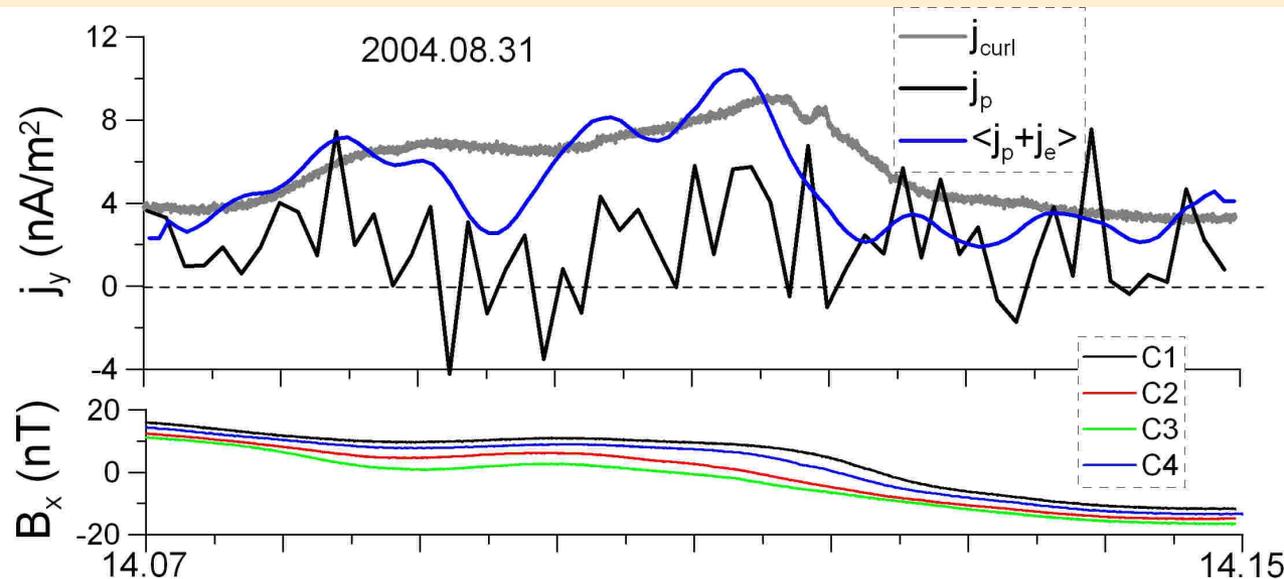


# **Свидетельства существования «скрытого» крупномасштабного электрического поля $E_x$ в тонких ТОКОВЫХ СЛОЯХ.**

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

Институт Космических Исследований, РАН

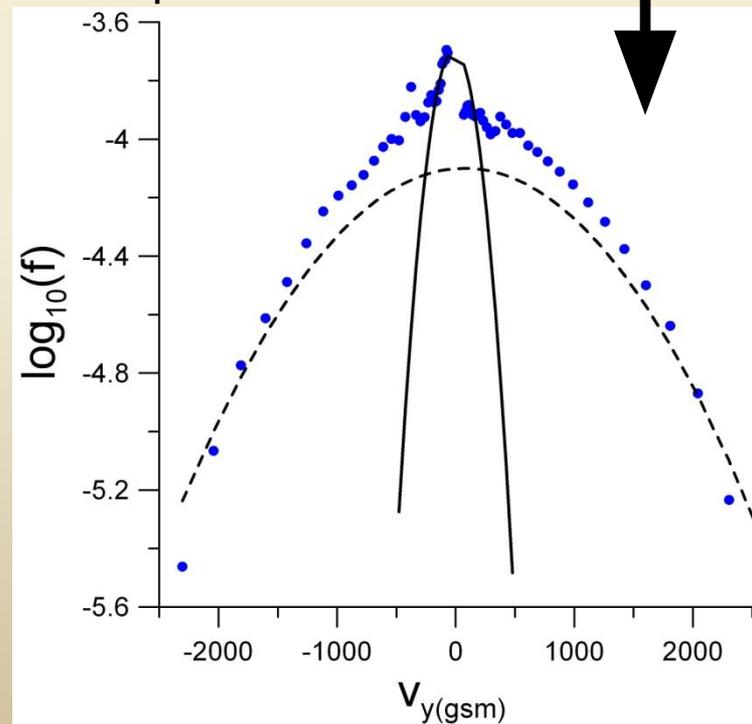
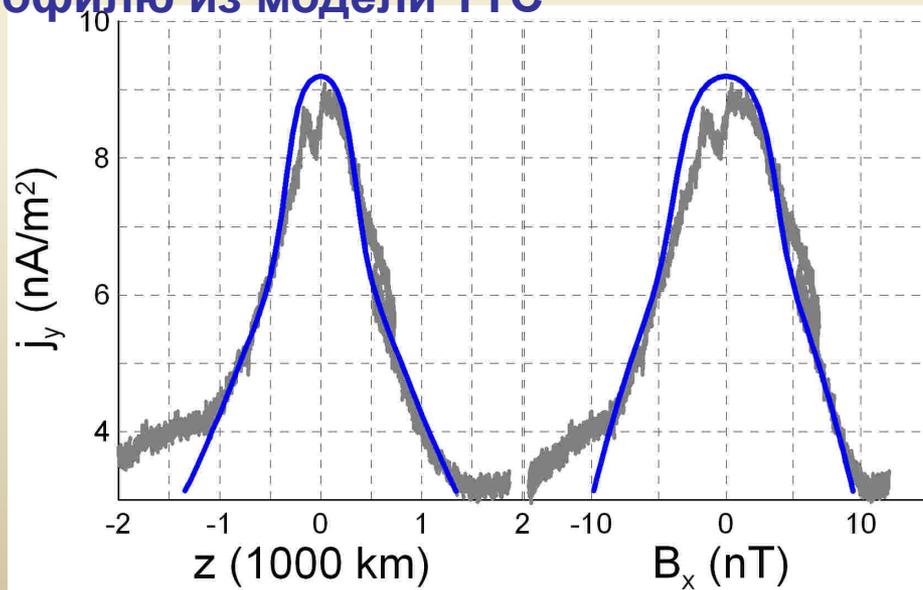
# Тонкий токовый слой



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

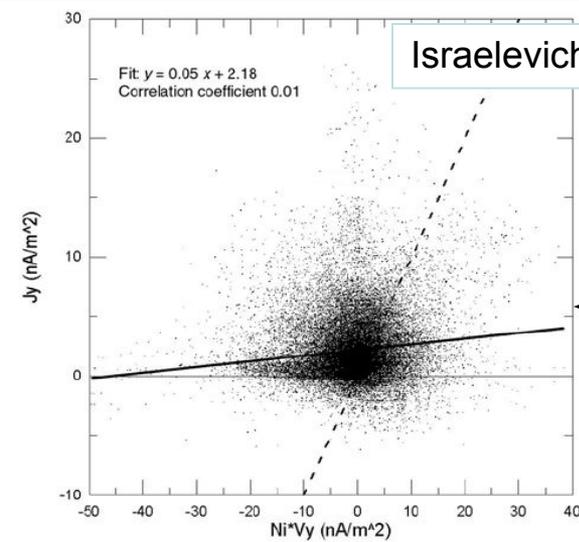
Функция распределения протонов состоит из двух частей: холодное ядро и горячие асимметричные фланги.

Профиль плотности тока соответствует профилю из модели ТТС



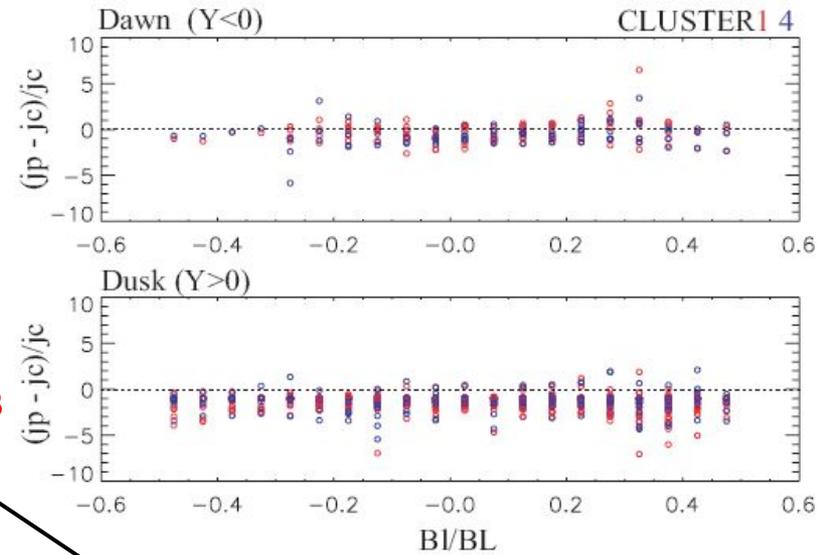
# Соотношение между ионными и электронными токами

Runov et al. 2006

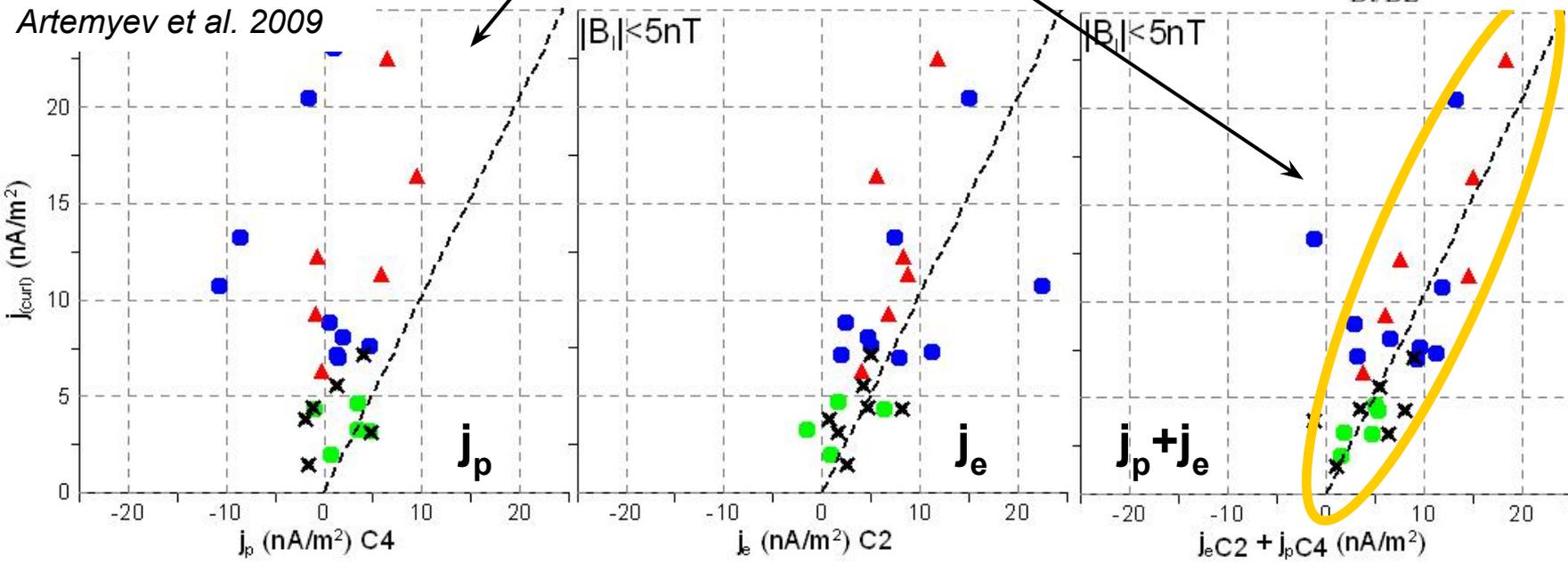


Плохая корреляция тока  $\text{rot}\mathbf{B}$  с током ионов!

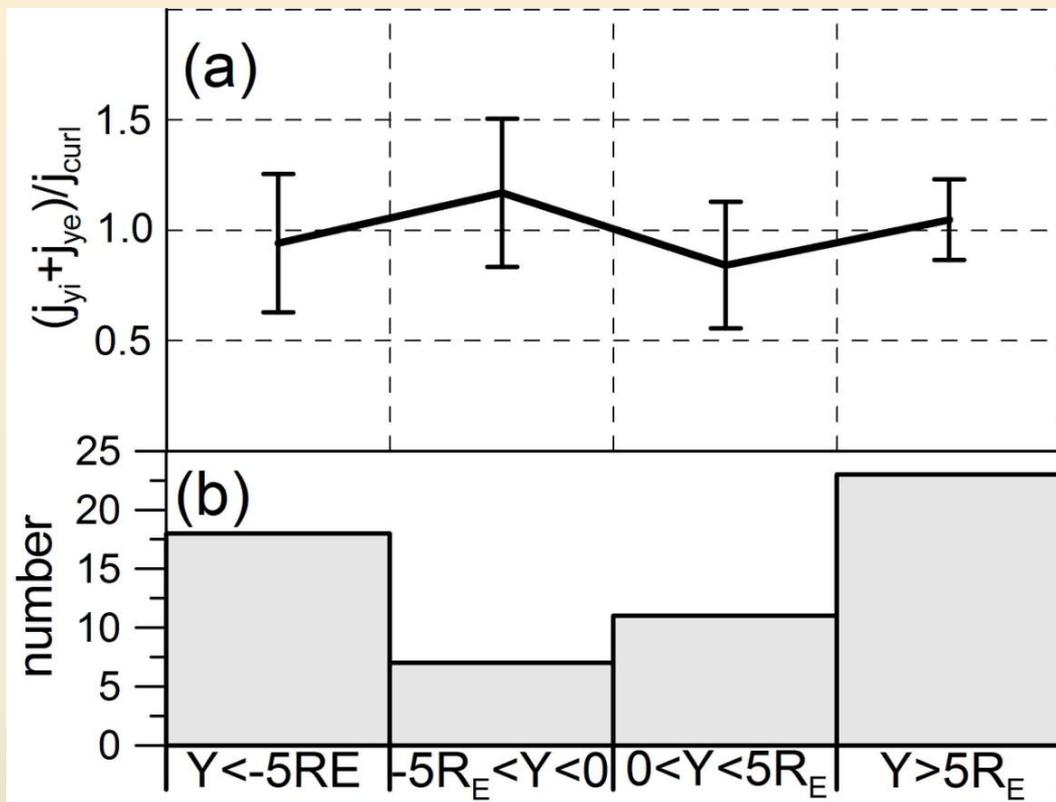
Основной ток в ТТС переносят электроны!



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:

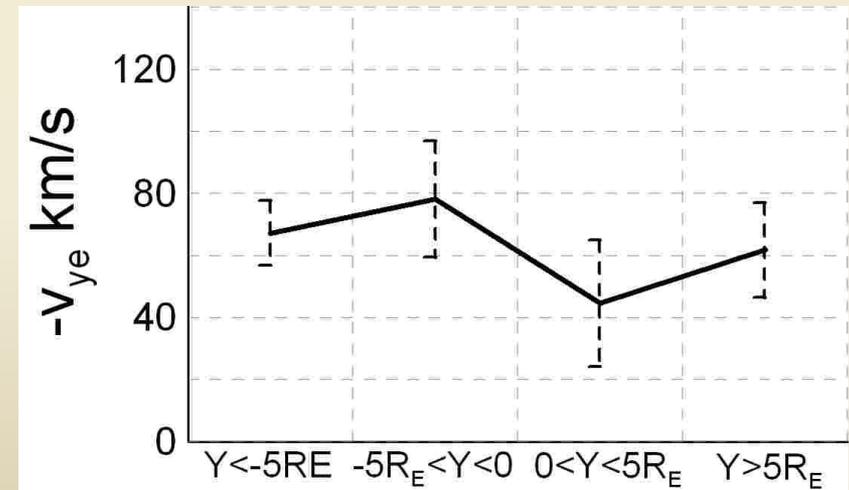
$$-en_e V_{\text{C}} = \frac{c}{B^4} (p_{\parallel e} - p_{\perp e}) [\mathbf{B} \times (\mathbf{B} \nabla) \mathbf{B}] = j_y \frac{4\pi (p_{\parallel e} - p_{\perp e}) B_z^2}{B^4}$$

Диамагнитный дрейф:

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

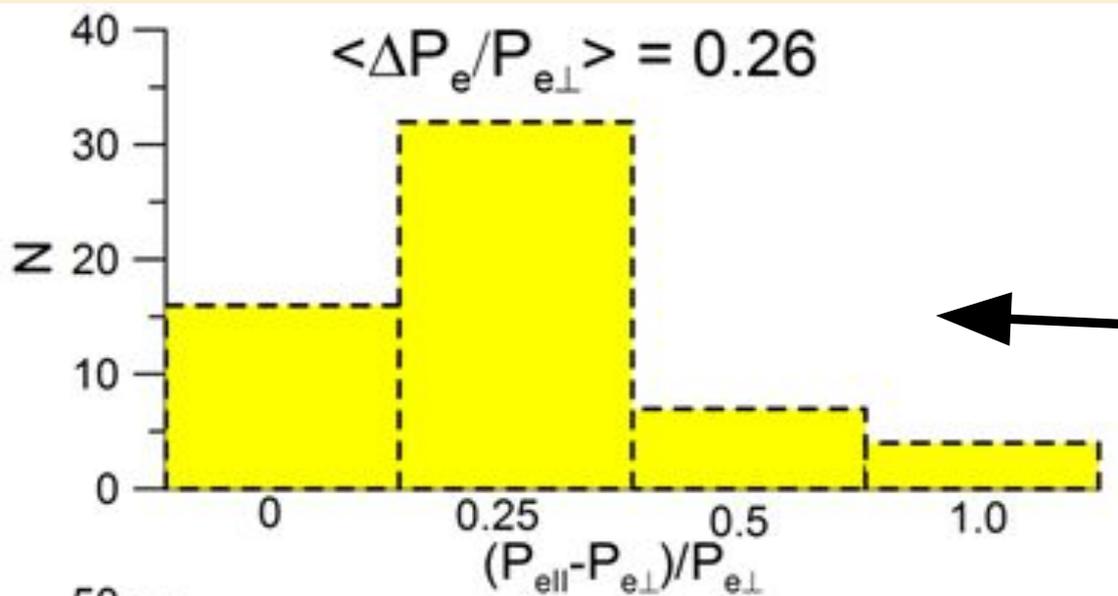
$\mathbf{E}\times\mathbf{B}$  дрейф:

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

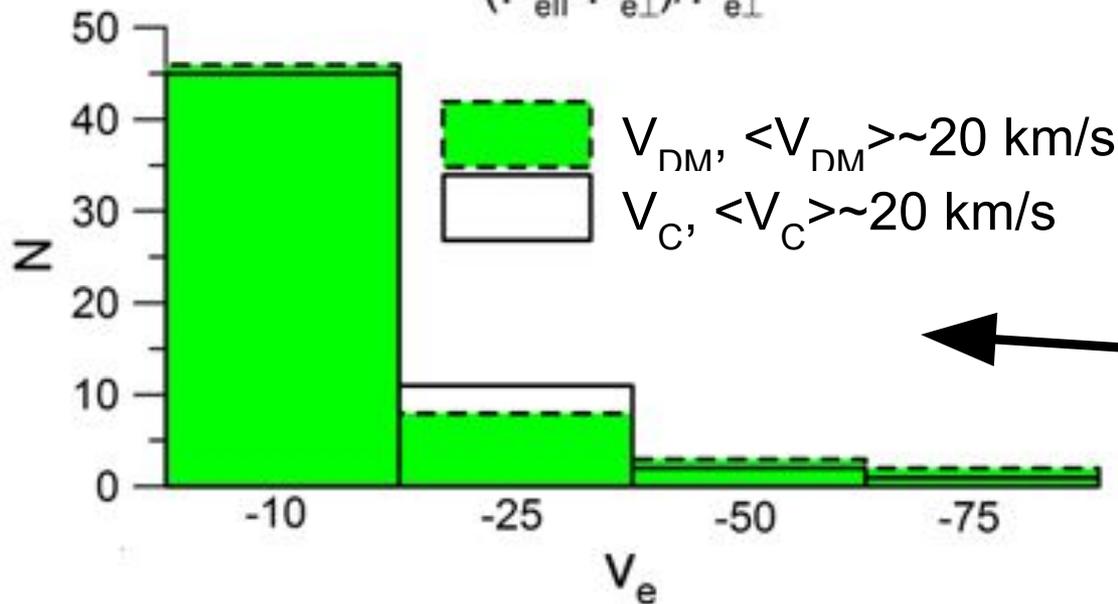


Средние значения потоковой скорости электронов

# Оценка роли диамагнитного дрейфа и дрейфа кривизны

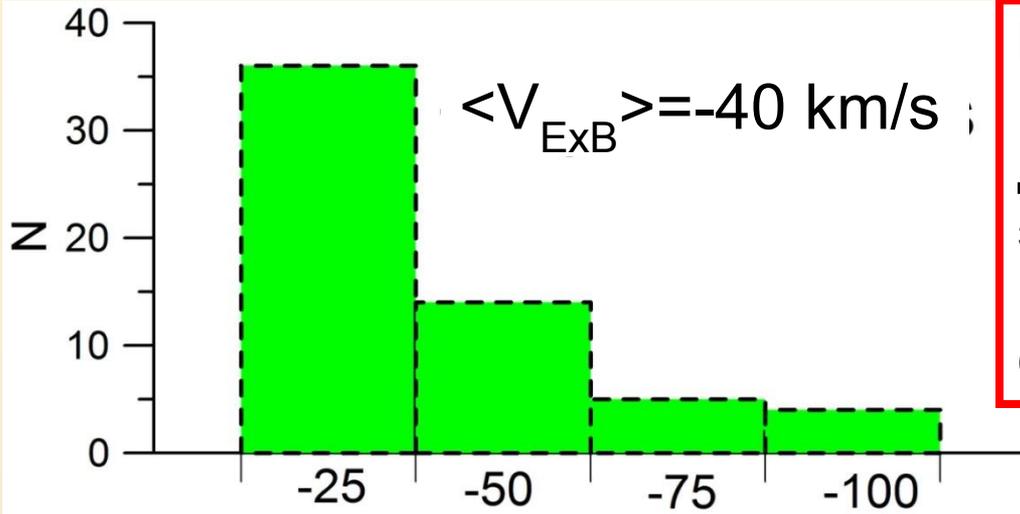


Более чем в 75% ТС анизотропия электронов порядка 25%!



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

# Дрейф $E \times B$ и геометрия токового слоя



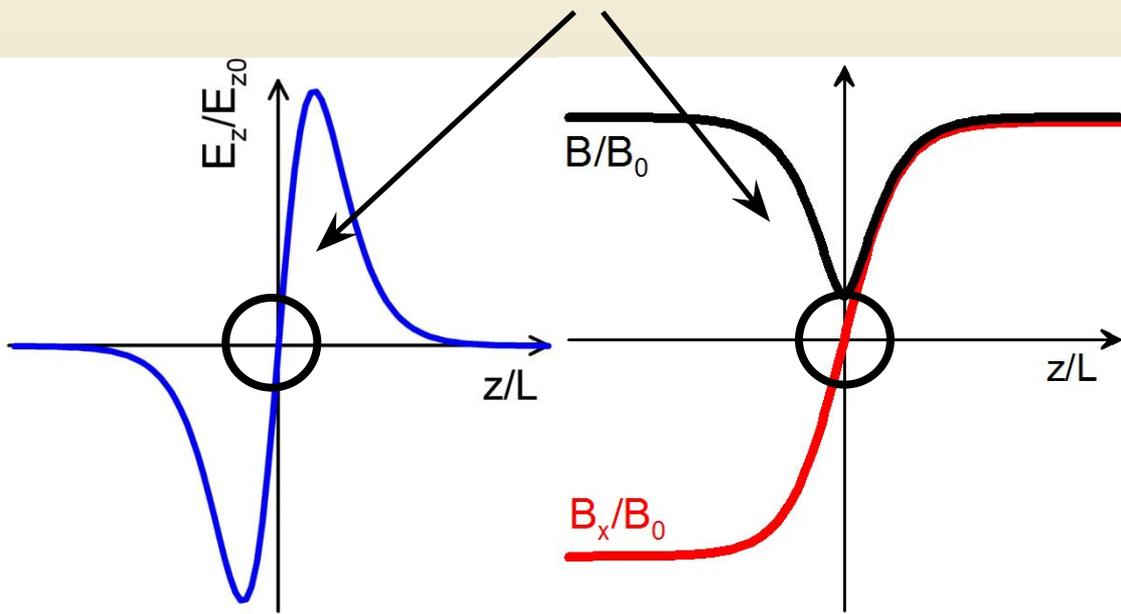
После вычитания дрейфа кривизны и диамагнитного дрейфа из потоковой скорости электронов остается величина порядка -40 км/с, которую можно объяснить только дрейфом  $E \times B$ !

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

$E_z$  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  $E_x > 0$

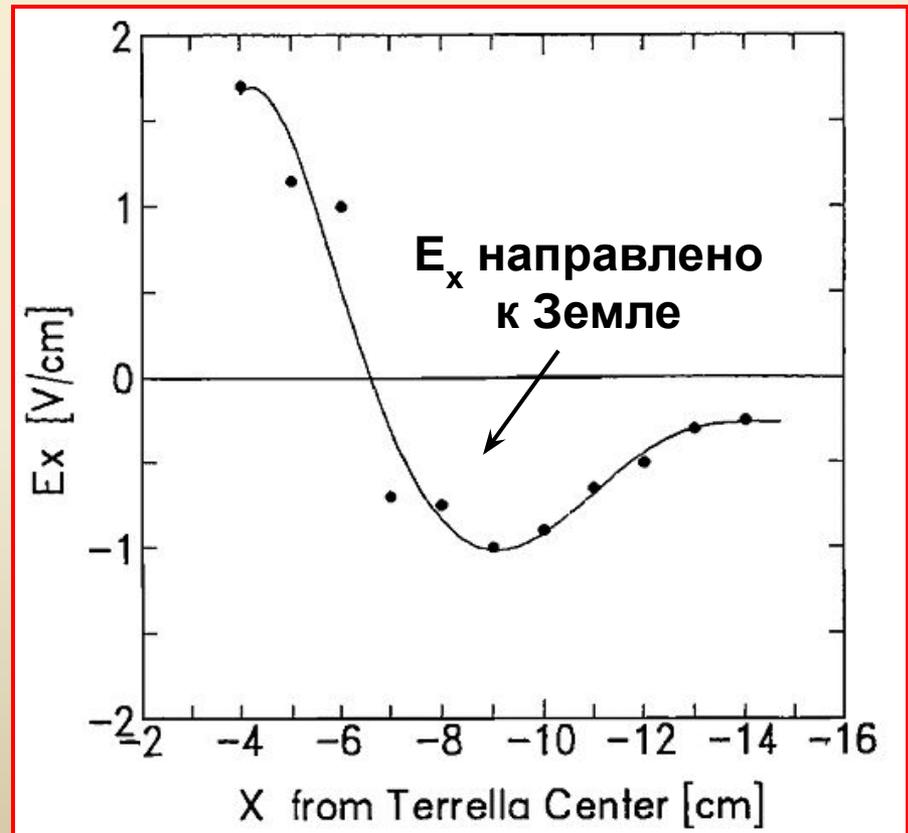
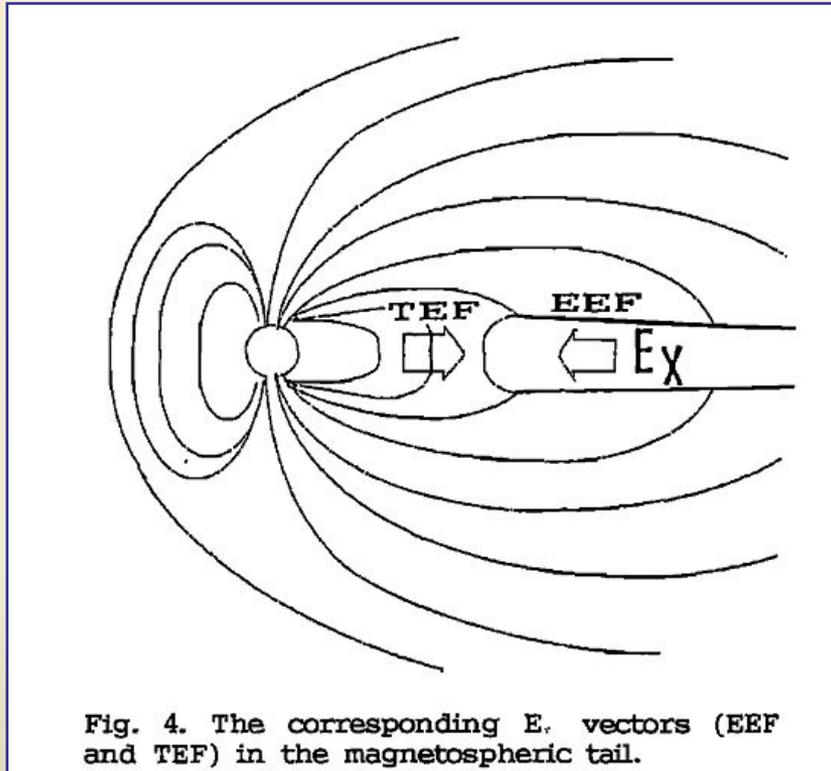


Величина  $E_x$  порядка **0.15 мВ/м**

# Лабораторный эксперимент

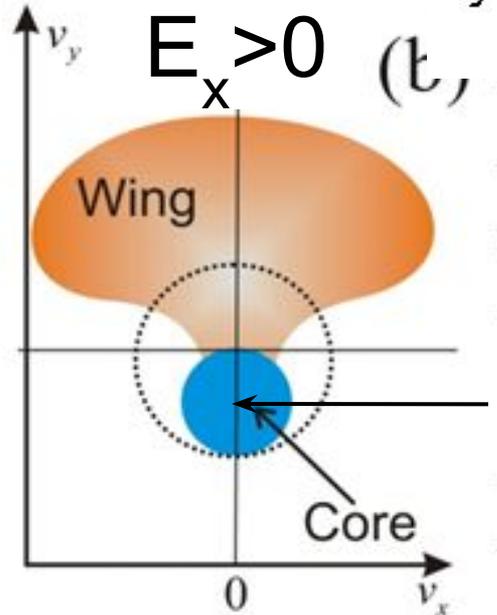
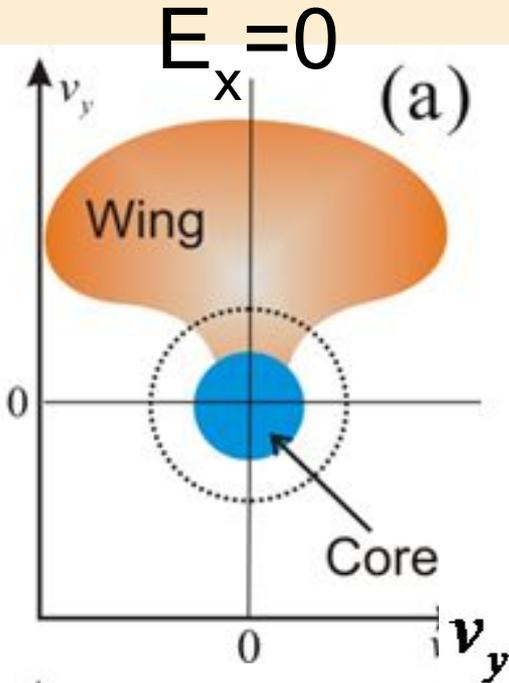
Laboratory evidence of Earthward electric field in the magnetotail current sheet.

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

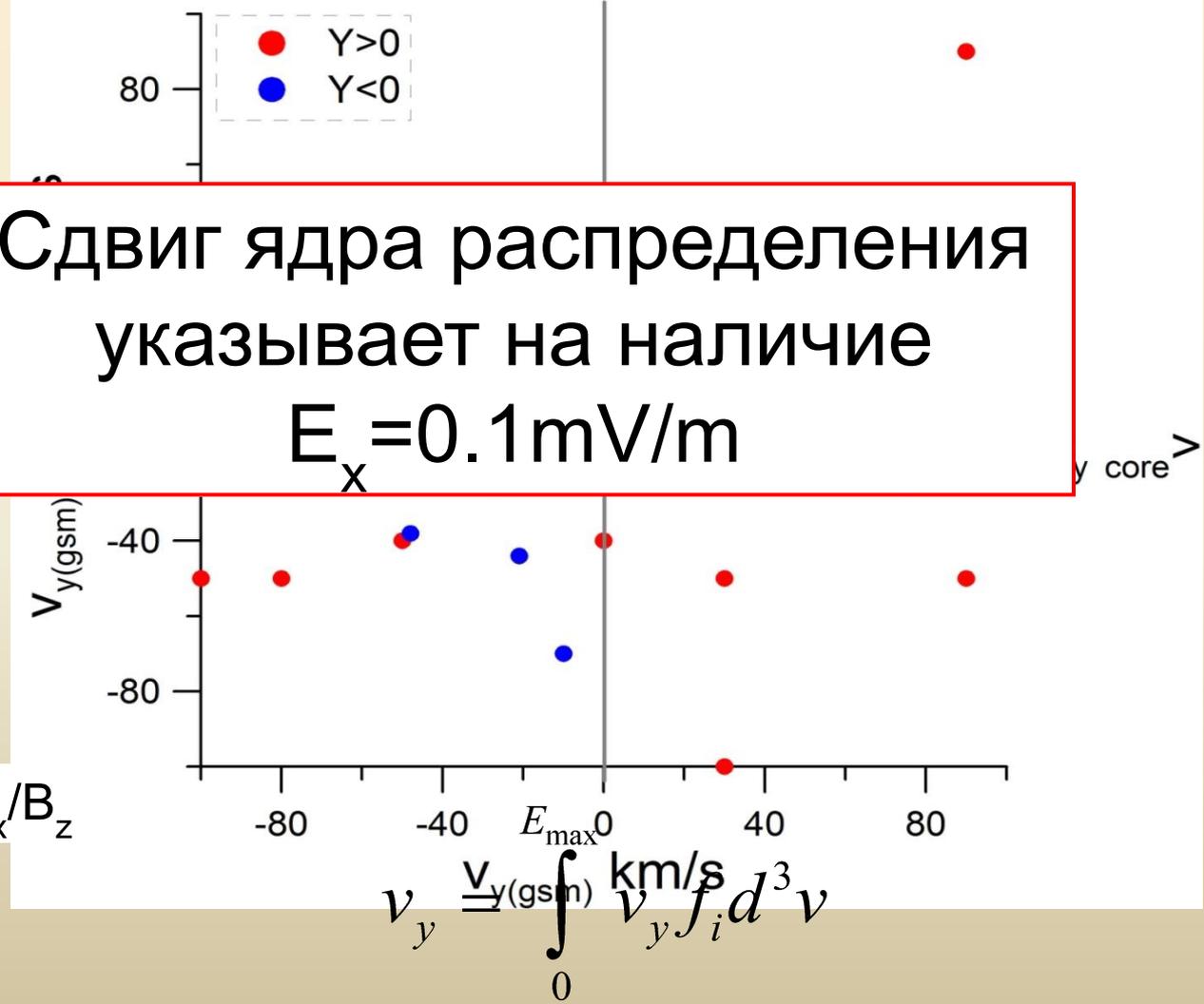


# Влияние $E_x$ на функцию распределения протонов

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  $A_y$

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

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

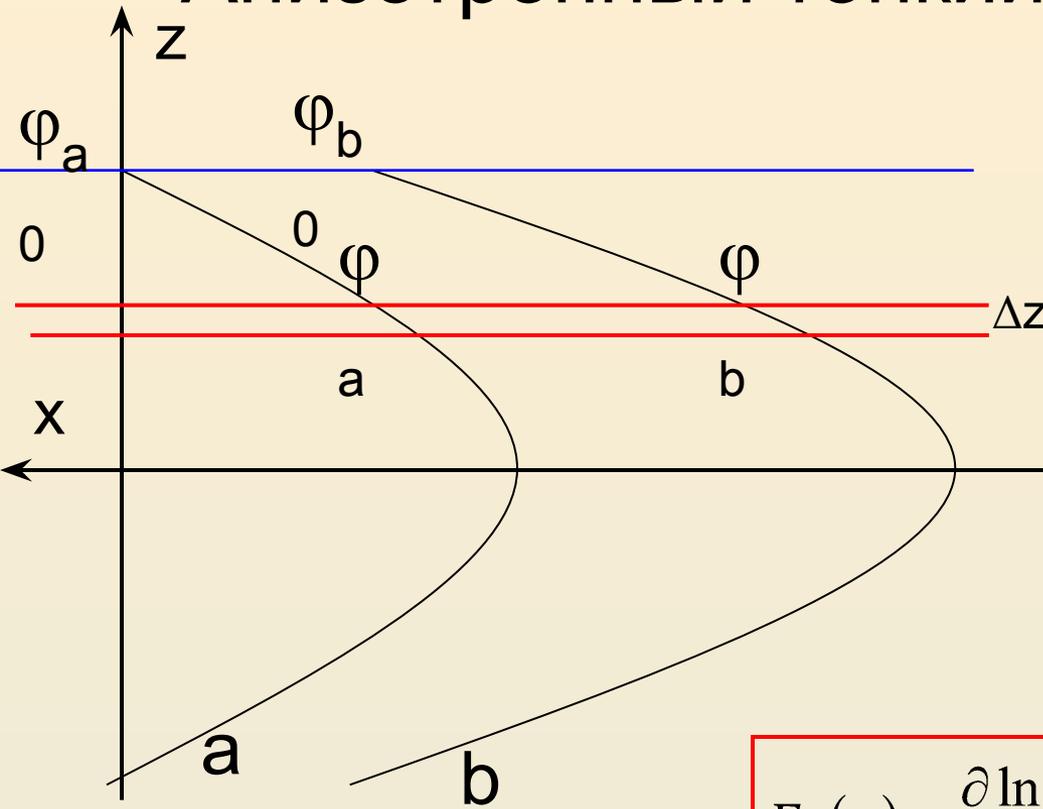
$$v_D = c \frac{E_z B_x - B_z E_x}{B^2} = -c \frac{E_x}{B_z} = -c \frac{\partial \varphi}{\partial A_y}$$

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: 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

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

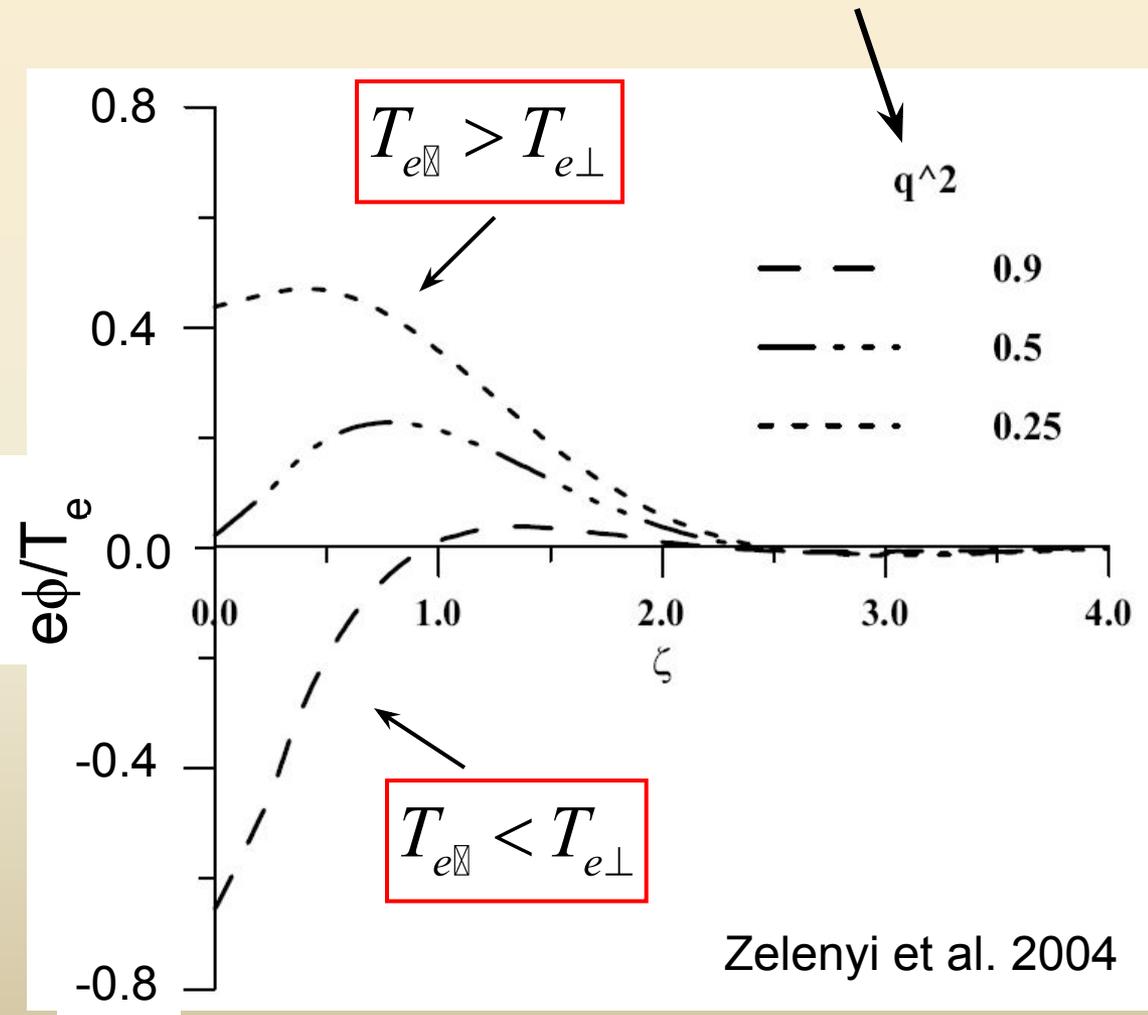
$$E_z \sim \frac{\Delta\phi}{L_z} = 0.5 \frac{T_e}{eL_z}$$

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

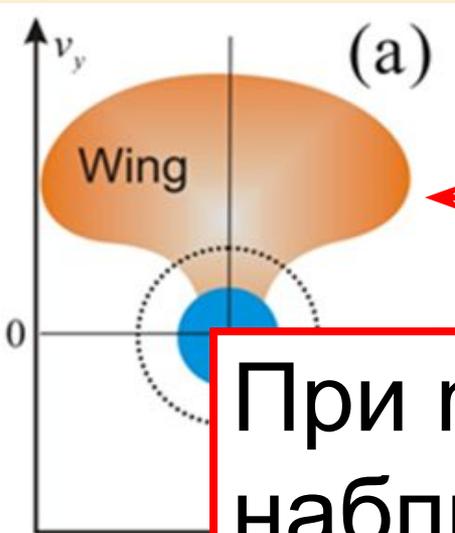
При  $T_e = 1 \text{ keV}$  и  $L_x = 10 R_E$

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

Степень анизотропии электронов



# Двойная структура распределения протонов и поле $E_x$



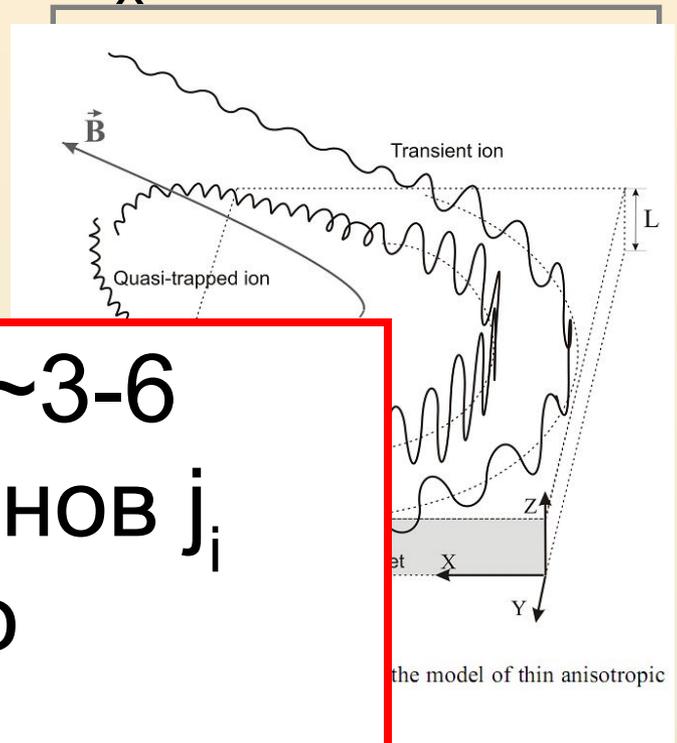
$$j_{0i} = n_{wing} v_{wing}$$

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

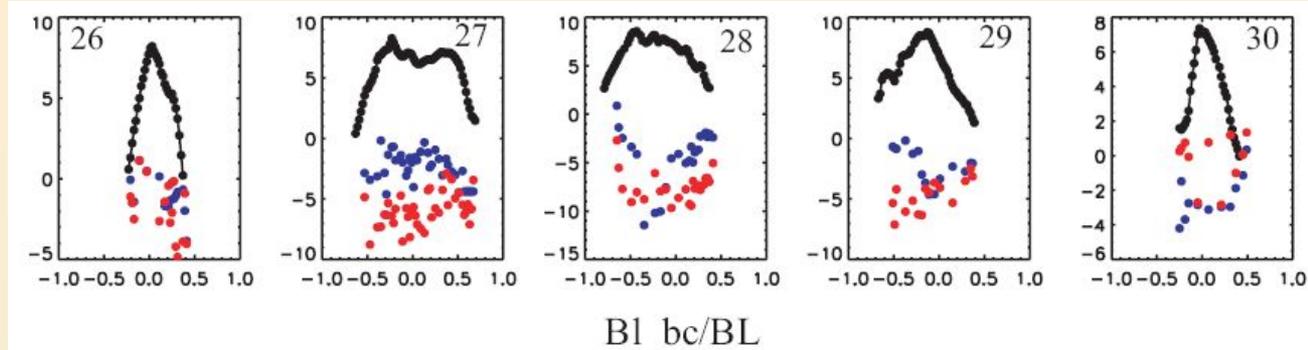


the model of thin anisotropic

ИОНОВ ПО

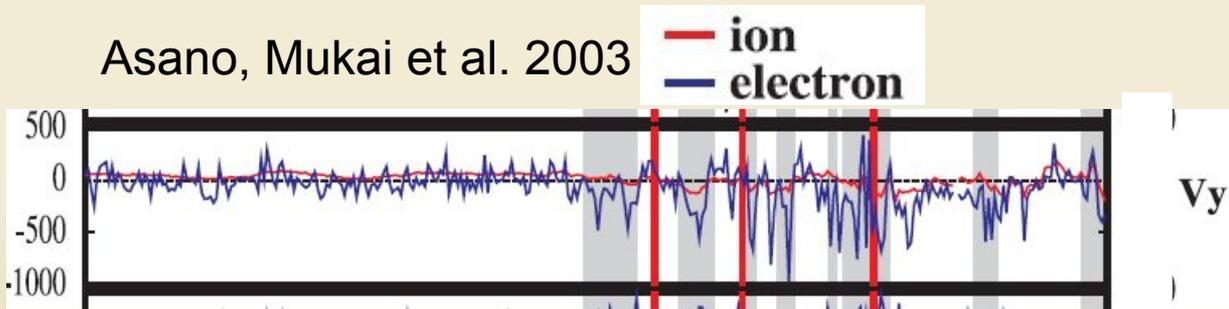
$$j_i = j_{0i} \left( 1 - \frac{n_p}{n_{wings}} \frac{v_D}{v_{wings}} \right) \approx j_{0i} \left( 1 - \frac{n_p}{n_{wings}} \frac{T_e}{T_i} \right)$$

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