

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

530

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР (28—29 января 1970 г.)

28 и 29 января 1970 г. в конференц-зале Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР. На сессии были заслушаны доклады и сообщения:

1. Э. Р. Мустель. О физических свойствах оболочек, выбрасываемых новыми звездами, и сравнение этих оболочек с оболочками, выбрасываемыми сверхновыми звездами.

2. В. Н. Цытович. Элементарные возбуждения и физика стохастических процессов в плазме.

3. Ю. Н. Денисюк, В. И. Суханов. Голограмма с записью в трехмерной среде как наиболее совершенная форма изображения.

4. Э. С. Воронин. Нелинейное преобразование изображений и инфракрасная голография.

5. К. С. Мустафин, В. А. Селезнев. Методы повышения чувствительности голографической интерферометрии.

Ниже публикуется краткое содержание некоторых докладов и сообщений.

В. Н. Цытович. Элементарные возбуждения и физика стохастических процессов в плазме

Физика плазмы в большей степени, чем физика конденсированных сред, является физикой взаимодействия ее элементарных возбуждений — плазмонов. Это связано с малостью параметра $\epsilon = 1/N_D$, где $N_D = (4\pi/3) n d^3$ — число частиц в сфере дебаевского радиуса (n — плотность плазмы, $d = V_{Te}/\omega_p$ — дебаевский радиус, V_{Te} — средняя тепловая скорость электронов, ω_p — плазменная частота). Величина N_D лежит обычно в пределах от 10^4 — 10^8 для лабораторной плазмы, до 10^8 — 10^{11} — в космической (10^{26} для плазмы вблизи пульсаров). Параметр ϵ характеризует отношение энергии плазмонов к средней энергии частиц в условиях теплового равновесия. С другой стороны, $\epsilon^{2/3}$ есть отношение потенциальной энергии взаимодействия частиц к кинетической, т. е. характеризует темп релаксационных процессов, обязанных парным столкновением. Уже малые отклонения ($\sim \epsilon$) распределений частиц от равновесных приводят к мазер-эффекту для плазмонов (неустойчивость). Энергия плазмонов W в пределе может возрасти в очень большое число раз $\sim N_D$. Уже при возрастании энергии плазмонов в 40—50 раз все релаксационные процессы обязаны взаимодействию частиц и плазмонов. Поэтому плазма в условиях $40/W_D \ll W/nT \ll 1$, когда релаксационные процессы регулируются элементарными возбуждениями, является наиболее распространенной. Ее часто называют турбулентной. Распределение энергии элементарных возбуждений по модулям

волновых чисел $k \left(\int_0^\infty N_k dk \right)$ характеризует спектр турбулентности. Он, так же как

в жидкостях, регулируется нелинейными процессами, меняющих и масштабы $1/k$ пульсаций. Результаты исследований для лэнгмюровских плазмонов суммированы на рис. 1. Спектры в асимптотической области носят колмогоровский характер $1/k_0$ в различных областях, в которых доминируют различные нелинейные процессы. Асимптотические спектры, полученные аналитически, находятся в хорошем соответствии с результатами численного решения нелинейных уравнений и качественно соответствуют эксперименту.

Существенное отличие рассматриваемых элементарных возбуждений от возбуждений конденсированных сред заключается в характере неоднозначности зависимости энергии ω от импульса элементарного возбуждения k .

Если в конденсированных средах эта неоднозначность обязана затуханию возбуждений, то в турбулентной плазме — нелинейным процессам. Эта неоднозначность может быть описана при помощи корреляционных функций случайных полей, измеряемых сейчас в большинстве плазменных экспериментов. Если поле в плазме разбито

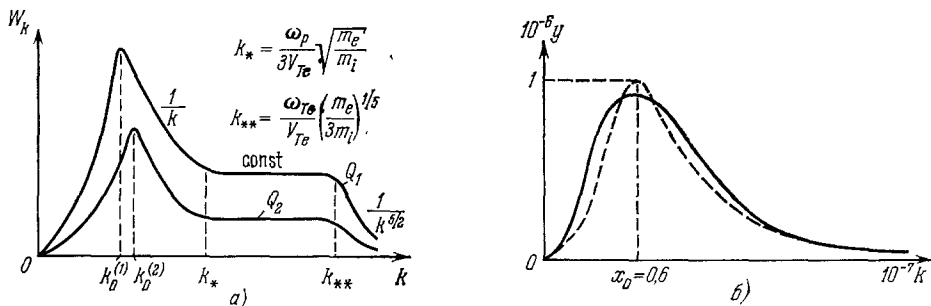


Рис. 1.

на регулярную и стохастическую компоненты: $E = E^R + E^S$, $\langle E^S \rangle = 0$, то корреляционная функция есть

$$I_{k, \omega} = \int \langle E(\mathbf{r}_1, t_1) E(\mathbf{r}_2, t_2) \rangle \exp[ik(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) - i\omega(t_1 - t_2)] d(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) d(t_1 - t_2).$$

Интеграл $\int I_{k, \omega} d\omega$ пропорционален W_k , описывающей спектр турбулентности. Построена общая теория корреляционных функций путем суммирования рядов по энергии

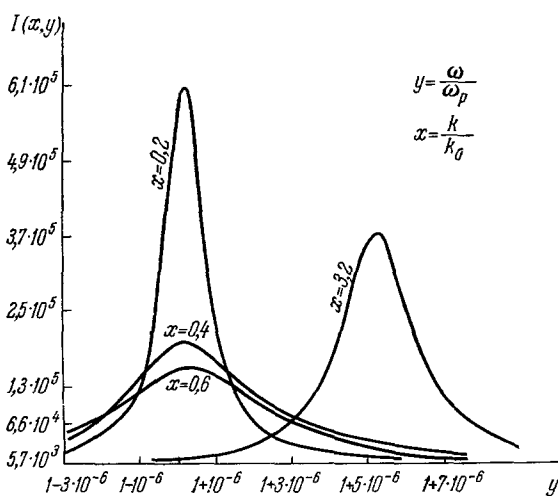


Рис. 2.

турбулентности вблизи резонанса ($|\omega - \omega(k)| \ll \omega(k)$) и показано, что корреляции описываются лоренцевой формулой

где $\omega^N(k)$ учитывает нелинейный сдвиг частоты, зависящий от энергии турбулентности W , γ_k^N — нелинейный декремент. Для каждого W_k на спектре турбулентности может быть построена соответствующая корреляционная кривая, что иллюстрируется рис. 2 для ленгмюровских возбуждений. Развитый аппарат позволяет обрабатывать многочисленные измерения корреляционных эффектов в плазме, определяя по корреляционным эффектам энергию турбулентности и другие параметры плазмы. Показано, что γ_k^N может быть меньше частот соударений и линейных инкрементов из-за их компенсации нелинейными процессами в условиях стационарной турбулентности. Вдали от резонанса $\omega = \omega(k)$ (на «хвостах») возникают колебания, не имеющие какой-либо однозначной связи ω и k . Их спектр находится, если известен спектр турбулентности (рис. 3). Характерно, что максимальная частота этих колебаний равна разности частот высокочастотных возбуждений. Именно такой эффект наблюдался экспериментально при возбуждении стохастических колебаний в условиях плазменно-пучкового взаимодействия (Я. Б. Файнберг). Эти низкочастотные пульсации приводят к стохастическому нагреву частиц. Если функцию распределения частиц разбить на регулярную и стохастическую части: $f = f^R + f^S$, то уравнение для f^R описывает диффузию в пространстве

$$I_{k, \omega} = \frac{C(k)}{[\omega - \omega^N(k)]^2 + (\gamma_k^N)^2},$$

импульсов, причем диффузия на «хвосте» корреляционной кривой, пропорциональная $I_{\mathbf{k}, \omega}$, имеет тот же порядок, что и эффекты $I_{\mathbf{k}, \omega}^2$, а их сумма точно описывает индуцированное рассеяние плазмонов с учетом двух процессов рассеяния — рассеяния на основном заряде и на окружающей его «шубе» зарядов противоположного знака. Наличие такой «шубы» существенно меняет процессы рассеяния, приводя, например, к интенсивному рассеянию для ионов плазмы. Таким образом, получается замкнутая физическая картина, в которой f^R описывает электронные и ионные возбуждения (заряд + «шуба»), а W_k — плазмоны, взаимодействующие между собой посредством индуцированного излучения и индуцированного рассеяния. Такая картина справедлива до тех пор, пока корреляционные уширения γ_k^N много меньше $\omega(k)$, т. е. при $W/nT \ll 1$. Малость $1/N_D$ приводит к весьма широкой области применимости этих представлений. Наряду с плазмонами в эту

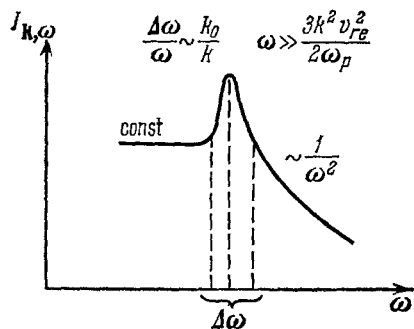


Рис. 3.

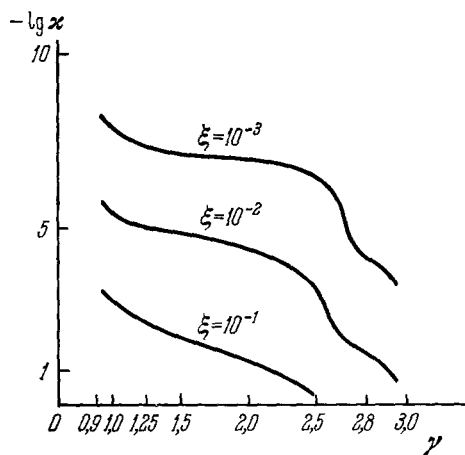


Рис. 4.

схему необходимо включить фотоны. Дело в том, что их появление неизбежно в системе, имеющей достаточно большие размеры. Можно разбить типы турбулентности плазмы на следующие классы — по типу диссипации турбулентности: а) в тепловую энергию, б) в электромагнитное излучение, в) в энергию ускоренных частиц. Можно показать, что если система оптически толста относительно процессов электромагнитной диссипации, то ее основная энергия уходит в быстрые частицы, которые весьма эффективно ускоряются до ультрарелятивистских энергий и, следовательно, начинают излучать высокие частоты, рассеиваясь на плазмонах. Эти фотоны в области частот, которые оптически толсты, имеют спектр $\sim \omega^{5/2}$, и их действие на релятивистские частицы вырабатывает у них степенный спектр $1/e^\gamma$. На рис. 4 приведены результаты численного решения уравнения для γ в зависимости от $-\lg \kappa = \lg(W/nmc^2)$ и $\xi = (eH/mc)/\omega_p$, которые дают $0,9 < \gamma < 3$. Спектральные индексы $\nu = (\gamma-1)/2$ большинства радиисточников лежат в этом интервале, а значение $\gamma = 2,7$, для которого, согласно рис. 3, большие изменения κ , ξ практически не меняют γ , соответствует спектру космических лучей. Подчеркнем, что этот вывод является необходимым следствием развитой теории плазмы как системы взаимодействующих элементарных возбуждений.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Цытович, Доклад на Бухарестской конференции по физике плазмы (1969).
2. В. Н. Цытович, Препринт ОИЯИ (1969).
3. В. Н. Цытович, Б. М. Чихачев, Астрон. ж. (1969).