

мости с шириной, пропорциональной малому отношению плотности электронных состояний в зонах проводимости и валентной [2]. Донорные же примеси в Б. п. с  $m_0^* \ll m_d^*$  таких квазисвязанных уровней не образуют.

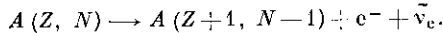
При наложении на Б. п. анизотропных воздействий (одноосного давления) или квантующего магн. поля в их электронном спектре возникает запрещённая зона, что проявляется в росте электросопротивления, коэф. Холла (см. *Холла эффект*), изменении оптич. характеристик и т. д.

Б. п. со случайным вырождением зоны проводимости и валентной зоны обладают ненарабоч. спектром носителей заряда с очень малыми эффективными массами. Следствием этого является высокая подвижность электронов и дырок, приводящая, в частности, к значит. величине *магнетосопротивления*, коэф. Нернста—Эттингсхаузена (см. *Нернста—Эттингсхаузена эффект*) и нек-рых др. кинетич. параметров.

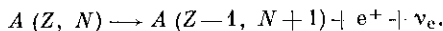
*Лит.:* 1) Цидильковский И. М., Зонная структура полупроводников, М., 1978; 2) Гельмонт В. Л., Иванов-Омский В. П., Цидильковский И. М., Электронный энергетический спектр бесцелевых полупроводников, «УФН», 1976, т. 120, с. 337; 3) Берченко Н. И., Пашковский М. В., Теллурид ртути — полупроводник с нулевой запрещённой зоной, там же, 1976, т. 119, с. 223.

С. Д. Бениславский.

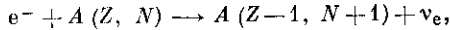
**БЕТА-РАСПАД** ядер ( $\beta$ -распад) — один из 3 осн. типов *радиоактивности*. При электронном ( $\beta^-$ ) распаде один из нейтронов ядра превращается в протон с испусканием электрона и электронного антинейтрино  $\bar{\nu}_e$ :



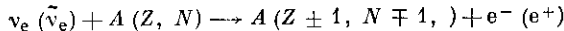
Здесь  $A$  — массовое число,  $Z$  — заряд ядра,  $N$  — число нейтронов. При позитронном ( $\beta^+$ ) распаде один из протонов ядра превращается в нейтрон с испусканием позитрона и электронного нейтрино  $\nu_e$ :



С Б.-р. тесно связаны т. н. о б р а т н ы е  $\beta$ -п р о ц е с с ы: захват электрона с  $K$ -оболочки атома ( $K$ -захват) или менее вероятный захват с  $L$ - и др. оболочек (*электронный захват*):



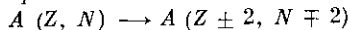
а также о б р а т н ы й  $\beta$ -р а с п а д:



(подробнее см. *Нейтрино*).

Б.-р. является проявлением фундаментального *слабого взаимодействия* элементарных частиц. Согласно совр. представлениям, Б.-р. обусловлен превращениями *кварков*: при  $\beta^-$ -распаде один  $d$ -кварков нуклона превращается в  $u$ -кварк, при  $\beta^+$ -распаде происходит обратное превращение.

Б.-р. возможен в том случае, когда разность масс начального  $N$  и конечного  $N'$  ядер превышает сумму масс электрона  $m_e$  и нейтрино  $m_\nu$ . Всегда, когда энергетически возможен  $\beta^+$ -распад, возможен и электронный захват. В ряде случаев может происходить т. н. *двойной бета-распад*:



с испусканием двух  $\beta$ -частиц и нейтрино или без испускания нейтрино.

Энергия, выделяющаяся при Б.-р., распределяется между электроном, нейтрино и конечным ядром; подавляющая часть приходится на долю лёгких частиц. Поэтому спектр испускаемых  $\beta$ -частиц непрерывен, их кинетич. энергия принимает значения от 0 до нек-рой граничной энергии  $E_0$ , определяемой соотношением

$$E_0/c^2 = M(A, Z) - M(A, Z+1) - m_e - m_\nu,$$

где  $M$  — массы начального и конечного ядер.

**Сохранение пространственной чётности при Б.-р.** В 1956 Ли Цундао и Ян Чжэньин (США, [1]) предположили, что в слабых взаимодействиях, обуславливающих Б.-р., закон сохранения пространственной

чётности может нарушаться. Для проверки этой гипотезы предлагалось измерить угловые распределения электронов и позитронов при Б.-р. поляризов. ядер. При несохранении пространственной чётности угловое распределение электронов должно быть асимметрично относительно направления спина ядра. Впервые такой эксперимент выполнен в 1956 Ву Цзяньсюн с сотрудниками (США) на поляризов. ядрах  $^{60}\text{Co}$ , была обнаружена сильная асимметрия — электроны испускались в направлении, противоположном спину ядра [2].

Нарушение сохранения пространственной чётности в Б.-р. должно приводить также к отличию от 0 ср. значений продольных поляризаций  $\beta$ -частиц и нейтрино. Эксперименты показали, что при Б.-р. рождаются электроны со спинами, антипараллельными их импульсу (левовинтовые), и позитроны со спинами, параллельными импульсу (правовинтовые), причём для большинства  $\beta$ -переходов степени их поляризации равны  $\pm v/c$ . Если  $m_\nu = 0$ , то испускаемые в Б.-р. нейтрино и антинейтрино должны иметь определёл. значение проекции спина на направление импульса (*спиральность*), т. е. обладать 100%-ной продольной поляризацией. Оказалось, что при  $\beta^+$ -распаде испускаются левополяризов. нейтрино, а в  $\beta^-$ -распаде — правополяризов. антинейтрино.

**Теория Б.-р.** Основы теории Б.-р. созданы в 1934 Э. Ферми [3]. Он исходил из 4-фермионного взаимодействия нуклонов и *лептонов* по аналогии с эффективным электрон-нуклонным взаимодействием в электродинамике (рис. 1, а). Однако, в отличие от *электромагнитного взаимодействия*, к-рое является дальнегодействующим, 4-фермионное взаимодействие Ферми было

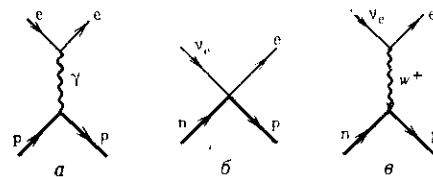


Рис. 1. Схематическое изображение (Фейнмана диаграммы): а — электромагнитного взаимодействия; б — бета-распада в теории Ферми; в — в современной теории электрослабого взаимодействия.

контактным (локальным; рис. 1, б). Гамильтониан нуклон-лептонного взаимодействия Ферми имел вид:

$$H_\beta = G_\beta (\bar{\Psi}_p \gamma_\mu \Psi_n) (\bar{\Psi}_e \gamma^\mu \Psi_\nu). \quad (1)$$

Здесь  $G_\beta$  — константа взаимодействия (константа Ферми),  $\Psi$  — 4-компонентные волновые ф-ции взаимодействующих частиц, удовлетворяющие *Дирака уравнению*,  $\bar{\Psi} = \Psi + \gamma_0$  — сопряжённые волновые ф-ции,  $\gamma^\mu$  — дираковские матрицы,  $\mu = 0, 1, 2, 3, 4$ ;  $\gamma^0 = \gamma_0$ ;  $\gamma^i = -\gamma_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

В первонач. варианте теории Ферми нуклон-лептонное взаимодействие имело чисто векторную форму. Впоследствии было выяснено, что гамильтониан слабого взаимодействия может быть комбинацией релятивистски-инвариантных скалярных, образованных из скаляра ( $S$ ), псевдоскаляра ( $P$ ), вектора ( $V$ ), аксиального вектора ( $A$ ) и тензора ( $T$ ). Открытие несохранения пространственной чётности, исследование корреляций между направлениями вылета  $\beta$ -частиц и нейтрино при Б.-р. ядер  $^{35}\text{Ag}$  и  $^6\text{He}$ , а также угловых распределений электронов и нейтрино при распаде *поляризованных нейтронов* показали, что в Б.-р. реализуется гл. обр.  $V-A$ -вариант (см. *Бета-распад нейтрона*).

Эффективный гамильтониан Б.-р., используемый в совр. расчётах, предложен Р. Ф. Фейнманом и М. Гелл-Маном в 1958 [4]. Он имеет вид:

$$H_\beta = \frac{G_\beta}{\sqrt{2}} J^\mu(x) L_\mu(x) + \text{в.с.} \quad (2)$$