

ния волн в статистически неоднородных средах (напр., распространение радиоволн, света и звука в турбулентной атмосфере). Суть П. в. м. состоит в том, что теория возмущений строится не для комплексной амплитуды волны, а для комплексной фазы волны, что соответствует частичному суммированию рядов теории возмущений, т. е. определённого учёту многократного рассеяния волн.

Ур-ние П. в. м. для комплексной фазы  $\Phi$ , получаемое из параболич. ур-ния, имеет вид

$$2ik\partial\Phi/\partial z + \Delta_1\Phi + (\nabla_1\Phi)^2 + k^2\tilde{\varepsilon}(\rho, z) = 0.$$

Решение ищут в виде ряда  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots$ , представляющего собой разложение по степеням  $|\tilde{\varepsilon}|$ . В результате получается система ур-ний последоват. приближений:

$$2ik\partial\Phi_l/\partial z + \Delta_1\Phi_l = f_l, \quad l = 1, 2, \dots,$$

$$f_1 = -k^2\tilde{\varepsilon}(\rho, z), \quad f_2 = -(\nabla_1\Phi_1)^2,$$

$$f_3 = -2\nabla_1\Phi_1\nabla_1\Phi_2, \dots$$

Граничные условия для  $\Phi_l$  имеют один и тот же вид:  $\Phi_l(\rho, 0) = 0$ . Решение любого из ур-ний можно представить в виде

$$\Phi_l(\rho, z) = \int_0^z dz' \int d\rho' K(\rho - \rho', z - z') f_l(\rho, z'),$$

где  $K$  — Грина функция линейного дифференциального оператора  $2ik\partial/\partial z + \Delta_1$ , описывающего дифракцию волн во френелевском приближении. На практике удаётся вычислить лишь неск. первых членов  $\Phi_l$ , обычно используют только  $\Phi_1$ . Условие применимости П. в. м. требует достаточной плавности изменения  $\Phi_1$ , отсюда и происходит название.

Лит.: Татарский В. И., Распространение волн в турбулентной атмосфере, М., 1967; Введение в статистическую радиофизику, ч. 2 — Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И., Случайные поля, М., 1978; Исмаилов А., Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах, пер. с англ., т. 2, М., 1981.

В. У. Заворотный.

**ПЛАЗМА** (от греч. plasma, букв. — вылепленное, оформленное) — частично или полностью ионизованный газ, в к-ром плотности положит. и отрицат. зарядов практически одинаковы.

Содержание:

Основные понятия	594
Основные свойства	595
Движение частиц	596
Магнитогидродинамическое описание	596
Кинетическое описание	597
Классификация взаимодействий	597
Линейные волны	598
Нелинейные волны	599
Методы нагрева	599
Излучение плазмы	599
Диагностика	600
Применения	600

Основные понятия

При сильном нагревании любое вещество испаряется, превращаясь в газ. Если увеличивать темп-ру и дальше, резко усилится процесс термич. ионизации, т. е. молекулы газа начнут распадаться на составляющие их атомы, к-рые затем превращаются в ионы. Ионизация газа, кроме того, может быть вызвана его взаимодействием с эл.-магн. излучением (фотоионизация) или бомбардировкой газа заряж. частицами.

Свободные заряж. частицы, особенно электроны, легко перемещаются под действием электрич. поля. Поэтому в состоянии равновесия пространственные заряды входящих в состав П. отрицат. электронов и положит. ионов должны компенсировать друг друга так, чтобы полное поле внутри П. было равно нулю. Именно отсюда вытекает необходимость практически точного равенства плотностей электронов и ионов в плазме — её квазинейтральности. Нарушение квазинейтральности П. в объёме, ею занимаемом, ведёт к

немедленному появлению сильных электрич. полей пространственных зарядов, тут же восстанавливающих квазинейтральность. Степенью ионизации плазмы  $\alpha$  наз. отношение числа ионизов. атомов к полному их числу в единице объёма плазмы. В условиях термич. равновесия она определяется Саха формулой:

$$\alpha = 1/\sqrt{1+K}; \quad K = N_\lambda \exp(I/kT),$$

где  $I$  — энергия ионизации,  $N_\lambda = n\lambda_e^3$  — число частиц всех сортов в кубе с ребром, равным тепловой длине волны де Бройля для электронов  $\lambda_e = h\sqrt{2\pi/m_e kT}$ .

Для многозарядных ионов следует учитывать кратность ионизации атомов. В зависимости от величины  $\alpha$  говорят о слабо-, сильно- и полностью ионизованной П.

Ср. энергии разл. типов частиц, составляющих П., могут отличаться одна от другой. В таком случае П. нельзя охарактеризовать одним значением темп-ры  $T$ , и различают электронную темп-ру  $T_e$ , ионную темп-ру  $T_i$  (или ионные темп-ры, если в П. имеются ионы неск. сортов) и темп-ру нейтральных атомов  $T_a$  (см. Температуры компонент плазмы). Подобная П. наз. неизо термической, в то время как П., для к-рой темп-ры всех компонент равны, наз. изо термической.

Применительно к П. несколько необычный смысл (по сравнению с др. разделами физики) вкладывается в понятия «низкотемпературная» и «высокотемпературная». Низкотемпературной плазмой принято считать П. с  $T \leq 10^6$  К, а высокотемпературной — с  $T \geq 10^6 - 10^8$  К. Это условное разделение связано с тем, что проблема осуществления УТС решается для высокотемпературной П.

В состоянии П. находится большая часть вещества Вселенной — звёзды, звёздные атмосферы, галактич. туманности и межзвёздная среда. Около Земли П. существует в космосе в виде солнечного ветра, заполняет магнитосферу Земли (образуя радиационные пояса Земли) и ионосферу. Процессами в околоземной П. обусловлены магнитные бури и полярные сияния. Отражение радиоволн от ионосферной П. обеспечивает возможность дальней радиосвязи на Земле.

В лаб. условиях и пром. применениях П. образуется в электрических разрядах в газах (дуговом разряде, искровом разряде, тлеющем разряде и пр.), в процессах горения и взрыва, используется в пламенных ускорителях, магнитогидродинамических генераторах, в установках для исследования УТС. Мн. характерными для П. свойствами обладают совокупности электронов и дырок в полупроводниках и электронов проводимости, нейтрализуемых неподвижными положит. ионами в металлах, к-рые наз. плазмой твёрдых тел. Её отличит. особенность — возможность существования при сверхнизких для «газовой» П. темп-рах — комнатной и ниже, вплоть до абс. нуля темп-ры. Газовая П. при темп-рах, близких к абсолютному нулю, наз. криогенной плазмой.

Возможные значения плотности П.  $n$  охватывают очень широкий диапазон: от  $n \sim 10^{-6}$  см<sup>-3</sup> в межгалактич. пространстве и  $n \sim 10$  в солнечном ветре до  $n \sim 10^{23}$  для твёрдых тел и ещё больш. значений в центр. областях звёзд.

Термин «П.» в физике был введён в 1929 И. Ленгмуэром (I. Langmuir) и Л. Тонксом (L. Tonks), проводившими зондовые измерения параметров низкотемпературной газоразрядной П. Кинетика П. рассматривалась в работах Л. Д. Ландау (1936 и 1946), А. А. Власова (1938) и др. В 1942 Х. Альвен (H. Alfvén) предложил ур-ния магнитной гидродинамики для объяснения ряда явлений в космической плазме. В 1950 в СССР А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом, а также Л. Спитцем в США была предложена идея магн. термоизоляции П. для осуществления УТС. В 50—80-е гг. изучение П. стимулировалось её разл. практич. применениями,