

протонам, атомам и т. д., причём количественные соотношения между волновыми и корпускулярными свойствами частиц те же, что и установленные ранее для фотонов. А именно, если частица имеет энергию  $\mathcal{E}$  и импульс, абс. значение к-рого равно  $\lambda$ , то с ней связана волна частоты  $\nu = \mathcal{E}/h$  и длины  $\lambda = h/p$ , где  $h \approx 6 \cdot 10^{-27}$  эрг·с — постоянная Планка. Эти волны и получили назв. В. де Б.

Для частиц не очень высокой энергии ( $v \ll c$ )  $\lambda = h/mv$ , где  $m$  и  $v$  — масса и скорость частицы. Следовательно, длина В. де Б. тем меньше, чем больше масса частицы и её скорость. Напр., частице с массой в 1 г, движущейся со скоростью 1 м/с, соответствует В. де Б. с  $\lambda \approx 10^{-18}$  Å, что лежит за пределами доступной наблюдению области. Поэтому волновые свойства несущественны в механике макроскопич. тел. Для электронов с энергиями от 1 эВ до 10 000 эВ длины В. де Б. лежат в пределах от 10 Å до 0,1 Å, т. е. в интервале длин волн рентг. излучения. Поэтому волновые свойства электронов должны проявиться, напр., при их рассеянии на тех же кристаллах, на к-рых наблюдается дифракция рентгеновских лучей.

Первое эксперим. подтверждение гипотезы де Бройля получено в 1927 в опытах К. Дэвиссона (С. Davisson) и Л. Джермера (L. Germer). Пучок электронов ускорился в электрич. поле с разностью потенциалов 100—150 В (энергия таких электронов 100—150 эВ, что соответствует  $\lambda \approx 1$  Å) и падал на кристалл никеля, играющий роль пространственной дифракц. решётки. Было установлено, что электроны дифрагируют на кристалле, причём именно так, как должно быть для волн, длина к-рых определяется соотношением де Бройля. Волновые свойства электронов, нейтронов и др. частиц, а также атомов и молекул не только надёжно доказаны прямыми опытами, но и широко используются в установках с высокой разрешающей способностью, так что можно говорить об инженерном использовании В. де Б. (см. Дифракция частиц).

Подтверждённая на опыте идея де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме микрочастиц принципиально изменила представления об облике микромира. Поскольку всем микрообъектам (по традиции за ними сохраняется термин «частицы») присущи и корпускулярные и волновые свойства, то, очевидно, любую из этих «частиц» нельзя считать ни частицей, ни волной в классич. понимании этих слов. Возникла потребность в такой теории, в к-рой волновые и корпускулярные свойства материи выступали бы не как исключаяющие, а как взаимно дополняющие друг друга. В основу такой теории — волновой, или квантовой, механики — и легла концепция де Бройля, уточнение к-рой привело к вероятностной интерпретации В. де Б. В 1926 М. Борн (М. Born) высказал идею о том, что волновым законом подчиняется величина, описывающая состояние частицы. Она была названа волновой функцией ( $\psi$ ). Квадрат модуля  $\psi$  определяет вероятность нахождения частицы в разл. точках пространства в разные моменты времени. Волновая ф-ция свободно движущейся частицы с точно заданным импульсом и является В. де Б.; в частном случае движения вдоль оси  $x$  она имеет вид плоской волны:

$$\psi(x, t) \sim \exp \left[ \frac{i}{\hbar} (px - \mathcal{E}t) \right]$$

(где  $t$  — время,  $\hbar = h/2\pi$ ). В этом случае  $|\psi|^2 = \text{const}$ , т. е. вероятность обнаружить частицу во всех точках одинакова.

Лит. см. при ст. Квантовая механика. В. И. Григорьев. **ВОЛНЫ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ** в металлах — периодич. перераспределение в пространстве электронного, ионного и суммарного зарядов, обусловленное малыми периодич. смещениями ионов около их положений равновесия в кристаллич. решётке [1]. Состояние с В.з.п. обнаруживается по рассеянию рентг. лучей, быстрых электронов и нейтронов; для него характерно присутствие дифракц. пиков исходной решётки

и более слабых пиков «спутников» около этих осн. дифракц. пиков [1] (см. Рентгеновский структурный анализ, Электронография). Состояние с В.з.п. возникает при охлаждении металла ниже нек-рой критич. темп-ры. Фазовый переход в состояние с В.з.п. проявляется в изменении температурной зависимости сопротивления, постоянной Холла, магн. восприимчивости и в модификации электронного спектра металлов.

Период В. з. п. может быть соизмеримым с периодом исходной решётки, и тогда говорят о соизмеримых В. з. п., в отличие от несоизмеримых В. з. п. Как правило, при несоизмеримости период решётки зависит от темп-ры и возможны структурные переходы к соизмеримым В. з. п.

Переходы в состояние с В. з. п. обнаружены в металлах с сильной анизотропией электронного спектра. Эта анизотропия может иметь двумерный характер, когда электроны двигаются свободно вдоль плоскости (их волновые функции Ванье на разных узлах перекрываются), но между плоскостями их движение затруднено (слабое перекрытие электронных волновых ф-ций Ванье). К таким соединениям относятся, напр., слоистые соединения диалкогенидов переходных металлов типа  $\text{TaS}_2$ ,  $\text{NbSe}_2$  [1] (см. Квазидвумерные соединения). Анизотропия одномерного типа реализуется в соединениях со структурной цепочкой [2], напр. в органических проводниках [3] (см. Квазидвумерные соединения).

Предполагается, что происхождение переходов в состояние с В.з.п. во всех этих системах связано с особенностями геометрии ферми-поверхности электронов. Теория показывает, что если достаточно большие участки поверхности Ферми совмещаются при параллельном переносе на вектор  $\mathcal{Q}$ , то поляризуемость системы электронов в периодич. электрич. поле решётки  $E = \text{gr}(E_0 e^{i\mathcal{Q}r})$  с волновым вектором  $\mathcal{Q}$  ( $r$  — радиус-вектор узла решётки) велика и решётка становится неустойчивой относительно появления периодич. искажений с волновым вектором  $\mathcal{Q}$ . Эти искажения формируются ниже критич. темп-ры и приводят к появлению энергетич. щели в электронном спектре на совмещающихся участках поверхности Ферми, т. е. к полной или частичной потере металлич. свойств. Степень совмещаемости, как и степень потери металлич. свойств (диэлектризации), увеличивается по мере увеличения анизотропии электронного спектра. В квазидвумерных соединениях (слоистых) появление энергетич. щели на всей поверхности Ферми невозможно, и они сохраняют при переходе в состояние с В. з. п. металлич. свойства или в случае больших смещений атомов становятся полуметаллами. В квазидвумерных соединениях площадь совмещающихся отл. участков поверхности Ферми больше и энергетич. щель может появиться на всей поверхности Ферми. При этом в состоянии с В. з. п. квазидвумерные соединения становятся диэлектриками (Найерса переход, [4, 5]).

Образующееся диэлектрич. состояние является необычным: эл.-магн. поле может возбуждать низкочастотные фононы, для к-рых характер движения частиц, составляющих решётку, иной, чем в акустич. ветви колебаний кристаллической решётки. Эти колебания наз. Фрелиховской или коллективной модой. В состоянии с несоизмеримыми В. з. п. в идеальном кристалле спектр этой моды начинается с 0 (осн. состояние вырождено по фазе В. з. п.). Фрелиховская мода соответствует периодич. колебаниям фазы В. з. п. с малой амплитудой; в этих движениях участвуют как электроны, так и ионы решётки, причём электроны обеспечивают оптич. активность моды, а ионы — низкую частоту [6]. Примеси фиксируют фазу В. з. п., приводя к конечной, но большой поляризуемости электронной системы. Аналогично действуют эффекты соизмеримости, при этом спектр фрелиховской моды начинается с конечной частоты. Кроме фрелиховской моды, для состояния с В. з. п. характерны солитонные возбуждения, к-рые представляют собой резкие изменения фазы