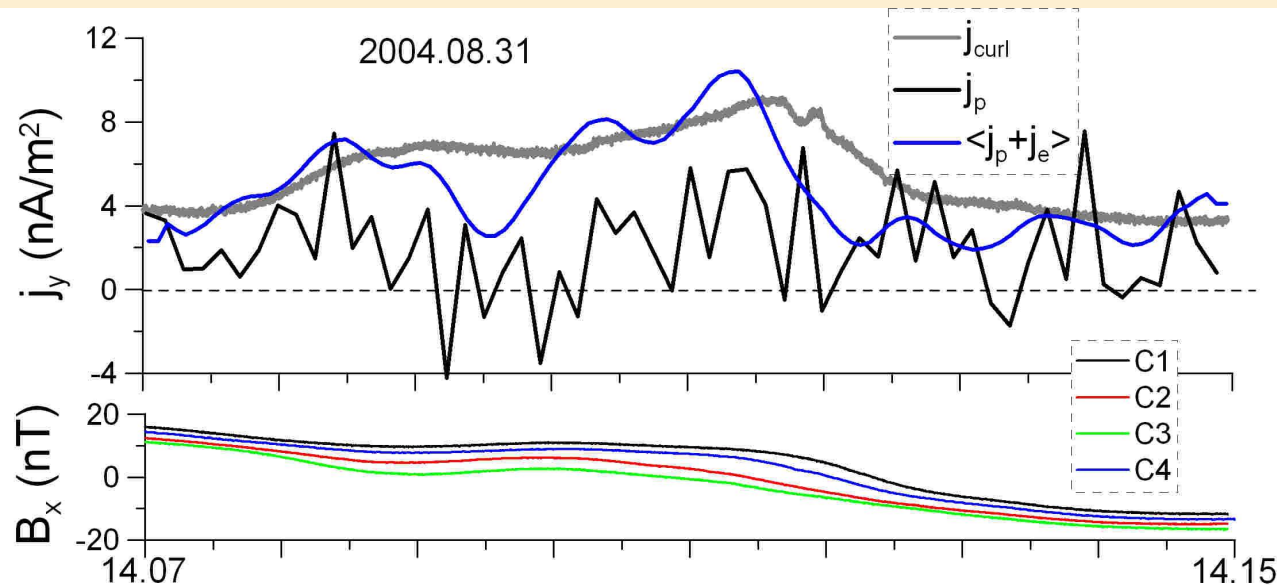


Свидетельства существования «скрытого» крупномасштабного электрического поля E_x в тонких ТОКОВЫХ СЛОЯХ.

Л.М. Зелёный,
А.В. Артемьев, А.А. Петрукович,

Институт Космических Исследований, РАН

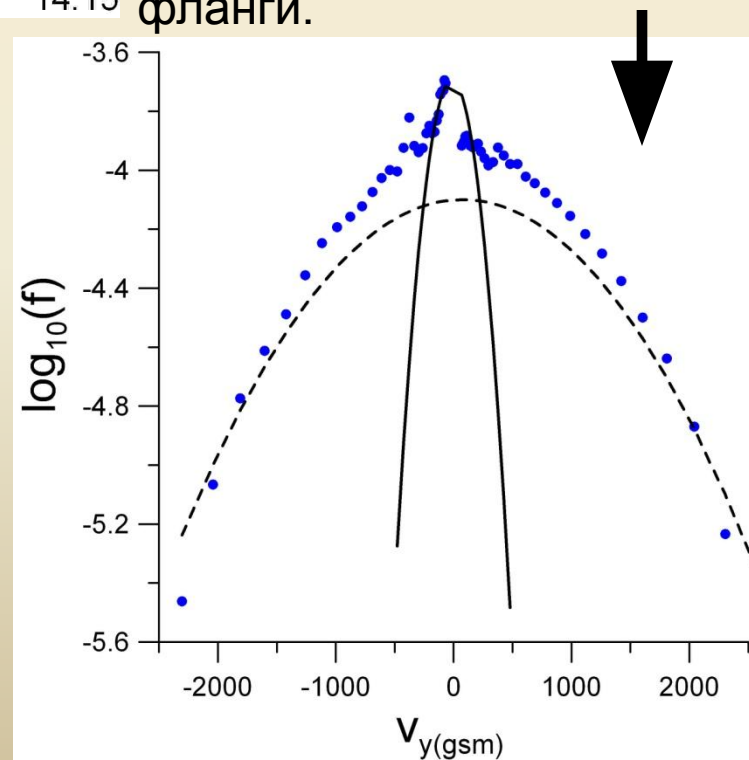
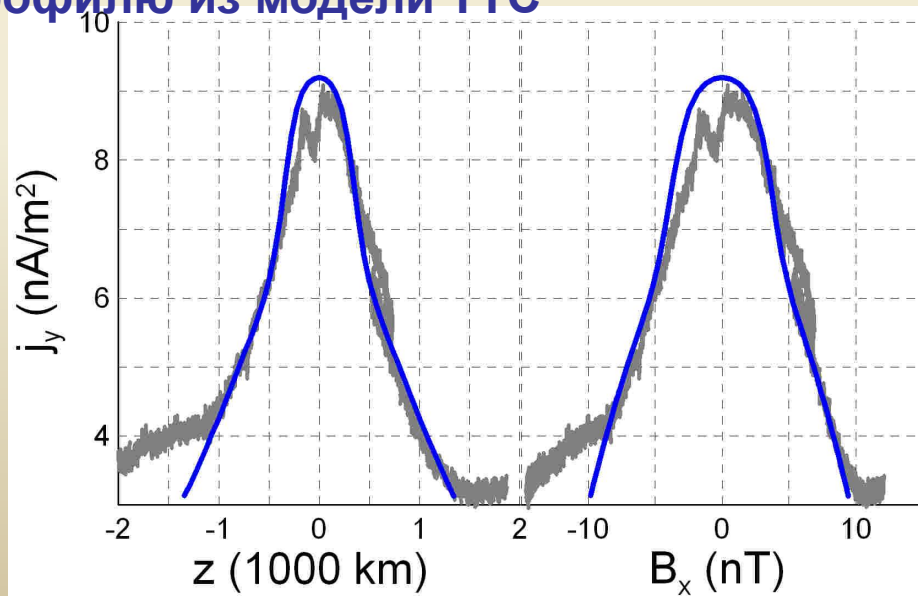
Тонкий токовый слой



Пересечение ТТС:
показано, что сумма токов
ионов и электронов
относительно хорошо
соотносятся с током $\text{rot}\mathbf{V}$

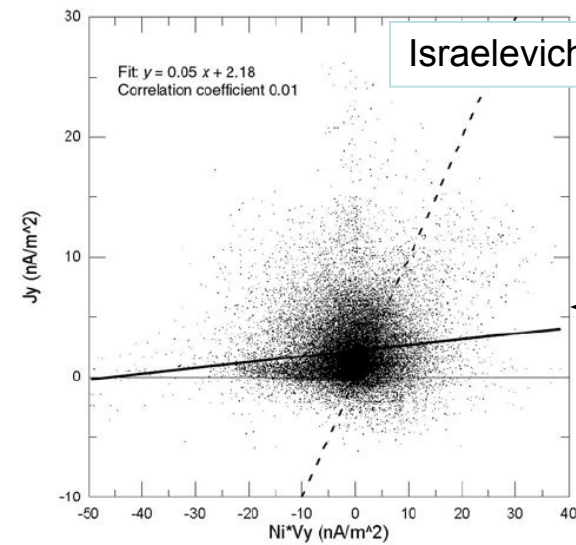
Функция распределения
протонов состоит из двух
частей: холодное ядро и
горячие асимметричные
фланги.

Профиль плотности тока соответствует
профилю из модели ТТС



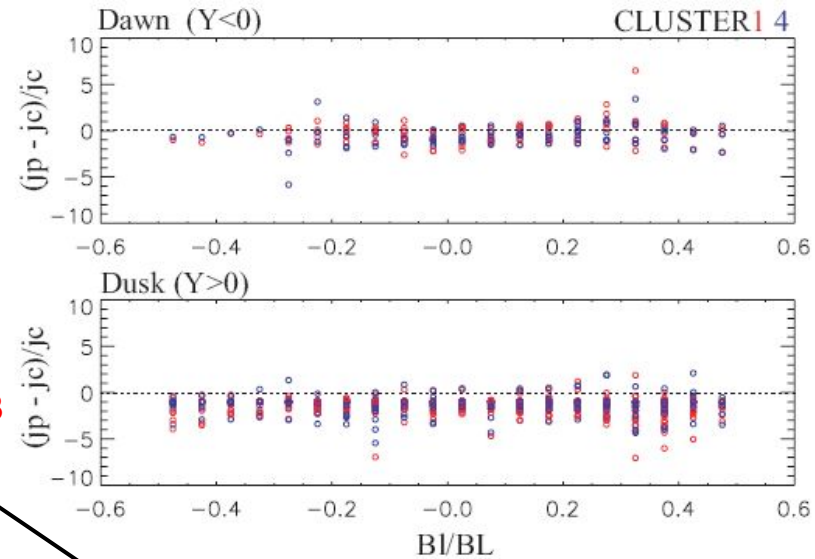
Соотношение между ионными и электронными токами

Runov et al. 2006

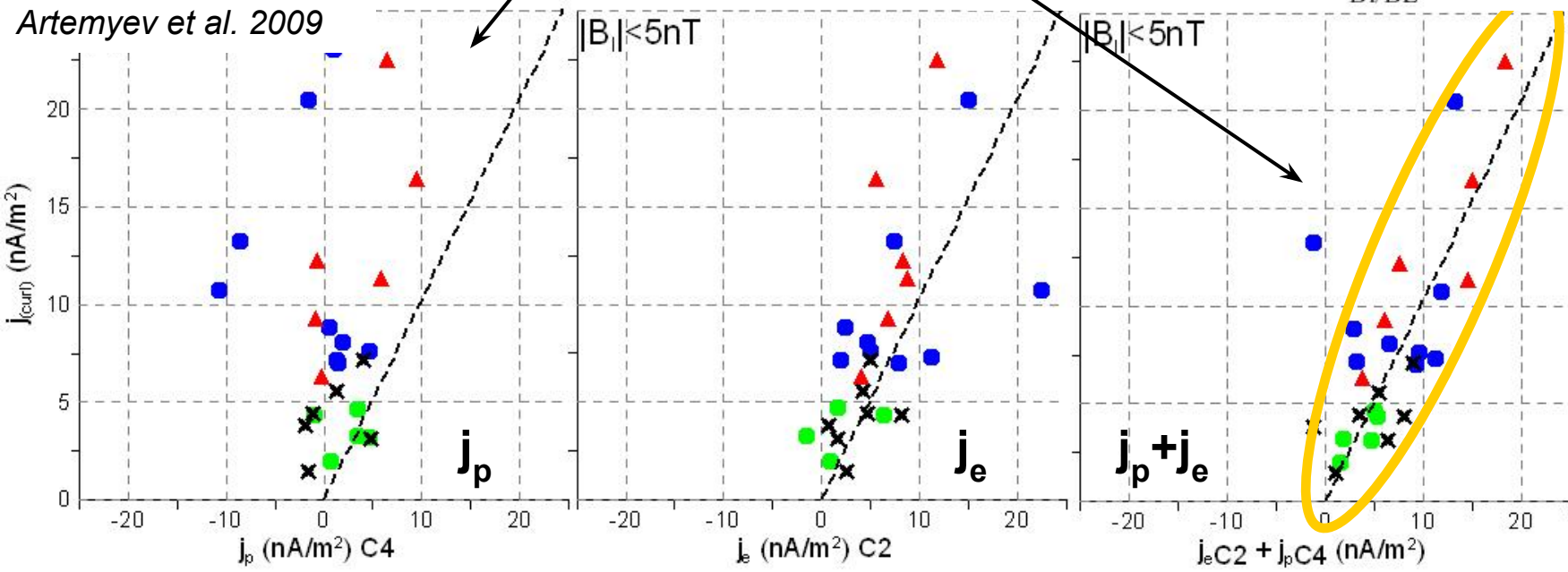


Плохая корреляция тока $\text{rot}\mathbf{B}$ с током ионов!

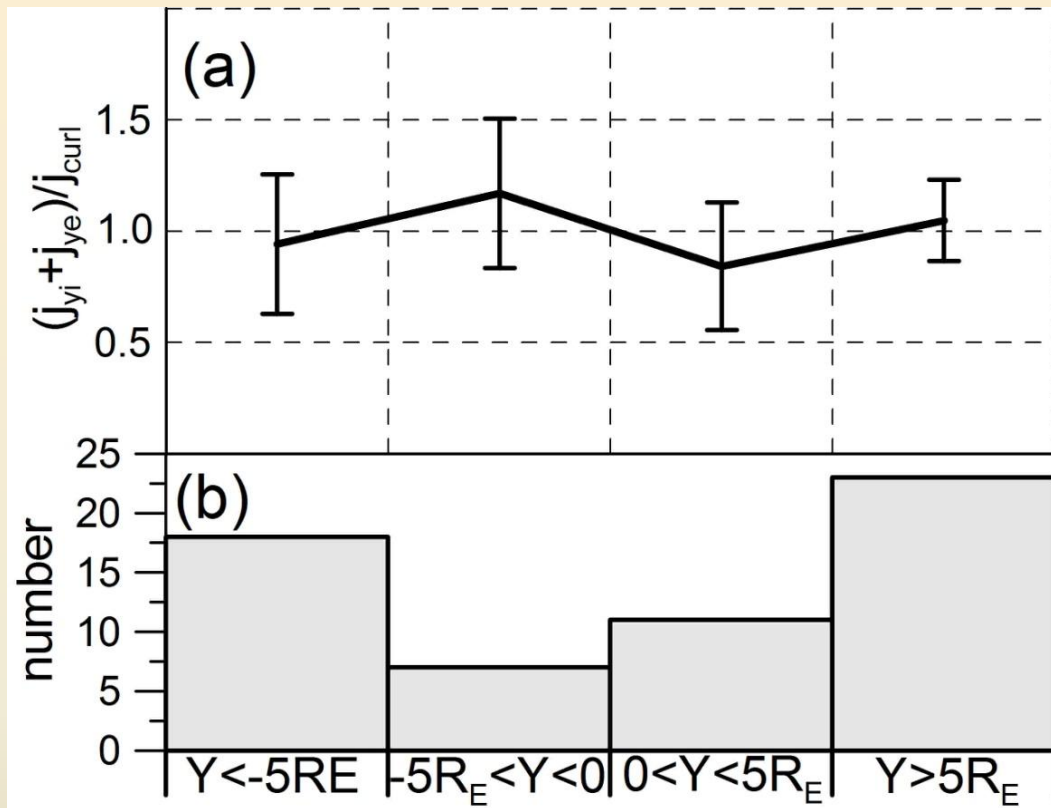
Основной ток в ТТС переносят электроны!



Artemyev et al. 2009



Статистика из 60 пересечений ТТС



$$\longrightarrow 4\pi/c(j_e + j_i) \sim \text{rot}\mathbf{B}$$

$$j_e \gg j_i$$

Asano et al. 2005, Runov et al. 2006, Israelevich et al. 2008, Artemyev et al. 2009

Данный результат противоречит основным теоретическим моделям:

$$T_i \gg T_e$$

$$e\rho_i \gg \rho_e$$



$$j_i \gg j_e$$



Составляющие электронного тока

$$j_{e\perp} = -en_e v_{ey} = -en_e (V_{\mathbf{E}\times\mathbf{B}} + V_{\text{DM}} + V_{\text{C}})$$

Плотность тока в горизонтальных ТС: $4\pi j_y/c = \partial B_{\parallel}/\partial z$

Дрейф кривизны + ток намагничивания + ток за счёт неоднородности магнитного поля:

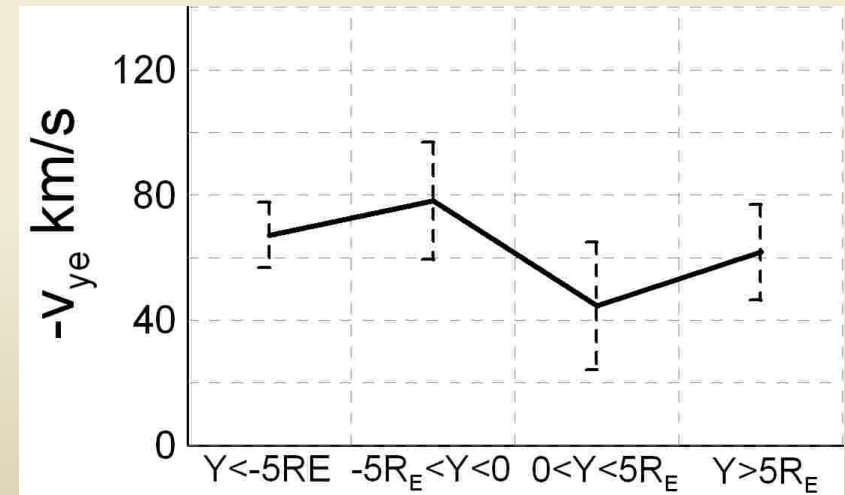
$$-en_e V_{\text{C}} = \frac{c}{B^4} (p_{\parallel e} - p_{\perp e}) [\mathbf{B} \times (\mathbf{B} \nabla) \mathbf{B}] = j_y \frac{4\pi (p_{\parallel e} - p_{\perp e}) B_z^2}{B^4}$$

Диамагнитный дрейф:

$$-en_e V_{\text{DM}} = \frac{c}{B^2} [\mathbf{B} \times \nabla_{\perp} p_{e\perp}] = \frac{c B_x}{B^2} \frac{\partial p_{e\perp}}{\partial z} = j_y \left(8\pi \frac{\partial p_{e\perp}}{\partial B_{\parallel}^2} \right)$$

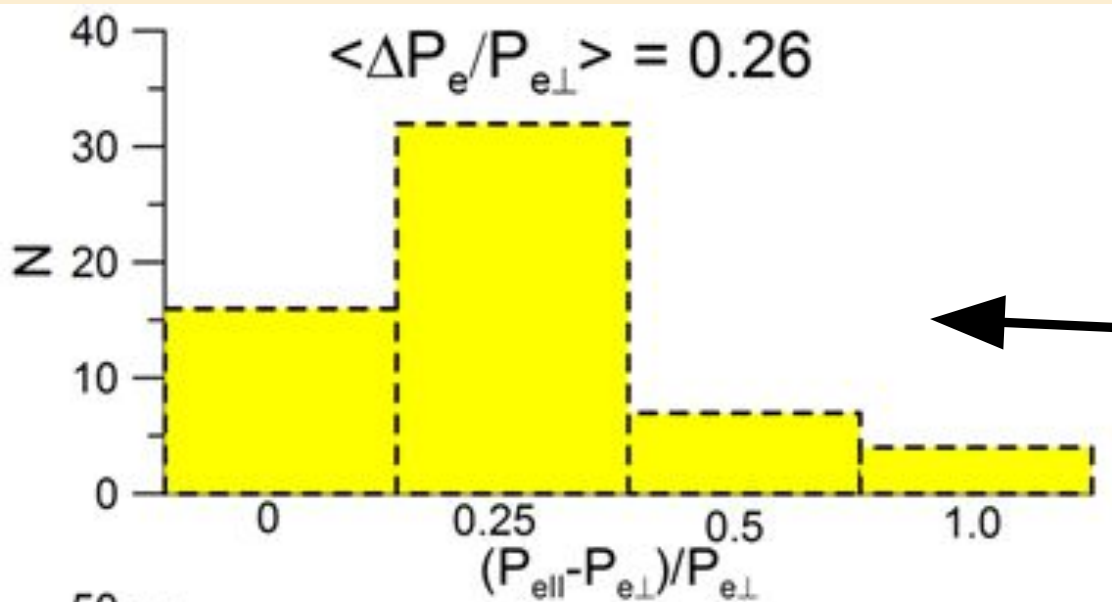
$\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ дрейф:

$$-en_e V_{\mathbf{E}\times\mathbf{B}} = -en_e \frac{[\mathbf{E} \times \mathbf{B}]}{B^2} = -en_e \frac{E_z B_x - E_x B_z}{B^2}$$

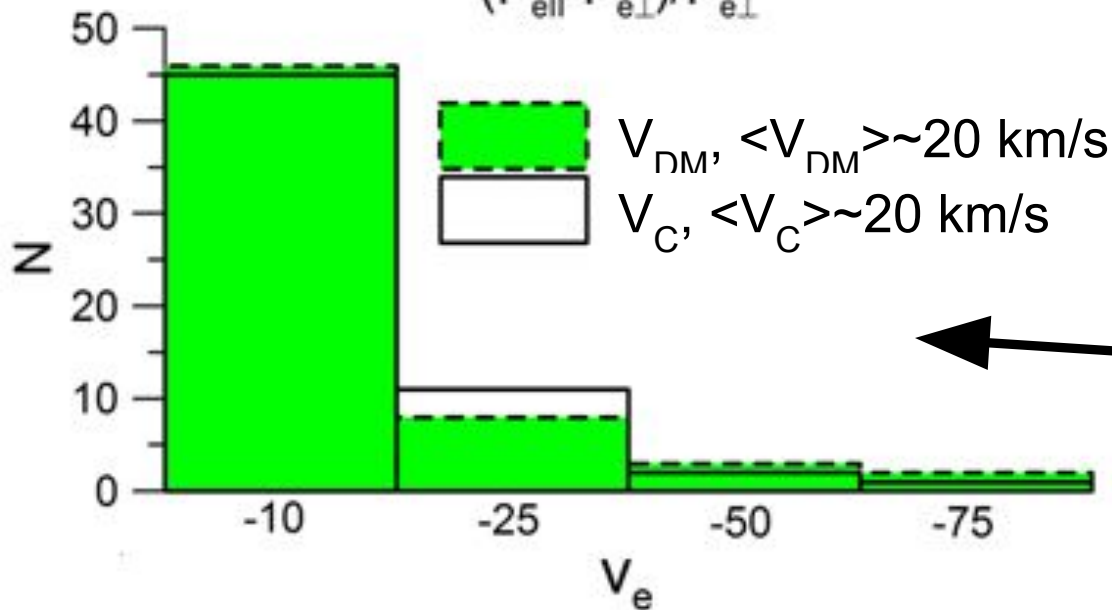


Средние значения потоковой скорости электронов

Оценка роли диамагнитного дрейфа и дрейфа кривизны

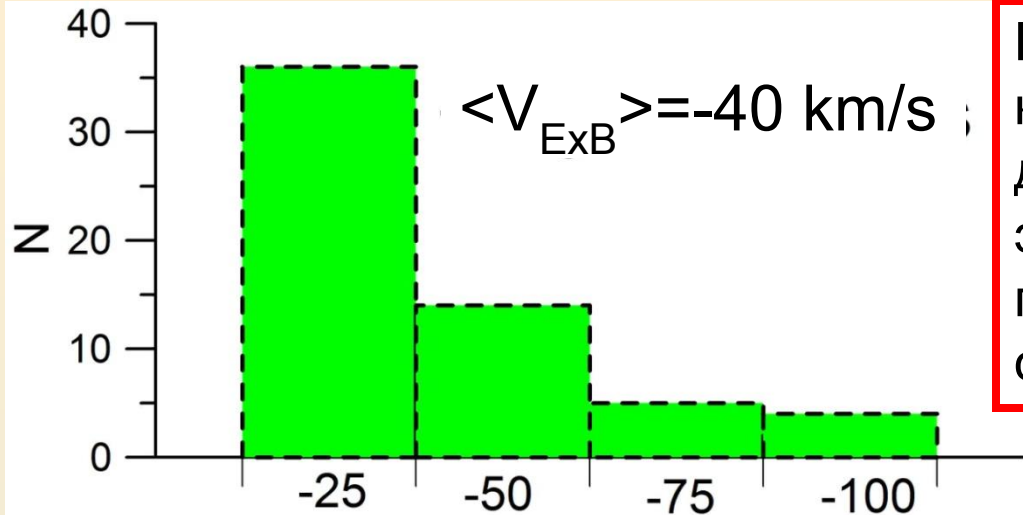


Более чем в 75% ТС анизотропия электронов порядка 25%!



Диамагнитный дрейф вместе с дрейфом кривизны могут обеспечить только половину наблюдаемой потоковой скорости электронов

Дрейф $E \times B$ и геометрия токового слоя



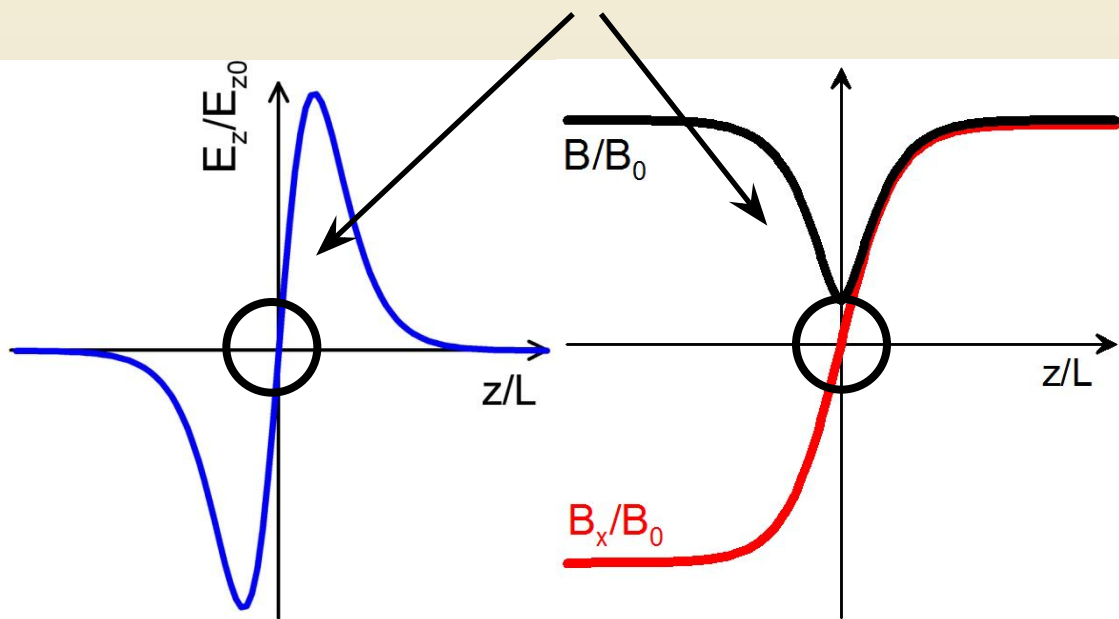
После вычитания дрейфа кривизны и диамагнитного дрейфа из потоковой скорости электронов остается величина порядка -40 км/с, которую можно объяснить только дрейфом $E \times B$!

$$V_{ExB} = V_{ye} - V_{DM} - V_C$$

E_z и B_x обращаются в ноль в центре ТС: дрейфа $E_z B_x \sim 0$

$$V_{E \times B} = \frac{E_z B_x - E_x B_z}{B^2}$$

Для описания остаточного дрейфа электронов необходимо $E_x > 0$

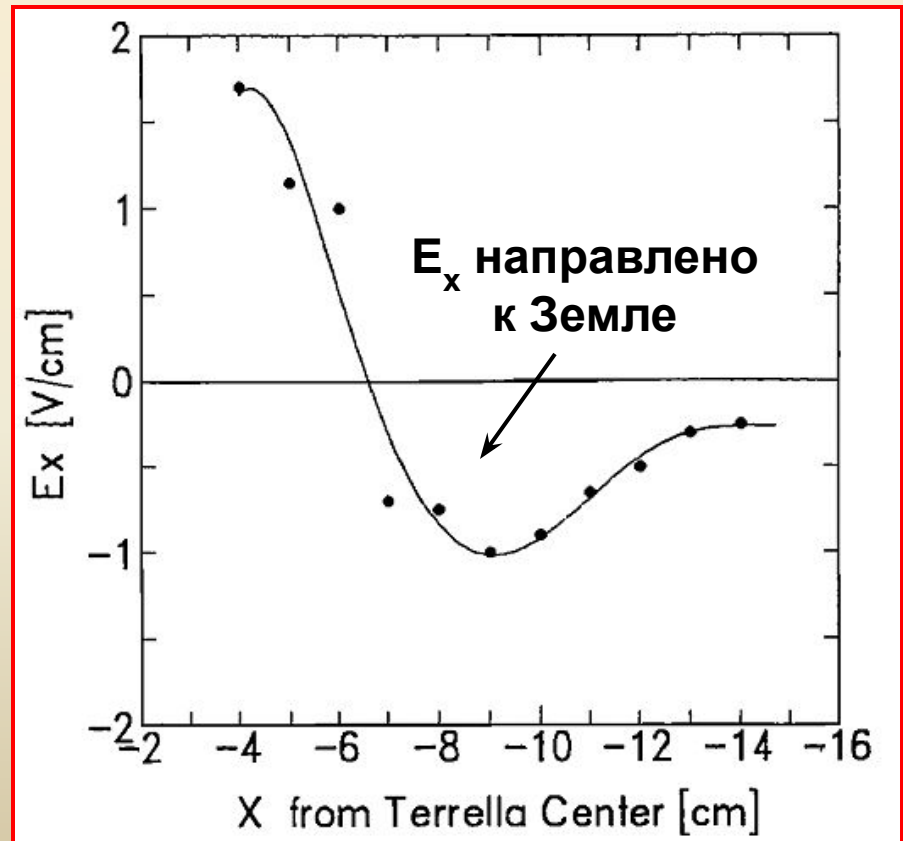
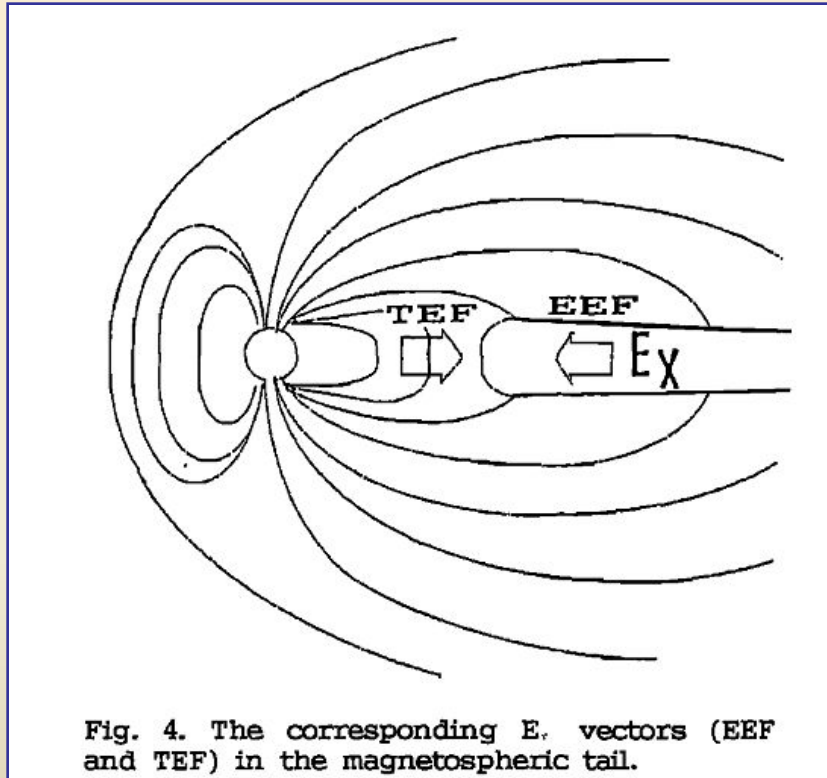


Величина E_x порядка **0.15 мВ/м**

Лабораторный эксперимент

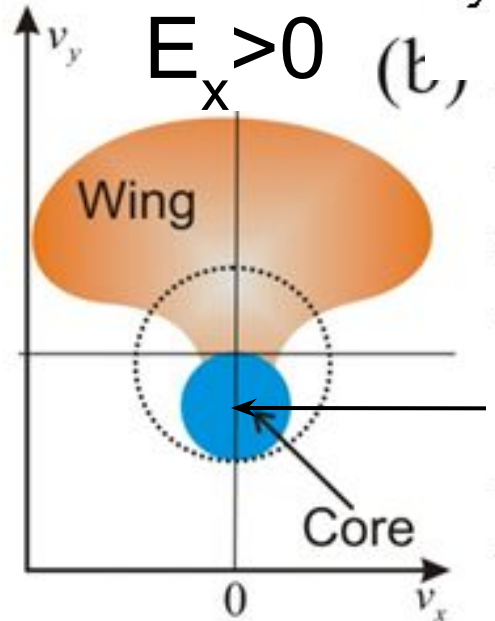
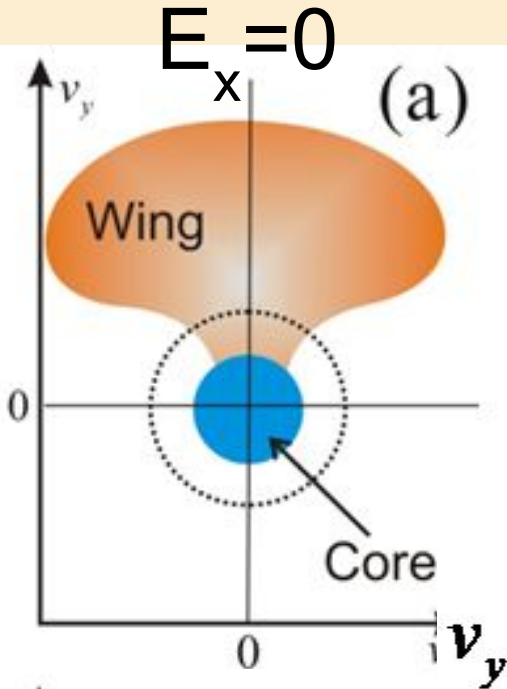
Laboratory evidence of Earthward electric field in the magnetotail current sheet.

S. Minami, A.I. Podgorny and I.M. Podgorny
GRL, 1993

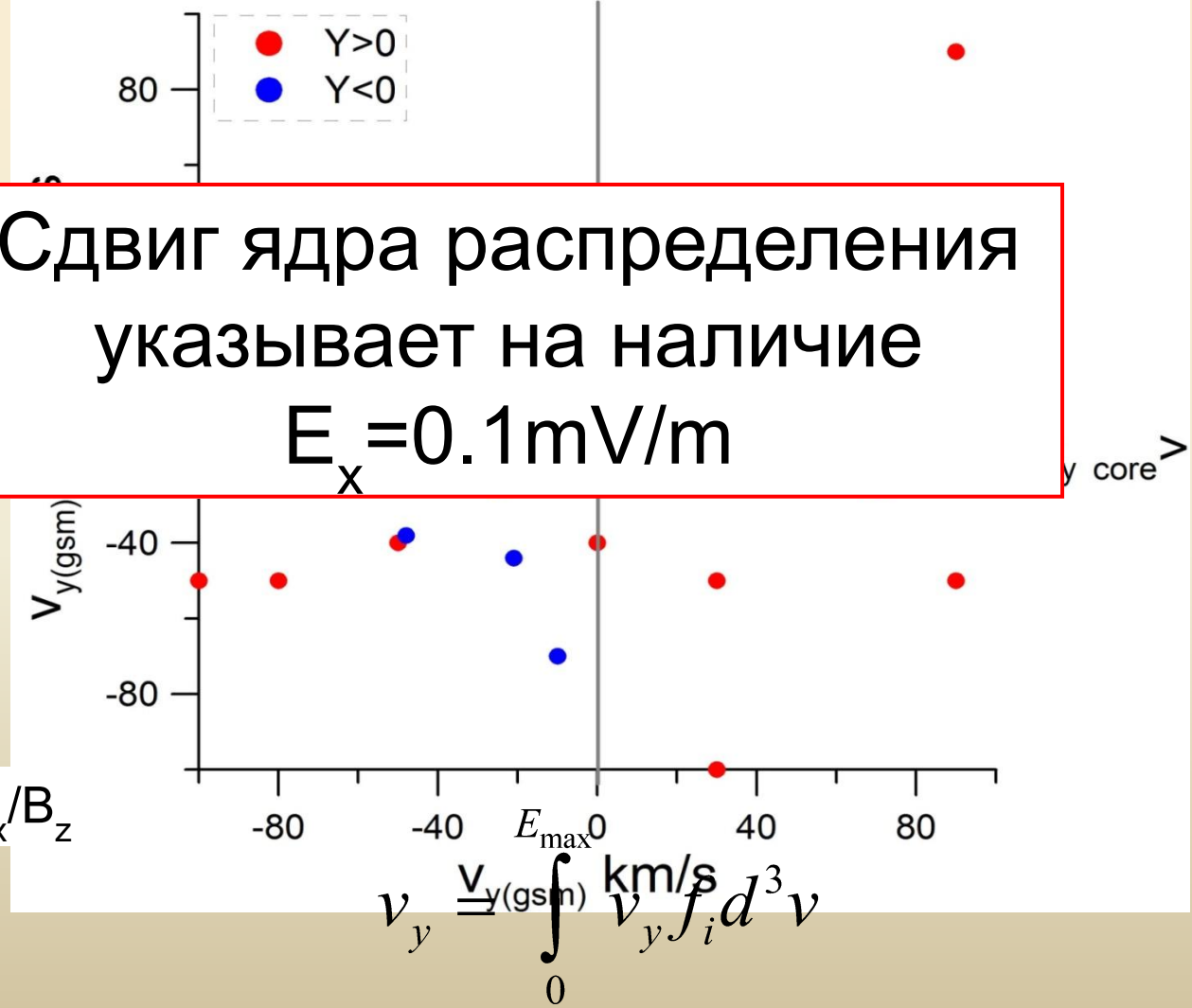


Влияние E_x на функцию распределения протонов

У большинства распределений присутствует сдвиг ядра ($\epsilon < 1 \text{ keV}$) в область отрицательных скоростей



Сдвиг ядра распределения указывает на наличие $E_x = 0.1 \text{ mV/m}$



Модель поля E_x в
ТОКОВОМ СЛОЕ

MHD isotropic CS model: ExB drift

Absence of parallel electric field

$$E_{\parallel} B = E_x B_x + E_z B_z = 0$$

$$E_z = -E_x \frac{B_x}{B_z}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial s} = 0 \Rightarrow \varphi = \varphi(r_{\perp})$$

Field line is also level line of A_y

$$\varphi(r_{\perp}) = \varphi(A_y)$$

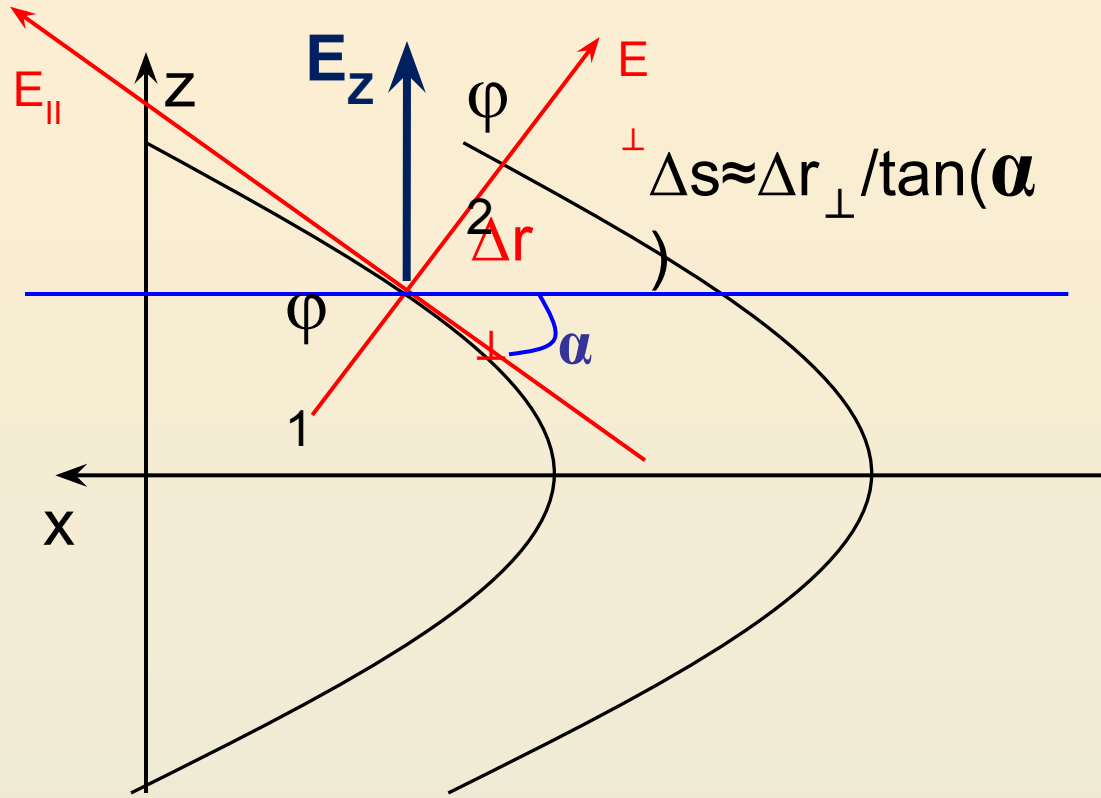
$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{\partial \varphi}{\partial A_y} \frac{\partial A_y}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial A_y} B_z$$

$$v_D = c \frac{E_z B_x - B_z E_x}{B^2} = -c \frac{E_x}{B_z} = -c \frac{\partial \varphi}{\partial A_y}$$

Dependence $\varphi(A_y)$ can be assumed by such way that v_D will have needed signature (see Birn and Schindler 2002, Yoon and Lui 2004).

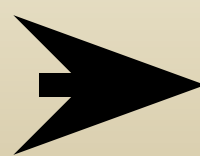
Function $\varphi(A_y)$ in such models should be set but not obtained from considering some physical mechanism!

Анизотропный тонкий токовый слой: 1D



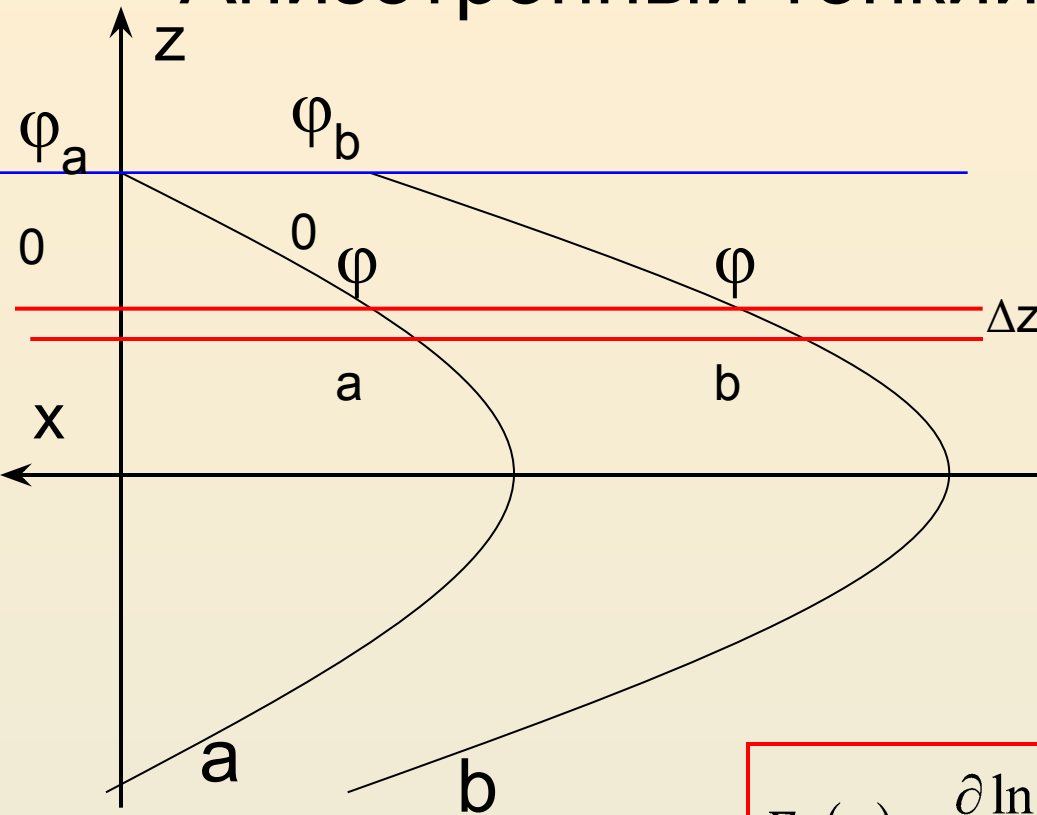
$$\begin{aligned}
 & d\varphi/ds \\
 & = F(s) \\
 & \varphi_2 = \varphi_1 + F(s) \\
 & \Delta s \\
 & E_{\perp} = -(\varphi_2 - \\
 & \varphi_1) / \Delta r_{\perp} \\
 & E_{\perp} = -F(s) \Delta s \\
 & / \Delta r_{\perp} \text{ and} \\
 & E_{\perp} = E_{\parallel} / \tan(\alpha)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_z &= E_{\parallel} \sin(\alpha) + E_{\perp} \cos(\alpha) \\
 E_x &= -E_{\parallel} \cos(\alpha) + E_{\perp} \sin(\alpha)
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 E_z &= -F(s) / \sin(\alpha) \\
 E_x &= 0
 \end{aligned}$$

Анизотропный тонкий токовый слой: 2D



$$\partial B_z / \partial x > 0$$

$$\Delta s_a = \Delta z \sqrt{1 + B_x^2(z) / B_{za}^2}$$

$$\Delta s_b = \Delta z \sqrt{1 + B_x^2(z) / B_{zb}^2}, B_{zb} = B_{za} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \Delta x$$

$$\frac{\partial \Delta s_a}{\partial x} = - \frac{\partial \ln B_z}{\partial x} \frac{B_x^2(z) / B_z^2}{\sqrt{1 + B_x^2(z) / B_z^2}} \Delta z$$

$$E_x(z) = \frac{\partial \ln B_z}{\partial x} \int_z^{L_z} \frac{\partial \varphi(z')}{\partial s} \frac{B_x^2(z') / B_z^2}{\sqrt{1 + B_x^2(z') / B_z^2}} dz'$$

$$E_x(z) = \frac{\partial \ln B_z}{\partial x} \int_z^{L_z} E_z(z') \frac{B_x^2(z')}{B_z^2 + B_x^2(z')} dz'$$

$$E_x \sim E_z \frac{L_z}{L_x}$$

Перепад потенциала через слой

Перепад потенциала через слой

$$\Delta\phi \sim 0.5 T_e / e$$

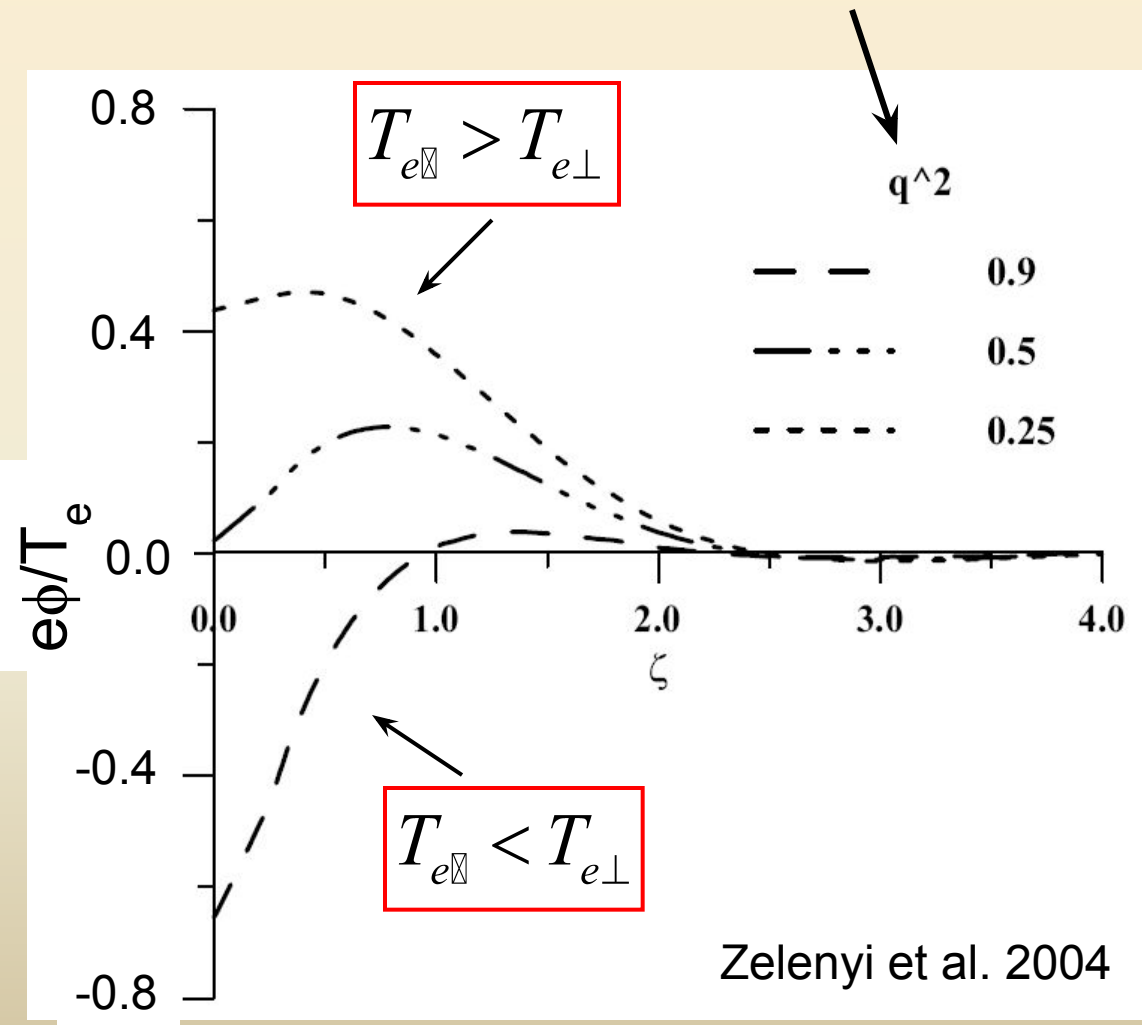
$$E_z \sim \frac{\Delta\phi}{L_z} = 0.5 \frac{T_e}{eL_z}$$

$$E_x \sim 0.5 \frac{T_e}{eL_x}$$

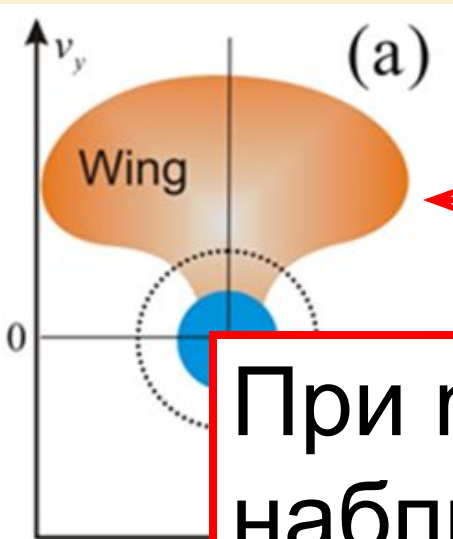
При $T_e = 1 \text{ keV}$ и $L_x = 10 R_E$

$$E_x \sim 0.1 \text{ mV/m}$$

Степень анизотропии электронов



Двойная структура распределения протонов и поле E_x



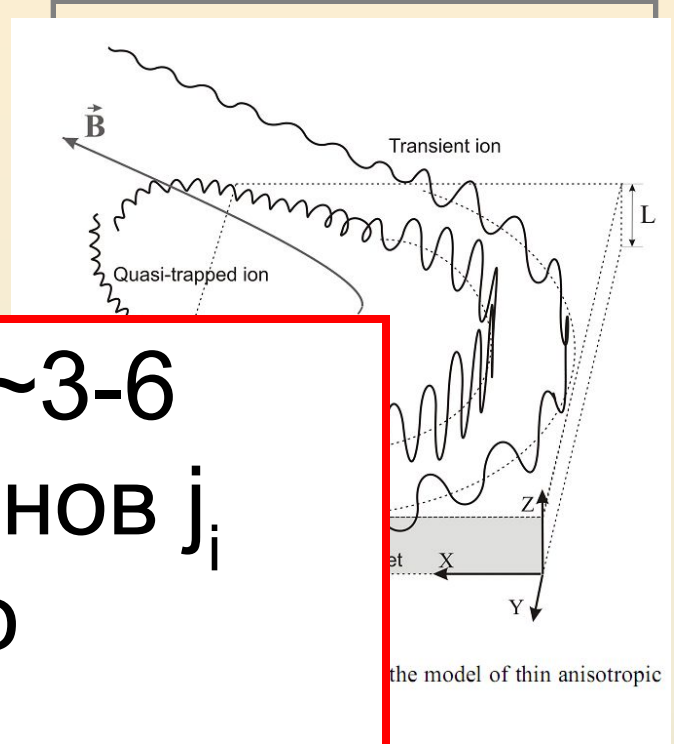
$$j_{0i} = n_{wing} v_{wing}$$

При $n_p/n_{wing} \sim 5$ и $T_i/T_e \sim 3-6$ наблюдаемый ток ионов j_i оказывается намного меньше тока j_{0i}

$$j_i = j_{0i} \left(1 - \frac{n_p}{n_{wings}} \frac{v_D}{v_{wings}} \right)$$

$$v_{wing} \sim v_{Ti}$$

спайсеровским орбитам

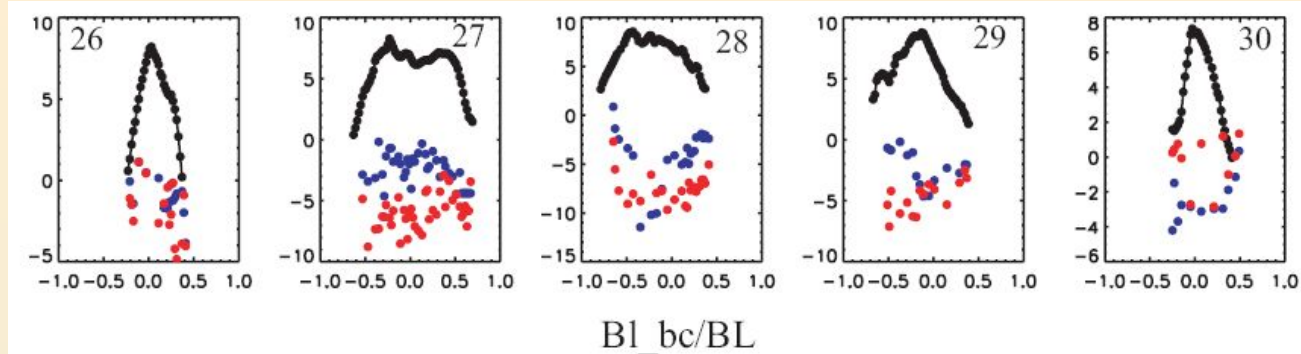


the model of thin anisotropic

ИОНОВ ПО

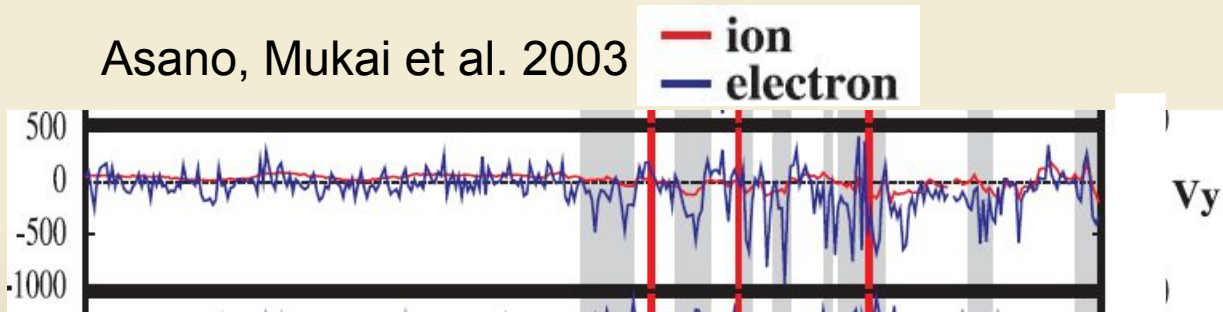
$$j_i = j_{0i} \left(1 - \frac{n_p}{n_{wings}} \frac{v_D}{v_{wings}} \right) \approx j_{0i} \left(1 - \frac{n_p}{n_{wings}} \frac{T_e}{T_i} \right)$$

Runov et al. 2006



Profiles of the curlometer current m-component (black) and the corresponding proton current $j_p \sim N_p V_{py}$ at Cluster 1 (red) and 4 (blue) versus B_x/B_L .

Asano, Mukai et al. 2003



The electron velocity v_{ey} occasionally reached up to 1000 km/s, and the ion velocity v_{iy} showed the dawnward convection. Since the electrons dominated the electric current, the current is not caused by the standard diamagnetic drift current.

Выводы:

- Величины потоковой скорости электронов и сдвиги ядер функций распределения ионов по данным Cluster указывают на присутствие в хвосте земной магнитосферы поля $E_x \sim 0.15$ мВ/м
- Теория ТТС, учитывающая слабую неоднородность по X , позволяет получить $E_x \sim 0.1$ мВ/м
- Существование «скрытого» поля E_x позволяет объяснить *кажущееся* доминирование электронных токов в спутниковых наблюдениях