Десятая ежегодная конференция

Физика плазмы в Солнечной системе

16-20 февраля 2015, ИКИ РАН Научные программы Президиума РАН №22 и ОФН РАН №15

Импульсно-периодический режим кинетической неустойчивости плазмы ЭЦР разряда в условиях двойного плазменного резонанса

М.Е. Викторов, С.В. Голубев, В.В. Зайцев, Д.А. Мансфельд

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Двойной плазменный резонанс



H. Aurass, K.-L. Klein, E. Ya. Zlotnik, V. V. Zaitsev, *A&A*, 2003, **410**, 1001.

VLF hiss Porojärvi station (Финляндия) 23 ноября 1995 г. Зебра-структуры в радиоизлучении Солнца



Двойной плазменный резонанс



Радиоизлучение Юпитера 21 октября 2000 г. КА Кассини

Kuznetsov A.A. and Vlasov V.G., Planetary and Space Science, 2013, 75, 167.

Микроволновое излучение пульсара в Крабовидной туманности (NP0532)



Двойной плазменный резонанс



Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya., 1975, Solar Phys., **43**, p.431 Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya., 1975, Solar Phys., **44**, p.447 Zaitsev V.V., Stepanov A.V., 1975, Astron. Astrophys., **45**, p.135



Неравновесные распределения электронов

Схема экспериментального стенда



- 3. Импульсный клапан
- 4. p-i-n диод, регистрирующий энергичные электроны (10 180 кэВ)

5,6. Приемные антенны СВЧ излучения

- 7. Диамагнитный зонд
- 8. Ленгмюровский зонд

Микроволновое излучение плазмы ЭЦР разряда



Микроволновое излучение плазмы ЭЦР разряда





Распад плазмы и условие двойного плазменного резонанса



1. Возбуждение плазменных волн

$$\omega_{pe} > \omega_{ce} \ (\omega_{pe} \approx \sqrt{3}\omega_{ce})$$

$$(0.1 \div 1) rac{N_h}{N_c} \omega_{ce}$$
 - инкремен

- инкремент неустойчивости в условиях ДПР

CM

2. Плазменные волны трансформируются в электромагнитные (например, в результате рассеяния на тепловых ионах)

 $\Gamma \approx$

Волны распространяются поперек внешнего магнитного поля с $k_{\perp} \approx \frac{\omega}{v_h}$, где v_h - скорость неравновесных резонансных электронов.

Групповая скорость: $v_{gr} \approx \frac{3 k_{\perp} v_{T_e}^2}{\omega} \approx \frac{3 v_{T_e}^2}{v_h}$ Усиление: $\mu = \frac{\Gamma}{v_{gr}} \approx (0.1 \div 1) \frac{N_h}{N_c} \frac{\omega_{ce} v_h}{3 v_{T_e}^2}$ $\mu \approx 1.5 \times (10^3 \div 10^4) \text{ см}^{-1}$

Ширина полосы неустойчивости при реализации двойного плазменного резонанса составляет $\Delta\omega \approx 0.1\omega$, тогда оптическая толщина усиления для плазменных волн, распространяющихся «по касательной» к поверхностям равного магнитного поля:

$$3 \times (10^3 \div 10^4)$$
 при $R_\perp = 3.5$

Импульсно-периодический режим неустойчивости





Длительность одного всплеска ~ 50 нс

Импульсно-периодический режим неустойчивости

Конкуренция процессов возбуждения волн и их индуцированного рассеяния.

Lotka–Volterra equations:

$$\frac{dw}{dt} = \Gamma w - \xi w w^*,$$
$$\frac{dw^*}{dt} = \xi w w^* - v w^*$$

- *w* уровень плазменной турбулентностив неустойчивом интервале углов
- w^* уровень плазменной турбулентности в затухающем интервале углов состояние равновесия: $w_0 = \frac{\nu}{\xi}, w_0^* = \frac{\Gamma}{\xi}$.
- 1. Случай слабой модуляции плотности энергии плазменных волн :

$$|w - w_0| \ll w_0, |w^* - w_0^*| \ll w_0^* \implies T = \frac{2\pi}{\sqrt{\Gamma \nu}}$$

2. Случай глубокой модуляции плотности энергии плазменных волн :

$$T = 200 \text{ Hc} \implies \nu \approx 7.5 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$$

Оценки декремента плазменных волн на основе экспериментальных данных: $T = 200 \text{ нс} \implies \nu \approx 7.5 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$

Оценки на основе численного расчета распада фоновой плазмы:





 $N_e \approx 2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $T_e \approx 5 \text{ sB} \implies v_{ei} \approx 6 \times 10^6 \text{ c}^{-1}$

Быстрые магнитозвуковые волны

$$R_{\perp} = 3.5 \text{ cm}$$
 $v_A \approx 10^8 \text{ cm/c}$ $v_S \approx 6 \times 10^5 \text{ cm/c}$

$$T_{FMS} \approx 2.6 \frac{R_{\perp}}{\sqrt{v_A^2 + c_S^2}} \approx 90$$
 нс – приблизительно в два раза меньше, чем в
эксперименте.
(приближение бесконечного цилиндра без
учета реальной геометрии магнитной ловушки)

В случае БМЗ колебаний периодические высыпания быстрых электронов объясняются периодическим изменением пробочного отношения ловушки.

Характерное время затухания БМЗ колебаний определяется в нашем случае вязкостью и составляет около 100 мкс, т.е. порядка длительности интенсивного высокочастотного излучения.

Это означает, что модуляцию собственного излучения плазмы БМЗ колебаниями исключить нельзя.

Спасибо за внимание!

Распад фоновой плазмы

$$\frac{dN_{e}}{dt} = -\nu_{gd}N_{e} + k_{i}N_{m}N_{e} - k_{d}N_{m}^{+}N_{e} - \alpha_{3r}N_{e}^{2}N_{i},$$

$$\frac{dN_{i}}{dt} = -\nu_{gd}N_{i} - k_{cx}N_{i}N_{m} - \alpha_{3r}N_{e}^{2}N_{i},$$

$$\frac{dN_{m}}{dt} = F - k_{i}N_{m}N_{e} - k_{cx}N_{i}N_{m},$$

$$\frac{dN_{m}^{+}}{dt} = k_{i}N_{m}N_{e} - k_{d}N_{m}^{+}N_{e} + k_{cx}N_{i}N_{m},$$

$$\frac{dT_{e}}{dt} = -\nu_{gd}\left(\frac{1}{3}\ln\frac{m_{i}}{m_{e}} - 1\right)T_{e} - k_{i}N_{m}\left(T_{e} + \frac{2}{3}E_{i}\right)$$