

# Атомная физика

**Корпускулярно-волновой дуализм свойств материи.**

**Гипотеза Луи де Бройля. Формула де Бройля.**

*Интерференция, дифракция, поляризация* – эти явления подтверждают волновую (электромагнитную) природу света.

*Излучение абсолютно черного тела, фотоэффект, эффект Комптона* – эти явления служат доказательством квантовых (корпускулярных) представлений о свете, как о потоке фотонов.

*Давление света, преломление света* – эти явления объясняются как волновой, так и квантовой теориями.

Основные уравнения, связывающие корпускулярные и волновые свойства электромагнитного излучения, предложены Луи де Бройлем. Де Бройль, развивая теорию о двойственности природы света, выдвинул гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма.

*Гипотеза де Бройля. Не только фотоны, но и электроны и любые другие частицы материи наряду с корпускулярными обладают также волновыми свойствами.*

**микрочастица**



корпускулярные хар-ки:  
E – энергия, p - импульс

волновые характеристики:  
 $\nu$  - частота,  $\lambda$  - длина волны

Соотношения между корпускулярными и волновыми характеристиками:  $E = h\nu$        $p = h\nu/c = h/\lambda$

### Формула де Бройля:

*Любой частице, обладающей импульсом, можно сопоставить волну, длина которой  $\lambda = h/p = h/mv$ .*

Волновые свойства характеризуются длиной волны:

$$\lambda_B = \frac{h}{p} \quad (1.1) \quad \text{и частотой} \quad \nu_B = \frac{E}{h} \quad (1.2)$$

где  $p = mv$  - импульс движущейся частицы,  $h$  - постоянная Планка,  $E$  - энергия частицы. Эти волны называются *волнами де Бройля*.

Аналогично уравнению электромагнитной волны, предполагается, что уравнение плоской волны де Бройля для свободной частицы имеет вид:

$$\psi = A \cos\left(\frac{2\pi}{h}(Et - pz)\right) \quad (1.3)$$

Связующей величиной между волновыми и корпускулярными свойствами является **постоянная Планка  $h$** , которая выступает как **мера дискретности**. Попытки найти модель частица-волна на основе законов классической физики, например, используя волновой пакет или цуг волн, не увенчалась успехом. Электрон, как и другие микрочастицы, не является волной в классическом смысле, поэтому волны де Бройля нельзя представлять в виде волнового пакета. По современным представлениям волны де Бройля интерпретируются с точки зрения **статистической физики: квадрат амплитуды волны де Бройля равен плотности вероятности нахождения частицы в данный момент времени в заданной точке пространства**. Поэтому волны де Бройля иначе называют волнами вероятности.

*Экспериментальным подтверждением гипотезы де Бройля являются:*

- дифракция пучка электронов (а также отдельных электронов) на кристаллической решетке;
- дифракция нейтронов, протонов, атомных и молекулярных пучков.

### Дифракция электронов.

*Дифракция частиц – это упругое (т.е. происходящее без потери энергии) рассеяние микрочастиц (электронов, протонов, нейтронов, атомов и т.п.) кристаллами или молекулами жидкостей и газов с возникновением из начального пучка частиц дополнительных отклоненных пучков.* Направление и интенсивность этих пучков зависят от строения рассеивающего объекта.

С целью обоснования гипотезы де Бройля были проведены специальные эксперименты американскими физиками **К. Девиссоном и Л. Джермером** в **1927** г., английским физиком **Джорджем Томсоном** и советским физиком **Тартаковским** в **1928** г. К. Девиссону и Дж. Томсону в 1937 г. за работы по дифракции электронов присуждена **Нобелевская премия**. Первые опыты проводились с электронами малых энергий (до 100 эВ).

В опытах Девиссона и Джермера поток электронов, излучаемый электронной пушкой  **$P$** , направлялся на поверхность монокристалла  **$M$**  (например, никеля) под углом скольжения  **$\theta$**  (рис. 1.1).

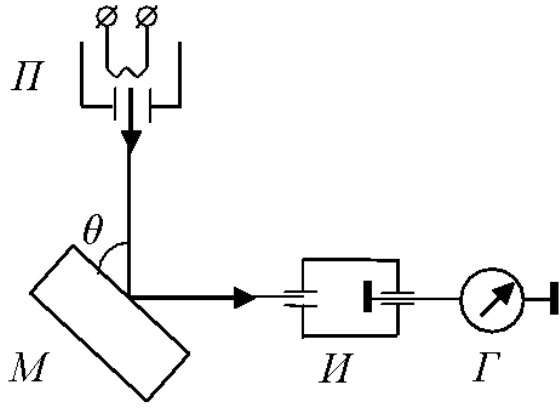


Рис. 1.1 Схема опыта Девиссона-Джермера

С помощью ионизационной камеры **И** измеряется поток отраженных электронов тоже под углом  **$\theta$** . Импульс электронов определяется по величине ускоряющего напряжения  $U$ :

$$p = m_e v \quad \text{и} \quad m_e v^2 = 2eU ,$$

поэтому  $p = \sqrt{2m_e eU}$

**$m_e$**  – масса электрона,  **$e$**  – заряд электрона.

Длина волны де Бройля:

$$\lambda_{\text{Д}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}$$

Согласно формуле **Вульфа-Бреггов** имеет место селективное отражение, определяемое условием:

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad , \quad (1.4)$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots$ ,  $d$  – расстояние между атомными плоскостями кристалла. Если гипотеза де Бройля верна, то должно наблюдаться селективное отражение электронов, определяемое аналогичным условием, но вместо длины волны должна быть длина волны де Бройля  $\lambda_B$ , т. е.

$$2d \sin \theta = \frac{mh}{(2m_e eU)^{1/2}} \quad . \quad (1.5)$$

Таким образом, при целочисленных значениях

$$m = \frac{2d \sin \theta (2em_e U)^{1/2}}{h} = BU^{1/2}$$

должны наблюдаться максимумы по току. На опыте действительно наблюдались максимумы. При малых значениях  $m$  ( $m < 6$ ), максимумы оказываются несколько смещенными относительно расчетных значений, которые указаны на рис. 1.2 стрелками.



Это объясняется тем, что скорость электронов определяется не только ускоряющим напряжением  $U$ , но и разностью потенциалов на границе кристалла  $U_0$ , вследствие чего

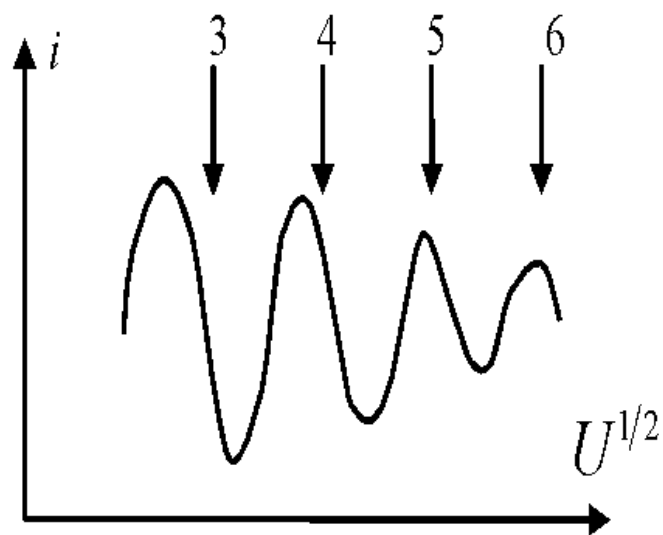


Рис. 1.2 Зависимость тока в ионизационной камере от напряжения

$$\lambda'_D = \frac{h}{\sqrt{2em(U + U_0)}}$$

тогда

$$m = \frac{BU^{1/2}}{\sqrt{1 - \frac{U_0 B^2}{m^2}}}$$

Если  $\frac{U_0 B^2}{m^2} \ll 1$ , то  $m \approx BU^{1/2}$ .

Опыты Девиссона и Джермера подтвердили существование волновых свойств электронов.

Вторая группа опытов проводилась **Томсоном и Тартаковским** с использованием электронов большой энергии – свыше  **$10^3$  эВ** (рис.1.3). Узкий сфокусированный поток электронов с энергией около **0,1 МэВ** направляется на тонкую металлическую фольгу  **$\Phi$** , за которой устанавливается фотопластинка  **$\Pi$** .

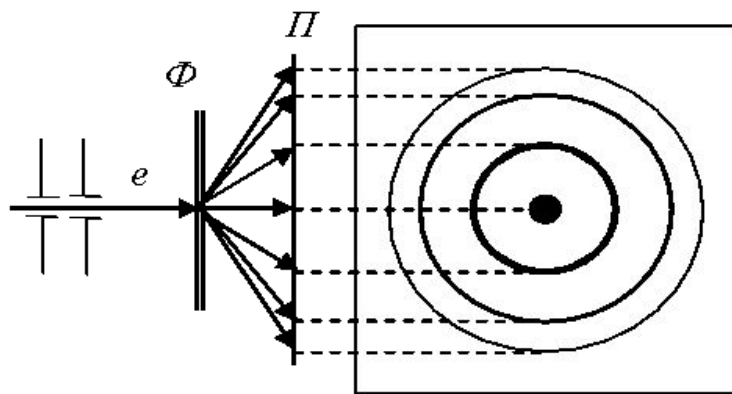


Рис. 1.3 Дифракция электронов (опыты Томсона и Тартаковского)

Опыт проводится в вакууме. В результате дифракции электронов на фотопластинке образуется система колец, аналогичная дифракционной картине рентгеновских волн с соответствующей длиной.

В дифракции электронов наиболее ярко выделяется их волновая природа. Идея де Бройля нашла своё первое подтверждение именно в экспериментах по дифракции электронов (**1927 г**). Позже наблюдалась дифракция других частиц.

Пучок движущихся электронов описывается плоской монохроматической волной  $\varphi = e^{ikx}$ , распространяющейся вдоль оси **x** с единичной амплитудой и волновым вектором **k**, причем модуль  $\mathbf{k} = 2\pi/\lambda = 2\pi p/h$ . Тогда действующая длина волны  $\lambda$  определяется массой **m** и энергией **E** электрона:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

Проходя через объект, строение которого и характер его взаимодействия с электроном определяет вид функции  $U(x,y,z)$ , начальная волна испытывает рассеяние. Решение волнового уравнения даст описание дифракционной картины, так что  $|\varphi|^2$  определяет вероятность попадания частицы в данную точку.

## 2. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.

Двойственная природа частиц вещества ставит вопрос о границах применимости понятий классической физики для микрообъектов.

**В классической механике** – каждая частица движется по вполне определенной траектории и в любой момент времени  $t$  ее координаты и импульс определены точно.

**Микрочастицы**, ввиду их волновых свойств, отличаются от классических частиц. Они, в частности, не имеют траектории. Действительно, нелепо говорить, например, «длина волны в данной точке». То есть частица с определенным импульсом имеет полностью неопределенную координату, а если фиксирована координата, то неопределенным является импульс.

О траекториях микрочастиц можно говорить в предельном случае, когда можно пренебречь волновыми свойствами. Это условие аналогично условию перехода от волновой оптики к геометрической, а именно, отношение:

$$\frac{\lambda_B}{R} \ll 1,$$

где  $\lambda_B$  – длина волны де Бройля,  $R$  – характерные размеры области движения (например, расстояние между отклоняющими пластинами осциллографа).

Рассмотрим следующую ситуацию: перпендикулярно координатной плоскости  $XU$  расположена узкая длинная щель шириной  $\Delta y$  (рис. 3.1). На нее падает параллельный пучок электронов с одинаковыми скоростями  $v_x$ . Импульс каждого электрона  $p_x$ . Длина волны де Бройля определяется как

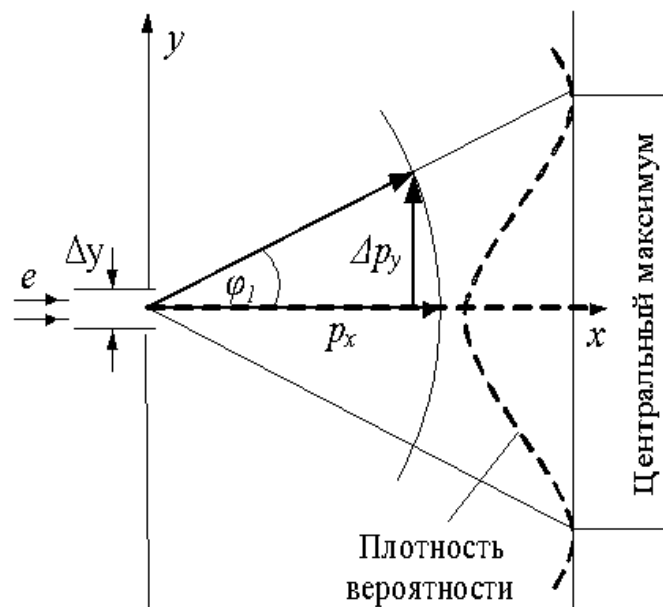


Рис. 3.1 Иллюстрация соотношения неопределенностей

$$\lambda_B = \frac{\hbar}{p_x}$$

В результате дифракции электронного пучка расщепляется. Главные минимумы  $\pm 1$  порядка определяются условием:

$$\Delta y \cdot \sin \varphi = \pm \lambda_B.$$

Модули импульсов дифрагированных электронов остаются равными  $p_y$ , но их направления изменяются, вследствие чего проекции импульсов на ось  $OY$  отличны от нуля  $\Delta p_y \neq 0$ .

Максимальное значение проекции в пределах минимумов  $\pm 1$ -го порядка равно (рис. 3.1):

$$\Delta p_y = p_x \sin \varphi_1 = \frac{p_x \lambda_D}{\Delta y} = \frac{h}{\Delta y}.$$

Отсюда следует, что  $\Delta p_y \cdot \Delta y = h$ .

Две величины, для которых погрешность измерения одной величины зависит от погрешности измерения другой величины, называются *сопряженными*. В рассмотренном выше примере величины  $p_y$  и  $y$  являются сопряженными. Если координата  $y$  измеряется точно, т.е.  $\Delta y \rightarrow 0$ , то  $\Delta p_y \rightarrow \infty$ , т.е. значение проекции  $p_y$  определить невозможно.

Обусловленные волновыми свойствами частиц погрешности измерения сопряженных величин называются неопределенностями.

**В. Гейзенбергом в 1927 г.** был сформулирован принцип неопределенностей: *произведение неопределенностей двух сопряженных величин не может быть меньше постоянной Планка:*

$$\Delta p_y \cdot \Delta y \geq \hbar \quad (3.1)$$

**Принцип неопределенности Гейзенберга.**

*Невозможно одновременно с одинаковой степенью точности объект микромира характеризовать его координатой  $(x, y, z)$  и импульсом  $(p_x, p_y, p_z)$ . Произведение их неопределенностей не может быть меньше постоянной Планка  $\hbar = h/2\pi$ :*

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

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar \quad \Rightarrow \text{если, например, } \Delta x = 0, \text{ то } \Delta p_x \rightarrow \infty.$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar$$

Если соотношение неопределенностей записать в виде:

$$\Delta x \cdot \Delta v \geq \hbar/m \quad (\Delta p = m \cdot \Delta v),$$

то из него видно, что чем больше масса, тем меньше неопределенность координаты и скорости. Можно видеть, что для макрочастицы (даже для пылинки массой  $m = 10^{-12}$  кг) при  $\Delta x \sim$  линейных размеров пылинки неопределенность  $\Delta v$  ничтожна. Таким образом, для макрочастиц волновые свойства не играют никакой роли: координата и импульс частицы могут быть измерены с любой степенью точности.



Энергия и время тоже являются сопряженными величинами. Произведем замену переменных в (9.10):

$$\Delta y = v_y \Delta t, \quad \Delta x_{\text{фот}} \approx \frac{\Delta x_{\text{эл}}}{\beta}, \quad \text{тогда}$$

$$\Delta x_{\text{фот}} \Delta x_{\text{эл}} \geq \hbar \quad (3.2)$$

Таким образом, система, имеющая среднее время жизни  $\Delta t$  не может быть охарактеризована определенной энергией.

Так как  $E = h\nu$ , то  $\Delta E = h\Delta\nu$ , то есть линии в спектрах излучения имеют разброс по частоте (ширина линий), зависящий от времени жизни атома в возбужденном состоянии.

**Примечание.** Следует заметить, что между обычными погрешностями, которые имеют место при любых измерениях, и неопределенностями сопряженных величин имеется существенное различие: если первые в принципе можно сделать как угодно малыми за счет совершенствования измерительной техники, то неопределенности сопряженных величин не зависят от технических средств измерения: неопределенности обусловлены волновыми свойствами.

**Вывод.** Соотношения неопределенностей показывают, насколько применимы к микромиру понятия классической механики.