

где  $\varphi^{(a \rightarrow b)}$  — потенциал, наводимый зарядом «а» на теле «b». Аналогично можно записать В. п. для любых элементарных мультипольных источников. Так, для точечных зарядов  $[\rho = Q\delta(\mathbf{r}), \delta(\mathbf{r})$  — дельта-функция Дирака] В. п. сводится к (2); для диполей с дипольными моментами  $\mathbf{p}^{(a)}, \mathbf{p}^{(b)}$   $[\rho = (\mathbf{p} \nabla \delta(\mathbf{r}))]: (\mathbf{p}^{(a)} \nabla \varphi^{(b \rightarrow a)}) = (\mathbf{p}^{(b)} \nabla \varphi^{(a \rightarrow b)})$ , т. е.

$$(\mathbf{p}^{(a)} \mathbf{E}^{(b \rightarrow a)}) = (\mathbf{p}^{(b)} \mathbf{E}^{(a \rightarrow b)}), \quad (3)$$

где  $\mathbf{E}^{(a \rightarrow b)}, \mathbf{E}^{(b \rightarrow a)}$  — напряжённости соотв. электрич. полей; для квадрупольных тензоров квадрупольного момента  $d_{\alpha\beta}^{(a)}, d_{\alpha\beta}^{(b)}$   $[\rho = d_{\alpha\beta} \nabla_{\alpha} \nabla_{\beta} \delta(\mathbf{r})]: d_{\alpha\beta}^{(a)} \nabla_{\alpha} \nabla_{\beta} \varphi^{(b \rightarrow a)} = d_{\alpha\beta}^{(b)} \nabla_{\alpha} \nabla_{\beta} \varphi^{(a \rightarrow b)}$  и т. д.

В. п. (1) — (3) справедливы только в средах с симметричными тензорами диэлектрич. проницаемостей  $\epsilon_{\alpha\beta} = \epsilon_{\beta\alpha}$ . В тех случаях, когда  $\epsilon_{\alpha\beta} \neq \epsilon_{\beta\alpha}$ , справедливы «транспонированный» В. п. (ТВП), формально совпадающий с (1), но состоящий из поля и источников в разных средах: «а» — в среде с  $\epsilon_{\alpha\beta}$ , «b» — в транспониров. среде с  $\epsilon_{\beta\alpha}$ .

Двойственности перестановочной принцип позволяет переписать сформулированный выше В. п. в магнитоэлектростатику; причём в представлении (3) магн. дипольный момент можно интерпретировать и как зарядовый, и как токовый. Более общей является запись В. п. через объёмные плотности токов  $\mathbf{j}$  и векторные потенциалы  $\mathbf{A}$ :

$$\int_{V^{(a)}} (\mathbf{j}^{(a)} \mathbf{A}^{(b)}) dV = \int_{V^{(b)}} (\mathbf{j}^{(b)} \mathbf{A}^{(a)}) dV. \quad (4)$$

В случае перем. полей с произвольной зависимостью от времени формулировка В. п. существенно усложняется из-за конечности запаздывания отклика на изменение поведения источника. В частном случае синусоидальных процессов, описываемых множителем  $\exp(i\omega t)$  ( $\omega$  — угловая частота,  $t$  — время), В. п. представляют в форме, объединяющей (1) и (4):

$$\int_{V^{(a)}} [\rho^{(a)} \varphi^{(b)} + (\mathbf{j}^{(a)} \mathbf{A}^{(b)}) / c] dV = \int_{V^{(b)}} [\rho^{(b)} \varphi^{(a)} + (\mathbf{j}^{(b)} \mathbf{A}^{(a)}) / c] dV, \quad (5)$$

где фигурируют комплексные амплитуды зарядов, токов и потенциалов. Выражение (5) не зависит от калибровки потенциалов и сводится к соотношению между токами  $\mathbf{j}^{(a)}, \mathbf{j}^{(b)}$  и полями  $\mathbf{E}^{(a)}, \mathbf{E}^{(b)}$ :

$$\int_{V^{(a)}} (\mathbf{j}^{(a)} \mathbf{E}^{(b)}) dV = \int_{V^{(b)}} (\mathbf{j}^{(b)} \mathbf{E}^{(a)}) dV. \quad (6)$$

Именно в форме (6) В. п. применяют в разл. задачах электродинамики (возбуждение волноводов и резонаторов, расчёт антенн и т. п.). В. л. (6) опирается на Лоренца лемму и справедлив только для сред, в к-рых соблюдается соотношение вида:

$$\int_V \{ (\mathbf{E}^{(a)} \mathbf{D}^{(b)}) - (\mathbf{H}^{(a)} \mathbf{B}^{(b)}) - (\mathbf{E}^{(b)} \mathbf{D}^{(a)}) + (\mathbf{H}^{(b)} \mathbf{B}^{(a)}) \} dV = 0, \quad (7)$$

где  $\mathbf{D}, \mathbf{B}$  — векторы электрич. и магн. индукции, а интегрирование осуществляется по всему объёму, занимаемому полем. Соотношение (7) справедливо для линейных сред с симметричными тензорами проницаемостей. Для сред с несимметричными тензорами проницаемостей (к ним принадлежат, в частности, плазма и ферриты, находящиеся под действием пост. магн. поля  $\mathbf{H}_0$ ) имеет место ТВП ( $\epsilon_{\alpha\beta}^{(a)} \neq \epsilon_{\beta\alpha}^{(a)}, \mu_{\alpha\beta}^{(a)} \neq \mu_{\beta\alpha}^{(a)}$ ). В магнитоактивных средах транспонирование достигается при замене  $\mathbf{H}_0 \rightarrow -\mathbf{H}_0$ . Если заряды и токи движутся как единое целое с пост. скоростью  $\mathbf{v}$ , взаимно сопоставимые системы получаются при замене  $\mathbf{r}^{(a)} \rightleftharpoons \mathbf{r}^{(b)}$ . Принцип перестановочной двойственности позволяет обобщить В. п. (5), (6) на случай магн. источников.

С помощью В. п. удаётся получить Кирхгофа закон обобщённый о связи излучательной и поглощательной способностей для произвольных эл.-динамич. систем. Одним из следствий В. п. является совпадение диаграмм направленности антенны в режимах передачи и приёма. В теории линейных цепей В. п. помогает расшифровывать структуры самых сложных цепей разн. природы.

Лит.: Стретт Дж. (Джорд Ролей), Теория звука, пер. с англ., 2 изд., т. 1—2, М., 1955; Фурдус В. В., Теоремы взаимности в механических, акустических и электромеханических четырехполюсниках, М.—Л., 1948; Вайнштейн Л. А., Электромагнитные волны, М., 1957; Морс Ф. М., Фешбах Г., Методы теоретической физики, пер. с англ., т. 1—2, М., 1958—60; Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982. И. Г. Кодратев, М. А. Миллер.

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** в физике — взаимодействие тел или частиц друг на друга, приводящее к изменению состояния их движения. В механике Ньютона взаимное действие тел друг на друга характеризуется силой. Более общей характеристикой В. является потенциальная энергия.

Первоначально в физике утвердилось представление о том, что В. между телами может осуществляться непосредственно через пустое пространство, к-рое не принимает никакого участия в передаче В.; при этом передача В. происходит мгновенно. Так, считалось, что перемещение Земли должно сразу же приводить к изменению силы тяготения, действующей на Луну. В этом состояла т. н. концепция дальнего действия.

Однако данные представления были оставлены как не соответствующие действительности после открытия и исследования эл.-магн. поля. Было доказано, что В. электрически заряж. тел осуществляется не мгновенно и перемещение одной заряж. частицы приводит к изменению сил, действующих на др. частицы, не в тот же момент, а спустя конечное время. В разделяющем частицы пространстве происходит нек-рый процесс, к-рый распространяется с конечной скоростью. Соответственно имеется «посредник», осуществляющий В. между заряж. частицами. Этот посредник был назван эл.-магн. полем. Каждая электрически заряж. частица создаёт эл.-магн. поле, действующее на др. частицы. Скорость распространения эл.-магн. поля равна скорости света в вакууме  $c \approx 3 \cdot 10^{10}$  см/с. Возникла новая концепция — близкое действие В., к-рая позже была распространена и на любые другие В. Согласно этой концепции, В. между телами осуществляется посредством тех или иных полей, непрерывно распространённых в пространстве. Так, всемирное тяготение осуществляется гравитац. полем.

После появления квантовой теории поля (КТП) представление о В. существенно изменилось. Согласно КТП, любое поле представляет собой совокупность частиц — квантов этого поля. Каждому полю соответствуют свои частицы. Напр., квантами эл.-магн. поля являются фотоны, т. е. фотоны являются переносчиками этого В. Аналогично др. виды В. возникают в результате обмена между частицами квантами соответствующих полей.

Несмотря на разнообразие воздействий тел друг на друга (зависящих от В. слагающих их элементарных частиц), в природе, по совр. данным, имеется лишь 4 типа фундаментальных В. Это (в порядке возрастания интенсивности В.): гравитационное взаимодействие (отвечающее за большинство распадов и многие превращения элементарных частиц), электромагнитное взаимодействие, сильное взаимодействие (обеспечивающее, в частности, связь частиц в атомных ядрах и поэтому часто называемое ядерным). Интенсивность В. определяется соответствующей константой взаимодействия, или константой связи. В частности, для эл.-магн. В. константой связи является электрич. заряд. Квантовая теория эл.-магн. В. — квантовая электродинамика — превосходно описывает все известные эл.-магн. явления. Слабое В. осуществляется