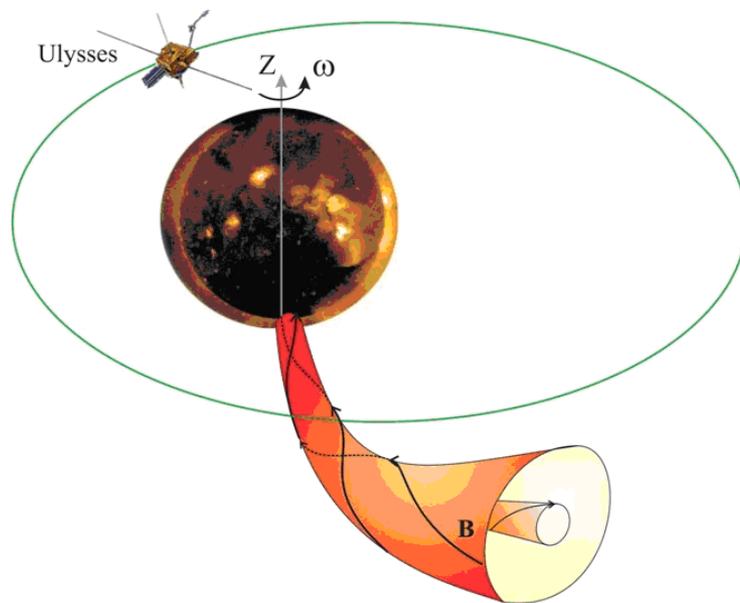


Новая МГД – модель высокоширотного токового слоя в солнечном ветре на больших гелиоцентрических расстояниях



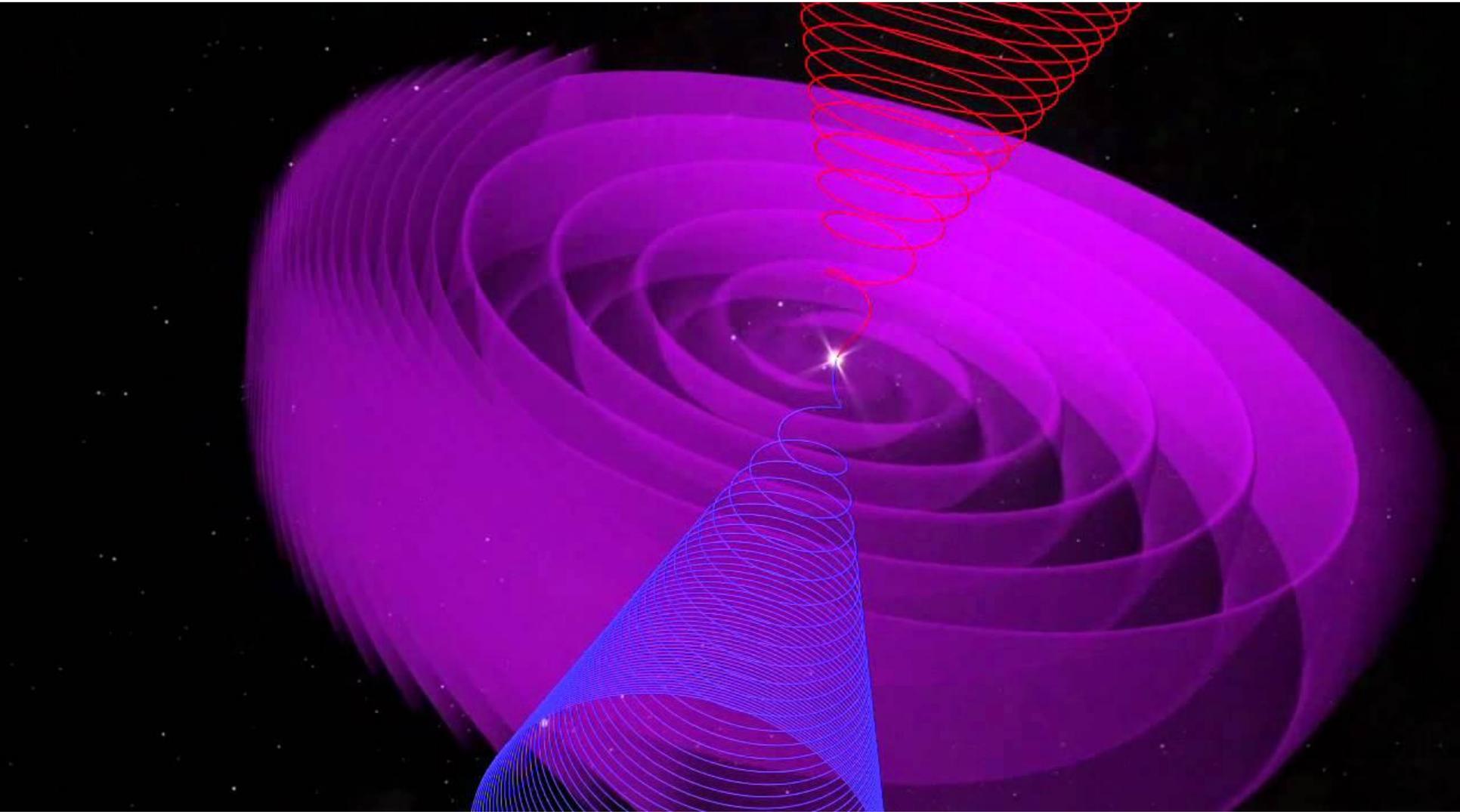
Кислов¹ Р.А., Хабарова² О.В., Малова^{1,3} Х.В.,
Обридко² В.Н., Харшиладзе² А.Ф., Зелёный¹ Л.М.

1) Институт космических исследований (ИКИ РАН)

2) Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.
Н.В.Пушкова (ИЗМИРАН)

3) Институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ)

Гелиосфера



NASA/Goddard Space Flight Center/Conceptual Image Lab

Токовый слой

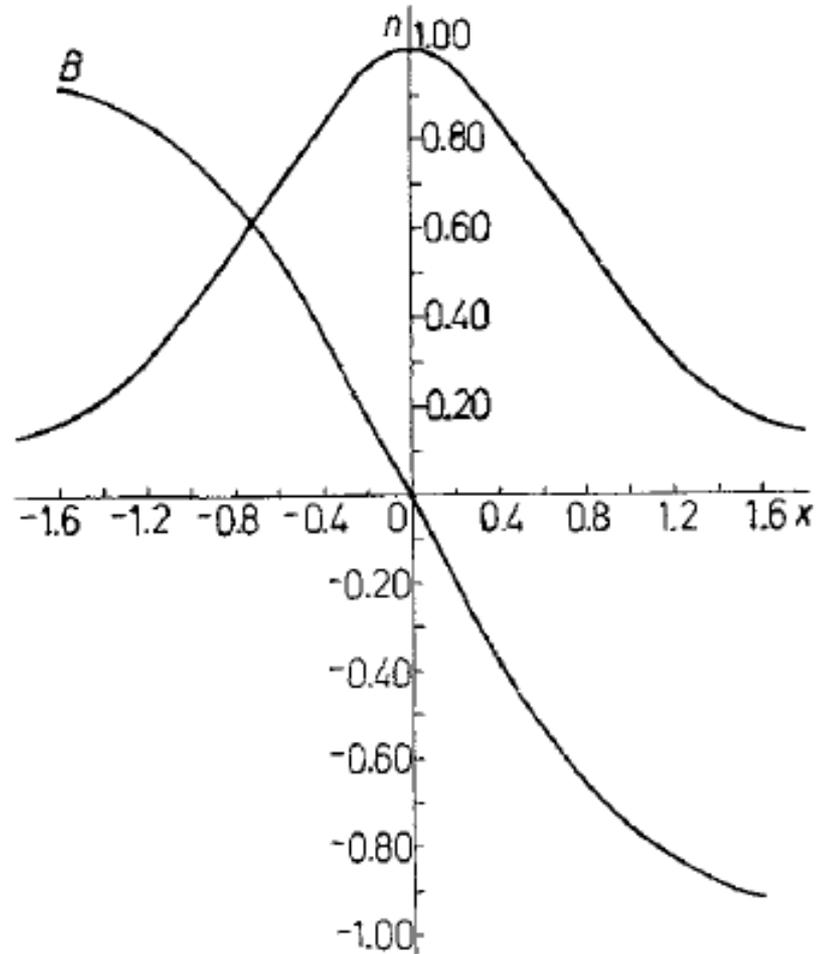
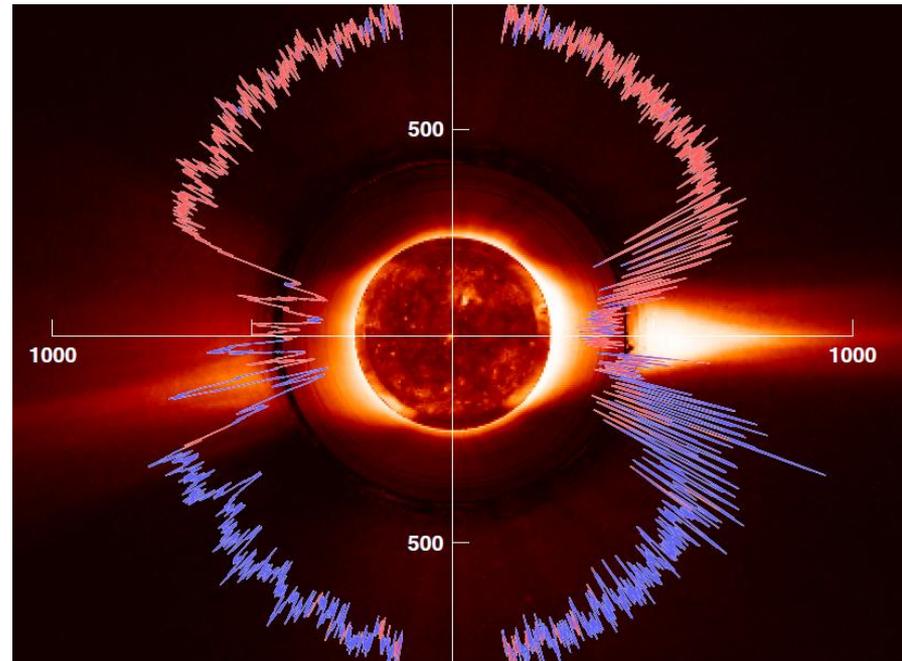
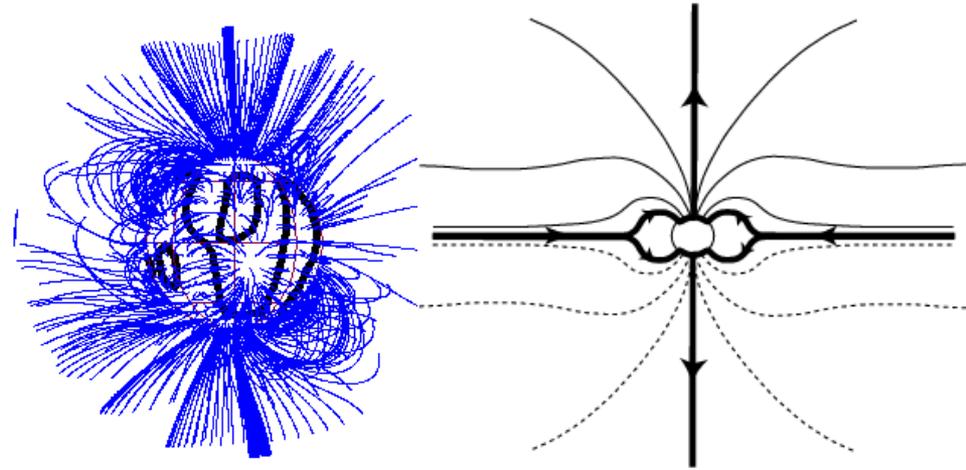


Fig. 1. — The variation of B and n across the sheath.

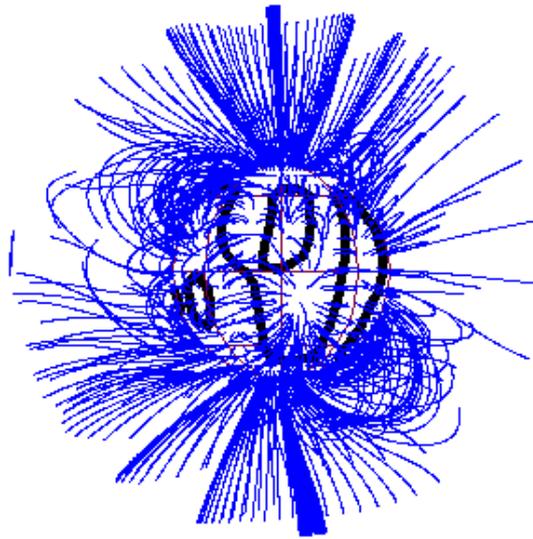
- *Harris, 1962*

Идеи

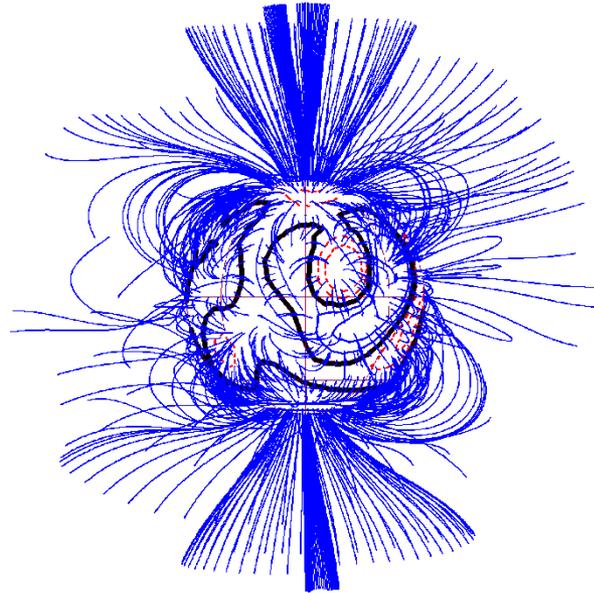
- *Магнитное поле Солнца не дипольно, возможны нейтральные поверхности на высоких широтах*
- *Распределение плазмы и её скорости зависит от широты, около полюсов возможны неоднородности (Smith et al., 2004)*
- *ГТС – плазменный диск (Kislov et al., 2015), тогда на высоких широтах при сходных условиях может быть плазменный цилиндр или конус*
- *Гелиосферная токовая цепь включает высокие широты (Alfven, 1977)*



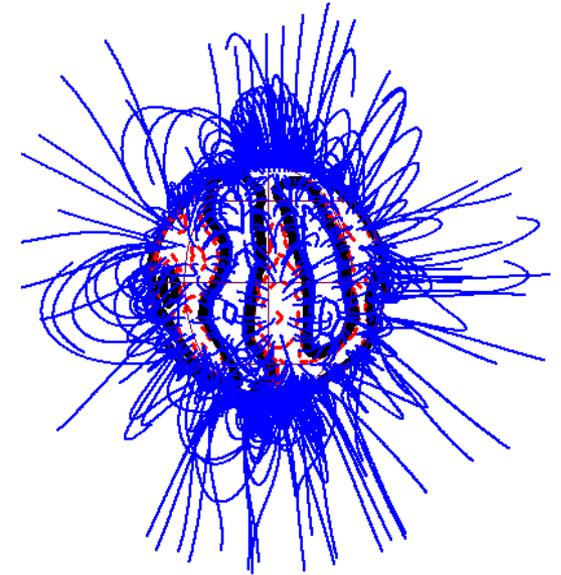
minimum reconstructed coronal magnetic field maximum



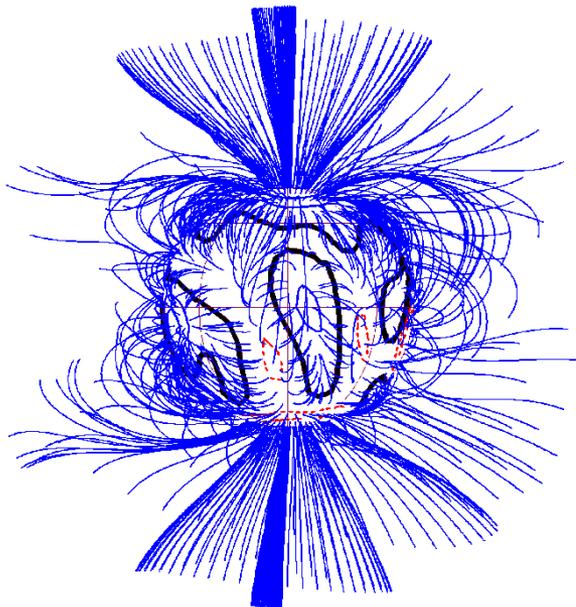
January 1994



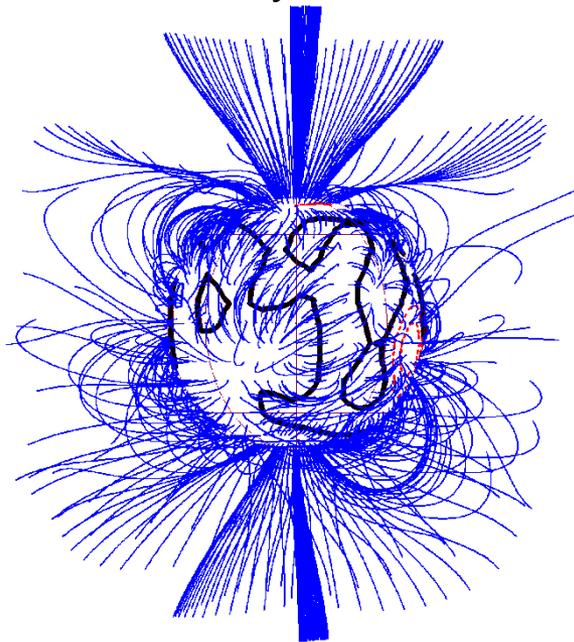
January 2006



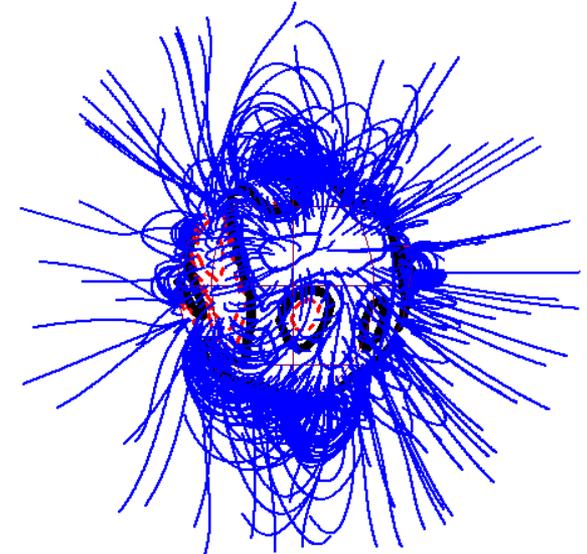
January 1989



September 1994



February 2007



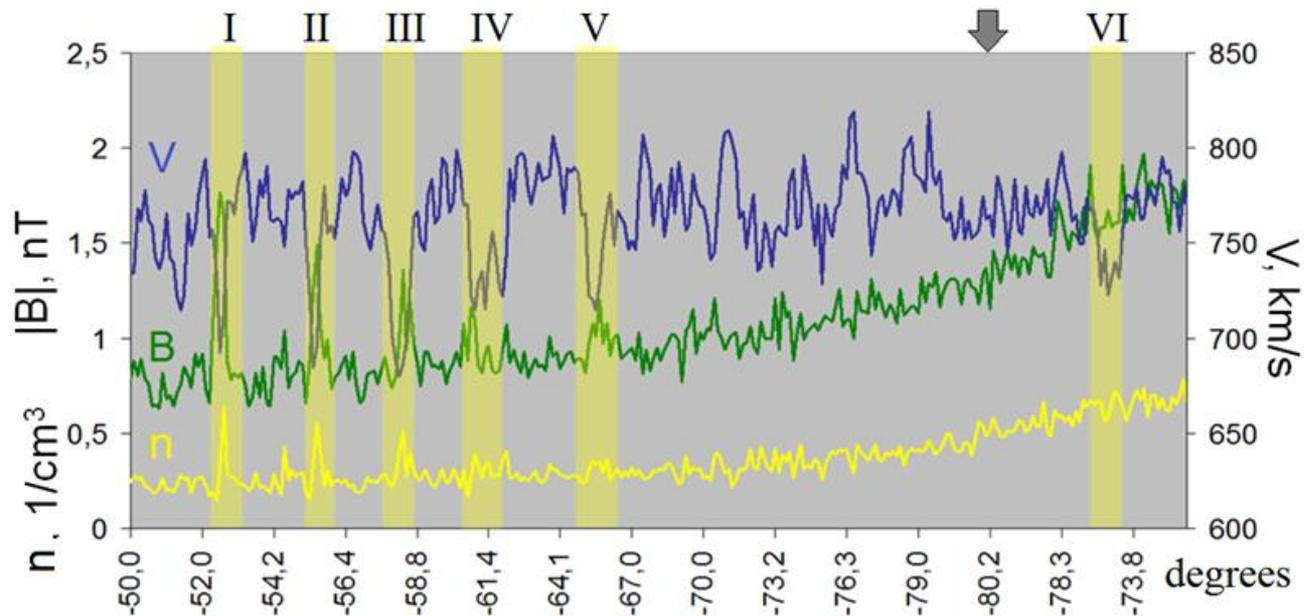
January 2000

Solar activity minimum

1994

Конический/цилиндрический токовый слой в полярной гелиосфере (несколько пересечений):

- Мощный провал **V**
- Низкое плазменное бета
- Вложенные токовые слои
- Вращение **B** внутри трубы
- Пик **N**



Исходные уравнения

Стационарная осесимметричная МГД-модель для качественного описания трубы
Показатель политропы $\gamma = 1$, теплоперенос детально не рассматривается.

Модель применима вдали от Солнца, где $Z \gg 1 R_{\odot}$

Plasma equilibrium:

$$P = nT$$

$$\rho(\mathbf{v}, \nabla)\mathbf{v} = -\nabla P + 1/c[\mathbf{j}, \mathbf{B}]$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

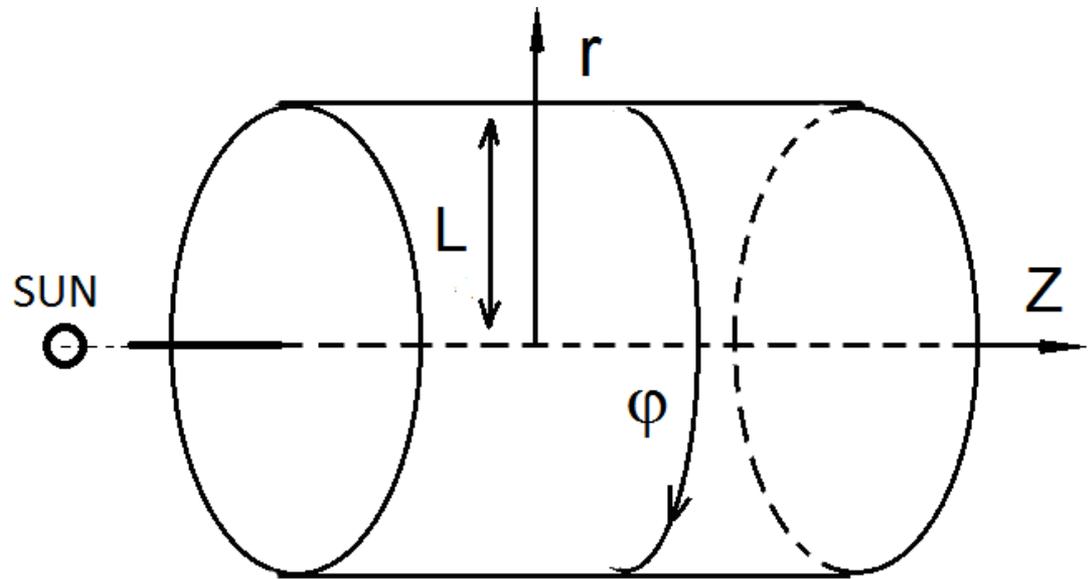
$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = 4\pi \mathbf{j}/c$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0 \rightarrow \mathbf{E} = -\nabla \Psi$$

$$\mathbf{E} + 1/c[\mathbf{v}, \mathbf{B}] = 0$$

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$P = K\rho^{\gamma}$$

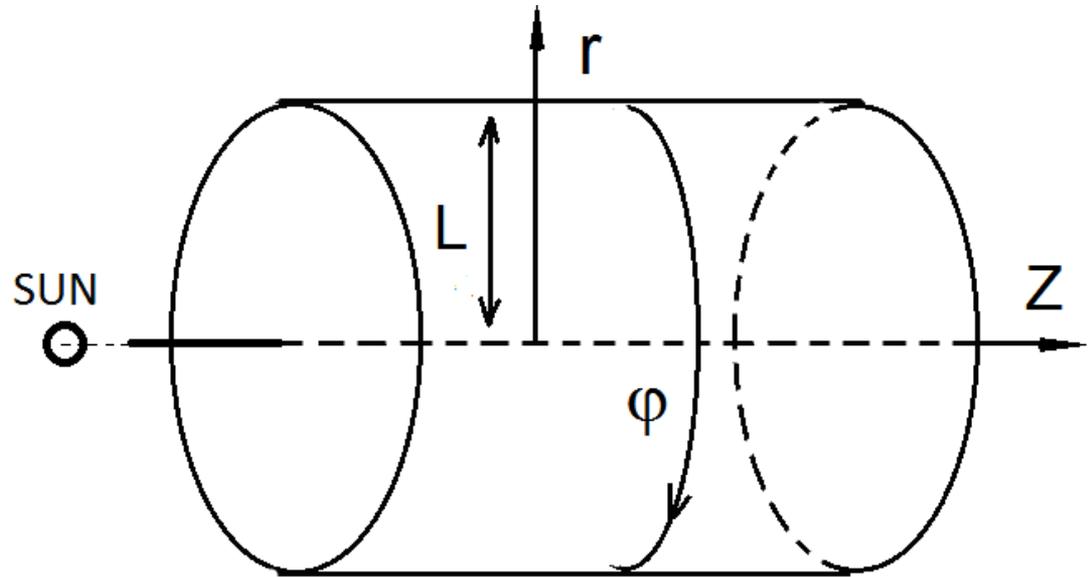


КТС соответствует нейтральной поверхности

Метод потоков

- Осевая симметрия: $d/d\phi=0$

$$\left\{ \begin{array}{l} B_r = -\frac{\partial \Phi}{r \partial z} \\ B_z = \frac{\partial \Phi}{r \partial r} \\ \rho v_r = -\frac{\partial F}{r \partial z} \\ \rho v_z = \frac{\partial F}{r \partial r} \end{array} \right.$$



- Φ – магнитный поток, F – массовый поток

“Вмороженность” в солнечном ветре

$$\mathbf{E} + 1/c[\mathbf{v}, \mathbf{B}] = 0$$

$$\mathbf{E} = -\nabla\Psi$$

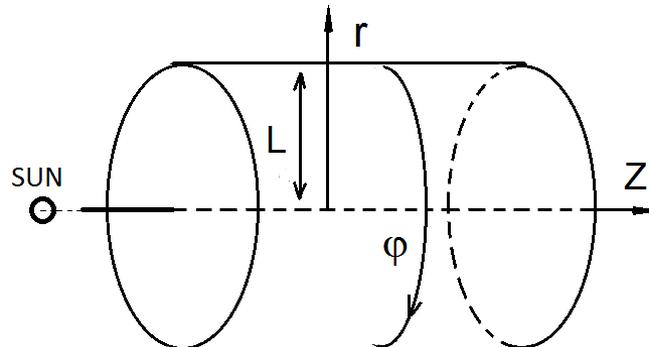
■ $d/d\phi = 0$, откуда:

$$\begin{cases} \rho v_r = \alpha B_r \\ \rho v_z = \alpha B_z \end{cases}$$

$$v_\phi - \frac{\alpha}{\rho} B_\phi = \Omega r = c \frac{d\Psi}{d\Phi} r$$

■ Отклонение от закона изоротации Ферраро

■ $\alpha = \partial F / \partial \Phi \sim r^2 \rho v_z / r^2 B_z \sim (\sqrt{\rho}) v_z / v_A$ — массовая нагруженность магнитных линий



Плазменное равновесие:

$$\rho(\mathbf{v}, \nabla)\mathbf{v} = -\nabla P + 1/c[\mathbf{j}, \mathbf{B}] \quad \text{rot} \mathbf{B} = 4\pi \mathbf{j}/c$$

Осевая симметрия: $d/d\varphi = 0$:

$$4\pi\alpha v_\varphi r - B_\varphi r = a(\Phi)$$

$$B_\varphi = \rho \frac{4\pi\alpha\Omega r - a/r}{\rho - 4\pi\alpha^2} \quad v_\varphi = \frac{\rho\Omega r - \alpha a/r}{\rho - 4\pi\alpha^2}$$

Доп. предположения:

- *Сверхтепловое течение: $V_\varphi, V_z \gg V_T$*
- *Вытянутые магнитные линии: $r \ll z$*

■ *Баланс давлений:*

$$P + \frac{B_z^2 + B_\varphi^2}{8\pi} = P_0(z)$$

■ *Решения для плотности:*

$$\rho = \frac{2\pi v_T^2}{2U + \Omega^2 r^2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{\rho_0(z) 2U + \Omega^2 r^2}{\pi v_T^2 \alpha^2}} \right)$$

Принципиальные предположения при задании граничных условий

- Смесь магнитных диполя и квадруполя:

$$\Phi = \Phi_1 \sin^2 \theta (1 + \epsilon \cos \theta)$$

где ϵ – параметр квадрупольности

Есть два экстремума по θ , которые соответствуют нейтральным

поверхностям:

$$\cos \theta = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 3\epsilon^2}}{3\epsilon}$$

Дополнительно $|\epsilon| > 1$

Например: при $\epsilon = -1.01$, второй экстремум будет при

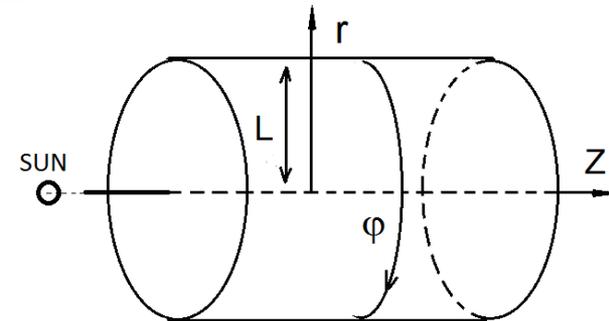
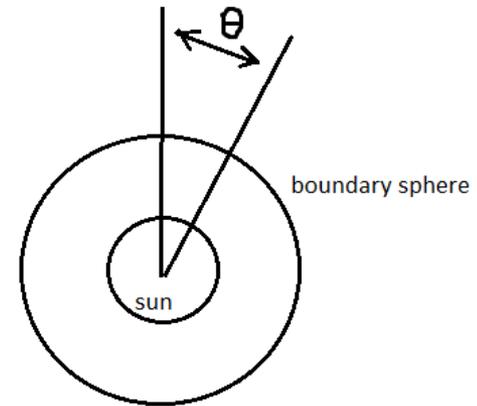
$$\theta \sim 18^\circ$$

- Узкий пик плотности:

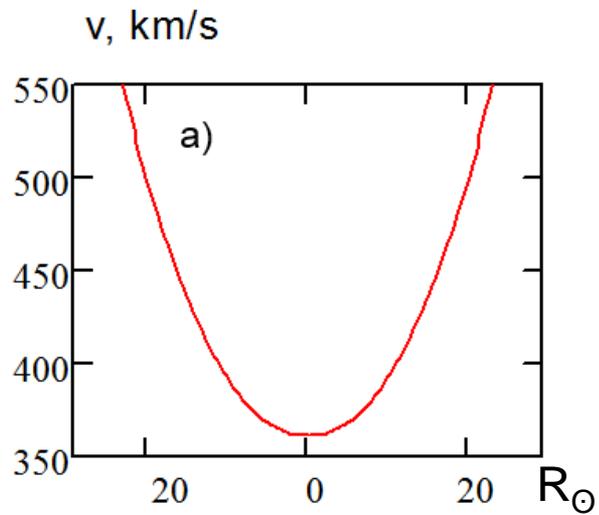
$$n = 3.75 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3} (0.4 + 0.6 \cdot \exp(\theta^2 / (\pi/50)^2))$$

- Концентрация на нейтральной поверхности:

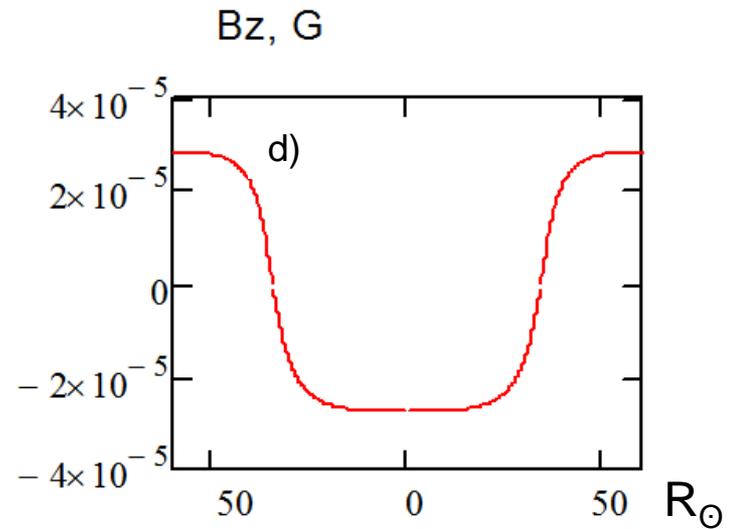
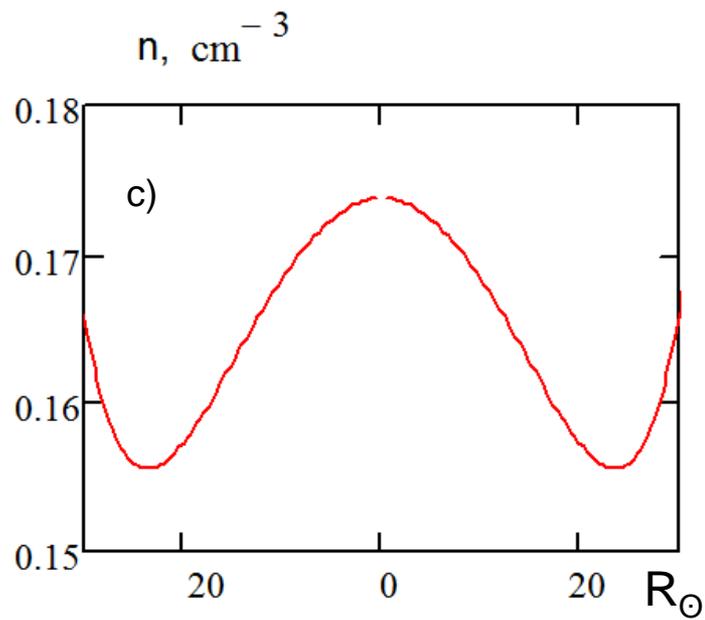
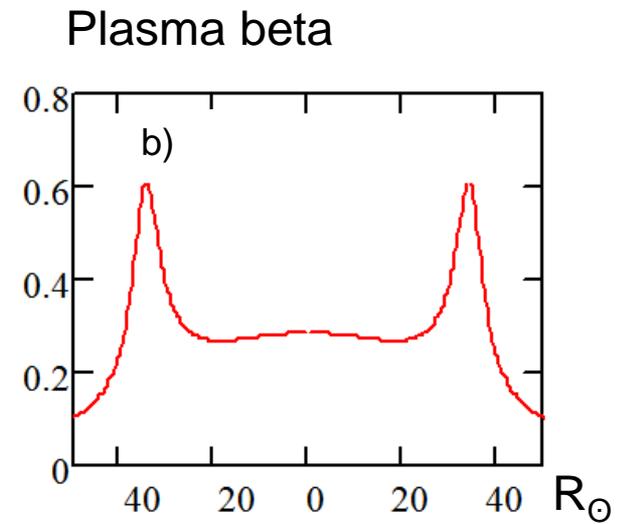
$$n = 3.75 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3} (10R_\odot / z)^2$$

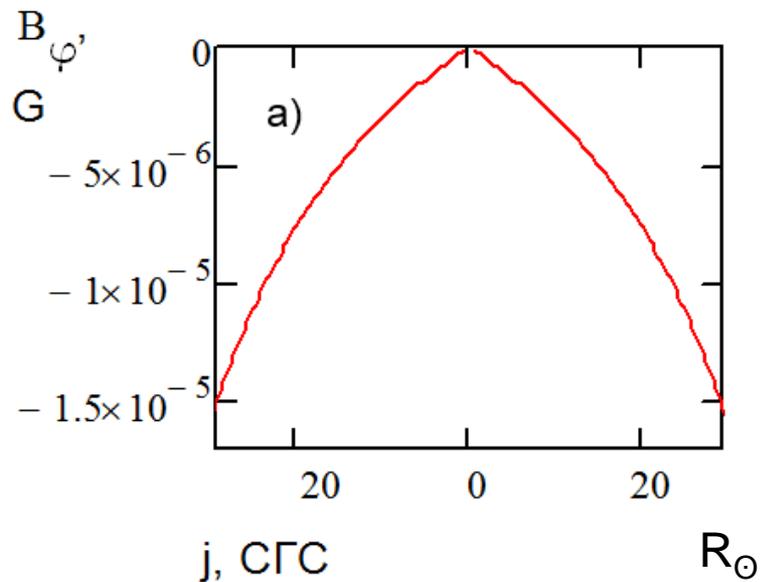


Решения при ~ 2.5 AU

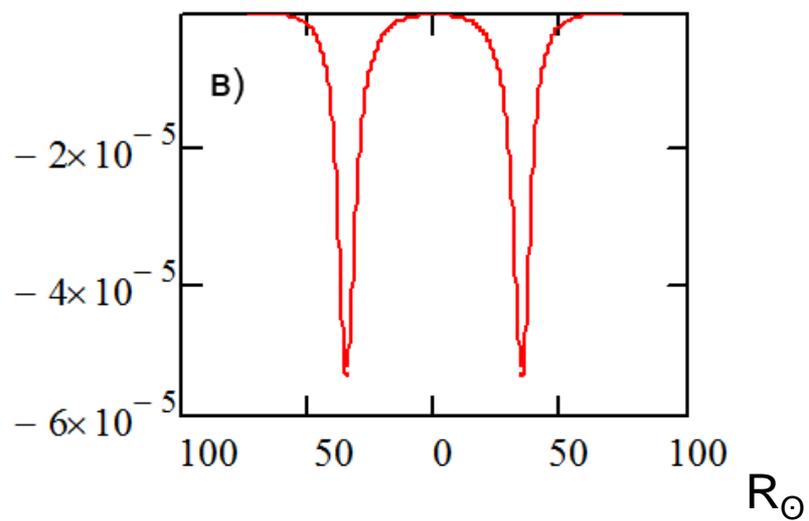
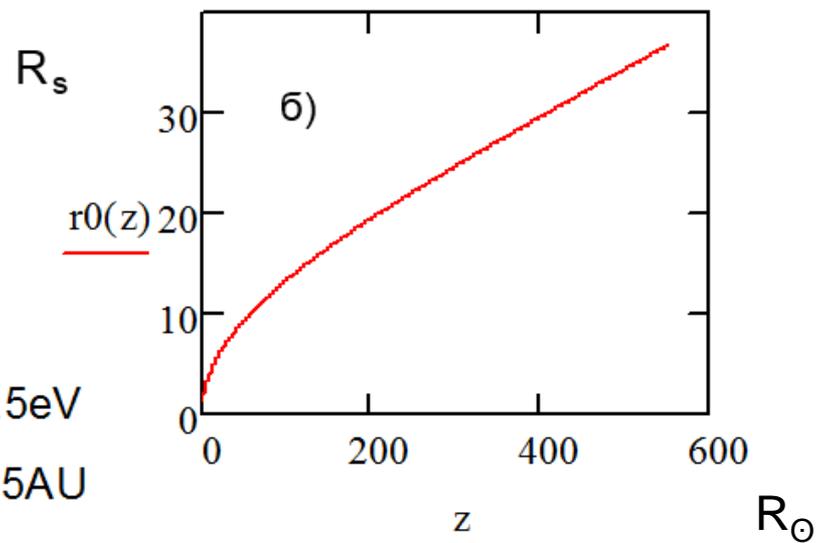


$T=2.5$ eV
 $z=2.5$ AU





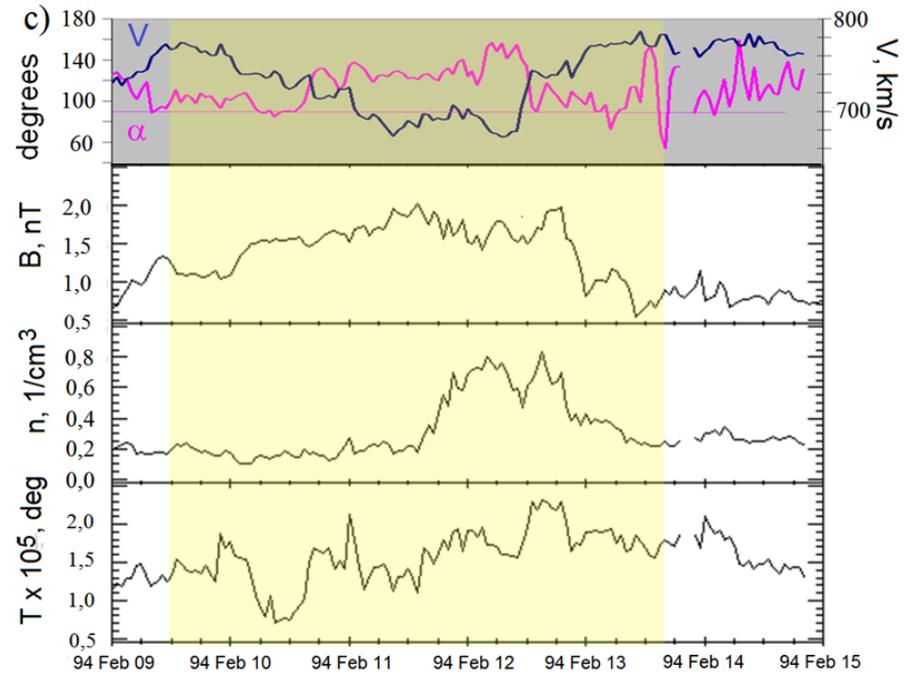
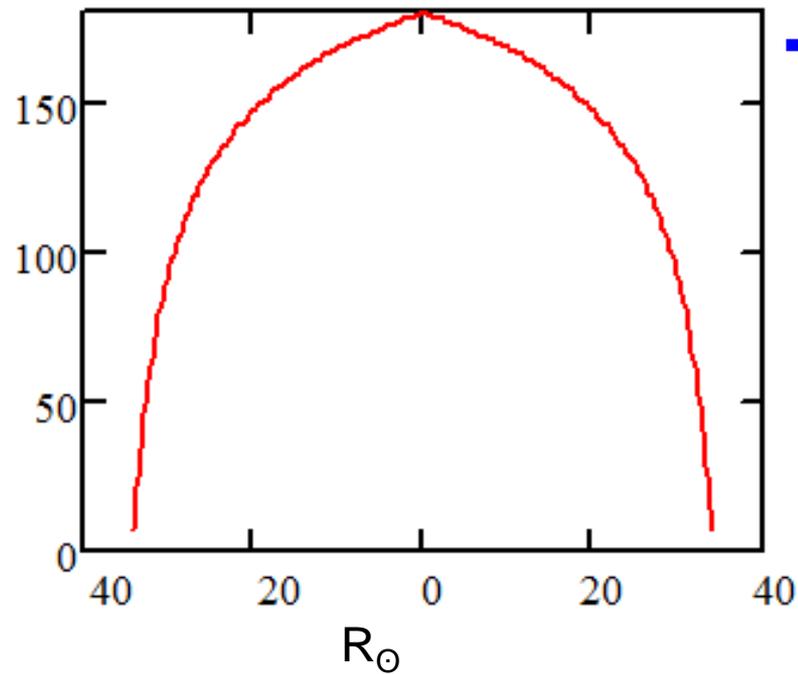
$T=2.5\text{eV}$
 $z=2.5\text{AU}$



Угол между В и V (~2.5 AU)

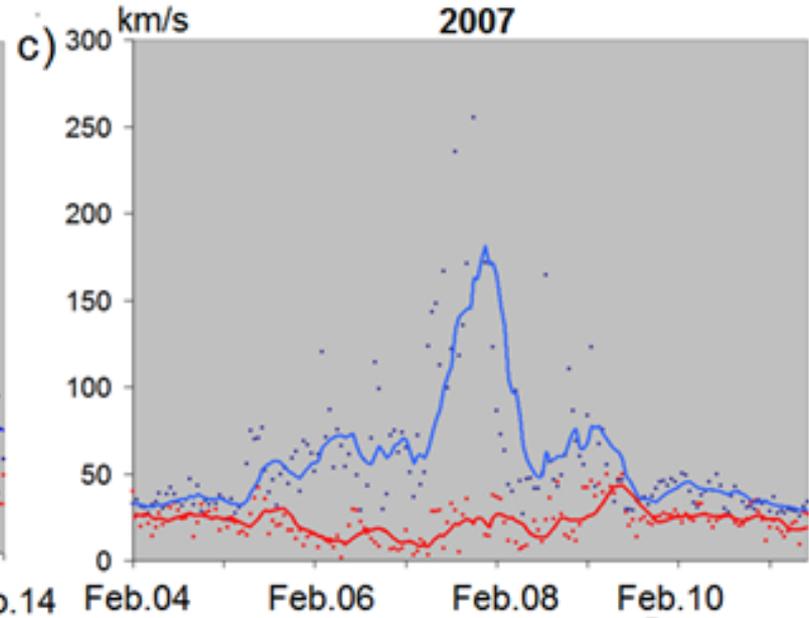
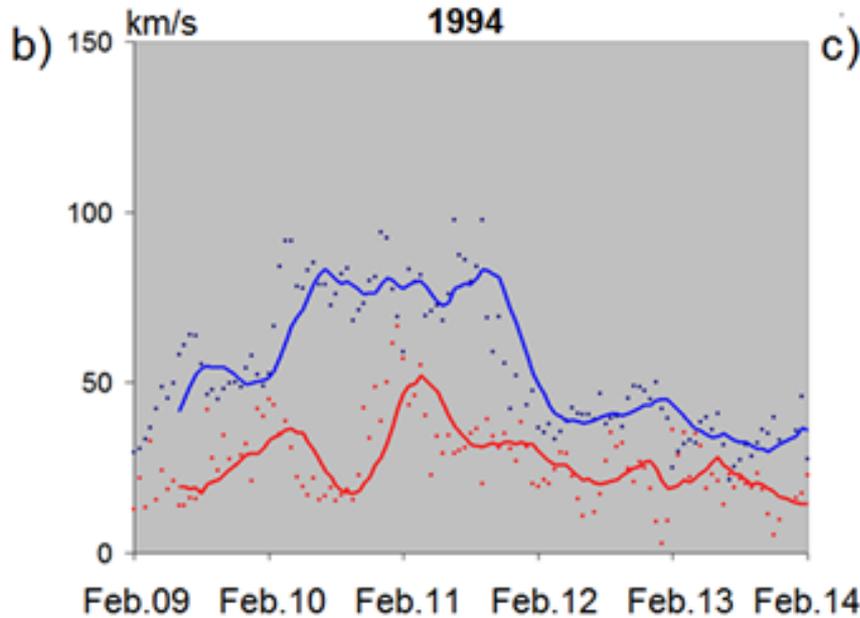
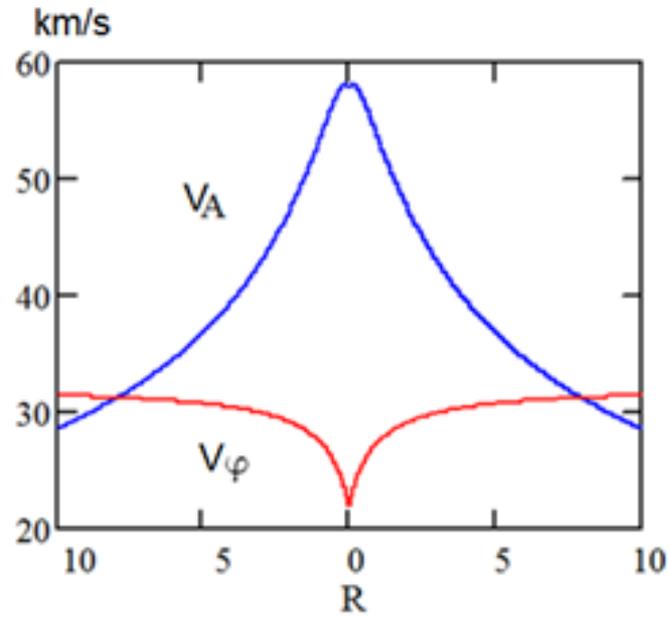
degrees

α



Альфвеновская поверхность

$\varepsilon=3$



Заключение

- В высокоширотной гелиосфере наблюдаются конические/цилиндрические токовые структуры.
- Построена МГД-модель магнитной трубы, которая качественно согласуется с наблюдениями.
- Провал скорости в солнечном ветре обуславливается локальным пиком скорости на полюсе Солнца.
- Границы КТС – нейтральные поверхности V_z .
- Вблизи границ пресекается азимутальная альфвеновская поверхность

1. Khabarova O.V., N.V. Malova, R.A. Kislov, L. M. Zelenyi, V.N. Obridko, A.F. Kharshiladze, M. Tokumaru, J.M. Sokół, S. Grzedzielski, and K.Fujiki,
High-latitude conic current sheets in the solar wind,
The Astrophysical Journal, 836, №1, p 1-14, 2017

2. Кислов Р.А., **МГД – модель высокоширотного токового слоя в гелиосфере**,
Учёные записки Физического факультета Московского университета, №4, 1740704, 2017.