

Кислицын А.А.
Физика атома, атомного
ядра и элементарных
частиц

7 (1). Волновая функция
и ее физический смысл

ГИПОТЕЗА ВОЛНОВОГО ПАКЕТА

Итак, реальность волновых свойств микрочастиц подтверждена прямыми экспериментами. Возникает вопрос о физическом смысле волн де-Бройля.

На первых порах развития квантовой механики была сделана попытка рассматривать микрочастицы как волновые пакеты. В настоящее время общепринятой является другая - статистическая - интерпретация физического смысла волн де-Бройля. Почему пришлось отказаться от гипотезы волнового пакета? Есть 3 серьезных возражения против этой гипотезы.

1-е возражение: неустойчивость волнового пакета

Фазовая скорость

$$v = \frac{v}{k} = \frac{hv}{hk} = \frac{E}{p} = \frac{\sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}}{p} = c \sqrt{1 + \left(\frac{m_0 c}{p} \right)^2}$$

зависит от импульса, и, значит, от волнового числа $k = p/h$. Поэтому каждая из монохроматических волн, входящих в пакет, распространяется со своей фазовой скоростью, и пакет "расплывается" за время

$$\Delta t \approx \frac{m_0}{k} (\Delta x)^2$$

Для электрона это примерно 10^{-26} секунды, т.е. практически мгновенно. Это первое возражение против гипотезы волнового пакета.

Второе возражение против гипотезы волнового пакета заключается в следующем. Любая монохроматическая волна при прохождении через границу раздела двух сред разделяется на 2 волны: прошедшую и отраженную. Волновой пакет представляет собой линейную суперпозицию (т.е. сумму) монохроматических волн, поэтому, проходя через границу раздела он также должен разделиться на две части, т.е. на 2 частицы: прошедшую и отраженную. Но такое представление противоречит опытному факту неделимости элементарных частиц. Например, электрон при прохождении границы раздела сред не может разделиться. Он либо отражается от границы, либо проходит во вторую среду.

Третье возражение рассмотрим позднее.

Эти возражения указывают на несостоятельность гипотезы волнового пакета. Но такое заключение справедливо лишь для волн, описываемых линейными уравнениями. В некоторых явлениях, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями, возможны уединенные волны ("солитоны"), которые сосредоточены в малой области пространства, и распространяются на большие расстояния без изменения своей формы и размеров. Поэтому до сих пор не прекращаются попытки найти такие уравнения и их решения в виде солитонов, которые можно было бы применить к электронам и к другим элементарным частицам. Однако удовлетворительных результатов на этом направлении пока не получено.

Статистическое истолкование связи между волнами и частицами.

Современная точка зрения на связь между волнами и частицами заключается в статистическом истолковании: квадрат амплитуды волны в данном месте есть мера вероятности нахождения частицы в данном месте.

Запишем волну де-Бройля в виде

$$\psi(r, t) = \psi_0 e^{-2\pi i(vt - kr)}$$

где ψ_0 – амплитуда волны; $\nu = E/h$ – частота;
 $k = 1/\lambda = p/h$ – волновой вектор. Вероятность нахождения частицы в данной точке пространства, согласно сказанному, определяется квадратом амплитуды волны:

$$dW = |\psi|^2 dV = \psi(r, t) \cdot \psi^*(r, t) dV$$

или

$$|\psi|^2 = \frac{dW}{dV} \quad (7.1)$$

То, что частица где-то находится, есть достоверность т.е.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi|^2 dV = 1$$

или

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^* \psi dV = 1$$

(7.2)

Это равенство называется условием нормировки, а функции ψ , удовлетворяющие этому условию, называются нормированными.

Кроме того, волновая функция, по своему смыслу, должна удовлетворять и другим естественным условиям: она должна быть однозначной, конечной и непрерывной. Эти требования накладывают некоторые ограничения на волновые функции, точнее, на выбор некоторых параметров, входящих в волновую функцию.

Итак, современная физика рассматривает волны де-Бройля как волны вероятности.

При этом возникает вопрос: не обусловлен ли вероятностный характер описания поведения частиц и их волновые свойства, тем, что мы имеем дело с большим количеством частиц? Иначе говоря, обладает ли волновыми свойствами каждая отдельная частица или волновые свойства присущи только большой совокупности частиц?

Опыты Фабриканта, Бибермана, Сушкина (1949 год, СССР)

Ответ на этот вопрос дали опыты под рук. В.А.Фабриканта. Интенсивность пучка была примерно в 10^7 раз слабее, чем в опытах Томсона. При этом средний промежуток времени между двумя последовательными прохождениями электрона через поликристаллическую пленку был примерно в 30 000 раз больше, чем время прохождения электрона через прибор.

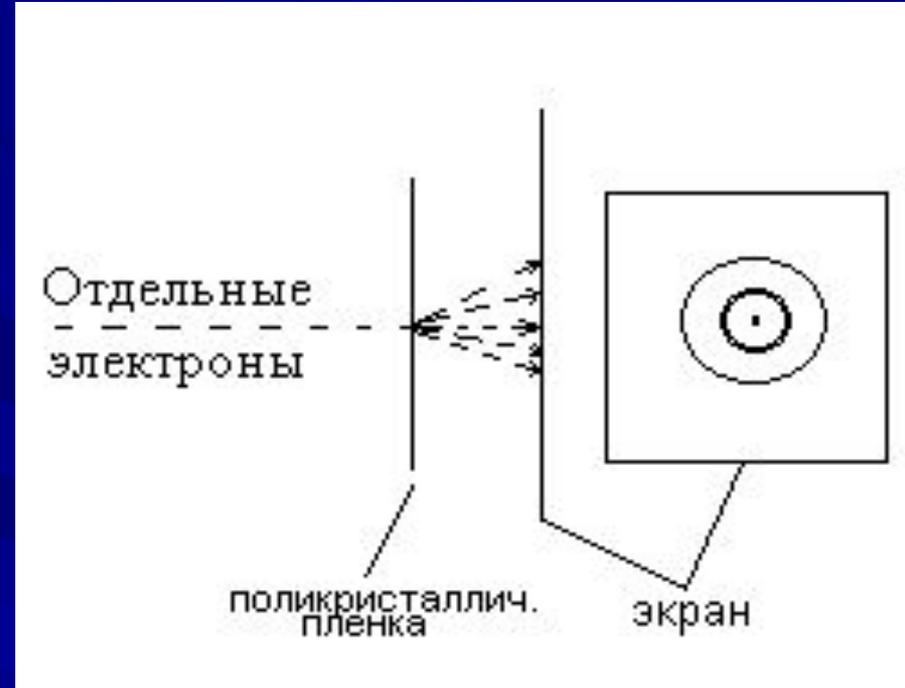


Схема этих опытов аналогична рассмотренным выше опытам Томсона, но использовался электронный пучок очень малой интенсивности.

Другими словами, на поликристаллическую пластинку в каждый данный момент времени падала не совокупность электронов, а отдельный электрон. Однако и в этих опытах дифракционная картина, возникающая за достаточно длительный интервал времени, ничем не отличалась от обычной, т.е. той, что получается с интенсивными пучками.

Это означает, что волновыми свойствами обладает каждая отдельная частица.