

1. Волновые свойства частиц. Гипотеза де Бройля (1924г)

Начало XX столетия физика встретила, казалось, неразрешимым кризисом. Новая фотонная теория света оказалась не универсальной. Чтобы объяснить, например, интерференцию, свету приписывают волновую природу. Фотоэлектрический эффект обнаруживает квантовую природу света. Двойственность природы света – это своеобразный дуализм «волна-частица». Если «перемещаться» по шкале электромагнитных волн в сторону более коротких длин волн, все более отчетливо проявляются квантовые свойства.



Луи де Бройль
(1892-1987г.)

С этой точки зрения не было ничего невероятного в предположении, сделанном французским физиком Луи де Бройлем, будущим Нобелевским лауреатом. Автор новой *глубоко революционной* концепции пришел к заключению, что существуют еще более короткие волны, связанные с частицами вещества. Т.е. *любые материальные частицы (электроны, атомы, молекулы) наряду с корпускулярными свойствами обладают также и волновыми; причем, правила перехода от одного аспекта природы материальных частиц к другому такие же, как и для фотона, для «волны-частицы» в оптике. Т.е. дуализм не есть особенность только оптических явлений, а – универсальное свойство материи.* Согласно де Бройлю, с каждым материальным объектом связаны, с одной стороны, корпускулярные характеристики – энергия E и импульс p , а с другой, волновые характеристики – частота ν и длина волны λ .

Корпускулярные и волновые характеристики микрообъектов связаны такими же количественными соотношениями, как и у фотона.

Пусть электрон (материальная частица) массой m движется равномерно со скоростью v . Корпускулярная теория характеризует его энергию E и импульс p как

$$E=mc^2 \text{ и } p=mv.$$

С волновой точки зрения

$$E=h\nu \quad \text{и} \quad p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

или, по де Бройлю,

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1).$$

Полученное выражение имеет, согласно идее де Бройля, *универсальный* характер, справедливый для любых волновых процессов. Любой ча-

стице, обладающей импульсом p , соответствует длина волны $\lambda = \frac{h}{p}$. Любой частице, обладающей импульсом, сопоставляется волновой процесс с длиной волны $\lambda = \frac{h}{p}$.

Оценим длину волны де Бройля для частицы массой $m=1g$, движущейся со скоростью $v=1cm/c$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot c}{1 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \text{ м} / c} = 6,63 \cdot 10^{-29} \text{ м} \quad (2)$$

Такая длина волны столь мала, что ее невозможно экспериментально наблюдать.

Совершенно иное получается при движении частиц с очень малой массой m , сравнимой с величиной h . Если электрон ускорить потенциалом в 150 В, то

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{150}} = 1 \text{ \AA} \quad \left(1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м} \right) \quad (3)$$

$$\left(\frac{mv^2}{2} = eV \right).$$

То есть, электрон должен обладать длиной волны порядка длины волны рентгеновских лучей. Как оказалось в любой лаборатории мира уже в течение четверти века имелись все инструменты, необходимые для открытия дифракции электронов, но не было волновой механики, которая могла бы подсказать эти исследования.

Для частиц, имеющих массу $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h \cdot \sqrt{1-v^2/c^2}}{m}$, в нерелятивистском приближении ($v \ll c$) $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$.

Гипотеза де Бройля основывалась на соображениях симметрии свойств материи и не имела в то время опытного подтверждения. Но она явилась мощным революционным толчком к развитию новых представлений о природе материальных объектов. В течение нескольких лет целый ряд выдающихся физиков XX века – В. Гейзенберг, Э. Шредингер, П. Дирак, Н. Бор и другие – разработали теоретические основы новой науки, которая была названа **квантовой механикой**.

Первое экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля было получено 1927 году американскими физиками К. Девиссоном и Л. Джерменом. Они обнаружили, что **пучок электронов, рассеивающийся на кристалле никеля, дает отчетливую дифракционную картину**, подоб-

ную той, которая возникает при рассеянии на кристалле коротковолнового рентгеновского излучения. В этих экспериментах кристалл играл роль дифракционной решетки. По положению дифракционных максимумов была определена длина волны электронного пучка, которая оказалась в полном соответствии с формулой де Бройля.

2. Экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля

Теперь следует выяснить, в какой степени идеи де Бройля о существовании волн материи согласуются с опытом. Для обнаружения дифракции малых длин волн необходимо иметь специальную решетку. *Дифракционные явления наблюдаются лишь в тех случаях, когда длина волны падающего излучения меньше постоянной дифракционной решетки.* В качестве пространственной дифракционной решетки могут быть использованы кристаллы. Как известно, в кристаллах атомы расположены в правильном порядке (рис.1) на определенных расстоя-

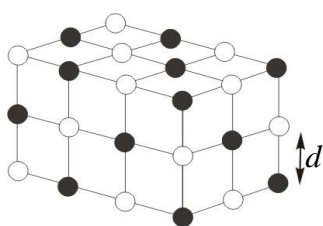


Рис.1

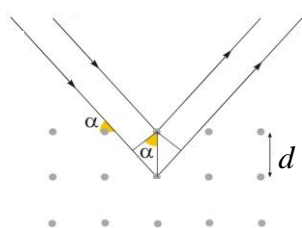


Рис.2

ниях друг от друга, примерно в 3-4 Å. Весь кристалл можно представить в виде ряда плоскостей, параллельных его естественным граням и отстоящих друг от друга на расстоянии d . Такая решетка должна дать дифракционную картину как рентгеновских лучей, так и пучка электронов.

В качестве пространственной дифракционной решетки могут быть использованы кристаллы. Как известно, в кристаллах атомы расположены в правильном порядке (рис.1) на определенных расстоя-

ниях друг от друга, примерно в 3-4 Å. Весь кристалл можно представить в виде ряда плоскостей, параллельных его естественным граням и отстоящих друг от друга на расстоянии d . Такая решетка должна дать дифракционную картину как рентгеновских лучей, так и пучка электронов.

1 Дифракция рентгеновских лучей.

Дифракцию рентгеновских лучей можно рассматривать как результат их отражения от атомов кристаллической решетки. Определим условие, при котором лучи 1 и 2 усиливают друг друга.

Когда лучи проходят через кристалл, атомы становятся источниками вторичных волн. Наложение вторичных волн приведет к интерференционному эффекту, если отражение происходит от разных плоскостей. Абсолютный показатель преломления всех сред для рентгеновских лучей близок к единице, поэтому оптическая разность хода между лучами равна

$$\delta = 2d \sin \alpha, \quad (4)$$

где α - угол скольжения.

Если длина волны рентгеновских лучей равна λ , то для интерференционного отражения должно выполняться *условие Вульфа – Брэгга*:

$$2d \sin \alpha = n\lambda, \quad (5)$$

$n=1, 2, 3 \dots$ и т.д.

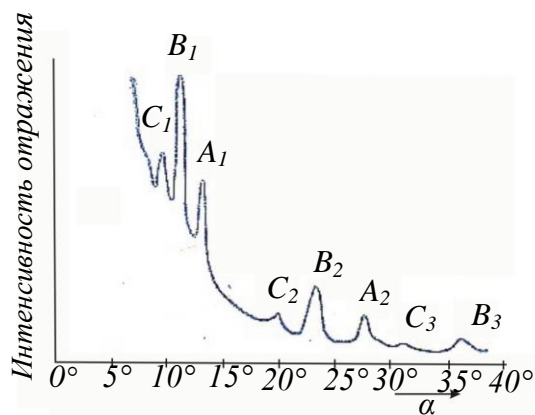


Рис.3. Кривая отражения рентгеновских лучей от кристалла NaCl.

Поэтому кривая интенсивности рентгеновских лучей в зависимости от угла α (рис.3) будет иметь ряд максимумов. Действительно, наблюдается избирательность по углу как в случае дифракционной решетки.

II Дифракция электронов.

Гипотеза де Бройля очень быстро была подтверждена экспериментально. Было показано, что **пучки электронов, протонов и даже целых атомов обнаруживают явление интерференции совершенно так же, как свет и рентгеновские лучи.**

Существует несколько методов наблюдения дифракции электронов.

Метод Дэвиссона-Джермера (1927г).

В решающем эксперименте Дэвиссона и Джермена **моноэнергетический** пучок электронов попадал на мишень из монокристалла никеля (рис.4), отшлифованного как показано на рисунке. Отраженные электроны собирались линзой Фарадея, размещенной по дуге вокруг кристалла.

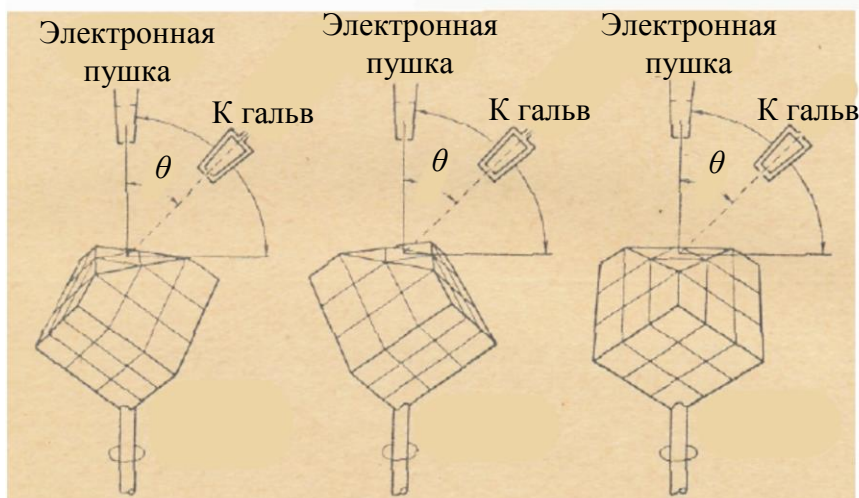


Рис.4. Схема экспериментального исследования дифракции электронов.

Кристалл вращался вокруг оси, совпадающей с направлением падающего пучка электронов.

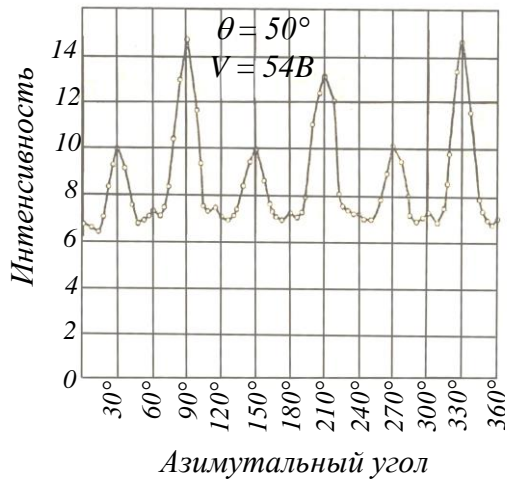


Рис.5

Изучался ток электронов как функция энергии падающих электронов, угла вылета θ и ориентации кристалла.

Различие между условиями опыта при повороте кристалла видно из рисунка 5. Постоянная решетки неодинакова, от $2,15 \text{ \AA}$ до $1,24 \text{ \AA}$.

Несколько лет изучалось угловое распределение электронов, т.е. интенсивность рассеяния от ориентации кристалла (скорость электронов оставалась постоянной). На графике резкие максимумы интенсивности повторяют-

ся через каждые 120° вследствие симметрии при повороте кристалла.

В другой серии опытов было зафиксировано положение приемника и изменяли энергию падающего пучка.

Максимумы будут иметь место при условии $2d \sin\alpha = n\lambda$. Если угол Брэгга $\alpha = \text{const}$ и изменять длину волны в следующем порядке:

$$\lambda, \frac{1}{2}\lambda, \frac{1}{3}\lambda, \dots \quad (6)$$

то в одном и том же направлении в этой же последовательности будут

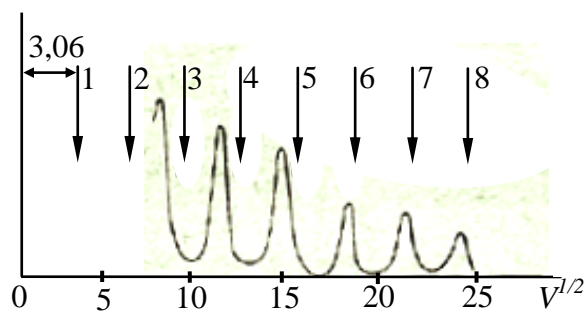


Рис.6

осуществляться максимумы 1-го, 2-го, 3-го и т. д. порядков. На рисунке 6 видны эти максимумы. Кроме того, стрелками показаны максимумы, вычисленные по формуле Вульфа – Брэгга. Очевидно несомненное совпадение гипотезы де Бройля и опыта.

Метод Дебая (1928г).

Узкий пучок электронов рассеивается мишенью, состоящей из большого числа небольших, случайно сориентированных **микросталлов** (рис.7). Теория предсказывает, что дифрагировавшие волны будут распространяться по поверхности круговых конусов.

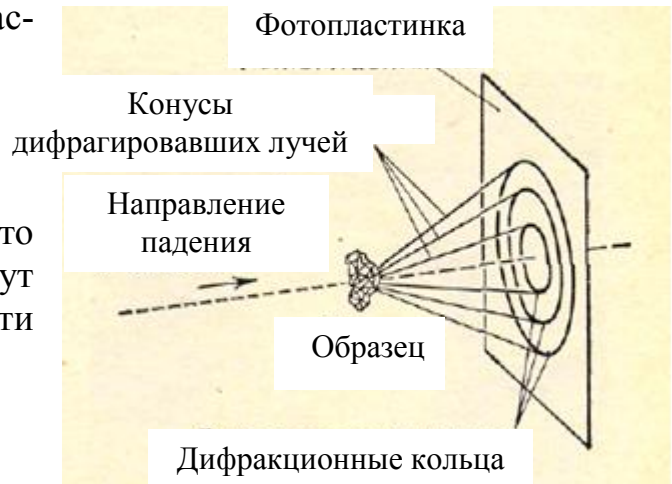


Рис.7. Дифракция рентгеновских лучей или электронов от мишени (конгломерат небольших, случайно ориентированных кристаллов).

Если рассеянные электроны регистрируются фотопластинкой, то видна последовательность концентрических окружностей. Рассмотрим фотографии дифракционных картин (рис.8). Справа показан вид мишени, который дает электронный микроскоп. Слева – кольца от дифракции электронов. На втором снимке мишень состоит из меньших кристаллов, в создании дифракционной картины участвует гораздо большее их число, кольца видны отчетливее.

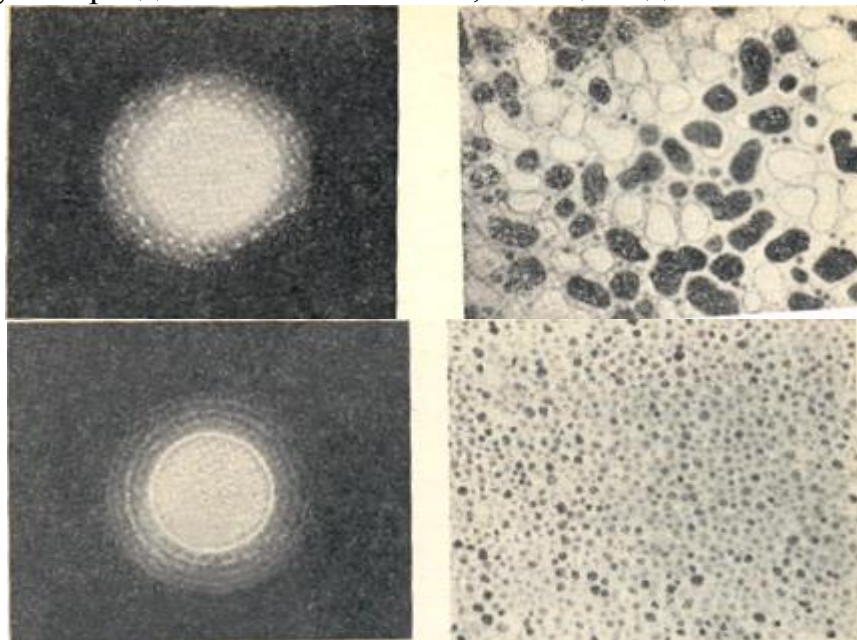


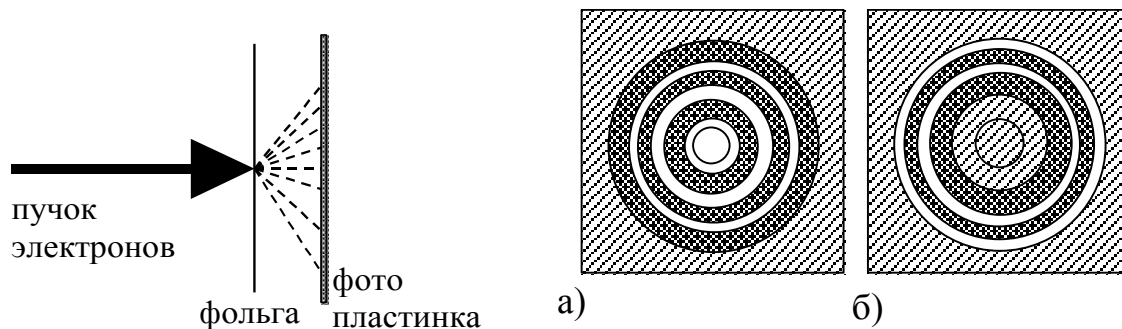
Рис.8

Что очень важно, такой же результат получается при многократном «обстреле» мишени *поочередно летящими электронами*. Это значит,

что образование дифракционной картины происходит при *индивидуальном прохождении* электронов через вещество. Вероятность попадания электронов, прошедших через вещество, в ту или иную точку экрана определяется волновыми свойствами движущихся электронов – наличием у них де - Бройлевской волны.

Дифракция электронов (метод Томсона, 1928 г.)

В 1928 году английский физик Дж. Томсон получил подтверждение гипотезы де Бройля, исследовав дифракцию электронов при прохождении их через тонкую поликристаллическую фольгу из золота.



На рисунке показана схема опыта Томсона. На установленной за фольгой фотопластинке наблюдалась дифракционная картина - концентрические темные и светлые кольца, радиусы которых изменялись с изменением скорости электронов (т.е. длины волны) согласно де Бройлю. Полученная таким способом электронограмма золота (рисунок а)) сопоставлена с полученной в аналогичных условиях рентгенограммой алюминия (рисунок б)). Видно очевидное сходство обеих картин дифракции.

Немецким физиком О. Штерном (1888-1969) в 30^х гг. были изучены дифракционные явления на атомных и молекулярных пучках.

В последующие годы Томсон неоднократно повторял опыт, с неизменным результатом, в том числе при условиях, когда поток электронов был настолько слабым, что через прибор одновременно могла проходить только одна частица. Оказалось, что для того чтобы получить четкую дифракционную картину на слабых пучках электронов, необходимо увеличить время экспозиции. На фотографии дифракционной картины, приведенной ниже, (случай б) видны точки попадания отдельных электронов на фотопластинку



Картина дифракции электронов на поликристаллическом образце при длительной экспозиции (а) и при короткой экспозиции (б)

Таким образом, было экспериментально доказано, что волновые свойства присущи не только большой совокупности частиц, но и каждому электрону в отдельности.

Применение дифракции электронов, нейтронов (Электроннография).

Несколько слов о применении явления и соответствующих приборов.

1. Электроны имеют меньшую проникающую способность по сравнению с рентгеновскими лучами, поэтому особенно полезны для исследования поверхностных слоев различных металлов различных типов коррозий, смазочных свойств различных масел (электроннография).

2. В медицине и биологии используют электронный микроскоп с увеличением более 100000 раз.



Фотография, полученная при дифракции электронов на белом олове.

Фотография дифракции рентгеновских лучей на белом олове.

3. Дифракция электронов и рентгеновских лучей дают поразительно аналогическую картину **в характере расположения окружностей**.

Оба явления позволяют провести исследование структуры кристаллов.

Результаты этих опытов приведены в таблице.

<i>Металл</i>	<i>Постоянная решетки d в Å</i>	
	<i>электроны</i>	<i>рентг.лучи</i>
Алюминий	4,00 – 4,06	4,05
Золото	3,99 – 4,18	4,06
Платина	3,88	3,91
Свинец	4,99	4,92

Учитывая погрешность измерений, постоянную кристаллической решетки можно считать одинаковой.

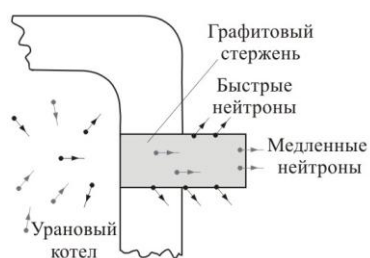


Рис.10

Для *медленных* нейтронов $\lambda \gg d$, никакой дифракции не возникнет и они проходят через графит не рассеиваясь. Медленные электроны особенно эффективно вызывают искусственную радиоактивность.

4. Урановый котел (рис.10) – источник нейтронов широкого энергетического спектра. Нейтроны как и электроны обладают волновыми свойствами. **Быстрым** нейтронам соответствует длина волны $\lambda < 2d$, меньше постоянной кристаллической решетки графита. Для них справедливо условие Вульфа – Брэгга, они рассеиваются на атомных плоскостях, будет иметь место дифракционное отражение и рассеяние через боковую поверхность графитового стержня.

3. Физический смысл волн де Бройля

Мы убедились, что гипотеза де Бройля справедлива, волны де Бройля реальны, объективно существуют в природе. **Реальность заключается в том, что частицы, созданные природой, имеют свойства волны.** Волновые и корпускулярные представления – это лишь два неполных и односторонних представления о свойствах одного и того же объекта, которые возникают на определенном этапе развития знаний.

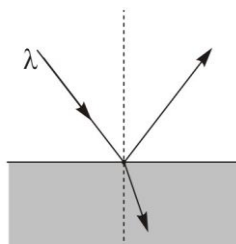


Рис.11

Как истолковать наличие волновых свойств у материальных частиц? Электромагнитная природа волн де Бройля полностью исключается, так как волновые свойства электронов проявляются и при их равномерном движении, а электромагнитные – только при переменном движении.

Что понимается под волнами де Бройля?

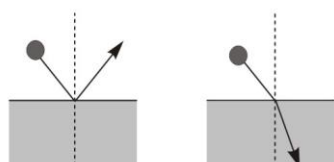


Рис.12

Пусть на границу раздела 2-х сред падает волна. На границе двух сред волна разделяется на отраженную и преломленную (рис.11). Интенсивность волны определится квадратом амплитуды волны.

Частица же обладает свойством **неделимости**: она либо отразится от границы, либо

пройдет во вторую среду (рис.12). Отсюда следует, что связь между волнами и частицами может быть истолкована **только статистически: квадрат амплитуды волны в данном месте, измеряющий ее интенсивность, есть мера вероятности нахождения частицы в данном месте.**

При дифракции волн дифракционные полосы возникают в том месте, где разность хода волн равна целому числу длин волн. В этом месте амплитуда максимальна.

При дифракции электронов светлые дифракционные полосы будут там, куда больше всего попадают электроны. Т.е. вероятность нахождения электронов будет максимальна **в тех местах, где амплитуда максимальна.** Но процесс попадания электронов в различные места на фотопластинке не индивидуален. Принципиально невозможно предсказать, куда попадет очередной электрон после рассеяния, существует лишь определенная вероятность попадания электрона в то или иное место. Таким образом, описание состояния микрообъекта и его поведение может быть дано только на основе понятия вероятности.

Необходимость вероятностного подхода к описанию микрообъектов является важнейшей особенностью квантовой теории. В квантовой механике для характеристики состояний объектов в микромире вводится понятие **волновой функции ψ (пси-функции).** **Квадрат модуля волновой функции $|\psi|^2$ пропорционален вероятности нахождения микрочастицы в единичном объеме пространства.** Конкретный вид волновой функции определяется внешними условиями, в которых находится микрочастица. Математический аппарат квантовой механики позволяет находить волновую функцию частицы, находящейся в заданных силовых полях.

Необходимость вероятностного подхода к описанию микрочастиц является важнейшей отличительной особенностью квантовой теории. Можно ли волны де Бройля истолковывать как волны вероятности, то есть считать, что вероятность обнаружить микрочастицу в различных точках пространства меняется по волновому закону? Такое толкование волн де Бройля уже неверно хотя бы потому, что тогда вероятность обнаружить частицу в некоторых точках пространства может быть отрицательна, что не имеет смысла.

Чтобы устранить эти трудности, немецкий физик М. Борн в 1926 г. предположил, что по волновому закону меняется не сама вероятность, а величина, названная амплитудой вероятности и обозначаемая $\psi(x, y, z, t)$. Эту величину называют также волновой функцией (или ψ -функцией). Амплитуда вероятности может быть комплексной, и вероятность W про-

порциональна квадрату её модуля: $W = |\psi(x, y, z, t)|^2$, $|\psi|^2 = \psi\psi^*$, где ψ^* - функция, комплексно сопряженная с ψ . Таким образом, описание состояния микрообъекта с помощью волновой функции имеет **статистический, вероятностный характер**: квадрат модуля волновой функции (квадрат модуля амплитуды волн де Бройля) определяет вероятность нахождения частицы в момент времени t в области с координатами от x до $x+dx$, от y до $y+dy$, от z до $z+dz$.

Волновая функция – основной носитель информации о корпускулярных и волновых свойствах микрочастицы. Вероятность нахождения частицы в элементе объема dV равна $dW = |\psi|^2 dV$. величина $|\psi|^2 = \frac{dW}{dV}$ - это плотность вероятности, которая определяет вероятность нахождения частицы в единичном объеме в окрестности точки с координатами x, y, z .

Физический смысл имеет не сама ψ -функция, а квадрат ее модуля $|\psi|^2$, которым задается интенсивность волны.

Вероятность найти частицу в момент времени в конечном объеме, согласно теореме сложения вероятностей, равна $W = \int_V dW = \int_V |\psi|^2 dV$.

Так как $|\psi|^2 dV$ определяется как вероятность, то необходимо волновую функцию ψ нормировать так, чтобы вероятность достоверного события обращалась в единицу, если за объем V принять бесконечный объем всего пространства. Это означает, что при данном условии частица должна находиться где-то в пространстве. Это означает, что условие нормировки вероятностей $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi|^2 dV = 1$, где данный интеграл вычисляется по всему бесконечному пространству, т.е. по координатам x, y, z от $-\infty$ до ∞ .

Таким образом, выражение $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi|^2 dV = 1$ свидетельствует об объективном существовании частицы в пространстве.

Чтобы волновая функция являлась объективной характеристикой состояния микрочастиц, она должна удовлетворять ряду ограничительных условий.

1. Функция ψ , характеризующая вероятность обнаружения частицы в элементе объема, должна быть конечной (так как вероятность не может быть больше единицы), однозначной (вероятность не может быть неоднозначной величиной) и непрерывной (вероятность не может меняться скачком).

2. Волновая функция должна удовлетворять принципу суперпозиции: если система может находиться в различных состояниях, описываемых новыми волновыми функциями $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_n$, то она также может находиться в состоянии ψ , описываемом линейной комбинацией этих функций $\psi = \sum_n C_n \psi_n$, где C_n ($n=1,2,3\dots$) – произвольные комплексные числа. Сложение волновых функций (амплитуд вероятностей), а не вероятностей (определяемых квадратом модулей волновых функций) принципиально отличает квантовую теорию от классической статистической теории, в которой для независимых событий справедлива теорема о сложении вероятностей.
3. Волновая функция ψ , являясь основной характеристикой состояния микрочастицы, позволяет в квантовой механике вычислить средние значения физических величин, характеризующих данный микрообъект. Например, среднее расстояние электрона от ядра вычисляется по формуле: $\langle r \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} r |\psi|^2 dV$.

Итак, волновая функция $\psi(x,y,z,t)$ играет в квантовой теории первостепенную роль: именно она описывает состояние квантовой системы, поэтому волновую функцию стали также называть вектором состояния (по аналогии с тем, как в классической механике положение материальной точки задается с помощью радиус-вектора). Предложенное Борном толкование волн де Бройля исключает их понимание как классических волн материи (т.е. как распространяющиеся в пространстве колебания материи). Связывая, например, со свободным электроном плоскую волну, не нужно понимать это так, будто бы электрон «размазан» по огромной области: в действительности это означает, что хотя электрон продолжает выступать в теории как точечный объект, вероятность обнаружить его в любой из точек пространства одинакова.

Задачей квантовой механики является нахождение волновой функции ψ частицы, свободное движение которой ограничено действием внешних сил. Функция ψ должна быть не только нормируемой, но и однозначна, т.е. иметь только одно значение в каждой точке пространства. В общем случае волновая функция и ее первые производные должны быть конечными, непрерывными и однозначными функциями своих аргументов.

4. Границы применимости корпускулярных представлений к микрочастицам. Соотношение неопределенностей Гейзенберга

Принцип неопределенности в квантовой механике. Открытие корпускулярно-волнового дуализма стало важным шагом для понимания того, что присущее классической физике противопоставление частиц и волн не имеет места для объектов микромира. Электроны, фотоны, нейтроны и другие микрочастицы в одних случаях ведут себя как частицы, в других проявляют свои волновые свойства. Это значит, что объекты микромира не являются ни классическими частицами, ни классическими волнами и для изучения их свойств не применимы ни классические методы описания частиц, ни классические методы описания волн.

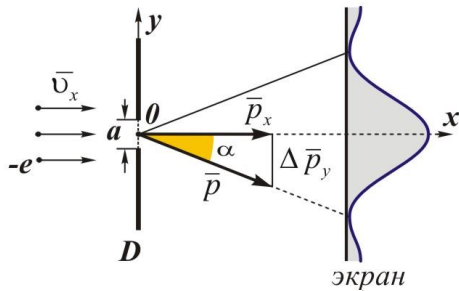


Рис.13

В классической механике частицы характеризуются тем, что в каждый рассматриваемый момент времени частица занимает строго определенное место в пространстве, определяемое координатой ее центра тяжести и обладает определенным количеством движения. Возможность одновременного точного определения положения и скорости является характерным свойством макроскопических тел и в классической физике состояние системы частиц полностью характеризуется совокупностью координат скоростей всех частиц. Наличие у электронов волновых свойств делает невозможным такое описание состояние системы микрочастиц.

Корпускулярно-волновая двойственность свойств частиц, изучаемых в квантовой механике, и статистический смысл ψ -функции, заданием которой определяется состояние частицы в пространстве, приводит к весьма важному вопросу о границе применимости понятий классической физики в микромире.

Рассмотрим, например, дифракцию электронов на одиночной щели шириной a , график справа – распределение электронов на фотопластинке, иллюстрирующих это. Пусть на диафрагму D (рис.13) со щелью a направлен пучок электронов со скоростью v_x .

До диафрагмы: каждый электрон имеет *определенный импульс* $p_x = mv_x$, $p_y = 0$, $p_z = 0$. Однако координаты каждой частицы *неопределены в пределах* $-\infty < x < 0$, $-\infty < y, z < +\infty$.

В момент прохождения щели диафрагмы частица находится между ее краями, *неопределенность координаты y уменьшилась*, пределы

ее измерения $-\frac{a}{2} < y < \frac{a}{2}$. *Импульс же стал менее определен, если раньше $p_y=0$, то теперь, вследствие дифракции электронов, частица получила добавочный импульс $\Delta p_y \neq 0$. И так, в момент прохождения щели координата y известна с неточностью $\Delta y = a$, а импульс с неточностью Δp_y .*

Ширина щели a , длина волны λ , угловая ширина центрального, нулевого максимума связаны соотношением

$$a \sin \alpha = \lambda.$$

Из рисунка следует, что

$$\Delta p_y = p \sin \alpha = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha.$$

Так как $\Delta y = a$, то

$$\Delta y \sin \alpha = \lambda.$$

Перемножая два последних равенства, получим

$$\Delta p_y \Delta y \sin \alpha = \frac{h}{\lambda} \lambda \sin \alpha$$

или

$$\Delta p_y \Delta y = h.$$

Если учесть максимумы более высоких порядков, то

$$\Delta p_y \Delta y = nh.$$

Отсюда следует, что

$$\Delta p_y \Delta y \geq h$$

Это и есть соотношение неопределенности Гейзенберга. Оно показывает, что в микромире для квантовых объектов, чем точнее определено значение координаты частицы (чем меньше Δy), тем менее точно определено значение импульса частицы (тем больше Δp_y) и наоборот.

В общем случае для координат x, y, z и проекций импульсов на координатные оси можно записать

$$\begin{cases} \Delta x \cdot \Delta p_x \geq h \\ \Delta y \cdot \Delta p_y \geq h \\ \Delta z \cdot \Delta p_z \geq h \end{cases}$$

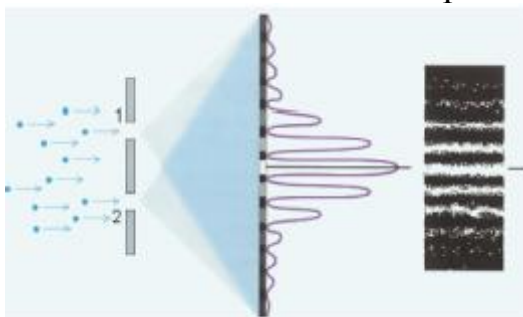
Величины Δy и Δp_y нужно понимать в том смысле, что микрочастицы в принципе не имеют одновременно точного значения координаты и соответствующей проекции импульса. Соотношение неопределенностей не связано с несовершенством применяемых приборов для одновременного измерения координаты и импульса микрочастицы. Оно является проявлением двойственной природы материальных микрообъектов. Соотношение неопределенностей позволяет оценить, в какой мере можно применять к микрочастицам понятия классической механики. Оно показывает, в частности, что к микрообъектам неприменимо классическое понятие тра-

ектории, так как движение по траектории характеризуется в любой момент времени определенными значениями координат и скорости. В рассмотренном эксперименте по дифракции электронов принципиально невозможно указать траекторию, по которой двигался какой-то конкретный электрон после прохождения щели и до фотопластинки.

В квантовой теории рассматривается также соотношение неопределенностей для энергии E и времени t , то есть неопределенности этих величин удовлетворяют условию: $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$.

Необходимо отметить, что ΔE – неопределенность энергии некоторого состояния системы, Δt – промежуток времени, в течение которого оно существует. Следовательно, система, имеющая среднее время жизни Δt , не может быть охарактеризована определенным значением энергии. Разброс энергии $\Delta E = h/\Delta t$ возрастает с уменьшением среднего времени жизни. Из выражения $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$ следует, что частота излученного фотона также должна иметь неопределенность $\Delta \nu = \Delta E/h$, то есть линии спектра должны характеризоваться частотой, равной $\nu \pm \Delta E/h$. Опыт действительно показывает, что все спектральные линии размыты. Измеряя ширину спектральной линии, можно оценить порядок времени существования атома в возбужденном состоянии.

Рассмотрим еще один мысленный эксперимент – дифракцию электронного пучка на двух щелях. Схема этого эксперимента.



совпадает со схемой оптического интерференционного опыта Юнга.

Анализ этого эксперимента позволяет проиллюстрировать логические трудности, возникающие в квантовой теории. Те же проблемы возникают при объяснении оптического опыта Юнга, исходя из концепции фотонов.

Если в опыте по наблюдению дифракции электронов на двух щелях закрыть одну из щелей, то интерференционные полосы исчезнут, и фотопластинка зарегистрирует распределение электронов, продифрагировавших на одной щели. В этом случае все электроны, долетающие до фотопластинки, проходят через единственную открытую щель. Если же открыты обе щели, то появляются интерференционные полосы, и тогда возникает вопрос, через какую из щелей пролетает тот или иной электрон?

Трудно смириться с тем, что ответ на этот вопрос может быть только один: электрон пролетает через обе щели. Мы представляем себе поток микрочастиц как направленное движение маленьких шариков и применяем для описания этого движения законы классической физики. Но электрон (и любая другая микрочастица) обладает не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. Легко представить, как электромагнитная световая волна проходит через две щели в оптическом опыте Юнга, так как волна не локализована в пространстве. Но если принять концепцию фотонов, то нужно признать, что каждый фотон тоже не локализован. Невозможно указать, через какую из щелей пролетел фотон, как невозможно проследить за траекторией движения фотона до фотопластинки и указать точку, в которую он попадет. Опыт показывает, что даже в том случае, когда фотоны пролетают через интерферометр поштучно, интерференционная картина после пролета многих независимых фотонов всё равно возникает. Поэтому в квантовой физике делается вывод: фотон интерферирует сам с собой.

Все вышесказанное относится и к опыту по дифракции электронов на двух щелях. Вся совокупность известных экспериментальных фактов может найти объяснение, если принять, что дебройлевская волна каждого отдельного электрона проходит одновременно через оба отверстия, в результате чего и возникает интерференция. Поштучный поток электронов тоже дает интерференцию при длительной экспозиции, то есть электрон, как и фотон, интерферирует сам с собой.

Принцип тождественности одинаковых частиц. Одинаковые частицы имеют одинаковые значения массы, заряда и других внутренних характеристик. В классической механике при описании системы их одинаковых частиц можно проследить за отдельной частицей, движущейся по своей траектории. Это обусловлено тем, что пронумеровав частицы в некоторый момент времени в дальнейшем можно наблюдать за движением любой из них, т.е. одинаковые классические частицы различимы.

В квантовой механике принципиально иное положение. Как вытекает из соотношения неопределенностей, понятие траектории неприменимо к микрочастицам. Поэтому в принципе нельзя проследить за движением отдельной частицы. Действительно, пусть координаты частиц в начальный момент времени фиксированы с большой точностью, так что состояние каждой частицы характеризуется достаточно четко локализованным в пространстве волновым пакетом. В этом состоянии частицы можно пронумеровать. Однако при дальнейшем движении частиц их волновые пакеты начинают расплываться и через некоторое время перекроются. в той области пространства, где волновые пакеты перекрываются невозможно отличить одну частицу от другой. Таким образом, в квантовой механике

одинаковые частицы становятся тождественными. Это и есть принцип тождественности: никакими экспериментами нельзя отличить состояния, получающиеся перестановкой одинаковых частиц, поэтому состояния с переставленными частицами рассматриваются как одно физическое состояние.

Принцип тождественности приводит к возникновению так называемого обменного взаимодействия, связанного с вкладом от взаимодействия частиц в области перекрытия волновых функций. Обменное взаимодействие не имеет аналогов в классической механике.