

Лит.: Займан Дж. М., Электроны и фононы, пер. с англ., М., 1962; Косевич А. М., Основы механики кристаллической решетки, М., 1972; Рейсленд Дж., Физика фононов, пер. с англ., М., 1975; Маделунг О., Теория твердого тела, пер. с нем., М., 1980; Бетгер Х., Принципы динамической теории решетки, пер. с англ., М., 1986. М. И. Казанов.

**ФОНОН-ФОНОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** — см. в статьях *Динамика кристаллической решетки*, *Фонон*.

**ФОНТАНИРОВАНИЯ ЭФФЕКТ** — см. *Термомеханический эффект*.

**ФОРБУША ЭФФЕКТ** — понижение интенсивности галактич. космических лучей в Солнечной системе, обусловленное выбросом вещества из Солнца (связанным со *вспышкой на Солнце*, эруптивным *протуберанцем* или исчезающим волокном). Макс. понижение интенсивности относительно ср. уровня достигает 30% у поверхности Земли и 50% в межпланетном пространстве. Характерная длительность явления вблизи Земли — неск. суток. Эффект впервые замечен С. Форбушем (S. Forbush) в 1937. В результате выброса из Солнца увеличивается плотность плазмы *солнечного ветра* и, следовательно, напряжённость замороженного в плазму магн. поля, что и приводит к дополнит. рассеянию (экранированию) галактич. космич. лучей.

**ФОРМФАКТОР** в теории элементарных частиц — ф-ция, описывающая влияние протяжённости частицы на её взаимодействие с др. частицами и полями. Термин «Ф.» заимствован из теории рассеяния рентг. лучей (см. *Атомный фактор*), а его применение основано на наглядном представлении о том, что, напр., протон проводит часть времени в виртуальном состоянии («нейтрон +  $\pi^+$ -мезон»). Поэтому его заряд оказывается «размазанным» с нек-рой плотностью  $e\rho(r)$ . Тогда, напр., амплитуда рассеяния электрона на таком размазанном протоне отличается от амплитуды рассеяния на точечном протоне множителем, называемом Ф. протона:

$$F(q) = \int \rho(r) \exp(iqr) dV,$$

где  $q$  — передаваемый при рассеянии импульс.

В последоват. релятивистской локальной теории реальное размазывание невозможно, а строгий смысл термина Ф. в ней определяется следующим образом. Плотность энергии взаимодействия эл.-магн. поля, описываемого 4-потенциалом  $A_\mu(x)$ , со свободным фермионом, волновая ф-ция  $\Psi(x)$ , имеет вид

$$H(x) = ie\bar{\Psi}(x)\gamma^\mu\Psi(x)A_\mu(x) \equiv j_0^\mu A_\mu(x),$$

где  $\gamma^\mu$  — *Дирака матрицы*, черта означает дираковское сопряжение, а  $j_0^\mu$  наз. *электромагнитным током* свободных фермионов. Но само взаимодействие меняет оператор тока  $j_0^\mu$ . Матричный элемент эл.-магн. тока взаимодействующего протона, взятый между состояниями реального протона с 4-импульсами  $p$  и  $p'$ , с учётом релятивистской инвариантности, *Дирака уравнения* и сохранения заряда, в общем случае можно записать в виде

$$\langle p' | j_0^\mu(0) | p \rangle = (4p_0 p'_0)^{-1/2} \bar{u}(p') \{ \gamma^\mu F_1(q^2) + i\sigma^{\mu\nu} q_\nu F_2(q^2) \} u(p),$$

где  $q = p - p'$ ;  $\sigma^{\mu\nu} = (i/2)(\gamma^\mu\gamma^\nu - \gamma^\nu\gamma^\mu)$ . Входящие сюда ф-ции  $F_1(q^2)$  и  $F_2(q^2)$  наз. *электрич. и магн. Ф. протона*; о них заранее можно утверждать лишь то, что в пределе  $q \rightarrow 0$ , для длинных волн или малых передаваемых импульсов,  $F_1(0) = e$ ; где  $e$  — наблюдаемый заряд, а  $F_2(q^2) = \mu$ , где  $\mu$  — полный магн. момент протона. Для свободной частицы  $F_1(q^2) \equiv e$ , а  $F_2(q^2) \equiv \mu_0$ , где  $\mu_0$  — «нормальный» магн. момент дираковской частицы с зарядом  $e$ ,  $\mu_0 = eh/2mc$ . В системе координат, где  $q_0 = 0$ , выражения  $p_{1,2} = (2\pi)^{-3} \int dq \exp(iqr) F_{1,2}(-q^2)$  можно считать пространств. распределениями соответственно заряда и магн. момента взаимодействующей частицы. Благодаря Ф.  $F_1$  и  $F_2$  взаимодействующий протон выглядит протяжённым; однако нельзя говорить о реальном физ. размазывании протона, поскольку взаимодействующий ток остаётся локальным оператором и условие *микрорпричинности* не нарушается. Аналогично эл.-магн. Ф.  $F_1$  и  $F_2$  можно ввес-

ти мезонные Ф. нуклона, описывающие соответствующий эффект при взаимодействии реального нуклона с мезонным полем, и др. Ф.

В *нелокальной квантовой теории поля* Ф. описывает реальное размазывание частицы. В этом случае плотность энергии взаимодействия фермиона с эл.-магн. полем записывается в виде

$$H(x) = ie \int d^4y d^4z F(x, y, z) \bar{\Psi}(y) \gamma^\mu \Psi(z) A_\mu(x) = j^\mu(x) A_\mu(x).$$

Релятивистски инвариантная ф-ция  $F(x, y, z) = f[(x-y), (x-z)]$  наз. Ф. в  $x$ -представлении, а её фурье-образ

$$\tilde{f}(p, q) = \int d^4x d^4y f(x, y) \exp(-ipx - iqy)$$

наз. Ф. в  $p$ -представлении, или обрезающим множителем. Благодаря Ф. взаимодействие размазано по всей области, где  $F(x, y, z) \neq 0$ . С одной стороны, это приводит к нарушению микрорпричинности, с другой — подходящий выбор убывания  $\tilde{f}(p, q)$  при больших значениях её аргументов позволяет устранить *ультрафиолетовые расходимости*, присущие локальной теории. Для точечного взаимодействия

$$F(x, y, z) = \delta^4(x-y)\delta^4(x-z), \quad \tilde{f}(p, q) \equiv 1,$$

а ток  $j^\mu(x)$  превращается в  $j_0^\mu(x)$  — ток свободных частиц в локальной теории.

В. П. Павлов.

**ФОСФОР** (лат. phosphorus, от греч. phosphóros, букв. — светоносный), Р — хим. элемент V группы периодич. системы элементов, ат. номер 15, ат. масса 30,97376. В природе представлен одним  $^{31}\text{P}$ . Конфигурация внеш. электронных оболочек  $3s^2 3p^3$ . Энергии последоват. ионизаций 10,486; 19,76; 30,16; 51,36 и 65,02 эВ. Сродство к электрону 0,8 эВ. Радиус атома Р 134, ионов  $\text{P}^{3-}$ ;  $\text{P}^{3+}$  и  $\text{P}^{5+}$  соответственно 186; 44 и 35 пм. Значение электроотрицательности 2,1.

Ф. — типичный неметалл. Известно неск. его аллотропных модификаций, наиб. важны белый (его иногда наз. жёлтым), красный и чёрный Ф. При условиях, близких к нормальным, стабилен чёрный Ф., однако в этих условиях довольно длит. время могут существовать белый и красный Ф. (вследствие низкой скорости фазовых переходов).

Белый Ф. состоит из молекул  $\text{P}_4$ . При темп-рах выше  $-76,9^\circ\text{C}$  устойчива  $\alpha$ -модификация белого Ф. с параметром кубич. решётки  $a = 1,851$  нм, а при более низких темп-рах и давлениях 12 ГПа и выше устойчива  $\beta$ -модификация с параметром кубич. решётки  $a = 0,2377$  нм. При нагревании без доступа воздуха до  $250$ — $300^\circ\text{C}$  белый Ф. превращается в полимерный красный Ф. (цвет варьирует от алого до кирпичного в зависимости от условий перехода). Можно получить и кристаллич. красный Ф., напр. его кристаллизацией из расплава в свинце (т. н. фосфор Гитторфа). При  $200$ — $220^\circ\text{C}$  и давлениях 1,2—1,7 ГПа белый Ф. переходит в чёрный, имеющий ромбич. решётку с параметрами  $a = 331$  пм,  $b = 438$  пм и  $c = 1050$  пм. Структура чёрного Ф. напоминает слоистую структуру графита. Белый и красный Ф. — диэлектрики, чёрный — полупроводник (при  $25^\circ\text{C}$  ширина запрещённой зоны  $0,33$  эВ).

Белый Ф. ( $\alpha$ -модификация) — серое или жёлтое воскообразное вещество, к-рое люминесцирует в процессе медленного окисления на воздухе (светится в темноте). Плотн.  $1,828$  кг/дм $^3$ ,  $t_{\text{пл}} = 44,14^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{кип}} = 257^\circ\text{C}$  (по др. данным,  $280,5^\circ\text{C}$ ). Уд. теплоёмкость  $c_p = 23,8$  Дж/(моль·К), теплота плавления  $0,66$  кДж/моль. Уд. электрич. сопротивление белого Ф.  $1540$  МОм·м. Диамагнитен, магн. восприимчивость  $\chi = -0,86 \cdot 10^{-9}$ . Белый Ф. самовоспламеняется при  $44^\circ\text{C}$ ; при его горении образуется густой белый дым, а сам Ф. разбрызгивается. Поэтому его хранят под слоем воды (в воде он не растворяется, хорошо растворим в сероуглероде, слабо — в спирте, бензоле и др.).

Плотность красного Ф.  $2,0$ — $2,4$  кг/дм $^3$ . При обычных давлениях и нагревании не плавится, а сублимирует (в газовой фазе состоит из молекул  $\text{P}_4$ ); при давлениях в неск. МПа и темп-рах  $585$ — $610^\circ\text{C}$  плавится. Красный Ф. нерастворим в воде и органич. растворителях. Плотность чёр-