

Лит.: Тамм И. Е., Основы теории электричества, 9 изд., М., 1976; Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 6 изд., М., 1973; Сивухин Д. В., Общий курс физики, 2 изд., т. 3, М., 1983. В. В. Курин, М. А. Миллер.

ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ — взаимодействие между диполями электрическими или диполями магнитными. Каждый электрич. (магн.) диполь создаёт в окружающем пространстве электрич. (магн.) поле, воздействующее на др. диполи. Напряжённость поля электрич. диполя

$$E_d(p, r) = [3r(pr) - p^2 r^3], \quad (1)$$

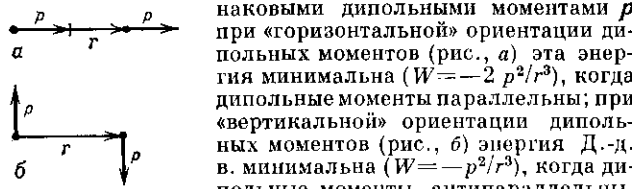
где p — дипольный момент (p_e — электрич., p_m — магн.); r — радиус-вектор из точки локализации диполя в точку наблюдения. Аналогичной ф-лой описывается напряжённость магн. поля H_d , создаваемого магн. диполем (напр., магн. моментом парамагн. атома или иона): нужно только заменить в ф-ле (1) E_d на H_d и p_e на p_m .

Энергия Д.-д.в. W_{ij} двух диполей с моментами p_i и p_j , находящихся в точках r_i и r_j :

$$W_{ij} = -p_i E_d(p_j r_{ij}) = [p_i p_j r_{ij}^2 - 3(r_{ij} p_i)(r_{ij} p_j)] / r_{ij}^3 = -p_i p_j (\cos \theta_{ij} - 3 \cos \theta_i \cos \theta_j) / r_{ij}^3, \quad (2)$$

где $r_{ij} = r_i - r_j$, θ_{ij} — угол между векторами p_i и p_j , θ_i и θ_j — углы между векторами p_i и p_j и вектором r_{ij} , W_{ij} — энергия диполя p_i в поле диполя p_j . Полная энергия Д.-д.в. для системы диполей является суммой энергий всех парных дипольных взаимодействий (Д.-д. в. — дальнедействующее).

Энергия Д.-д. в. зависит от взаимного расположения диполей [см. ф-лу (2)]. Напр., для пары диполей с одинаковыми дипольными моментами p при «горизонтальной» ориентации дипольных моментов (рис., а) эта энергия минимальна ($W = -2p^2/r^3$), когда дипольные моменты параллельны; при «вертикальной» ориентации дипольных моментов (рис., б) энергия Д.-д. в. минимальна ($W = -p^2/r^3$), когда дипольные моменты антипараллельны.



Д.-д. в. играет особенно важную роль при возникновении в твёрдых телах нек-рых видов магнитной атомной структуры и магнитной доменной структуры. Магн. Д.-д. в. относится к классу анизотропных взаимодействий и, наряду с внутрикристаллическим полем и анизотропным обменным взаимодействием, даёт вклад в магнитную анизотропию кристаллов.

Магн. Д.-д. в. — релятивистское по природе взаимодействие, но несмотря на относительно небольшую величину (по сравнению, напр., с обменным взаимодействием) может существ. образом влиять на низкотемпературные свойства кристаллов с парамагн. ионами, определяя темп-ру их магн. упорядочения и тип возникающей атомной магн. структуры. Существует целый класс соединений (т. н. дипольные магнетики), магн. упорядочение к-рых практически полностью обусловлено Д.-д. в. (напр., редкоземельные литиевые фториды и гидроксиды, редкоземельные ортоалюминаты и др.). Д.-д. в. ответственно за образование в ферро- и ферримагнетиках доменной структуры (см. Домены). С Д.-д. в. тесно связано поле размагничивания, т. е. магн. поле, создаваемое всеми магн. моментами внутри магнетика и усреднённое по малому (но макроскопич.) объёму, окружающему точку локализации рассматриваемого магн. момента. Энергию Д.-д. в. в связи с этим часто наз. энергией размагничивания. Аналогично проявляет себя взаимодействие электрич. дипольных моментов в сегнетоэлектриках.

Лит.: Браун У. Ф., Микромagnetизм, пер. с англ., М., 1979. В. М. Матвеев.

ДИПОЛЬНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ — излучение, обусловленное изменением во времени дипольного момента системы. В случае эл.-магн. Д. и. о. к-ром далее только и будет идти речь, различают электрич. и магн. Д. и.

в зависимости от того, вызывается ли оно изменением электрич. p_e или магн. p_m дипольных моментов.

Классическая теория. Произвольное распределение неподвижных или движущихся зарядов можно описать с помощью плотностей заряда ρ и тока j , удовлетворяющих ур-нию непрерывности: $\nabla j + \partial \rho / \partial t = 0$. Поле, создаваемое такими источниками вне области их размещения, описывается как совокупность полей *мультиполей*: монополя (заряда), диполя, квадруполь и т. д. Однако такое описание продуктивно только тогда, когда размер l области, содержащей источник, мал по сравнению с длиной волны излучения $\lambda = 2\pi/k = 2\pi/c\omega$; $l \ll \lambda$. Это ограничивает скорости и движения зарядов нерелятивистскими значениями, $u \ll c$. Д. и. из таких областей можно представить как излучение сосредоточенного (точечного) дипольного момента — электрического, соответствующего источникам $\rho = -(\dot{p}_e \nabla \delta(r))$, $j = \dot{p}_e \delta(r)$, и магнитного, соответствующего токам $j = c[\nabla \delta(r) \times p_m]$. Здесь $\delta(r)$ — дельта-функция Дирака, а точка — знак дифференцирования по времени. Поле излучения создаётся только соленоидальными частями этих распределений, потенц. части ответственны лишь за квазистатич. поля.

На больших расстояниях R от области источников, $R \gg \lambda \gg l$, т. е. в волновой зоне (см. Антенна), электрическое E и магнитное H поля в вакууме выражают след. ф-лами (Гаусса система единиц):

$$E(R, n, t) = c^{-2} R^{-1} [n \dot{p}_e(t - R/c)], \quad (*)$$

$$H(R, n, t) = -c^{-2} R^{-1} [n \dot{p}_e(t - R/c)].$$

Здесь n — единичный вектор вдоль R , запаздывающий аргумент $t - R/c$ учитывает разницу между моментом возникновения волнового возмущения в точке источника и моментом прихода его в точку наблюдения. Поле магн. Д. и. получают отсюда при помощи двойственности перестановочной принципа ($E \rightarrow H$, $H \rightarrow -E$, $p_e \rightarrow p_m$). Эл.-магн. поле (*) представляет собой сферически расходящуюся волну с векторами E и H , перпендикулярными направлению её распространения, т. е. вдали от источников это квазиплоские волны типа *ТЕМ*.

В случае гармонич. закона изменения дипольного момента, $p = p_0 \cos \omega t$, с частотой ω ср. интенсивность излучения в единицу времени (ср. мощность излучения) равна $I = \omega^4 p_0^2 / 3c^3$, а её угл. распределение (диаграмма направленности) имеет вид: $I_\theta = (3/8\pi) I \sin^2 \theta$, где I_θ — интенсивность, отнесённая к единице телесного угла, θ — угол между n и p_0 . Обычно (но не всегда!) магн. Д. и. меньше электрич. Д. и. и сопоставимо лишь с электрич. квадрупольным излучением. Если диполь электрический представить как элемент тока J длины l : $i \omega p_e = J l$ (элементарный вибратор, или диполь Герца), а диполь магнитный — как рамку с током J и площадью S : $p_m = JS/c$ и считать токи одинаковыми, а размеры области источников соизмеримыми ($S \sim l^2$), то $p_m \sim p_e k l \ll p_e$. При движении гармонически колеблющегося диполя в пространстве частота его Д. и. зависит от направления излучения (см. Доплера эффект), а диаграмма направленности искажается, стягиваясь к направлению движения диполя (см. также Синхротронное излучение, Ондюляторное излучение).

Квантовая теория. Согласно квантовой теории, излучение происходит при квантовом переходе системы из одного состояния в другое. При этом излучается фотон с энергией $\hbar \omega = \epsilon_1 - \epsilon_2$, где ϵ_1 и ϵ_2 — энергии начального и конечного состояний, ω — частота фотона. Если размеры системы малы в сравнении с длиной волны фотона, то в отсутствие внеш. эл.-магн. поля вероятность перехода определяется в первом приближении соответствующим этому переходу элементом матрицы дипольного момента d_{12} . Вероятность перехода w в секунду с излучением фотона равна $w = 4\omega^3 |d_{12}|^2 / 3c^3 \hbar$. Такой самопроизвольный переход системы в состояние с более низкой энергией, сопровождающийся излучением фотона, относится к процессам спонтанного