

глощения волн частицами, к-рый описывается т. н. квазилинейной системой ур-ний

$$\frac{dN}{dt} = 2\gamma N; \quad \frac{df}{dt} = \nabla(\hat{D}\nabla f); \quad \hat{D} = \int k k N v d k,$$

где N — число квантов, пропорц. интенсивности волн, w — вероятность спонтанного излучения кванта, k — волновой вектор. Эти ур-ния описывают турбулентный нагрев П. волнами; предполагается, что они могут описать процесс ускорения частиц, входящих в состав космических лучей.

Верхняя диаграмма II порядка изображает кулоновское столкновение двух частиц, упомянутое ранее, а нижняя диаграмма указывает, что частица вначале поглощает один квант (или взаимодействует с полем), а затем испускает другой квант-волну. Эта диаграмма условно изображает сразу 4 важных процесса: рассеяние лазерного луча в плазме (метод диагностики); тормозное излучение электронов при их рассеянии на кулоновских полях ионов; поглощение циклотронной волны частицей в магн. поле (циклотронный нагрев П.); циклотронное излучение частиц, закручиваемых магн. полем.

Среди возможных диаграмм III порядка наиб. важной оказывается диаграмма, изображающая т. н. распадные процессы — распад волны на две другие волны или, наоборот, — слияние двух волн в одну. В таких распадных процессах должны соблюдаться законы сохранения энергии и импульса квантов:

$$\hbar\omega_1 = \hbar\omega_2 + \hbar\omega_3, \quad \hbar k_1 = \hbar k_2 + \hbar k_3.$$

Если эти законы не выполняются, то трёхволновые распадные процессы оказываются запрещёнными и на первый план выступают четырёхволновые процессы, изображаемые диаграммой IV порядка. Примером таких четырёхволновых процессов может быть взаимодействие волн на воде, приводящее к зависимости частоты волны от амплитуды a по ф-ле Стокса $\omega^2 = kg(1 + k^2 a^2)$. Аналогичные нелинейные процессы возможны и в П., напр. модульн. неустойчивость ленгмюровских волн (см. ниже), при к-рой частота также зависит от амплитуды.

Линейные волны

Волны в П. отличаются объёмным характером и разнообразием свойств. С помощью разложения в ряд Фурье любое малое возмущение в П. можно представить как набор монохроматич. волн простейшего синусоидального вида (рис. 9) с частотой ω , длиной волны λ и фазовой скоростью v_ϕ . Кроме того, волны могут

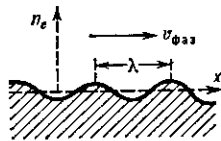


Рис. 9. Синусоидальный профиль плотности электронов в монохроматической плазменной волне.

различаться поляризацией, т. е. направлением вектора E электрич. поля в волне. Если это поле направлено вдоль скорости распространения, волна наз. продольной, а если поперёк — поперечной. В П. без магн. поля возможны волны трёх типов: продольные ленгмюровские с частотой ω_p , продольные звуковые (точнее, ионно-звуковые) волны со скоростью $v_{зв} = \sqrt{T_e/m_i}$ и поперечные эл.-магн. (световые или радиоволны) с частотой $\omega = \sqrt{\omega_p^2 + k^2 c^2}$.

Поперечные эл.-магн. волны могут обладать двумя поляризациями и могут распространяться в П. без магн. поля, только если их частота ω превышает плазменную частоту ω_p . В противоположном же случае $\omega < \omega_p$ показатель преломления плазмы становится мнимым и поперечные волны отражаются её поверхностью (см. Волны в плазме). (Именно поэтому радиовол-

ны с $\lambda > 20$ м отражаются ионосферой, что обеспечивает возможность дальней радиосвязи на Земле.)

Однако при наличии магн. поля поперечные волны, резонируя с ионами и электронами на их циклотронных частотах, могут распространяться внутри П. и при $\omega < \omega_p$. Это означает появление в П. ещё двух типов волн, наз. альвеновскими и быстрыми магнитозвуковыми.

Альвеновская волна представляет собой поперечное возмущение, распространяющееся вдоль магн. поля со скоростью $v_A = B/\sqrt{4\pi n_i m_i}$ (m_i — масса иона). Её природа обусловлена вмороженностью и упругостью силовых линий, к-рые, стремясь сократить свою длину и будучи «нагружены» частицами П., в частности массивными ионами, колеблются подобно натянутым струнам.

Быстрая магнитозвуковая волна в области малых частот по существу лишь поляризацией отличается от альвеновской (их скорости близки и определяются магн. полем и инерцией тяжёлых ионов). Скорость магнитозвуковой волны в области малых частот равна

$$v_+ = \frac{1}{2}(|v_A + v_{зв}| + |v_A - v_{зв}|).$$

В области больших частот, где ионы можно считать неподвижными, она определяется инерцией электронов и имеет специфич. винтовую поляризацию. Поэтому её называют геликонной ветвью колебаний или ветвью вистлеров (свистов), поскольку в магнитосферной П. она проявляется в виде характерных свистов при радиосвязи (см. Атмосферик). Кроме того, в П. может распространяться медленная магнитозвуковая волна, к-рая представляет собой обычную звуковую волну с характеристиками, несколько изменёнными магн. полем. Её скорость равна

$$v_- = \frac{1}{2}(|v_A + v_{зв}| - |v_A - v_{зв}|).$$

Т. о., при наличии магн. поля в однородной П. возможны волны шести типов: три высокочастотные и три низкочастотные. Зависимость квадрата показателя преломления $N = kc/\omega$ от частоты для этих шести волн схематически изображена на рис. 10.

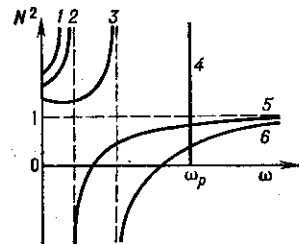


Рис. 10. Шесть типов волн в плазме при наличии магнитного поля: 1 — ионно-звуковая; 2 — альвеновская; 3 — быстрая магнитозвуковая (вистлер); 4 — ленгмюровская; 5 — обыкновенная электромагнитная; 6 — не-обыкновенная.

Если темп-ра или плотность П. в магн. поле неоднородны, то возникают ещё т. н. дрейфовые волны со скоростью $v_d = v_T \rho_{ВМ}$, где $\kappa = \nabla \ln(nT)$ (см. Дрейфовые неустойчивости).

В неравновесной П. при определённых условиях возможна раскачка неустойчивостей, т. е. нарастание к.-л. из перечисленных типов волн до нек-рого уровня насыщения. Возможны и более сложные случаи индуциров. возбуждения волн одного типа за счёт энергии волн др. типа. При больших амплитудах возможны бесстолкновительные ударные волны (возбуждаемые, напр., на границе магнитосферы набегающим на Землю солнечным ветром), уединённые волны (солитоны), а также ряд др. нелинейных волн и сильно развитая турбулентность плазмы.

Электрич. поле E возбуждает в П. индуциров. ток $j_{инд} = \sigma E$. Это соотношение наз. Ома обобщённым законом, а тензор $\hat{\sigma}$ — тензором электропроводности. Наиб. удобной характеристикой электродинамич. свойств П. является тензор диэлектрич. проницаемости