

Зеркалом каких процессов оказались полярные сияния?

**А.П. Кропоткин
НИИЯФ МГУ**

Ускорение электронов на авроральных силовых линиях геомагнитного поля

- Различие в дрейфовом движении электронов и ионов, приходящих из плазменного слоя геомагнитного хвоста + поперечная неоднородность ионной концентрации

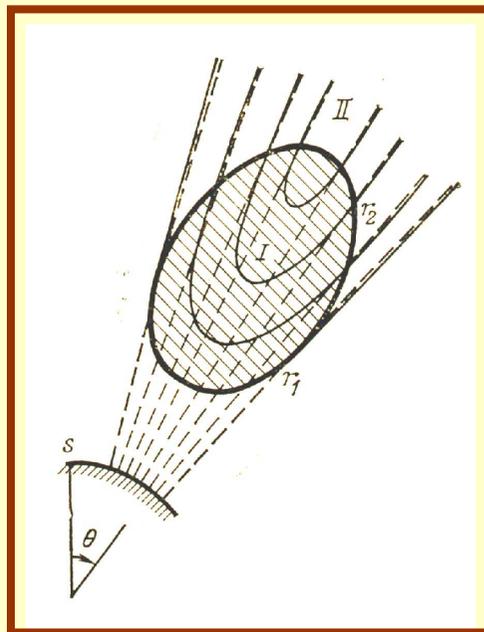


сброс электронов в атмосферу посредством продольного электрического поля

- Наблюдательные факты:
 - существование *продольных электрических полей* на высотах $\leq 1R_E$ над авроральной зоной
 - потоки *высыпающихся электронов*, вызывающих *активные формы полярных сияний* (для этих потоков типичен квазимоноэнергетический спектр с характерной энергией, зависящей от широты — *«перевернутые V»*, и часто — анизотропия с сильным преобладанием продольного потока),
 - *мощные продольные токи, направленные вверх* и локализованные в области сильных электронных высыпаний
 - сильно анизотропные потоки положительных ионов

Аномальное сопротивление. Убегающие электроны

- Область неустойчивости, ответственной за появление **аномального сопротивления**, должна охватывать отрезок силовой линии длиной в несколько R_E .
- Необходимая плотность тока на ионосферном уровне $\sim 10^{-5}$ А/м², в согласии с измерениями продольных токов над авроральными дугами.
- Плотность продольного тока и полный скачок потенциала $\Delta\varphi$ приблизительно пропорциональны



Пунктирные линии –
эквипотенциали

Наряду с данными лабораторных экспериментов, результаты экспериментального изучения ионно-циклотронной турбулентности над авроральной ионосферой указывают на существование аномального сопротивления и позволяют в значительной степени конкретизировать выводы теории.

Эвристическое применение представления об аномальном сопротивлении объясняет наблюдаемые авроральные эффекты:

- дискретная широтная структура авроральных высыпаний;
- квазимоноэнергетический спектр электронов, вызывающих дискретные формы сияний;
- значительные продольные электрические поля и очень сильные (~ 1 В/м) поперечные поля, не проникающие в ионосферу;
- спектрограммы электронных высыпаний в виде перевернутых V;
- плотность продольного тока приблизительно пропорциональна полной продольной разности потенциалов на силовой линии;
- поток энергии, переносимой авроральными электронами, часто пропорционален квадрату этой разности потенциалов.

**«Перевернутые V». Совместное действие
эффектов магнитного отражения и
электронной инерции**

Задача о структуре продольного электрического поля на авроральной силовой линии, обусловленного продольным потоком авроральных электронов, решена с учетом теплового движения частиц, в предположении адиабатического характера этого движения.

Возникновение поля определяется совместным действием двух эффектов: магнитного отражения и инерции электронов.

Пусть задана функция распределения частиц $f(\varepsilon, \mu)$, тогда концентрация их в данной точке, характеризуемой значением магнитного поля B , дается интегралом:

$$n(B) = \frac{\pi\sqrt{2}}{m^{1/2}} B \int \frac{f(\varepsilon, \mu) d\varepsilon d\mu}{[\varepsilon - \mu B - U(B)]^{1/2}}$$

где $U(B) = -e\varphi(B)$, φ — электростатический потенциал. Область интегрирования здесь определяется положением точек отражения частиц с разными ε, μ .

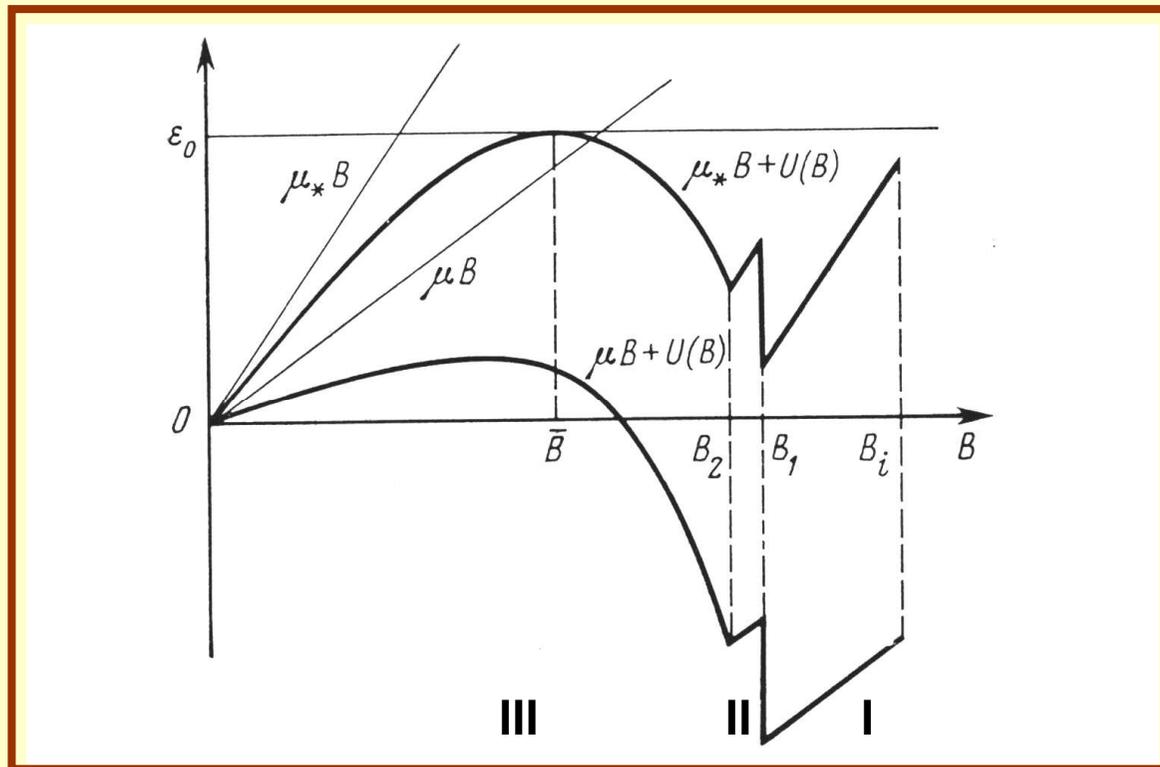
Решается уравнение квазинейтральности, $n_e(B) = n_i(B)$.

**Роль ионосферы.
Нелинейная структура продольного двойного слоя.
Авроральная «полость»**

Электрическое поле, рассчитанное как решение уравнения квазинейтральности, построенного с учетом только двух компонент плазмы: разреженных горячих магнитосферных ионов и электронов, становится непригодным на малых высотах, где имеется *холодная плотная ионосферная плазма, экранирующая внешнее электрическое поле* магнитосферного происхождения.

- Магнитосферное продольное электрическое поле, обусловленное совместным действием магнитного отражения горячих магнитосферных частиц и инерции электронов - составная часть общей электростатической структуры, образующейся на авроральной силовой линии.
- Построена модель, дающая последовательное кинетическое решение задачи о продольном поле *для всей силовой трубки, с учетом как разреженной горячей компоненты плазмы, так и относительно плотной и холодной компоненты, имеющей ионосферное происхождение.*

Там, где происходит экранировка, должен возникать **двойной электростатический слой** (область II), разделяющий ионосферную и магнитосферную «квазинейтральные» области I и III соответственно. Этим определяется вид граничных условий, задаваемый на нижней границе магнитосферной «квазинейтральной» области.



Ход эффективного потенциала $\mu B + U(B)$ при разных значениях μ . Значение μ_* определяется величиной высыпающего потока электронов

- Показана невозможность существования непрерывного квазинейтрального решения, соответствующего продольному ускорению авроральных электронов (вниз) и ионосферных ионов (вверх).
- *Выяснена необходимость скачков — двойных электростатических слоев.*
- *Найдена структура одиночного двойного слоя.*
- Показана необходимость группы холодных ионов, запертых продольным электростатическим полем, для существования двойного слоя.
- Существует целое семейство решений с продольным полем и двойными слоями, отвечающее данной величине высыпающегося потока электронов. Эти решения различаются по положению двойного слоя и падению потенциала в нем.

**Нестационарная динамика.
Квазиударная волна –
движущаяся граница авроральной «полости»**

Нестационарная задача: при **возникновении** источника сильного, вытекающего из ионосферы, продольного тока:

бесстолкновительные эффекты формирования электростатических скачков потенциала



образуется резко неоднородная структура: **авроральная полость** с резкой нижней границей, разделяющей области холодной ионосферной и горячей разреженной магнитосферной плазмы.

- **Квазиударная волна разрежения** ограничивает полость снизу при ее расширении. Выяснена ее зависимость от числа захваченных электронов и ионов в потенциальных ямах осцилляторной структуры волны.
- Если плотность продольного тока велика, с необходимостью возникает **распределенный продольный ускоряющий потенциал**, обеспечивающий продольный ток за счет сброса горячих авроральных электронов.

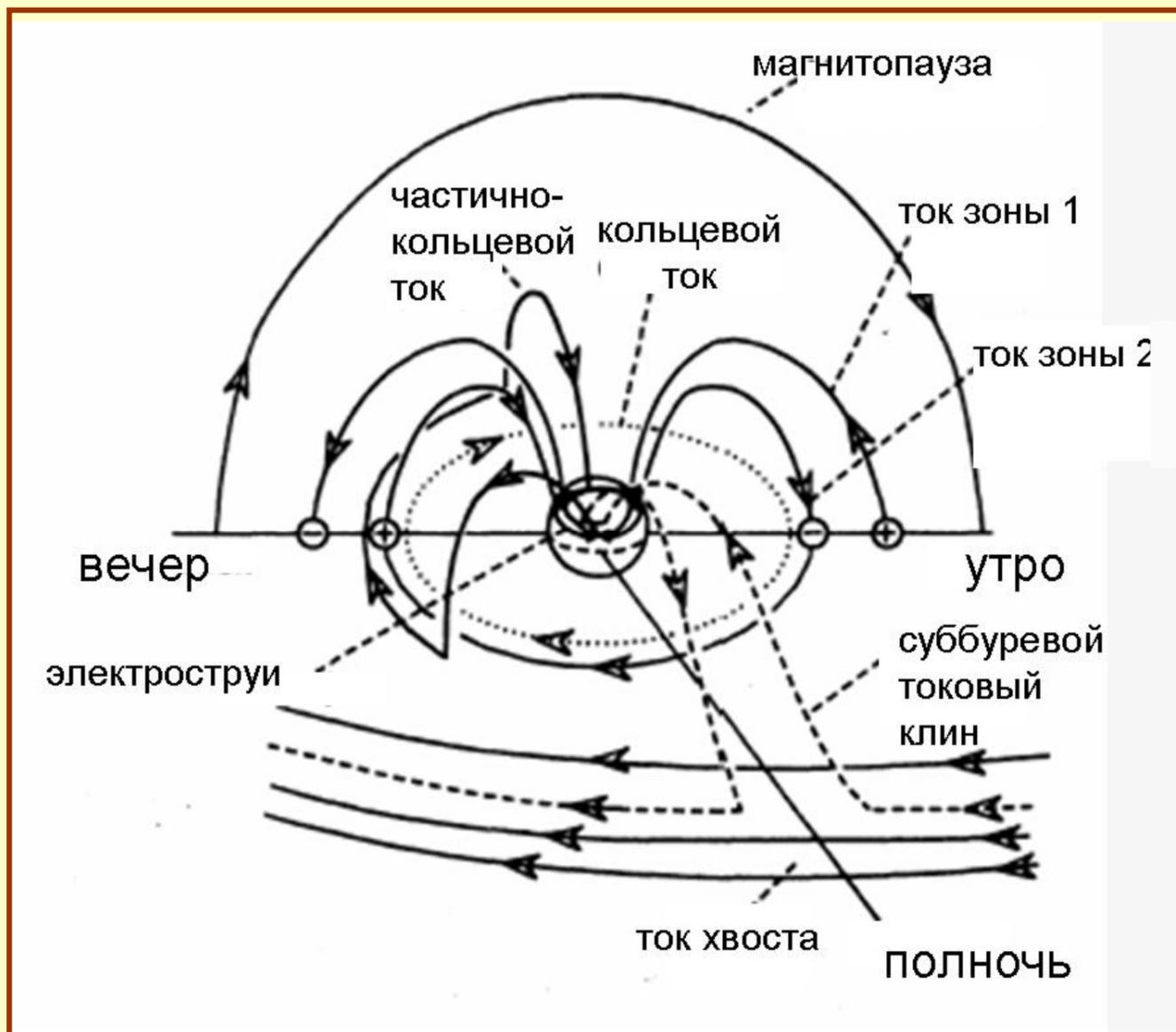
Мелкомасштабная поперечная структура Турбулентный альвеновский погранслои

- Магнитосферная конвекция
- Динамо-область ионосферы (100–150 км): $v_i > \Omega_i; v_e \ll \Omega_e$
- Неоднородный по высоте профиль скорости - турбулентный погранслои с повышенной диссипацией энергии сдвигового потока
- Ионосферный альвеновский резонатор (ИАР) обеспечивает положительную обратную связь в системе косых альвеновских волн, возбуждаемых сдвиговым потоком
- Косые альвеновские волны образуют замкнутые сильно анизотропные токовые вихри, а соответствующее турбулентное течение - турбулентный альвеновский погранслои (ТАПС)

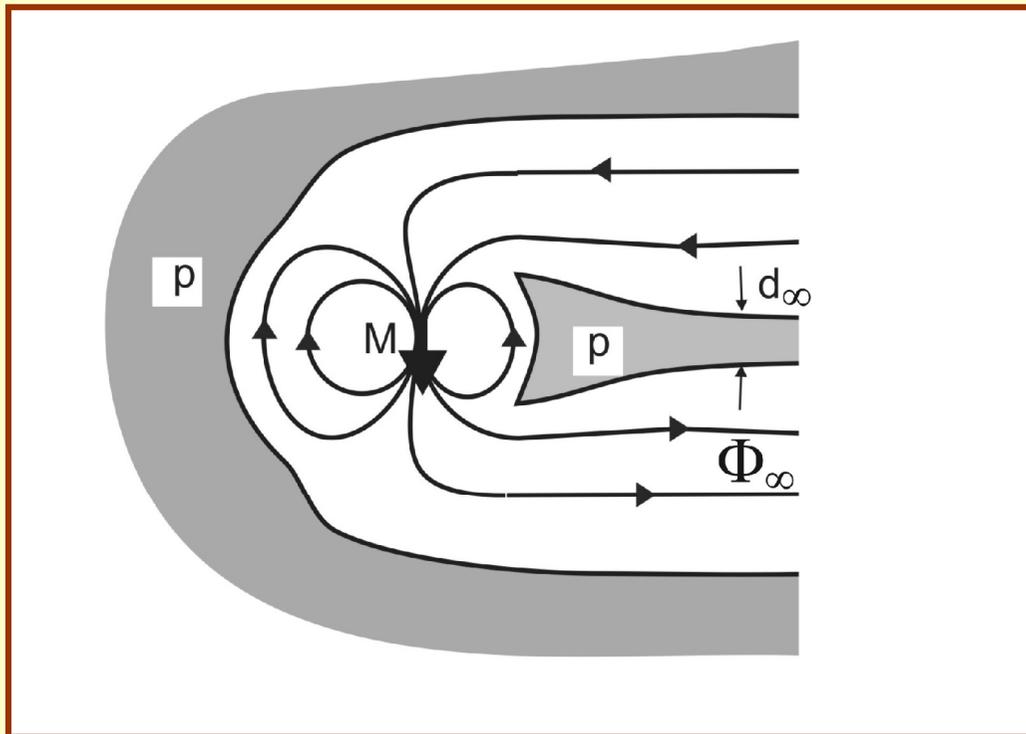
- Частота дрейфовой моды $\omega = k_{\perp} v_0$
- Частота альвеновской волны $\omega = k_{\parallel} V_A$
- Условие двойного резонанса:
$$k_{\parallel} V_A = k_{\perp} v_0$$
- Альвеновская скорость велика: $V_A \gg v_0$
- Резкая анизотропия альвеновских вихрей с поперечным масштабом, много меньшим масштаба вдоль магнитного поля
- Задача о неустойчивости сдвигового потока сводится к нахождению эффективного граничного условия на нижней границе ИАР и решению волнового уравнения внутри ИАР

- В периоды магнитных возмущений резко возрастает ионизация в динамо-области. Инкремент неустойчивости сильно увеличивается
- Появление *аномального сопротивления* приводит к генерации продольного электрического поля в альвеновских вихрях вблизи верхней стенки ТАПС, амплитуда которого достаточна, чтобы ускорить ионосферные электроны до энергий 1–10 кэВ
- Другой механизм ускорения электронов: продольное электрическое поле в альвеновской волне обусловлено *кинетическими эффектами*

**Магнитосферно-ионосферное взаимодействие.
Аксиально несимметричные (и нестационарные)
потоки в экваториальной области. Продольные токи**



- Обтекание магнитосферы – почти идеальное
- Равновесная магнитоплазменная *конфигурация содержит «хвост» с токовым слоем* (Ness 1965)

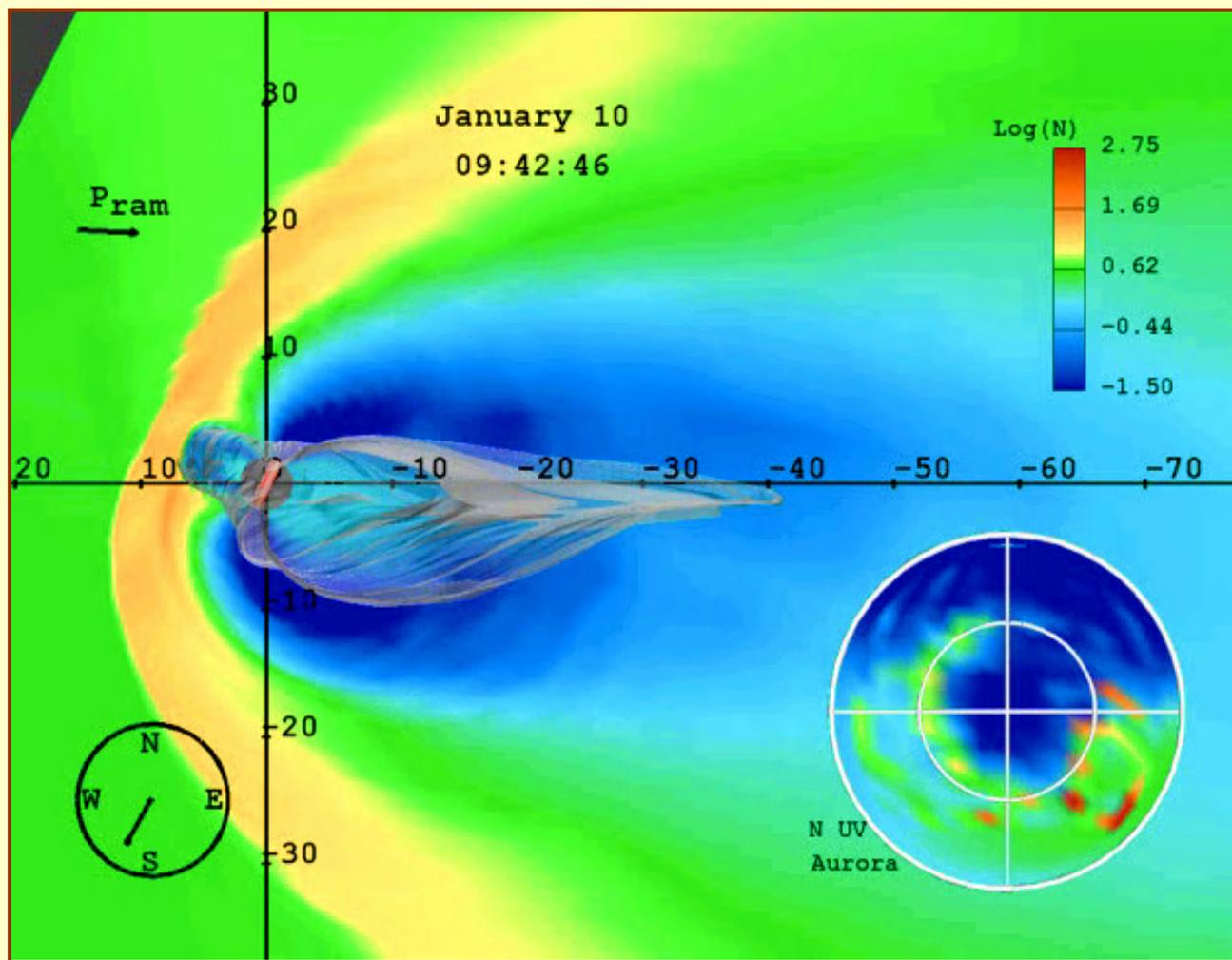


Hewson-Browne and Kendall 1971

Простейшая двумерная модель.

При увеличении потока Φ_∞ уменьшается толщина плазменного слоя d_∞ и он приближается к диполю

- Геомагнитный хвост. Присутствие в МГД моделях



*Goodrich et al.
1998*

- Слабая **неидеальность обтекания** - медленная эволюция конфигурации
- Малое отличие от равновесной конфигурации
- Ненулевые продольные токи (и электрические поля)
- Формула Василюнаса – Тверского

$$j_{\parallel} = \frac{1}{2} c (\mathbf{n} [\nabla W \nabla p])$$

$$W = \int \frac{ds}{B} \quad \text{- объем силовой трубки с единичным магнитным потоком}$$

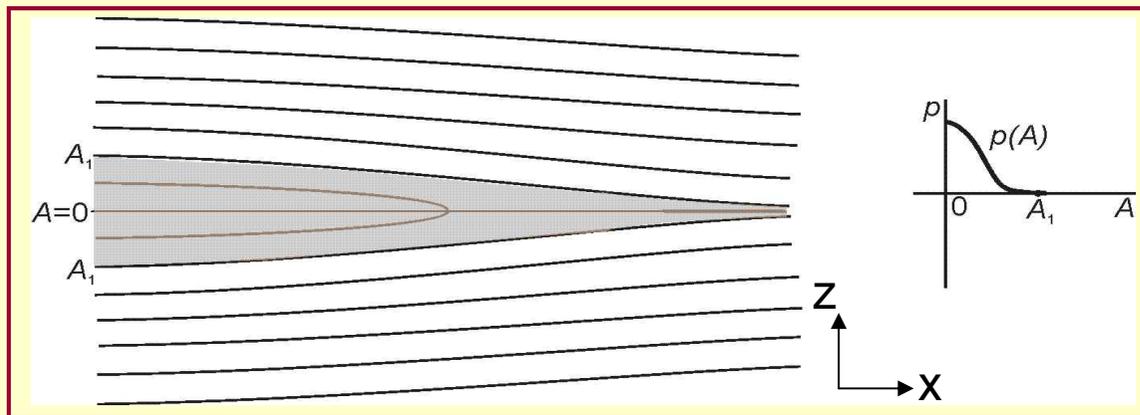
- Медленная **релаксация** магнитосферно-ионосферной системы (внутренняя область): квазистатическая эволюция плазменного кольца
- «Внешнее» воздействие:
 - (а) из солнечного ветра: ρv^2 ; vB_z
 - (б) из геомагнитного хвоста:
 - **при медленной эволюции** – самосогласованные изменения в хвосте и во внутренней области;
 - **при срыве равновесия в хвосте** – быстрая инжекция плазмы во внутреннюю область, сопровождаемая **большими нелинейными возмущениями** в полях, токах и высыпаниях частиц в этой области

Нелинейная суббуревая динамика

- Режим перемежающихся фаз *loading – unloading* отсутствует в МГД моделях
- МГД модели принципиально неадекватны из-за неопределенной относительной величины диссипации: возможны *кардинально разные динамические режимы* в зависимости от роли диссипации – от величины магнитного числа Рейнольдса

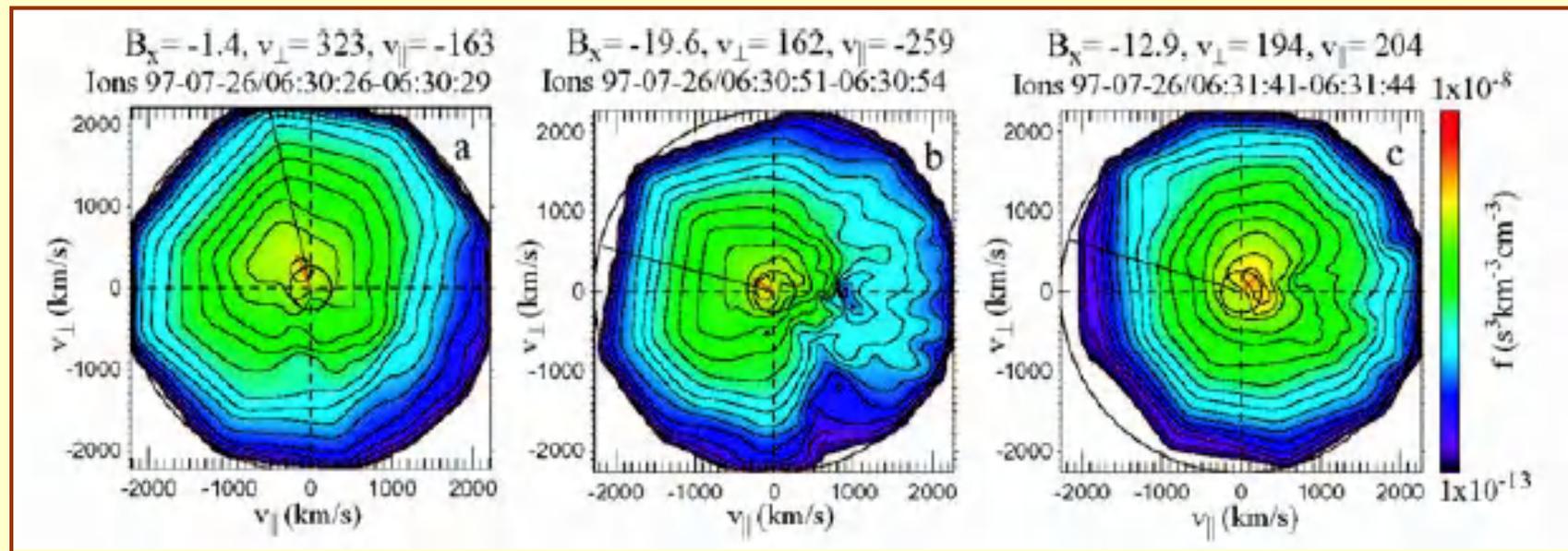
Роль токовых слоев в динамике. Утоньшение ТС на медленной фазе (**loading**)

- Теория и численное моделирование: **тонкие ТС неизбежно формируются** при перестройках, происходящих в МГД системах.
- К этому моменту **МГД становится уже неприменимой**: в профиле плотности тока появляется сингулярность.
- Такие сингулярности **ОДНОМЕРНЫ: ТОКОВЫЕ СЛОИ**.
- Это сильно упрощает проблему **КИНЕТИЧЕСКОГО** описания, которое становится необходимым на этой стадии.
- Роль ТС: трансформация энергии, $jE > 0$, на большом протяжении ТС.



2D структура с токовым слоем. При данном $p = p(A)$ такая структура - асимптотическое решение уравнения Грэда – Шафранова ($L_x \gg L_z$).

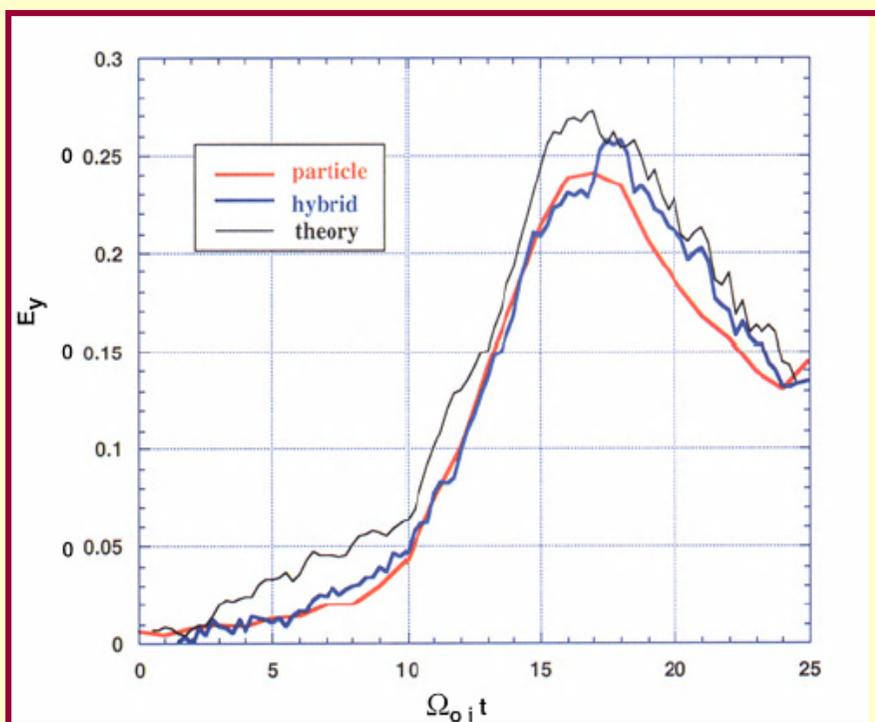
Среднемасштабная динамика на фазе **unloading**.
Морфология: суббуревые активизации,
быстрые плазменные потоки (bursty bulk flows)



Raj et al 2002 Wind data: BULK FLOW

Кинетическая плазменная структура вблизи нейтральной линии магнитного поля.

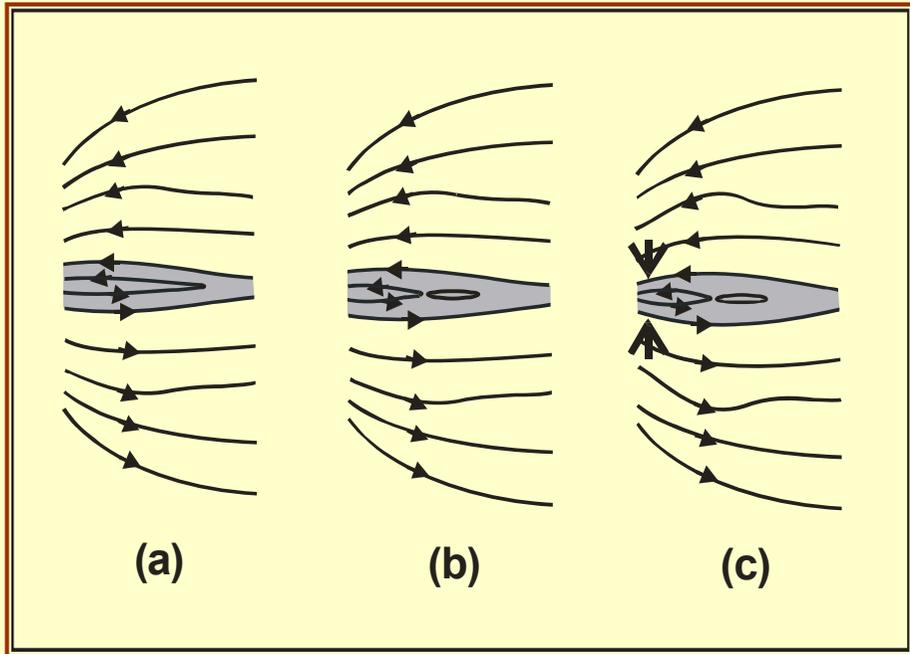
Доминирующая роль среднемасштабных движений в определении темпа пересоединения на нейтральной линии



(M.Kuznetsova, M.Hesse, D.Winske, 2001)

$$E \approx \frac{1}{e} \sqrt{m_i T_i} \frac{\partial v_x}{\partial x}$$

Электрическое поле в **диффузионной области** и скорость пересоединения - связь с электрическим **полем конвекции** $E \sim v_x B_n$ на краю диффузионной области. Независимость от конкретного вида электронной динамики.



Последовательные фазы срыва равновесия.

(a) Равновесный тонкий ПС с плотной горячей плазмой, несущей ток, помещенный в однородный разреженный холодный фон.

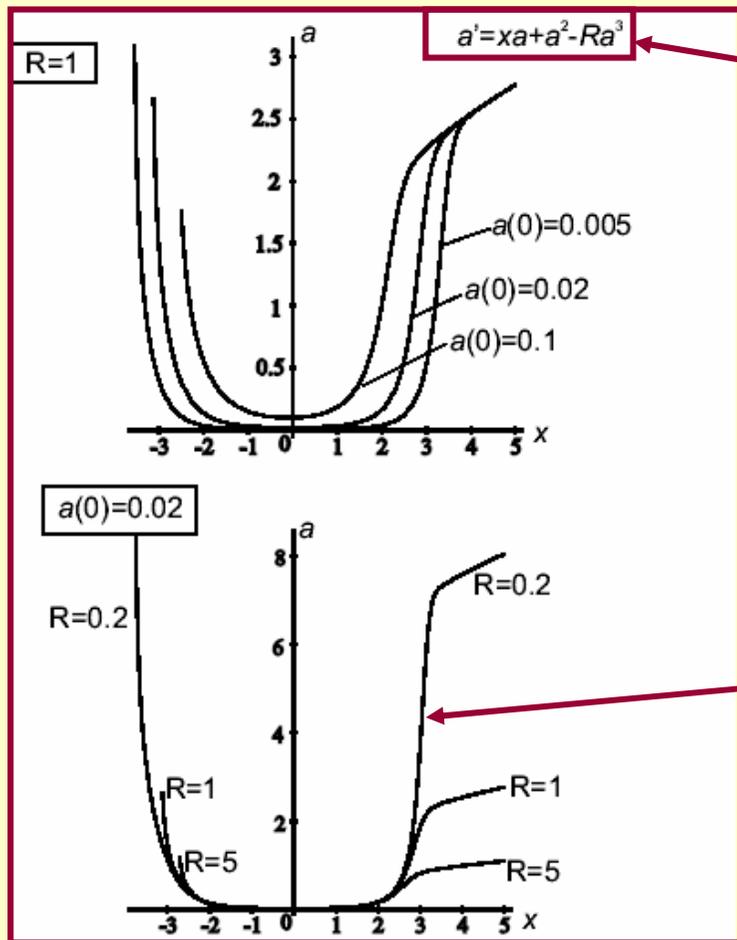
(b) Слой после локального всплеска нелинейной тиринг-неустойчивости – *импульсного пересоединения*.

Топология изменилась: появился магнитный остров.

(c) Утоньшение слоя МГД импульсом, убегающим из зоны пересоединения по плазме долей хвоста. (Чтобы возник МГД импульс, нужна уже 3D конфигурация!) Продольное равновесие в зоне утоньшения нарушается.

(d) В зоне нарушенного продольного равновесия происходит продольный разгон плазмы внутри ТС до альвеновской скорости. Это продольное движение инициирует вынужденное *квазистационарное пересоединение* в малой диффузионной области, в окрестности нулевой линии.

(e) Нормальная компонента магнитного поля сильно возрастает («диполизация»); ТС перестает быть тонким, быстрые потоки замедляются, и пересоединение прекращается.



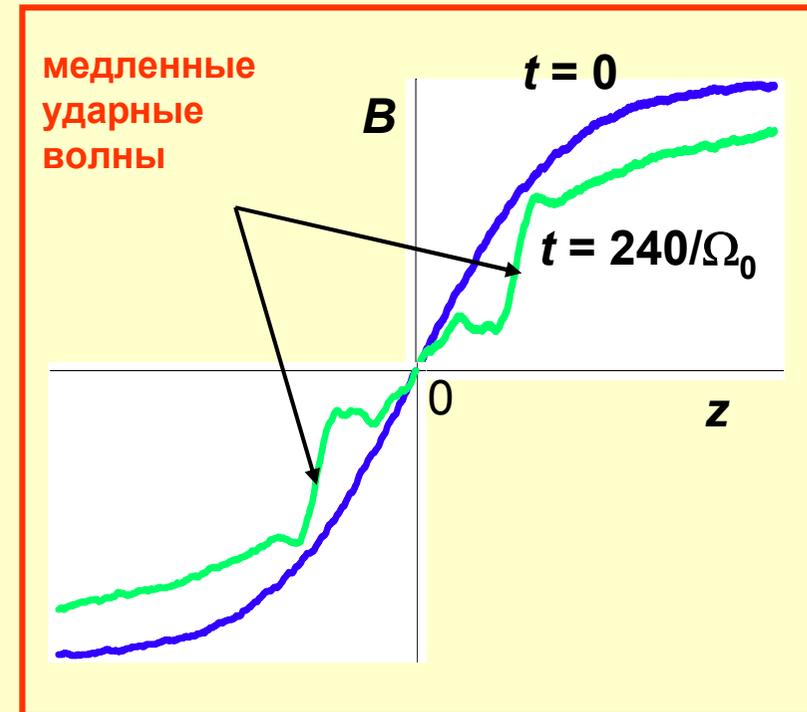
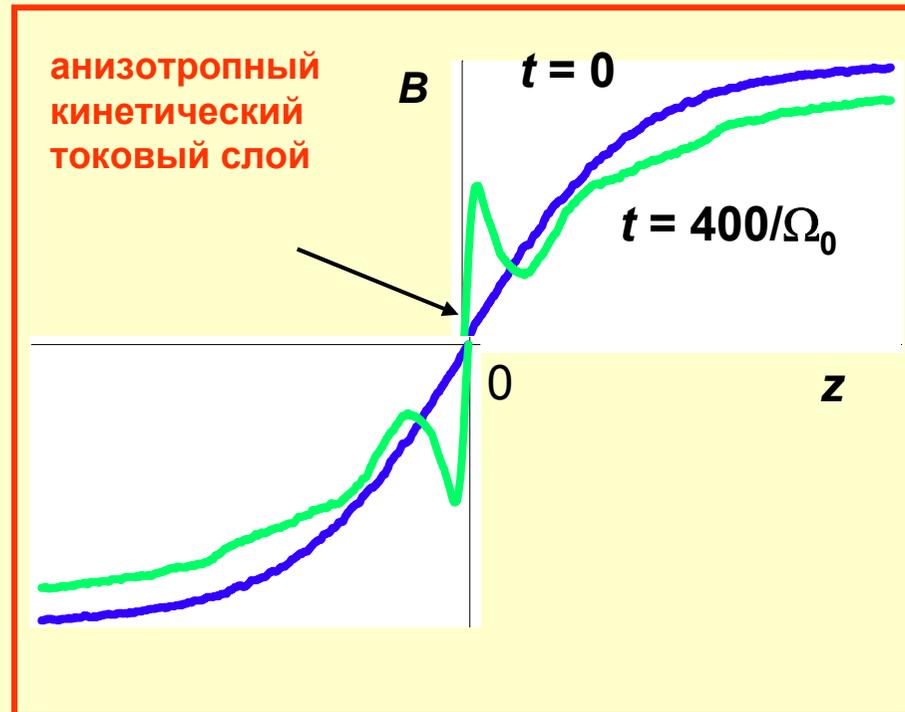
Универсальное нелинейное уравнение в безразмерных переменных

Нелинейная тиринг-неустойчивость – динамическая бифуркация (А.П.Кропоткин, О.О.Трубачев, К.Шиндлер, 2002)

Взрывообразная потеря равновесия

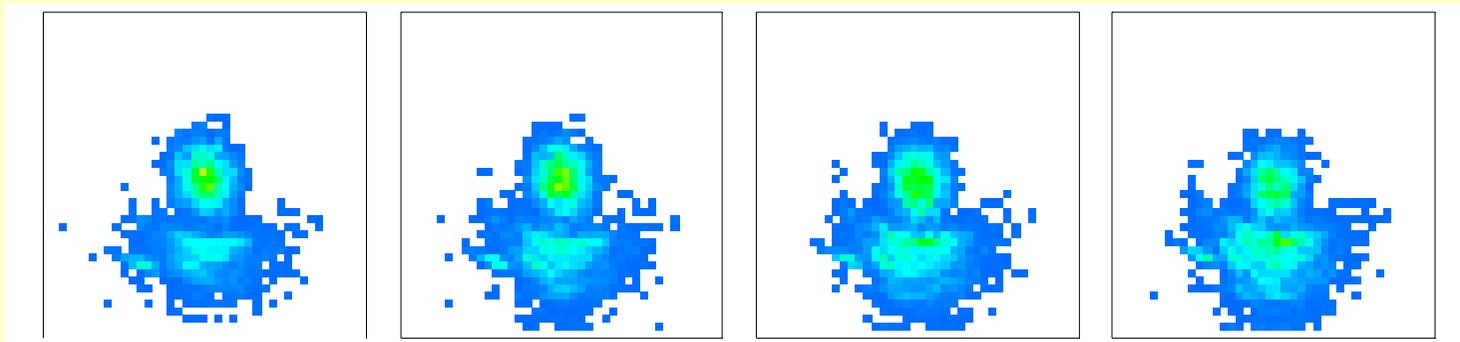
Когда система оказывается в окрестности точки маргинальной устойчивости относительно тиринг-возмущения, происходит «взрывная» потеря равновесия, описываемая простым универсальным нелинейным уравнением. За конечное время возникает тиринг-возмущение конечной амплитуды.

СЛОИ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ (RECONNECTION LAYERS)



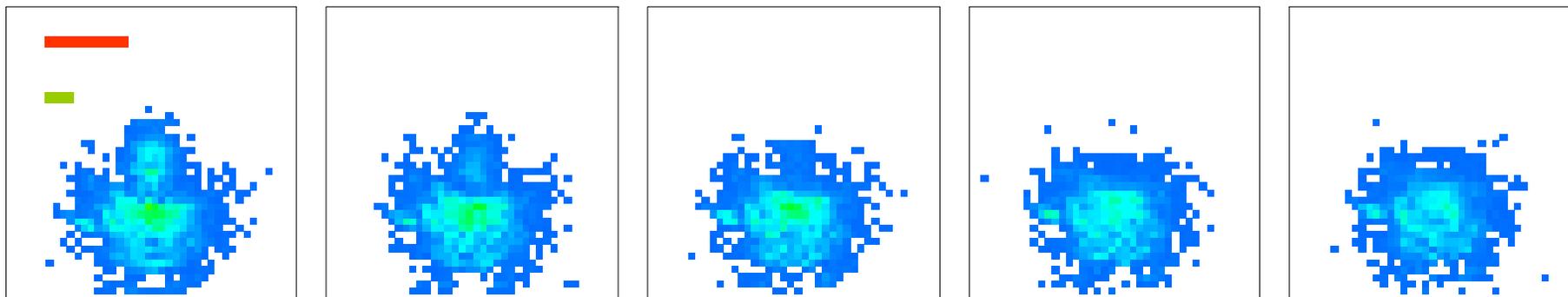
Формирование тонких вложенных токовых слоев в кинетическом численном моделировании

Результаты численного моделирования: встречные ионные пучки



$V_z = -2.45v_T^{(c)}$

V_z increase

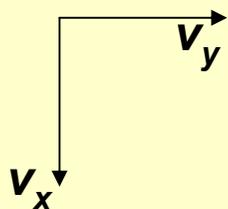


$V_z = 0$

V_z increase



$V_z = 2.45v_T^{(c)}$



Successive cross-sections of the velocity distribution

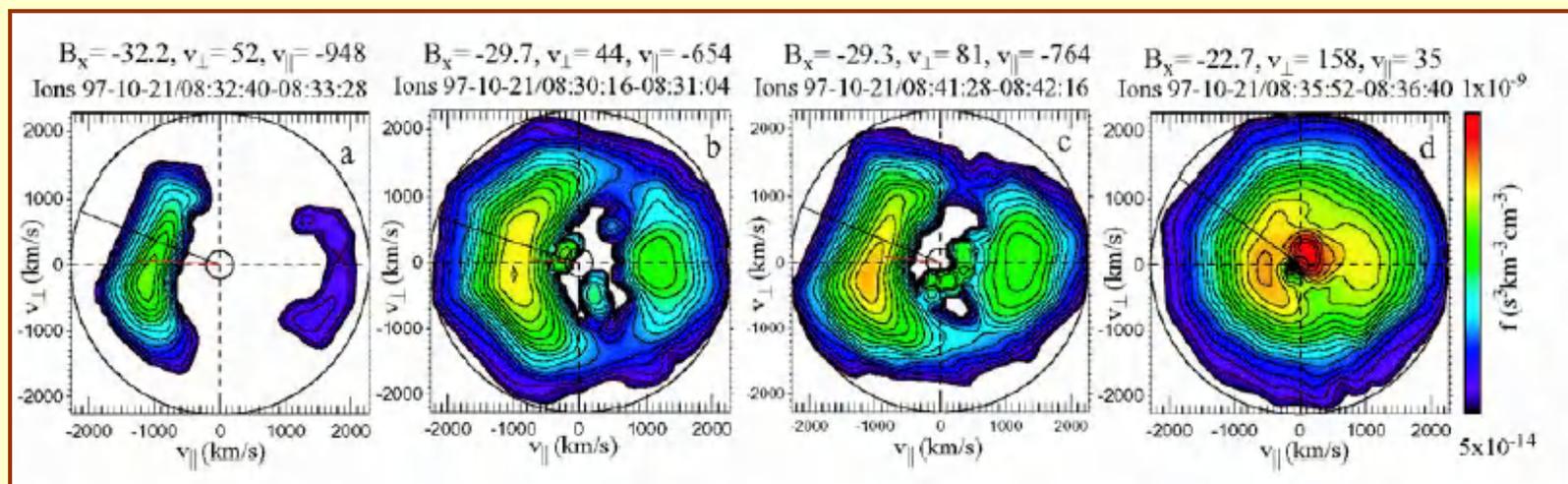
No trigger; $B_{\parallel}/B_0 = 0.2$;

$t = 4/\Omega_0$, $Z = 12.2\rho_0$

— $v_T^{(h)}$

— $v_T^{(c)}$

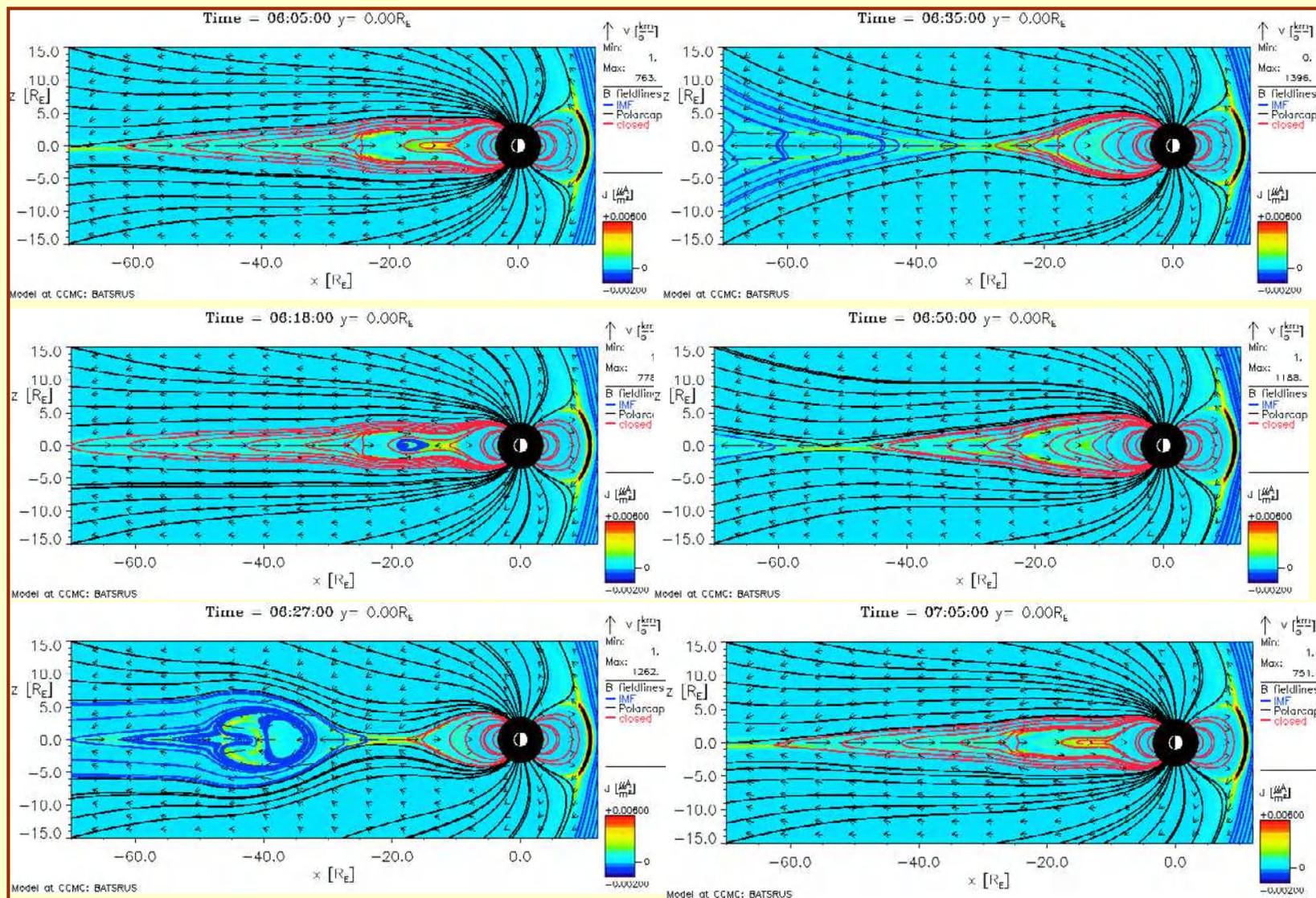
Экспериментальные результаты: встречные ионные пучки



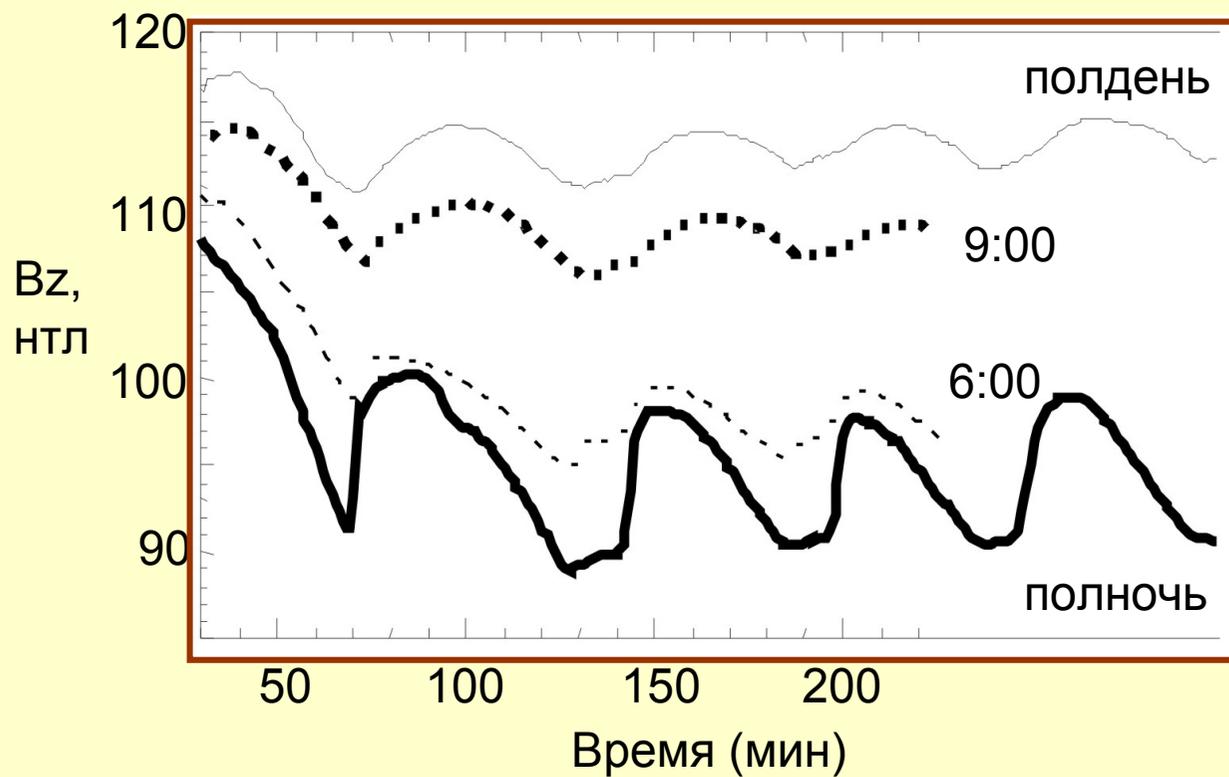
Raj et al 2002

Wind data: FIELD-ALIGNED BEAMS

МГД моделирование с учетом кинетических эффектов в тонких ТС (Kuznetsova et al., 2007)



**МГД моделирование с учетом кинетических эффектов
в тонких ТС (Kuznetsova et al., 2007)**



- **Магнитосфера – нелинейная открытая диссипативная система**
- **Возможны принципиально различные динамические режимы при различных внешних воздействиях**
- **Суббури, пилообразные возмущения, планетарные бури, ???...**