

Elektromagnetické vlastnosti měsíců a planet

prezentace v Mariánské

Daniel Procházka

Školitel: Dr. Pavel Trávníček

22. ledna 2020

Zadání bakalářské práce

Úkoly ze zadání:

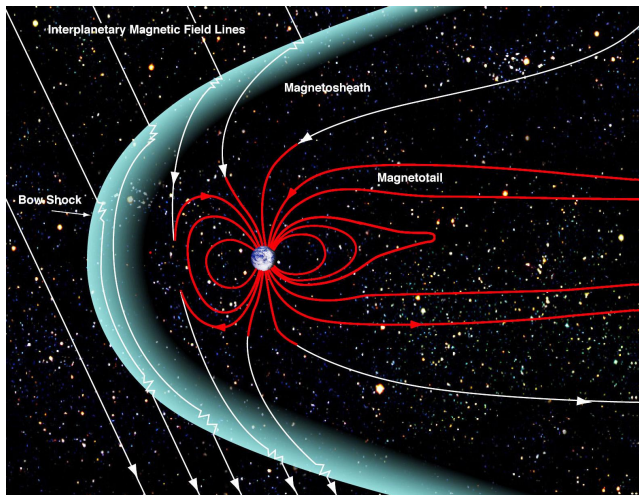
- 1 proved'te rešerši na dané téma,
- 2 nastudujte jednotky použité v simulaci,
- 3 na základě literatury vytvořte model Měsíce,
- 4 porovnejte výsledky simulace s modelem a bez něj.

Interakce Slunečního větru s tělesy

čtyři základní typy:

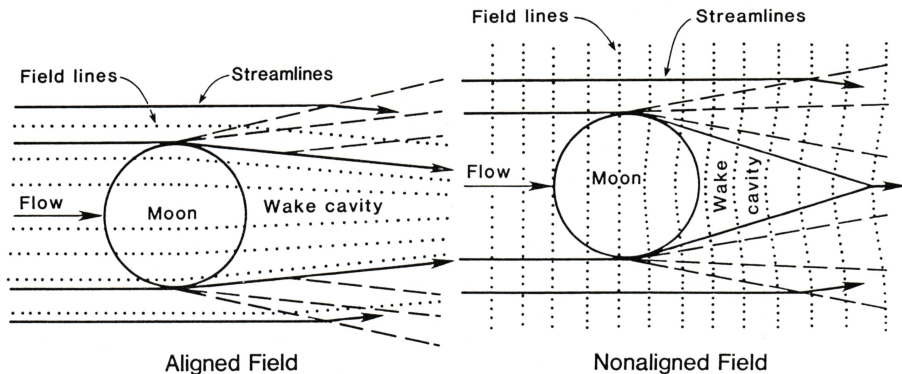
- 1 Země, Jupiter, ...
- 2 Měsíc
- 3 Venuše, Mars
- 4 komety

Interakce Slunečního větru se Zemí



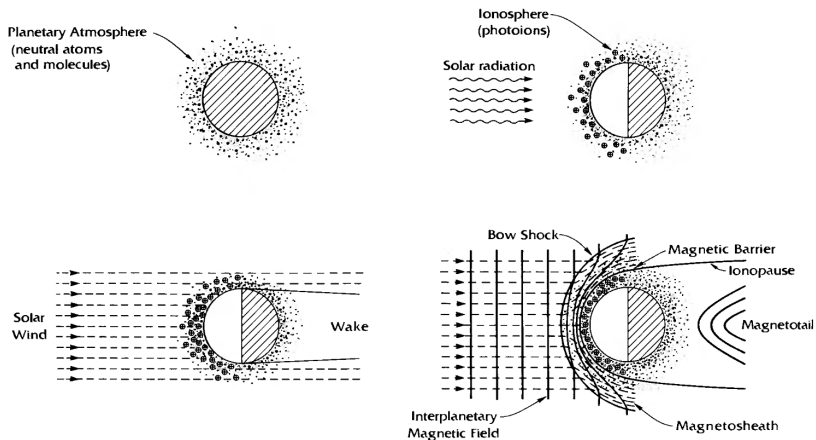
Magnetosféra Země, Credit: NASA/Goddard/Aaron Kaase

Interakce Slunečního větru s Měsícem



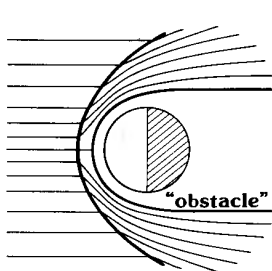
Interakce Měsíce se SV [3]

Interakce Slunečního větru s Venuší

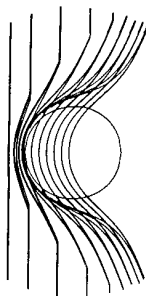


Vznik *bow shocku* u těles s ionosférou [3]

Interakce Slunečního větru s Venuší



Streamlines



Field Lines
(perpendicular IMF)

Magnetic draping [3]

Elektromagnetické vlastnosti Měsíce

$R_M = 1737 \text{ km}$		
jádro	plášť	kůra
<p>≈ 300 km</p> <p>kovové</p> <p>vodivé</p>	<p>≈ 1380 km</p> <p>ortopyroxen, olivín</p>	<p>≈ 60 km</p> <p>anortozitické horniny, hořčíkaté horniny, bazalty, pyroklastika</p> <p>velká rezistivita, magnetické anomálie</p>

Magnetické pole v Měsíci

difúze magnetického pole

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma \mu} \nabla^2 \mathbf{B} \quad (1)$$

jenže ...

$\sigma = \sigma(\mathbf{x})$, tedy:

- 1 rovnice $\partial_t \mathbf{B} = -\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma} \nabla \times \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu} \right) \right)$
- 2 difúzní rovnice na kulových slupkách s propojovacími podmínkami

Ideálně vodivé jádro

v případě ideálně vodivého jádra

$$\mathbf{p}_M(t) = -\frac{2\pi}{\mu_0} \mathbf{B}_0(t) r_0^3,$$

$$\mathbf{B}_{\text{ind}}(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3\mathbf{p}_M(t) \cdot \mathbf{r}}{r^5} \mathbf{r} - \frac{1}{r^3} \mathbf{p}_M(t) \right).$$

Hybridní model I

Co znamená „hybridní model“?

- elektrony – tekutina
- ionty – makročástice ($\approx 10^{18}$ částic)

1. momentová rovnice pro elektronovou tekutinu

$$m_e n_e \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u}_e \cdot \nabla \right) \mathbf{u}_e = \rho_e \mathbf{E} + \mathbf{j}_e \times \mathbf{B} - \nabla \cdot \mathbf{P}_e \quad (2)$$

→ rovnice pro pole

Hybridní model II

Využijeme:

- Ampérův zákon (limita $\omega \rightarrow 0$): $\mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B} / \mu_0$
- proud: $\mathbf{j} = \mathbf{j}_i + \mathbf{j}_e$
- kvazineutralita: $\rho_i + \rho_e = 0$
- nehmotné elektrony: $m_e \approx 0$

Rovnice pro elektrické pole:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\rho_i} \left(-\mathbf{j}_i \times \mathbf{B} + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} - \nabla \cdot \mathbf{P}_e \right) + \frac{\eta}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B}. \quad (3)$$

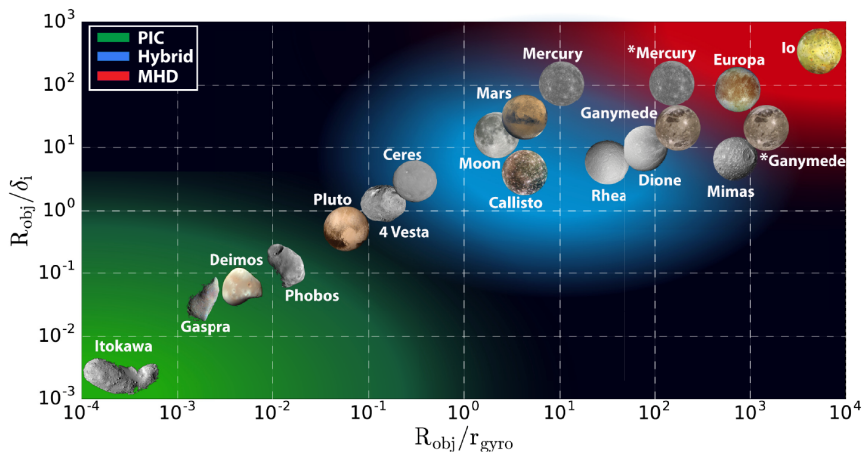
Hybridní model III

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\rho_i} \left(-\mathbf{j}_i \times \mathbf{B} + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} - \nabla \cdot \mathbf{P}_e \right) + \frac{\eta}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B}$$

Odtud časové posuny \mathbf{x} , \mathbf{v} , \mathbf{B} :

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \\ \frac{d\mathbf{x}}{dt} &= \mathbf{v}, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \end{aligned}$$

Kdy použít hybridní model?



Graf velikosti těles a platnost modelů [2]

Simulační jednotky

Jednotky

délka

čas

hustota

magnetické pole

$$\Lambda = \frac{c}{\omega_{pi}}$$

$$\Omega_i^{-1} = \frac{m_i}{eB_{SV}}$$

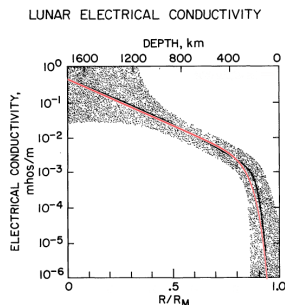
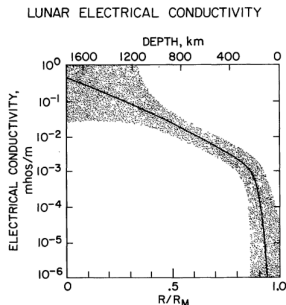
$$n_{SV}$$

$$B_{SV}$$

Důvody pro použití

- čas – praktické důvody: $\Delta t = 0,01\Omega^{-1}$
- délka $x/\Lambda \implies v_A = 1\Lambda \cdot \Omega_i$

Rezistivita Měsíce I



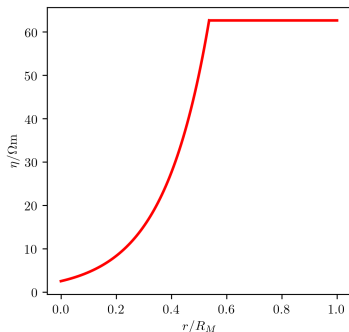
Vodivostní profil Měsíce [1]. (Pozn.: $\text{mhos/m} = \text{S m}^{-1}$)

Převod rezistivity

$$\eta(r) = \frac{n_{\text{sv}} q}{B_{\text{sv}}} 10^{0.4+2.6 \frac{A}{R_M} \frac{r}{A} + 9 \exp\left(20 \left(\frac{A}{R_M} \frac{r}{A} - 1\right)\right)} \mu_0 v_A^2 / \Omega_i$$

Rezistivita Měsíce II

problémy se stabilitou \implies nutno omezit: $\eta < 0,01\mu_0 v_A^2 / \Omega_i$



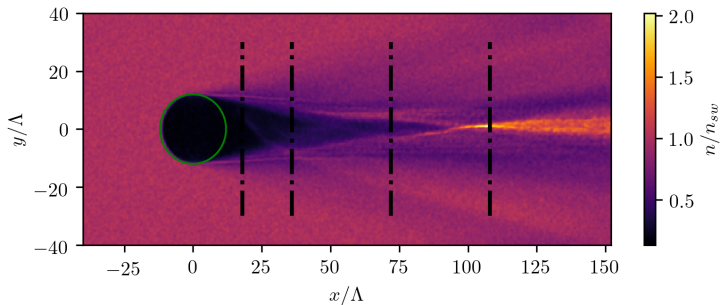
Model profilu rezistivity Měsíce vytvořený podle [1]

Parametry simulace

Parametr	Hodnota
Velikost magnetické indukce SV ¹	10 nT
Orientace magnetické indukce SV	$(\sqrt{2}/2, -\sqrt{2}/2, 0)^T$
Rychlost SV	5 v _A
Hustota plazmatu ve SV	10 cm ⁻³
Velikost buňky	0,4 λ × 0,4 λ × 0,4 λ
Počet makročástic na buňku	35

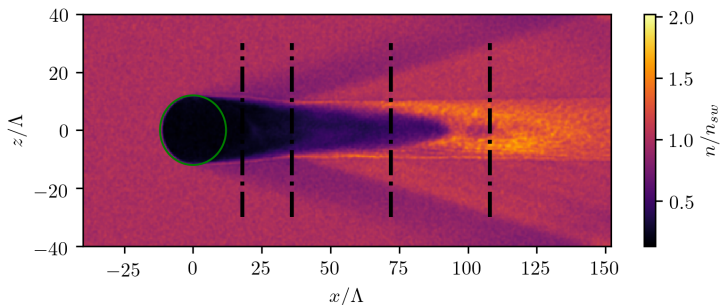
¹SV = sluneční vítr

Hustota protonů I



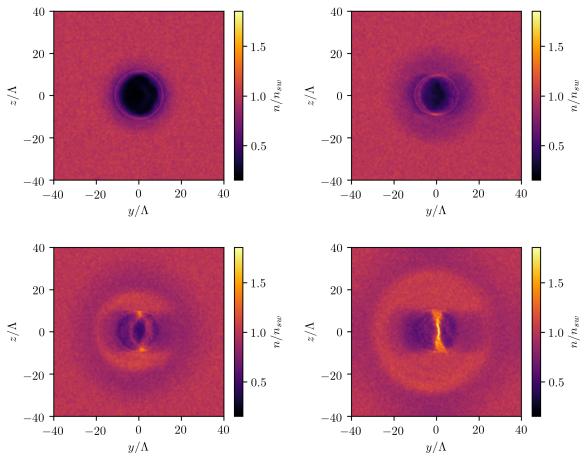
Hustota protonů: řez xy

Hustota protonů II



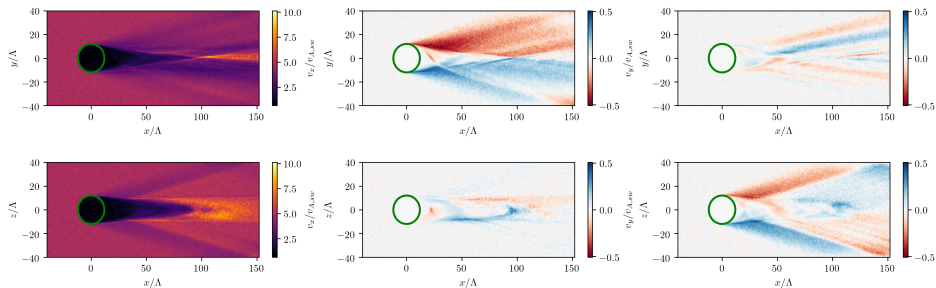
Hustota protonů: řez xz

Hustota protonů III



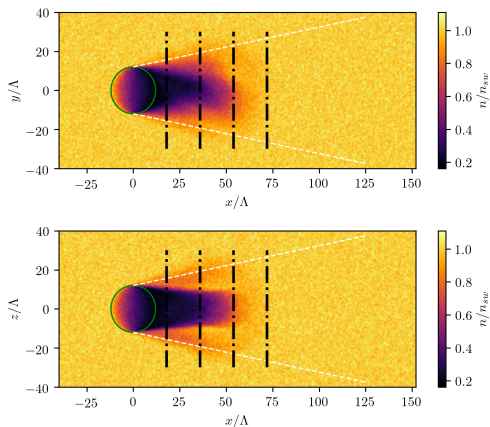
Hustota protonů: řezy yz pro $x = 1,5R_L$; $x = 3R_L$; $x = 6R_L$; $x = 9R_L$

Průměrná rychlost protonů



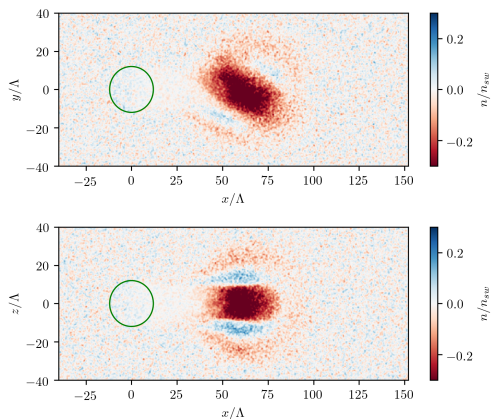
Rychlost protonů: řezy v rovinách xy , xz

Hustota protonů s modelem



Hustota protonů v simulaci s geologickým modelem ($t = 10\Omega^{-1}$)

Rozdíl






Rozdíl hustot protonů v simulacích s geologickým modelem a bez něj (pro různé časy)

Závěr

Co dále?

- 1 vyřešit problém z BP
 - zvýšit η_{\max} ,
 - nebo změnit ošetření vnitřku?
- 2 magnetické anomálie v kůře
- 3 rozšířit na Europu, Ganymed, Merkur
 - podpovrchový oceán
 - planetární dynamo

Zdroje

-  P. Dyal, C. W. Parkin, and W. D. Daily.
Structure of the lunar interior from magnetic field measurements.
Lunar Science Conference, 7th, Houston, Tex., 3:3077–3095, 1976.
-  Shahab Fatemi, Andrew R. Poppe, Gregory T. Delory, and William M. Farrell.
AMITIS: A 3D GPU-Based Hybrid-PIC Model for Space and Plasma Physics.
Journal of Physics: Conference Series, 837(1), 2017.
-  Margaret G. Kivelson and Christopher T. Russell.
Introduction to Space Physics.
Cambridge University Press, 1995.