

состояние многоэлектронной системы, характеризующееся тем, что одно из одноэлектронных состояний (заполнением  $k$ -рых сформировано многоэлектронное состояние) свободно. Энергия  $D$ ,  $\varepsilon_D$  отсчитывается от энергии основного состояния ( $\varepsilon_D = 0$ ). Если система электронов — вырожденный идеальный газ, то равновесная ф-ция распределения  $D$ ,  $N_D(\varepsilon)$  — ф-ция Ферми (см. *Ферми—Дирака распределение*):

$$N_D(\varepsilon) = 1 - \frac{1}{e^{(\varepsilon - \varepsilon_F)/kT} + 1} = \frac{1}{e^{\varepsilon_D/kT} + 1}.$$

Здесь  $T$  — темп-ра,  $\varepsilon_F$  — ферми-энергия;  $\varepsilon_D = \varepsilon_F - \varepsilon > 0$ ;  $\varepsilon < \varepsilon_F$ .

При образовании  $D$ , освободивший место электрон может оказаться свободным, а может перейти в связанное (локализованное) состояние (напр., при образовании  $D$ , путём введения в полупроводник акцепторов).  $D$ , также может образоваться не только в свободном состоянии, но и в связанном (напр., на донорах).

2) Свободное при  $T=0K$  состояние в разрешённой энергетич. зоне с отрицат. эффективной массой  $m^* < 0$ . Существование  $D$ , (в этом смысле) обычно обусловлено пересечением зон в металлах и полуметаллах или попаданием в валентную зону полупроводника энергетич. уровней акцепторов (состояния с  $m^* < 0$  расположены вблизи «шотолка» валентной зоны).  $D$ , вводит в тех случаях, когда ферми-поверхность окружает свободные от электронов состояния (поверхность Ферми заполнена  $D$ ).

Осн. черты динамики  $D$ , (в обоих смыслах): в магн. поле  $D$ , движется как положительно заряженная частица; с ростом энергии её скорость уменьшается. Возможность описания движения электронной системы проводников с помощью  $D$ , обеспечивается тем, что электронный ток полностью заполненной зоны равен нулю.

Введение  $D$ , помогает понять многие свойства ряда веществ: обратные знаки константы Холла (см. *Гальваномагнитные явления*), термоэдс (см. *Термоэлектрические явления*) и др.

Лит. см. при ст. *Зонная теория, Полупроводники.*

М. И. Каганов.

**ДЫРОК ТЕОРИЯ ДИРАКА** — теоретич. модель вакуума. ф-н з и ч е с к о г о, предложенная в 1930 П. А. М. Дираком (Р. А. М. Dirac) для устранения трудностей релятивистской квантовой теории электрона (см. *Дирака уравнение*); привела к предсказанию существования *античастиц*, процессов *рождения пар* и их *аннигиляции* и т. д., а также к представлению о вакууме как об особом типе материальной среды (см. *Поляризация вакуума*).

Полная система решений ур-ния Дирака содержит наряду с имеющими физ. смысл состояниями с положит. энергией  $\varepsilon$  также и отделённые от них энергетич. щелью  $\Delta$  состояния с отрицат. энергией (в частности, для свободной частицы с массой  $m$  и импульсом  $p$  энергия  $\varepsilon = \pm c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$ ,  $\Delta = 2mc^2$ ). Это ведёт к ряду следствий, противоречащих опыту: нестабильности физ. состояний с  $\varepsilon > 0$  за счёт переходов частицы в состояния с  $\varepsilon < 0$ , «самоускорению» взаимодействующих частиц разного знака энергии и т. д. Безуспешность попыток избавиться от состояний с  $\varepsilon < 0$  для одночастичного ур-ния Дирака заставила пересмотреть само понятие вакуума как состояния, в к-ром нет частиц. Это и привело к Д. т. Д. Её идея была подказана квантовой теорией валентности, в соответствии с к-рой заполненные электронные оболочки атомов в хим. смысле ненаблюдаемы, а проявляет себя лишь избыток или недостаток электронов по отношению к таким оболочкам.

Первоначально Д. т. Д. формулировалась применительно к электрону, но затем была распространена на др. типы ферми-частиц (мюон, нуклон и др.). Её основу составляют след. постулаты. а) В состоянии вакуума все уровни с  $\varepsilon < 0$  заполнены частицами, а все уровни

с  $\varepsilon > 0$  свободны. Такое распределение частиц считается ненаблюдаемым (несмотря на бесконечную величину его плотности энергии, плотности заряда и т. д.), играв роль начала отсчёта для физ. величин. Поэтому наблюдаемое значение физ. величины  $A$  для к.-л. системы равно разности  $A$  (система + вакуум) —  $A$  (вакуум). б) Заполненный уровень с  $\varepsilon > 0$  воспринимается наблюдателем как частица, а свободный уровень («дырка») с  $\varepsilon < 0$  — как *античастица*. Дырке в электронном вакууме соответствует позитрон (массы частицы и дырки равны, а заряды равны и противоположны по знаку). в) Фотон с энергией, большей  $\Delta$ , способен возбуждать вакуум, переводя частицу из состояния с  $\varepsilon < 0$  в состояние с  $\varepsilon > 0$ . Это соответствует процессу рождения пары частица-античастица. Их аннигиляция отвечает переходу частицы из состояния с  $\varepsilon > 0$  в свободное состояние с  $\varepsilon < 0$ , сопровождаемому излучением фотона.

Д. т. Д. устранила трудности одночастичного ур-ния Дирака (в частности, стабильность физ. состояния частицы связана с тем, что её переход в состояния с  $\varepsilon < 0$  запрещён принципом Паули). Все следствия Д. т. Д. — как качественные (существование античастиц, процессы рождения и аннигиляции пар, поляризация вакуума), так и многие количественные подтвердились экспериментально.

В аппарате совр. квантовой теории поля Д. т. Д. в её первонач. форме не используется (за исключением относительно редких применений, напр. для наглядного расчёта нелинейных вакуумных эффектов; см. *Лагранжиан эффективный*). Применяются более компактные формулировки, равноценные Д. т. Д.: лагранжиан в виде *нормального произведения* операторов поля в сочетании с требованием *перекрёстной симметрии*, *Грина функции* с возвратным во времени движением частицы и др.

Физ. картина, отвечающая Д. т. Д., и сходный матем. аппарат используются в физике *полупроводников*, где аналогом областей  $\varepsilon < 0$  и  $\varepsilon > 0$  служат соответственно валентная зона и зона проводимости, аналогом  $\Delta$  — ширина разделяющей их запрещённой зоны, аналогом рождения пар фотонами — рождение частиц и дырок под действием световой накачки. Связанному состоянию электрона и дырки — *экситону* соответствует в физике высоких энергий *позитроний* — связанное состояние электрона и позитрона. В 1968 была предсказана и в 70-х гг. обнаружена новая форма вещества — *электронно-дырочная жидкость*. Соответствующий аналог в физике высоких энергий — самосвязанная относительно плотная система электронов и позитронов в присутствии световой накачки — пока неизвестен.

Лит.: Дирак П. А. М., Теория позитрона, в кн.: Атомное ядро, Л.—М., 1934; е г о ж е, Развитие квантовой теории, «Природа», 1972, № 3, с. 68.

Д. А. Киржич.

**ДЮЛОНГА И ПТИ ЗАКОН** — эмпирич. правило, согласно к-рому молярная *теплоёмкость* при пост. объёме для всех простых твёрдых тел одинакова и составляет прибл. 25 Дж/моль·К. Установлен в 1819 франц. физиками П. Дюлонгом (P. L. Dulong) и А. Пти (A. Th. Petit). Д. и П. з. может быть выведен из закона равномерного распределения колебат. энергии по степеням свободы, согласно к-рому на каждую степень свободы колебат. движения приходится энергия  $kT$ , где  $T$  — абс. темп-ра. Поскольку число колебательных степеней свободы у кристалла, содержащего  $N$  атомов ( $N$  — число Авогадро), равно  $3N$  (см. *Динамика кристаллической решётки*), то ср. энергия теплового движения в кристалле, содержащем 1 моль вещества, составляет  $\varepsilon = 3NkT$ , а соответствующая молярная теплоёмкость равна  $\partial\varepsilon/\partial T = c_V = 3Nk = 24,9$  Дж/моль·К.

Д. и П. з. удовлетворительно выполняется для большинства хим. элементов и простых соединений при комнатной темп-ре. При понижении темп-ры теплоёмкость падает гораздо ниже значения, даваемого Д. и П. з., стремясь к нулю как  $T^3$  у диэлектриков и как  $T$  — у металлов. Отклонения от Д. и П. з. при низких