

# **НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР** (26 декабря 1974 г.)

26 декабря 1974 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:

1. А. А. Галеев, Р. З. Сагдеев, В. Д. Шапиро, В. И. Шевченко. Нелинейные эффекты в неоднородной плазме.
  2. Л. И. Дорман. Космические лучи и солнечный ветер.
- Ниже публикуется краткое содержание прочитанных докладов.

533.951(048)

**А. А. Галеев, Р. З. Сагдеев, В. Д. Шапиро, В. И. Шевченко. Нелинейные эффекты в неоднородной плазме.** При распространении электромагнитной волны в неоднородной плазме в точке плазменного резонанса  $n = m\omega^2/4\pi e^2$  ( $\omega$  — частота волны) происходит ее трансформация в плазменные колебания<sup>1</sup>. Малость групповой скорости плазмонов приводит к их накоплению в окрестности резонанса. Подростание продольного электрического поля в этой области существенно снижает порог для возникновения нелинейных эффектов и последний приобретает вид<sup>2,3</sup>  $\epsilon = (H^2(0) \sin^2 \theta / 16 \pi n_0 T) L^2 / \lambda_D^2 > 1$ .  $H(0)$  — магнитное поле волны в точке резонанса,  $\theta$  — угол падения,  $L^{-1}$  — градиент невозмущенной плотности,  $\lambda_D$  — дебаевская длина. Основные нелинейные эффекты в области плазменного резонанса — деформация профиля плотности силой высокочастотного давления и диссипация электромагнитной энергии, обусловленная модуляционной неустойчивостью.

Модуляционная неустойчивость приводит к образованию на фоне достаточно плавного распределения электрического поля в окрестности резонанса «каверн» —

областей пониженной плотности с запертыми в них плазмонами. Процесс схлопывания «каверн» и роста в них поля («коллапс») носит характер взрыва (особенность достигается за конечное время) и ограничивается при достижении столь коротких масштабов, для которых становится существенным резонансное поглощение плазмонов электронами<sup>4,5</sup>. Поглощение происходит на быстрых электронах, параметр  $k\lambda_D < 1$  и другие механизмы диссипации (передача энергии ионам плазмы, вытесняемой из каверн, пересечение электронных траекторий) не столь существенны.

Среднее поле в области резонанса играет роль волны накачки для каверн с плазмонами. Каверны рождаются из волны накачки с характерным размером  $l \sim \lambda_D \sqrt{16\pi n_0 T / \langle E^2 \rangle}$ , который при  $\varepsilon \gg 1$  много меньше ширины резонанса  $\Delta z \sim L \langle E^2 \rangle / 16\pi n_0 T$ . Последующее схлопывание каверн приводит к коротковолновой перекачке плазмонов в ту часть спектра, для которой существенно резонансное затухание на электронах. Спектр в иерархическом интервале (между большими масштабами, где энергия накачивается в каверны, и малыми, где возникает затухание) вычисляется из условия постоянства потока энергии (гипотеза Колмогорова):  $|E_k|^2 \sim 1/k^{1+(r/2)}$  ( $r$  — размерность схлопывающихся каверн). Скорость накачки энергии в плазменную турбулентность определяется эффективной частотой рассеяния плазмонов  $\nu_{\text{eff}} = s \omega_p \langle E^2 \rangle / 16\pi n_0 T$ ,  $s$  — численный коэффициент, в машинных экспериментах (см.,

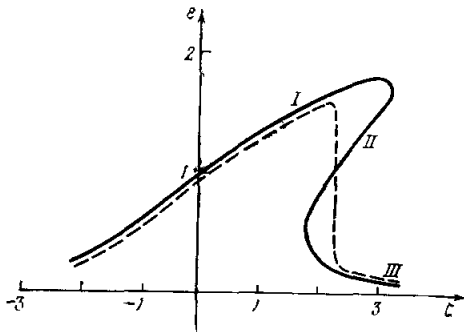


Рис. 1.

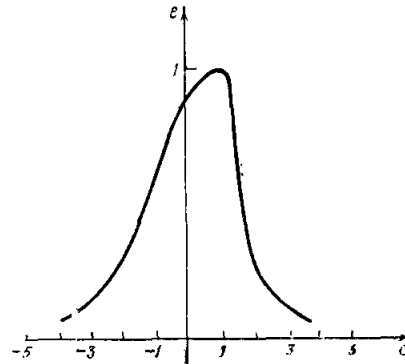


Рис. 2.

например,<sup>6</sup>)  $s \approx 1/4$ . Средняя энергия в турбулентных пульсациях находится из условия компенсации энергии диссипируемой из волны накачки потоком энергии в коротковолновую часть спектра  $\langle E^2 \rangle \approx \langle E \rangle^2 (Ms^2/m) \langle E \rangle^2 / 16\pi n_0 T$ .

Пространственное распределение среднего поля в окрестности резонанса определяется путем решения уравнений Максвелла с нелинейной диэлектрической постоянной, в которой диссипация электромагнитной энергии учтена введением эффективной частоты столкновений  $\nu_{\text{eff}}$ . Таким путем удается получить количественное объяснение результатов экспериментального изучения нелинейных эффектов в области плазменного резонанса, которое было предпринято в серии работ, проведенных в Калифорнийском университете<sup>7-9</sup>. Плазма, вытесняясь из окрестности резонанса, образует потенциальную яму, в которую захватываются плазмоны. Среднее поле в этой области находится из формулы  $\langle E \rangle = H(0) \sin \theta / \varepsilon_N$ ,  $\varepsilon_N = -(z/L) + (\langle E^2 \rangle / 16\pi n_0 T)(1 + is)$  — диэлектрическая постоянная, учитывающая как вытеснение плазмы силой высокочастотного давления, так и нелинейную диссипацию электромагнитной энергии. Амплитуда поля в резонансе и его ширина по порядку величины равны

$$\frac{E_0^2}{16\pi n_0 T} \approx \left( \frac{m}{Ms^2} \right)^{2/5} \left( \frac{H^2(0) \sin^2 \theta}{16\pi n_0 T} \right)^{1/5},$$

$$\Delta z \approx L \left( \frac{Ms^2}{m} \right)^{1/5} \left( \frac{H^2(0) \sin^2 \theta}{16\pi n_0 T} \right)^{2/5}.$$

Коэффициент поглощения волны (отношение энергии диссипируемой в единицу времени в области плазменного резонанса к потоку энергии в падающей волне) не зависит от  $s$  и его максимальное значение  $R_{\text{max}} \approx 0,4$ . Фаза поля при прохождении через резонанс изменяется на  $\pi$ . Характерные зависимости модуля поля от координаты показаны на рис. 1 и 2. Рис. 2 относится к случаю достаточно слабой диссипации, когда волна играет роль электромагнитного поршня. Глубина проникновения волны в плазму  $\sim \Delta z/s^{1/5}$ . Экспериментально особенности пространственного распределения

электрического поля, характерные для этого случая, удается наблюдать при импульсном включении электромагнитного поля, когда за время включения модуляционная неустойчивость не успевает развиваться<sup>10</sup>.

Приведенные формулы относятся к случаю не очень больших амплитуд поля в падающей волне  $(H_0^2/16\pi n_0 T) < \sqrt{m/Ms^2} \sin^2 \theta$ . В этом случае проникновение волны в область плазменного резонанса как и в линейной теории<sup>1</sup> имеет место при достаточно малых углах  $\theta \sim (c/\omega L)^{1/3}$ . При больших амплитудах волны область проникновения расширяется до значений  $\sin \theta \sim \sqrt{H_0^2/16\pi n_0 T \sqrt{Ms^2/m}}$ . Основной результат проведенного рассмотрения — наличие в области резонанса эффективного механизма диссипации электромагнитной энергии, связанного с модуляционной неустойчивостью, сохраняется и в этом случае, что весьма существенно для проблемы инициирования импульсной термоядерной реакции мощным лазерным излучением<sup>11</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Гинзбург, Распространение электромагнитных волн в плазме, М., Физматгиз, 1960.
2. Р. З. Сагдеев, В. Д. Шапиро, ЖЭТФ 66, 1651 (1974).
3. В. Б. Гильденбург, Г. М. Фрайман, Препринт НИРФИ № 58, Горький, 1974.
4. Л. М. Дегтярев, В. Е. Захаров, Препринт ИПМ АН СССР № 106, Москва, 1974.
5. А. А. Галеев, Р. З. Сагдеев, Ю. С. Сигов, В. Д. Шапиро, В. И. Шевченко, Физ. плазмы 1, 10 (1975).
6. J. J. Thompson, R. J. Fachtl, W. L. Krueer, Phys. Rev. Lett. 31, 918 (1973).
7. H. C. Kim, R. Stenzel, A. Y. Wong, Univ. of California, Preprint, PPG-175 (1974).
8. В. Фрид, Доклад на симпозиуме по сильноточным релятивистским пучкам, Новосибирск, 1974.
9. H. C. Kim, R. Stenzel, A. Y. Wong, Univ. of California, Preprint, PPG-177 (1974).
10. A. Y. Wong et al., Paper IAEA-CN-33/H4-1 presented at IAEA Conference, Tokio, 1974.
11. M. N. Rosenbluth, R. Z. Sagdееv, Comm. Plasma Phys. and Thermo-nucl. Res. 1 (4), 10 (1973).

523.165(048)

Л. И. Дорман. Космические лучи и солнечный ветер. Около четверти века назад, задолго до прямых исследований в космическом пространстве, с помощью космических лучей удалось получить важную информацию о потоках плазмы из Солнца, о вмороженных в них магнитных полях. Было обнаружено два типа потоков. С помощью космических лучей удалось тогда установить, что в потоках I типа (всплескостивии, по предложению Е. Паркера, их стали называть спокойным солнечным ветром) напряженность магнитного поля составляет несколько гамм ( $1 \gamma = 10^{-5}$  эс), в потоках II типа (возмущенный солнечный ветер, вызывающий магнитные бури на Земле) — на порядок больше. Выполненные через много лет прямые измерения магнитных полей в межпланетном пространстве подтвердили эти результаты. Следует отметить, что первые сведения о солнечном ветре с помощью космических лучей были получены на основе применения метода коэффициентов связи к данным непрерывных наземных наблюдений мезонной (с 1935 г.) и нейтронной (с 1952 г.) компонент космических лучей<sup>1</sup>.

В последующем метод зондирования космическими лучами солнечного ветра был усовершенствован как благодаря мощному развитию экспериментальной базы (наземные наблюдения космических лучей на более чем сотне станций, оснащенных нейтронными и мезонными супермониторами; наблюдения в стратосфере и на различных глубинах под землей; косвенные методы по метеоритным и ионосферным данным; исследования космических лучей на спутниках и межпланетных автоматических станциях), так и благодаря развитию методов извлечения космофизической информации из данных наблюдений космических лучей (метод учета метеорологических и геомагнитных эффектов; методы спутников, вариационных коэффициентов, кольца станций, приемных векторов; метод определения полной функции распределения космических лучей в межпланетном пространстве по данным измерений на мировой сети станций; метод исследования флуктуаций космических лучей)<sup>2-9</sup>. Достоверность и точность информации о процессах в межпланетном пространстве, получаемой с помощью космических лучей, в значительной степени зависит также от того, насколько правильными и полными являются наши представления о характере рас-

пространения космических лучей (КЛ) и их взаимодействии с солнечным ветром (теория изотропной и анизотропной диффузии КЛ с учетом конвекционного переноса и адиабатического охлаждения, расчеты несимметричных моделей с учетом реального распределения солнечной активности по диску Солнца и его изменения с 11-летним циклом; кинетическая теория распространения, модуляции, образования анизотропии и флуктуаций КЛ, взаимодействия космических лучей с межпланетными ударными волнами)<sup>10-19</sup>. На основе системы самосогласованных уравнений была разработана также нелинейная теория модуляции космических лучей в межпланетном пространстве с учетом обратного воздействия КЛ на солнечный ветер<sup>20</sup>.

Проблема взаимодействия космических лучей с солнечным ветром — исключительно сложна и многогранна. В последние годы существенные результаты удалось получить в следующих направлениях: а) воздействие солнечного ветра и искажение спектра различных ядер и электронов галактических космических лучей в области энергий  $0,1 \text{ Мэв} - 2 \cdot 10^2 \text{ Гэв}$ , восстановление межзвездного спектра и проблема суб-космических лучей; б) воздействие солнечного ветра на внешнюю анизотропию космических лучей галактического происхождения (особенно значительное в области малых энергий); в) установление связи между параметрами модуляции космических лучей в межпланетном пространстве с индексами солнечной активности (с учетом запаздывания электромагнитных условий на различных расстояниях от Солнца по отношению к процессам в солнечной атмосфере); г) исследование и интерпретация 11-летней, годовой и 27-дневной вариации, солнечной анизотропии, радиального и поперечного градиентов космических лучей в межпланетном пространстве; д) исследование по модуляционным эффектам космических лучей свойств солнечного ветра на больших расстояниях от Солнца и от плоскости эклиптики (где пока нет прямых измерений плазмы и магнитных полей на космических аппаратах), предсказание наличия переходного слоя между солнечным ветром и межзвездной средой и оценка условий в нем; е) исследование с помощью космических лучей секторной и струйчатой структур солнечного ветра, особенностей регулярной составляющей межпланетного магнитного поля (токовые системы космических лучей, вращение вектора анизотропии при пересечении секторов, анализ второй сферической гармоники космических лучей, особенности распространения солнечных космических лучей вдоль границ между секторами с противоположными направлениями поля); ж) исследование по эффектам возрастания интенсивности космических лучей перед началом магнитных бурь формы, структуры и скорости межпланетных ударных волн от хромосферных вспышек и распространяющихся от Солнца областей сжатого магнитного поля; з) исследование свойств и спектра магнитных неоднородностей в солнечном ветре по данным о характере зависимости транспортного пробега для рассеяния космических частиц от расстояния до Солнца и от жесткости КЛ, а также по данным о флуктуациях (мерцаниях) интенсивности космических лучей и ее функции распределения<sup>21-24</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Дорман, Вариации космических лучей, М., Гостехиздат, 1957.
2. Л. И. Дорман, Вариации космических лучей и исследование космоса, М., Изд-во АН СССР, 1963.
3. А. И. Кузьмин, Вариации космических лучей высоких энергий, М., «Наука», 1964.
4. А. И. Кузьмин, Вариации космических лучей и солнечная активность, М., «Наука», 1968.
5. Л. И. Дорман, Метеорологические эффекты космических лучей, М., «Наука», 1972.
6. Л. И. Дорман, В. С. Смирнов, М. И. Тясто, Космические лучи в магнитном поле Земли, М., «Наука», 1971.
7. Л. И. Дорман, Р. Т. Гуцнина, М. А. Шсей, Д. Ф. Смарт, Эффективные жесткости обрезания космических лучей, М., «Наука», 1972.
8. П. Велинов, Г. Несторов, Л. Дорман, Воздействие космических лучей на ионосферу и распространение радиоволн, София, Изд-во Болгарской Академии наук, 1974.
9. L. I. Dorman, Cosmic Rays: Variations and Space Explorations, Amsterdam, North-Holland, 1974.
10. Е. Паркер, Динамические процессы в межпланетной среде, М., «Мир», 1965.
11. E. N. Parker, Planet. and Space Sci. 13, 9 (1965); W. I. Axford, ibid., p. 115; L. I. Dorman, in: Proc. of 9th Intern. Conference on Cosmic Rays, v. 1, London, 1965, p. 292.
12. L. I. Dorman, Comm. Astrophys. and Space Phys. 5, No.3 (1973); ibid., No. 4.
13. Л. И. Дорман, в кн.: Космические лучи, № 8, М., «Наука», 1967, стр. 305; ibid., № 13, 1973, стр. 5.
14. Г. Ф. Крымский, Модуляция космических лучей в межпланетном пространстве, М., «Наука», 1969.

15. А. З. Долгинов, И. Н. Топтыгин, Изв. АН СССР, сер. физ. 30, 1780 (1966); 31, 1269 (1967); 32, 1821 (1968).
  16. Л. И. Дорман, М. Е. Кац, *ibid.* 36, 2271 (1972); 38, 1961 (1974).
  17. Л. И. Дорман, З. Кобилински, *ibid.* 32, 1928 (1968); 34, 2408, 2415 (1970); 36, 2332, 2346 (1972).
  18. Л. И. Дорман, Н. С. Каминер, А. Е. Кузьмичева, *ibid.*, стр. 2391; 37, 1241 (1973).
  19. А. В. Белов, Л. И. Дорман, Б. А. Шахов, Геомагн. и аэронав. 13, 399 (1973); Изв. АН СССР, сер. физ. 38, 1884 (1974); Л. И. Дорман, В. Х. Шогенов, *ibid.*, стр. 1888.
  20. И. В. Дорман, Л. И. Дорман, *ibid.* 32, 1838 (1968); 33, 1908 (1969); Геомагн. и аэронав. 8, 817, 1008 (1968).
  21. Космические лучи, № 8—14, М., «Наука», 1967—1974.
  22. Труды Ленинградских международных семинаров по космическим лучам и смежным проблемам, т. I—V, Л., 1969—1973.
  23. Изв. АН СССР, сер. физ. 34 (11) (1970); 35 (12) (1971); 36 (11) (1972); 37 (6) (1973); 38 (9) (1974).
  24. Proc. of 13th Intern. Conference on Cosmic Rays, vols 1, 2, Denver, 1973.
-