

A Naprendszer fizikája - Modellek

FACSKÓ Gábor¹²

¹Wigner Fizikai Kutatóközpont, Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály, Budapest

²Milton Friedman Egyetem, Informatika Tanszék, Budapest

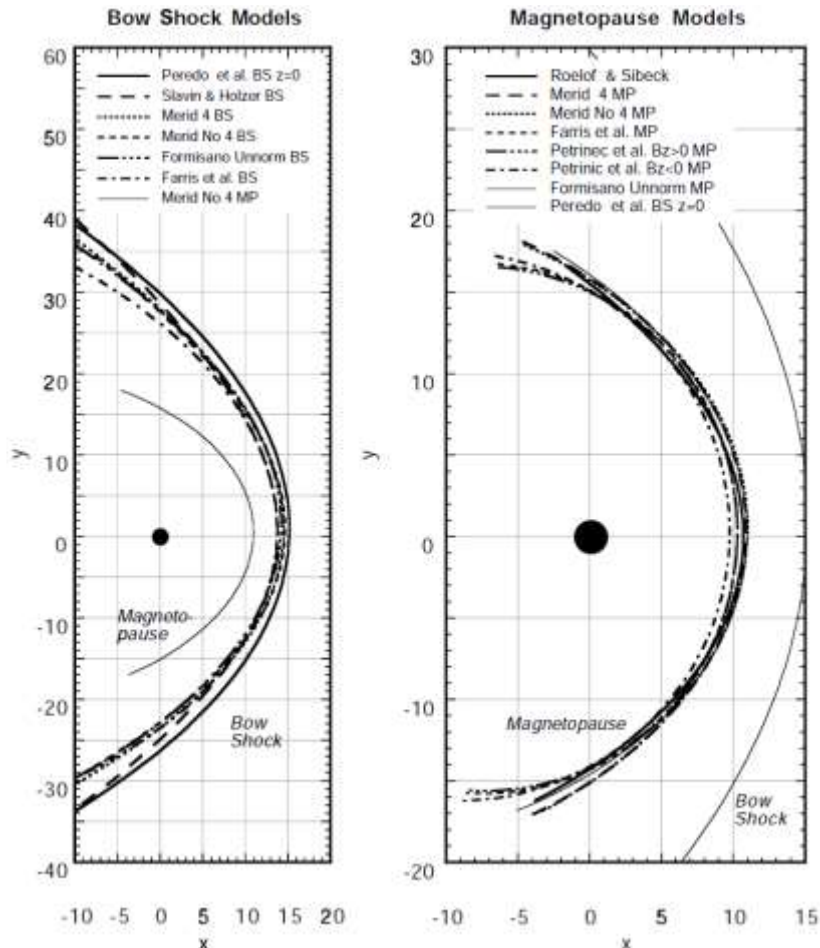
facsko.gabor@wigner.hu

**A Naprendszer fizikája egyetemi előadás, Wigner Fizikai Kutatóközpont,
2023. november 30., Budapest**

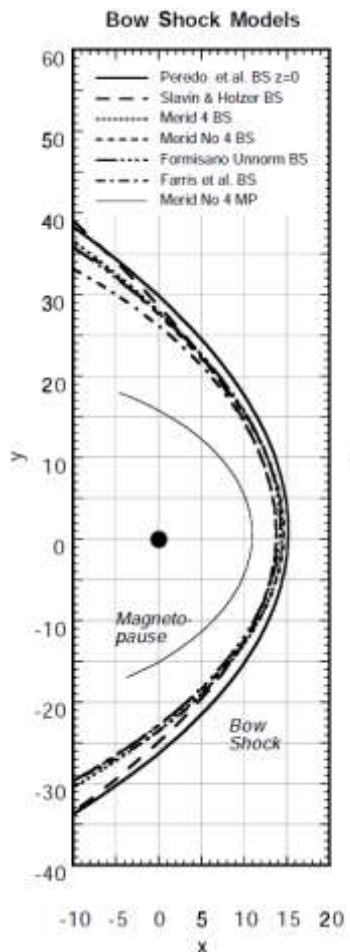
- Űrfizika \neq csillagászat \neq asztrofizika
- Képesek vagyunk mérni a közegben, kísérleteket végezni, megismételni – az űrszonda pályája mentén
- Fogalmunk sincsen, hogy milyen viszonyok uralkodnak akár csak néhány ezer km-vel távolabb a pályától
- Modelleket kell használnunk, lehetőleg fizikai alapú modelleket, bár pl. a tapasztalati modellek is hatékonyak

- Nagyon hatékony és kezelhető eszköznek számítanak az tapasztalati (empirikus) modellek.
- Nagy számú űrszondás mérések alapján egy leíró képletet illesztnek az adott paraméterre.
- Ezeket a modelleket folyamatosan karban kell tartani, fejleszteni és az illesztés alapjául szolgáló adatbázist folyamatosan bővíteni kell.
- Nagyon sok jelenségre, nagyon sokféle modellt fejlesztettek

Empirikus modellek: lökéshullám és magnetopauza modellek



- Nagy számban összegyűjtik azt, hogy egy adott szonda mikor metszi a lökéshullámot
- Feljegyzik a koordinátákat, a napszél paramétereit és a geomágneses indexet.
- A hasonló értékű paraméterekhez tartozó koordinátákra egy három dimenziós görbét leíró sort illesztnek, majd a sor együtthatóit származtatják a napszél paramétereiből és a geomágneses indexből
- Sok munkával jár, azonban egy egyszerűen használható eszközt ad a földi lökéshullám és a magnetopauza helyének meghatározására.
- A modellek gyorsan reagálnak a napszél paramétereinek változásaira.
- Fizikát nem tartalmaznak és pontosságuk csak ott jó, ahol van elég mérés.
- Így például lökéshullám és a magnetopauza napközeli pontja környékén a leíró modellek pontosak, azonban a flankben a pontosságuk sokkal gyengébb
- **FONTOS!!! Nélkülük nem tudunk adatelemzést végezni a BS és a MP előtt.**

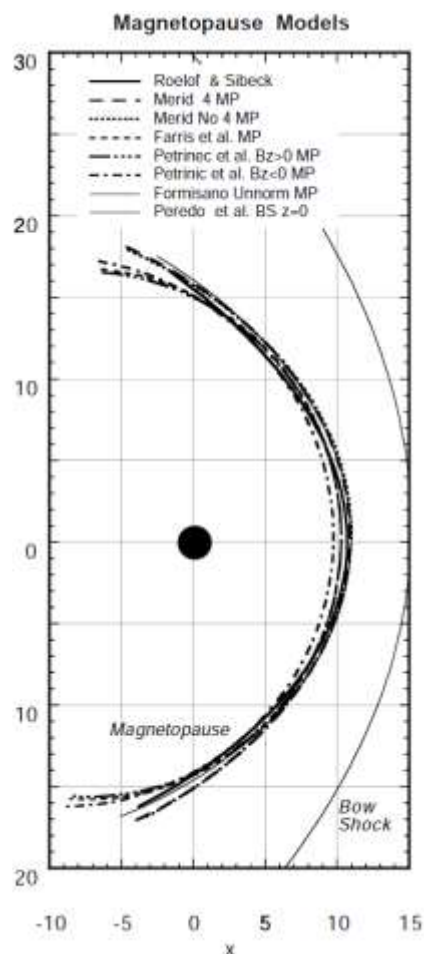


- Peredo et al. (1995) lökéshullám modell: 17 űrszonda 1392 lökéshullám kereszteződését használták fel arra, hogy feltérképezzék a Föld lökéshullámának a 3D-s alakját és helyzetét, továbbá ezeknek a függését a napszél és a bolygóközi mágneses tér adataitól.
- A tapasztalati modellek megadják a lökéshullám átlagos helyét és formáját a napszélnyomás, a bolygóközi mágneses tér és az Alfvén-Mach (M_A) értékek függvényében
- Az egyes lökéshullám keresztezések helyeit áttranszformálták egy kicsit módosított Geocentric Solar Ecliptic (GSE) koordináta-rendszerbe, hogy eltüntessék a Föld pálya menti mozgása által okozott asszimmetriákat
- A napszél dinamikus nyomásának változása által okozott variációkat úgy vették figyelembe, hogy csak azokat az átmeneteket vették figyelembe, amelyek idején a napszél dinamikus nyomása 3.1 nPa volt
- 3D-s lökéshullám felületeket illesztettek és megvizsgálták a függésüket a hangsebességből számolt (M), az Alfvén- (M_A) és a magnetoszonikus (M_S) Mach számoktól
- Az Alfvén-Mach szám adja a legjobb illeszkedést a lökéshullám felületekhez a legkisebb négyzetek módszerével.

Götz Paschmann and Patrick W. Daly. Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. ISSI Scientific Reports Series SR-001, ESA/ISSI, Vol. 1. ISBN 1608-280X, 1998. *ISSI Scientific Reports Series*, 1, January 1998.

Peredo, M., J. A. Slavin, E. Mazur, and S. A. Curtis. Three-dimensional position and shape of the bow shock and their variation with Alfvénic, sonic, and magnetosonic Mach numbers and interplanetary magnetic field orientation. *Journal of Geophysical Research*, 100(A5):7907-7916, May 1995. doi: 10.1029/94JA02545.

Empirikus modellek: magnetopauza modellek

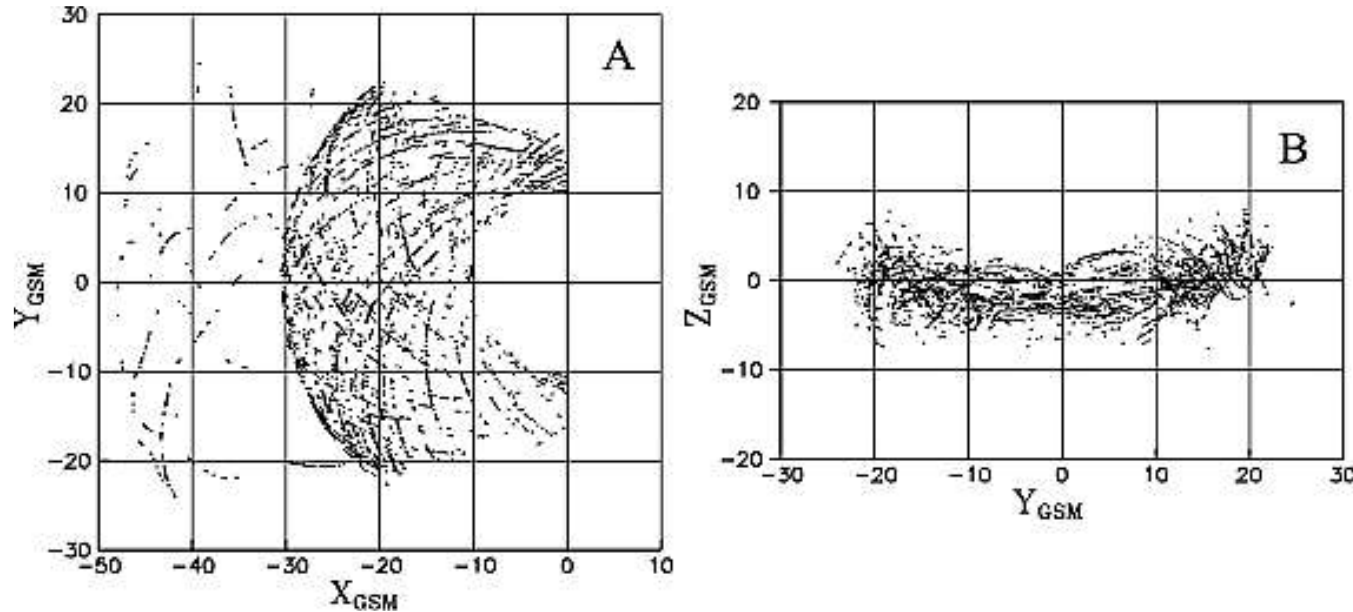


- Shue et al. (1997) magnetopauze modellje az $r = r_0 [2 / (1 + \cos \theta)]^\alpha$ formulát illesztette az International Sun-Earth 1 és 2, az Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers/Ion Release Module és az Interplanetary Monitoring Platform (IMP McDowell, 2002) szondák magnetopauza áthaladásaira
 - r_0 a magnetopauza orr pontjának távolsága a Föld középpontjától
 - α pedig a csóva kitérése
 - Az r érték egy adott szögnél (θ) a Nap-Föld vonal és az r iránya között
- Az r_0 változik a bolygóközi mágneses tér z komponense (B_z) függvényében és szakadása van a $B_z=0$ nT értéknél.
- Az r_0 illesztésének pontossága csökken a bolygóközi mágneses tér B_z komponensének a déli irány ú növekedésével.
- Az r_0 illesztésének pontossága nő a bolygóközi mágneses tér egyre nagyobb északi irányú B_z értékeivel.
- Az α szög illesztésének pontossága monoton nő a csökkenő B_z értékekkel
- A napszél dinamikus nyomása szintén hatással van az r_0 -ra és az α -ra
- A napszél dinamikus nyomása és az r_0 a $-1 = 1/(6.6 \pm 0.8)$ hatványfüggvény szerint függenek össze. Az α paraméter legjobb illeszkedése kicsit javul a növekvő dinamikus napszélnyomással, mert a dinamikus napszélnyomásnak van némi hatása a fluxus transzferre a nappali oldalról az éjszakai oldalra
- A magnetopauza méretének és alakjának a napszél dinamikus nyomásától és a B_z -től való függését paraméterillesztéssel határozták meg
- **FONTOS!!! Megadja, hogy a geostacionárius pályán lévő szondák mikor találhatók a mágneses burookban**

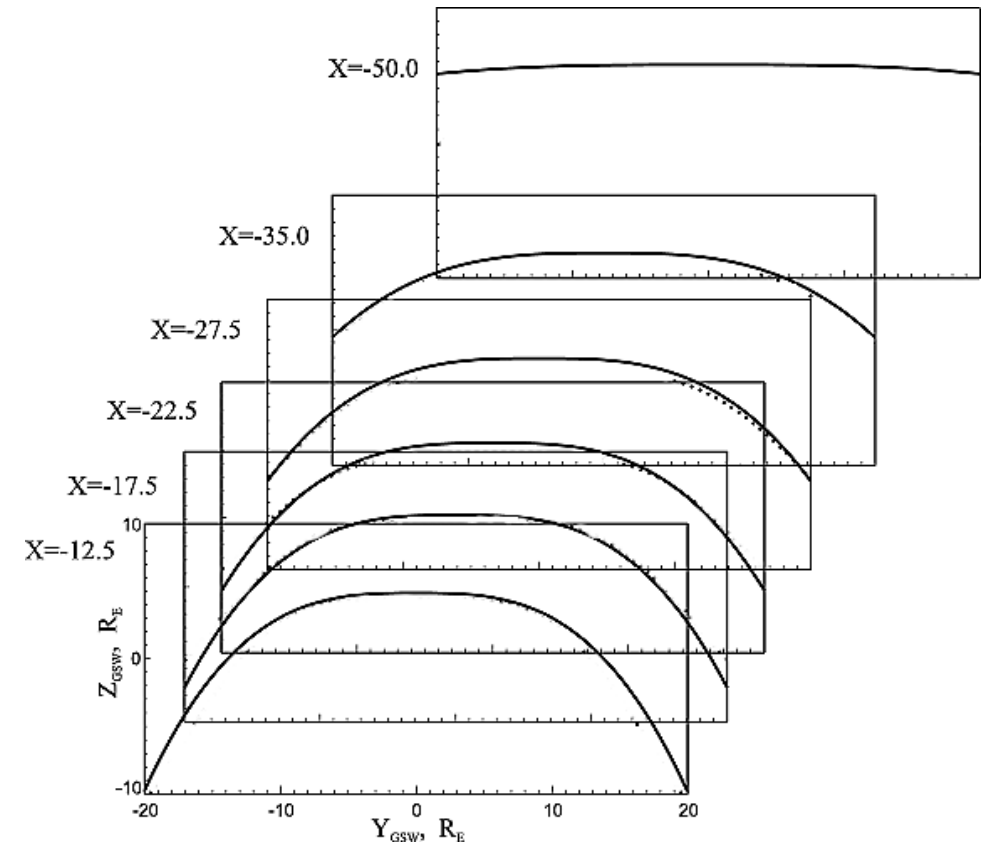
Empirikus modellek: geomágneses csóva modellek



A semleges lepel alakjának 3D-s illusztrációja



A központi plazma lepel (central plasma sheet; CPS) eloszlása az adatsorokban: (a) az egyenlítői (Geocentric Solar Magnetospheric; GSM XY) síkban és (b) a csóva Nap-Föld vonalára merőleges (GSM YZ) síkban.



N. A. Tsyganenko and T. Mukai. Tail plasma sheet models derived from Geotail particle data. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 108(A3):1136, March 2003. doi: 10.1029/2002JA009707.

N. A. Tsyganenko and D. H. Fairfeld. Global shape of the magnetotail current sheet as derived from Geotail and Polar data. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 109(A3):A03218, March 2004. doi: 10.1029/2003JA010062.

- A földi mágneses tér leírására is empirikus modelleket használnak.
- International Geomagnetic Reference Field (IGRF):

$$\mathbf{B}(r, \theta, \phi, t) = -R \nabla \sum_{N_{max}}^{n=1} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n [g_n^m(t) \cos m\phi + h_n^m(t) \sin m\phi] P_n^m \cos \theta,$$

- ahol r a geocentrikus föld sugár
- a θ geocentrikus kiegészítő szélesség
- a ϕ hosszúság
- t pedig az idő.
- $R = 6371.2\text{km}$ a referenciasugár
- P_n^m az m -ed fokú, n -ed rendű asszociált Legendre függvény
- g_n^m és h_n^m a belső Gauss együtthatói
- Ez az utóbbi kettő érték időfüggő, emiatt az IGRF modellt öt évente frissítik
- A jelenlegi modellekben az N_{max} értéke 13, ami 195 Gauss együttható használatát jelenti

Nikolett Biró. Statisztikus plazmaszféra-modell kifejlesztése gépi tanulással. Master's thesis, Eötvös Loránd Tudományegyetem, 117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/a, május 2021. Geozikus MSc., Űrkutató-távérzékelő szakirány.

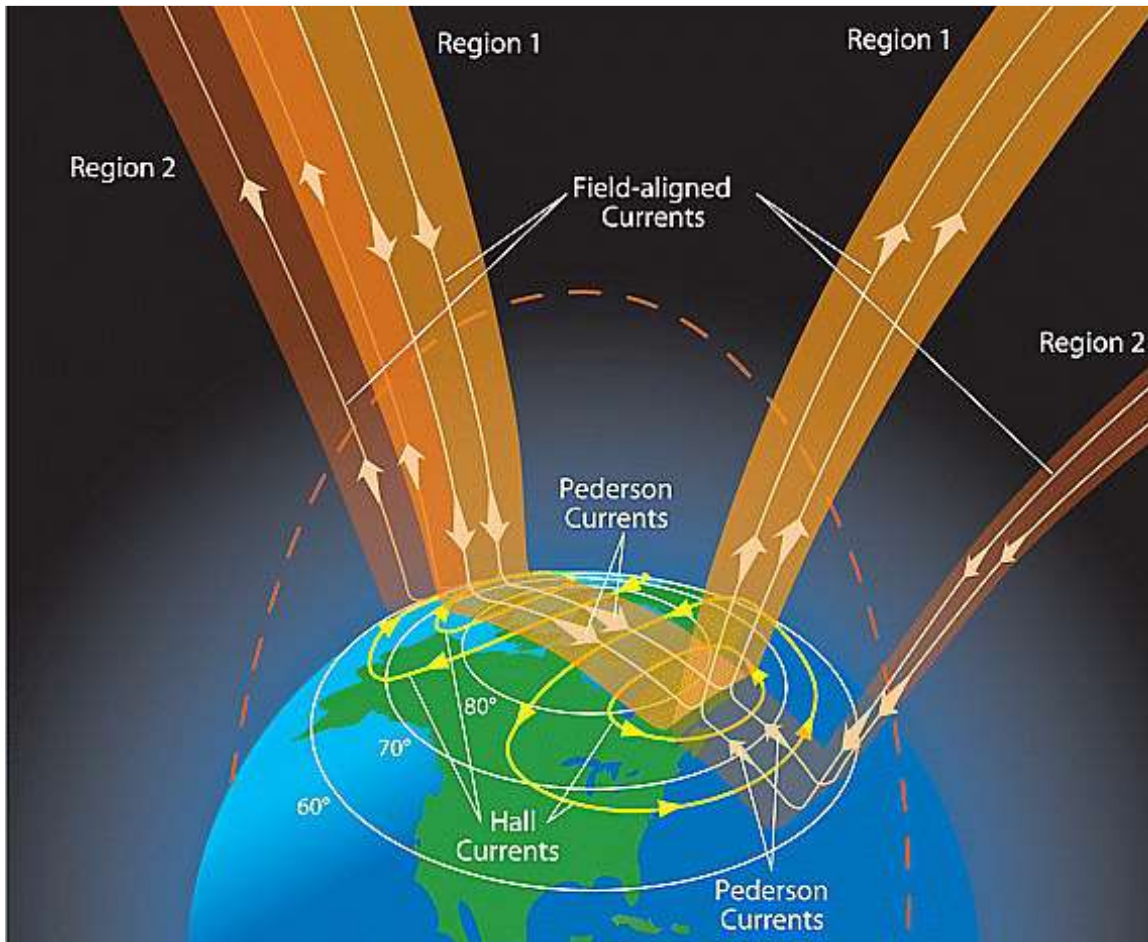
N. A. Tsyganenko. Global quantitative models of the geomagnetic field in the cislunar magnetosphere for different disturbance levels. *Planetary and Space Science*, 35(11):1347-1358, November 1987. doi: 10.1016/0032-0633(87)90046-8.

N. A. Tsyganenko. A solution of the Chapman-Ferraro problem for an ellipsoidal magnetopause. *Planetary and Space Science*, 37(9):1037-1046, September 1989. doi: 10.1016/0032-0633(89)90076-7.

N. A. Tsyganenko. Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field conmed within a realistic magnetopause. *Journal of Geophysical Research*, 100(A4):5599-5612, April 1995. doi: 10.1029/94JA03193

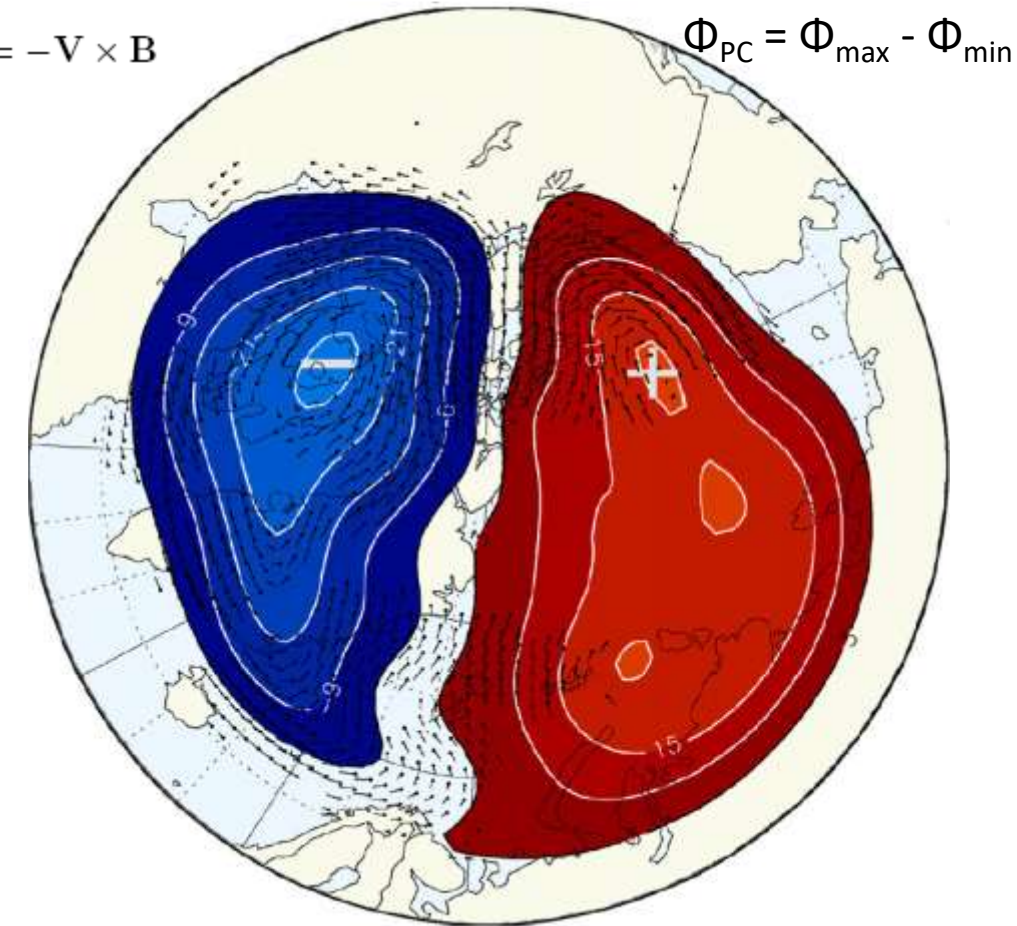
Empirikus modellek: árammodellek

Az ionoszférikus áramrendszerek vázlata



$$-\nabla_{\perp} \phi = \mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}$$

A körüljáró plazma
 Super Dual
 Auroral Radar
 Network
 (SuperDARN)
 magas
 frekvenciájú (high
 frequency, HF)
 radar
 észleléseiből
 származtatott
 konvenció
 elektromos
 potenciál a magas
 szélességű
 ionoszférában. A
 cross polar cap
 potential (CPCP)
 vagy PC) PC a +
 és - jellel
 címkézett szélső
 értékek
 különbsége.



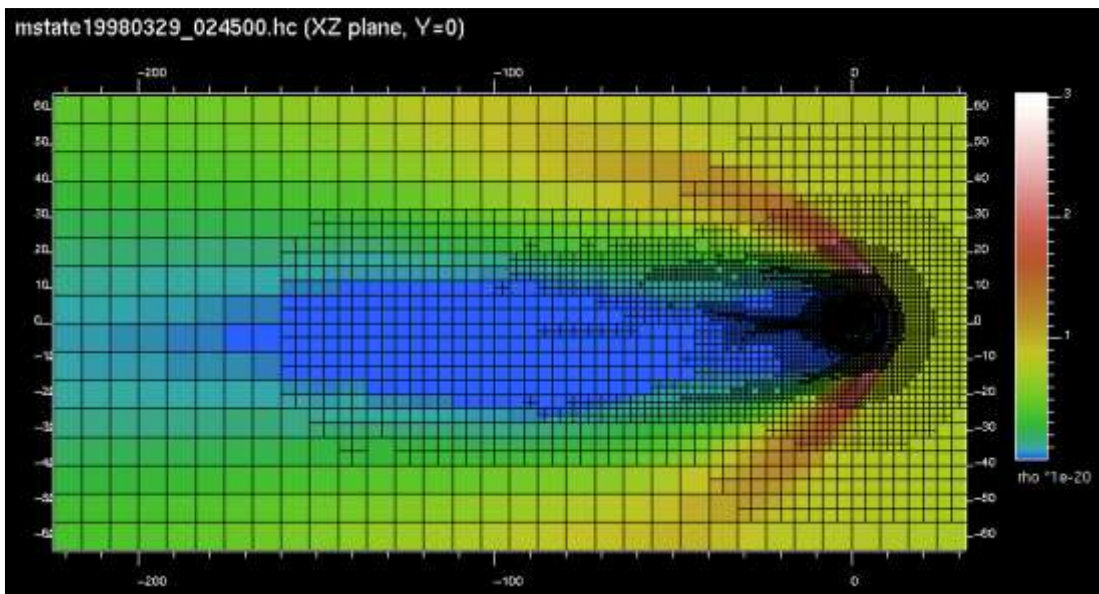
G. Le, J. A. Slavin, and R. J. Strangeway. Space Technology 5 observations of the imbalance of regions 1 and 2 field-aligned currents and its implication to the cross-polar cap Pedersen currents. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 115(A7):A07202, July 2010. doi:10.1029/2009JA014979.

Simon G. Shepherd. Polar cap potential saturation: Observations, theory, and modeling. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69(3):234-248, March 2007. doi: 10.1016/j.jastp.2006.07.022.

- A plazma modellezése bonyolult és számításigényes -> különféleközelítések
- A magnetohidrodinamikai (MHD) kódokban mágnesezett plazma található
 - Egy, vagy több folyadék
 - Mágnesezett bolygók vizsgálata
 - A számításigényük kicsi
 - A kinetikus jelenségeket nem tudják visszaadni
- A hibrid kódokban az ionokat részecskeként, az elektronokat töltéskiegyenlítő folyadékként kezeli
 - Légkörrel rendelkező, illetve azt nélkülöző mágnesezetlen bolygók, illetve gyenge mágnesesterű objektumok (pl. a Merkúr) vizsgálatára használhatóak
 - Képesek visszaadni a kinetikus jelenségeket, így pl. a lökéshullámok mikrofizikája is tanulmányozható velük
 - A számításigényük aránylag alacsony, akár asztali munkaállomásokon is lefutnak
 - Elmosódó határok

- A teljes részecske kódok az elektronokat és az ionokat is részecskeként kezelik.
 - Az elektronok kis tömege miatt nagyon nagy időfelbontással kell futtatni őket, így nagyon számításigényesek.
 - Létezik belőlük globális kód, de igazán jól a plazma mikrofizikájának a tanulmányozására lehet használni őket.
 - Párhuzamos szuperszámítógépen futnak igazán jól
 - A GPU-k nem igazán alkalmasak a futtatásukra korlátozott utasításkészletük és memóriájuk miatt
- A Vlasov-Maxwell egyenletek megoldása eloszlás függvényeket ad a részecskékre.
 - Egyetlen szabad hozzáférésű hibrid változata létezik, ahol az elektronok töltés kiegyenlítő folyadékként viselkednek
- Minden kódot különféle rácson oldanak meg.
 - A rács lehet adaptív, azaz a felbontása változik az érdekesebb területeken (pl. a lökéshullámnál)
 - Használhat egyenes, vagy görbevonalú koordinátarendszereket.
 - Futási időt csökkentő trükk, ha több (ezer) részecskét egybegyűrünk egyetlen makrorészecskévé, amely egyben tartalmazza az alkotó részecskék tömegét és töltését.
 - Ez csak hibrid és teljes részecske kódokra alkalmazható

- Lokális és globális kódokra
 - Lokális kódok: mikrofizika
 - Globális kódok: bolygó-napszél kölcsönhatás
 - Elmosódó határok
- Fúziós plazmák modellezésére léteznek nagyon furcsa modellek
 - Több folyadékos rendszer, hidrogén hibrid, hélium MHD
 - Stb.

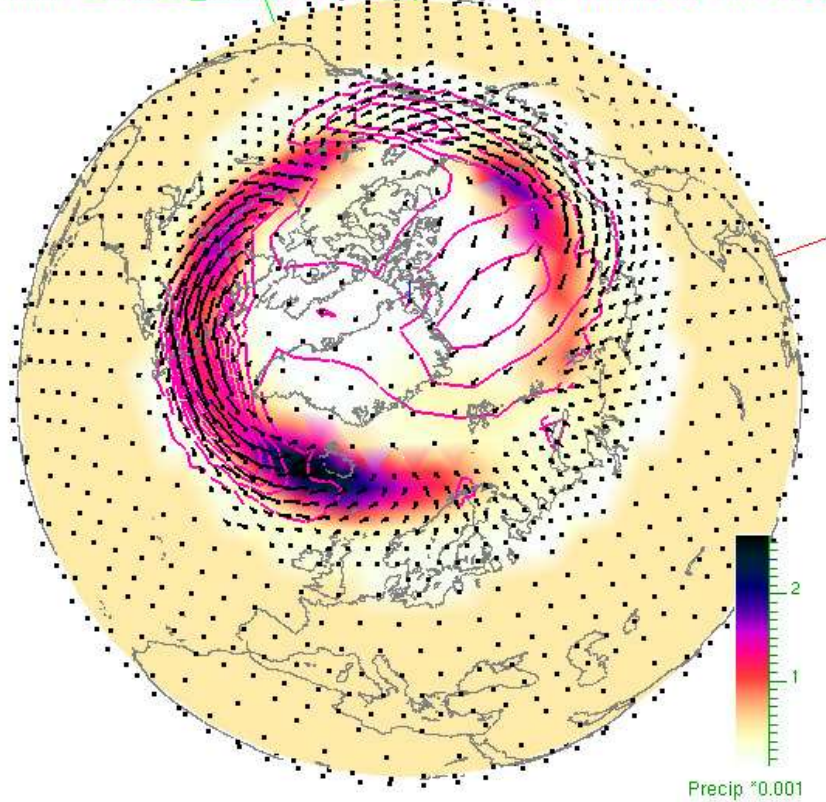


A GUMICS-4 szimulációs régiójának GSE XZ síkbeli metszete $X_{\text{GSE}} = [-224; +32] R_{\text{Föld}}$ és $Z_{\text{GSE}} = [+64; +64] R_{\text{Föld}}$ tartományban. A sűrűséget a színek jelölik. A fekete vonalak a számításokhoz használt rácsot jelentik. A kód adaptív, a rács az érdekesebb részekben besűrűsödik, azaz a szimuláció felbontása $2 R_{\text{Föld}}$ -ről akár $0.25 R_{\text{Föld}}$ -re növekedhet.

- A magnetohidrodinamikai (MHD) közelítése mágnesezett folyadéknak tekinti a plazmát.
- Jól adja vissza a mágnesezett bolygók lökeshullámát, a magnetopauzát
- Csatolt belső magnetoszféra és ionoszféra modellekkel a sarki fény tevékenységet is meg lehet jósolni.
- A modellek térbeli felbontása kritikus a használhatóságuk szempontjából
 - Descartes-féle koordináta-rendszerek
 - Adaptív kódok
 - Görbevonalú
- Európában a legrégebben használt MHD modell a Grand Unified Magnetosphere-Ionosphere Coupling Simulation (GUMICS-4)
 - A kód nem párhuzamosított
 - Geocentric Solar Ecliptic (GSE) rendszerben dolgozik
 - SI (Système International d'Unités) mértékegységeket használ
 - A szimuláció a napszélben, a mágneses burokokban, a magnetoszférában dolgozik.
 - Bemeneti paraméterei
 - a napszél mágneses terének komponensei,
 - a napszél sebesség komponensek,
 - a sűrűség
 - a hőmérséklet.
 - A földi mágneses teret dipólusként kezeli, ennek hajlásszöge a szimuláció elején állítható,
 - 10.7 cm-es szoláris rádiós fluxus (Solar Radio Flux; F10.7
 - a háttér mágneses tér értéke.
 - A bemenet származhat mérésekből, vagy lehet mesterséges is
 - A szimuláció kimenete az MHD plazma paraméterek
 - A magnetoszférát egy 2D-s elektrosztatikus ionoszféra modellhez csatolták két irányban.
 - A sarki fény régióban 180km a felbontása
 - Megadja az ionoszféra vezetőképességét, áramait, a precipitációt és az elektromos potenciált

A kép forrása: <http://gumics.fmi.kuvat/g4-hcvis-koko-hila.png>

istate19980329_025000.tri: Precip. / Joule / J, Theta=10, Phi=1690



A GUMICS ionoszféra modulja. A színek a precipitációt, a nyilak az áramokat jelenítik meg. A fekete pontok a számításhoz használt háló csomópontjai.

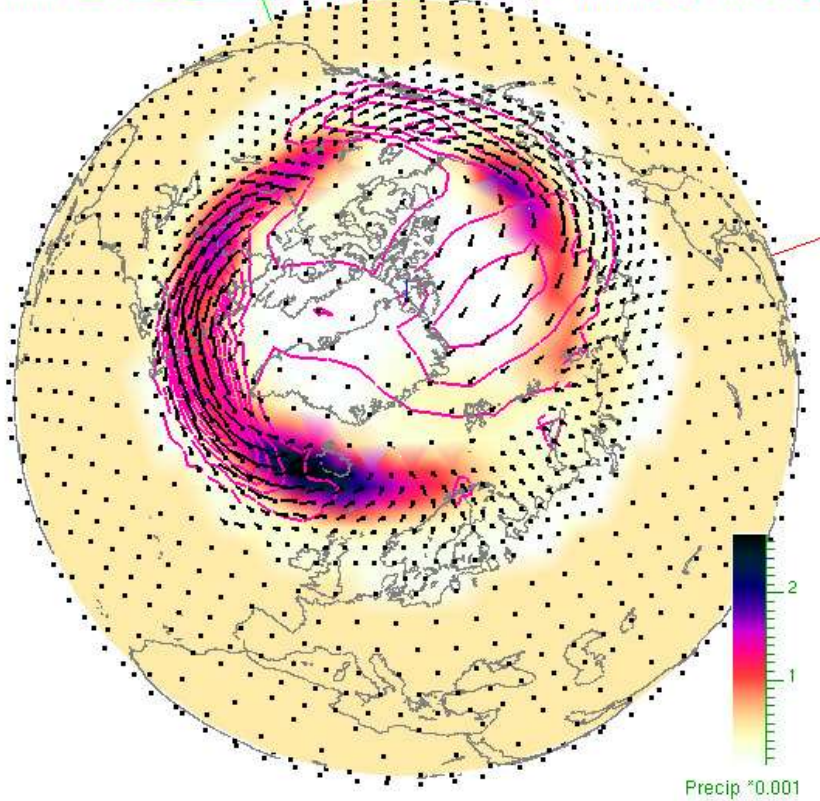
- A GUMICS ionoszféra modulja kiszámítja a vezetőképességet, az elektromos potenciált és az áramokat
- Az ionoszféra egy gömbfelület a GUMICS-ban, amelyen sugár irányban integráljuk a mágneses mező irányában folyó áramokat (Field-Aligned Current; FAC):

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = [\Sigma \cdot [-\nabla\Phi + \mathbf{v}_n \times \mathbf{B}]] = -\mathbf{j}_{\parallel} (\hat{\mathbf{b}} \cdot \hat{\mathbf{r}})$$

- Ahol Σ a magasság szerint integrált vezetési tenzor,
- Φ az ionoszféra elektromos potenciálja,
- \mathbf{v}_n a semleges részecskék szelének sebessége,
- \mathbf{j}_{\parallel} a mező irányú áram (field-aligned current; FAC)
- $\hat{\mathbf{b}} \cdot \hat{\mathbf{r}}$ a mágneses tér és a sugárirány bezárt szögének a koszinusza

A kép forrása: <http://gumics.fmi./kuvat/ionosf.png>

istate19980329_025000.tri: Precip. / Joule / J, Theta=10, Phi=1690



A GUMICS ionoszféra modulja. A színek a precipitációt, a nyilak az áramokat jelenítik meg. A fekete pontok a számításhoz használt háló csomópontjai.

- A magasság szerint integrált vezetési tenzort az elektromos térre gyakorolt hatása alapján határozzuk meg:

$$\Sigma \cdot \mathbf{E} = \Sigma_P \mathbf{E} + \Sigma_H \hat{\mathbf{b}} \times \mathbf{E},$$

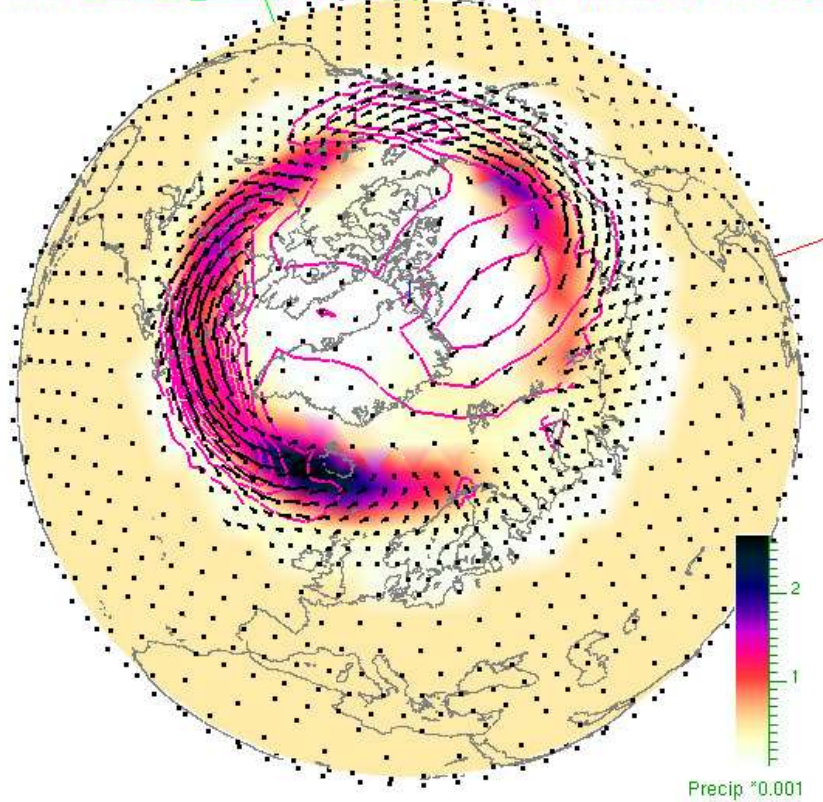
- ahol Σ_P és Σ_H a Pedersen és a Hall vezetőképesség.
- A Pedersen vezetőképesség az elektromos térrel párhuzamos vezetőképesség.
- Az elektromos térre és a földmágneses mezőre merőleges vezetőképesség pedig a Hall vezetőképesség
- Az ionoszférát egy háromszög alapú adaptív rácson diszkrétizálja a kód, amelynek a felbontása 360km a sarki kürtőben és 180km az sarki fény oválisnál
- Az előző slide egyenletét a konjugált gradiens algoritmussal oldja meg a kód
- Nincs határfeltétel, a szoláris EUV sugárzásra, az elektron precipitációra és a mező menti áramokra van szüksége a modulnak.

A kép forrása: <http://gumics.fmi./kuvat/ionosf.png>

A magnetohidrodinamikai modellek (cont'd)



istate19980329_025000.tri: Precip. / Joule / J, Theta=10, Phi=1690



A GUMICS ionoszféra modulja. A színek a precipitációt, a nyilak az áramokat jelenítik meg. A fekete pontok a számításhoz használt háló csomópontjai.

- Minden negyedik másodpercben fut le a modul
- Az szoláris EUV értéke állandó, de a Nap magasságától függ
- Moen and Brekke (1993) tapasztalati formuláját használja a kód
- A formula az F10.7 rádió fluxust használja, amelynek az értéke $100 \times 10^{-22} \text{ W/m}^2$
- Az elektron precipitáció a GUMICS magnetoszférikus tartományából származik
- Az ütközési frekvenciákból számítják Hedin (1991) módszere alapján
- A 3D-s vezetőképességet magasság szerint integrálja a kód
- A teljes vezetőképességet a kód az elektron precipitáció és a szoláris UV alapján számolja ki a program:

$$\Sigma_{P,H} = \sqrt{(\Sigma_{P,H}^{ele})^2 + (\Sigma_{P,H}^{UV})^2}$$

- ahol $\Sigma_{P,H}^{ele}$ és $\Sigma_{P,H}^{UV}$ az elektron precipitáció és a szoláris UV sugárzás hozzájárulásai

A kép forrása: <http://gumics.fmi./kuvat/ionosf.png>

P. Janhunen, M. Palmroth, T. Laitinen, I. Honkonen, L. Juusola, G. Fackó, and T. I. Pulkkinen. The GUMICS-4 global MHD magnetosphere-ionosphere coupling simulation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 80:4859, May 2012. doi:0.1016/j.jastp.2012.03.006.

A magnetohidrodinamikai modellek (cont'd)



- A GUMICS-ban a magnetoszféra modul elektron precipitációt és FAC-t küld az ionoszféra modulnak
- az ionoszféra meghatározza az elektromos potenciált a magnetoszféra modul belső határánál
- A FAC-et mágneses tér rotációjából számítja a kód.
- Az elektron precipitációt termikus elektron fluxusként számítja ki a kód az MHD plazmából
- Ezeket a számított mennyiségeket egy dipólus mentén levetítik az ionoszféra modulra, amely felhasználja az ionoszférikus áramok és a potenciál kiszámításához

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{p} \quad \text{MHD egyenletek:} \quad (11.7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{p}\mathbf{p}}{\rho} + \left(P + \frac{B^2}{2\mu_0} - \frac{B_0^2}{2\mu_0} \right) \mathbf{I} - \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B}\mathbf{B} - \mathbf{B}_0\mathbf{B}_0) \right] \quad (11.8)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[\left(U_1 + P + \frac{B_1^2}{2\mu_0} \right) \frac{\mathbf{p}}{\rho} - \frac{\mathbf{B}_1 (\mathbf{p} \cdot \mathbf{B}_1)}{\mu_0 \rho} + \frac{\mathbf{B}_1 \times (\mathbf{p} \times \mathbf{B}_0)}{\mu_0 \rho} \right] \quad (11.9)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}_1}{\partial t} = \nabla \times \left(\frac{\mathbf{p} \times \mathbf{B}}{\rho} \right). \quad (11.10)$$

- A GUMICS elsőrendű véges elem módszert használ az egyenletek megoldására
- Az GUMICS elsődleges változói
 - a ρ sűrűség,
 - a $\mathbf{p} = \rho \mathbf{v}$ impulzus sűrűség,
 - az U_1 teljes energia sűrűség a dipólus nélkül
 - A \mathbf{B}_1 a mágneses mező a dipólus nélkül
- A mágneses mező az analitikus számolt mező és egy származtatott mező összege: $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1$
- Így nem kell a dipólus járulékát ($\mathbf{B}_0^2/2\mu_0$) levonni a nyomás kiszámításánál, amely nagyon magas a Föld közelében
- A dipólus hozzájárulása a teljes energiasűrűségtől külön kezelendő: $U = U_0 + U_1$
- A nyomást a $P =$ képlettel számolja a kód
- Minden más mennyiség leszámaztatható az elsődleges mennyiségekből, ezért a GUMICS csak ezeket számolja ki

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{p} \quad (11.7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{p}\mathbf{p}}{\rho} + \left(P + \frac{B^2}{2\mu_0} - \frac{B_0^2}{2\mu_0} \right) \mathbf{I} - \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B}\mathbf{B} - \mathbf{B}_0\mathbf{B}_0) \right] \quad (11.8)$$

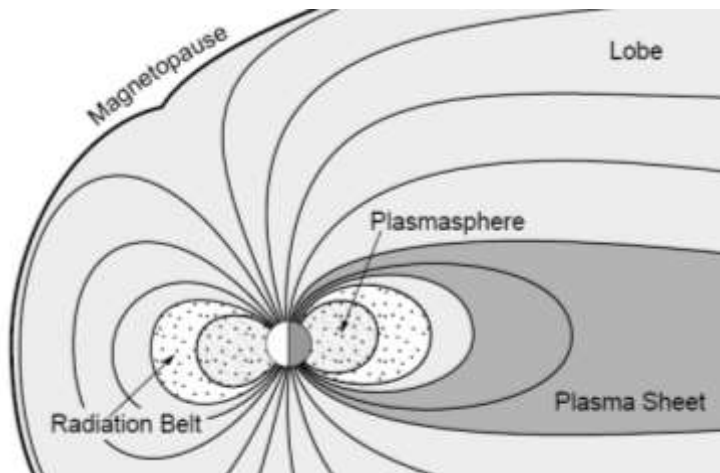
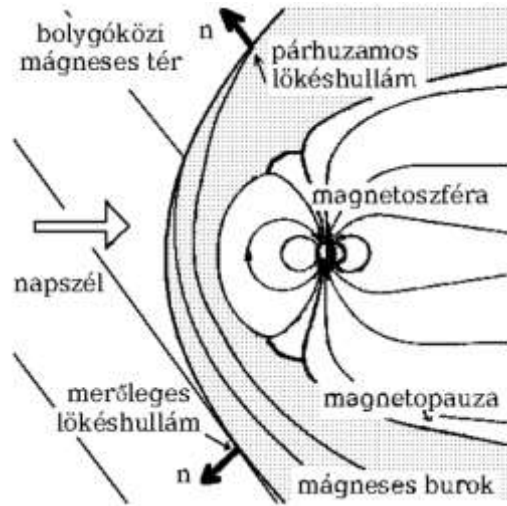
$$\frac{\partial U_1}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[\left(U_1 + P + \frac{B_1^2}{2\mu_0} \right) \frac{\mathbf{p}}{\rho} - \frac{\mathbf{B}_1 (\mathbf{p} \cdot \mathbf{B}_1)}{\mu_0 \rho} + \frac{\mathbf{B}_1 \times (\mathbf{p} \times \mathbf{B}_0)}{\mu_0 \rho} \right] \quad (11.9)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}_1}{\partial t} = \nabla \times \left(\frac{\mathbf{p} \times \mathbf{B}}{\rho} \right). \quad (11.10)$$

A fenti képletek a tömegmegmaradás, Newton második törvénye nyomásgradienssel és Lorentz erővel, az energiamegmaradás és a Faraday törvény egyenletei.

- Az egyenleteket diszkrétizálták és elsőrendű véges elem módszerrel oldják meg.
- Minden diszkrét téglatest tartalmazza a térbeli átlagát a mennyiségeknek, a megoldó algoritmusok pedig a fluxusokat adják meg a téglatestek felszínén keresztül, amelyet a téglatest tartalmához adnak.
- A GUMICS elsődleges megoldó módszere Roe (1981) eljárása
- Ez a módszer fizikailag értelmetlen köztes állapotokat adhat, pl. negatív nyomás, vagy sűrűség
- Amikor ez bekövetkezik a Roe (1981) eljárást felfüggeszti a kód és a mindig fizikai Harten et al. (1983) eljárást használja a program arra a téglatestre és időlépésre

A magnetohidrodinamikai modellek (cont'd)



- Jó megoldásokat kapunk, ott ahol az MHD közelítés érvényes
- A sugárzási övek, a plazmaszféra és a gyűrűáram tartományára az MHD közelítés nem érvényes, itt külön kódok futnak
- A régiók határára kiszámítanak olyan mennyiségeket, amelyekre a másik kódnak szüksége van. Ezt a másik kód beolvassa, majd kiszámítja azokat a mennyiségeket, amelyre az első kódra szüksége van. Ez a kétirányú csatolás
- Amikor egy helioszférikus kód kiszámolja a napszél adatait odáig, ahol a globális MHD kód számításai kezdődnek. A globális MHD kód nem ad semmit a helioszférikus kódnak, hiszen a napszél szupermagnetosónikus, az információ a magnetoszféra felé terjed, nem a napszéllel szemben. Ez az egy irányú csatolás
- A geomágneses csóvában és magnetopauzájánál mágneses átcsatolódás (rekonnekció) játszódik le, amit jobb hibrid, vagy teljes részecske kódokkal vizsgálni

- A GUMICS-4 mellett sok más MHD kód létezik
 - A Block-Adaptive-Tree-Solarwind-Roe-Upwind-Scheme (BATS-R-US) egy párhuzamos kód, amelyet sokféle belső magnetoszféra kóddal csatoltak
 - A Lyon-Fedder-Mobarry (LFM) egy párhuzamos, de nem görbe vonalú kód
 - A Grid Agnostic MHD for Extended Research Applications (GAMERA) az LFM alapokon újra kifejlesztett Descartes koordinátarendszert használó nem adaptív hálójú kód
 - Open Geospace General Circulation Model (OpenGGCM) az University California Los Angeles (UCLA)-n Jim Räder által fejlesztett kód.
- Ezek a kódok nagyjából ugyanazokat az egyenleteket oldják meg nagyon hasonló módszerrel, mégis különböző eredményeket adnak.
- Annak tisztázása, hogy ezek az eredmények hol és mennyire valóságúak, továbbá a kódok összehasonlítása a **validáció**
- Ennek a tevékenységnek a zászlós hajója a Geospace Environment Modeling (GEM; <https://gem.epss.ucla.edu/>) közössége
- Időről-időre kampányt szerveznek, egy-egy esemény modellezésére
- A résztvevők eredményeit pedig összehasonlítják a földi és űrszondás mérésekkel, továbbá egymással

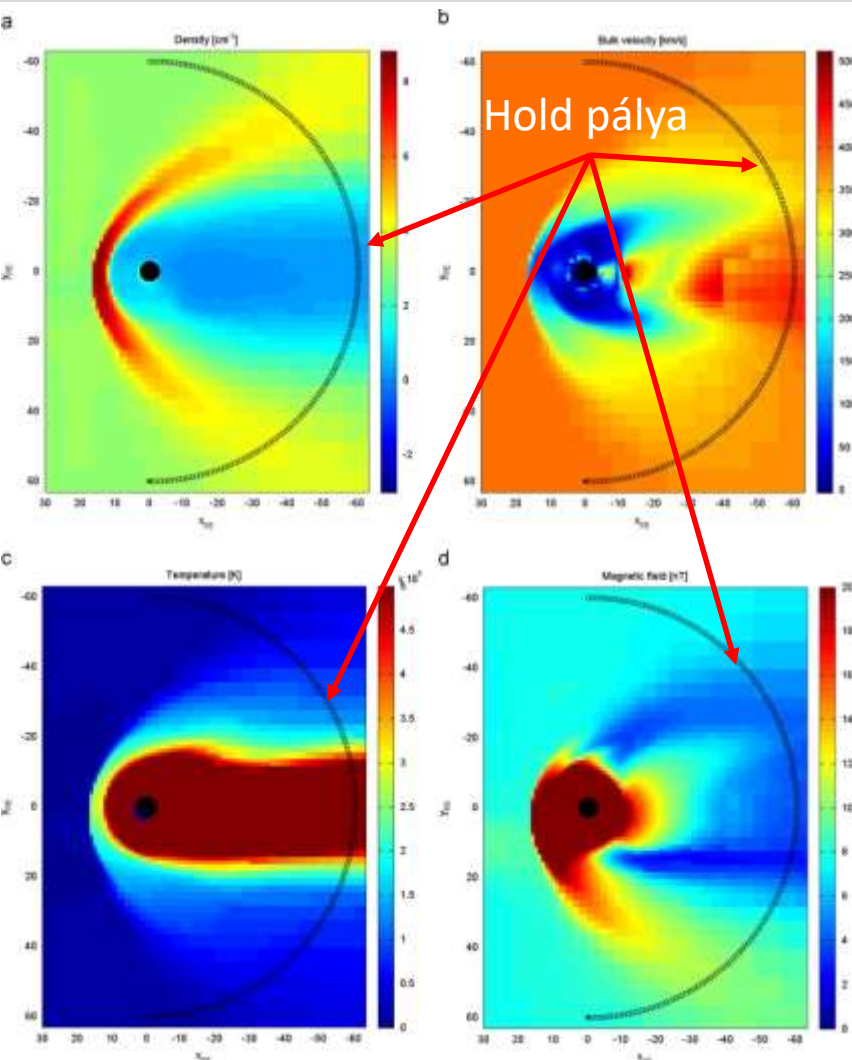
Facskó, G., I. Honkonen, T. Zikovic, L. Palin, E. Kallio, K. Agren, H. Opgenoorth, E. I. Tanskanen, and S. Milan. One year in the Earth's magnetosphere: A global MHD simulation and spacecraft measurements. *Space Weather*, 14:351367, May 2016. doi: 10.1002/2015SW001355.

Facskó, G., D. G. Sibeck, I. Honkonen, J. Bór, G. Farinas Perez, A. Timár, Y. Y. Shprits, P. Peitso, L. Degener, E. I. Tanskanen, C. R. Anekallu, S. Szalai, Á. Kis, V. Wertzgerom, Á. Madár, Biró N., G. Kobán, and A. Illyés. Comparing 1-year GUMICS-4 simulations of the Terrestrial Magnetosphere with Cluster Measurements. *Space Weather*, 2021. submitted, doi:10.1002/essoar.10507311.1.

Gordeev, E., **G. Facskó**, V. Sergeev, I. Honkonen, M. Palmroth, P. Janhunen, and S. Milan. Verification of the GUMICS-4 global MHD code using empirical relationships. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 118:31383146, June 2013. doi: 10.1002/jgra.50359.

L. Juusola, **G. Facskó**, I. Honkonen, P. Janhunen, H. Vanhamäki, K. Kauristie, T. V. Laitinen, S. E. Milan, M. Palmroth, E. I. Tanskanen, and A. Viljanen. Statistical comparison of seasonal variations in the GUMICS-4 global MHD model ionosphere and measurements. *Space Weather*, 12:582600, October 2014. doi: 10.1002/2014SW001082.

Az MHD modellek alkalmazása - Napszél a Hold pályája mentén



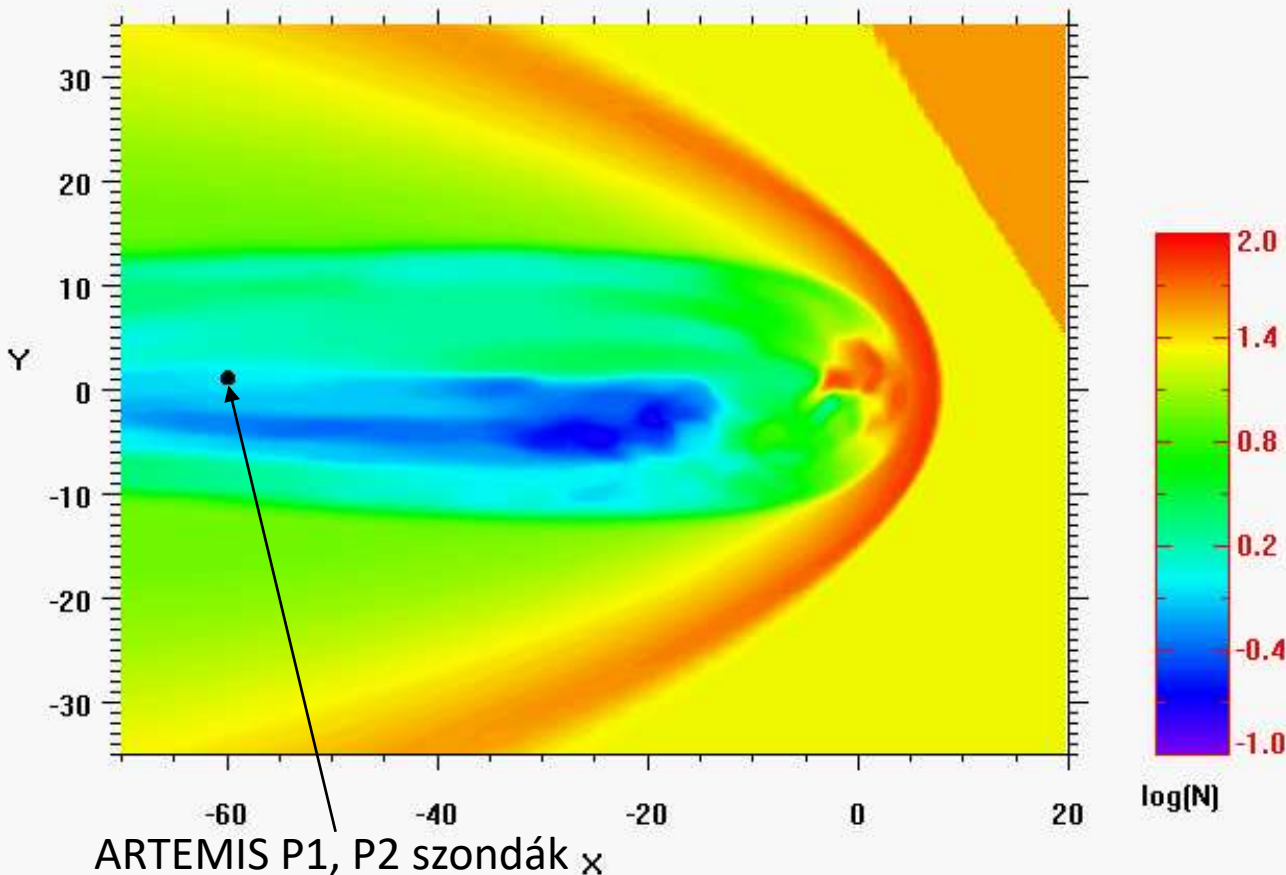
- A Hold idejének jelentős részét a Föld magnetoszférájában és a mágneses burokában tölti
- A Holdnak nincs sem légköre, sem mágneses tere, amely megvédené felszínét a napszél részecskéinek becsapódásától
- Telihold környékén a Hold belép a Föld lökéshulláma mögötti tartományba, a mágneses burokba, illetve mágneses védőernyőjébe, a magnetoszférába
- Bolygónk mágneses tere a napszél nyomásának hatására az éjszakai oldalon azonban nagyon elnyúlik
- Az éjszakai magnetoszférát körbeveszi a mágneses burok, a lökéshullámon keresztülhaladt, felhevült és lelassult napszéláram tartománya
- Így a Holdra leszálló űrhajósok telehold környékén biztonságban vannak, mert a Föld magnetoszférája megvédi őket a nagy energiájú szoláris-energikus részecskék kitöréseitől

(a) Részecske sűrűség, (b) napszél sebesség, (c) plazma hőmérséklet és (d) a mágneses tér nagysága 2002. február 20-án 08:54 (UT)-kor a GSE XY-síkban ($x_{GSE}=[30, -64] R_E$, $y_{GSE}=[-64, 64] R_E$, $z_{GSE}=0 R_E$)



- A bolygóközi lökeshullámok eltéríthetik a földi magnetoszférát, úgy, mint egy szélzsákot
- WIND űrszonda észlelte 2002-ben, $\sim 100 R_{\text{Föld}}$ távolságra a Földtől a Nap irányával ellentétesen
- ARTEMIS mérések: a magnetoszféra kilengése megtörténhet a telehold pozíciója közelében.
- Ez kibillenti a mágneses pajzsot így a Hold a napszélbe kerül, ahol a részecskesugárzás erősebb.
- A Holdra szálló űrhajósokat és az infrastruktúrát nem védi megbízhatóan a Föld mágneses pajzsa.

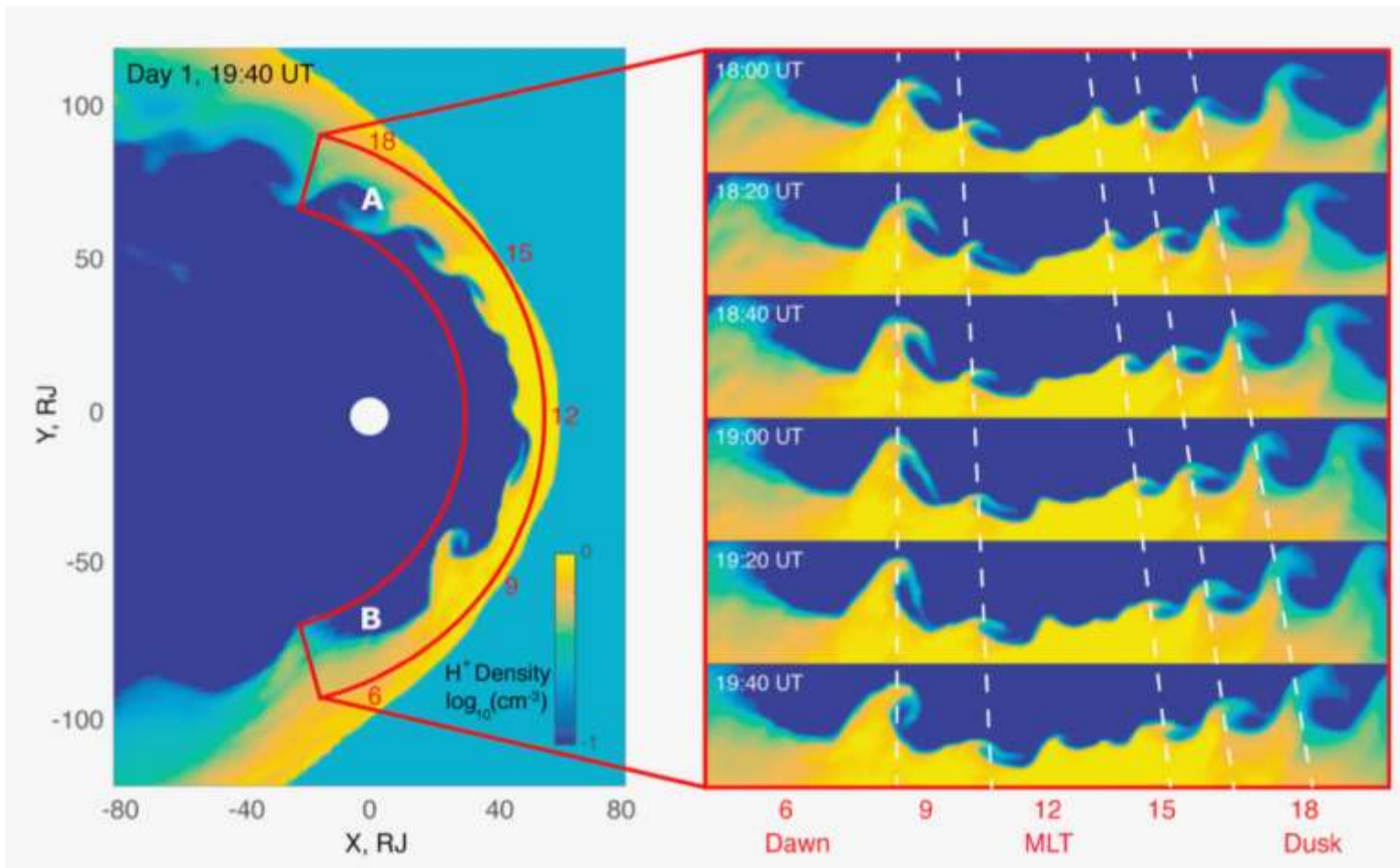
Az MHD modellek alkalmazása – A szélzsák effektus szimulációja



- Szélzsák effektus globális MHD szimulációja 2012. március 8-án 11:00-11:30 között
- A napszél sebességnek hatalmas GSE Y irányú komponense lett (tipikusan ez az érték 0 km/s)
- A csóva kilendült és a telehold a Földi magnetoszféra helyett a napszélben találta magát
- Gyakori esemény, senki sem katalogizálja
- Veszélyessé teszi a holdutazók űrsétáit



Az MHD modellek alkalmazása – Kelvin-Helmholtz hullámok a Jupiter magnetopauzája körül



A Jupiter magnetoszférájának a globális MHD szimulációja, amelyen látszik a Kelvin-Helmholtz instabilitás a magnetopauzánál és a hajnal/alkonyat asszimmetria.

- Finomabb térbeli felbontással rendelkeznek, mint az MHD kódok
- Üstökösök, gyenge mágneses terű testek (Merkúr), mágneses tér nélküli bolygók és légkör nélküli mágneszetlen testek (Hold, aszteroidák) vizsgálata a céljuk.
- Képesek a kinetikus jelenségek megjelenítésre
- A kód selfkonzisztens, az ionok részecskék egy elektromágneses térben mozognak,
- Az elektronok tömeg nélküli töltés kiegyenlítő MHD folyadékok.
- Az ionok és az elektromágneses tér egymáshoz csatoltak.
- A folyadék momentum egyenlete határozza meg az elektromos teret
- Az ionok mozgását a Lorentz-erő határozza meg:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = q_i (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B})$$
$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathbf{v}_i,$$

- ahol m_i , q_i , \mathbf{x}_i és \mathbf{v}_i az ionok tömege, töltése, helyzete és sebessége
- \mathbf{E} és \mathbf{B} az elektromos tér és a mágneses mező
- t az idő

- Az elektronokat egy tömeg nélküli folyadékként kezeli a folyadék momentum egyenlete:

$$\mathbf{E} + \mathbf{U}_e \times \mathbf{B} = \eta_a \mathbf{J} + \frac{\nabla p_e}{q_e n_e},$$

- ahol \mathbf{U}_e a . . . , η_a a . . . , q_e , n_e és p_e az elektronok töltése, részecskesűrűsége és nyomása
- Az ideális gáztörvény egyenlete elektronokra:

$$p_e = n_e k_B T_e,$$

- ahol k_B a Boltzmann-állandó és T_e az elektronok hőmérséklete

- A plazma kvázi-semlegességének feltétele:

$$\rho_q = \underbrace{\sum_i q_i n_i}_{\text{iontöltés sűrűség egy háló cellában}} + q_e n_e = 0$$

- ahol n_i az ionok részecskesűrűsége és q pedig a kvázisemlegesség
- Az elektromos áramsűrűséget a következő egyenlet határozza meg:

$$\mathbf{J} = \underbrace{\sum_i q_i n_i \mathbf{V}_i}_{\text{ion áram}} + \underbrace{q_e n_e \mathbf{U}_e}_{\text{elektron áram}}$$

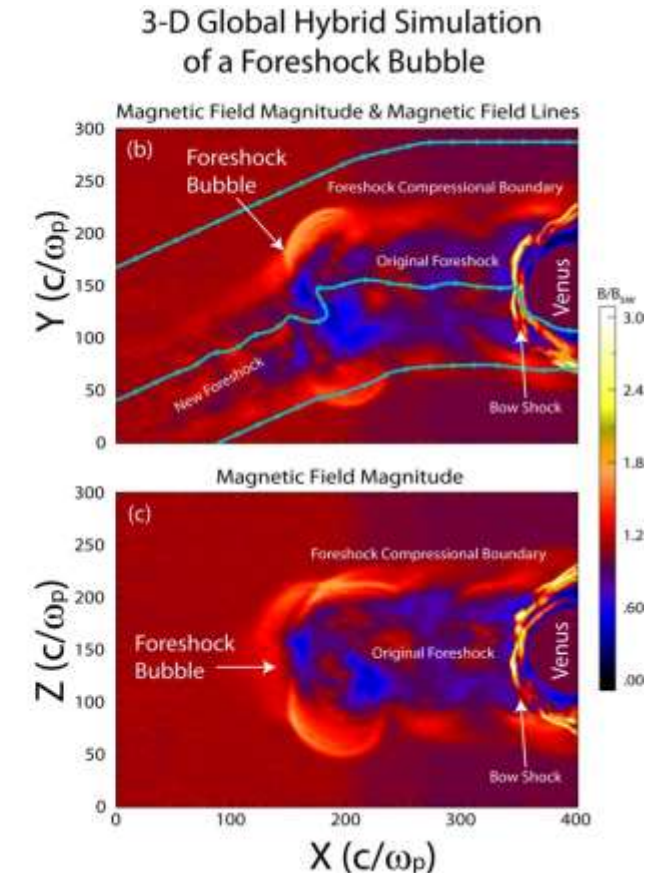
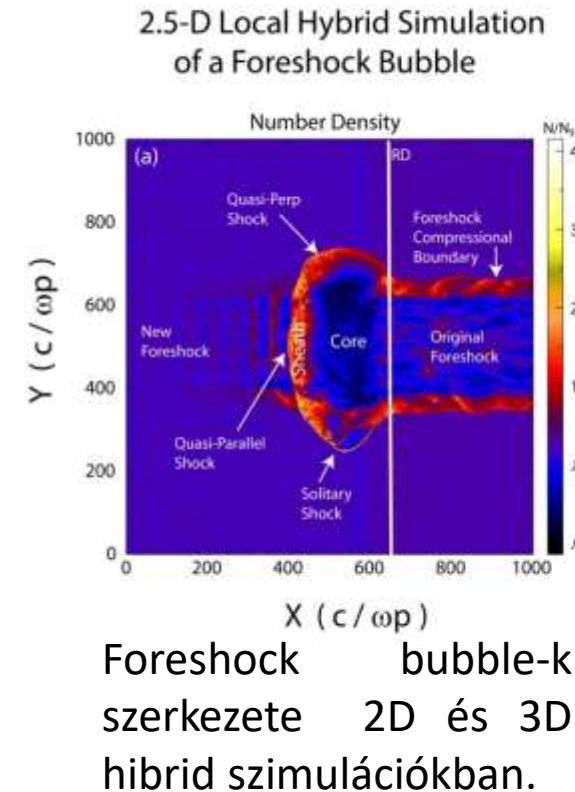
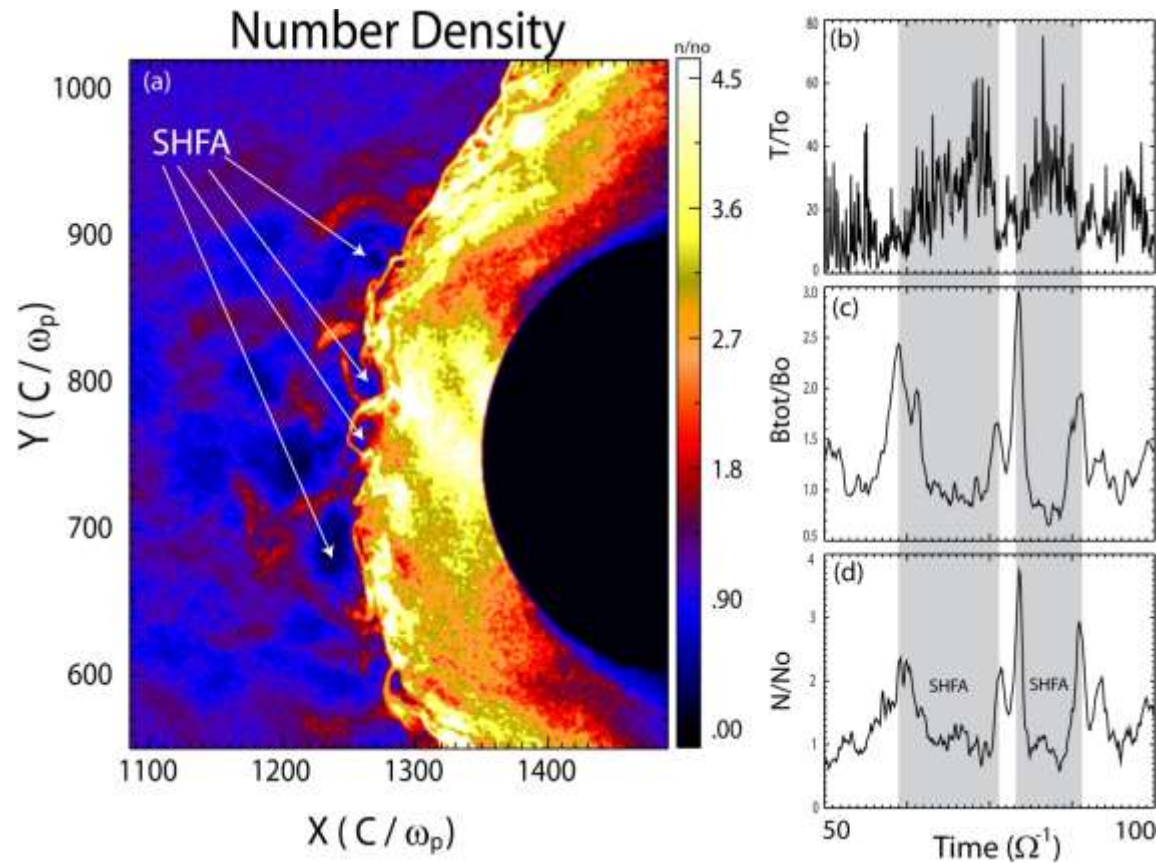
- ahol \mathbf{J} az áramsűrűség vektor

- Az elektrodinamika a Maxwell-egyenletekből származik:

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho_q}{\epsilon_0},\end{aligned}$$

- ahol ϵ_0 a vákuum dielektromos állandó, μ_0 pedig a mágneses permeabilitás
- A rendszer kvázi-semleges, a Maxwell-egyeleteket konzisztensen meg lehet oldani
- A kódnak meg kell adni a bolygó tömegét, a gravitációját, belső mágneses terét, a légkörét és az ionoszféráját, továbbá az elektromos vezetőképességét
- Az áramló plazma modellezéséhez pedig az ion sűrűséget, az ionok sebesség eloszlását, az elektron hőmérsékletet, a környező mágneses teret.
- Az egyenletek megoldása a kezdeti értékkel kezdődik.
- Az áramsűrűséget az Ampère-törvénnyel a mágneses mezőből számolja ki a kód
- Az elektronok töltéssűrűsége a cellában a feltett kvázi-semlegességből kapható meg
- Az elektron folyadék sebesség mezeje az áramsűrűség meghatározásából határozható meg
- Az elektromos teret az elektron momentum egyenletből számítjuk ki
- A mágneses teret a Faraday-törvényből kapjuk
- Az ionokat a Lorentz-erő gyorsítja

Az hibrid modellek alkalmazása



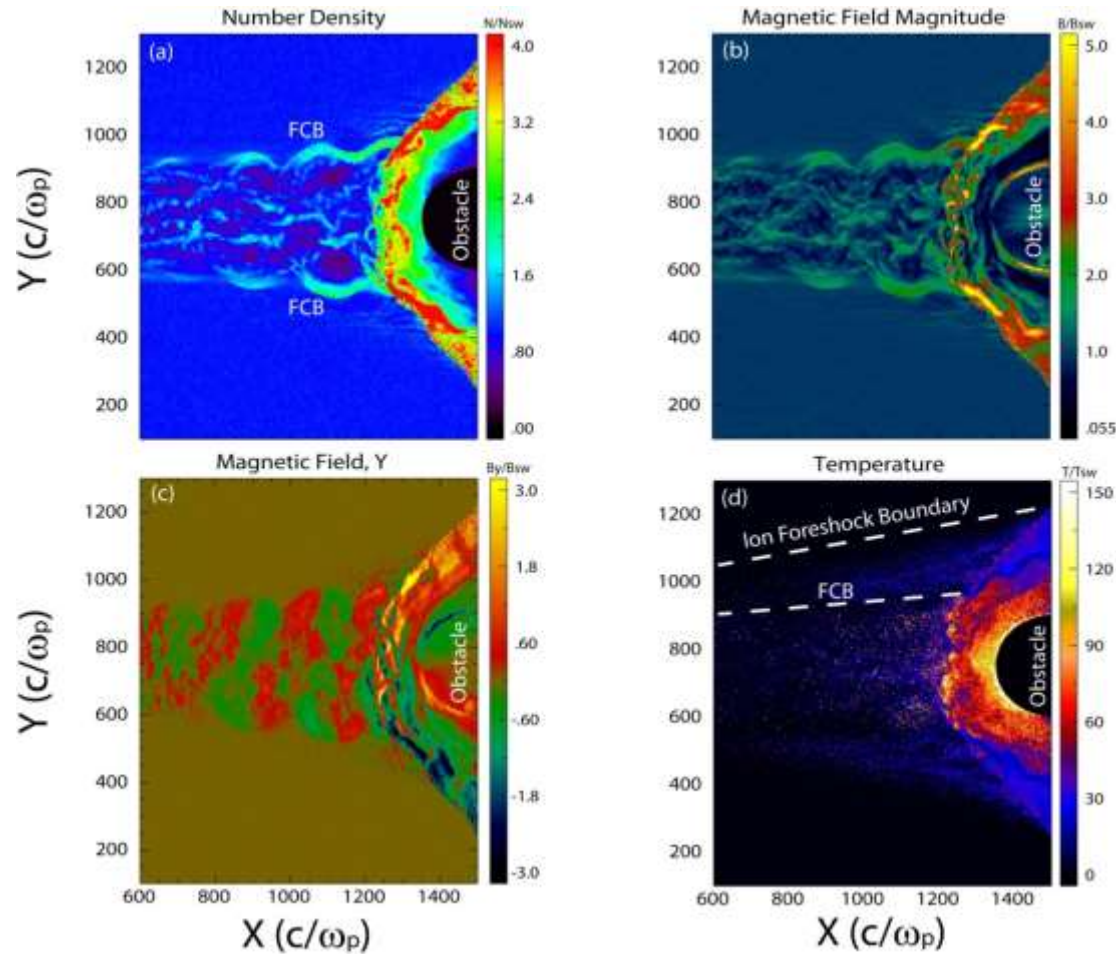
Globális hibrid szimuláció eredménye radiális IMF-nél.

Omidi N, Eastwood JP, Sibeck DG (2010) Foreshock bubbles and their global magnetospheric impacts. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 115:A06204, DOI 10.1029/2009JA014828

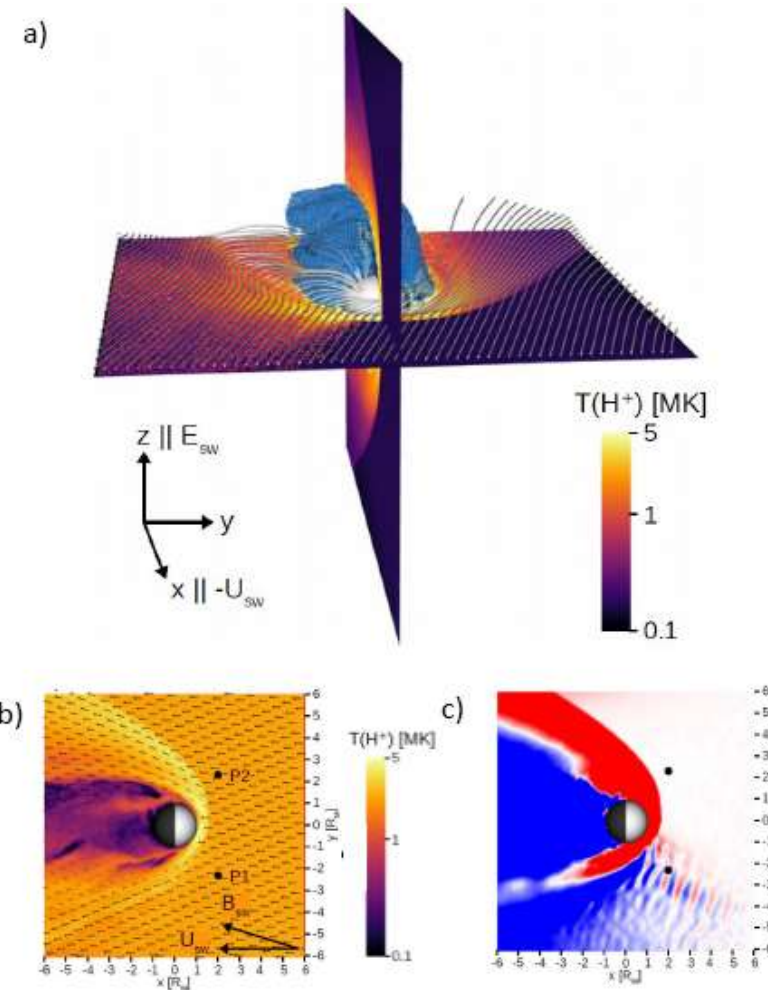
Omidi N, Collinson G, Sibeck D (2020a) Foreshock bubbles at venus: Hybrid simulations and vex observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(2):e2019JA027056, DOI:https://doi.org/10.1029/2019JA027056

Omidi N, Lee SH, Sibeck DG, Turner DL, Liu TZ, Angelopoulos V (2020b) Formation and topology of foreshock bubbles. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 125(9):e2020JA028058, DOI 10.1029/2020JA028058

Az hibrid modellek alkalmazása



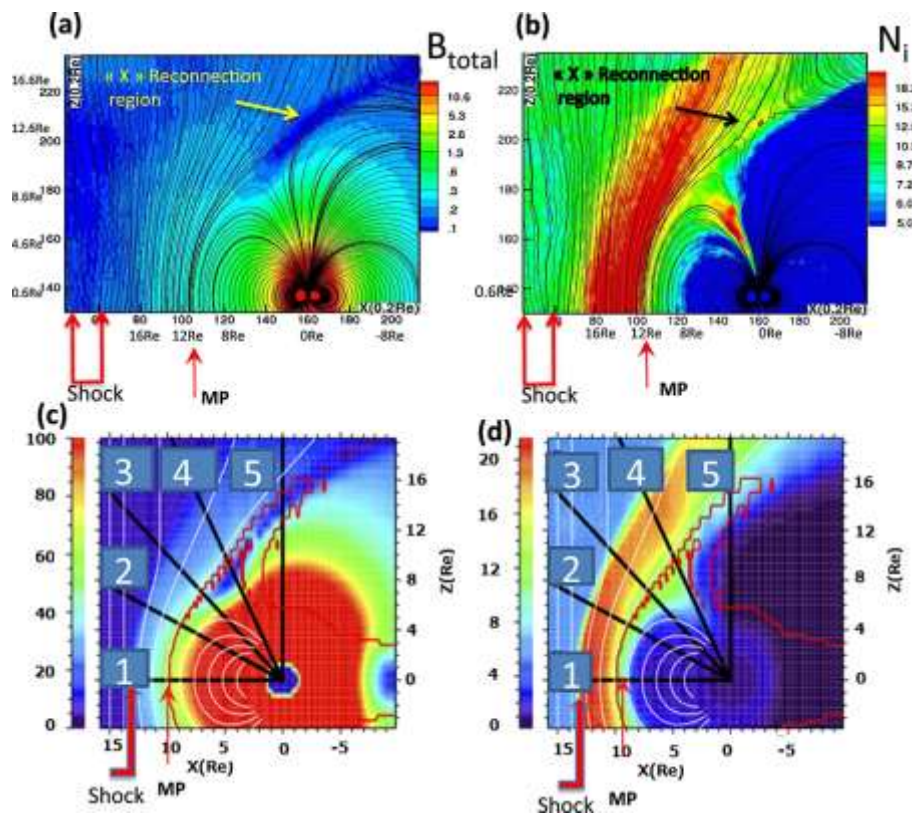
Globális hibrid szimuláció eredménye radiális IMF-nél.



3D PIC Merkúr-napszél kölcsönhatás szimuláció. (a) A mágneses tér vonalak a Merkúr közelében vannak. Anapszél az x iránymentén áramlik. A napszél protonok hőmérséklete az xy és az xz síkokban. (b) A napszél protonok sűrűsége az egyenlítői síkban ($z=0$). A fekete nyilak a napszél bulk sebességét mutatják. (c) A mágneses tér B_y komponense az egyenlítői $z=0$ síkban. A fehér nyilak az átlagos mágneses tér vektort mutatják.

Jarvinen R, M A, E K, I PT (2020) Ultra-low-frequency waves in the ion foreshock of mercury: a global hybrid modelling study. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 491(ue 3):4147–4161, DOI 10.1093/mnras/stz3257

Omidi N, Lee SH, Sibeck DG, Turner DL, Liu TZ, Angelopoulos V (2020b) Formation and topology of foreshock bubbles. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 125(9):e2020JA028058, DOI 10.1029/2020JA028058



(a, b): 3D PIC szimulációk. (c, d): 3DComparison of results obtained with the (a and b) present 3-D PIC simulation and (c and d) with 3-D MHD szimulációk. (a, c): ion sűrűség, (b, d): teljes mágneses tér. Az IMF teljesen északi irányú. A vörös nyílak a BS és MP helyzetét jelzik az X tengely mentén. Az ábrák a meridián síkban fekszenek.

- A teljes részecske kódokban az ionok és az elektronok is részecskék
- A legjobb térbeli felbontású és a legpontosabb fizikájú modellek, amellyel a mikrofizikát lehet tanulmányozni
- Hatalmas a számításigényük, ezért csak néhány helyen használják, ahol rendelkezésre állnak a szuperszámítógépek
- Az egyik ilyen szabadon hozzáférhető kód az iPIC3D (<https://epigram-hs.eu/ipic3d/>) kód
- C++-ban fejlesztették és Message Passing Interface (MPI) rutinokat használtak hozzá
- Része a Space Weather Modeling Framework (SWMF)-nek, amit a Michigani Egyetem kezel
- Nagyon sok felé használják Európában, nagyjából 30 ezer sorból áll a kód.

- Az ionok eloszlásfüggvények a 6D (3 térbeli és 3 sebesség) fázistérben
- Az elektronokat töltéskiegyenlítő folyadékként veszik figyelembe
- Hatalmas, a teljes részecske kódot meghaladó számításigénye van
- A Helsinki Egyetem rendelkezik egy változatával, a VLASIATOR-ral
- A VLASIATOR egy hibrid-Vlasov kód, az ionok eloszlásfüggvények, az elektronok tömeg nélküli töltéskiegyenlítő folyadékot alkotnak. Az ionokat az $f(\mathbf{r}; \mathbf{v}; t)$ a térben (\mathbf{r}) és a sebességtérben (\mathbf{v}). Az Vlasov-egyenlet írja le az időbeli fejlődését az $f(\mathbf{r}; \mathbf{v}; t)$ függvénynek:

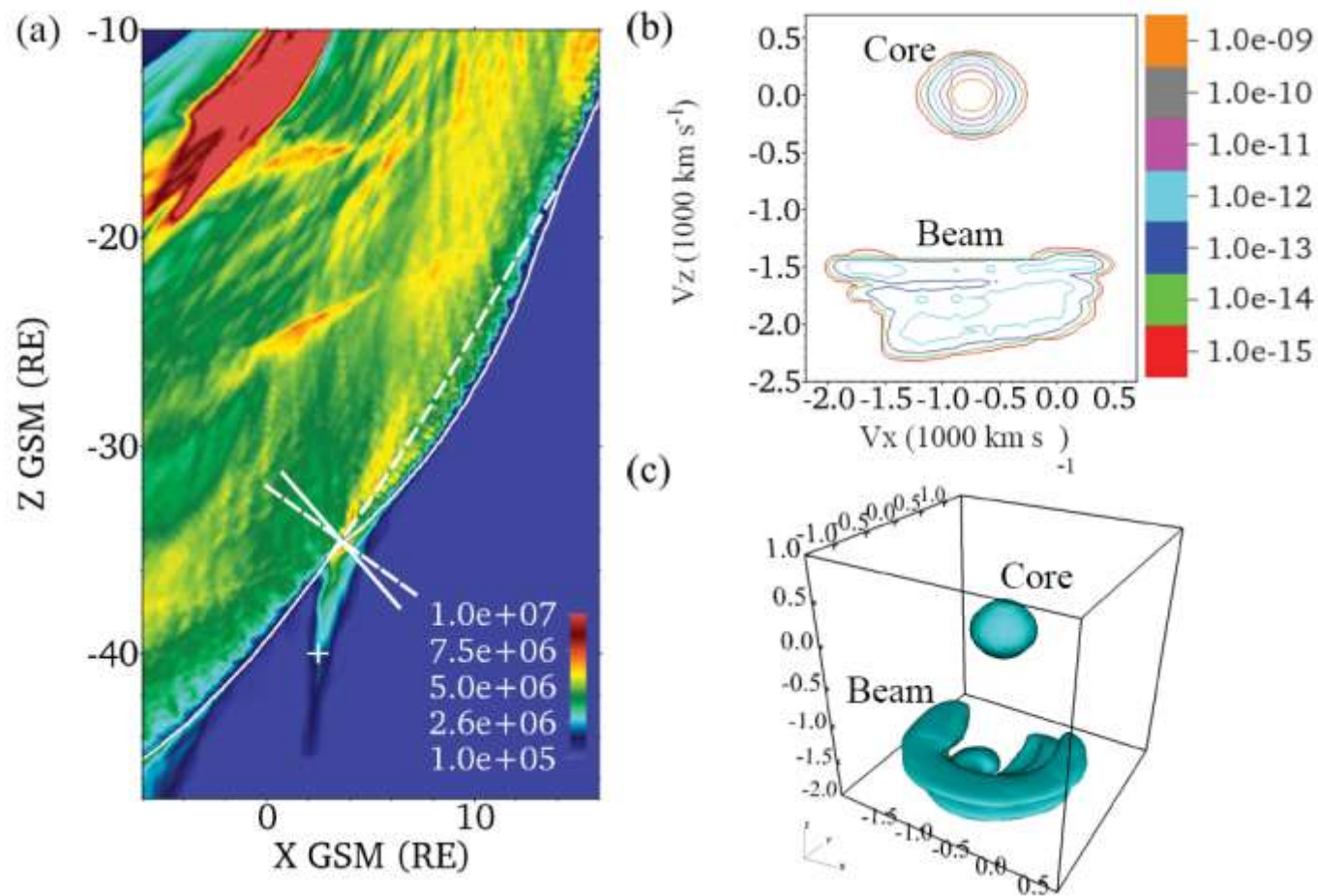
$$\frac{\partial}{\partial t} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) + \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = 0$$

- Ezt az egyenletet a Maxwell egyenletekhez csatolja a kód, amelyek megadják az \mathbf{E} és \mathbf{B} fejlődését.
- Az eltolódási áramot nem veszik figyelembe.
- Az egyenleteket az Ohm-törvény zárja le a Hall termmel:

$$\mathbf{E} = -\mathbf{V}_i \times \mathbf{B} + \frac{1}{\rho_q} \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

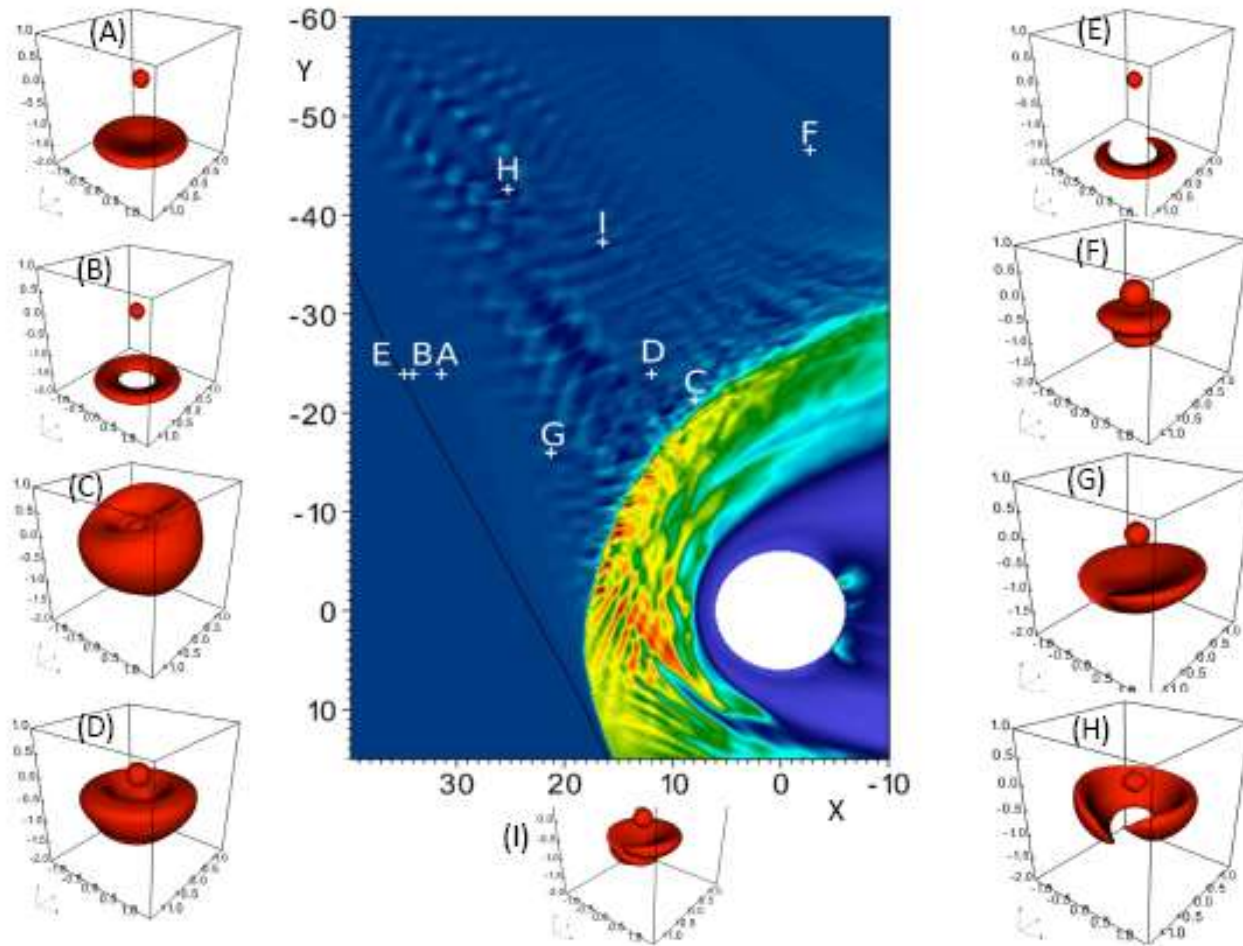
- ahol \mathbf{V}_i az ionok sebessége, \mathbf{B} a mágneses térerő, \mathbf{E} az elektromos tér és \mathbf{j} a áramsűrűség.
- A VLASIATOR Descartes koordinátákat használ a közönséges térben és minden cellához tartozik egy 3D sebességtér is. A kód MPI-t használ és párhuzamos

A Vlasov-Maxwell modellek alkalmazása (cont'd)



(a) Egy lokális foreshock szimuláció, ahol a színek a párhuzamos hőmérsékletet jelzi, amely érzékeny az ion nyaláb jelenlétére. A folytonos fehér vonal a lökéshullám helyét jelzi a sűrűség kontúr alapján. A szaggatott vonal a lökéshullám helyét jelzi a mágneses burokbeli perturbációk nélkül. Egy folytonos és egy szaggatott vonal jelzi a normálisok irányát. (b) az ion sebesség eloszlásnak a 2D vetített kontúr és (c) a 3D kontúr. Mindkét elosztás egy field-aligned beamet mutat.

A Vlasov-Maxwell modellek alkalmazása



Középen: ion sűrűség a foreshockban és a mágneses burokbán a 2D-s globális Vlasov szimuláció eredményeként. A színek kék: 6.50×10^4 -tól a vörös 5.50×10^6 értékekig terjed. A fekete vonal az ion foreshock pereme, amelytől upstream irányban a napszél ionok eloszlása Maxwelli. A fehér betűk azokat a helyeket jelölik, amelyek eloszlását oldalt kiemették. A koordináták a X_{GSE} - Y_{GSE} síkban értendők és Föld sugárban számoltak.

Kempf Y, Pokhotelov D, Gutynska O, Wilson LB III, Walsh BM, von Althan S, Hannuksela O, Sibeck DG, Palmroth M (2015) Ion distributions in the Earth's foreshock: Hybrid-Vlasov simulation and THEMIS observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120:3684–3701, DOI 10.1002/2014JA020519

1. Sorolja fel, milyen modelleket ismer elvek alapján!
2. Milyen fizika alapú modelleket ismer a plazma különféle leírásai alapján?
3. Melyik modell milyen objektumok modellezésére szolgál?
4. Mi a különbség a lokális és a globális modellek között?
5. Mi az a validáció? Miben tér el a verifikációtól?
6. Lehetséges-e részecsketerjedést modellezni MHD modellekkel?
7. Miért számítás-igényesek a teljesrészecske modellek?
8. Miért számítás-igényesek a Vlasov kódok?

Vége

Köszönöm a figyelmet!