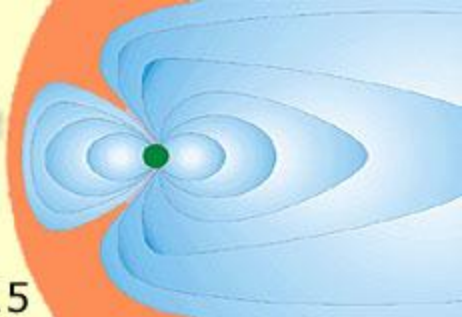




Девятая ежегодная конференция
Физика плазмы в Солнечной системе

10-14 февраля 2014, ИКИ РАН

Научные программы Президиума РАН №22 и ОФН РАН №15



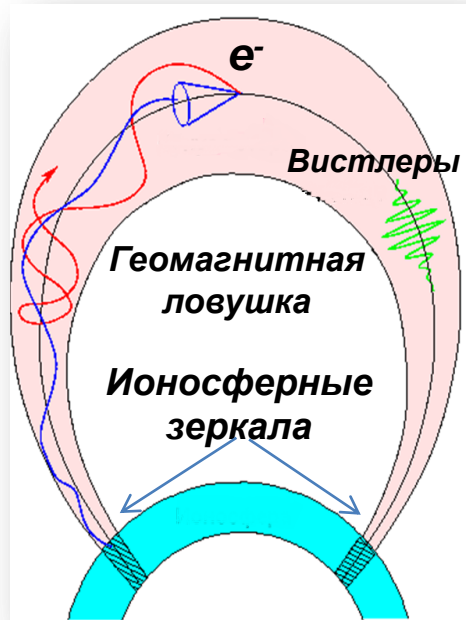
Импульсные режимы электронно-циклотронной неустойчивости плазмы в открытой магнитной ловушке

М.Е. Викторов, С.В. Голубев, Д.А. Мансфельд,
А.Г. Шалашов, Е.Д. Господчиков, И.В. Изотов

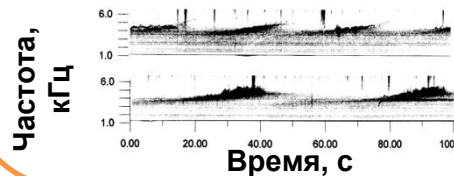
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Примеры космических циклотронных мазеров

Циклотронный мазер на свистовых волнах



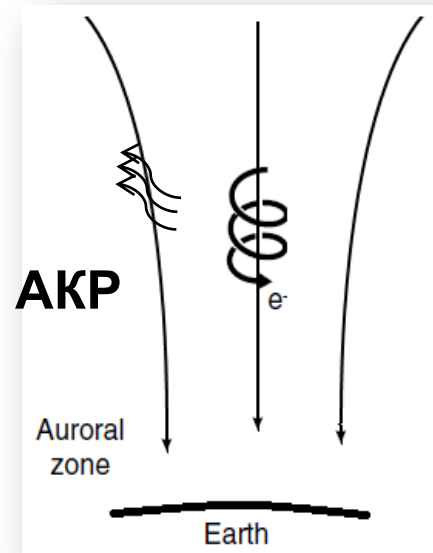
КНЧ/ОНЧ излучение
(Трахтенгерц, 1963)



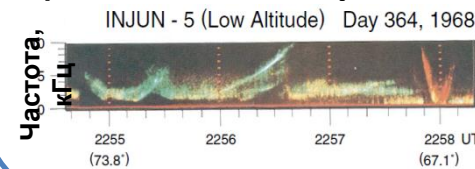
Плотная
плазма

$$\omega_{pe} > \omega_{ce}$$

Циклотронный мазер на X-моду



Авроральное
Километровое
Радиоизлучение
(Бенедиктов и др., 1965)

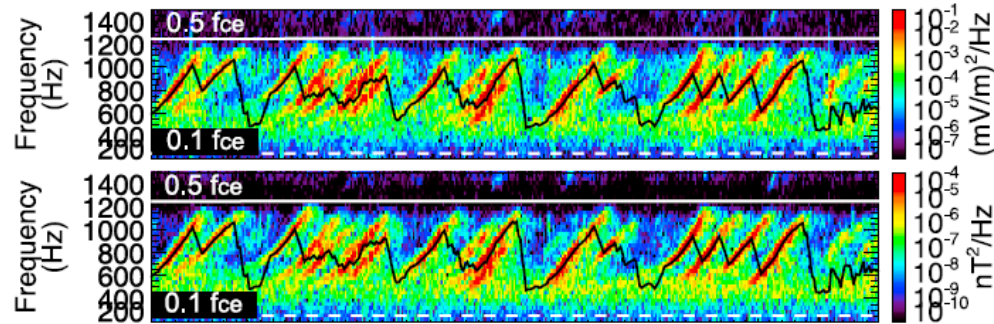


Разреженная
плазма

$$\omega_{pe} < \omega_{ce}$$

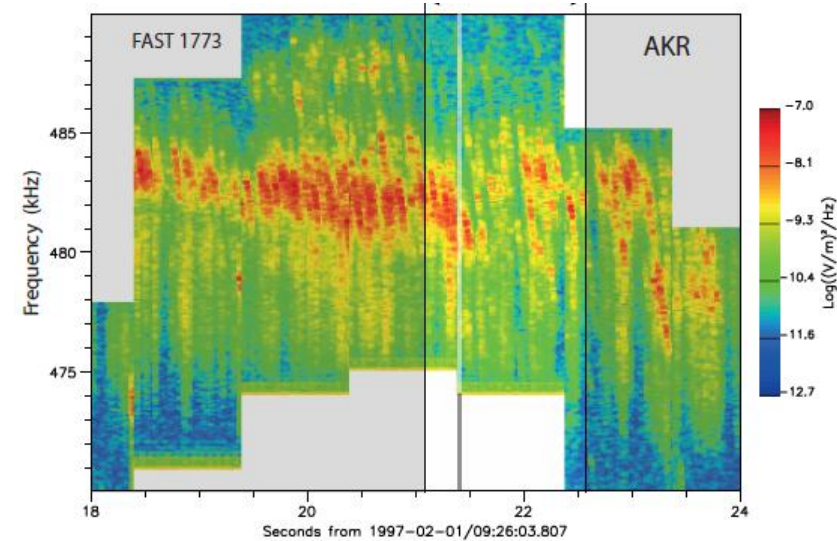
Генерация электромагнитных волн во внутренней магнитосфере Земли

Хоровые излучения по данным спутника THEMIS D (возрастающий тон)



W. Li et al., Geophys. Res. Lett., **38**, L14103, 2011

Авроральное километровое излучение по данным спутника FAST



R.A. Treumann et al., Ann. Geophys., **29**, 1885, 2011

Сложности космического эксперимента:

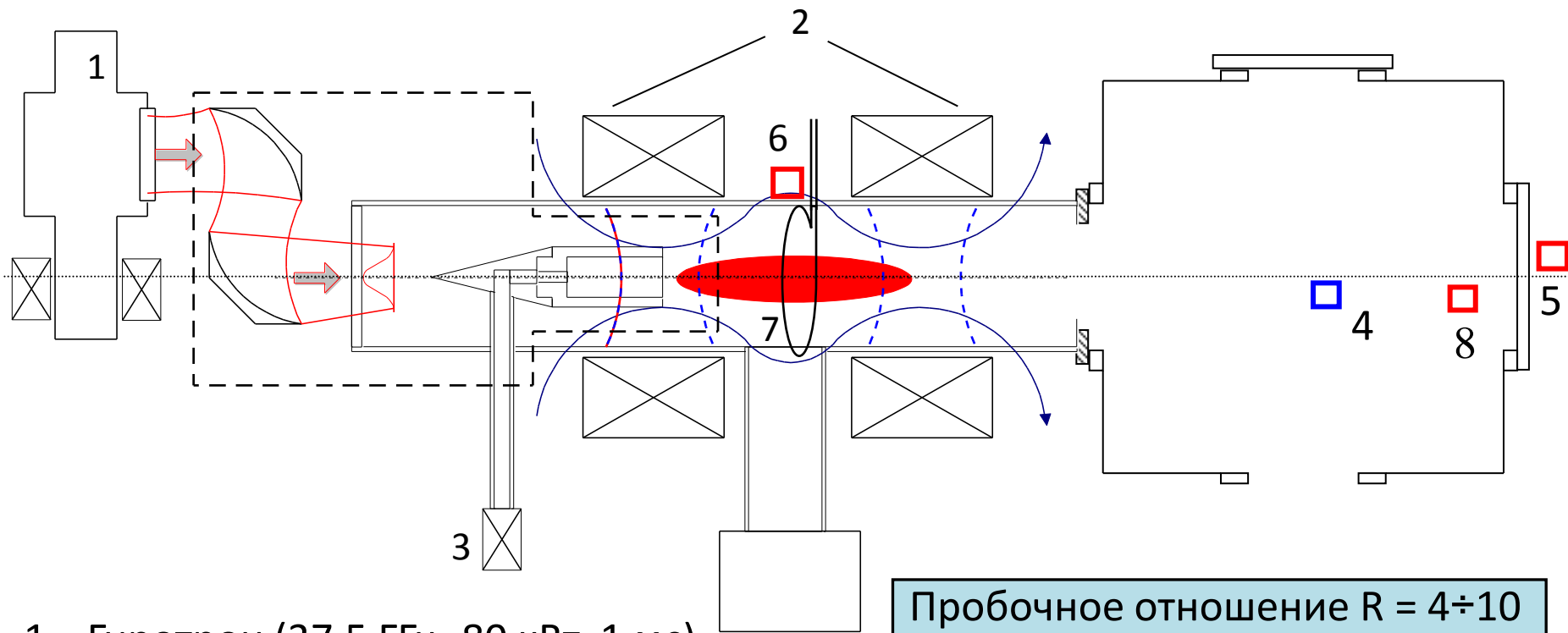
- локальный характер измерений
- разделение пространственных и временных зависимостей



Лабораторные исследования:

- управляемые параметры эксперимента
- повторяемость

Схема экспериментального стенда

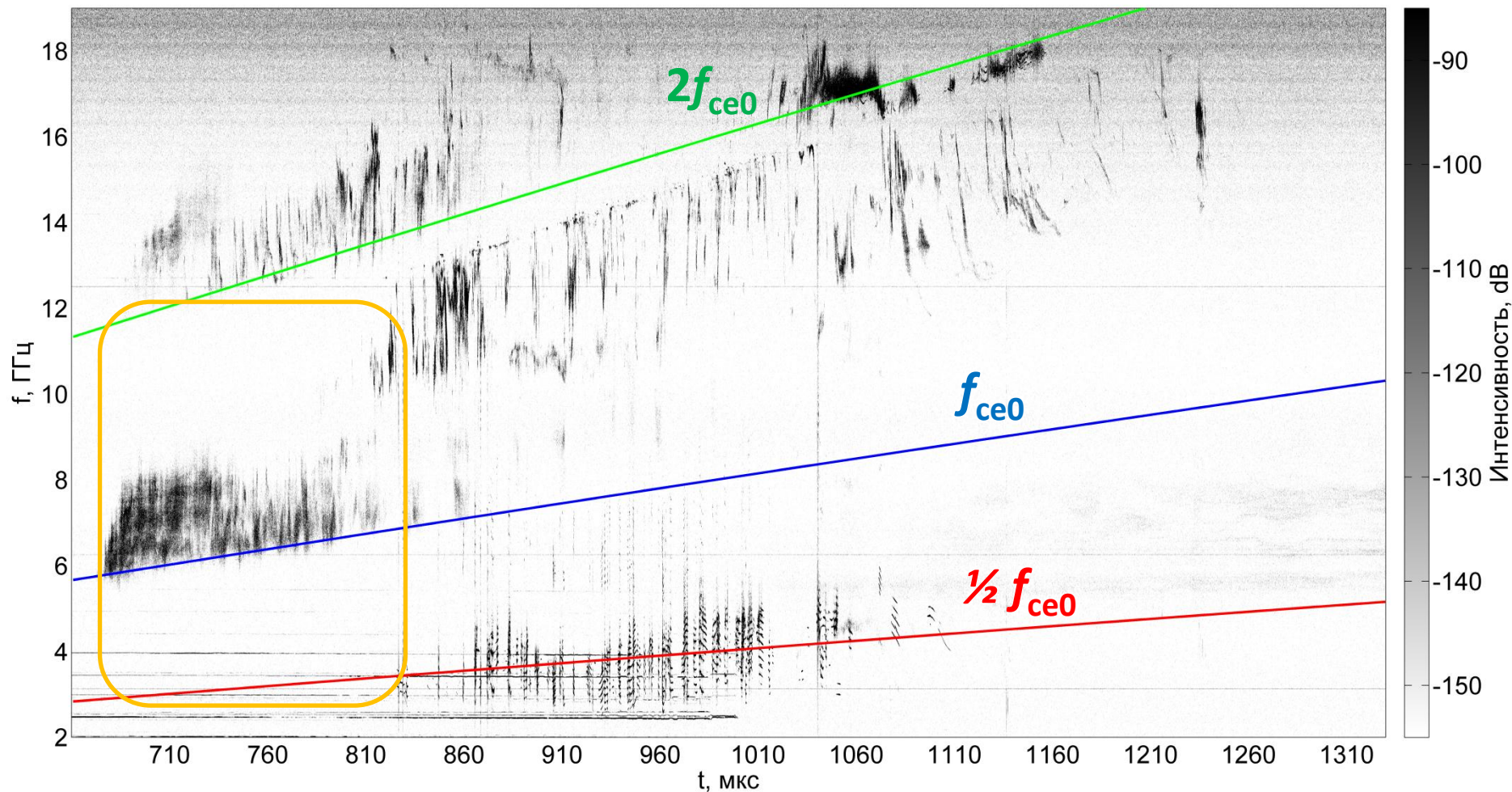


1. Гиротрон (37.5 ГГц, 80 кВт, 1 мс)
2. Зеркальная магнитная ловушка
3. Импульсный клапан
4. р-і-n диод, регистрирующий энергичные электроны (10 - 180 кэВ)

Пробочное отношение $R = 4 \div 10$
Длина ловушки ~ 25 см,
Макс. магнитное поле 4.3 Тл

- 5,6. Приемные антенны СВЧ излучения
7. Диамагнитный зонд
8. Ленгмюровский зонд

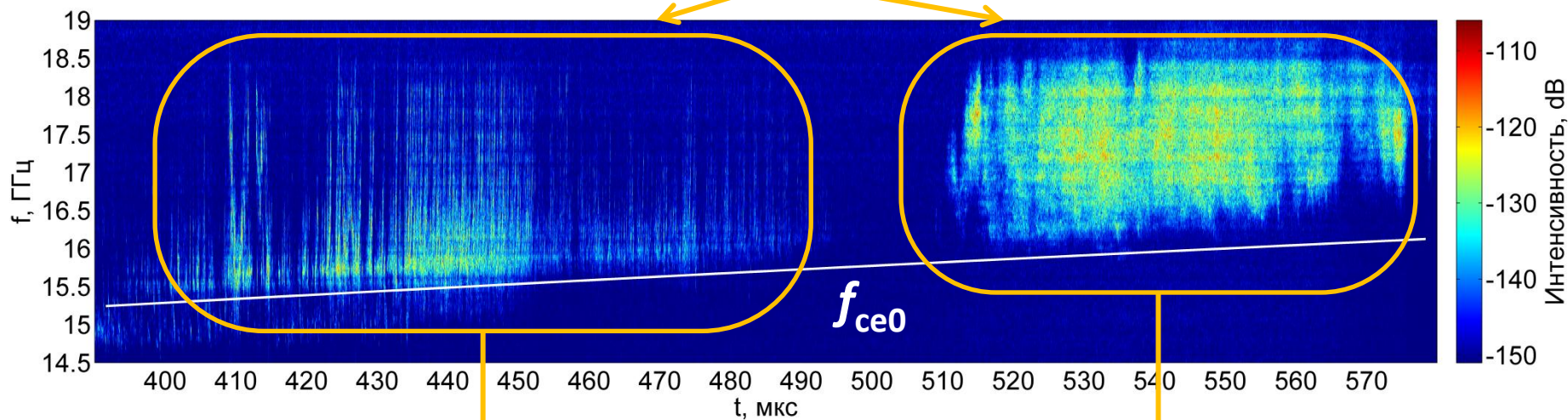
Особенности развития циклотронных неустойчивостей плазмы на разных стадиях ЭЦР разряда



$$f_{ce0} = f_{ce}(z_{центр})$$

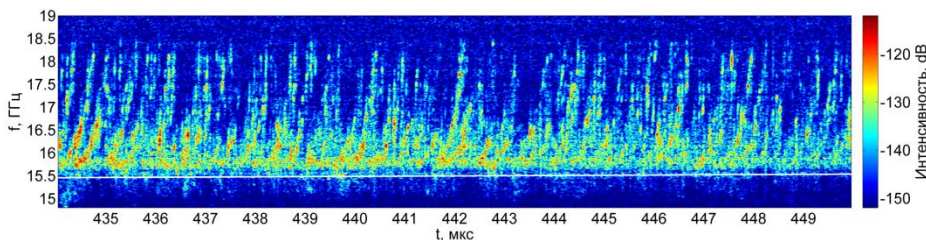
Циклотронная неустойчивость разреженной плазмы на начальной стадии ЭЦР разряда

2 режима развития неустойчивости при постоянно действующей накачке энергии в горячую анизотропную фракцию электронов



квазипериодические вспышки широкополосного электромагнитного излучения в виде отдельных волновых пакетов с быстро растущей частотой

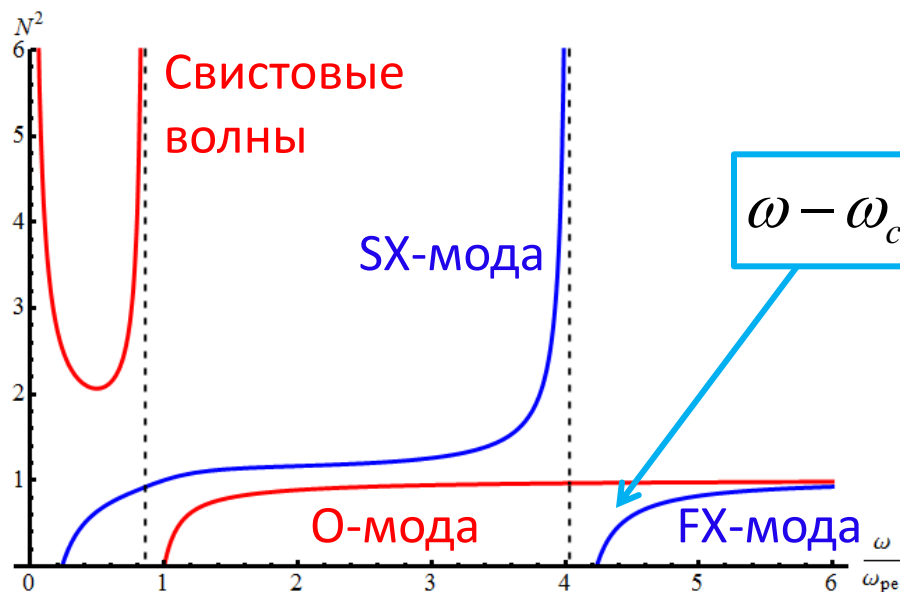
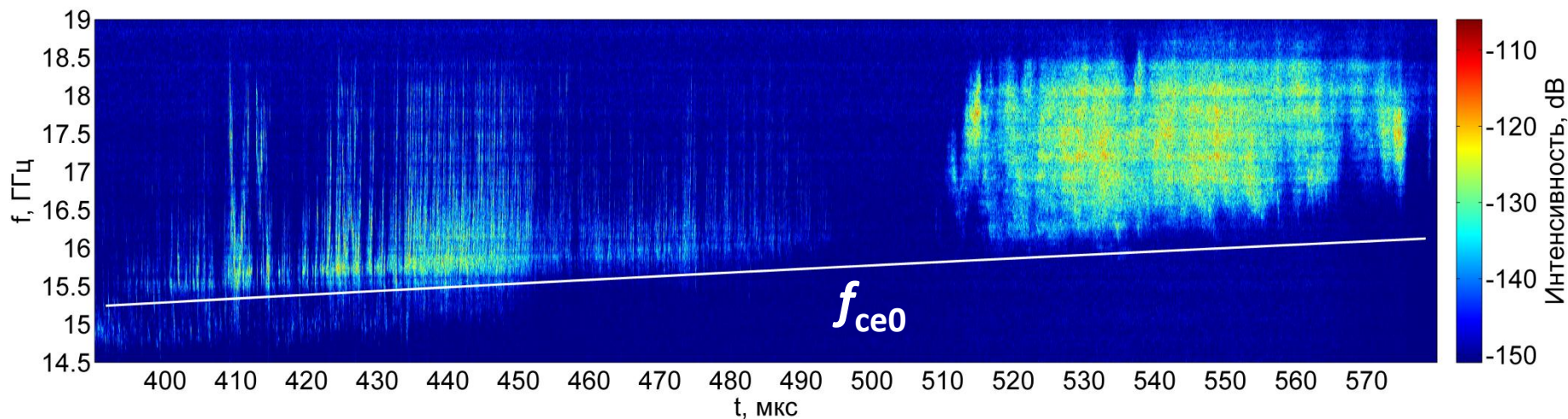
квазинепрерывная генерация излучения с широким (несколько ГГц) спектром



$$f_{min} \geq f_{ce0}$$

$$f_{min} \propto f_{ce0}$$

Циклотронная неустойчивость разреженной плазмы на начальной стадии ЭЦР разряда



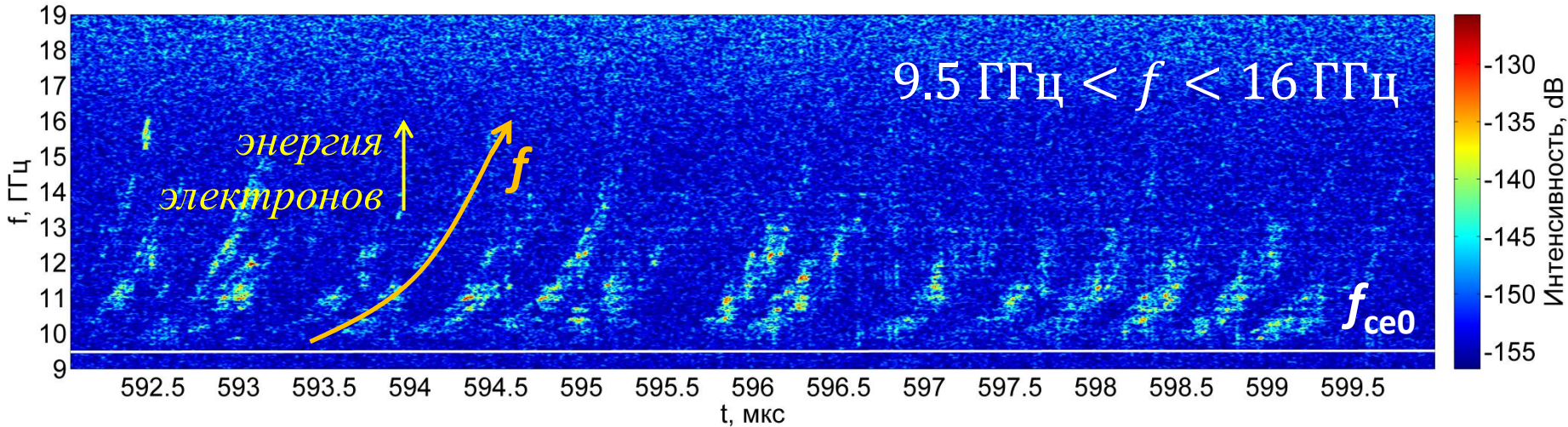
$$f_{min} \geq f_{ce0}$$

$$f_{min} \propto f_{ce0}$$

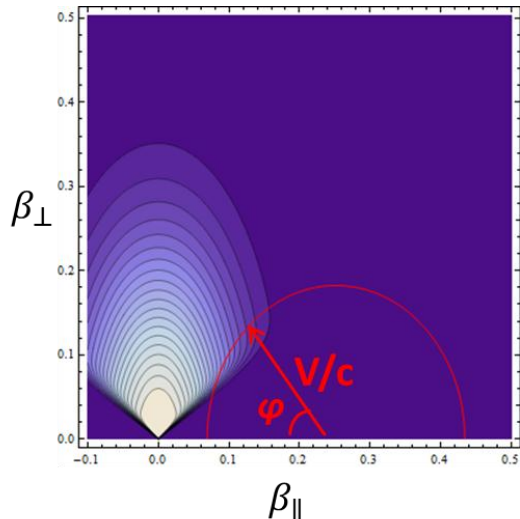
$$N_e \ll N_h$$

$$E_h \sim 100-400 \text{ кэВ}$$

Оценка характерной энергии резонансных электронов



Функция распределения электронов по скоростям (с конусом потерь) совместно с кривой электронно-циклотронного резонанса.



$$\begin{cases} \omega - k_{\parallel} v_{\parallel} - \omega_{ce} \sqrt{1 - v^2 / c^2} = 0, \\ v_{\perp} / v = \sqrt{B_{\min} / B_{\max}} \end{cases}$$



$$\omega / \omega_{ce} = \gamma$$

$$K = mc^2 (\gamma - 1) = mc^2 (\omega / \omega_{ce} - 1)$$

$$\omega_{\max} / \omega_{ce} \sim 1.6$$

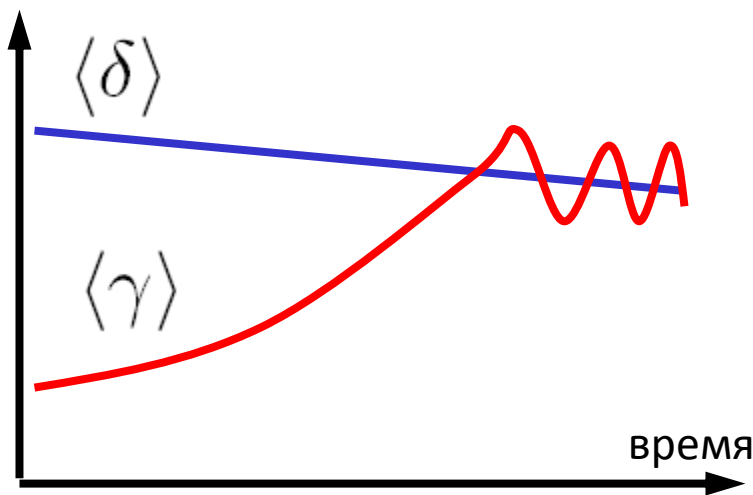
На начальной стадии разряда электроны ускорены до 300 кэВ

Балансные уравнения динамики двухуровневого лазера

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \underline{J} - \kappa N E, & h \approx \kappa T_h \\ \frac{dE}{dt} = (\gamma - \delta) E, & \gamma = h N. \end{cases}$$

E – плотность энергии э/м излучения
 N – “инверсия” (быстрые электроны)

Беспалов П. А.,
Трахтенгерц В.Ю., 1986



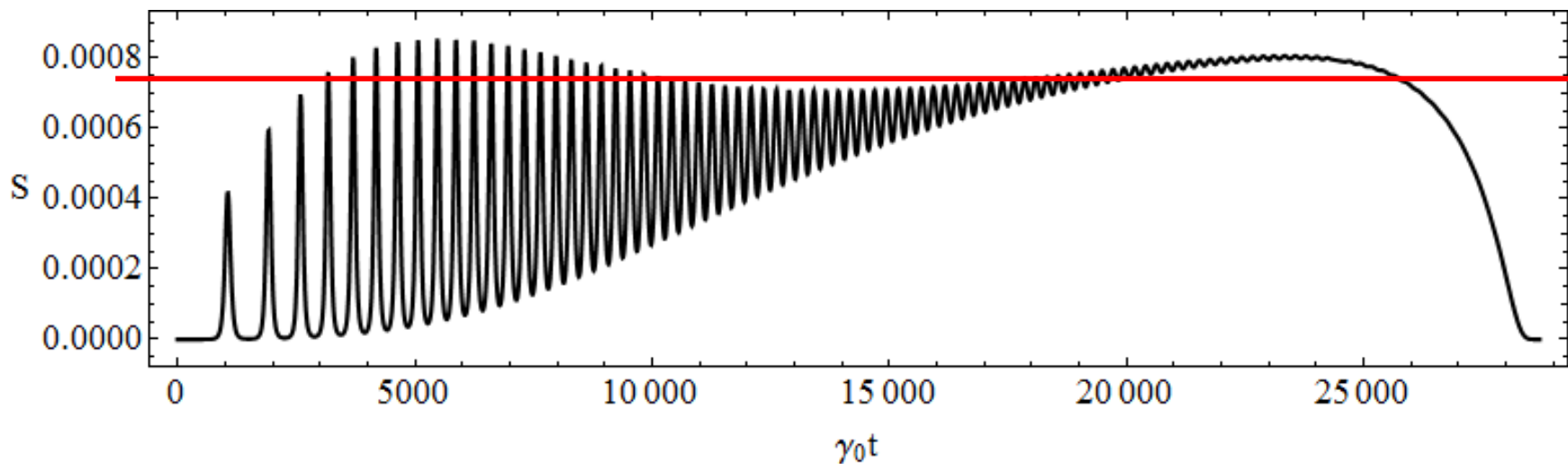
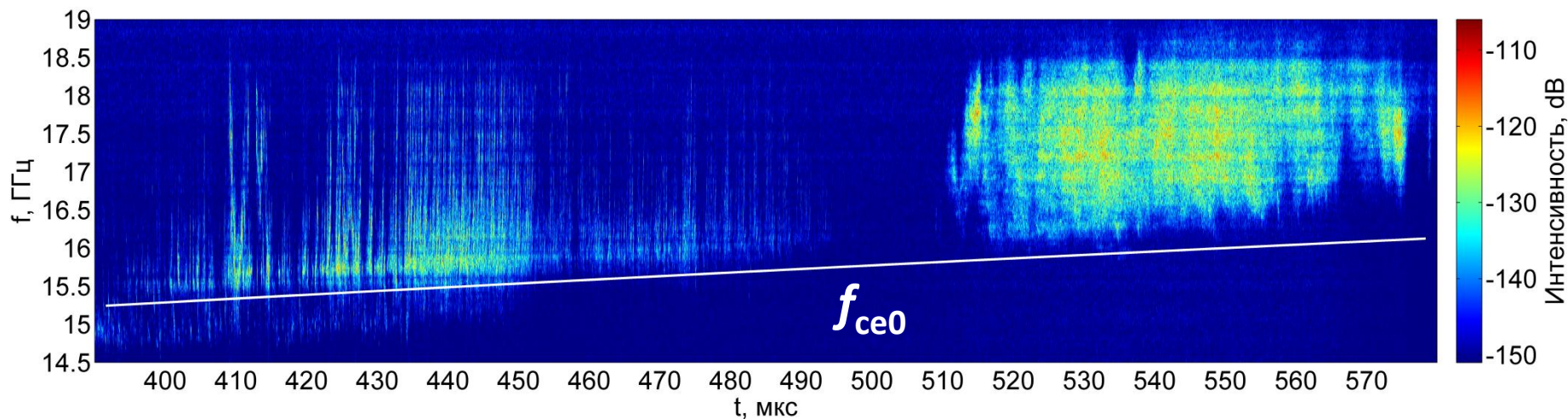
условие генерации

$$\langle \gamma \rangle > \langle \delta \rangle$$

Пример квазипериодического
режима генерации

Характерные режимы циклотронной неустойчивости на начальной стадии ЭЦР разряда

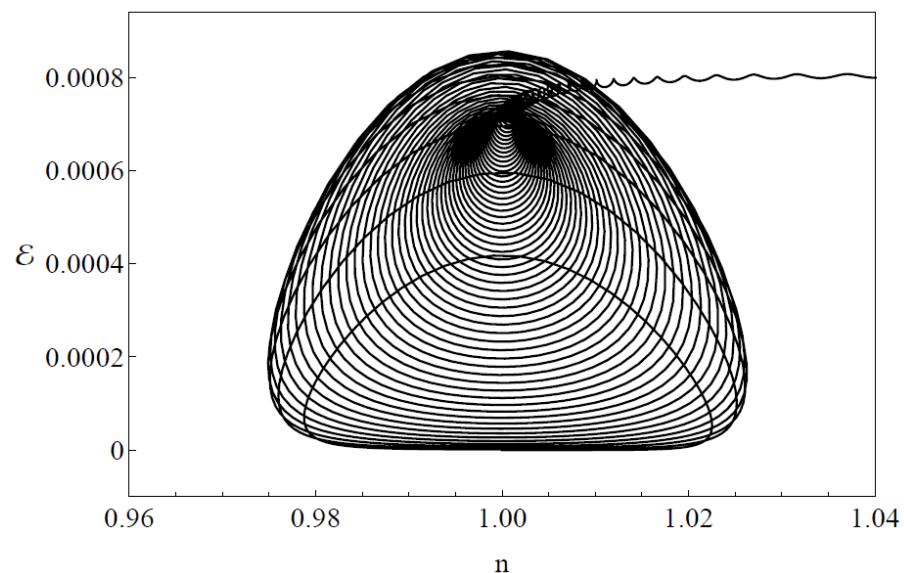
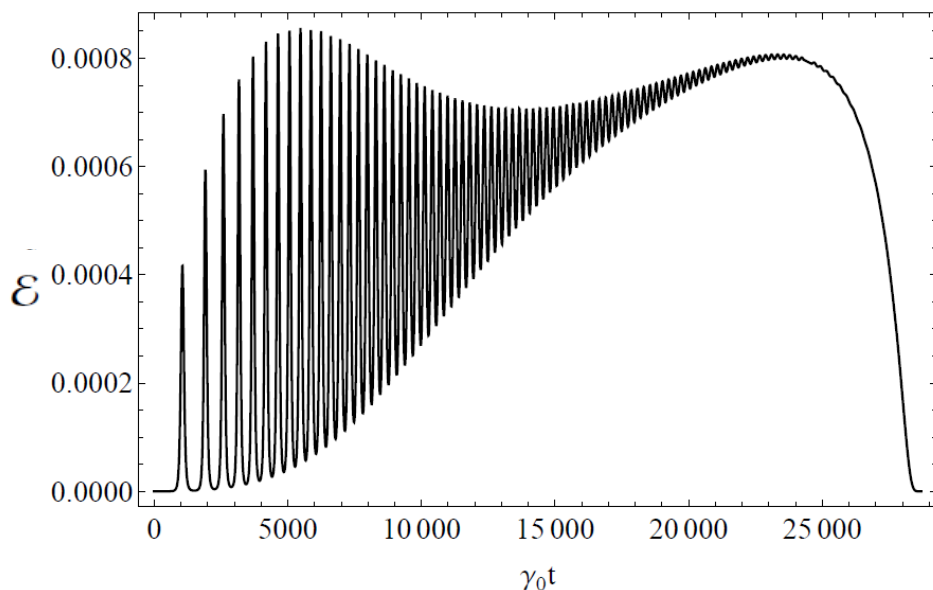
Сравнение с экспериментом



$$\gamma_0 \sim 1.5 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$$

Характерные режимы циклотронной неустойчивости на начальной стадии ЭЦР разряда

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \underline{J} - \kappa NE, & h \approx \kappa T_h \\ \frac{dE}{dt} = (\gamma - \delta)E, & \gamma = hN. \end{cases}$$



- Число вспышек в наблюдаемой серии до выхода в режим стационарной генерации определяло нормированную интенсивность источника частиц
- Положение «тихого» участка на оси времени определяло время изменения источника частиц t_j
- Момент срыва стационарной генерации определял время «выключения» усиления t_h .

Спасибо за внимание!