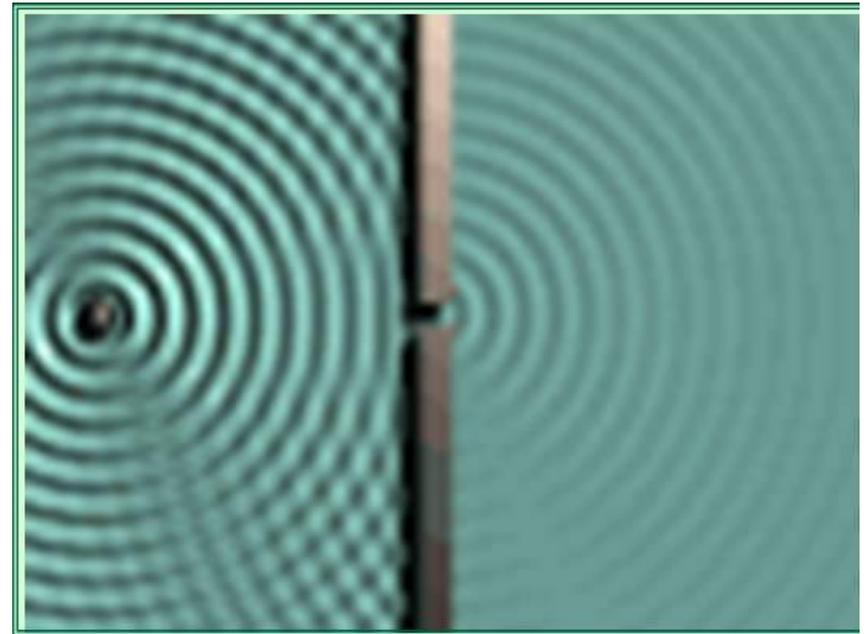
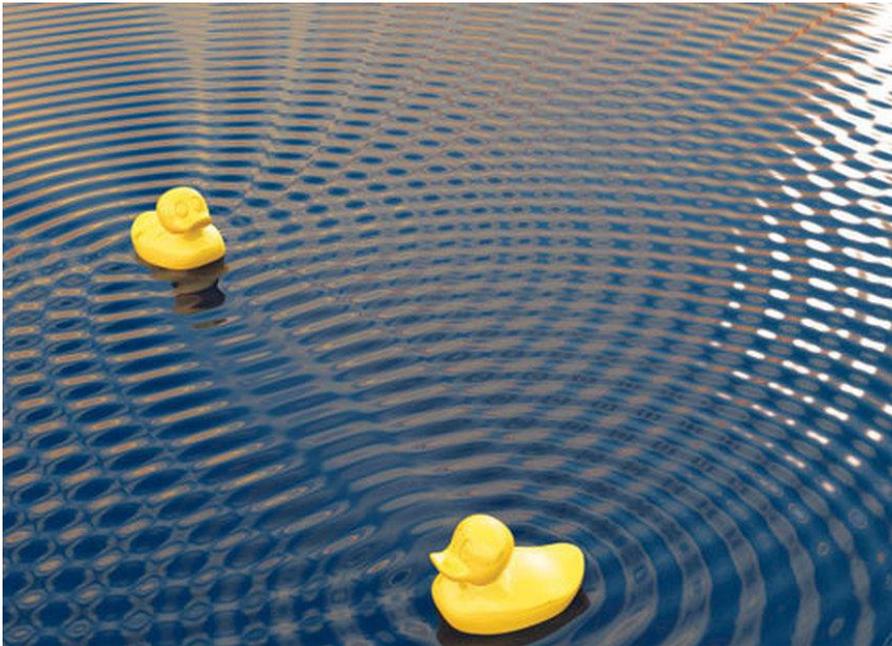
Недостатки и противоречия теории Бора указывали на необходимость пересмотра представлений о природе микрочастиц. Вопрос №1: *насколько общими являются представления о микрочастице как малой механической частице, которая характеризуется определенными координатами и определенной скоростью.*

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.

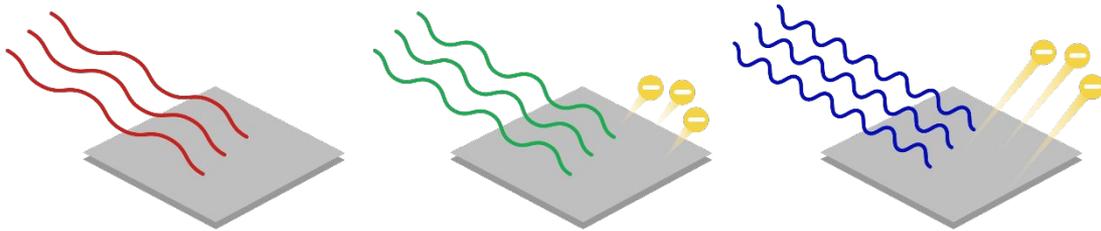
Волновая природа света (*интерференция, дифракция*).



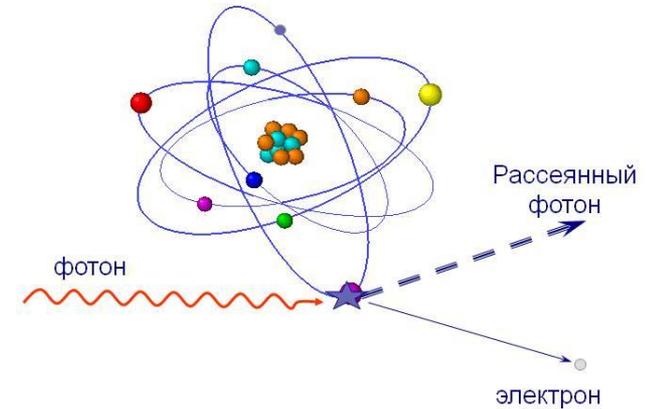
Интерференция волн — взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды двух или нескольких когерентных волн при их наложении друг на друга.

Дифракцией света называется явление отклонения света от прямолинейного направления распространения при прохождении вблизи препятствий.

Корпускулярная природа света (*фотоэффект, эффект Комптона*).



ЭФФЕКТ КОМПТОНА



Фотоэффе́кт или

фотоэлектрический эффект —

процесс взаимодействия света или любого другого электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия фотонов передается электронам вещества

Эффе́кт Ко́мптона (Ко́мптон-эффе́кт, ко́мптоновское рассеяние) — рассеяние фотонов на свободных электронах

ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ.

В 1924 году французский физик де Бройль высказал гипотезу:

установленный ранее для квантов света – 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.



Луи Виктор Пьер Раймон, 7-й герцог Брольи, более известный как **Луи де Бройль** (1892 — 1987) — французский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1929 г. Один из основоположников квантовой механики.

ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ.

Для частиц не очень высокой энергии ($v \ll c$) $p = mv$ и $\lambda = \frac{2\pi\hbar}{mv}$, 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 $\approx (0,1 - 1000) \cdot 10^{-10}$ м, что соответствует диапазону длин волн рентгеновского излучения.

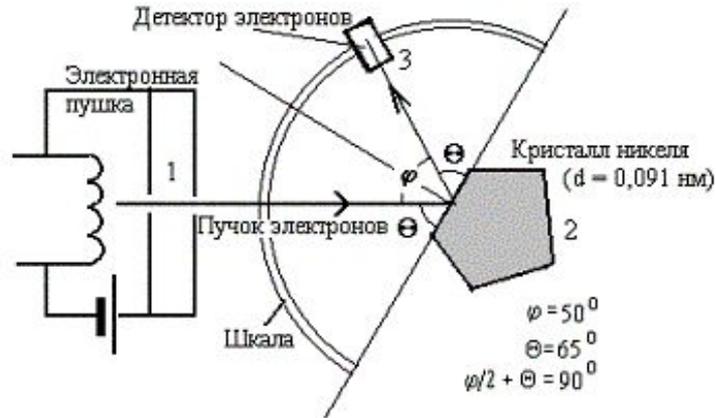
Поэтому волновые свойства таких электронов должны проявляться, например, при их рассеянии на кристаллах, на которых наблюдается дифракция рентгеновских лучей.

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).

Кафедра физики

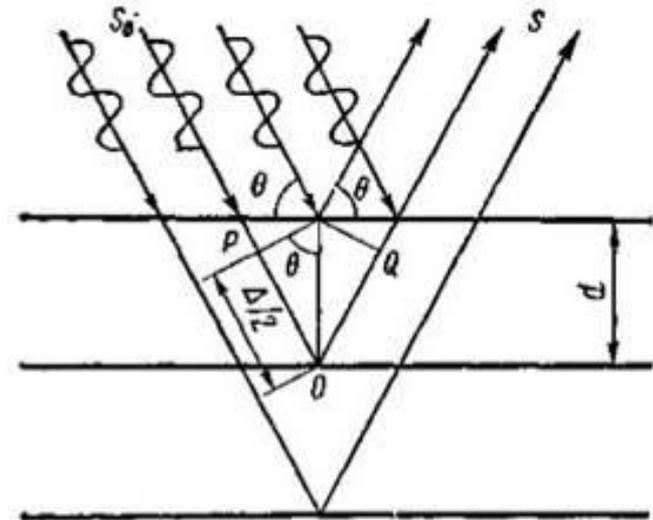


Рентгеновские лучи отражаются от кристалла Ni ($d=0.091\text{нм}$) в соответствии с формулой Вульфа-Брегга: $n\lambda = 2d \sin \theta$

и для $\theta=65^\circ$

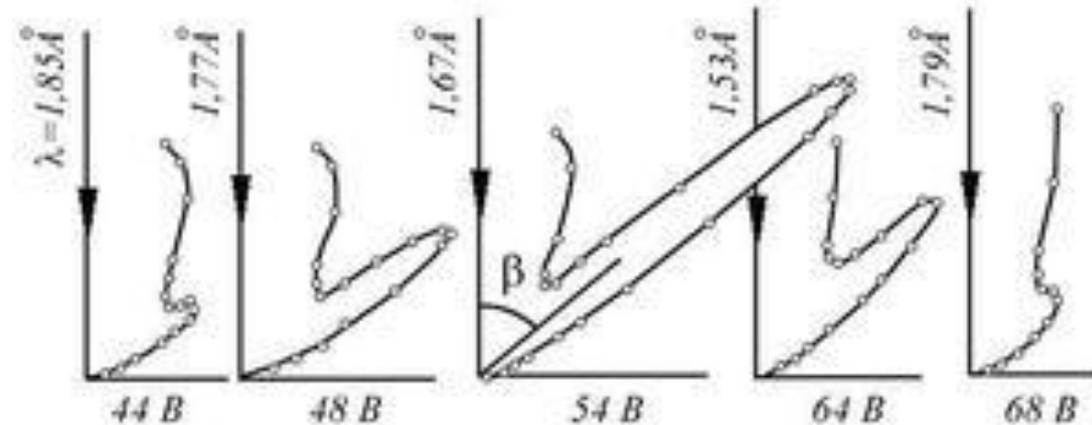
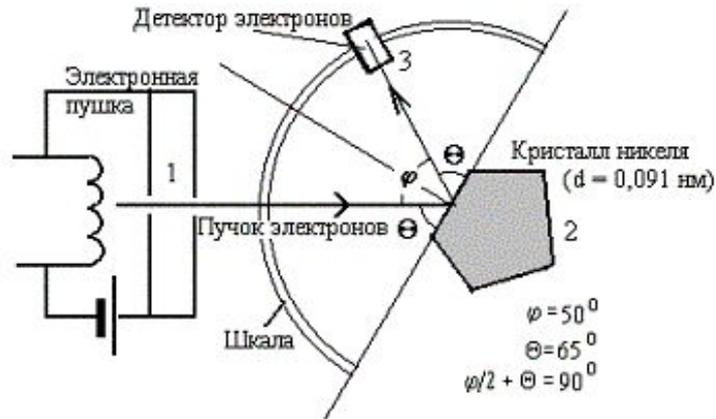
$$\lambda = 0.165 \text{ нм}$$

Дифракционный максимум (отражение) имеет место при таком угле скольжения θ , что разность хода между лучами составляет целое число длин волн: $\Delta=n\lambda$ ($n=1,2,3..$), а из чертежа видно, что $\Delta=2d \sin \theta$



ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ.

Эксперимент К.Девиссона и Л.Джермера



Варьировались скорость электронов и θ . Сила тока в детекторе оказалась максимальной при ускоряющем напряжении 54 В и угле $\theta = 65^\circ$

Длина волны де-Бройля для электрона,

V – ускоряющее напряжение

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \approx \sqrt{\frac{150}{V}} 10^{-10} \text{ м}$$

$$\lambda = 0.167 \text{ нм}$$

ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ.

$$\lambda_n = \frac{1}{n} 2d \sin \Theta$$

Условие Вульфа-Брэгга

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \approx \sqrt{\frac{150}{V}} 10^{-10} \text{ м}$$

Длина волны де-Бройля для электрона,
 V – ускоряющее напряжение

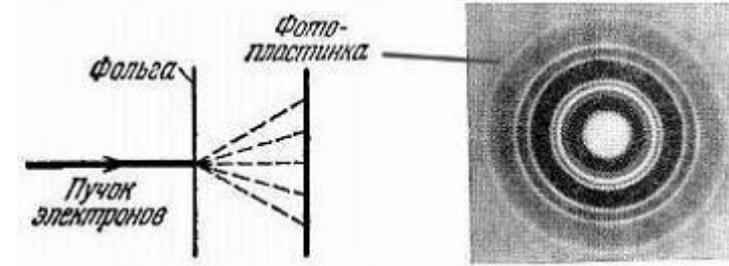
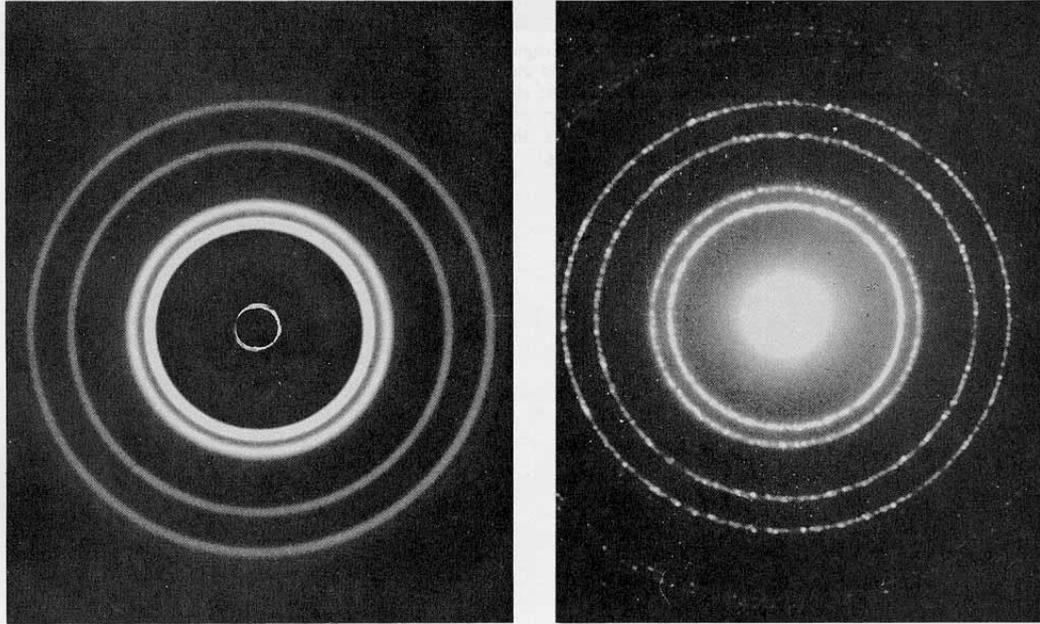
$$\lambda = 0.165 \text{ nm}$$

$$\lambda = 0.167 \text{ nm}$$

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

ГИПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ.

The diffraction pattern on the left was made by a beam of x rays passing through thin aluminum foil. The diffraction pattern on the right was made by a beam of electrons passing through the same foil.



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.



Джордж Паджет Томсон

(1892 — 1975)

английский физик, сын Дж.Дж. Томсона, лауреат Нобелевской премии по физике 1937 года.

Премия присуждена «за экспериментальное открытие дифракции электронов на кристаллах» (совместно с Джозефом Дэвиссоном).

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 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.

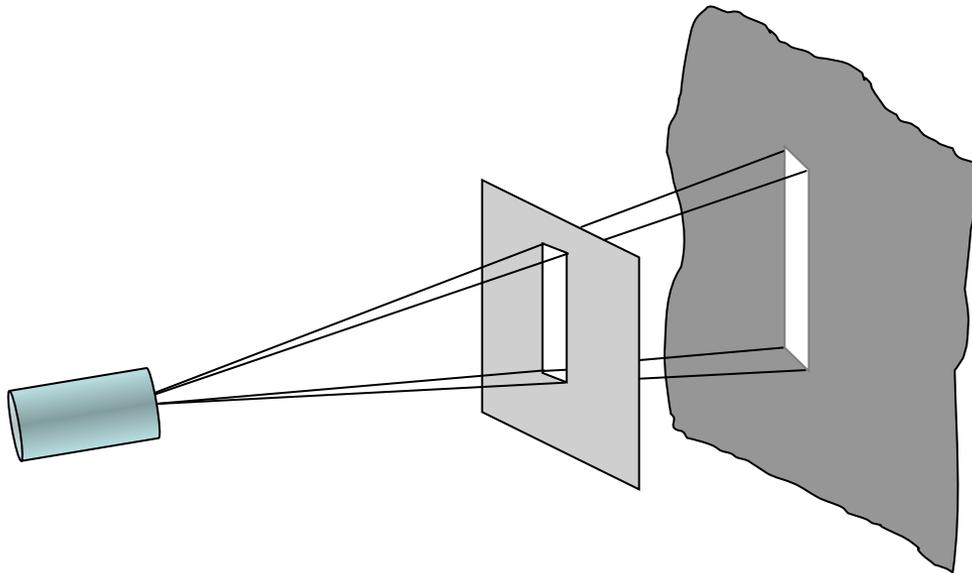
Микрочастицы не обладают одновременно определенными значениями координаты и импульса, понятие траектории применительно к ним теряет смысл.

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.

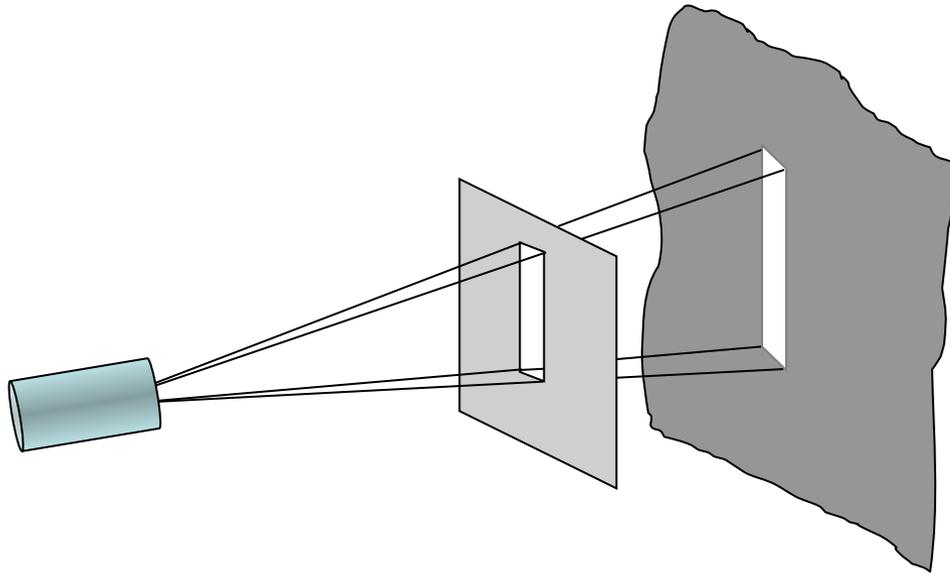
В классическом виде такой эксперимент описал Р.Фейнман.

Схема эксперимента.



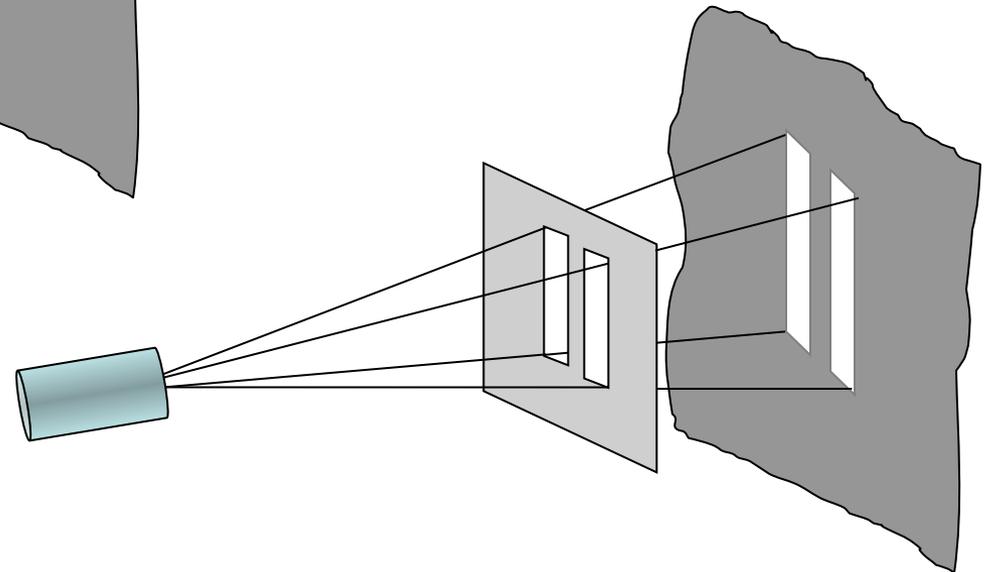
1. Пескоструйный аппарат, грязная стена, одна щель на пути прямолинейно летящих песчинок.

МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ



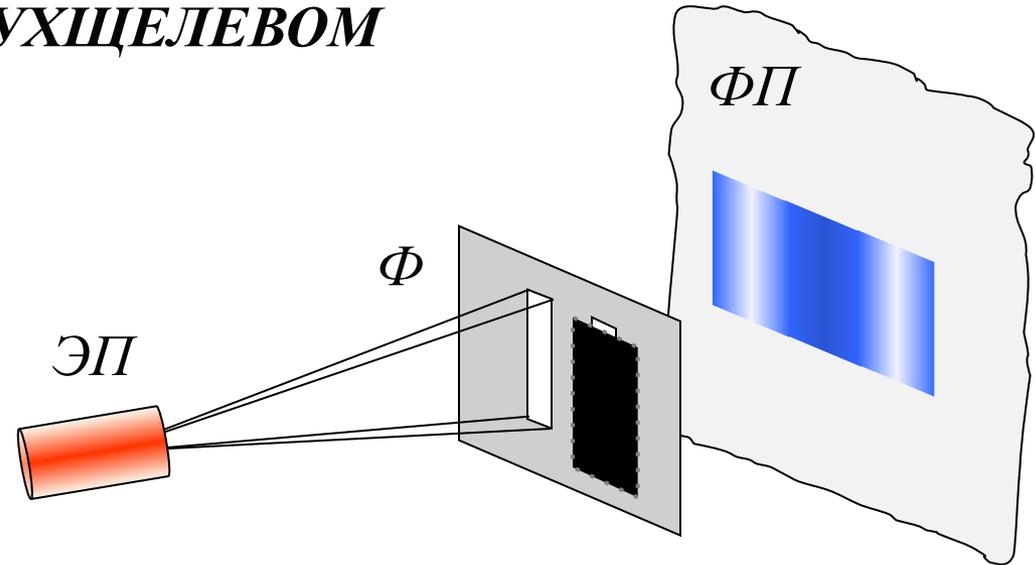
На стене будут две светлые полосы независимо от того, будут открыты обе прорезы одновременно или сначала одна, а потом другая.

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

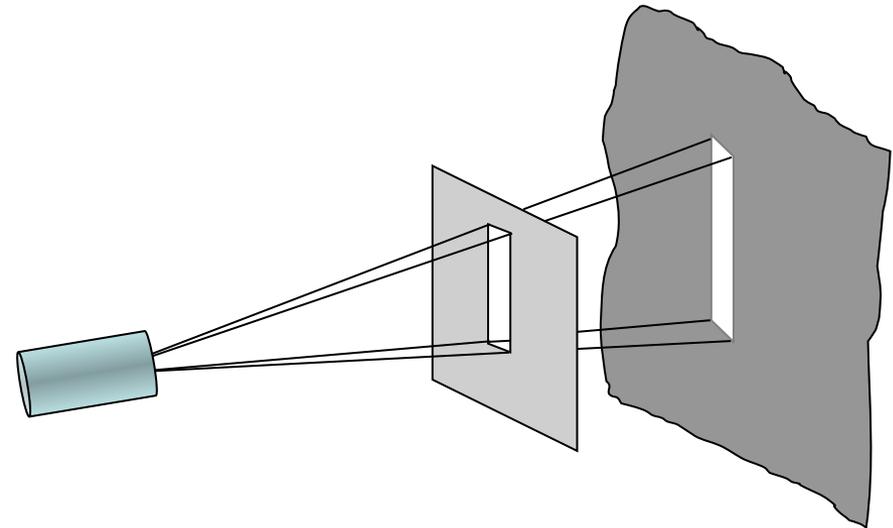


МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

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 $Ф$ с двумя узкими «щелями», вместо стены – фотопластинку $ФП$. Закроем одну щель, включим пушку.



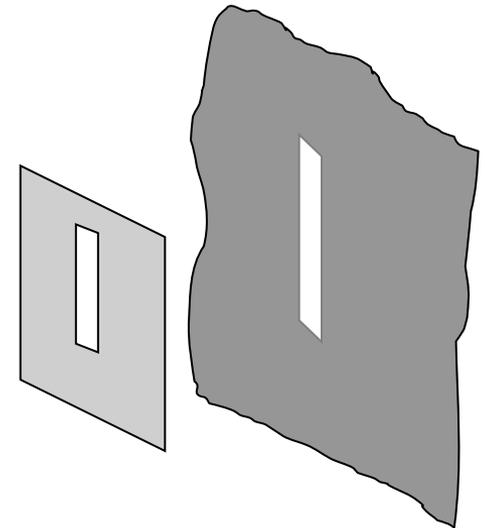
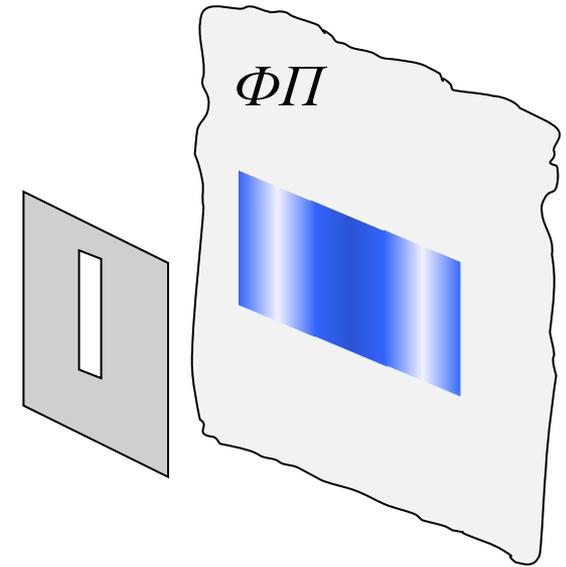
МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

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

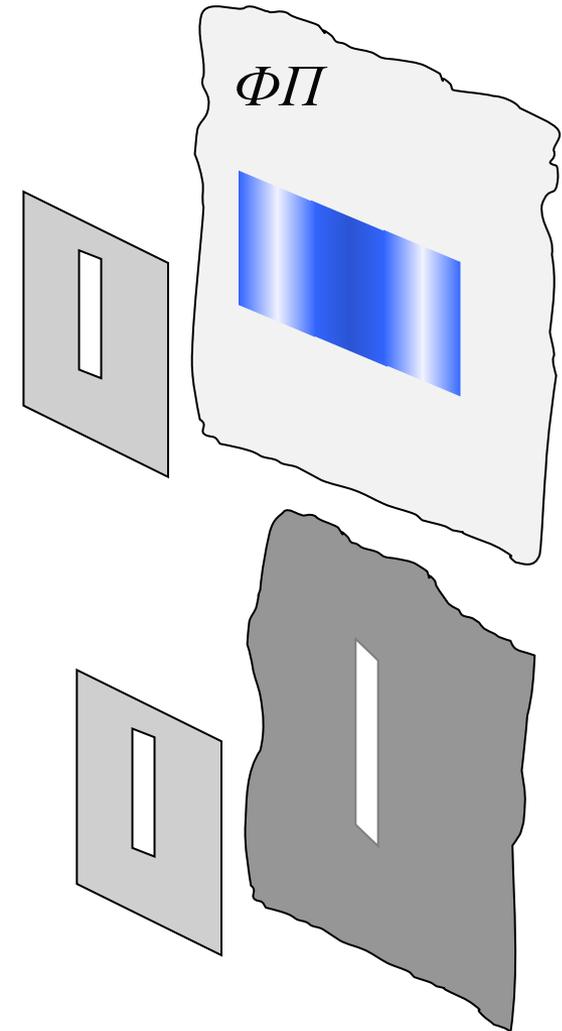
Необходимо снизить частоту выстрелов из электронной пушки настолько, чтобы электроны вылетали из нее поодиночке.

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.

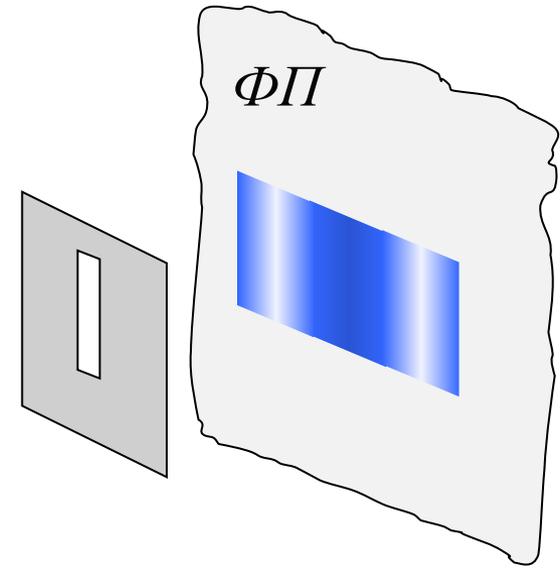
Каждый из них может попасть в любую точку затемненной области фотопластинки.



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.



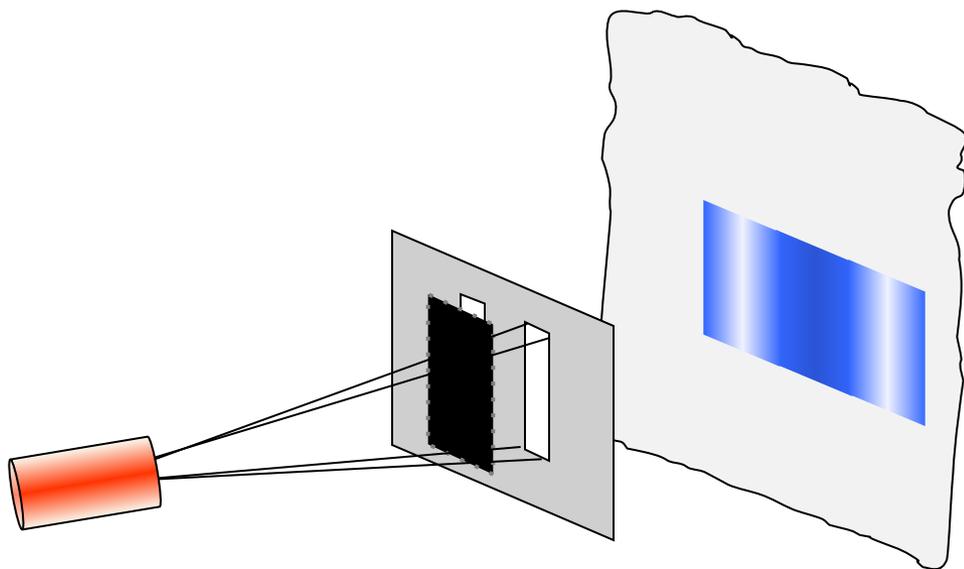
Электрон движется так, что его координаты на пластинке можно указать не однозначно, а только с *некоторой вероятностью*.

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

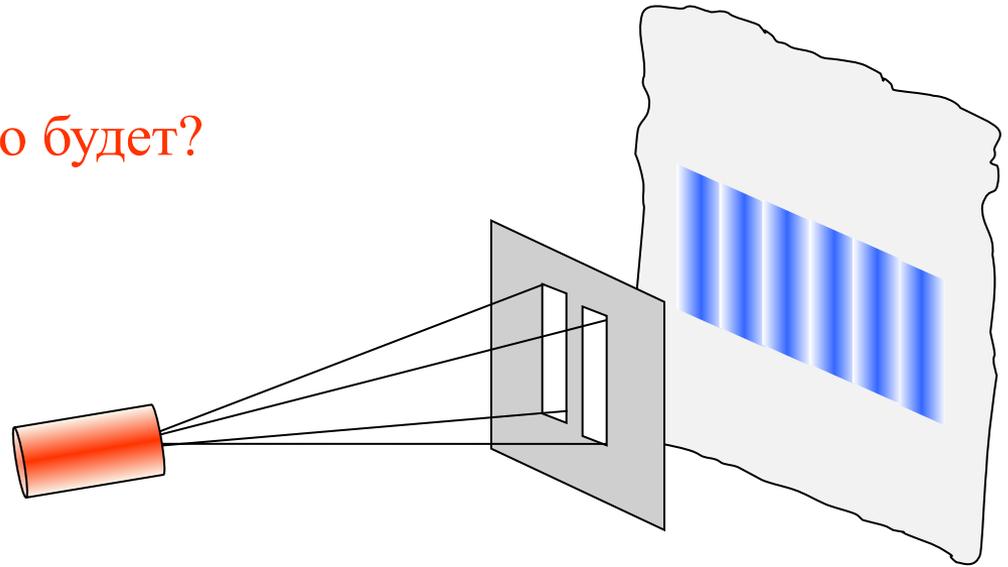
Однако она не будет похожа и на картину от одной щели, а также на сумму картин от левой и правой щелей.



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

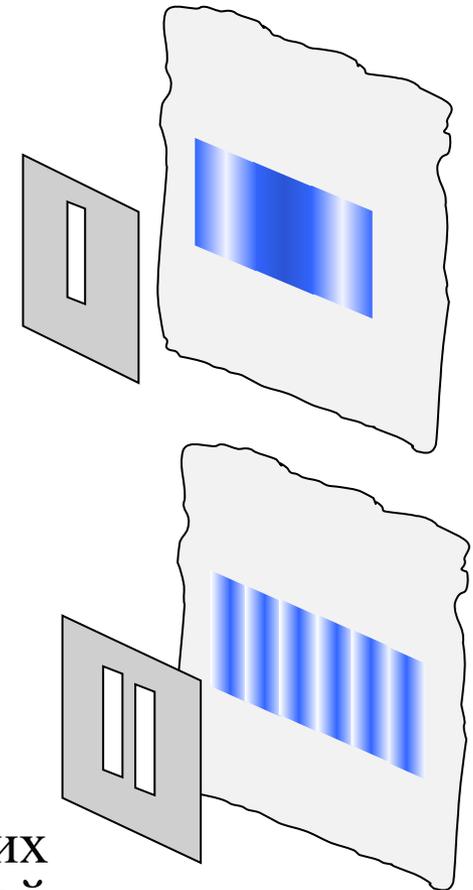
$$\lambda = 2\pi\hbar / p$$

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.



Копенгагенская концепция

Пока нет измерения электрон находится в суперпозиции состояний – он может быть где угодно.

Измерения приводит к коллапсу вероятностей и электрон обнаруживается у одной или другой щели.

Дополнить описание Копенгагенской концепции

МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

New Journal of Physics

The open access journal for physics

Controlled double-slit electron diffraction

Roger Bach^{1,3}, Damian Pope², Sy-Hwang Liou¹
and Herman Batelaan^{1,3}

¹ Department of Physics and Astronomy, University of Nebraska-Lincoln,
Theodore P Jorgensen Hall, Lincoln, NE 68588, USA

² Perimeter Institute for Theoretical Physics, 31 Caroline ST N, Waterloo,
Ontario N2L2Y5, Canada

E-mail: roger.bach@huskers.unl.edu and hbatelaan2@unl.edu

New Journal of Physics **15** (2013) 033018 (7pp)

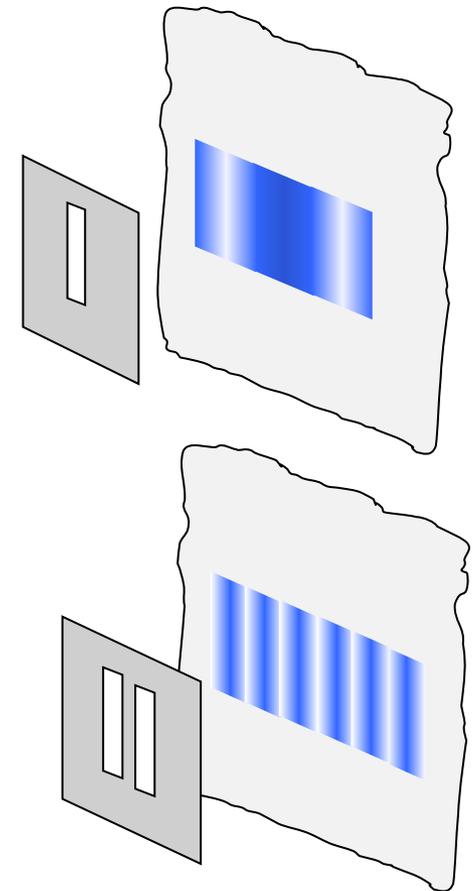
Received 31 December 2012

Published 13 March 2013

Online at <http://www.njp.org/>

doi:10.1088/1367-2630/15/3/033018

Abstract. Double-slit diffraction is a corner stone of quantum mechanics. It illustrates key features of quantum mechanics: interference and the particle-wave duality of matter. In 1965, Richard Feynman presented a thought experiment to show these features. Here we demonstrate the full realization of his famous thought experiment. By placing a movable mask in front of a double-slit to control the transmission through the individual slits, probability distributions for single- and double-slit arrangements were observed. Also, by recording single electron detection events diffracting through a double-slit, a diffraction pattern was built up from individual events.



МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

IOP Institute of Physics Φ DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT

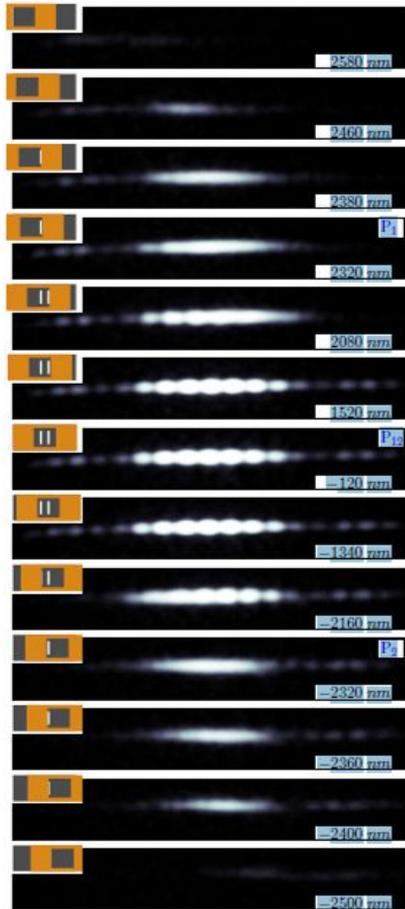
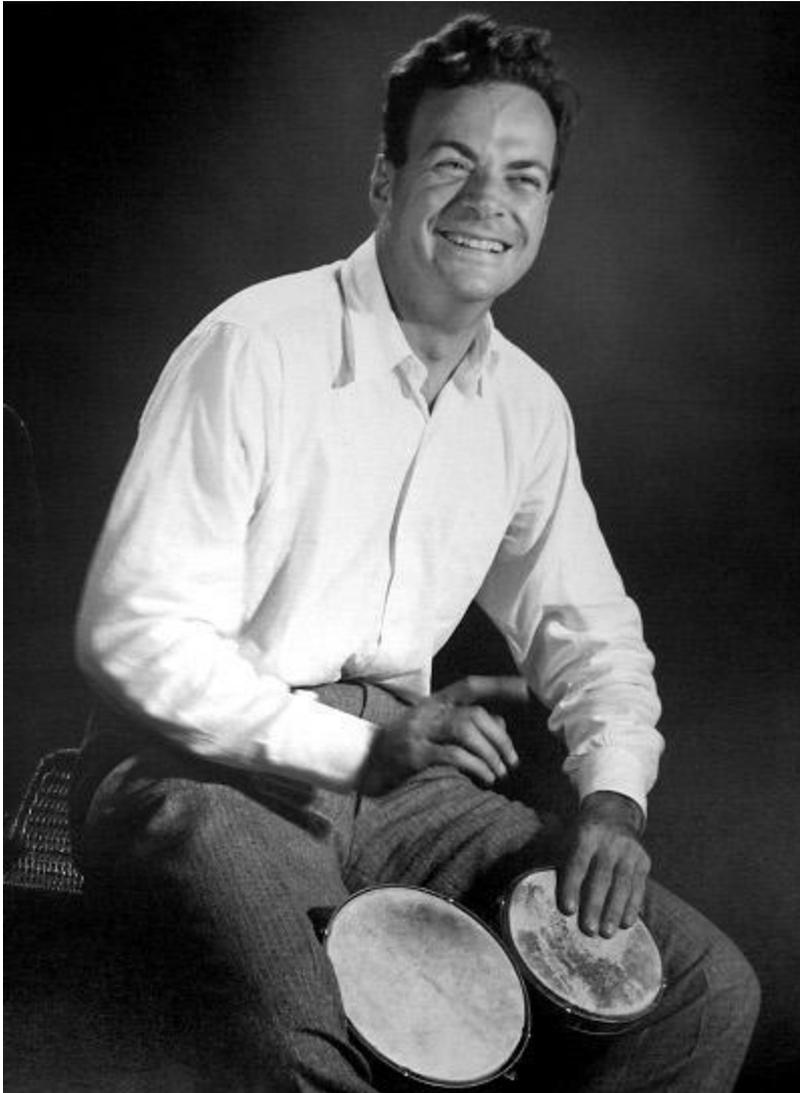


Figure 2. Mask movement. A mask is moved over a double-slit (inset) and the resulting probability distributions are shown. The mask allows the blocking of one slit, both slits, or neither slit in a non destructive way. The individual slits

Conclusion

In this paper, we show a full realization of Feynman's thought experiment and illustrate key features of quantum mechanics: interference and the wave–particle duality of matter. By controlling the transmission through the individual slits of a double-slit we were able to observe the diffraction patterns from slit 1 (P1), slit 2 (P2), and both (P12), thus observing the wave properties of electrons. Also, by recording single electron detection events diffracting through a double-slit we were able to build up a diffraction pattern, thus observing the particle properties of electrons.

МИКРОЧАСТИЦА В ДВУХЩЕЛЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ



Ричард Филлипс Фейнман
(1918 — 1988)

выдающийся американский учёный
Один из создателей квантовой
электродинамики.

Лауреат Нобелевской премии по
физике (1965, совместно с С.
Томонагой и Дж. Швингером).

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 компонента 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.

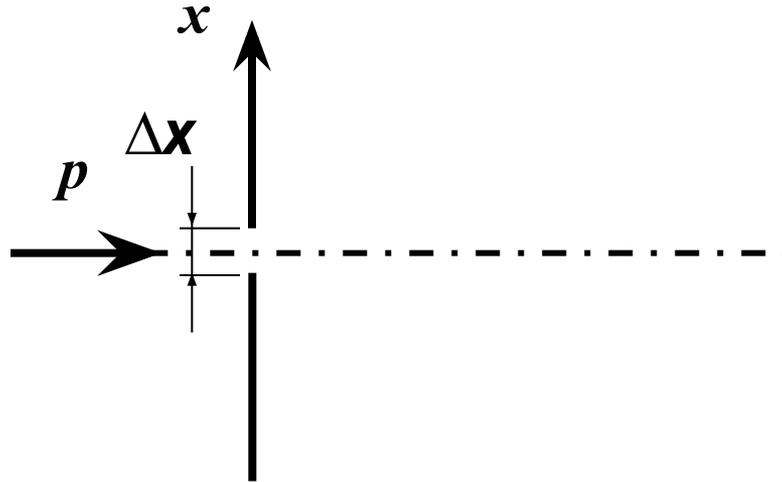
$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

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



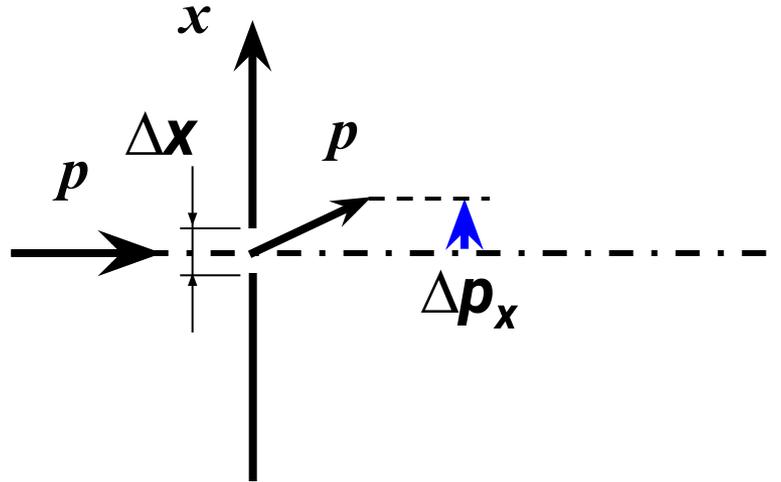
$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$$

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

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

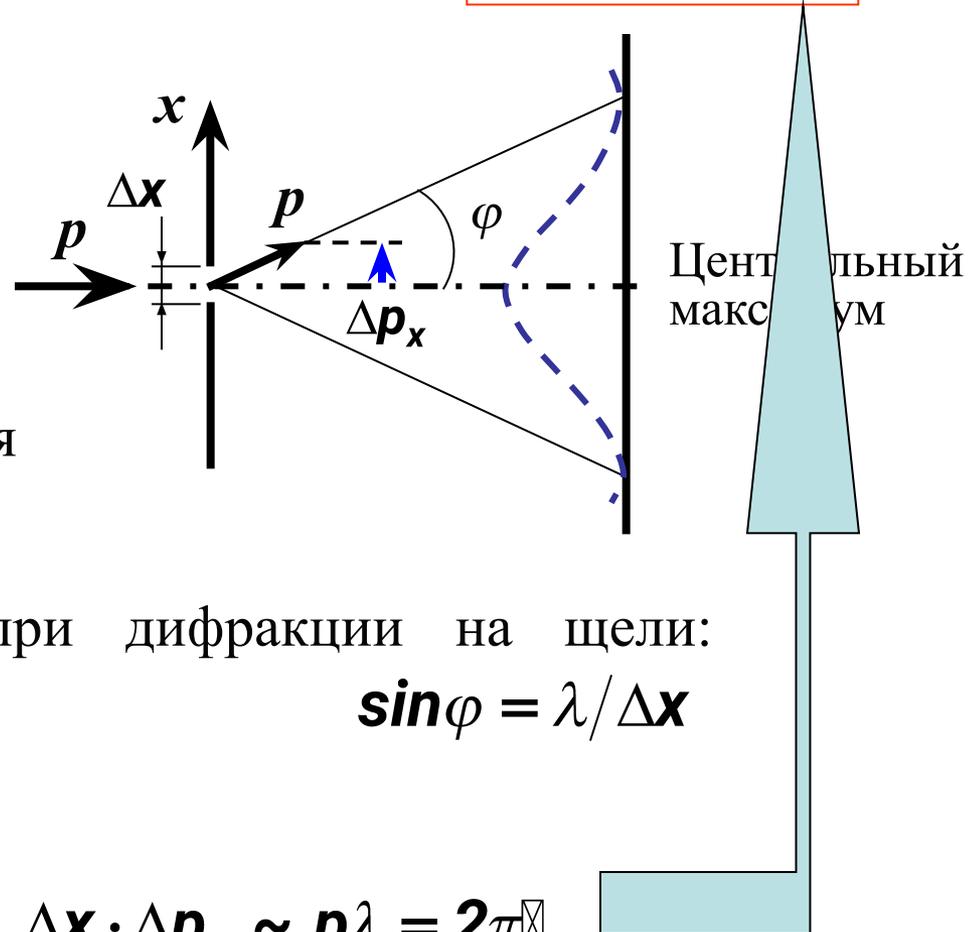


В момент прохождения частицы через щель:

- 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

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

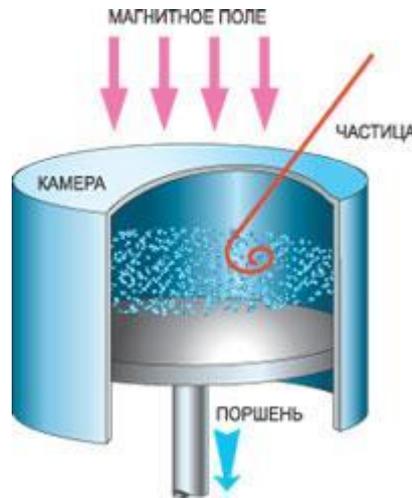
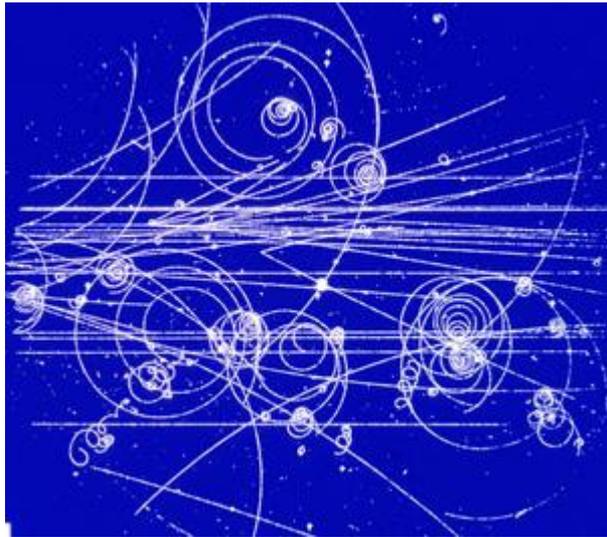
Видно, что чем больше масса, тем меньше неопределенности координаты и скорости частицы и, следовательно, тем с большей точностью применимо понятие траектории.

Пример: для макрочастицы с размерами 1 **мкм** неопределенности значений x и v_x оказываются за пределами точности измерения этих величин. (думаю правильно к массе обращаться, а не к размеру)

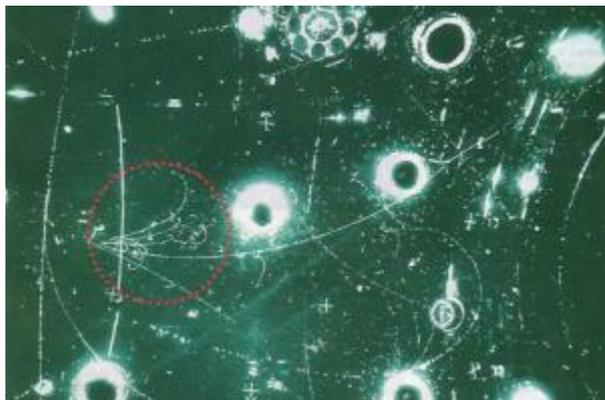
Это означает, что движение этой макрочастицы будет неотличимо от движения по траектории.

ИНФОРМАЦИЯ К РАЗМЫШЛЕНИЮ

Отличие микрочастицы от привычной нам макрочастицы заключается в том, что она не обладает одновременно определенными значениями координаты и импульса, вследствие чего понятие траектории применительно к микрочастице утрачивает смысл. (И.В.Савельев. Курс общей физики. Книга 5. 1998. Стр.73.)



LHC



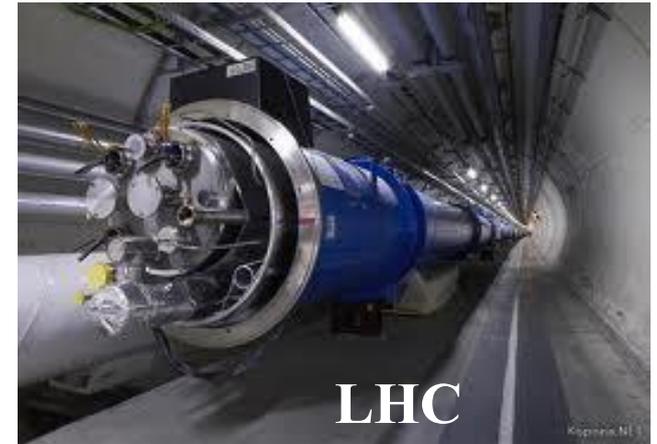
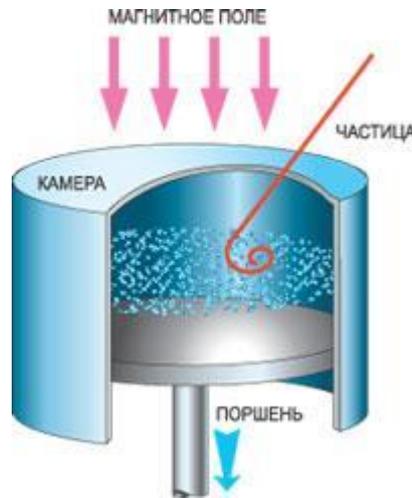
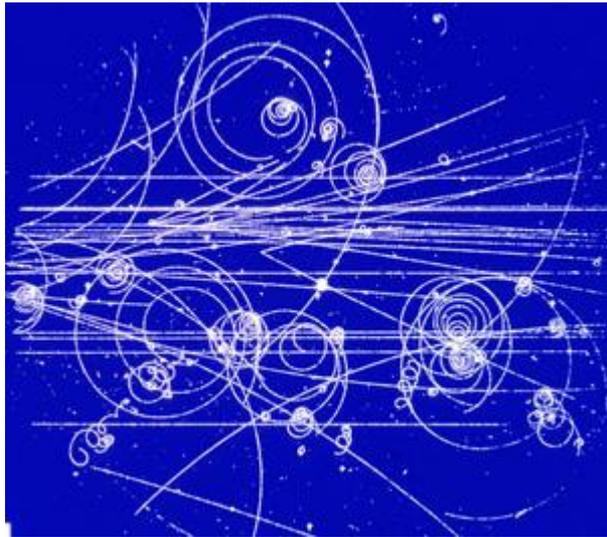
Камера Вильсона
Пузырьковая
камера

Как это
ВОЗМОЖНО,
если нет
траектории?!!

АНТОВОЙ МЕХАНИКИ

ИНФОРМАЦИЯ К РАЗМЫШЛЕНИЮ

Отличие микрочастицы от привычной нам макрочастицы заключается в том, что она не обладает одновременно определенными значениями координаты и импульса, вследствие чего понятие траектории применительно к микрочастице утрачивает смысл. (И.В.Савельев. Курс общей физики. Книга 5. 1998. Стр.73.)



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

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

Камера Вильсона
Пузырьковая
камера



АНТОВОЙ МЕХАНИКИ

$$h = 6,626\ 069\ 57(29) \times 10^{-34}$$