

посредством промежуточных векторных бозонов. Наиболее глубокая связь слабого В. с электромагнитным, что привело к их объединению в электрослабое взаимодействие. Основу сильного В., по совр. представлениям, составляет В. между составными частями адронов — кварками. Это В., переносчиками к-рого служат глюоны, определяется особой константой взаимодействия — цветом и описывается квантовой хромодинамикой. В. адронов друг с другом представляет собой лишь остаточный эффект межкварковых сил, подобно тому как молекулярные силы — остаточный эффект кулоновского В. электронов и ядер молекул. Делаются попытки объединения слабого, эл.-магн. и сильного В. (модели т. н. великого объединения), а также всех видов В., включая гравитационное (см. Супергравитация).

Г. Я. Мякишев.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН — воздействие волн друг на друга, приводящее к изменению их волновых характеристик (амплитуд, частот ω_i , волновых векторов k_i , поляризации). В. в. основано на пространственно-временном резонансе волн, условия к-рого имеют вид: $\sum \omega_i = 0, \sum k_i = 0$ (см. Синхронизм). В. в. возникает в средах нелинейных, для линейных сред справедлив принцип суперпозиции. Однако в неоднородных анизотропных средах возможно не нарушающее принцип суперпозиции т. н. линейное взаимодействие различных поляризов. волн, приводящее к перераспределению энергии между ними (см. *Линейное взаимодействие волн*).

Примерами В. в. могут быть взаимодействие волн в плазме, взаимодействие световых волн. В. в. можно рассматривать как рассеяние волн друг на друге, а при участии во взаимодействии разл. типов волн — как нелинейную трансформацию одних типов волн в другие, напр. световых в акустические (см. *Фотоакустические явления*). Рассеяние и трансформация волн могут быть как спонтанными процессами, так и при превышении определённого (в большинстве случаев малого) порога — индуцированными. Это означает, что при рассмотрении В. в. необходимо учитывать обратную связь между падающей и рассеянной волной. В зависимости от степени нелинейной поляризации среды В. в. могут быть трёхволновыми при квадратичной восприимчивости, четырёхволновыми при кубической восприимчивости и т. д. (см. *Нелинейные восприимчивости*). В средах с малой нелинейностью четырёх- и пятиволновые взаимодействия есть эффекты более высокого порядка малости, чем трёхволновые.

Трёхволновые В. в. наблюдаются в плазме, в кристаллах; ими объясняется возникновение распадной параметрич. неустойчивости, взрывной неустойчивости волн; на них основывается действие параметрических генераторов света, комбинационных лазеров. Четырёхволновые взаимодействия возможны в нелинейных средах с кубической восприимчивостью; ими объясняются самовоздействия света, а для случая вырожденного четырёхволнового взаимодействия — обращение волнового фронта. См. также ст. Волны и лит. при ней.

В. П. Орловский.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН В ПЛАЗМЕ — можно рассматривать как рассеяние волн друг на друге, а при участии во взаимодействии волн разл. типов — как нелинейную трансформацию одних типов волн в другие. В. в. в. н. основано на пространственно-временном резонансе волн, участвующих во взаимодействии. Условия такого резонанса имеют вид: $\sum \omega_i = 0, \sum k_i = 0, i = 1,$

2, 3, ... (1). Здесь ω_i и k_i соответственно частоты и волновые векторы взаимодействующих волн. Простейшим и основным является 3-волновое взаимодействие ($i = 1, 2, 3$). Рассеяние и трансформация волн в плазме даже при малых амплитудах (превышающих, однако, определ. порог) являются индуцированными процессами. Это означает, что при вычислении величин, подобных длинам рассеяния в теории взаимодействия частиц, следует учитывать обратную связь между пада-

ющей и рассеянной волной. Такая связь приводит к возникновению распадной параметрической неустойчивости волн, лежащей в основе вынужденного комбинационного рассеяния волн. Именно из-за распадной параметрич. неустойчивости при вынужденном комбинац. рассеянии экспоненциально нарастает амплитуда не только рассеянной, но и падающей волны. При рассмотрении плазмы как ансамбля большого числа мод-осцилляторов указанные выше условия резонанса волн можно трактовать как условия параметрич. резонанса в среде с распределёнными параметрами. (В нелинейной оптике эти условия называются условиями фазового (волнового) синхронизма.) Плазму можно рассматривать также как некий газ волн-«квазичастиц» с энергией $\hbar\omega$ и импульсом $\hbar k$ (фотоны — для эл.-магн. колебаний, фононы — для ионно-звуковых). Тогда указанные выше условия резонанса волн могут трактоваться как условия распада волн — квазичастиц. В простейшем случае 3-волнового взаимодействия $\omega_1 = \omega_2 + \omega_3, k_1 = k_2 + k_3$. Умножение этих равенств на \hbar даёт законы сохранения энергии и импульса при распаде элементарного возбуждения — «кванта» (ω_i, k_i) на два других (ω_2, k_2) и (ω_3, k_3). Поэтому можно сказать, что В. в. в. п. основано на распаде и слиянии элементарных возбуждений плазмы.

Система ур-ний для взаимодействующих волн имеет универсальный вид. При её выводе предполагается, что плазма в линейном приближении рассматривается как ансамбль бесконечного числа собственных волномод. Нелинейность плазмы приводит к появлению связи между модами, причём вначале учитываются главные слагаемые — резонансные и нелинейности низшего порядка. Примером 3-волнового взаимодействия является связь ленгмюровских волн и неизотермич. звука (см. Волны в плазме) в условиях, когда $T_e \gg T_i$ (T_e и T_i — темп-ры электронов и ионов). Система ур-ний, описывающая указанную связь, может быть сведена к следующей:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{3T_e}{m_e} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \omega_p^2 \right) E(t, x) &= -\omega_p^2 \frac{\delta n}{n} E \\ \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{T_e}{m_i} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \delta n(t, x) &= \frac{1}{16\pi m_i} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \langle E^2 \rangle \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Эти ур-ния записаны для электрич. поля ленгмюровских колебаний $E(t, x)$ и вариаций плотности в ионно-звуковой волне $\delta n(t, x)$ (m_e, m_i — массы электрона и иона, ω_p — ленгмюровская частота, n — плотность).

Решение (2) можно представить в виде разложения по собств. колебаниям плазмы или модам. Ур-ния для амплитуд ленгмюровских и ионно-звуковых мод становятся связанными и выводятся из (2) при учёте лишь медленного изменения амплитуд во времени. Вклад в такое изменение дают резонансные слагаемые, для к-рых выполняются условия (1): $\omega_1 = \omega_2 + \omega_3, k_1 = k_2 + k_3, \omega_{1,2}$ — частоты ленгмюровских волн, ω_3 — звуковой). Система ур-ний для этих связанных мод приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned} i \frac{\partial c_1}{\partial t} &= V c_1 c_2; \quad i \frac{\partial c_2}{\partial t} = -V c_1 c_3; \\ i \frac{\partial c_3}{\partial t} &= V c_1 c_2^*; \quad V = \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3}{\pi T_e}}; \\ c_{1,2} &= \sqrt{N_{1,2}} e^{i\varphi_{1,2}}; \quad c_3 = \sqrt{N_S} e^{i\varphi_S}; \\ N_{1,2} &= |E_{1,2}|^2 / 8\pi\omega_{1,2}; \quad N_S = \left| \frac{\delta n}{n} \right|^2 \frac{\pi M_S^2}{\omega_S}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь N_i — число квазичастиц в соответствующей моде, φ_i — фазы мод, c_i^* — комплексные амплитуды. С помощью системы ур-ний типа (3) изучают как турбулентные, так и ламинарные состояния плазмы. В первом случае системы ур-ний типа (3) усредняются по фазам мод и получают кинетич. ур-ния для числа квазичастиц (см. Турбулентность плазмы). В ламинарном режиме