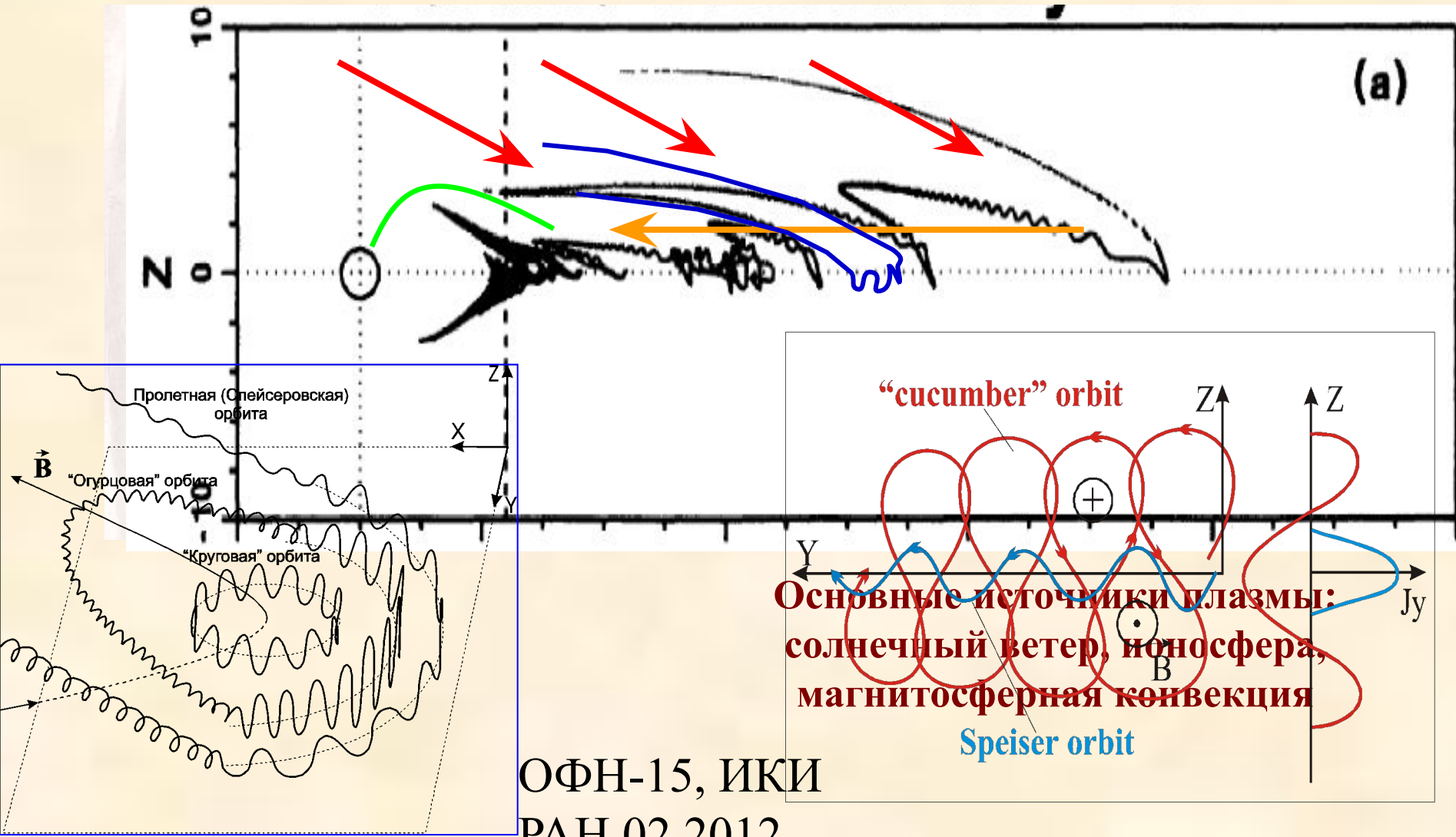


**Тонкие токовые слои в космической
плазме: двумерная структура**

[Х.В. Малова, Л.М. Зеленый, В.Ю. Попов,
А.В. Артемьев, А.А. Петрукович](#)

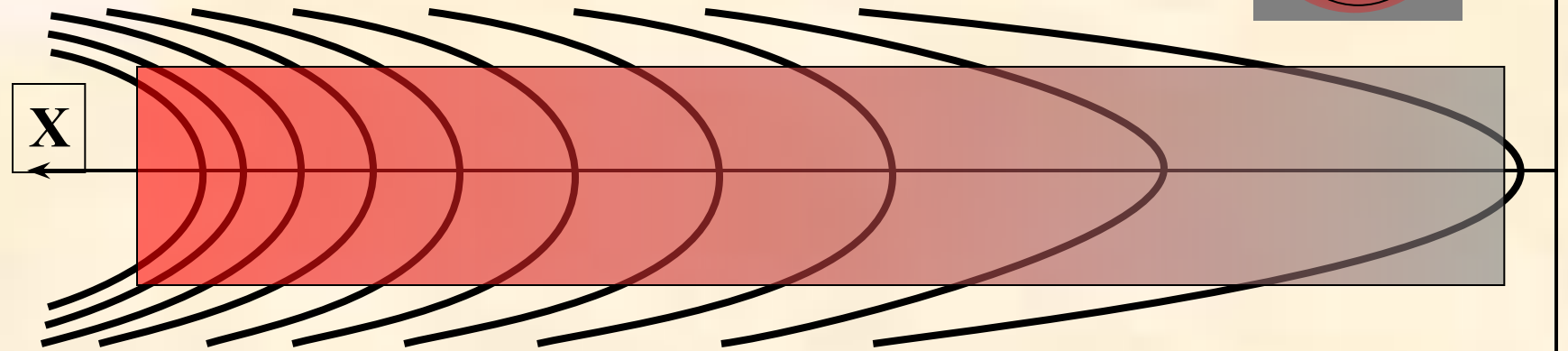
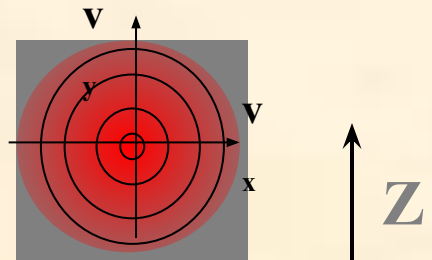
Plasma populations in Earth's magnetotail



Force balance:

**Isotropic pressure models
(Kan, 1973)**

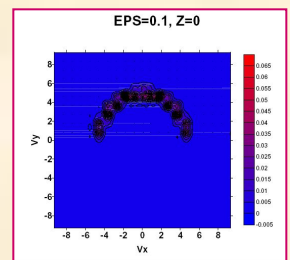
$$\frac{1}{c} [j_y \times B_n] = \nabla_x p$$



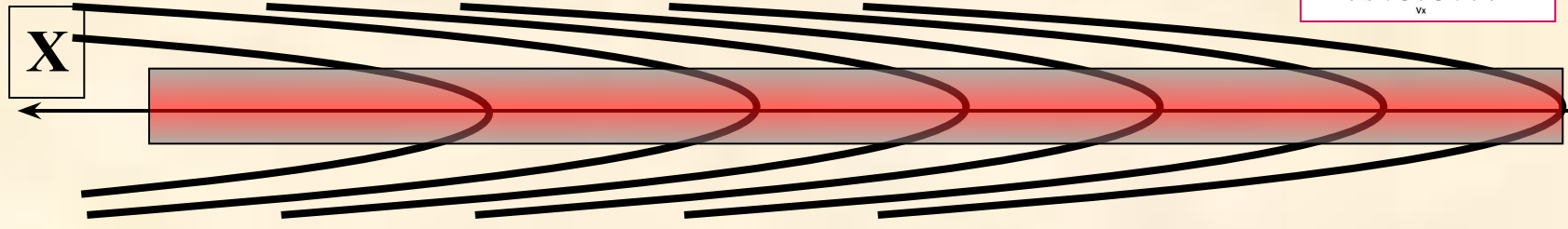
Anisotropic pressure models

(Zelenyi et al., 2000)

$$\frac{1}{c} [j_y \times B_n] = \frac{\rho v_{\perp}^2}{R_{curv}}$$



$$\kappa = \sqrt{\frac{R_{cmin}}{\rho_{max}}}$$



$$\frac{B_0^2}{8\pi} = n_0 (T_{e\perp} + T_{i\perp})$$

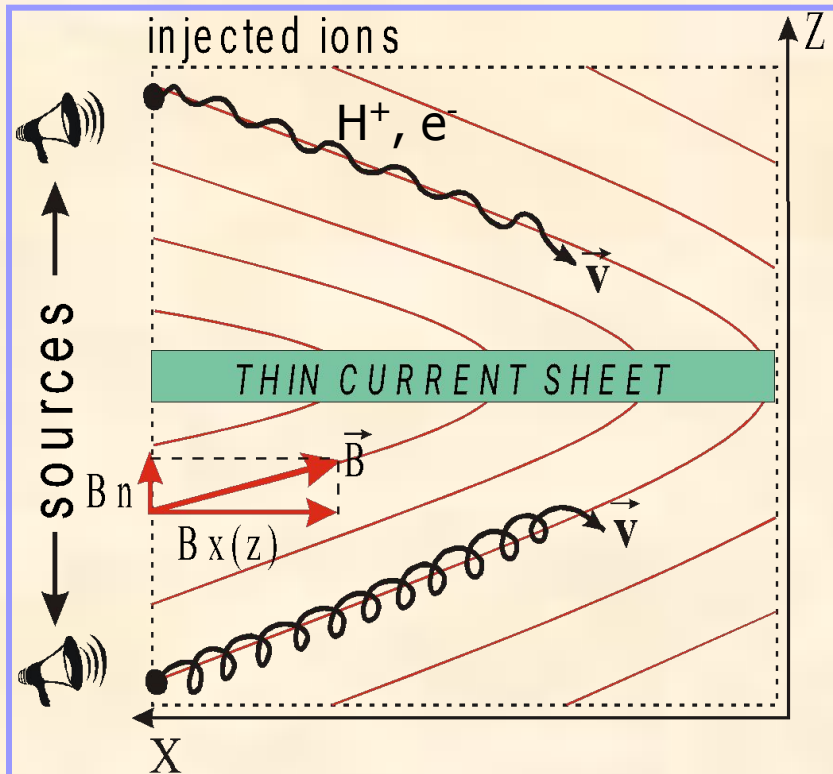
ОФН-15, ИКИ

РАН 02.2012

Баланс поперек слоя как в модели Харриса

Самосогласованная модель 2-х мерного токового слоя

Динамика ионов



$$W_0 \equiv \frac{mv_0^2}{2} = \frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2} + e\phi$$

$$P_{y0} = mv_y + \frac{e}{c} A_y(x, z)$$

$$I_z \equiv \frac{1}{2\pi} \oint mv_z dz \approx const$$

$$I_x = \frac{m}{2\pi} \oint v_x dx$$

Энергия, обобщенный импульс и адиабатические интегралы движения сохраняются во время движения частиц

$$\frac{\omega_x}{\omega_z} \sim \frac{B_z}{B_0} \ll \kappa \ll 1$$

$$\Delta I_z \ll I_z$$

ОФН-15, ИКИ

РАН 02 2012

Neistadt, 1986; Timofeev, 1978
Cary, Escande, Tennyson, 1986

Функции распределения пролетных и захваченных частиц

Пролетные ионы

ЧАСТИЦ

$$f_{transient}(\mathbf{v}) \sim \exp \left\{ -\frac{(v_{\parallel 0} - v_D)^2 + v_{\perp}^2}{v_T^2} \right\}$$

$$I_z = \frac{m}{2\pi} \oint v_z dz = \frac{2mc}{e} \mu \quad \text{где} \quad \mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B_0}$$

$$\frac{mv^2}{2} + e\varphi = \frac{mv_0^2}{2}$$

$$v_{\perp}^2 = \frac{\omega_0}{m} I_z$$

Квазизахваченные и захваченные ионы

$$f_{trap}(\mathbf{v}) \sim \exp \left\{ -\frac{v_D^2 + v_0^2}{v_T^2} \right\}$$

$$f(\mathbf{v}) \sim \exp \left\{ -\frac{\left(\sqrt{v_0^2 - \frac{\omega_0}{m} I_z} - v_D \right)^2 + \frac{\omega_0}{m} I_z}{v_T^2} \right\};$$

$$I_x = \frac{m}{2\pi} \oint v_x dx \approx \frac{m(v_y^2 + v_x^2)}{\frac{B_z}{B_0} \omega_0}$$

$$v_0^2 = v_z^2 + v_z^2 + v_z^2 + \frac{2}{m} e\varphi(z)$$

$$f(\mathbf{v}) \sim \exp \left\{ -\frac{v_D^2 + v_0^2 + \frac{\omega_0}{m} I_x}{v_T^2} \right\}$$

2D модель ионного токового слоя

$$df/dt = 0$$

$$\vec{r}$$

$$B = \{B_x(x, z), 0, B_z(x, z)\}$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} = \frac{4\pi}{c} \left\{ \int_{V^3} v_y f_{transient}(v_0, I_z) d^3 v \right. \\ \left. + \int_{V^3} v_y f_{trapped}(v_0, I_x) d^3 v + j_e(x, z) \right\}$$

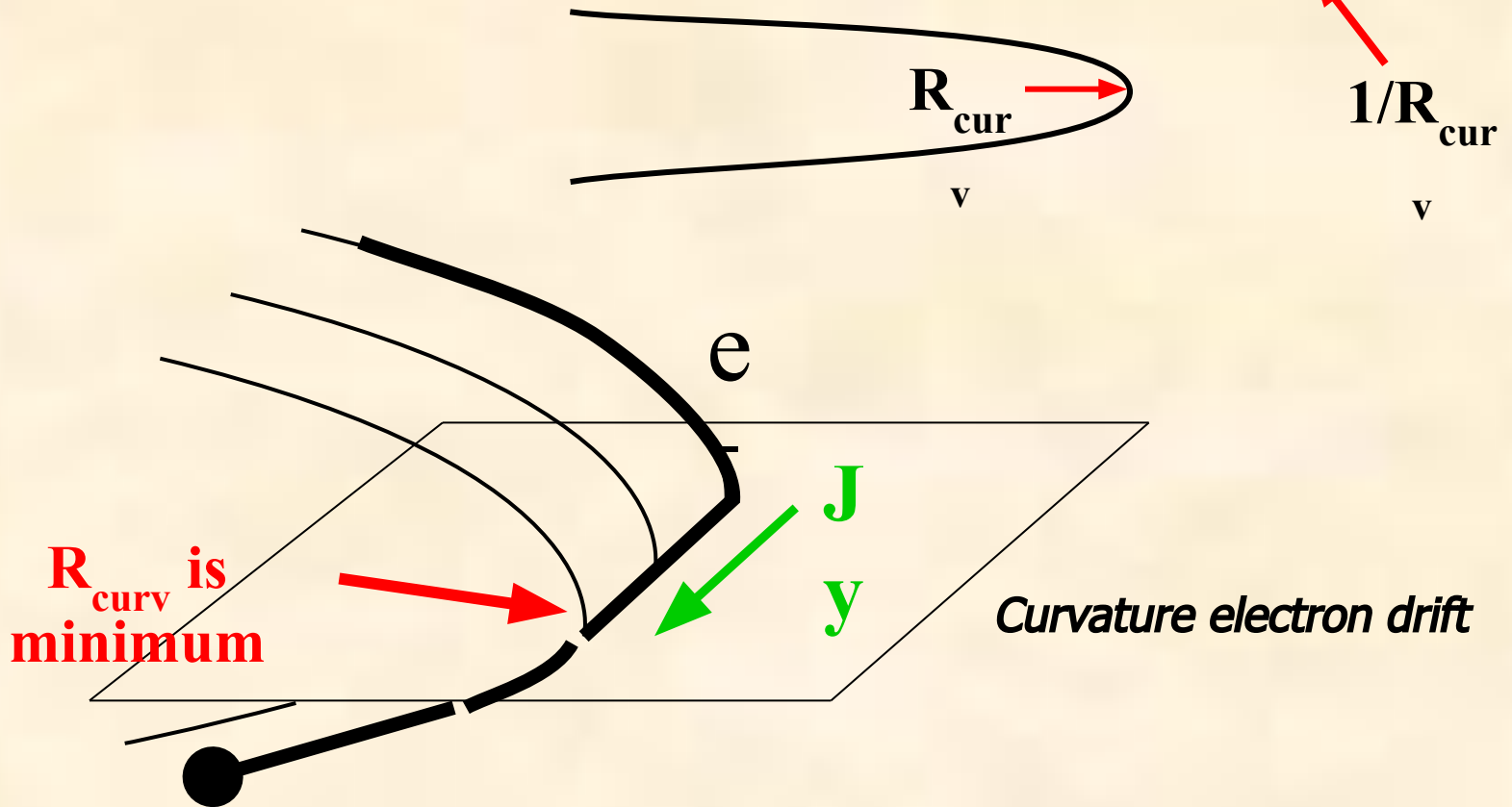
$$j_e = -en_e c \frac{[\vec{E}, \vec{B}]}{B^2} + \frac{c}{B^2} [\vec{B}, \nabla_{\perp} \tilde{p}_{\perp e}] + \frac{c}{B^4} (\tilde{p}_{\parallel e} - \tilde{p}_{\perp e}) \left[\vec{B}, \left(\vec{B} \nabla \right) \vec{B} \right]$$

ОФН-15, ИКИ

РАН 02.2012

Anisotropic electron pressure in TCS: calculation of electron currents

$$J_{e\perp} = -en_e c \frac{[\nabla E, \nabla B]}{B^2} + \frac{c}{B^2} [\nabla B, \nabla_{\perp} \tilde{p}_{\perp e}] + \frac{c}{B^4} (\tilde{p}_{\parallel e} - \tilde{p}_{\perp e}) \left[\nabla B, \left(\nabla \nabla B \right) \nabla B \right]$$



Уравнения Грэда-Шафранова для двумерного ТС (ур-я для ионов)

$$-\frac{\partial B_z}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial z} = \frac{4\pi}{c} \left\{ \int_V v_y [j_x(W_0, I_x(x, z), I_z(x, z)) j_e^3] + j_e \right\}$$

$$A_y(B_0(z)) = \alpha_l(\cdot B), A_y(B(x, z)) = \alpha_r(B(z)), B_y(x_0) = \frac{l_a}{B_0} \psi_0(B_x(x), A_y(x; B_0)) = \psi_1(x)$$

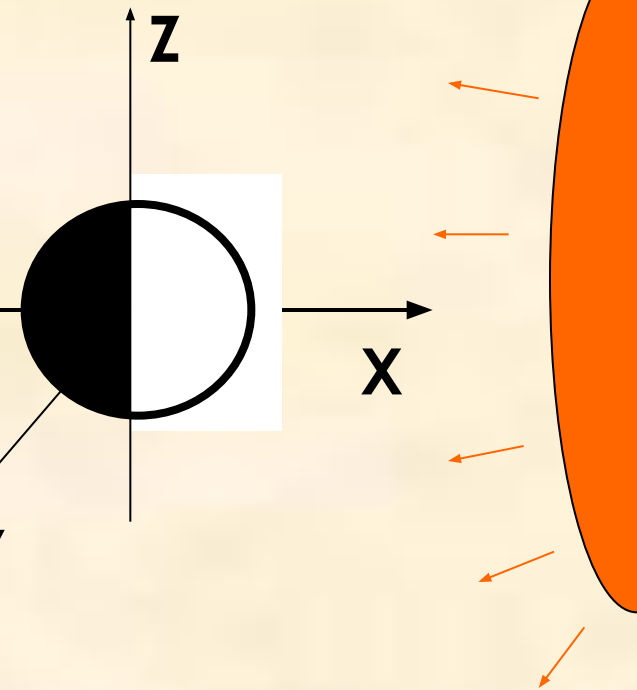
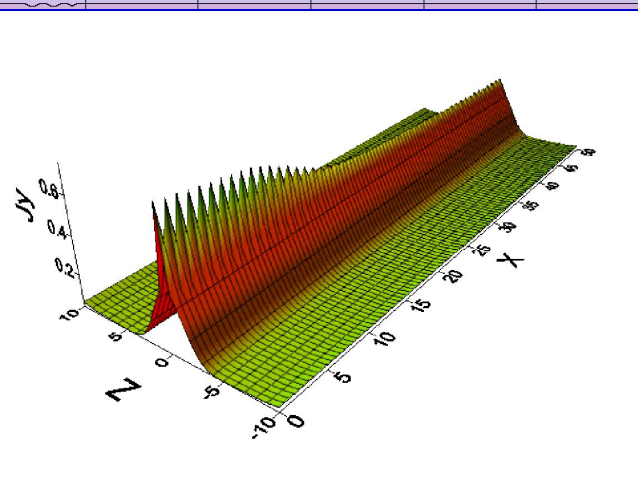
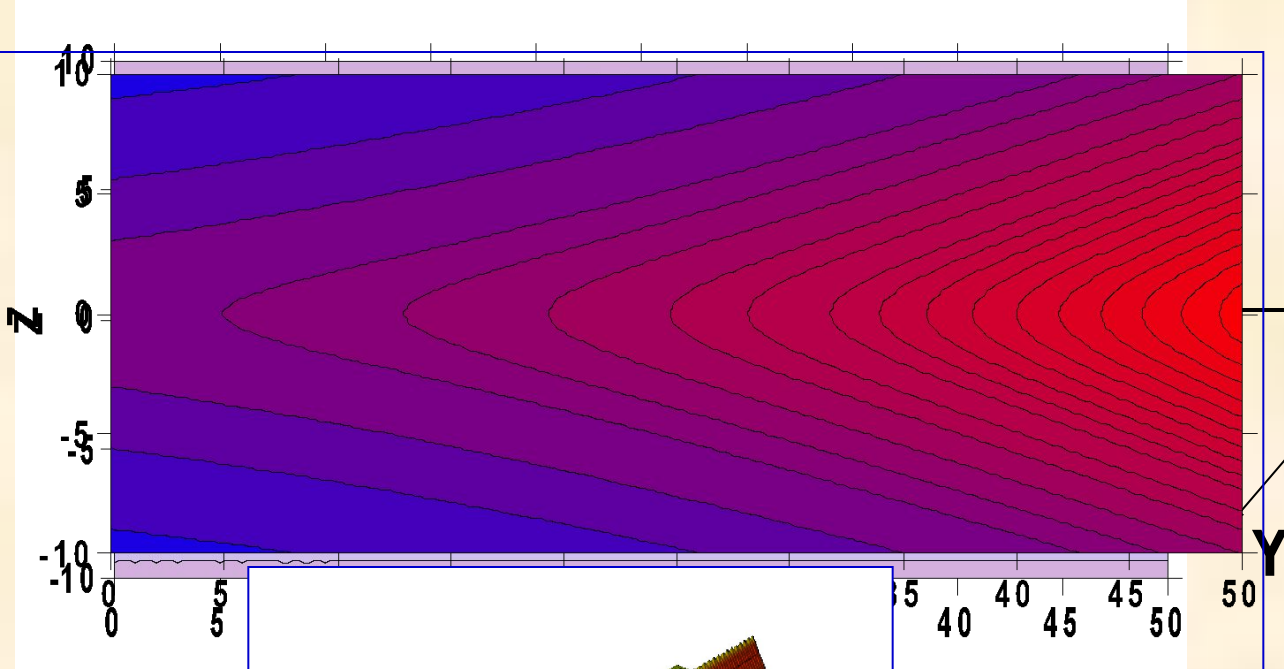
$$I_z = \frac{m}{2\pi} \int v_z dz$$

$$= \frac{m}{2\pi} \int \sqrt{v_0^2 - \left(v_x - \frac{e}{mc} B_y(z-z') \right)^2 - \left(mv_y + \frac{e}{mc} (A_y(x, z) - A_y(x', z')) \right)^2} + \frac{2e}{m} [\varphi(x, z) - \varphi(x', z')] dz'$$

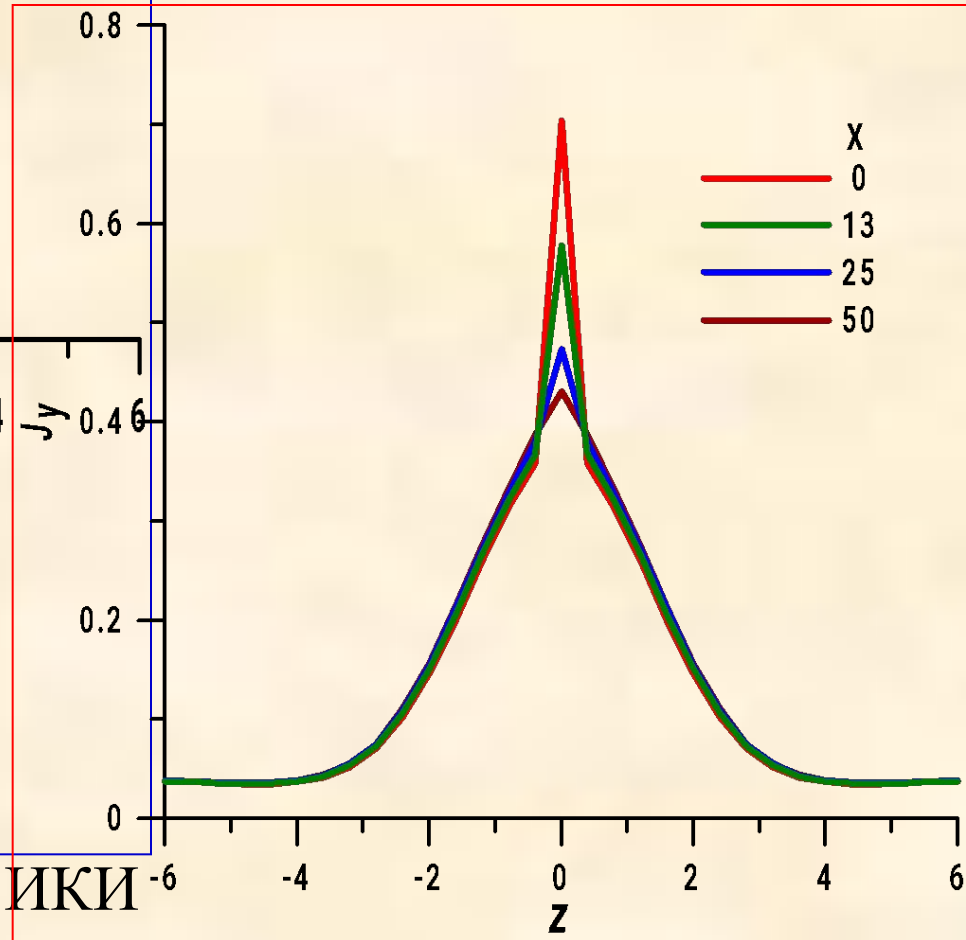
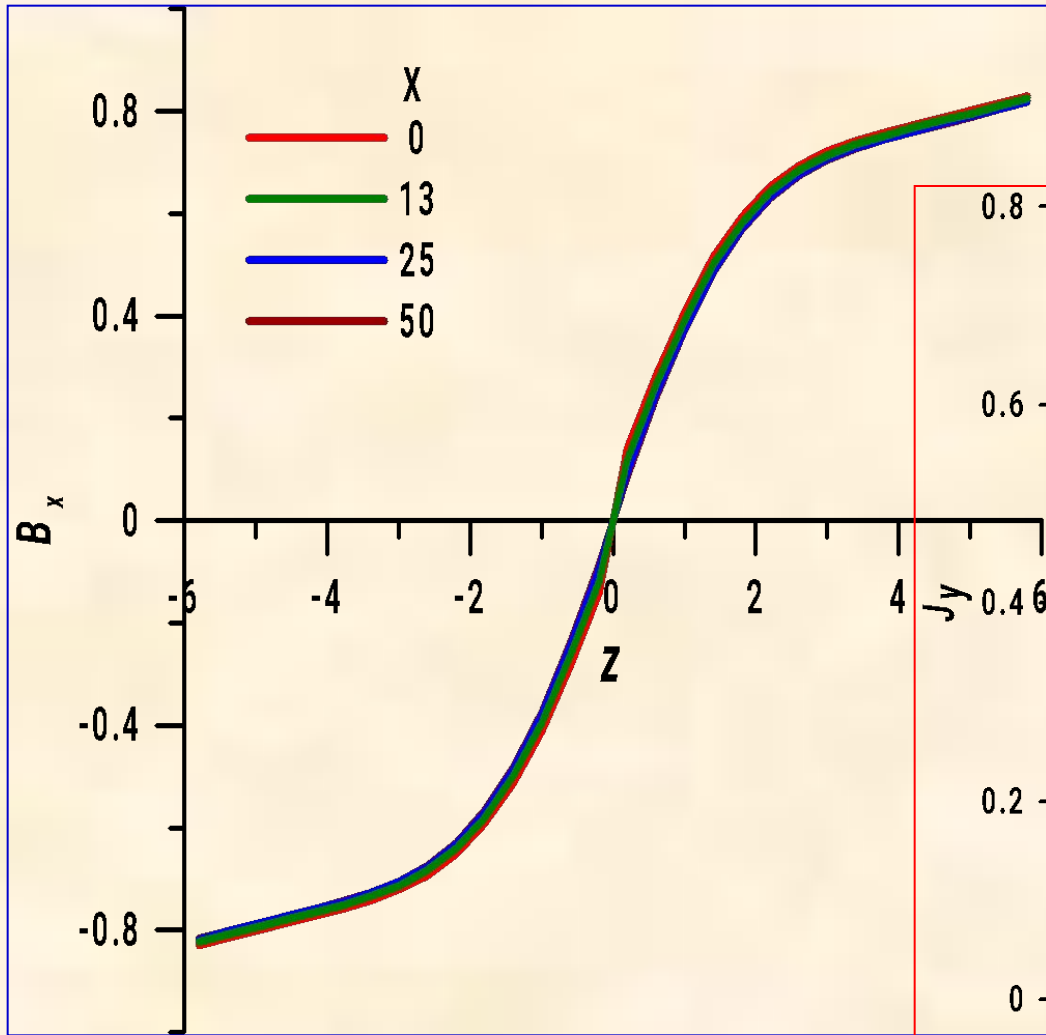
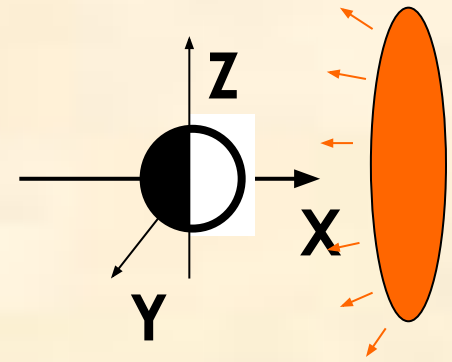
$$A_y(x, z) - A_y(x', z') = \int_z^{z'} B_x(z'') dz'' + \int_{x'}^x B_z(x'') dx''$$

$$I_x = \frac{m}{2\pi} \int v_x dx = \frac{m}{2\pi} \int \sqrt{v_x^2 + v_y^2 - \left(v_y + \frac{e}{mc} (A_y(x, z) - A_y(x', z)) \right)^2} + \frac{2e}{m} [\varphi(x, z) - \varphi(x', z)] dx'$$

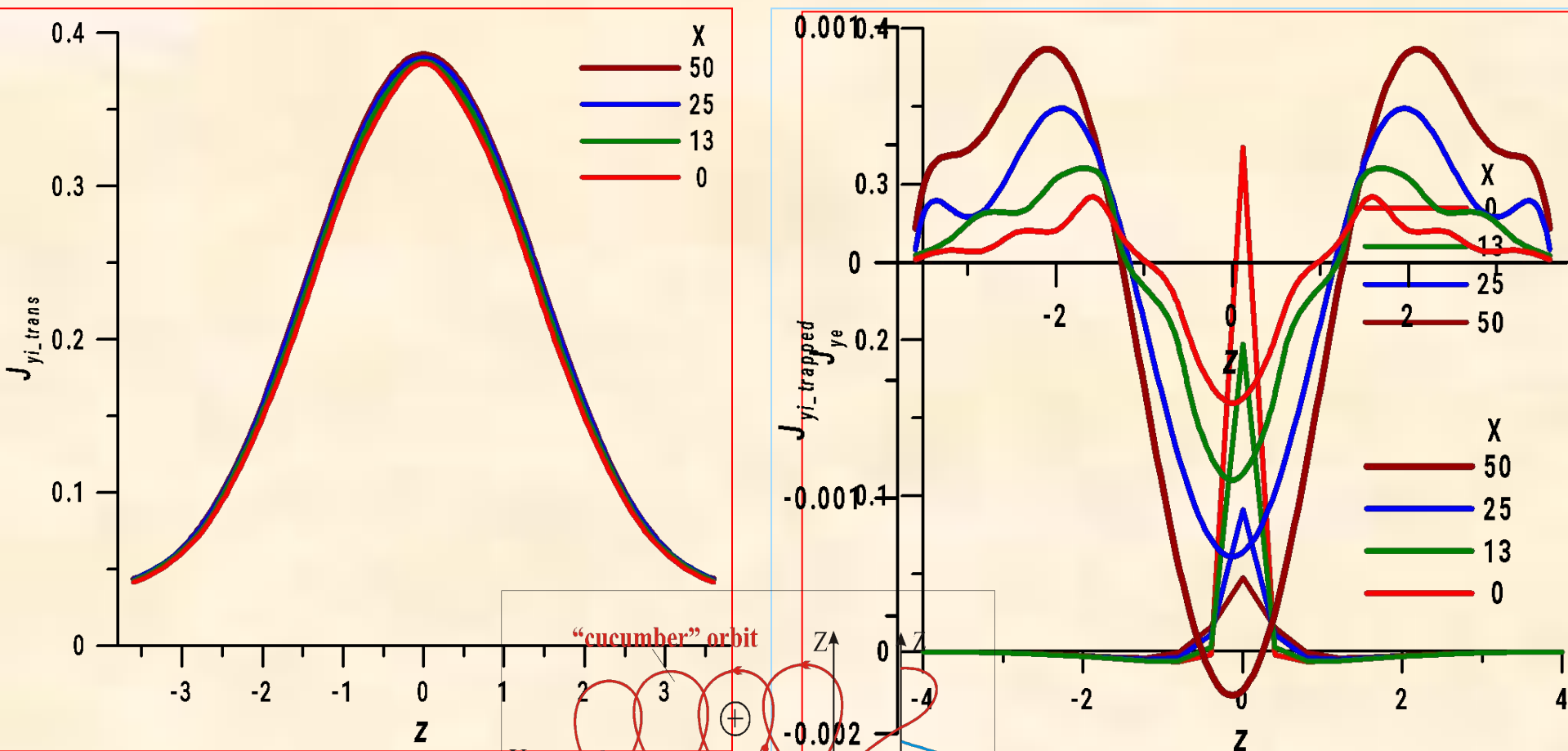
Двухмерное распределение парциальных плотностей тока



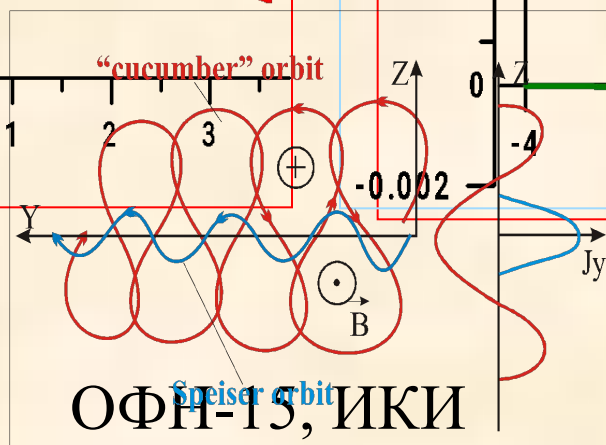
Распределение плотности тока и плазмы в двухмерном ТС



Распределение парциальных плотностей тока в системе



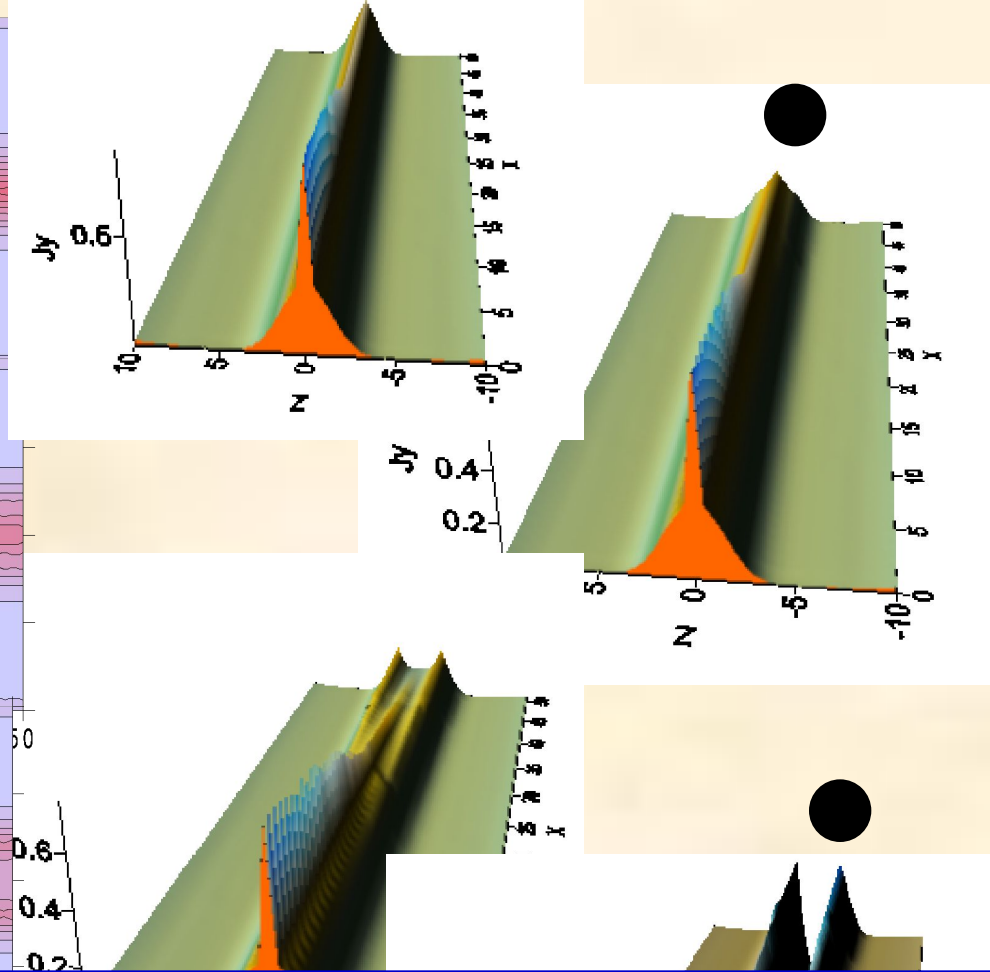
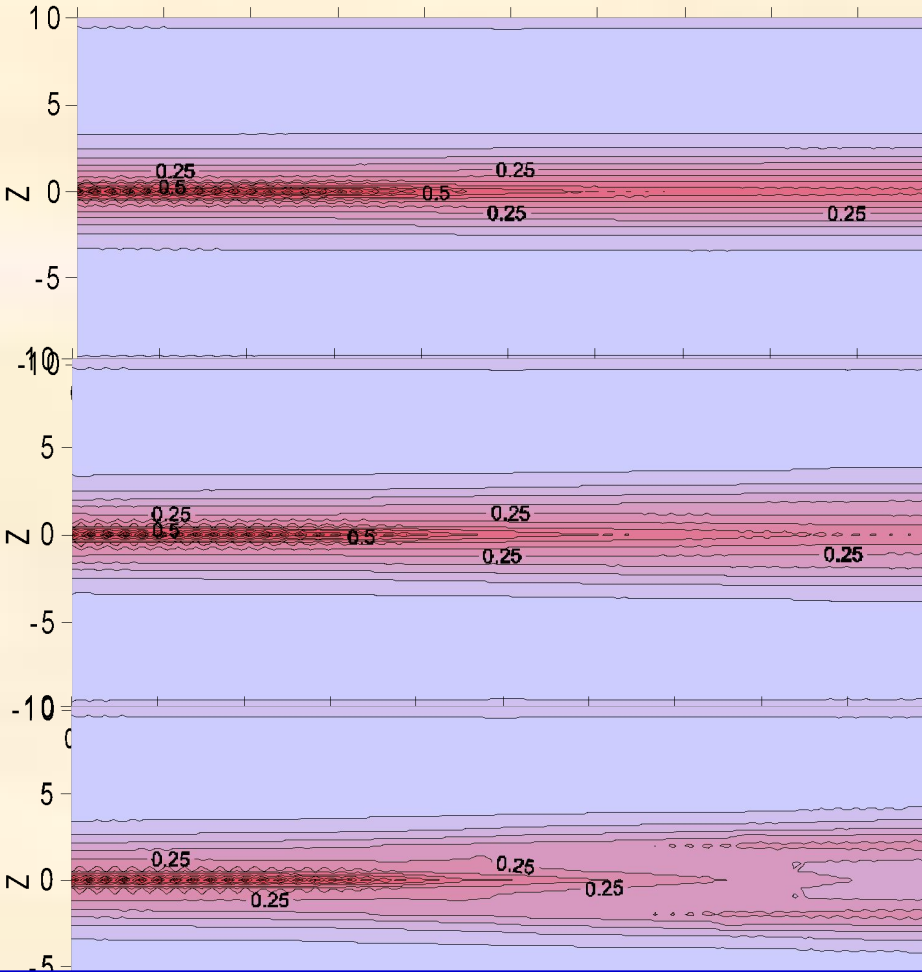
Пролетные ионы



Квазизахваченные ионы

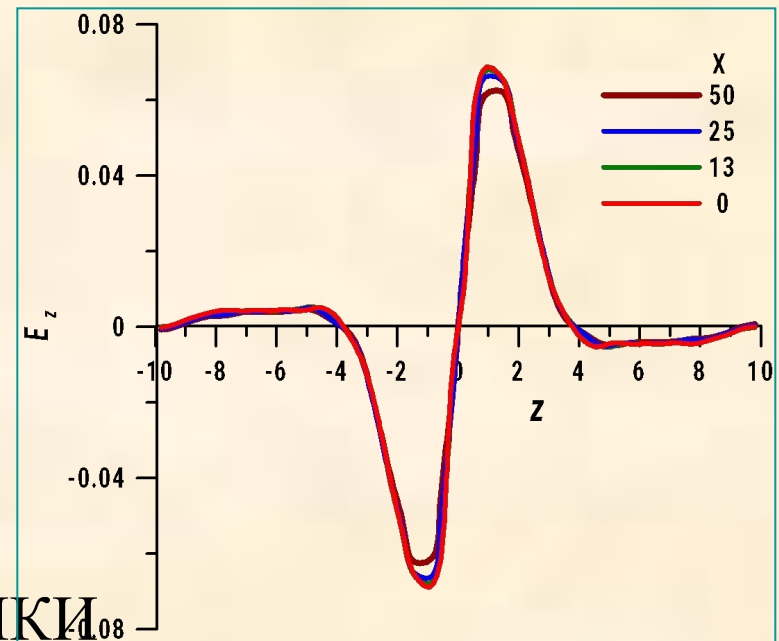
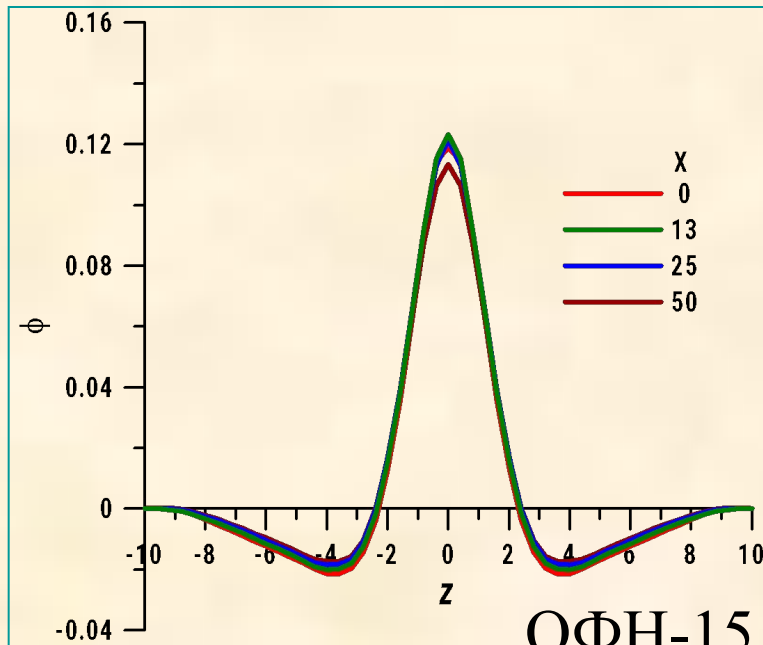
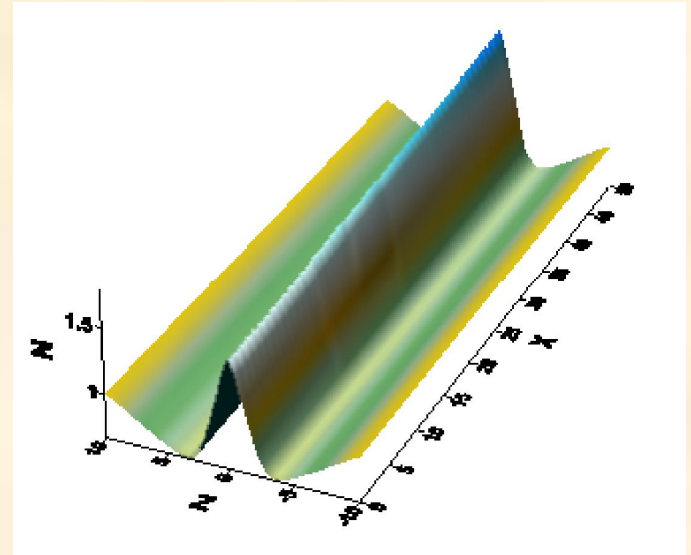
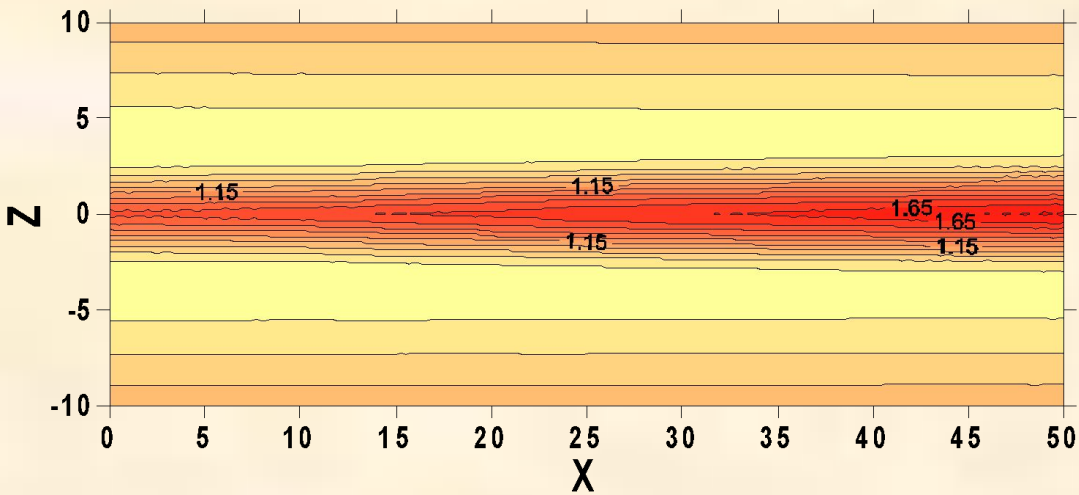
ОФН-15, ИКИ

РАН 02.2012



**Структура двумерного токового слоя
при разных плотностях
захваченных и квазизахваченных частиц**

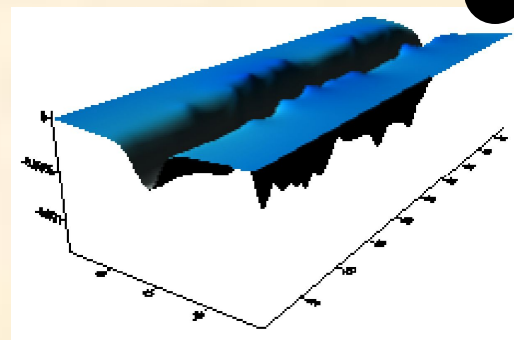
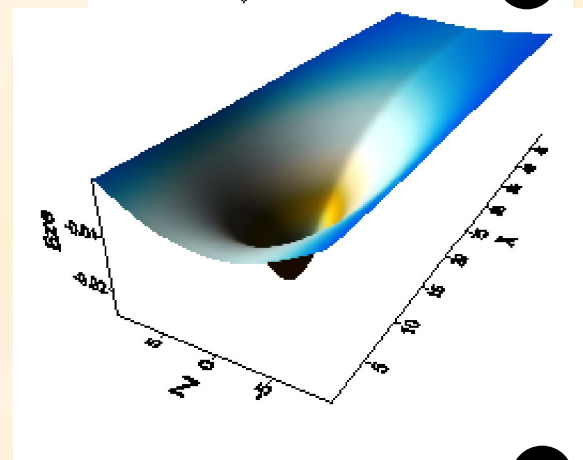
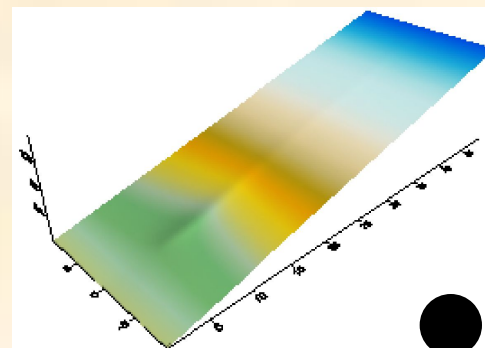
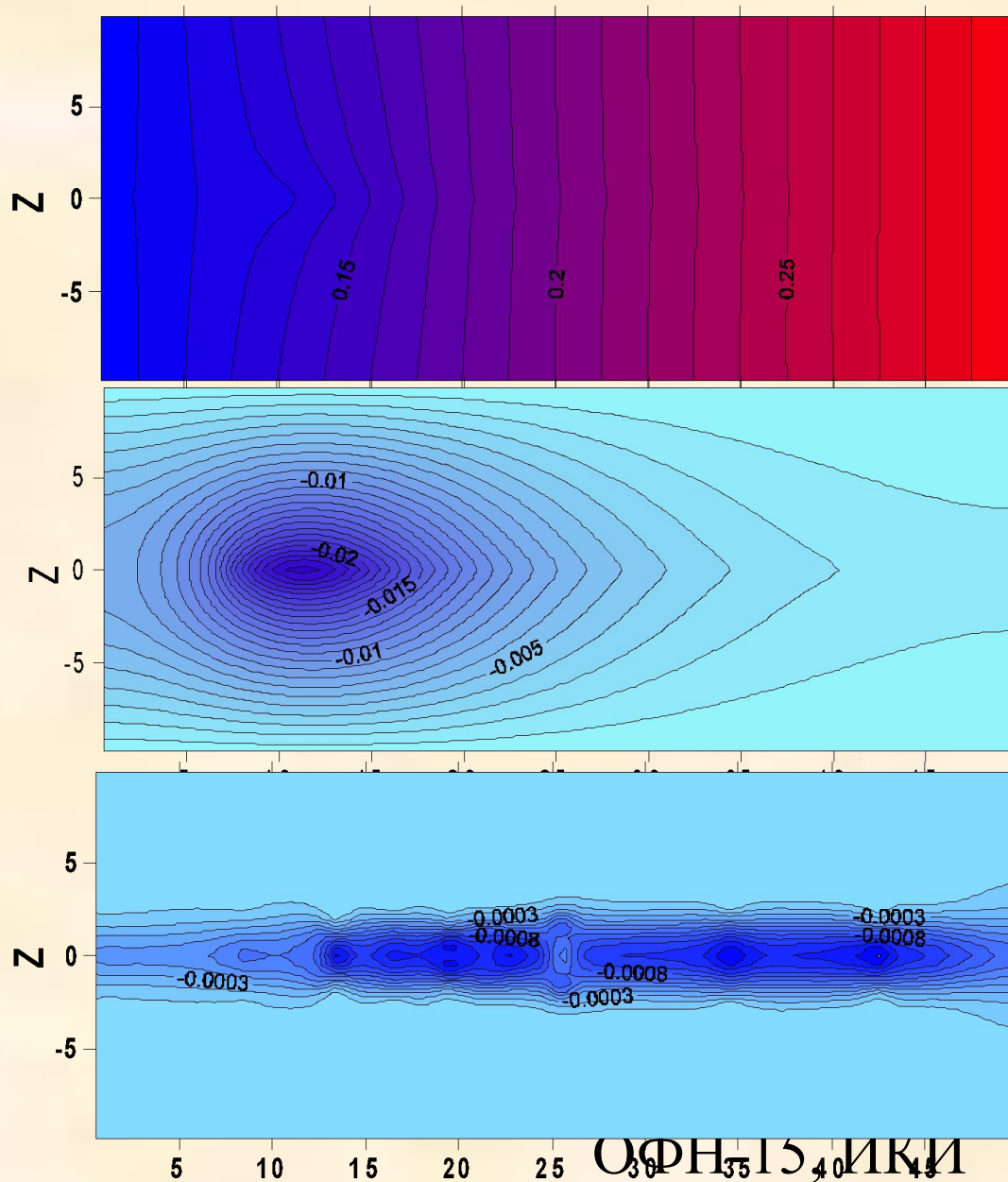
Распределение $N(x,z)$, $\phi(x,z)$, $E_z(x,z)$



ОФН-15, ИКИ

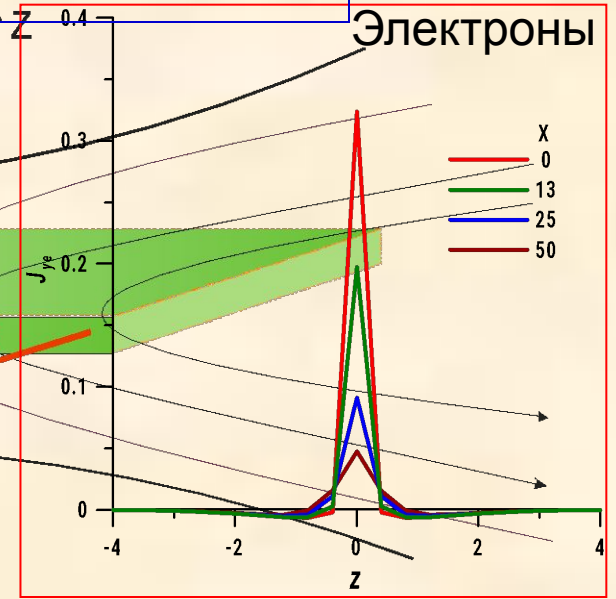
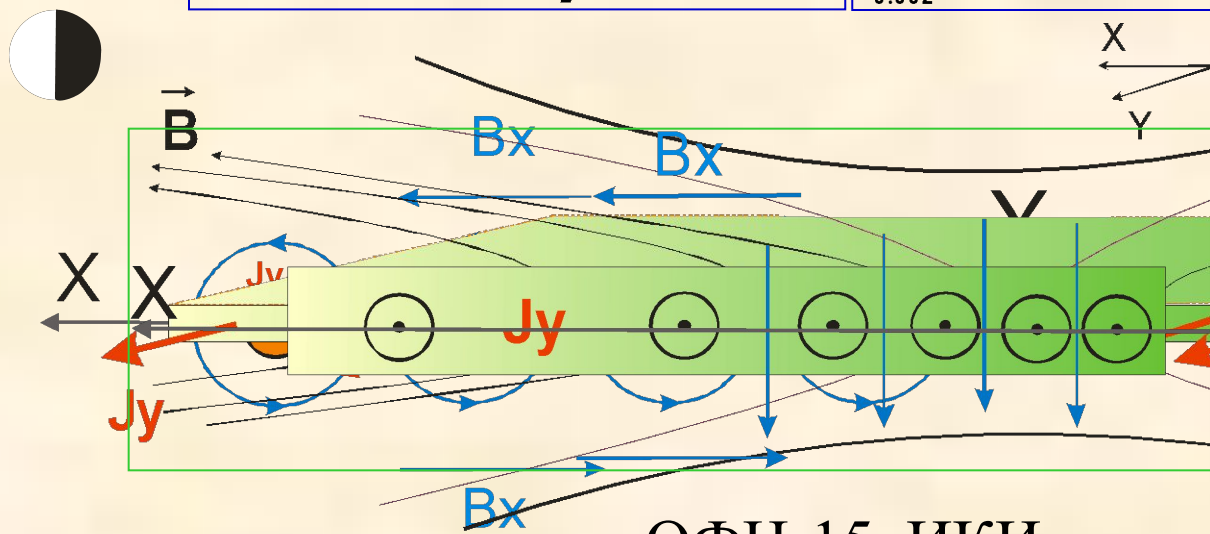
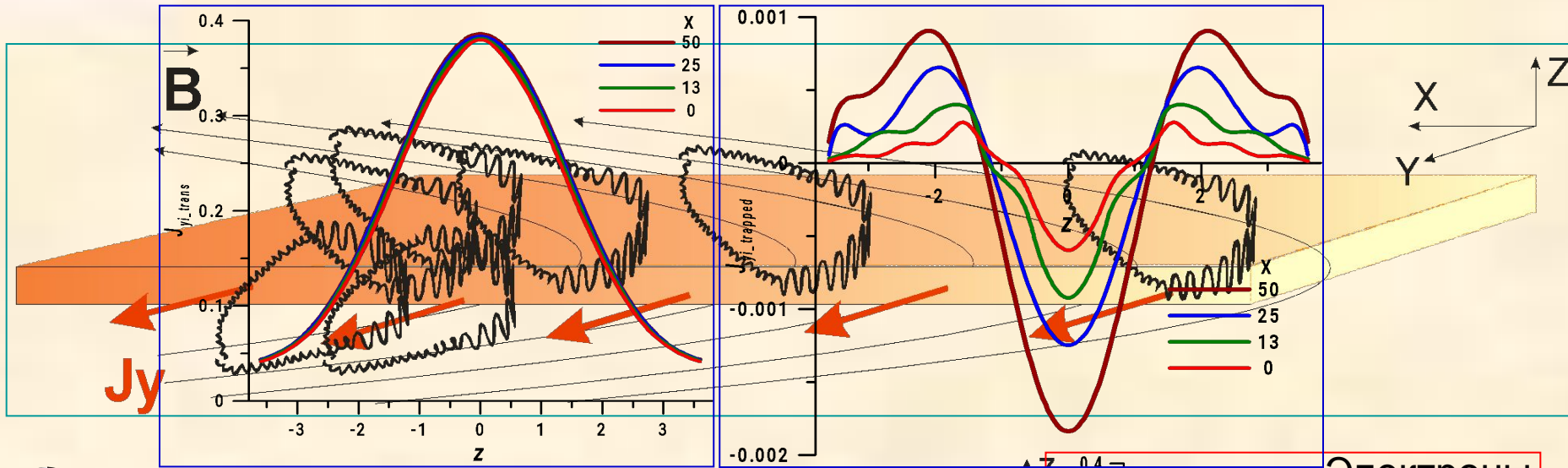
РАН 02.2012

Распределение нормального поля B_z в 2D TC



Вклад популяций частиц плазмы в распределение магнитного поля в ТС

Квазизахваченные ионы



Выводы

- ❑ Показано, что неоднородное распределение плотности тока в тонком токовом слое в продольном направлении обусловлено влиянием квазизахваченных ионов и электронов, в то время как основные носители тока – пролетные спейсеровские частицы.
- ❑ Плотность квазизахваченных частиц выше в области больших значений V_z , благодаря чему вблизи Земли может формироваться расщепленный ТС с 2 максимумами плотности тока.
- ❑ В области меньших V_z профиль J_y имеет колоколообразную форму и поддерживается, главным образом, токами пролетных ионов и электронов.
- ❑ Градиент электронных токов возрастает прочь от Земли, создавая самосогласованную отрицательную V_z компоненту, компенсирующую внешнее поле магнитного диполя.
- ❑ Возможно, электронные токи в ТТС облегчают формирование X-линии в хвосте м/сферы Земли.



Спасибо за внимание!