

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОСМИЧЕСКИХ ЦИКЛОТРОННЫХ МАЗЕРАХ

А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, А.Г. Демехов, Д.А. Мансфельд, В.Ю. Трахтенгерц

LABORATORY MODELING OF NONSTATIONARY PROCESSES IN SPACE CYCLOTRON MASERS

A.V. Vodopyanov, S.V. Golubev, A.G. Demekhov, D.A. Mansfeld, V.Yu. Trakhtenherts

Излагаются результаты лабораторного моделирования динамики космических циклотронных мазеров. Обнаружен автоколебательный режим развития циклотронной неустойчивости неравновесной плазмы электронно-циклотронного резонансного разряда в простой магнитной ловушке. Плазма в ловушке содержит две популяции электронов, одна из которых (основная) имеет концентрацию $N_c \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и температуру $T_c \sim 300 \text{ эВ}$, для другой (энергичной) $N_h \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и $T_h \sim 10 \text{ кэВ}$. Зарегистрированы квазипериодические импульсные высыпания энергичных электронов из ловушки, сопровождающиеся всплесками электромагнитного излучения на частоте ниже электронной гирочастоты в центральном сечении ловушки. Проведенное исследование СВЧ-излучения плазмы и высыпающихся из ловушки энергичных электронов позволило установить, что высыпания связаны с возбуждением свистовых волн с направлением распространения, близким к направлению оси ловушки. Наблюдаемая неустойчивость имеет много общего с явлениями, наблюдаемыми в космических магнитных ловушках, таких как радиационные пояса в магнитосферах планет и солнечные корональные петли. Результаты эксперимента демонстрируют возможность моделирования космических циклотронных мазеров в лабораторных условиях.

The results of laboratory modeling of space cyclotron masers dynamics are discussed. An auto-oscillation regime of the cyclotron instability in nonequilibrium ECR-discharge plasma in a simple mirror machine is observed. The plasma comprises two populations of electrons, one of which (bulk plasma) has the number density $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and the temperature $\sim 300 \text{ eV}$, and the other (energetic) $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ and 10 keV , respectively. The instability occurs as quasi-periodic bursts of precipitated energetic electrons, accompanied with bursts of the electromagnetic radiation at frequencies below the electron gyrofrequency in the trap center. We found that the spike-like regimes of precipitation observed in the laboratory trap are generally consistent with the theory of cyclotron masers and can have much in common with similar regimes in space cyclotron masers, in particular, in magnetospheric radiation belts and solar flare loops. Experimental results show prospects of laboratory modeling of space cyclotron masers.

На динамику многих процессов в космической плазме оказывает большое влияние резонансное взаимодействие частиц и волн, в частности, циклотронное взаимодействие. Изучение этих процессов, начатое еще в 60-х гг. [1], привело в дальнейшем к разработке концепции космических циклотронных мазеров (КЦМ). Многие успехи в развитии этой концепции связаны с работами по самосогласованной теории циклотронной неустойчивости в приложении к магнитосфере Земли [2].

Функционирование КЦМ определяет заселенность радиационных поясов Земли и планет энергичными частицами [2] и генерацию самых мощных электромагнитных излучений в магнитосферах планет, таких как хоровые КНЧ-ОНЧ-излучения в магнитосфере Земли, километровое излучение Земли и декаметровое излучение Юпитера.

Электродинамической системой такого мазера служит магнитная силовая трубка, заполненная плотной холодной плазмой. Фоновая плазма в основном определяет дисперсионные свойства генерируемых электромагнитных волн. Например, в КНЧ-ОНЧ-диапазоне (частоты от нескольких сот до 10–15 кГц), таковыми являются эффективно взаимодействующие с электронами свистовые волны. Области ионосферы, на которые опирается магнитная силовая трубка, исполняют роль зеркал резонатора. Активным веществом мазера являются энергичные частицы радиационного пояса (РП) с неравновесным распределением по скоростям.

Действие подобного мазера основано на циклотронном резонансе электронов, вращающихся с частотой ω_B в магнитном поле, с волной, частота которой

ω удовлетворяет условию: $\omega - \omega_B = k_{\parallel} v_{\parallel}$, где k_{\parallel} и v_{\parallel} – составляющие волнового вектора и скорости электрона вдоль магнитного поля соответственно. Электроны при определенных условиях могут отдавать энергию волне (циклотронная неустойчивость). В результате пакет свистовых волн, распространяясь между зеркалами, усиливается. Кроме того, при взаимодействии с волной электроны уменьшают свою поперечную энергию, попадают в конус потерь в пространстве скоростей и выносятся из ловушки в ионосферу. Оказывается, что КЦМ могут функционировать как в режиме квазистационарной генерации излучения, так и в импульсном режиме, который проявляется в виде всплывающих выбросов потоков энергичных частиц в ионосферу, сопровождаемых короткими всплесками КНЧ-ОНЧ-излучения.

Актуальность задачи лабораторного моделирования КЦМ обусловлена известными трудностями исследования космических явлений, такими как их большие масштабы, спорадический характер и большее число взаимозависимых факторов, трудно учитываемых и не поддающихся регулированию. Лабораторный эксперимент дает возможность многократного повторения измерений при контролируемом изменении параметров. В то же время лабораторное моделирование имеет свои трудности, связанные уже со слишком малыми пространственными и временными масштабами моделируемых процессов при их переносе из космоса в лабораторные условия. Успех в лабораторном моделировании может быть достигнут при сохранении основных безразмерных параметров, определяющих динамику волн и частиц в КЦМ и лабораторной системе, т.е. должны выполняться следующие

условия:

- отношение максимального магнитного поля к полю в центре ловушки (пробочное отношение) должно быть много больше 1;
- отношение длины волны возбуждаемых волн к длине системы $L/\lambda \gg 1$;
- $N_c \gg N_h$, где N_c – плотность холодной изотропной плазмы, N_h – горячая анизотропная компонента;
- $Th_{\parallel} \ll Th_{\perp}$ (в распределении горячих электронов преобладают частицы с большими поперечными по отношению к магнитному полю скоростями).

В настоящей работе лабораторное моделирование процессов в КЦМ осуществлялось на экспериментальной установке, основу которой составляет магнитная ловушка – пробкотрон (длина ловушки 25 см, $B_{\max} = 3.5$ Тл, пробочное отношение составляет 4 или 10). Плазма в ловушке образуется в результате ЭЦР пробы газа низкого давления ($\sim 10^{-4}$ Т) под действием сфокусированного СВЧ-излучения (37.5 ГГц, 100 кВт). Из проведенных ранее исследований [3] известно, что в плазме присутствуют две популяции электронов, одна из которых (фоновая изотропная) имеет концентрацию $N_c \sim 10^{13}$ см⁻³ и температуру $T_c \sim 300$ эВ, а для другой (энергичной анизотропной) $N_h \sim 10^{10}$ см⁻³ и $T_h \sim 10$ кэВ. Для приема собственного СВЧ-излучения плазмы в диапазонах >2, >5.4, >8.2, >11.8 ГГц на оси ловушки размещались коаксиально-волноводные переходы. Для измерения потока энергичных электронов использовался PIN диод, регистрирующий частицы с энергиями больше 7 кэВ.

Результаты

При определенных условиях в плазме развивается неустойчивость, характеризующаяся импульсными высыпаниями энергичных электронов из ловушки и короткими всплесками СВЧ-излучения на частотах 2–11 ГГц (при электронной гирочастоте в центре ловушки $f_{HL} \sim 15$ ГГц).

Наблюдения показали, что обнаруженная неустойчивость, как правило, развивается в виде квазипериодической последовательности импульсов излучения (автоколебательный режим), но могут также наблюдаться одиночные импульсы заметно большей амплитуды, чем при автоколебательном режиме («гигантские импульсы») и более сложная, чем квазипериодическая, модуляция излучения во времени.

Пример типичных временных зависимостей СВЧ-излучения плазмы и тока на PIN диоде, характеризующего высыпания энергичных электронов, приведен на рис. 1. В данном случае неустойчивость развивается в виде квазипериодических (характерный период до 200 нс) синхронных всплесков СВЧ-излучения и импульсов тока на PIN диоде с характерной длительностью 30 нс.

Эксперименты показали, что неустойчивость развивается в некотором диапазоне значений электронной концентрации плазмы N_c , ограниченном снизу и сверху. Импульсные высыпания и вспышки СВЧ-излучения появляются при монотонном увеличении концентрации плазмы до некоторого порога N_{cmin} и прекращаются при увеличении N_c выше значения N_{cmax} . По-видимому, при превышении N_c

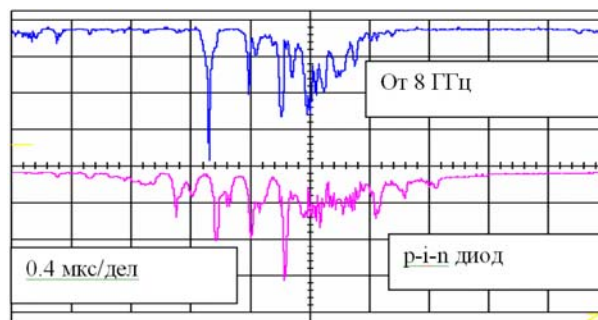


Рис. 1. Осциллограммы СВЧ-излучения плазмы и сигнала PIN диода при автоколебательном режиме неустойчивости.

некоторого значения популяция горячих электронов постепенно исчезает за счет как увеличения столкновительных потерь энергии, так и уменьшения эффективности нагрева вследствие экранирования плазмой зоны резонанса. С другой стороны, при малых N_c концентрация энергичных электронов также слишком мала, чтобы привести к развитию неустойчивости.

Измерения сигнала с помощью КВП в нескольких частотных диапазонах позволяют получить общее представление о спектре излучения. На рис. 2 показаны зависимости проинтегрированного за «выстрел» (т.е. в течение импульса СВЧ-накачки) сигнала СВЧ-детектора в разных частотных диапазонах от магнитного поля B_L в центре ловушки при оптимальном начальном давлении нейтрального газа ($p_0 = 10^{-4}$ Т) и пробочном отношении 4. Необходимо отметить, что приведенные на рис. 2 кривые для разных частотных каналов не являются калиброванными друг относительно друга и не могут служить основанием для построения спектра излучения, но позволяют утверждать следующее: 1) излучение сосредоточено в области частот $2 < f < 11$ ГГц и 2) при увеличении магнитного поля ловушки спектр сдвигается в область больших частот. В самом коротковолновом канале > 11.8 ГГц СВЧ-излучение не наблюдалось ни при каких условиях.

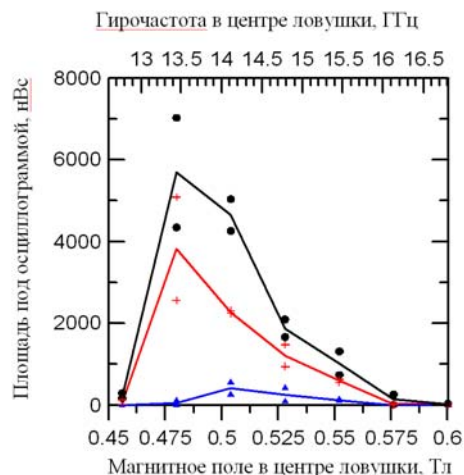


Рис. 2. Интегральная интенсивность излучения плазмы в зависимости от магнитного поля в центре ловушки. Диапазоны: крестики – от 2.2 ГГц, кружки – от 5.4 ГГц, треугольники – от 8 ГГц.

Обсуждение

Наблюдаемые в эксперименте высыпания энергичных электронов из ловушки и всплески СВЧ-излучения наиболее естественно связать с возникновением циклотронной неустойчивости свистовой моды с малыми углами распространения по отношению к магнитному полю. Это подтверждается расчетами усиления электромагнитных свистовых волн [4]. Ограниченность по частоте и сдвиг спектра излучения в сторону высоких частот при увеличении магнитного поля также непосредственно следуют линейной теории циклотронной неустойчивости РП Земли [2].

Следует отметить, что длительность регистрируемых импульсов заметно больше времени группового распространения свистового сигнала в ловушке $t_{гр} = 4$ нс. Это свидетельствует о том, что в магнитной ловушке формируется резонатор для свистовых волн, зеркалами которого служат, по-видимому, области перехода плазма–вакуум. Это подтверждается в том числе и тем, что циклотронная неустойчивость развивается в определенном диапазоне плотности плазмы.

Наблюдаемые в эксперименте автоколебания имеют много общего с квазипериодическими излучениями в земной магнитосфере с периодами $T \sim 10^2$ с.

Результаты экспериментов и их сопоставления с теорией [4] позволяют рассчитывать на более детальное моделирование аналогичных явлений в космических циклотронных мазерах, играющих важную роль в динамике околоземной, околопланетной и солнечной плазмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андронов А.А., Трахтенгерц В.Ю. // Геомагнетизм и аэрономия. 1964. Т. 4, № 2. С. 233.
2. Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Энергоатомиздат, 1980. Т. 10. С. 88.
3. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Зорин В.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, № 14. С. 90
4. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Демехов А.Г. и др. Лабораторное моделирование нестационарных процессов в космических циклотронных мазерах: первые результаты и перспективы // Физика плазмы. 2005. Т. 31, № 11. С. 1–12.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород