

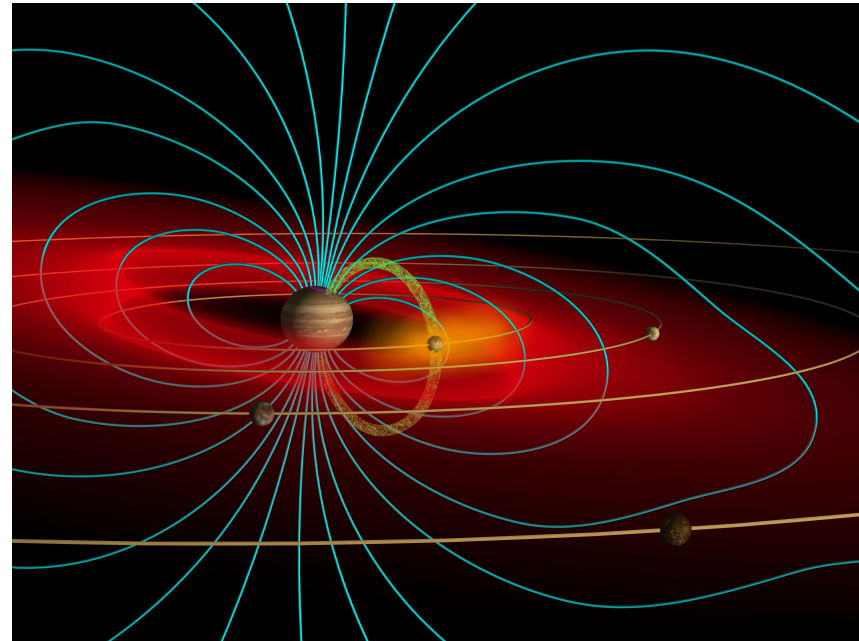
# Výzkum plazmatu v okolí Jupiterova měsíce Io pomocí numerických simulací

Ondřej Šebek

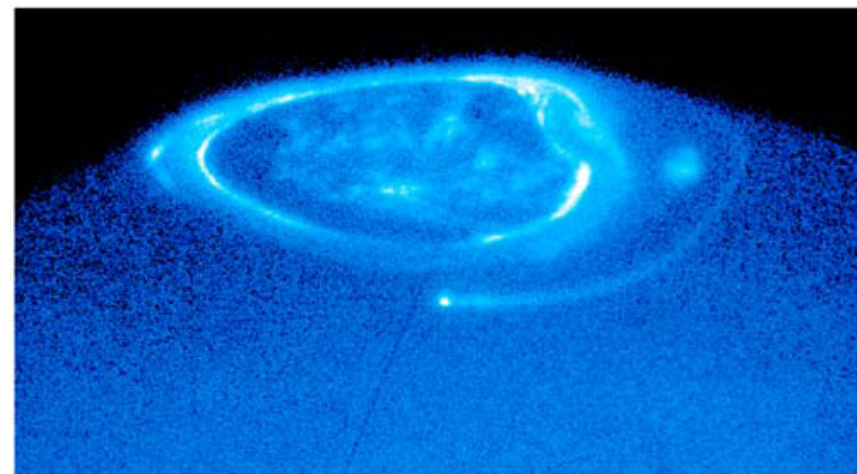
7. února 2014

# Historie výzkumu měsíce Io

- **1964** - *Io-effect*
- **1974** - Neutrální sodík
- **1975** - Ionosféra Io (*Pioneer 10/11*)
- **1979** - Sopečná činnost, SO<sub>2</sub>, plazmový torus, elektrodynamická interakce ( $\approx 10^6$  A) (*Voyager 1/2*)
- **1993** - *Io-footprint*
- **1995-2003** - 5 blízkých průletů sondy *Galileo* → detailní měření magnetického pole a vlastností plazmatu v okolí měsíce



J. Spencer



J. Clarke

# Io a plazmový torus

## Io

- poloměr  $R_{Io} = 1821$  km, orbitální vzdálenost  $R_{orbit} \approx 6 R_J$
- silné Jupiterovo magnetické pole  $B_J = 1800$  nT
- velmi silná vulkanická činnost
- neutrální atmosféra ( $SO_2$ ,  $SO$ ,  $S_2$ , ...) a ionosféra
- největší zdroj magnetosférického plazmatu ( $Q_{ion} = 10^{28} \text{ s}^{-1}$ )

## Plazmový torus

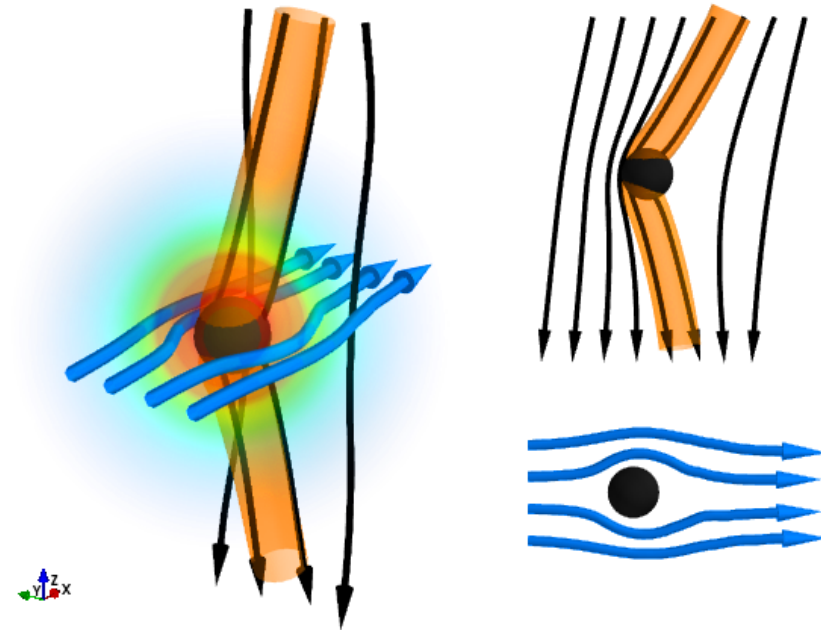
- relativní rychlost toku  $U_{torus} = 57 \text{ km.s}^{-1} \approx 0.3V_A$
- složení:  $O^+$ ,  $S^{++}$ ,  $S^+$ ,  $O^{++}$ , ...
- střední hmotnost  $\langle m_i \rangle = 22m_p$ , střední ionizace  $\langle Z_i \rangle = 1.5$

	$n$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$T$ [eV]	$p$ [nPa]	$\beta$ [-]	$r_L$ [km]
e	2000-3800	5-6	1.6-3.7	0.0012-0.0029	0.005
i	1000-3900	10-70	1.6-43.7	0.001-0.034	4.4-11.6

**Tabulka :** Rozsahy některých parametrů elektronů a iontů plazmového torusu.

# Interakce měsíce Io s plazmovým torusem

- Pohyb vodivého objektu rychlostí  $u$  napříč magnetickým polem
- elektrické pole  $\mathbf{E} = -\mathbf{u} \times \mathbf{B}$
- elektrický proud ve formě Alfvénovské poruchy se šíří podél siločar rychlostí  $v_A$ , porucha je unášena pozad'ovou rychlostí  $u$  napříč magnetickým polem
- sklon magnetických silokřivek protínajících měsíc o úhel  $\alpha = \arctan \frac{u}{v_A}$



Current advance method and cyclic leapfrog (A. Matthews, *J. Comp. Phys.* 112(1994), p. 102-116):

- částicové ionty - PIC metoda
- tekutina nehmotných elektronů s konstantní teplotou

Základní sada rovnic:

- zobecněný Ohmův zákon:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\rho_c} \left( \frac{(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{J}_i \times \mathbf{B} - \nabla p_e \right) + \eta (\nabla \times \mathbf{B})$$

- Faradayův zákon:  $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
- pohybová rovnice:  $\frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = \frac{q_s}{m_s} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_s \times \mathbf{B})$
- rovnice pro polohu:  $\frac{d\mathbf{x}_s}{dt} = \mathbf{v}_s$

# Simulation model

**Simulation model:** We use hybrid model with kinetic ions and massless charge-neutralizing fluid of electrons. The model solves selfconsistently equations of motion of ions, Faraday's law for magnetic field and generalized Ohm's law for electric field.

**Initial conditions:** In this model we assume properties of background plasma corresponding to flyby I0 of *Galileo* around Io on December 7, 1995. Density of background torus plasma is  $n_0 = 3500 \text{ cm}^{-3}$ , temperature is  $T_0 = 120 \text{ eV}$  and background Jovian magnetic field is  $B_0 = 1840 \text{ nT}$ . We use one plasma species with mass  $m_i = 22m_p$  and charge  $q_i = e$ . These parameters imply following values of characteristic plasma quantities:

PARAMETER	VALUE
$v_{A0}$ : Alfvén velocity of torus plasma	145 km.s <sup>-1</sup>
$\omega_{c0}$ : cyclotron frequency of torus plasma	8 s <sup>-1</sup>
$d_0 = \frac{v_{A0}}{\omega_{c0}}$ : ion inertial length of torus plasma	18 km
$R_{Io}$ : radius of Io	1,821 km (=101 $d_0$ )
$\rho_i$ : gyro-radius of ions	4.5 km (=0.25 $d_0$ )
$\beta_i$ : beta of ions	0.05

# Ionization processes at Io

Ions may exchange charge with neutrals near Io. The neutral atmosphere also can be a source of new ions produced by *electron impact ionization* from corotating plasma and by *photoionization*. We assume the following two-component model of Io's neutral atmosphere [Lipatov and Combi, 2006]:

$$n_{\text{neutral}}(r) \approx n_{\text{atm}} \left\{ W_{\text{ext}} \frac{H_{\text{atm}} R_{\text{Io}}}{4 r^2} + W_{\text{int}} \exp\left(-\frac{r - R_{\text{Io}}}{H_{\text{atm}}}\right) \right\}$$

where  $W_{\text{ext}} = 1 - W_{\text{int}}$ .

- **Charge exchange ionization:** Charge exchange rate increases with neutral density  $n_{\text{neutral}}$ . We use variable value of neutral density close to Io  $n_{\text{atm}}$  to change this rate.
- **Photoionization/electron impact ionization:** Ion production rate at Io is estimated to be  $Q_{\text{ion}} = 10^{26} - 10^{28} \text{ s}^{-1}$ .

$Q_{\text{ion}}$ ,  $n_{\text{atm}}$  are variable parameters in our simulations.

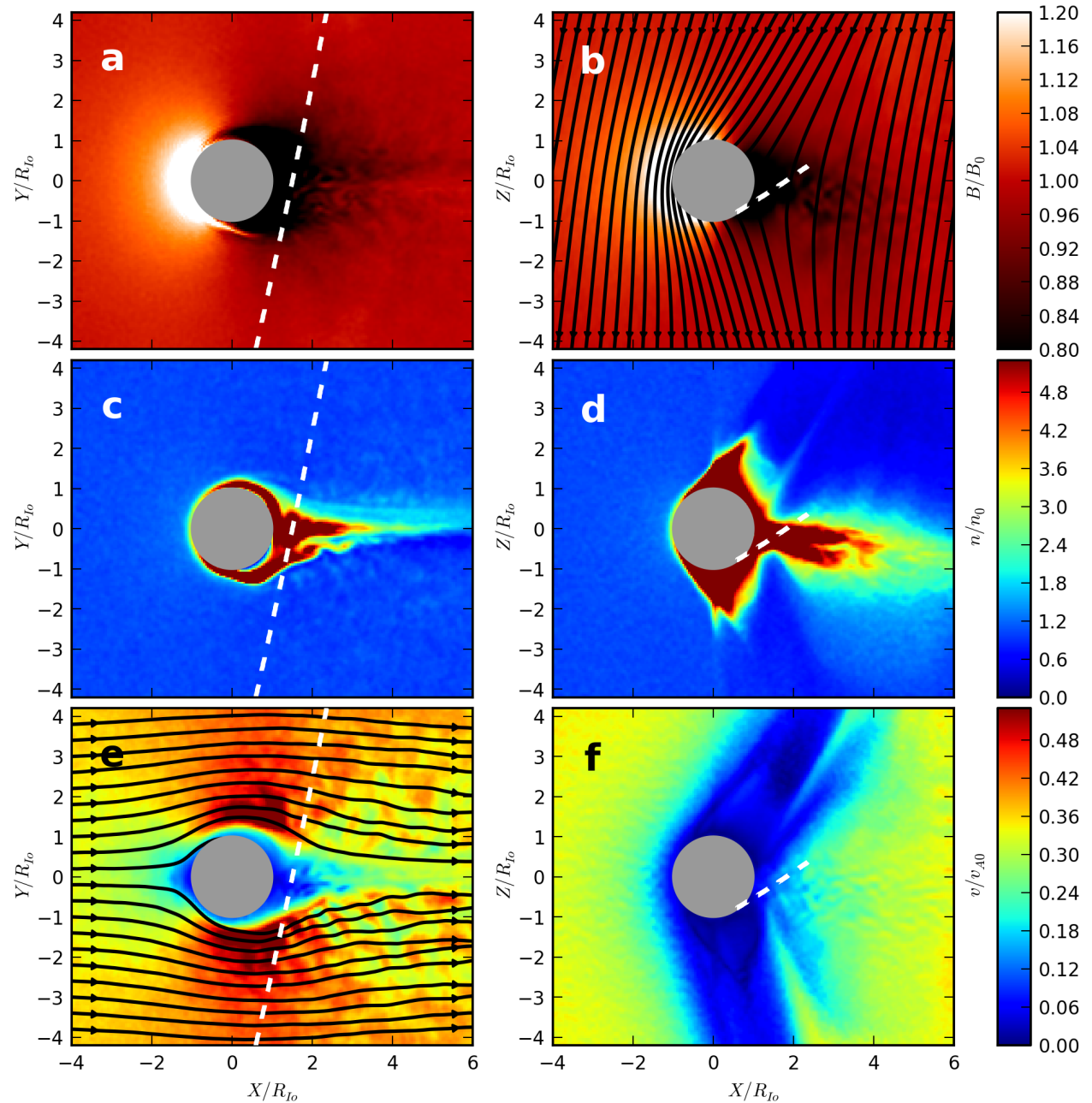
# Simulation setup

<b>PARAMETER</b>	<b>VALUE</b>
Spatial resolution $\Delta x = \Delta y = \Delta z$	$0.5 d_0$
Radius of Io $R_{Io}$	$10 d_0$
Number of cells $N_x/N_y/N_z$	304/240/304
Spatial size of the system $L_x/L_y/L_z$	$15.2R_{Io}/12R_{Io}/15.2R_{Io}$
Temporal resolution (time step) $\Delta t$	$0.01 \omega_{c0}^{-1}$
Time substep for magnetic field $\Delta t_B$	$\Delta t/10 = 0.001 \omega_{c0}^{-1}$
Total simulation time	$150 \omega_{c0}^{-1}$
Pressure ratios $\beta_i/\beta_e$	0.05/0.0022
Relative flow velocity $v_0$	$0.4 v_{A0}$
Magnetic field $\mathbf{B}_0$	$(-0.1549, -0.0516, -0.987)$
Atm. scale height $H_{atm}$	$0.1 R_{Io}$
Atm. fractions $W_{int} = W_{ext}$	0.5
<b>VARIABLE PARAMETER</b>	<b>VALUE</b>
Density of neutrals close to Io $n_{atm}$	$0.5; 3; 10 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$
Ion production rate at Io $Q_{ion}$	$0.5; 3; 10 \cdot 10^{27} \text{ s}^{-1}$

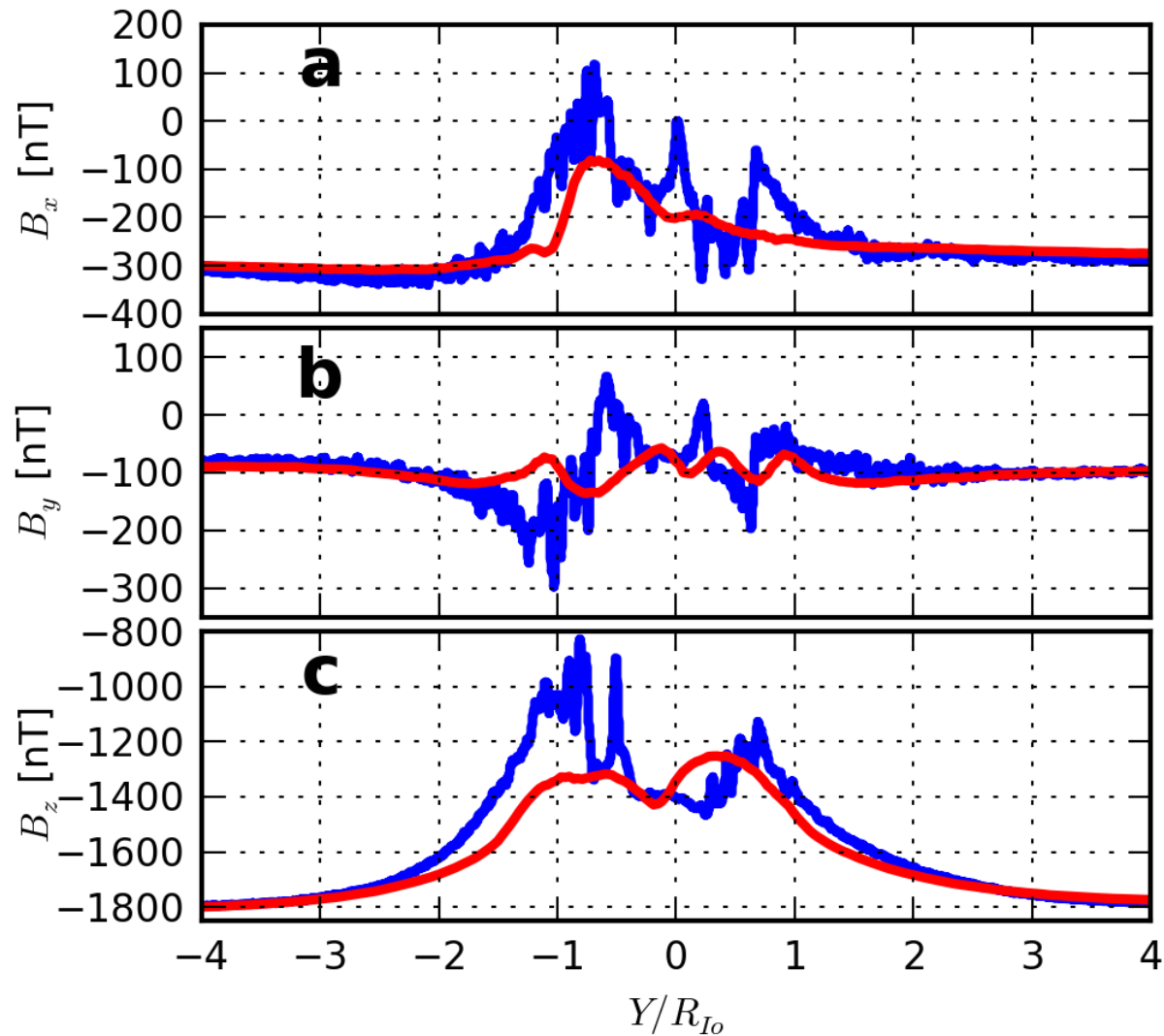


# Globální struktura interakce

**Nahoře:**  
magnetické pole  
**Uprostřed:**  
hustota plazmatu  
**Dole:** Velikost  
rychlosti



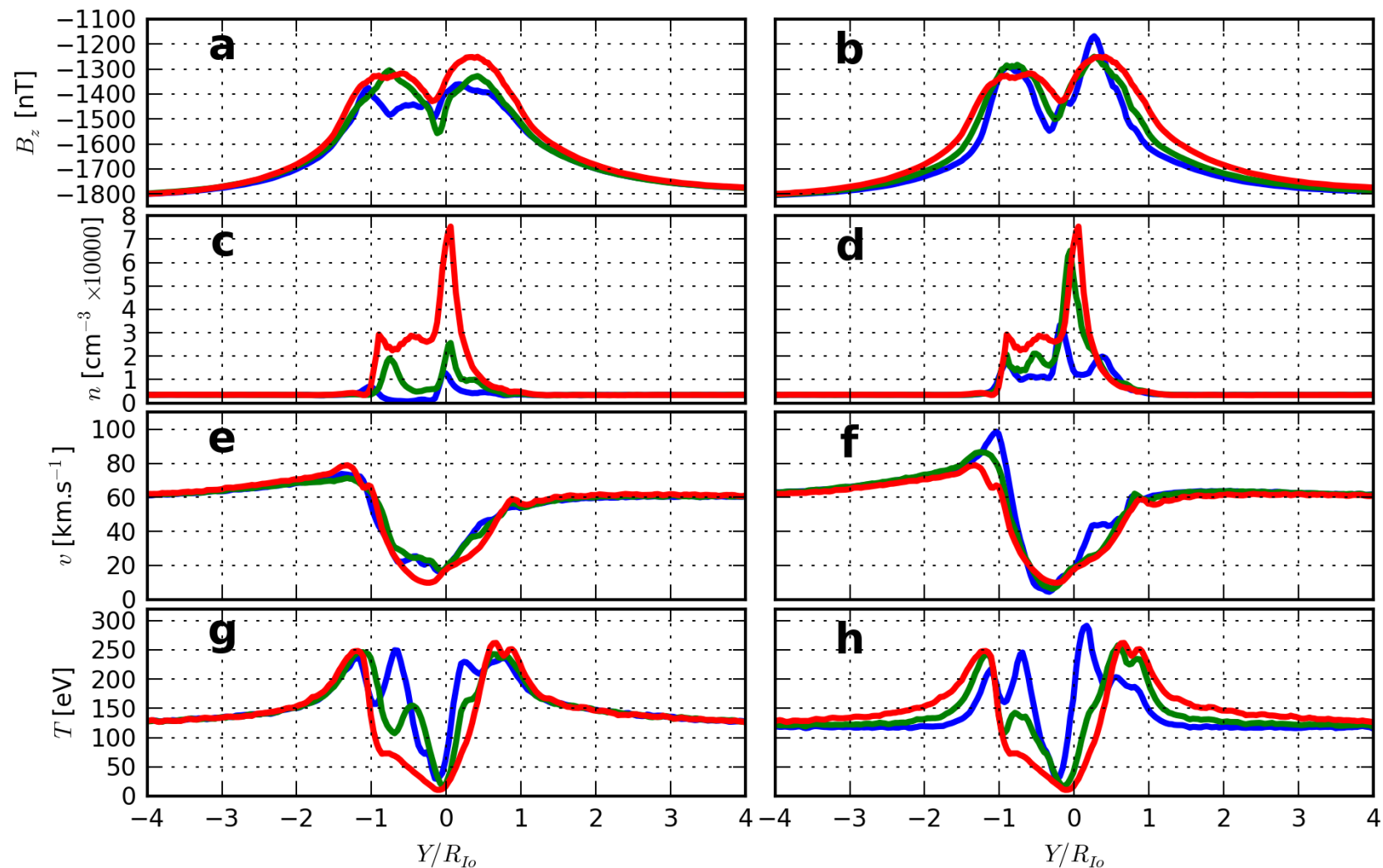
# Srovnání s reálnými daty



Modrá - měření sondy Galileo

Červená - hybridní model pro  $Q_{ion} = 10 \cdot 10^{27} \text{ s}^{-1}$  a  $n_{atm} = 10 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ .

# Vliv ionizačních procesů



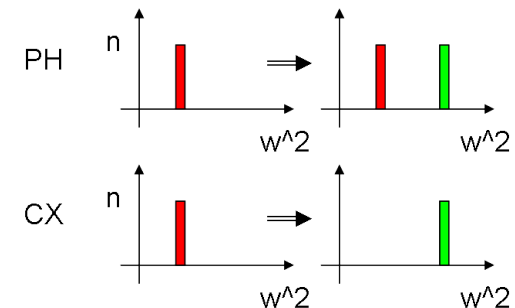
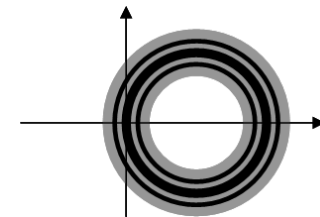
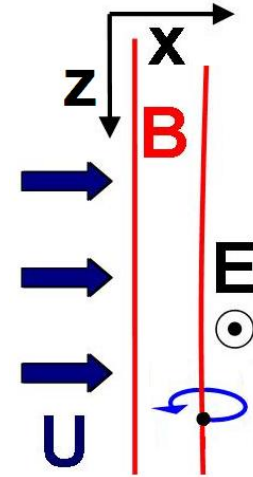
Vlevo -  $Q_{ion} = 0.5; 3; 10 \cdot 10^{27} \text{ s}^{-1}$  a konstantní  $n_{atm} = 10 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$

Vpravo - konstantní  $Q_{ion} = 10 \cdot 10^{27} \text{ s}^{-1}$  a  $n_{atm} = 0.5; 3; 10 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$

Odshora dolů: složka magnetického pole  $B_z$ ; hustota; velikost rychlosti; teplota

# O vlivu ionizačních procesů na teplotu a jiné vlastnosti tekoucího plazmatu

- $v_{esc} < 5 \text{ km.s}^{-1} \ll u = 57 \text{ km.s}^{-1}$
- Na nově ionizované částice působí  $\mathbf{E} = -\mathbf{u} \times \mathbf{B}$
- Získávají hybnost kolmo k  $\mathbf{B} \rightarrow$  produkce prstencové VDF
- Tlak  $p \propto \int \mathbf{w}^2 f d^3 \mathbf{v} \rightarrow$  nově vznikající částice mají stejnou hodnotu  $w^2$
- Zvýšení či snížení teploty v závislosti na poměru termální rychlosti a střední rychlosti pozad'ového plazmatu.
- CX ionizace má výraznější dopad na změnu teploty.
- Prstencové VDF jsou teplotně anizotropní s  $T_{\perp}/T_{\parallel} > 1$ .



# Nestability generované teplotní anizotropií iontů

$$T_{\parallel,i} < T_{\perp,i}$$

## Iontová cyklotronová nestabilita

- cyklotronová rezonance
- levotočivá polarizace
- $\omega_r < \omega_{c,i}$

## Zrcadlová nestabilita

- Landauova rezonance
- lineární polarizace
- $\omega_r = 0$
- antikorelované fluktuace  $n$  a  $B$

$$T_{\parallel,i} > T_{\perp,i}$$

## Podélná hadicová nestabilita

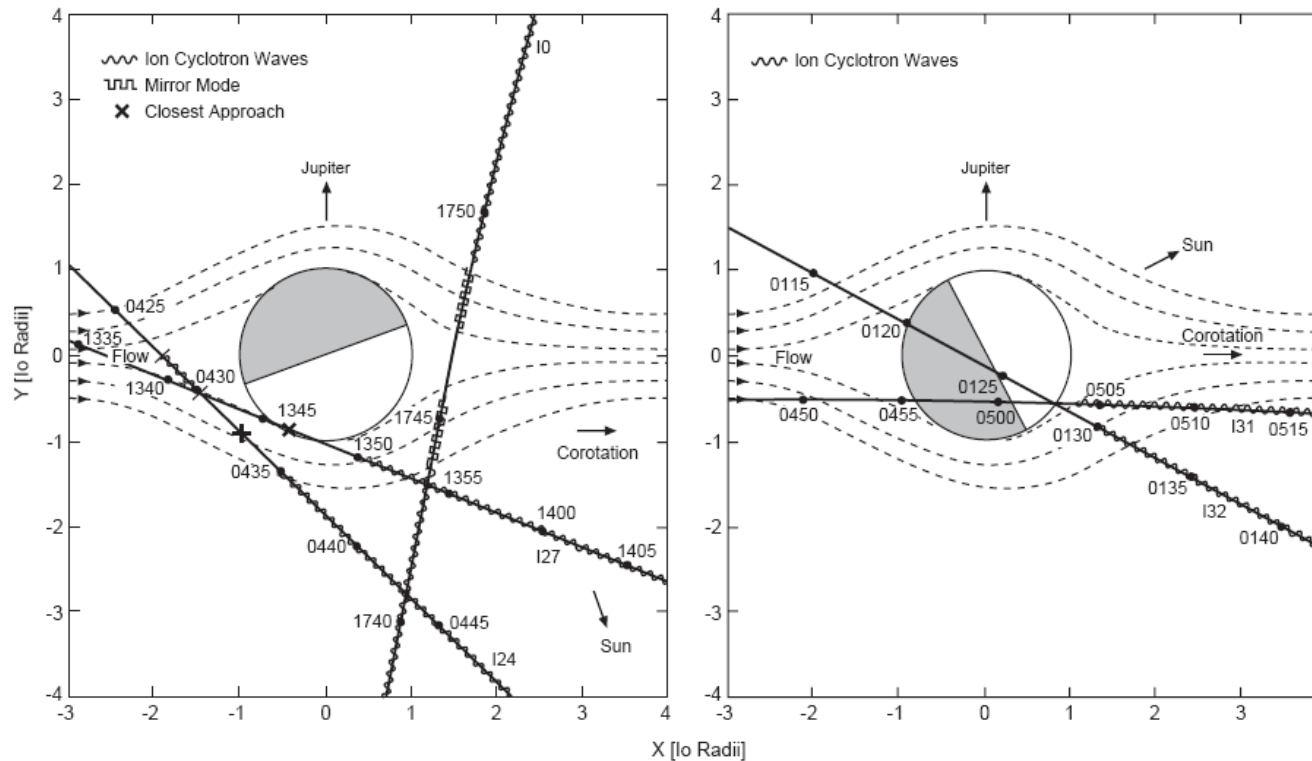
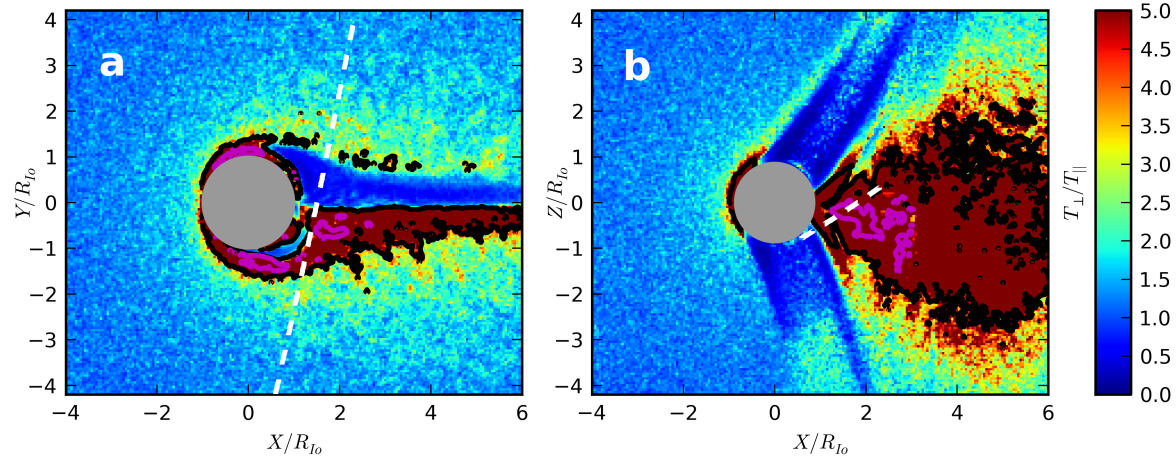
- cyklotronová rezonance
- pravotočivá polarizace
- $\omega_r < \omega_{c,i}$

## Šikmá hadicová nestabilita

- lineární polarizace
- $\omega_r = 0$

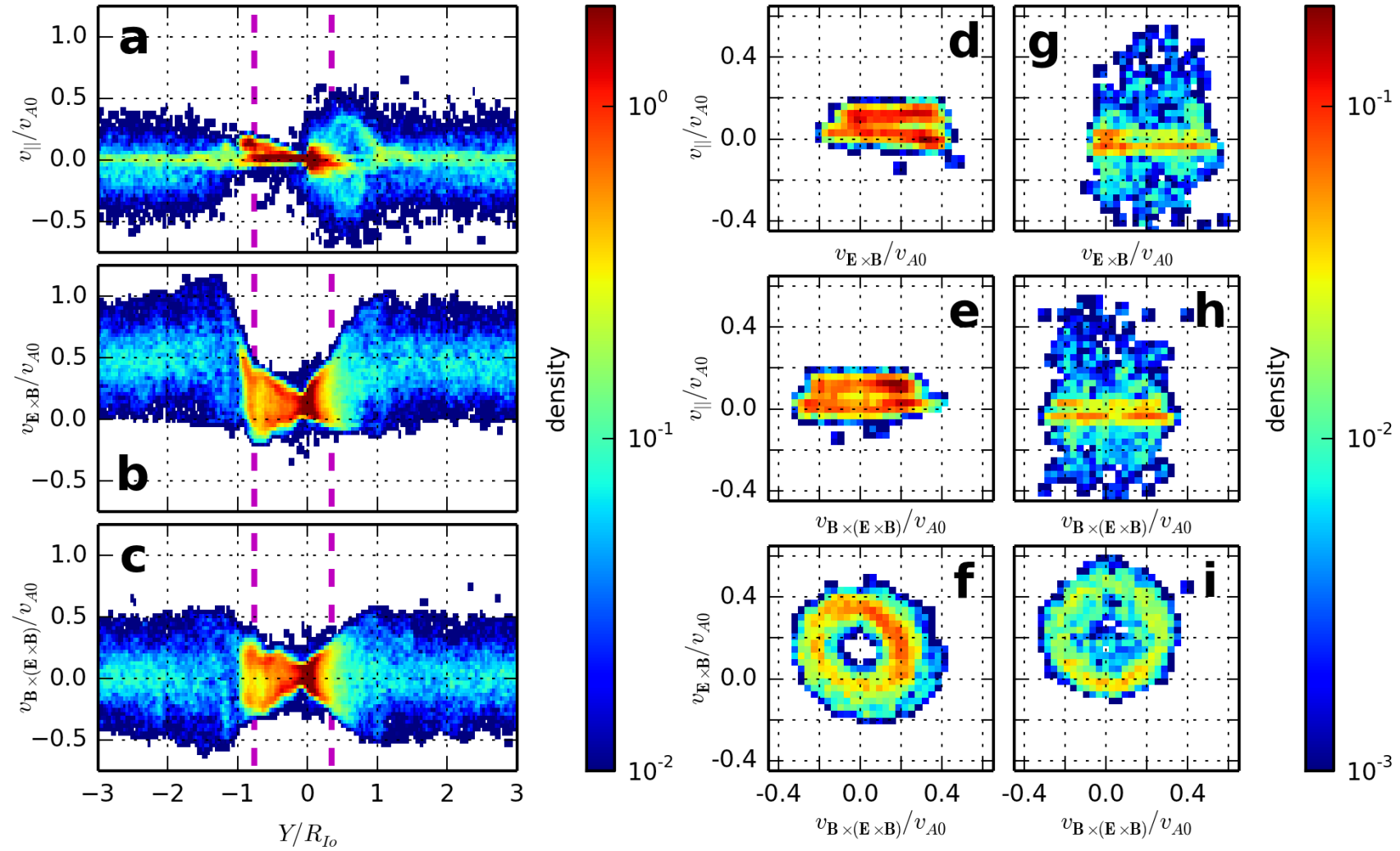
Čerstvé plazma u Io je teplotně anizotropní s  $T_{\perp,i} > T_{\parallel,i}$  a může tak generovat iontovou cyklotronovou a zrcadlovou nestabilitu. Obě zde byly pozorovány.

# Teplotní anizotropie



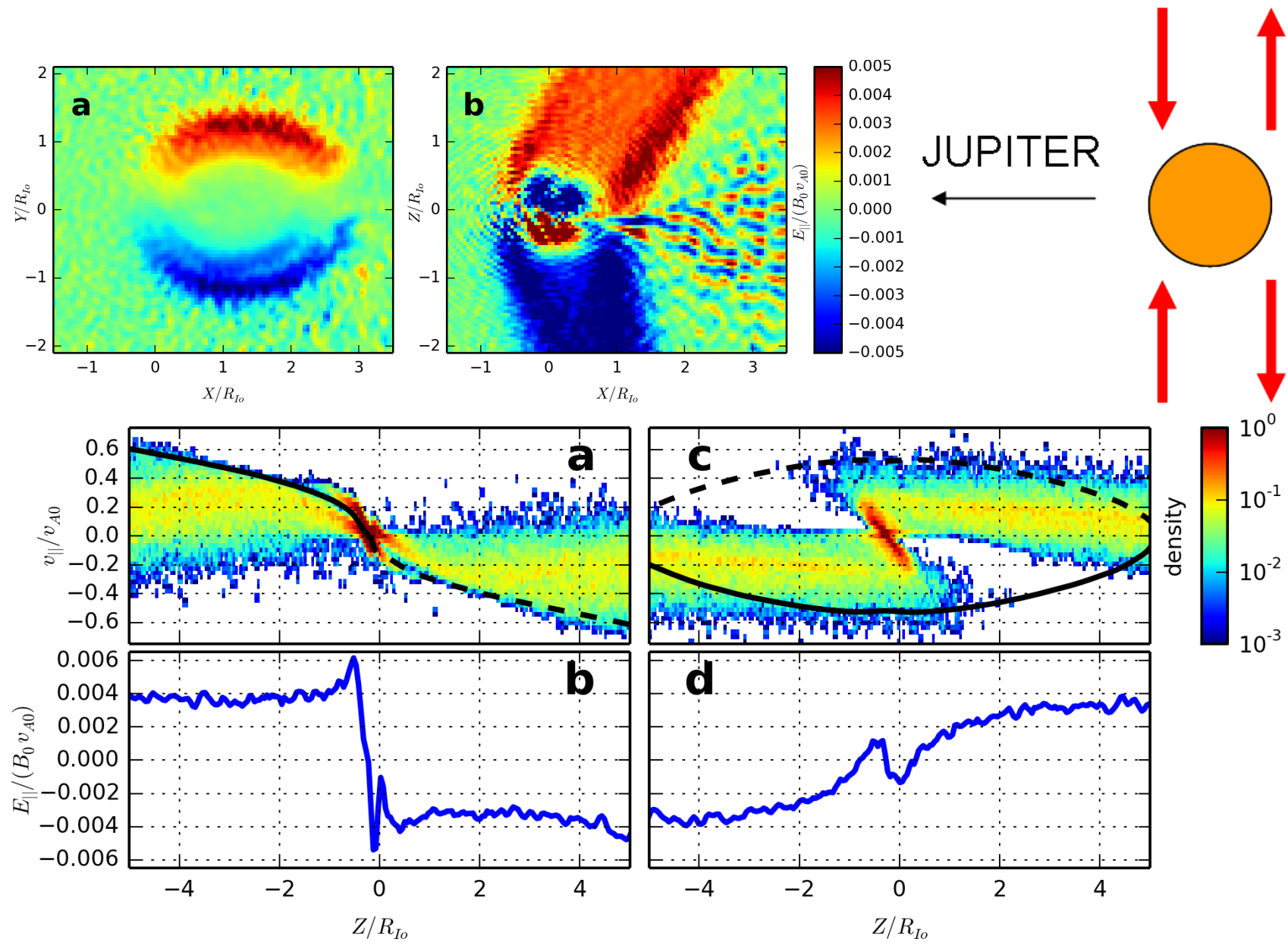
Russell et al., *Planet. Space Sci.* **51** (2003), 937.

# VDF



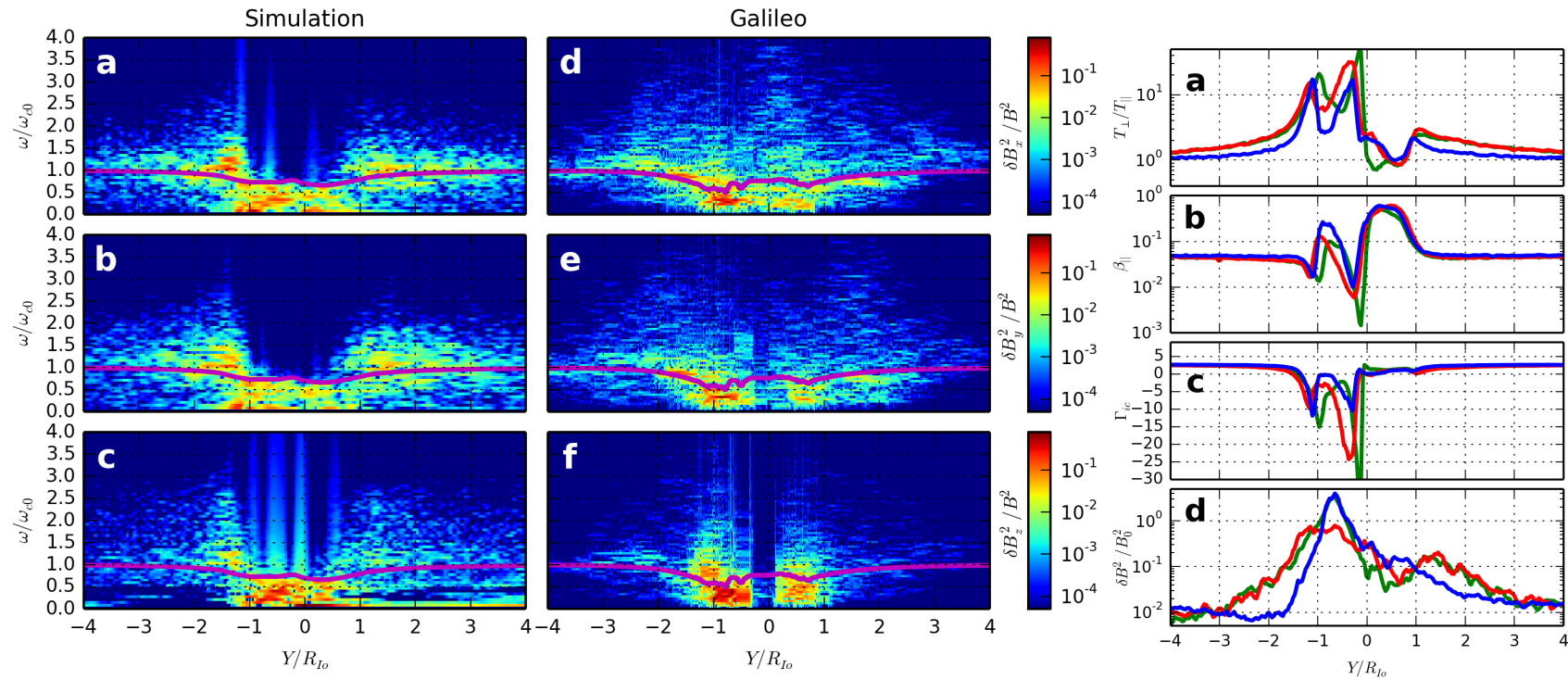


# Paralelní elektrické pole





# Magnetické fluktuace



Vlevo: spektrální analýza fluktuací magnetického pole podél trajektorie I0 naměřených v simulaci a sondou Galileo.

Vpravo: Kinetické vlastnosti plazmatu podél trajektorie pro simulace s  $Q_{ion} = 10Q_0$  a  $n_{atm} = 10n_{atm,0}$  (červená),  $Q_{ion} = 3Q_0$  a  $n_{atm} = 10n_{atm,0}$  (zelená) a  $Q_{ion} = 10Q_0$  a  $n_{atm} = 3n_{atm,0}$  (modrá).

Odshora dolů: teplotní anizotropie, paralelní beta, vzdálenost od prahu nestability a celková energie magnetických fluktuací.

- Hybridní modelování interakce měsíce Io s magnetosferickým plazmatem planety Jupiter ukazuje typické rysy této interakce (Alfvénova křídla, pokles magnetického pole ve stínu měsíce atd.) a dává slušnou shodu s reálným pozorováním. Model implikuje, že rozložení produkce iontů fotoionizací bylo v době průletu IO sféricky asymetrické s vyšší produkcí iontů na denní straně.
- Hybridní modelování demonstruje vliv ionizačních procesů na globální parametry plazmatu. Podle očekávání má na teplotu větší vliv ionizace nábojovou výměnou, protože tento proces výrazněji mění poměr hustot pozad'ového termálního plazmatu a pick-up plazmatu.
- Model ukazuje výskyt výrazných fluktuací magnetického pole v okolí měsíce. Charakter fluktuací odpovídá reálným pozorováním sondy Galileo. Amplituda je korelována s teplotní anizotropií plazmatu, výskyt fluktuací je pravděpodobně důsledkem růstu iontové cyklotronové nestability. Nábojová výměna ovlivňuje vlastnosti fluktuací výrazněji než fotoionizace/elektronová ionizace.

- Studium vlivu **místních** (podmínky v okolí měsíce Io: vlastnosti neutrální atmosféry, složení, hustota, frekvence ionizačních procesů apod.) a **vnějších** (podmínky v plazmovém torusu, složení, hustota, teplota plazmatu, velikost a orientace magnetického pole apod.) parametrů na globální strukturu a dynamiku interakce měsíce Io s magnetosférickým plazmatem planety Jupiter.
- Studium dynamiky Alfvénových křídel v závislosti na podmínkách interakce → urychlování částic a přenos energie podél magnetického pole, vliv lokální interakce měsíce Io na aurorální jevy v Jupiterově ionosféře.
- Studium nestabilit generovaných teplotní anizotropií iontů → analýza vlivu lokálních podmínek na růst jednotlivých módů + porovnání s reálným pozorováním. Vlastnosti vln generovaných těmito nestabilitami nesou závisí na podmínkách v lokálním plazmatu (složení a prostorové rozložení neutrální atmosféry, frekvence ionizačních procesů apod.).

Děkuji za pozornost