

Дрейфовый резонанс УНЧ-волны с электронами в наблюдениях аппаратов MMS

Челпанов М.А., Климушкин Д.Ю, Магер П.Н.

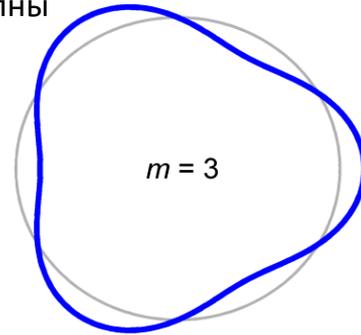
ИСЗФ СО РАН

Иркутск, 2022

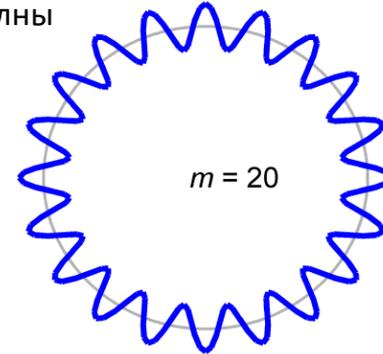


УНЧ-волны в магнитосфере

Крупномасштабные в
азимутальном направлении
волны

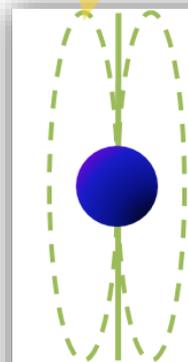


Мелкомасштабные в
азимутальном направлении
волны

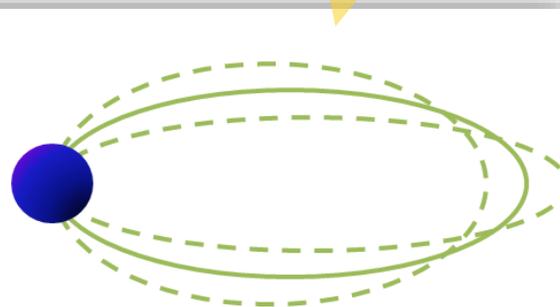


Экваториальная плоскость

Тороидальные колебания



Полоидальные колебания



УНЧ-волны в магнитосфере

- **Тороидальные моды (малые m)**

Внешнего по отношению к магнитосфере происхождения

- **Полоидальные моды (большие m)**

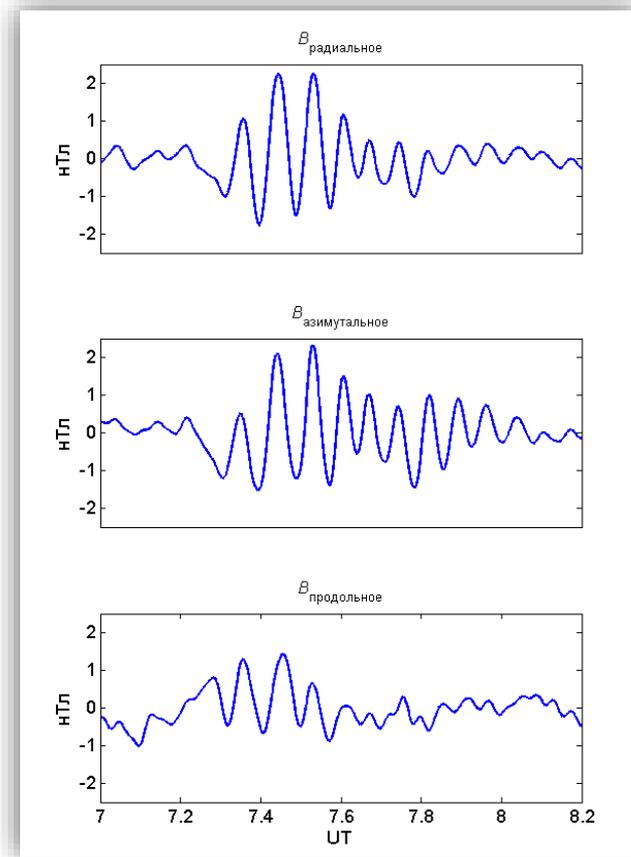
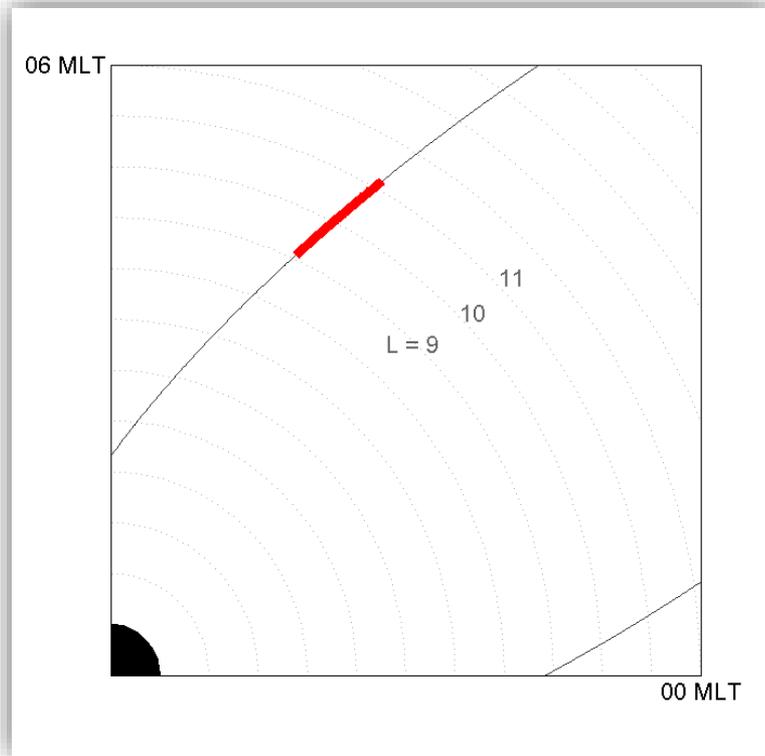
Взаимодействие с энергичными частицами

Распространение преимущественно на запад (взаимодействие с протонами)

По данным когерентного радара декаметрового диапазона ЕКВ, 10–15 % наблюдаемых волн распространяется на восток (положительные m)

Волны с положительными m могут эффективно взаимодействовать с электронами

Наблюдения 7 июля 2020 г.

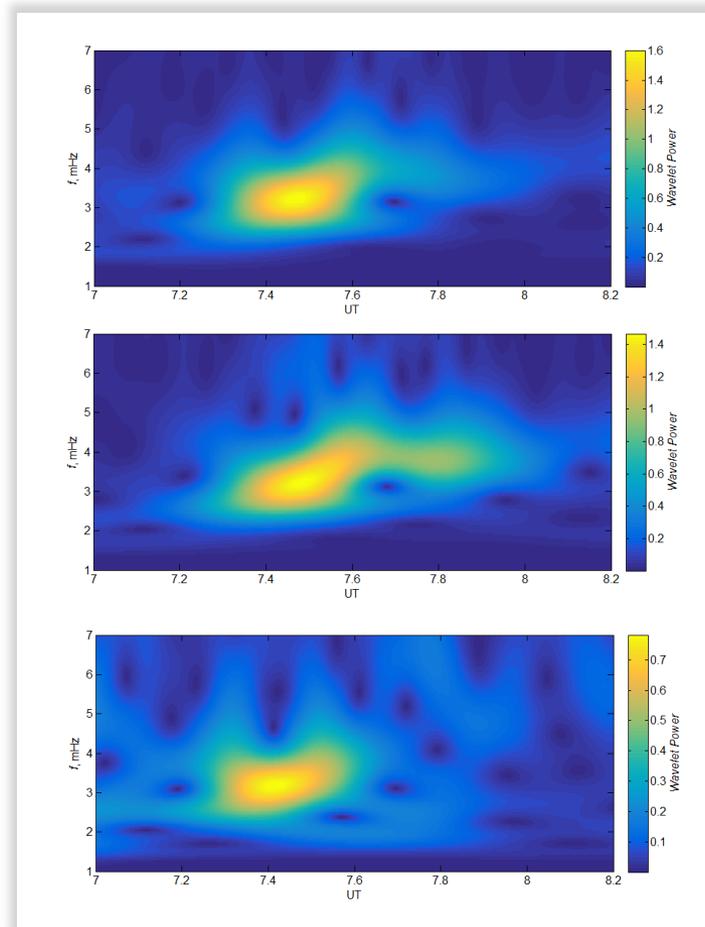
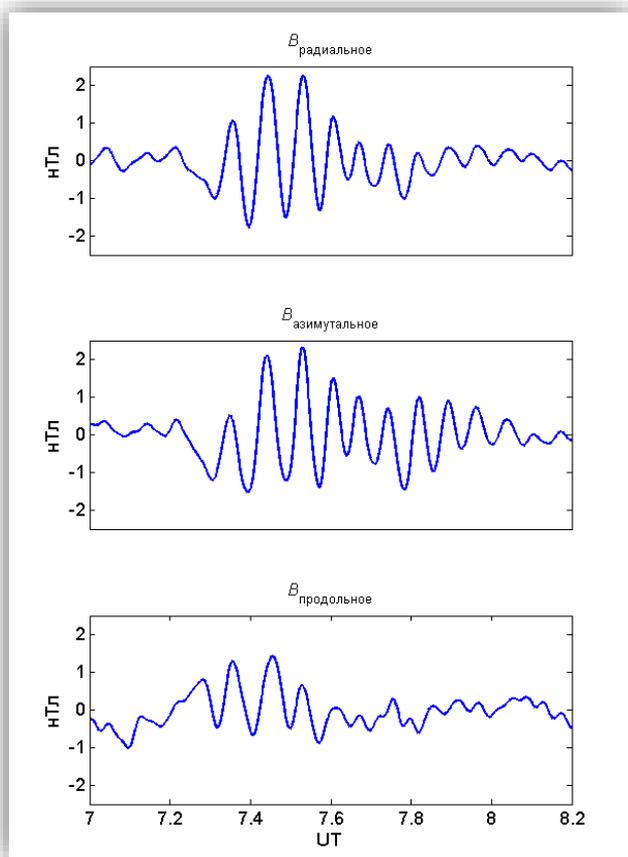


Спутники миссии MMS находились в послеполуночном секторе

Направление движения — в сторону Земли

Магнитные оболочки L = 12–10

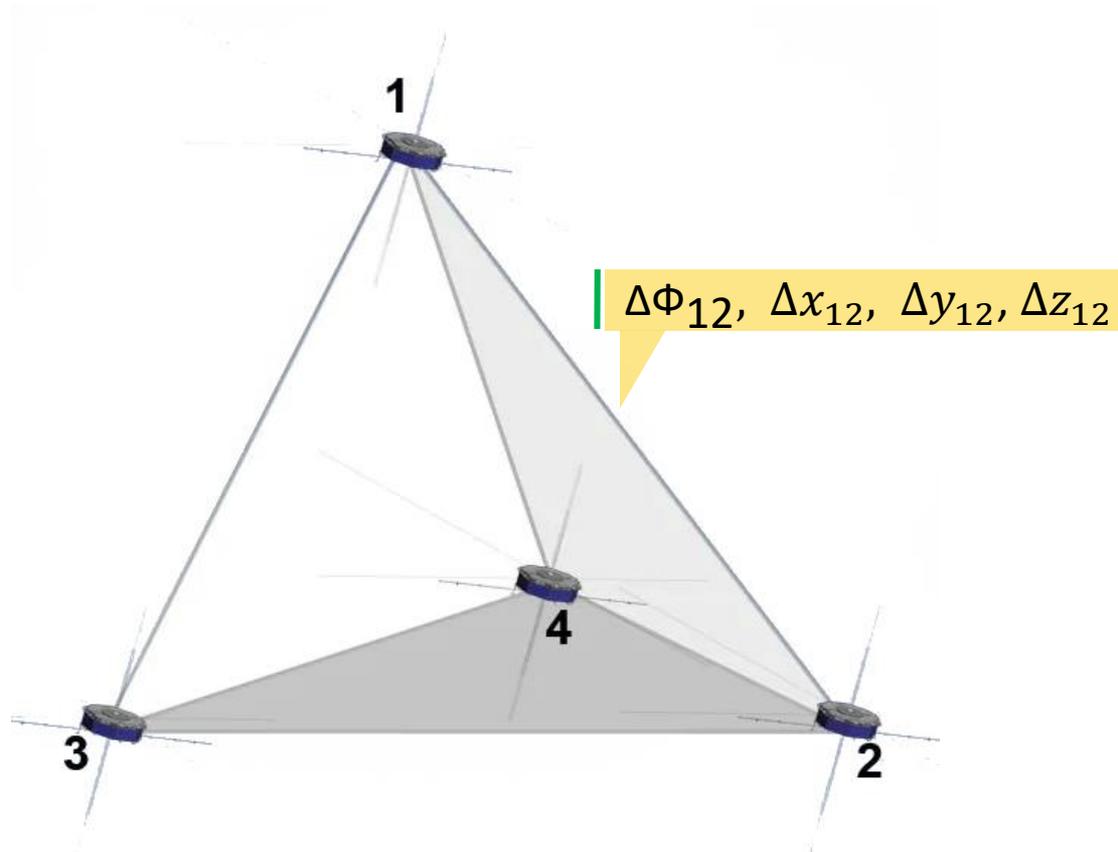
Наблюдения 7 июля 2020 г.



Определение азимутального волнового числа m

Система координат GSE (ориентированная по Солнцу и плоскости эклиптики)

Известны: $\Delta\Phi_{ij}, \Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, \Delta z_{ij}$



Определение азимутального волнового числа m

Система координат GSE (*ориентированная по Солнцу и плоскости эклиптики*)

Известны: $\Delta\Phi_{ij}, \Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, \Delta z_{ij}$

$$\Delta\Phi_{12} = k_x \Delta x_{12} + k_y \Delta y_{12} + k_z \Delta z_{12}$$

$$\Delta\Phi_{13} = k_x \Delta x_{13} + k_y \Delta y_{13} + k_z \Delta z_{13}$$

$$\Delta\Phi_{14} = k_x \Delta x_{14} + k_y \Delta y_{14} + k_z \Delta z_{14}$$



k_{xyz} в системе GSE



k_{xyz} в локальной системе координат,
ориентированной по магнитному полю

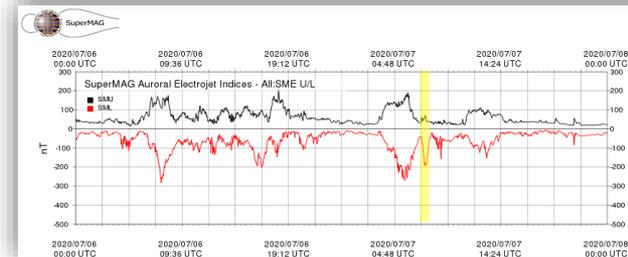
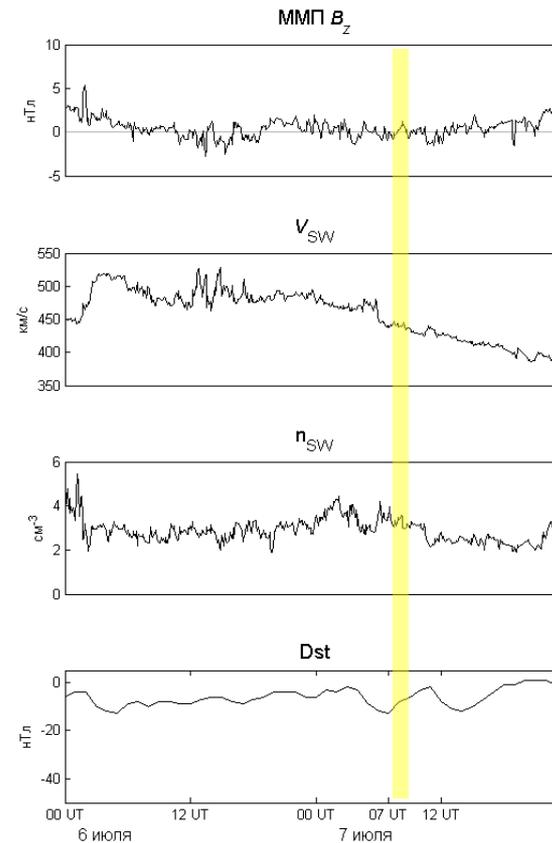
Геомагнитные условия

Азимутальное волновое число $m \approx +25$.

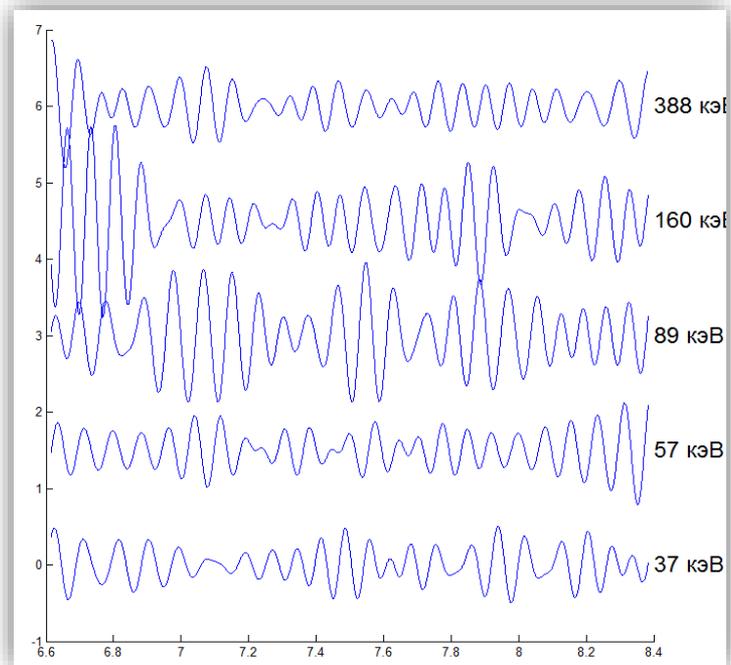
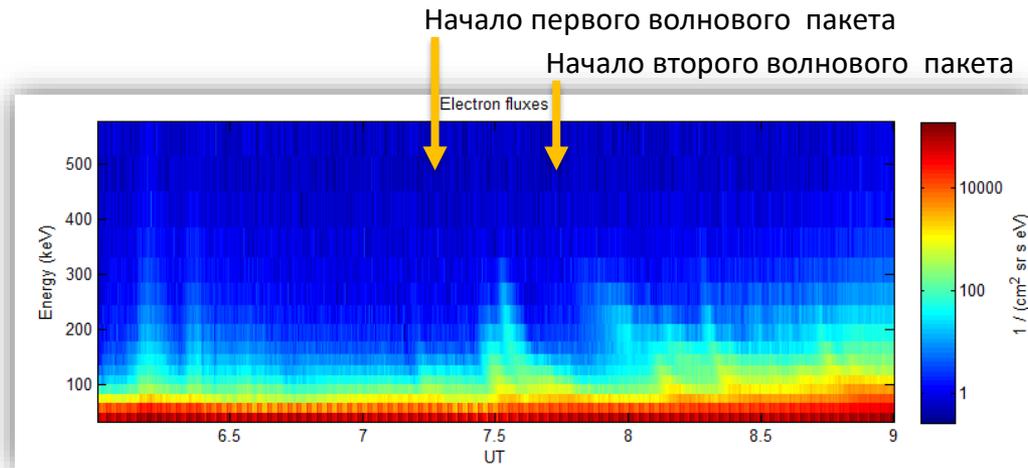
m порядка десятков распространение на восток, в направлении дрейфа электронов в магнитосфере.

В 0730 UT индекс SML до -200

Во время суббури вероятно произошла инжекция электронов в магнитосферу.

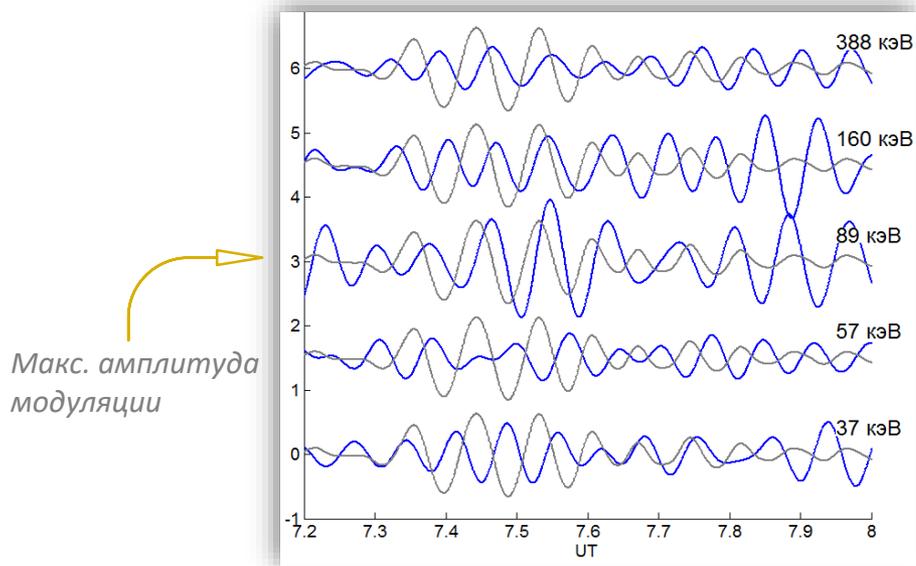


Потоки электронов



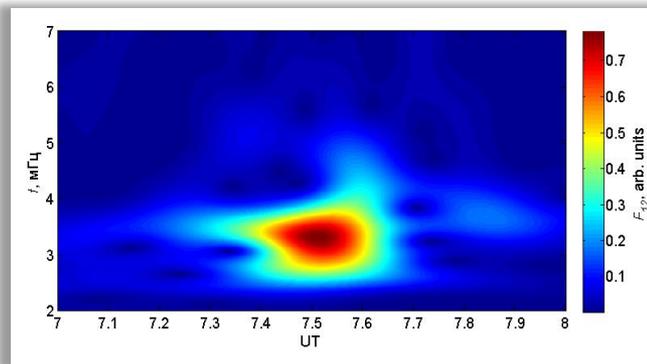
Относительные колебания
потока электронов ($\delta J/J$)
на разных энергиях

Модуляция потоков электронов

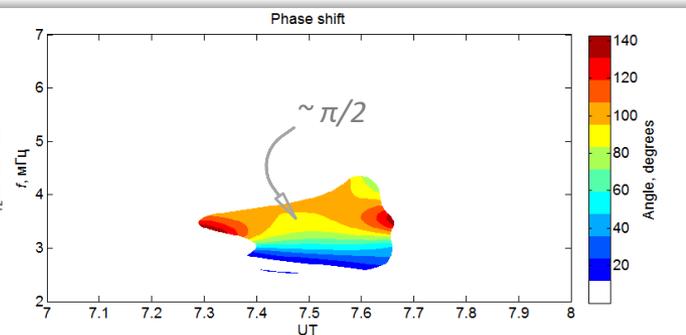


- Относительные колебания потока электронов ($\delta J/J$)
- Магнитное поле B , радиальная компонента

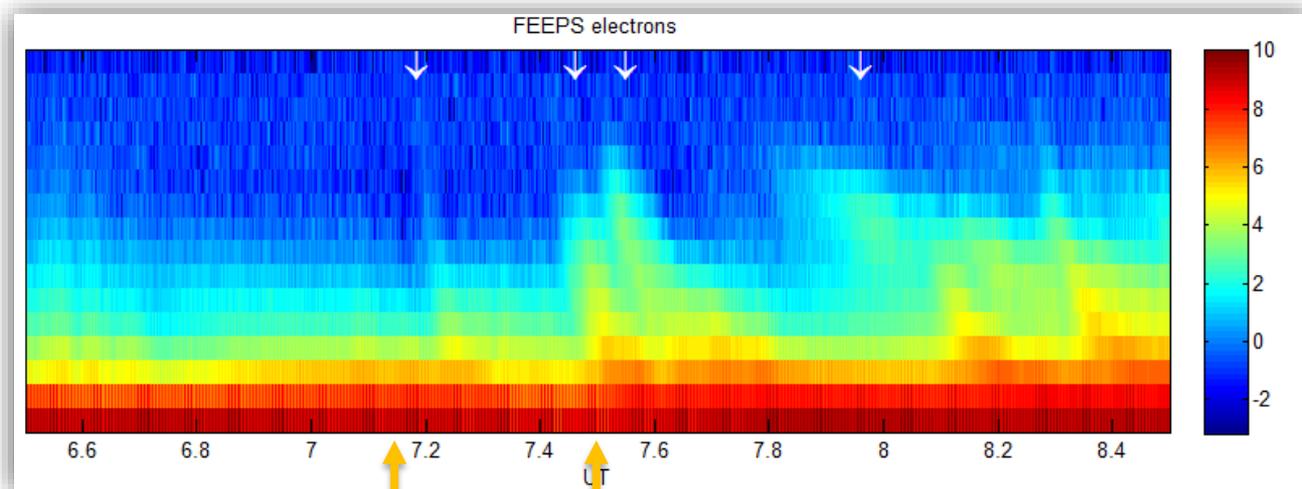
Кроссвейвлет $Brad / \delta J/J$ 89 кэВ



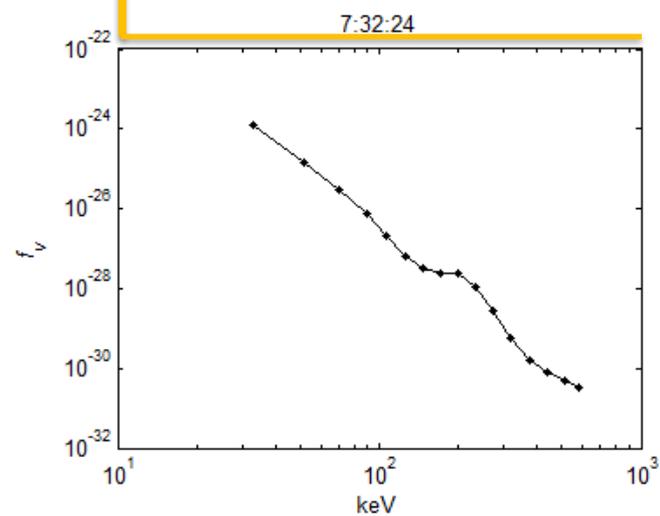
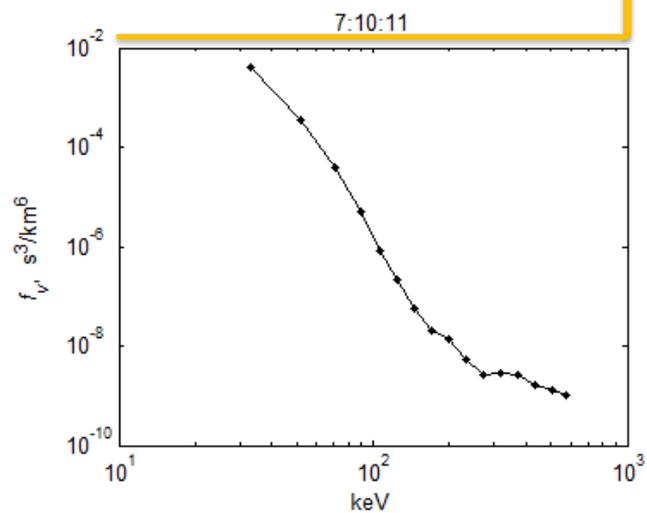
Разность фаз



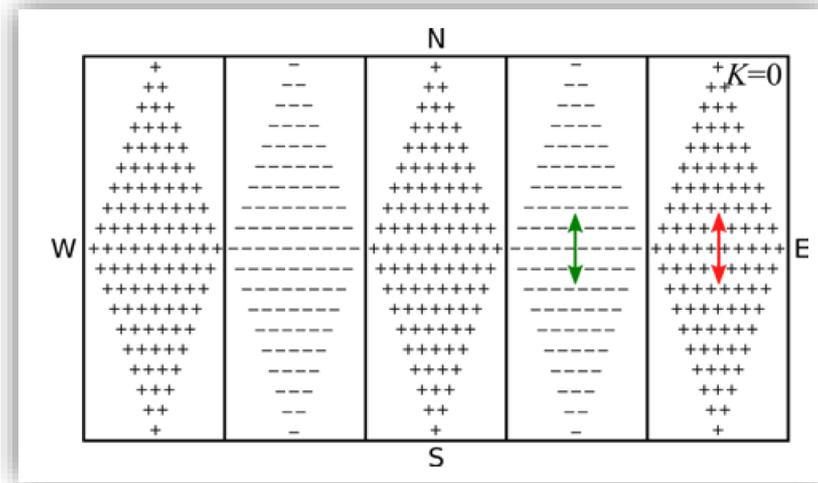
Условия неустойчивости



Распределение
электронов по энергиям



Дрейфовый резонанс



Дрейфовый резонанс: $\omega - m\bar{\omega}_d = 0$

При $m = +25$, $\omega = 0,02$ рад/с:

$$\omega_d = 0,008 \text{ рад/с}$$

$$\bar{\omega}_d \approx -\frac{3v^2}{\omega_{c,eq}L^2} (0.35 + 0.15 \sin \alpha_0) \text{ — для дипольного поля}$$



Резонансная энергия
электронов $W \approx 40$ кэВ

Условие неустойчивости

Условие неустойчивости для общего случая (недипольное поле) :

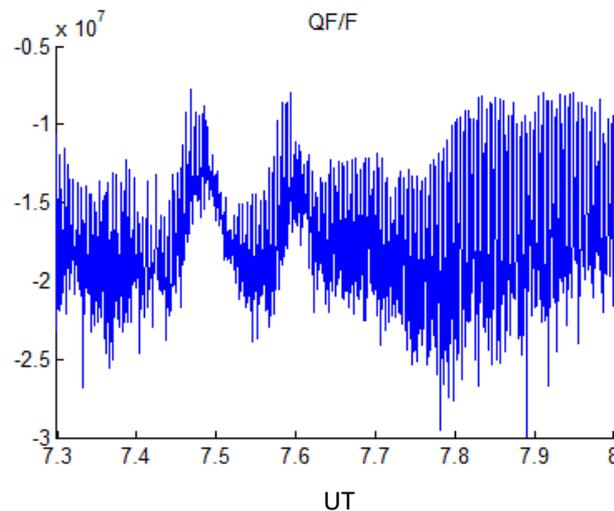
$$\frac{1}{F_0} \frac{\partial F_0}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{\omega} \frac{c}{qB} [\vec{k}_{tr} \times \vec{e}_{pr}] \frac{\vec{\nabla} F_0}{F_0} > 0$$



Рост F_0 с увеличением энергии
(*bump on tail*)



Пространственный градиент F_0



Генерация волн движущимся источником

Возможна генерация альфвеновских волн сторонними токами в плазме Shipwave theory [Золотухина, 1974; Гульельми, Золотухина, 1980].

Таким током может являться облако частиц, инжектированное в плазму во время суббури [Магер, Климушкин, 2007].

- Волна наблюдается одновременно с появлением в точке наблюдения облака частиц
- $m \sim \omega_A / \omega_d$
- Волна узко локализована по L .
- Происходит постепенная трансформация от полоидальной к тороидальной волне. В момент наибольшей амплитуды волны имеет смешанную поляризацию.
- Движущийся источник вероятно может быть источником колебаний, которые затем усиливаются посредством дрейфового резонанса.

Заключение