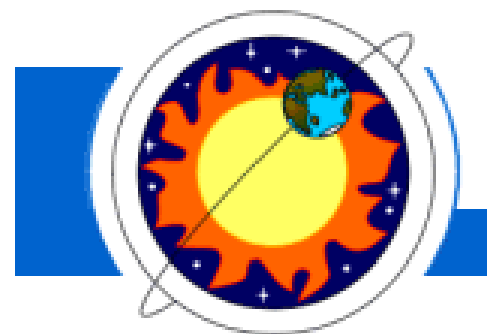


Ультра-низкочастотные волны в магнитосфере Земли

Д.Ю. Климушкин

П.Н. Магер

Институт солнечно-земной физики,
Иркутск

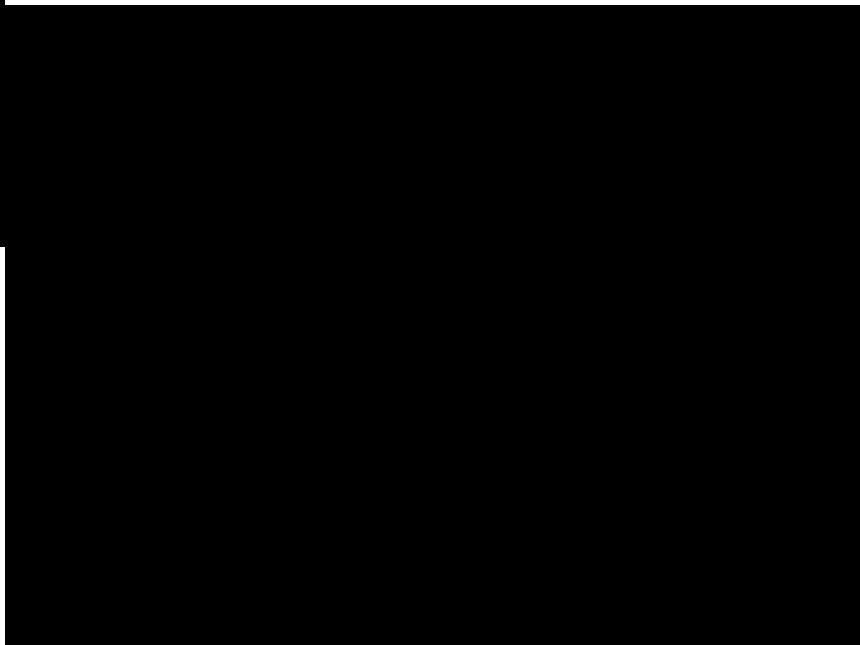
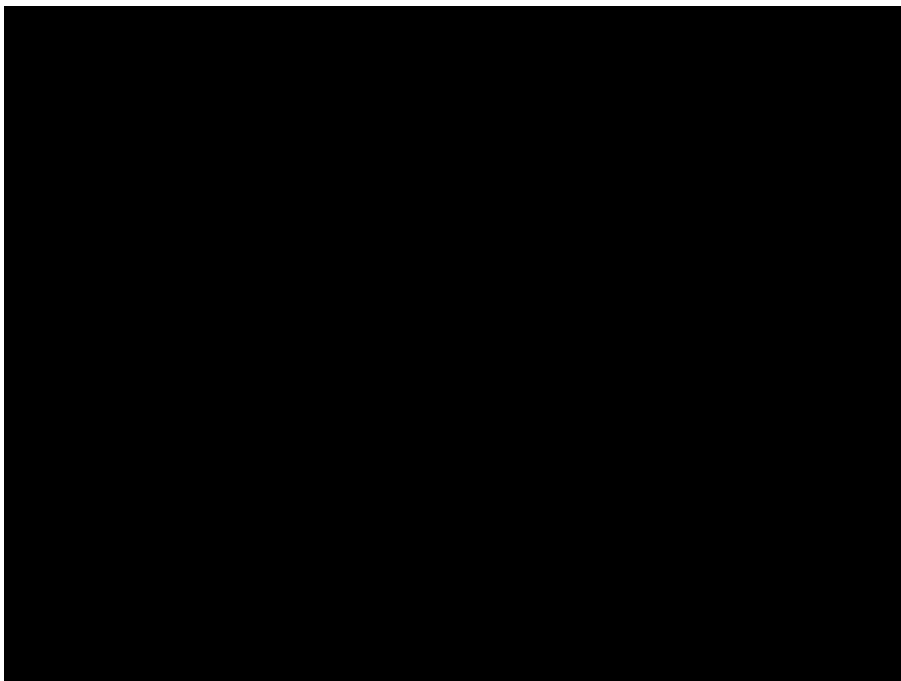


Международная Байкальская
молодежная научная школа по
фундаментальной физике
" Физические процессы в
космосе и околоземной среде"
Иркутск, 16-21 сентября 2019 г.

Волны

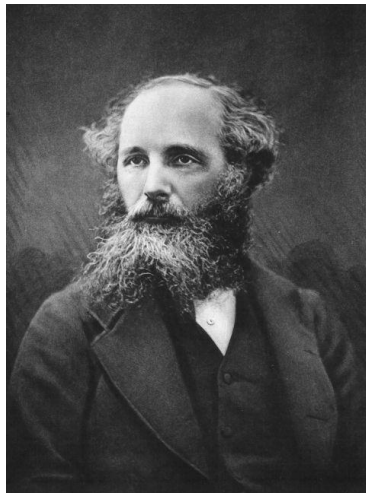
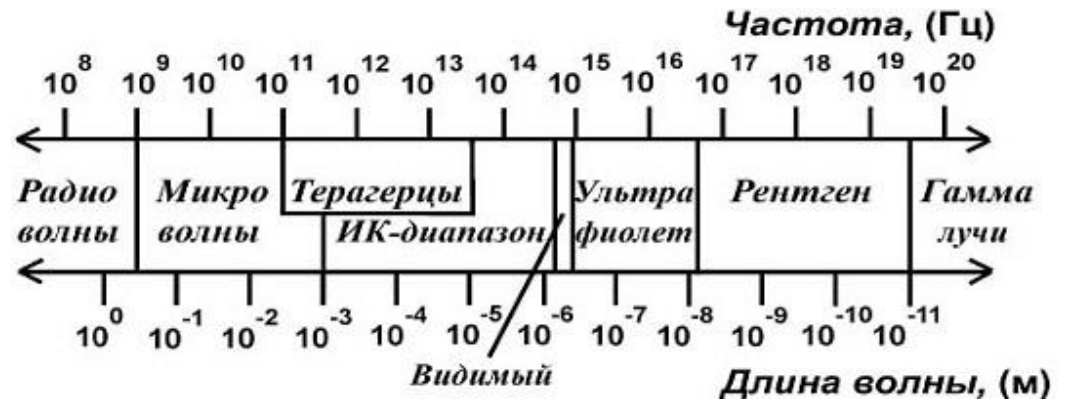


Волны



Электромагнитные волны

УНЧ-волны
($\lambda \sim$ радиусы Земли,
 $T \sim$ минуты)



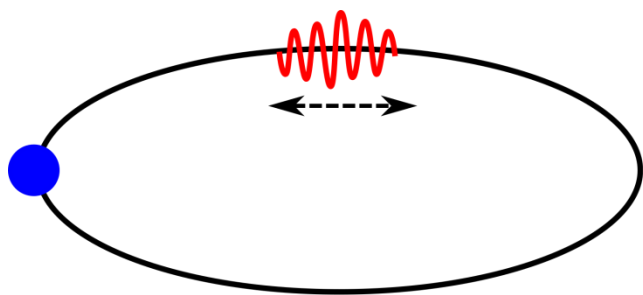
Джеймс Клерк
Максвелл



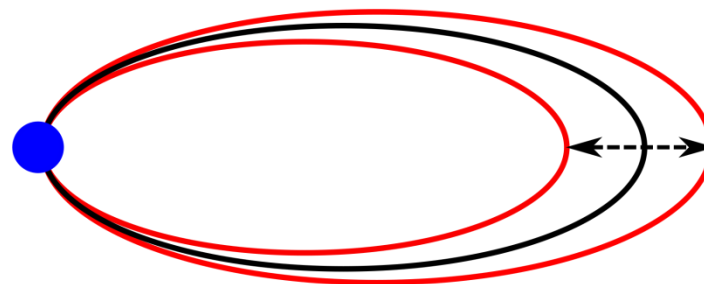
Ханнес
Альфвен

Низкочастотные электромагнитные волны в земной магнитосфере

- ОНЧ (VLF): $3 \text{ кГц} < f < 30 \text{ кГц}$
- КНЧ (ELF): $5 \text{ Гц} < f < 3 \text{ кГц}$
- УНЧ (ULF, геомагнитные пульсации): $f < 5 \text{ Гц}$

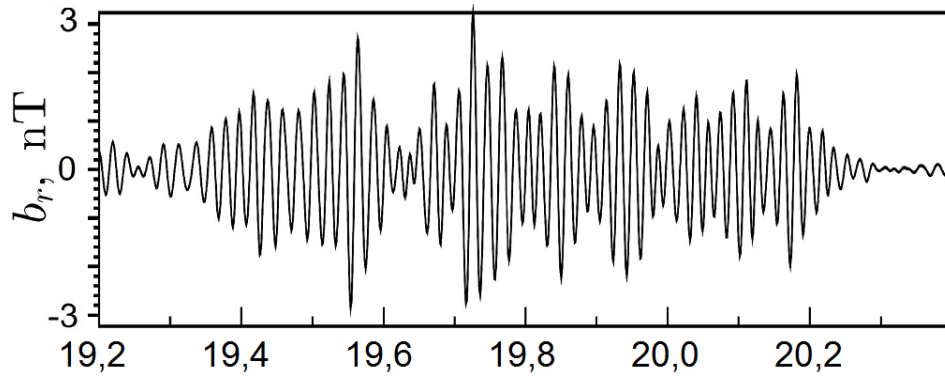


ELF



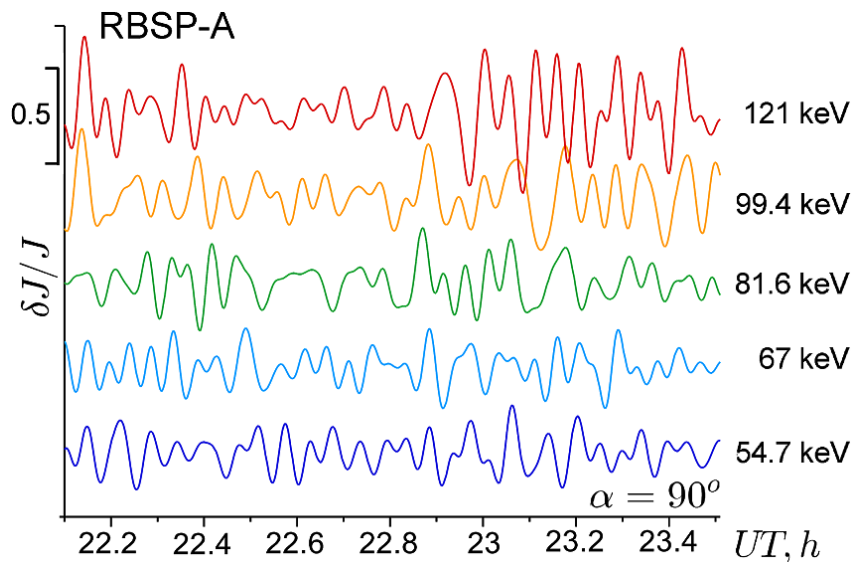
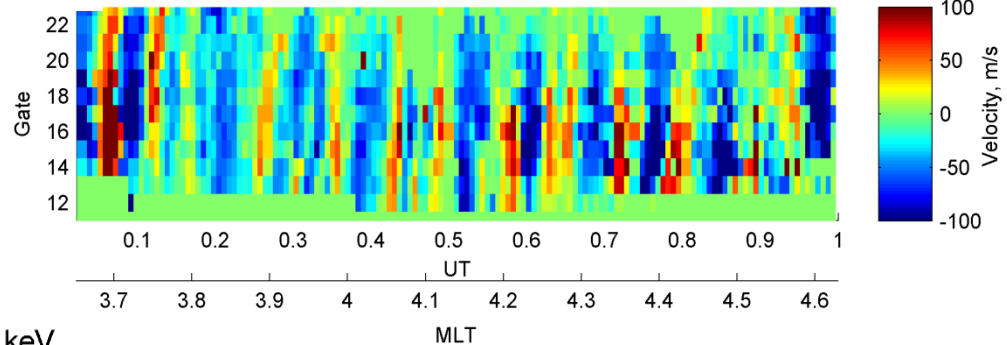
ULF

Проявления УНЧ-волн



В пульсациях магнитного поля
(наземные магнитометры,
спутники)

В пульсации скорости
ионосферной плазмы
(радары)



В пульсациях потоков энергичных
частиц (спутники)

1-жидкостная магнитная гидродинамика (холодная плазма)

Уравнения Максвелла:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{E} = \cancel{4\pi\rho} \simeq 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \cancel{\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}} \end{array} \right.$$

Уравнение движения:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{1}{c} \vec{j} \times \vec{B}$$

Закон Ома (при $\sigma \rightarrow \infty$):

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{B}$$

МГД-волны (однородная плазма)

$$\left[\omega^2 - k_{\parallel}^2 v_A^2 \right] \left[\omega^2 - (k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2) v_A^2 \right] = 0$$

Альфеновская
скорость

$$v_A = \frac{B_0}{\sqrt{4\pi\rho_0}}$$

Альфеновская
мода

$$\omega^2 = k_{\parallel}^2 v_A^2$$

(распространяется
вдоль силовой
линии)

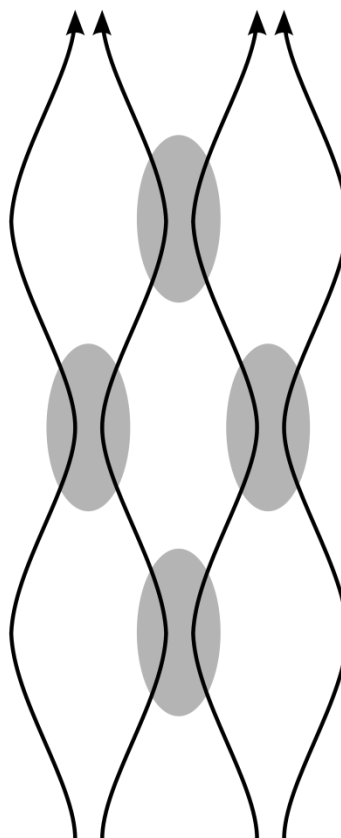


Альфвен

Быстрая
магнитозвуковая
мода

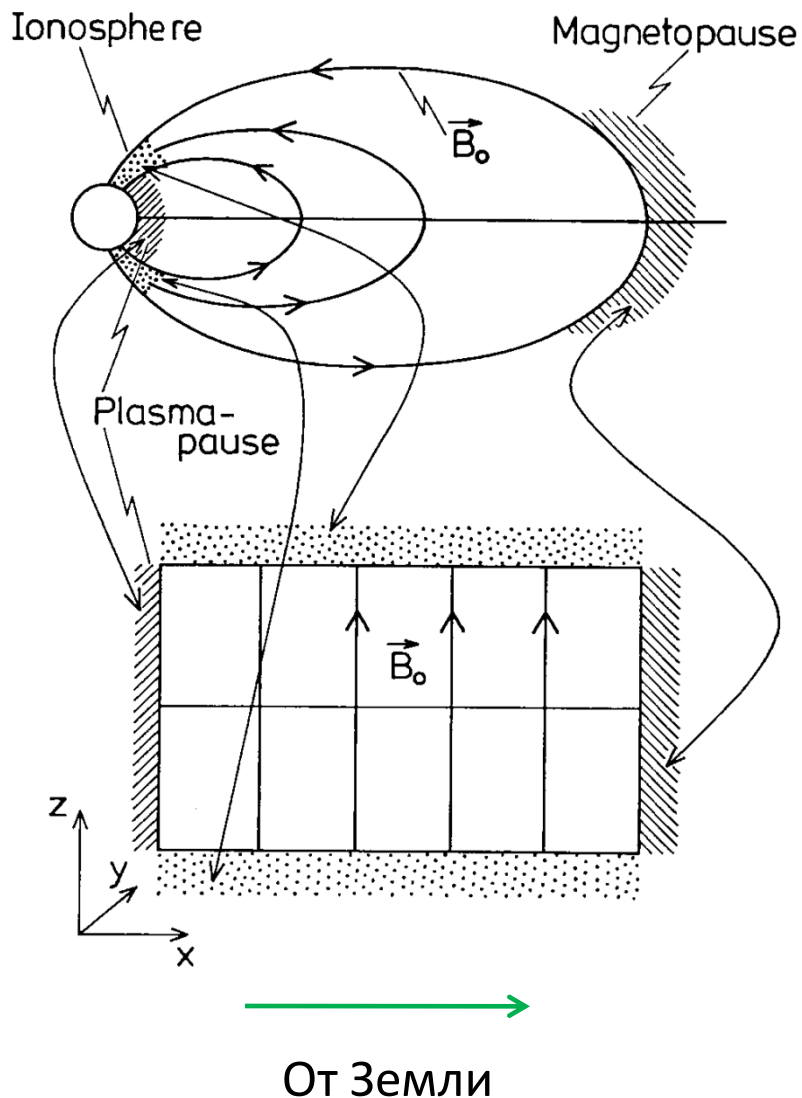
$$\omega^2 = (k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2) v_A^2$$

(распространяется
по всей плазме)



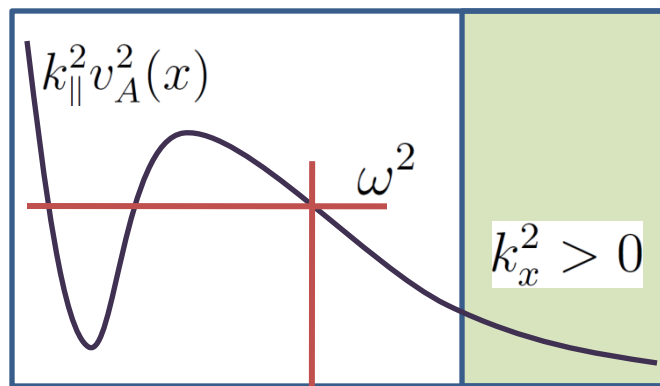
БМЗ

МГД-волны (1-мерно неоднородная плазма)



$$\omega^2 = k_{\parallel}^2 v_A^2(x)$$

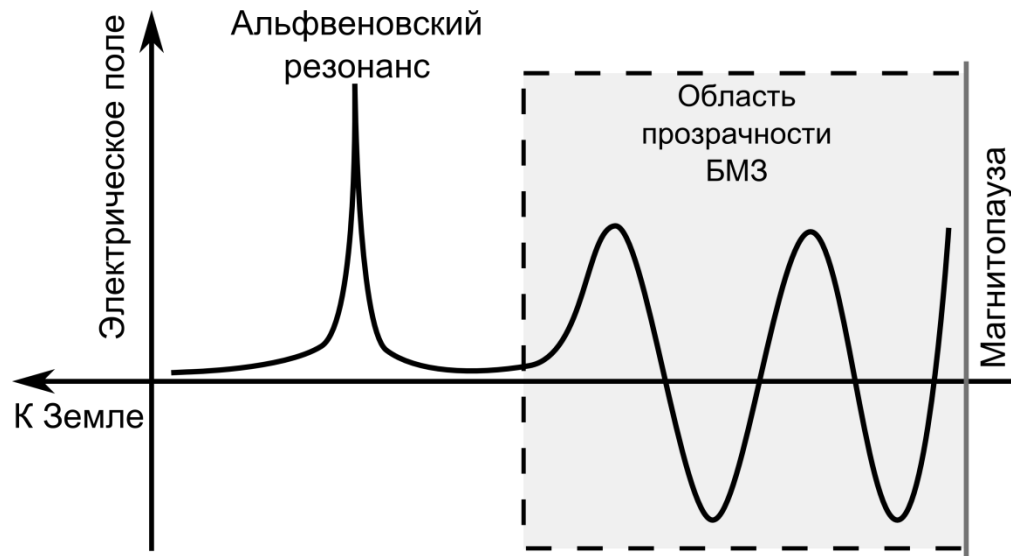
$$k_x^2 = \frac{\omega^2}{v_A^2(x)} - k_{\parallel}^2 - k_y^2$$



Альфвеновская
резонансная
поверхность

Область
прозрачности
БМЗ

Альфвеновский резонанс

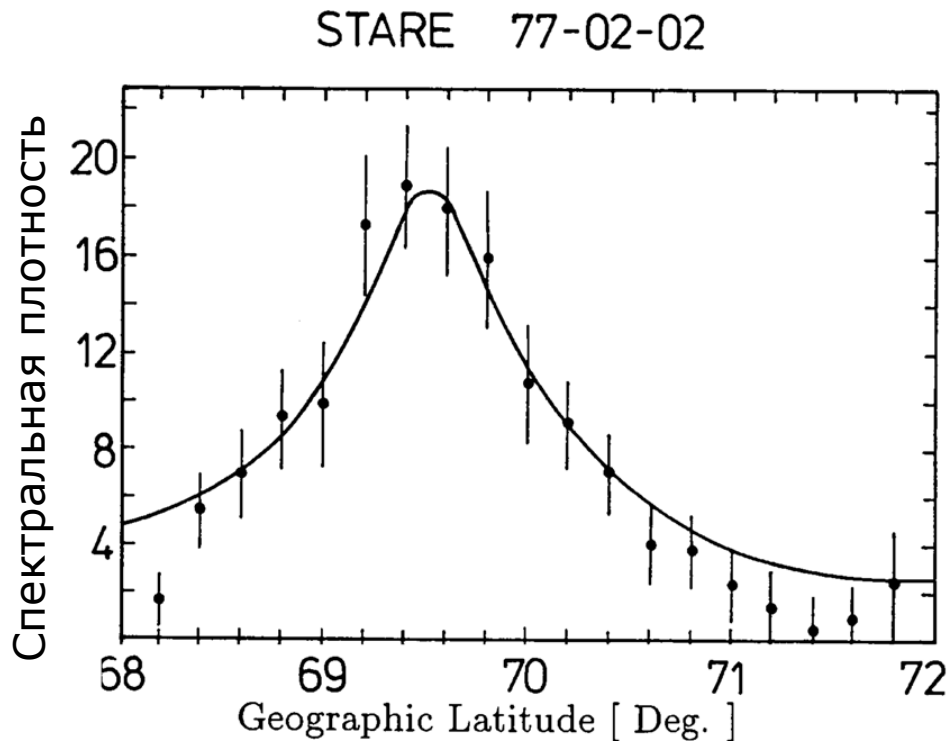
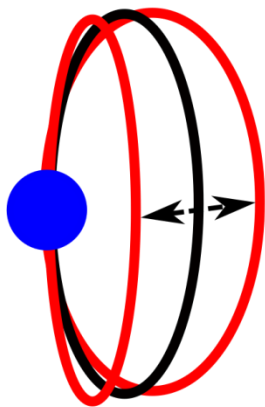


Откуда БМЗ? Внешние источники (связанные с солнечным ветром):

- Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (или другие МГД-неустойчивости)
- Сжатие или разряжение динамическими импульсами солнечного ветра
- Волны из солнечного ветра

Наблюдательные проявления альфвеновского резонанса

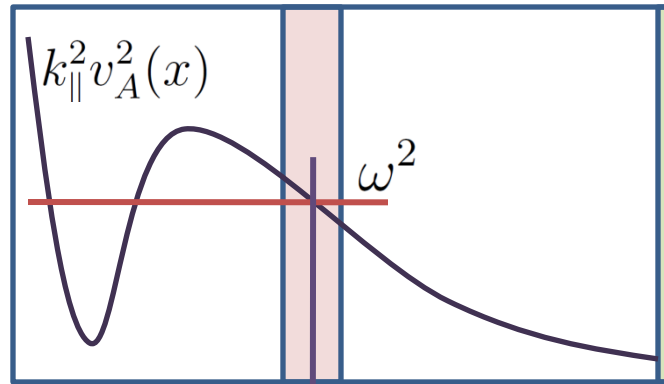
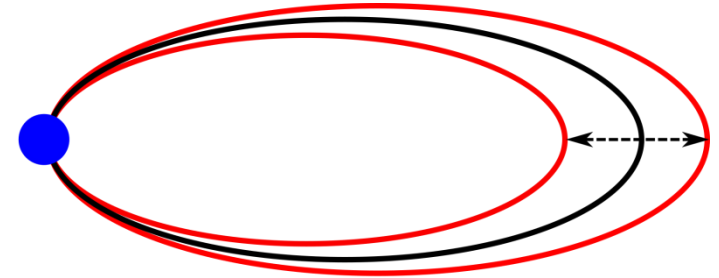
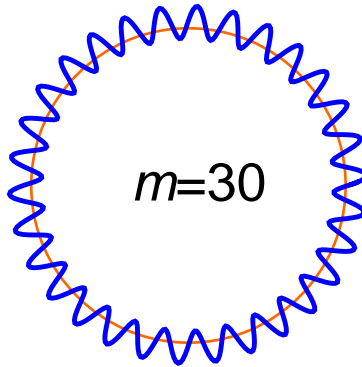
- Локализация поперек магнитных оболочек
- Тороидальная поляризация



- Наземные наблюдения (магнитометры, радары): ДА
- Спутники: почти НЕТ

УНЧ-волны внутримангнитосферного происхождения

- Азимутально-мелкомасштабные волны
- Полоидальная поляризация



Альфвеновская
резонансная
поверхность

Область
локализации
источников

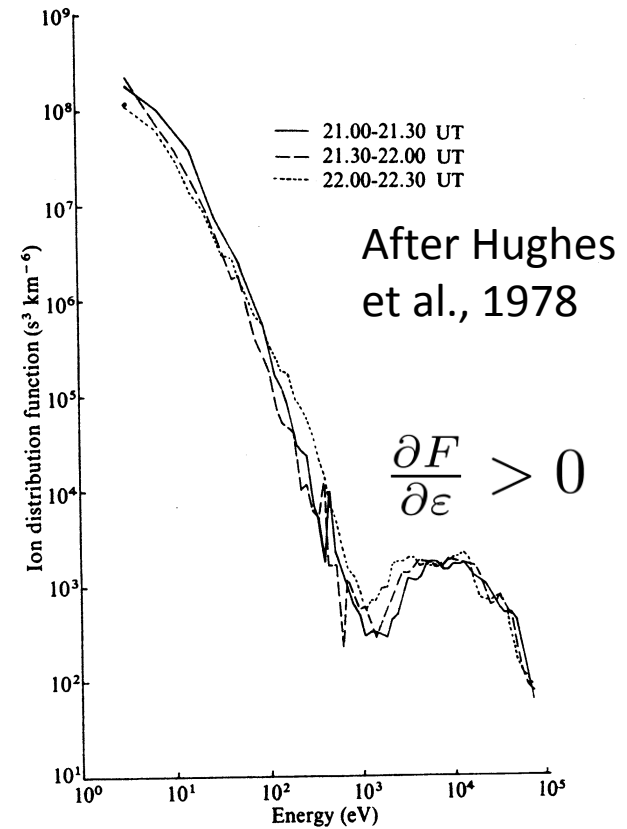
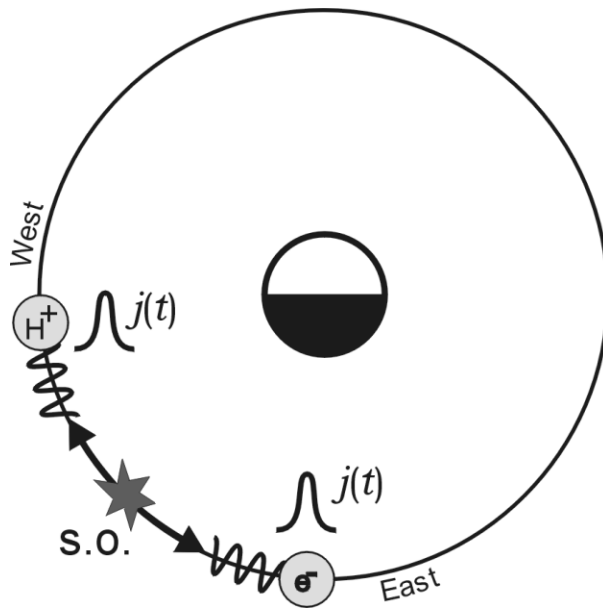
Область
прозрачности
БМЗ при $m \gg 1$

$$\omega^2 = k_{\parallel}^2 v_A^2(x)$$

$$k_x^2 = \frac{\omega^2}{v_A^2(x)} - k_{\parallel}^2 - k_y^2$$

Внутримагнитосферные механизмы генерации

- Неустойчивости в горячей компоненте магнитосферной плазмы (альфвеновский лазер)
- Токи заряженных частиц (движущийся источник)



Явления за пределами 1-жидкостной МГД

- Конечный ларморовский радиус или скиновая длина
- Конечная гирочастота
- Специфические кинетические моды: дрейфово-компрессионная, зеркальная

Конечный ларморовский радиус или скиновая длина

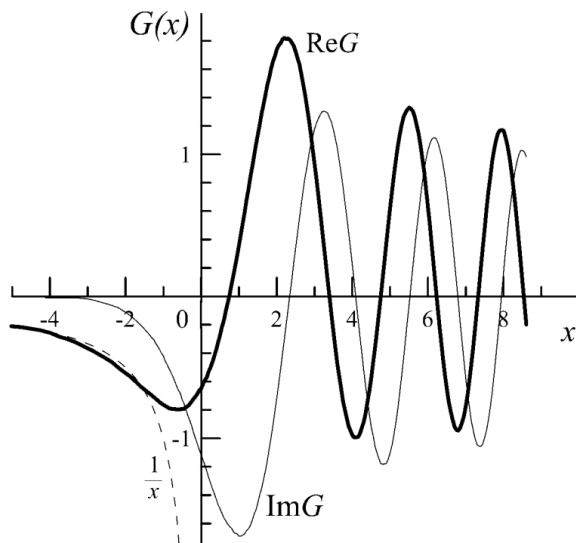
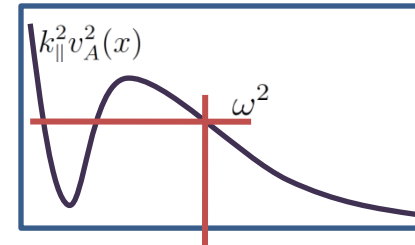
Ларморовский радиус:

$$\lambda_L = \frac{v_{\perp}}{\omega_c}, \quad \omega_c = \frac{qB}{mc}$$

Скиновая длина:

$$\lambda_s = \frac{c}{\omega_{pe}}, \quad \omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi n q^2}{m_e}}$$

Конечность: $\delta l \sim \lambda_L, \delta l \sim \lambda_s$



Альфвеновский резонанс в оптике
(Trondsen et al., 1997)



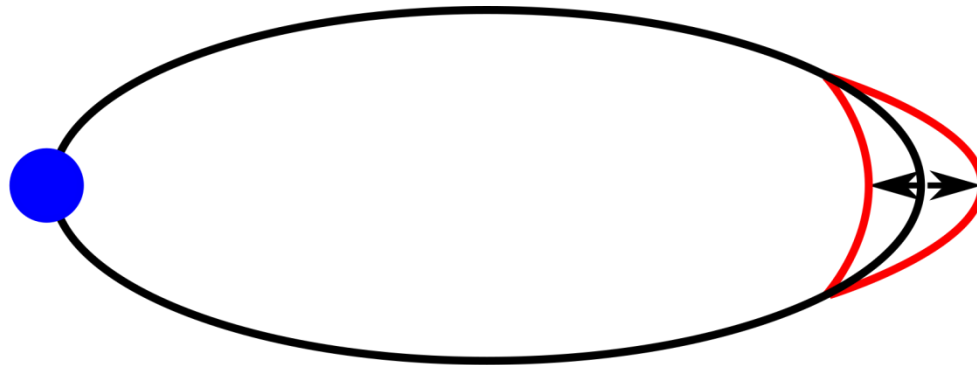
P. A. I. 950227/0718:10

Конечная гирочастота

$$\omega \sim \omega_c$$

$$\omega_c = \frac{qB}{mc}$$

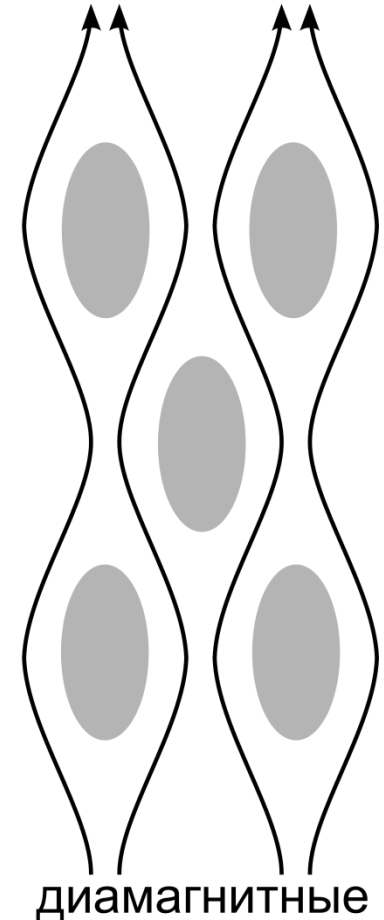
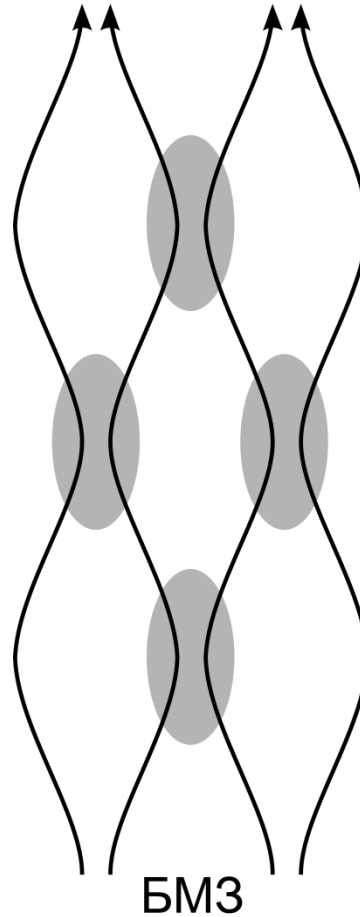
Плазма с высоким
содержанием тяжелых ионов



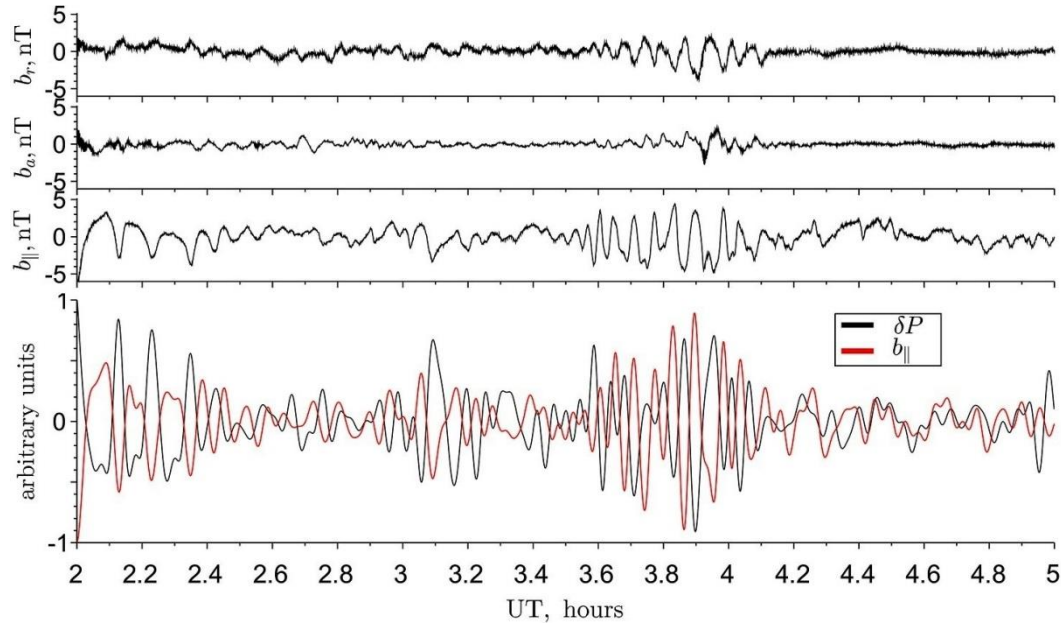
Колеблется только
приэкваториальная часть
силовой линии

УНЧ, но не МГД моды: дрейфово-компрессионные волны

- Бесстолкновительная плазма
Кинетическое описание
- Достаточные условия существования:
неоднородность плазмы,
конечное давление
- Частота ниже альфвеновской
- Вблизи геомагнитного экватора
- Выталкивают плазмы

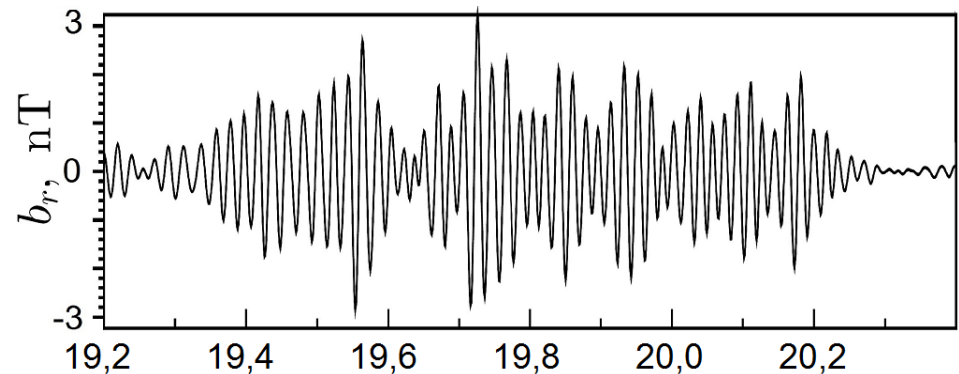


Дрейфово-компрессионные волны: компрессионные буревые волны Pc5?

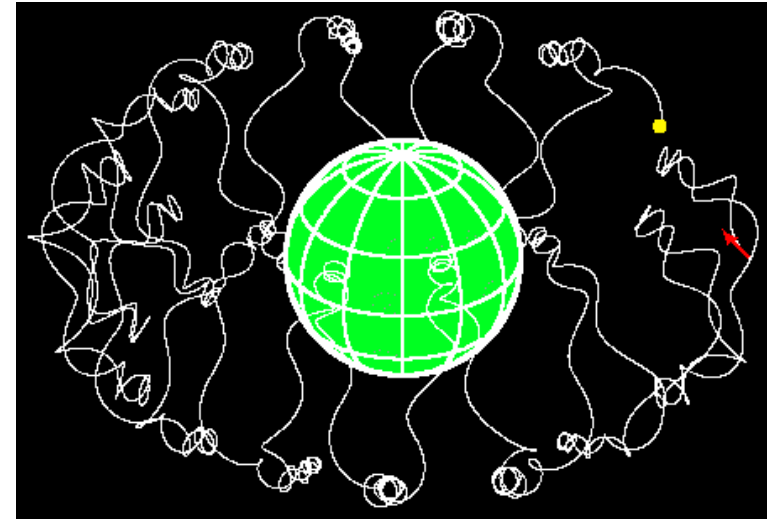
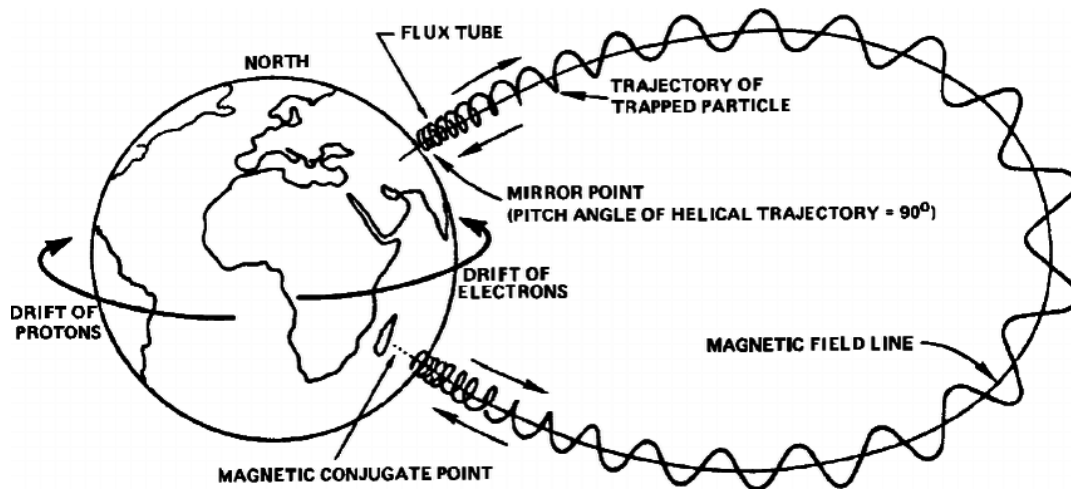


Не-альфвеновские
(дрейфово-
компрессионные?)

Альфвеновские



Взаимодействие волн и частиц



Обмен энергией между волнами и частицами:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = q \vec{v}_{\parallel} \cdot \vec{E}_{\parallel} + q \vec{u}_d \cdot \vec{E}_{\perp} + \mu \frac{\partial B_{\parallel}}{\partial t}$$

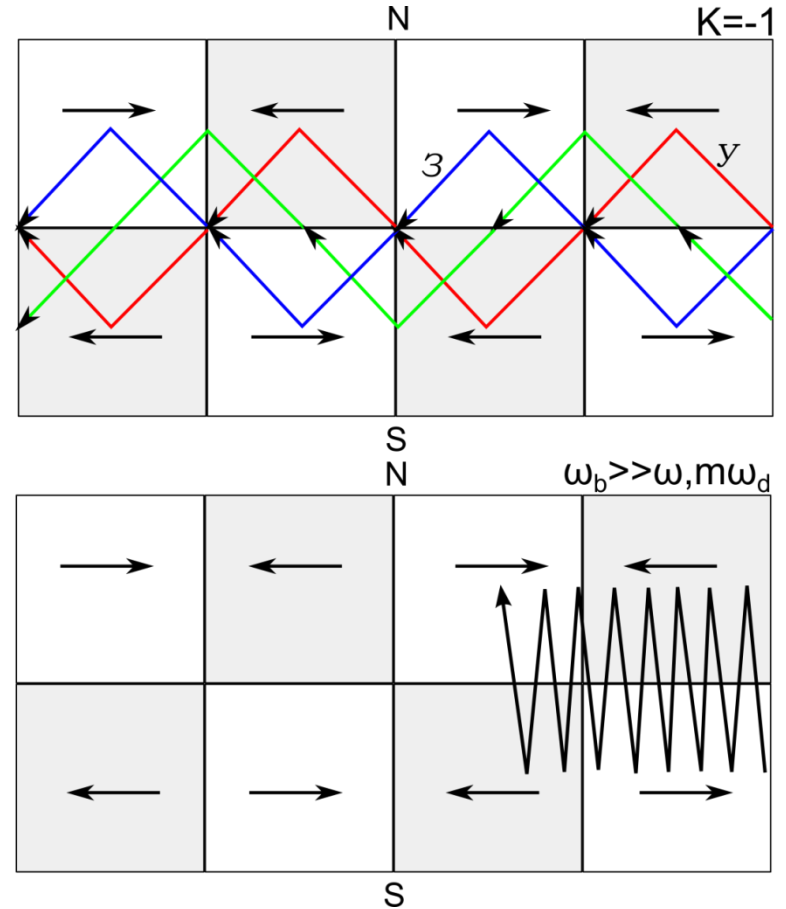
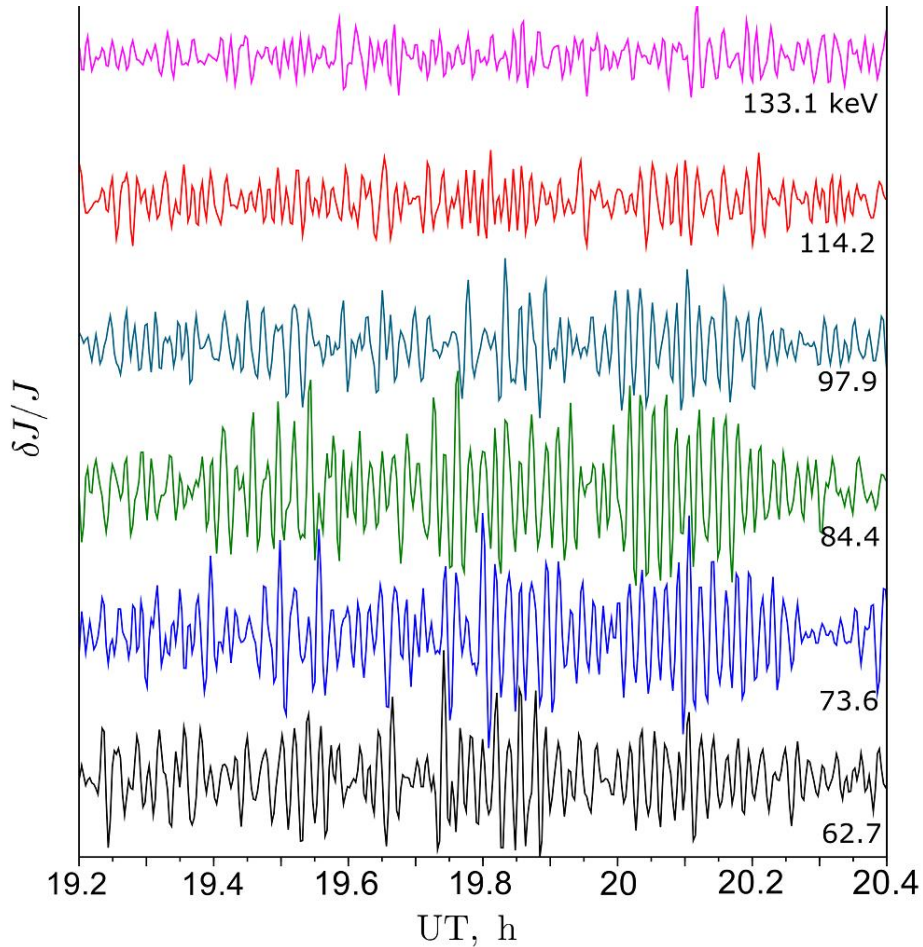
Ускорение:

- Электронов и ионов радиационных поясов
- Ионов кольцевого тока
- Авроральных электронов

Резонанс волна-частица

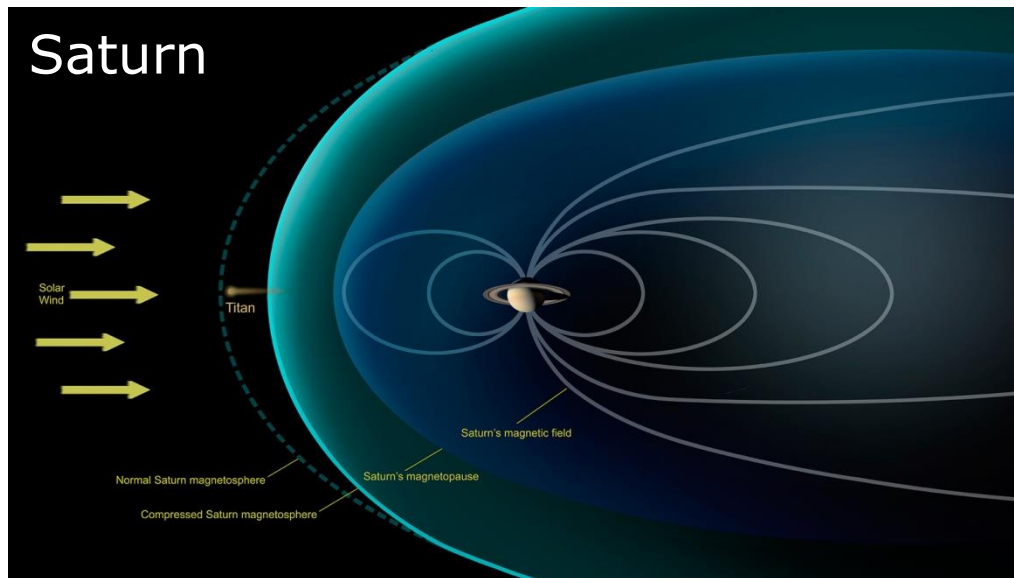
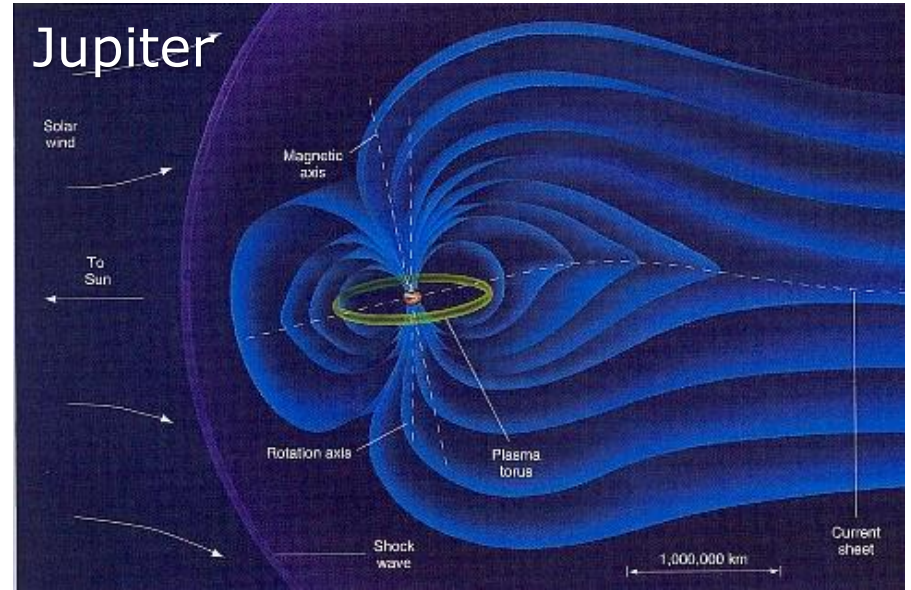
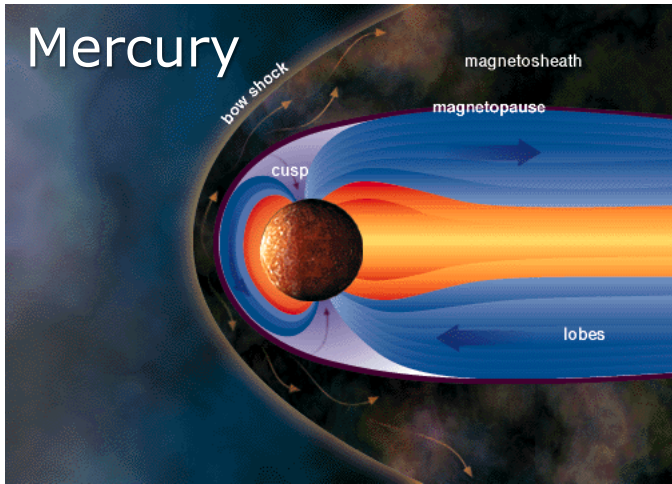
Условие резонанса:

$$\omega - m\bar{\omega}_d - K\omega_b = 0$$



$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = q \vec{v}_{\parallel} \cdot \vec{E}_{\parallel} + \boxed{q \vec{u}_d \cdot \vec{E}_{\perp}} + \mu \frac{\partial B_{\parallel}}{\partial t}$$

УНЧ-волны в магнитосферах других планет



Спасибо за внимание!

