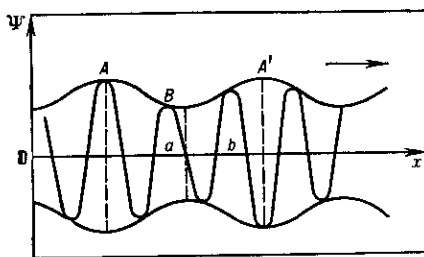


собств. колебания плазмы, соответствующего волновому вектору  $2k$ . Это условие выполняется для т. н. линейных спектров, когда  $\omega = kv_0$ ; в этом случае все кратные гармоники находятся в резонансе с биениями соответствующей кратности. Для волн конечной амплитуды, относительно слабо затухающих, это приводит к укрупнению первоначально синусоидальных волн, при этом образуются скачки параметров — ударные волны. Укрупнение волн останавливает лишь выход из резонанса кратных гармоник. Существует два разл. механизма выхода из резонанса. Первый связан с поглощением энергии волн за счёт вязкости, трения и т. п. Математически в этом случае у частот гармоник появляется мнимая добавка, приводящая к расстройке резонанса. Нарастание гармоник прекращается, когда подача энергии в гармонику сравнивается с её потерей за счёт диссипации. В спектре возникает насыщение, что приводит к установлению конечной ширины фронта ударной волны. Др. механизм, останавливающий рост гармоник, — это нелинейная зависимость частоты от волнового вектора. В плазме такая ситуация довольно часто случается (см. *Волны в плазме*). В этом случае кратные гармоники образуются не резонансно с собств. волнами, а вынужденным образом. Разрыв на фронте не возникает. При определ. условиях волна может двигаться без искажения своей формы. В частности, могут образовываться уединённые волны — солитоны.

Волны большой амплитуды в плазме приводят к появлению большой группы параметрич. неустойчивостей, к-рые вызваны резонансным взаимодействием волн и обычно возникают, если амплитуда волн накачки превышает нек-рый порог. Основная из них — распадная параметрич. неустойчивость — появляется при выполнении распадных условий, связывающих волну накачки  $\omega_1, k_1$  с волнами малой амплитуды  $\omega_{2,3}, k_{2,3}$  (флуктуационными или падающей и рассеянной). При распадном параметрич. неустойчивости, описывающей, в частности, вынужденное комбинац. рассеяние волн, проявляются такие особенности этих процессов, как экспоненциальное (а не линейное) нарастание во времени амплитуд не только рассеянной, но и падающей волн. Это является прямым следствием параметрич. положительной обратной связи рассеянной и падающей волн, распространяющихся на фоне волны накачки. При параметрич. воздействии на плазму мощных волн не только возникают неустойчивости, но и изменяются волновые (диэлектрич.) свойства плазмы. Изменение диэлектрич. свойств (показателей преломления) приводит к ряду эффектов самовоздействия, таких, напр., как самофокусировка и самосжатие волновых пакетов. Если под воздействием эл.-магн. волн, распространяющейся в плазме, последняя становится оптически более плотной, то это можно рассматривать как создание самим лучом некой фокусирующей линзы. Если при этом центр. часть пучка волн более интенсивна, то плазма под её воздействием имеет большую плотность, следовательно, скорость центр. пучка будет меньше и он будет несильно отставать от периферии, и пучок волн имеет тенденцию к сжатию к центру — т. н. самофокусировка волн. Другим нелинейным самовоздействием волн является самосжатие волнового пакета. Оно возникает в том случае, если имеется нелинейная добавка к частоте  $\omega(k,a) = \omega_0(k) + \alpha a^2$  [где  $\omega_0(k)$  — линейная дисперсия волн,  $a$  — амплитуда волны] и групповая скорость  $v_{гр}$  зависит от волнового вектора  $k$ . Тогда при  $adv_{гр}/dk < 0$  возникает т. н. модуляция и она неустойчивость. Если  $\alpha > 0$ , то в областях макс. амплитуд (точки  $A$  и  $A'$ , рис.) фазовая скорость больше, чем в областях мин. амплитуд (точка  $B$ ), что означает рост числа узлов с приближением к области мин. амплитуд и падение его при удалении от неё, так что если групповая скорость имеет отрицат. производную по  $k$ , то колебания в области  $a$  (мин. амплитуд) отстают, а в области  $b$  (макс. амплитуд) убегают вперёд, тем самым увеличивая рост максимума

амплитуд и углубляя минимум. Это и есть модуляц. неустойчивость. Модуляц. неустойчивость может приводить к т. н. коллапсу волн, когда давление пакета волн в максимуме амплитуд выталкивает частицы в области минимума амплитуд. Явление носит неоднородный характер (см. *Волновой коллапс*).



Развитие модуляционной неустойчивости.

Интересными особенностями обладают Н. я. в п., связанные с фазовой памятью частиц, напр. явление плазменного эха. Суть его состоит в следующем. Возбуждённая в к.-л. точке пространства ленгмюровская волна затухает при распространении вследствие затухания Ландау. В любой точке, где первая волна уже затухла, возбудим на другой частоте другую волну, к-рая также затухнет на определ. расстоянии. После затухания первой и второй волн через определённые пространственные интервалы можно наблюдать всплески ВЧ-колебаний на комбинац. частотах, это и наз. плазменным эхом. Появление эха можно пояснить на простом примере. Если в точке  $z = 0$  внеш. источником возбуждается электрич. поле с частотой  $\omega_1 \gg \omega_0$  (напр., с помощью сетки), то это поле модулирует тепловые потоки частиц так, что  $\phi$ -ция распределения электронов пропорциональна  $\delta f_1 \sim \exp[\pm i\omega_1(t - z/v)]$ . Такое распределение электронов создаёт электрич. поле лишь в районе  $z = 0$  и нуль во всём остальном пространстве. Если в точке  $z = d$  стоит аналогичная сетка, модулирующая потоки частиц с другой частотой  $\omega_2 \gg \omega_0$ , тогда  $\delta f_2 \sim \exp[\pm i\omega_2(t - (z - d)/v)]$ . Здесь также из-за быстрых осцилляций  $\phi$ -ции распределения поле всюду, кроме  $z = d$ , отсутствует. Однако нелинейный отклик  $\phi$ -ции распределения, который пропорционален  $\delta f_1 \cdot \delta f_2$ , даёт ненулевое поле в точке  $z = \omega_2 d / (\omega_2 - \omega_1)$ , т. к. здесь зависимость от скорости частиц в экспоненте исчезает. К Н. я. в п., связанным с частицами, промодулированными волнами, относится также т. н. сателлитная неустойчивость, возникающая на биениях частоты волн и частоты колебаний частиц, захваченных в потенц. ямы волн. На основе нелинейных взаимодействий частиц и волн разработана теория слабой турбулентности плазмы (см. *Турбулентность плазмы*), с помощью к-рой удалось описать явления установления спектра турбулентности, явления переноса, связанные с рассеянием на турбулентных колебаниях плазмы, рассчитать эффективные длины и времена рассеяний. Теория турбулентности плазмы используется для решения важных вопросов, связанных с нагревом и удержанием плазмы в лаб. и космич. условиях.

Лит.: Основы физики плазмы, т. 1—2, М., 1983—84.

В. Н. Оравский.

**НЕЛОКАЛЬНАЯ КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ** — общее наименование обобщений стандартной (локальной) квантовой теории поля, для к-рых характерно несоблюдение условия микропричинности в области малых расстояний и промежутков времени с размерами порядка фундаментальной длины  $l$ . (В статье используется система единиц, в к-рой  $c = \hbar = 1$ .) В большинстве вариантов Н. к. т. п. это достигается нарушением присущего локальной теории свойства близости действия (локальности взаимодействия), требующего совпадения пространственно-временных аргументов взаимодейст-