

# Üstökösök és óriásbolygók - Új eredményeink a Rosetta és Cassini programokban



Németh Zoltán

*MTA Wigner FK, Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály*

Simonyi Nap 2017

# A Rosetta és Cassini űrmissziók

A Rosetta a világon elsőként

- Állt pályára egy üstökös körül
- Szállt le egy üstökös felszínére
- Követte végig egy üstökös életét az aktivitás kezdetétől annak végéig



A Cassini a világon elsőként

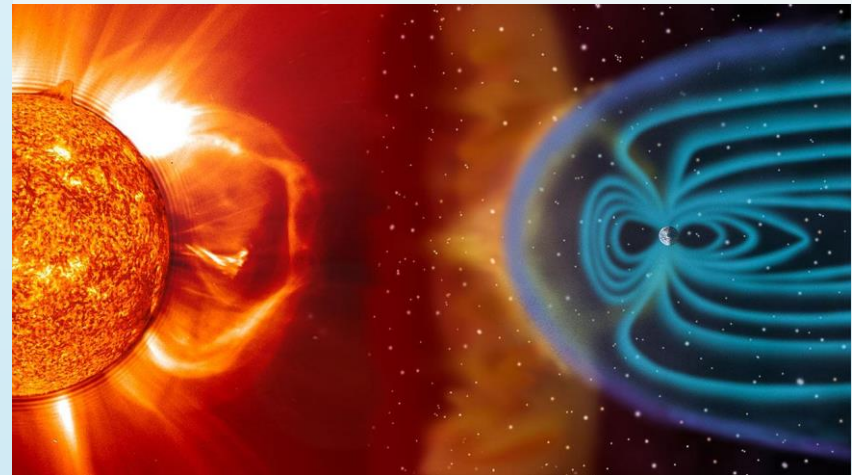
- Állt pályára a Szaturnusz körül
- Szállt le a Titán hold felszínére
- Felfedezte az Enceladus gejzírjeit
- És még sok mást ...
- Közel 20 éves élettartam, mely idén ért véget a „Nagy Finálé” gyűrű- és légkör-súroló pályáival

# Miről lesz szó

- ▶ A missziók tudományos eredményeit lehetetlen lenne még áttekinteni is fél óra alatt
- ▶ Kiemelek néhány érdekesebb részletet, amit:
  - ▶ Mi tettünk hozzá az eredményekhez
  - ▶ Az elmúlt másfél évben
- ▶ **A téma:**
  - ▶ Hogyan lépnek kölcsönhatásba ezek az égitestek a Nap egész Naprendszeret kitöltő furcsa légkörével?
  - ▶ Mi a szerepe ebben a kölcsönhatásban az égitestek környezetében található aktív anyagforrásoknak?

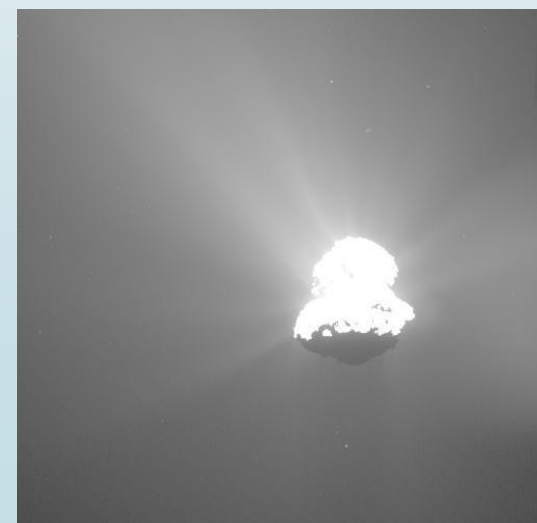
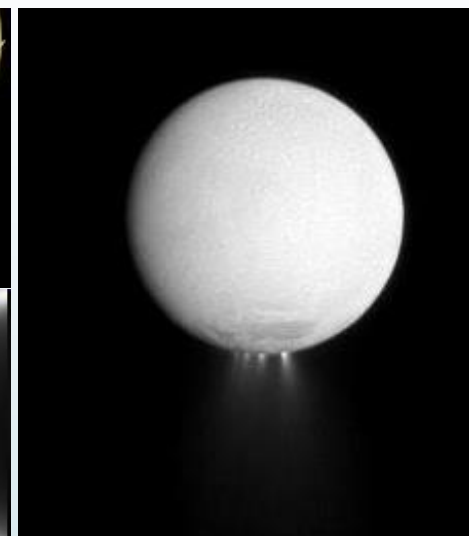
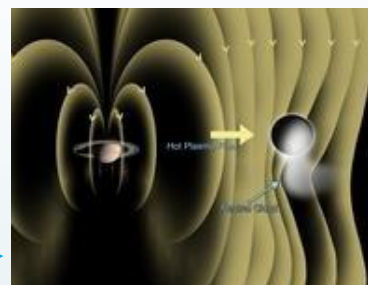
# Plazma, napszél, magnetoszféra

- Az űr nem üres! Mi van benne?
- Ionizált gáz (plazma)
- Radiálisan terjedő dinamikus mágnesezett naplégkör – napszél
- Ameddig jelentős: Helioszféra
- Terjedési sebesség 400-1200 km/s!
- Kölcsönhatásba lép az égitestek mágneses terével, ill. a közelükben található vezető plazmával
- Ez a kölcsönhatás alakítja az égitest mágnesezett plazmakörnyezetét, a magnetoszférát
- (Földön is érezhető hatások)



# Üstökösök óriásbolygók – mi a közös?

- ▶ Az űrfizika szempontjából:
  - ▶ Belső plazmaforrások!
- ▶ Jupiter: Io vulkanizmusa
- ▶ Szaturnusz: Enkeládusz gejzírei
- ▶ Üstökösök: a napsugárzás hatására szublimálódó illó anyagok
- ▶ Sűrű, gyorsan mozgó plazmák – felfújják a magnetoszférát, és jelentősen befolyásolják annak szerkezetét
- ▶ Néha egészen mgdöbbentő hatások
  - ▶ Diamágneses üreg az üstökösnél
  - ▶ Óriás plazmaörvények a Szaturnusznál



# A diamágneses üreg

- Mágneses tér mentes régió az üstökös mag körül
  - Az üstökös felől áramló anyag kiszorítja az interplanetáris mágneses teret az üstökös mag közvetlen környezetéből
  - A Naprendszerben létező legkisebb mágneses tér
- Első (és a Rosetta előtt egyetlen) rövid megfigyelése a Halley üstökösnél:
  - Vega flyby
  - mindössze 2 perc
- Oka: az üstökös aktivitása „elfújja” a mágnesezett plazmát
  - Az üreg határán a plazmára kívülről ható mágneses nyomás egyensúlyt tart az üstökös felől kiáramló semleges atomok súrlódásából fakadó erővel (Cravens, 1986):
  - $$\nabla \frac{B^2}{2\mu_0} - \left( \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \cdot \nabla \right) \mathbf{B} = m_i n_i v_{in} (\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_i)$$

# Rosetta – találjunk diamágneses üreget!

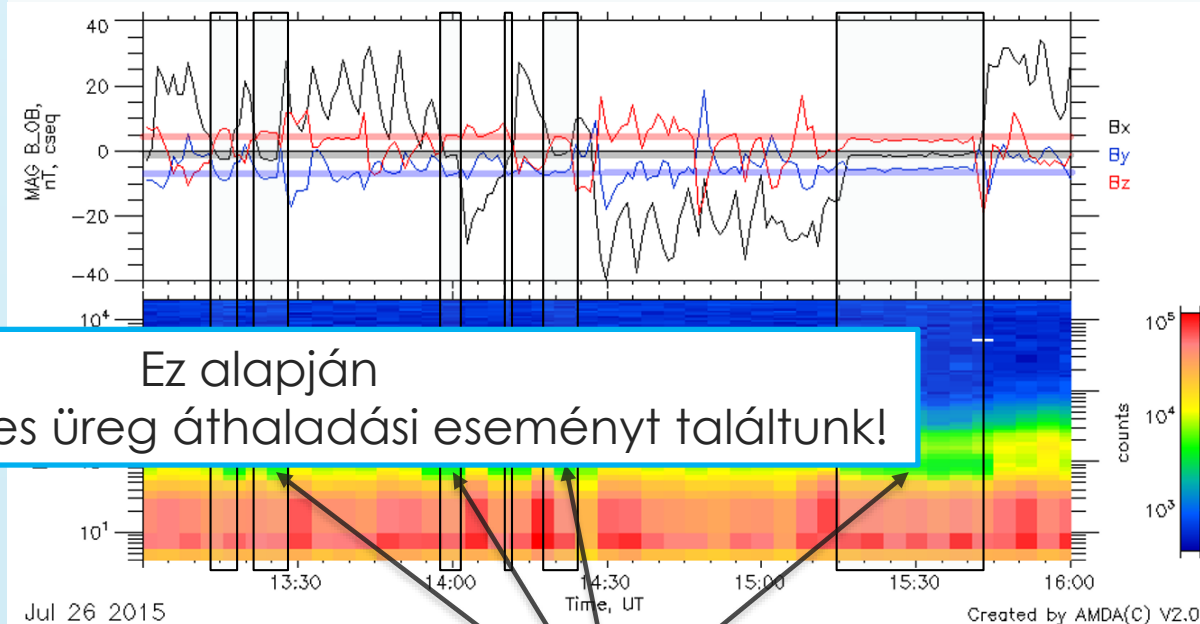
A Rosetta **mágnesesen szennyezett** űreszköz

→ A mágneses tér komponensek **értékei eltolódnak** a valós értékekhez képest

→ A **magnetométer** önmagában **nem alkalmas a diamágneses üreg**

**Feltételez** **127** diamágneses üreg áthaladási eseményt találtunk!

- A diamágneses üregben állandó 0 érték **helyett**
- **Kis fluktuáció** egy **konstans érték körül**
- Jelentős mágneses tér **offsetek** mellett
- Egymáshoz közeli áthaladások esetében hasonló offsetek
- Mindhárom komponens esetében



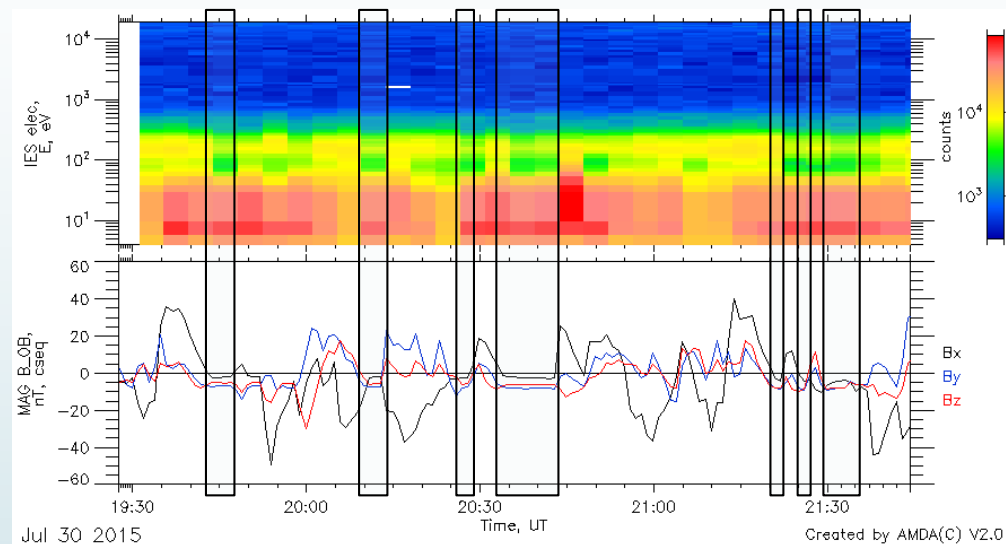
**Jellegzetes leugrások bizonyos elektron komponensekben az üregeken belül**  
→ **Diamágneses üreg indikátora!**

# Elektronspektrum

- **100 eV:** 2-3-szoros esés az elektron beütésszámokban az üreghatár közelében és az üreg belsejében
- **150-200 eV:** csökkenés a beütésszámokban az üreg belsejében

## → **Mágneses erővonalakhoz csatolt elektronpopuláció**

- Az erővonalakkal együtt kiszorulnak az üregből
- Valószínű eredetük: 10-15 eV-os fiatal fotoelektronokat az üstököstől távolabb felkapja a napszél
- Üstököst felé haladva „betatron-szerű” gyorsítás
  - **B** nő: mágneses momentum megmaradása miatt **v** nő
    - 10-15-szörös gyorsítás lehetséges



## Üregáthaladások keresési kritériuma:

1. Csökkenés az elektron beütésszámokban a 150-200 eV-os energia tartományban
2. Miközben a mágneses tér mindhárom komponense közel állandó
3. Közeli üregáthaladásoknál mért mágneses tér offsetek hasonlóak



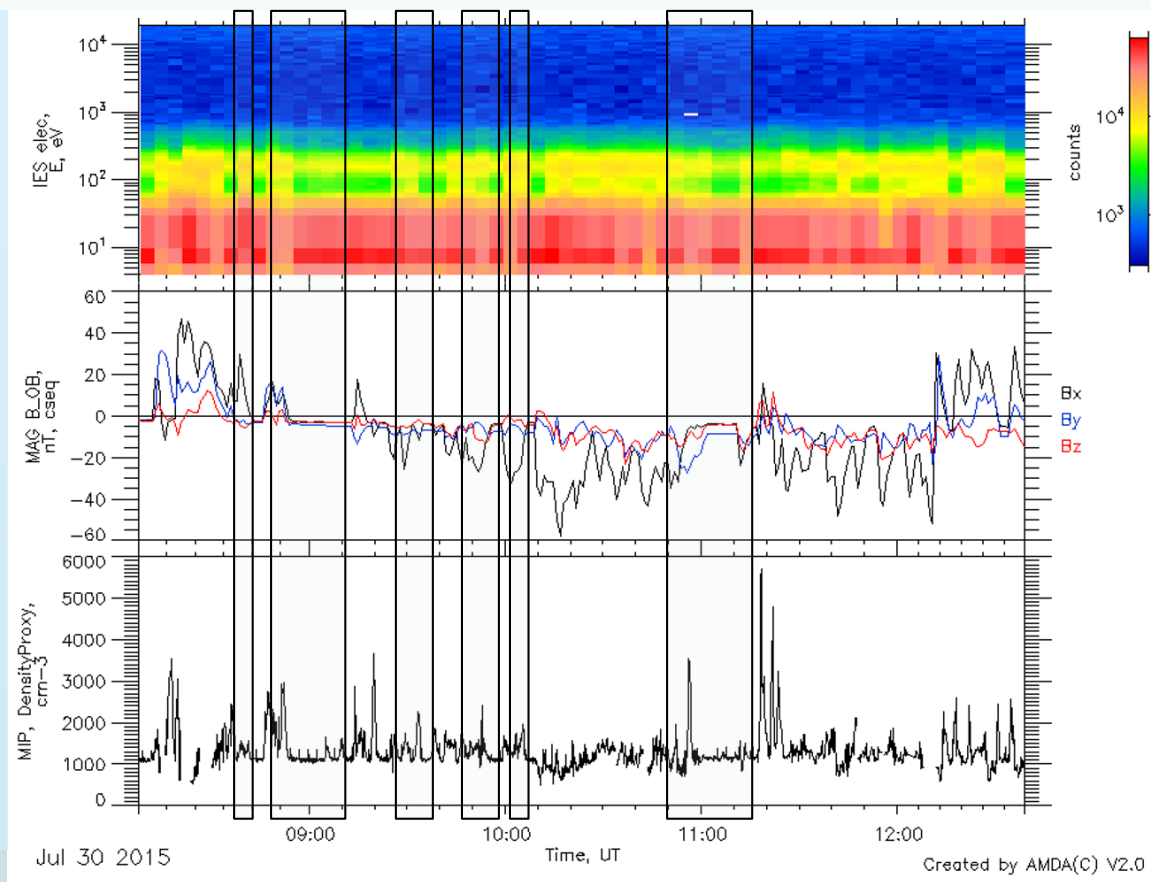
# Egyéb jellemzők - plazmasűrűség

## • Üregeken belül:

- **Nyugodt, alacsony**
  - kölcsönhatás a semleges árammal kisimítja
  - vagy nincs perturbáló hatás
- $\sim 500 \text{ cm}^{-3} - 1000 \text{ cm}^{-3}$
- **függ: gáztermelési ráta**  
→ ionizáció forrása

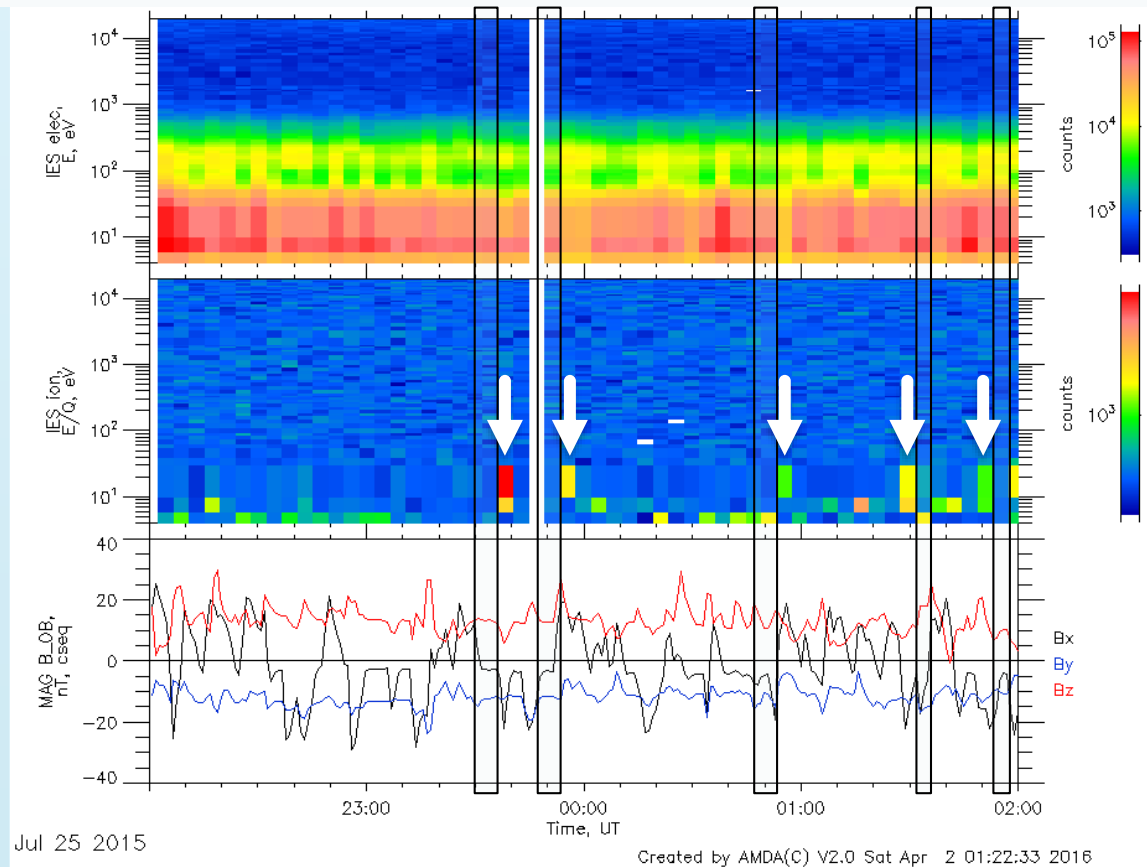
## • Üreghatáron:

- **Hirtelen, rövid felugrások**
- $\sim 2000 \text{ cm}^{-3} - 6000 \text{ cm}^{-3}$   
→ Az üstökös eredetű **elektronokat** az üreghatárhoz érve **befogják a mágneses térerővonalai**



# Egyéb jellemzők - ionspektrum

- Beütésszámok rövid **felugrása az üreghatáron**
- Az űreszköz közelében keletkezett fiatal ionok
- Negatív **műhold potenciál**
  - **Felgyorsíthatja a hideg ionokat a műszer mérési tartományába**
  - Csak sűrűbb plazmában (pl. diamágneses üreg határán)



# Üregáthaladások térben és időben

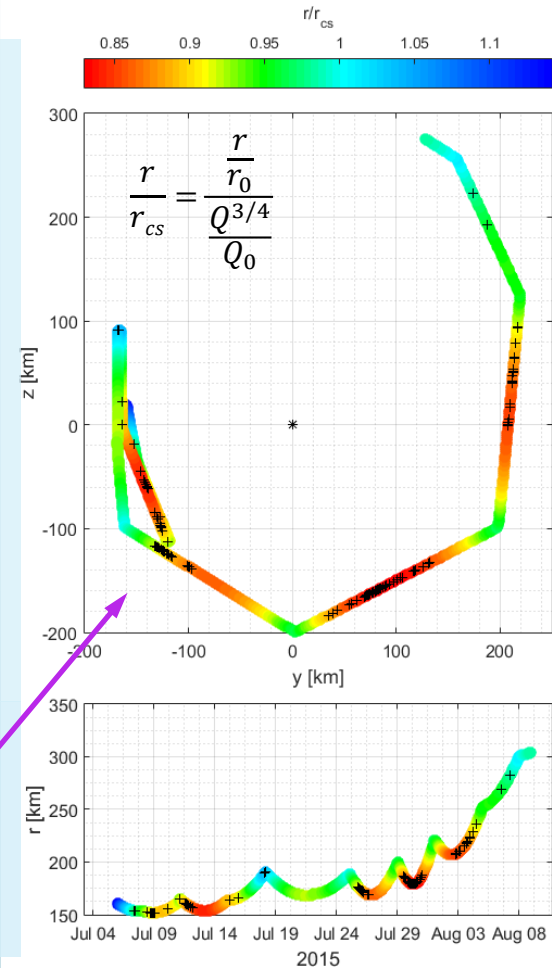
Vizsgált időszak: 2015. július-augusztus

→ 127 db üregáthaladási esemény

- **Sok, rövid áthaladás**, az üstököstől távol (150-300 km), mindenfelé: az ok **nem** lehet néhány hirtelen, intenzív gázkitörés:
  - „szuszogó” üreghatár vagy
  - terjedő **instabilitások** az üreghatáron
- **Eloszlás**
  - Leggyakoribbak az **1-2 perces áthaladások** (~80%)
  - Csak három darab 15 percnél hosszabb
  - Általában **csoportokba gyűlve**
- **Mágneses tér az üreghatárokon**
  - **Legnagyobb az x komponens** (CSEQ: x a Nap irányába mutat)
    - **Mágneses tér meghajlik az üreg körül**

## Elméleti üreghatár-távolság:

- Csak a **gáztermelési ráta (Q) függvényében** vizsgálva:
 
$$r_{cs} \sim Q^{3/4}$$
- Bár a mágneses teret nem veszi figyelembe, közelítőleg illeszkedik a talált üregáthaladásokhoz



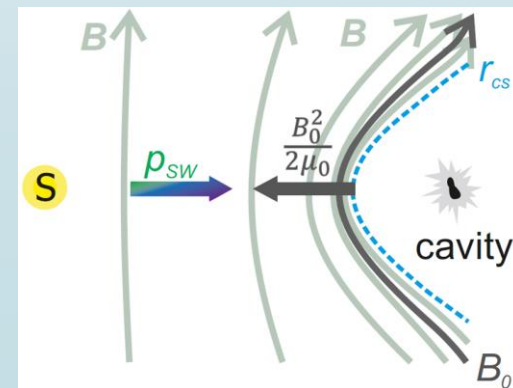
# Az üreghatár kiterjedése

- Cravens (1986) alapján a **diamágneses üreghatár távolsága** az üstökös magtól:

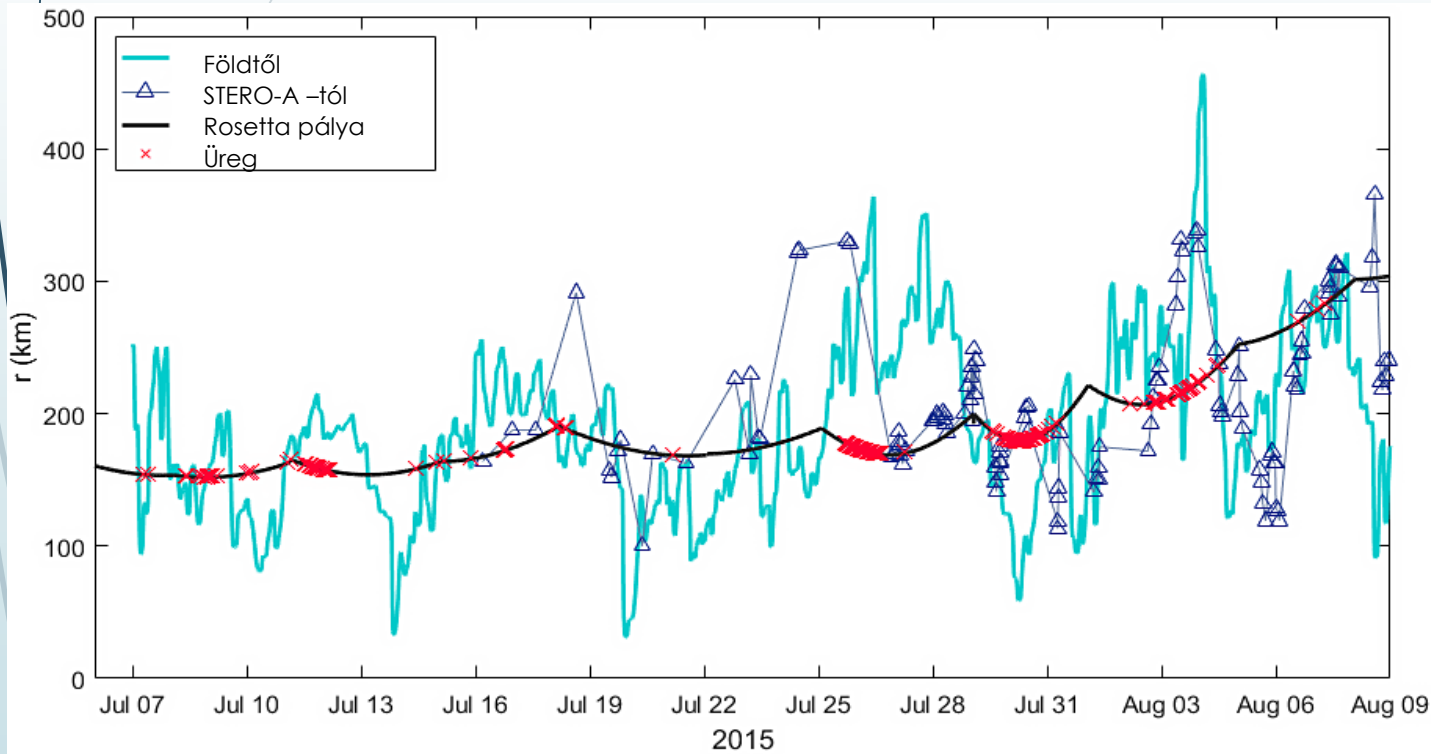
$$r_{cs} = 7.08 \times 10^{-18} \frac{Q^{\frac{3}{4}}}{B_0}$$

- Ahol **Q az üstökös gáztermelési rátája**,
- és **B<sub>0</sub> a mágneses tér maximuma** az üreghatár előtti pile-up régióban
- B<sub>0</sub> arányos a napszél dinamikus nyomásával, így:

$$r_{cs} \sim \frac{Q^{\frac{3}{4}}}{\sqrt{p_{sw}}}$$

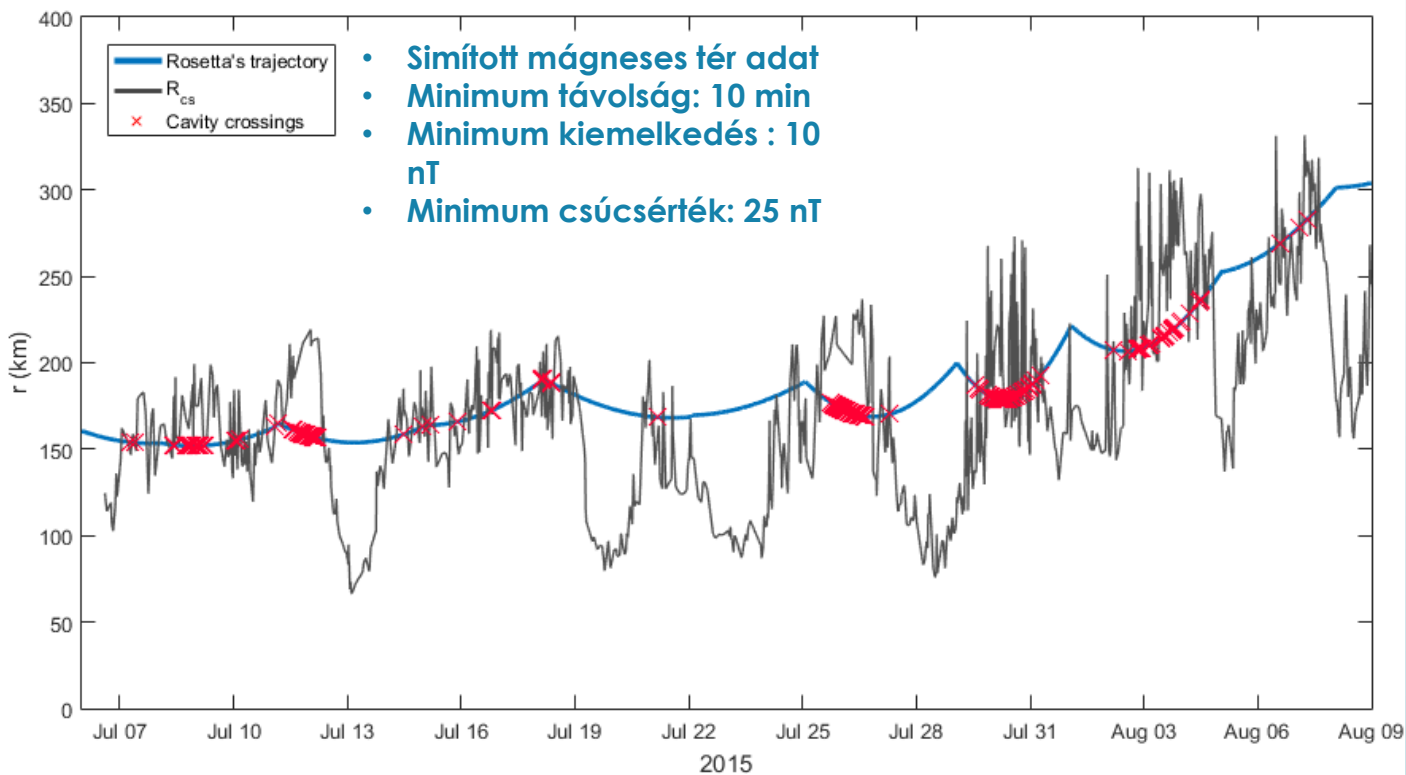


# Napszél nyomással számolt $r_{cs}$



- Nem rossz – kivéve július végét
- Globális gázkiáramlási rátával számolva
- Nem mindegy honnan propagálunk

# Rosetta mágneses tér maximumokkal számolt üregméret ( $r_{cs}$ )

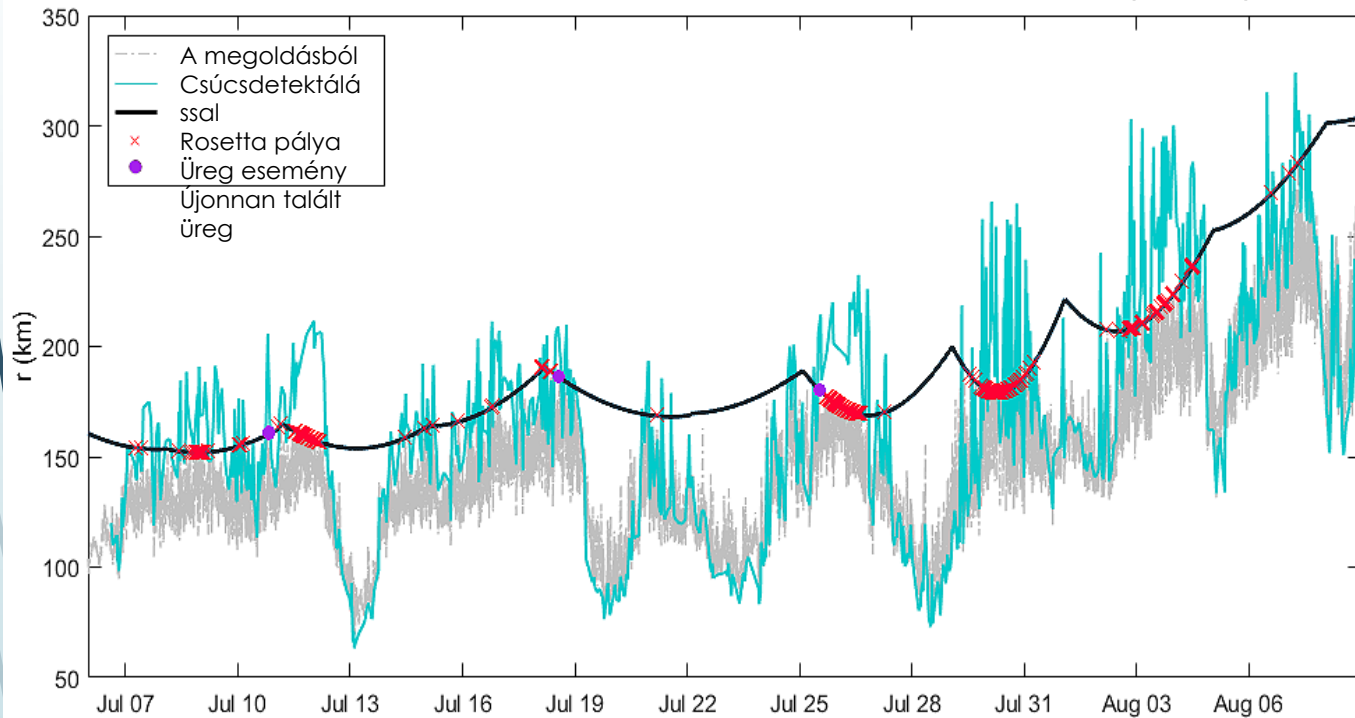


- Globális rátával számolva
- Tökéletes, néhol pontról-pontra történő egyezés

# „Valós” B-vel számolt $r_{cs}$

- $\nabla \frac{B^2}{2\mu_0} - \left( \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \cdot \nabla \right) \mathbf{B} = m_i n_i v_{in} (\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_i)$
- $\rightarrow B^2 = B_0^2 - \frac{c}{r^2} \rightarrow r_0^2 = \frac{c}{B_0^2}$
- $\rightarrow r_0^2 = \frac{1}{\frac{B^2}{c} + \frac{1}{r^2}}$  ahol B az r helyen mért mágneses tér adat
- Így hát **pontosan meg tudjuk adni  $r_0$ -t** a B(r) és r adatokból! (Feltéve persze, hogy a Cravens modell jó)

# „Valós” B-vel számolt $r_{CS}$



- A teljes Cravens modellből  $r_{CS}$  kifejezhető a lokális (mért) térrel és távolsággal
- **Maximumkeresés nélkül** számolt  $r_{CS}$  felhasználásával:

$$r_0 = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_{CS}^2}}}$$

- Üregen kívül pontos határ távolság
- Globális rátával számolva



# Alkalmazások

- ▶ A módszer nagyon pontos ezért alkalmas arra, hogy jóslatai alapján újabb üregáthaladási eseményeket keressünk – **és találjunk!**
- ▶ Az üreg közelében (ahol a Cravens megoldás érvényes) pontosan kiszámítható a pile-up régió maximális mágneses tere
- ▶ Ebből meg tudjuk mondani a napszél nyomást, amit a Rosetta nem tudott közvetlenül mérni ebben az időszakban
- ▶ Azaz a Rosetta magnetométere napszél monitorként, az űridőjárás előrejelzések egyik „állomásaként” is használható

# Pontosabb megoldás

➤ Anyagmegmaradás

$$\nabla \frac{B^2}{2\mu_0} - \left( \frac{B}{\mu_0} \cdot \nabla \right) B = m_i n_i v_{in} (u_n - u_i)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) - \nabla \times (D \nabla \times B)$$

$$\text{➤ } y := \frac{Br}{B_0 r_0}$$

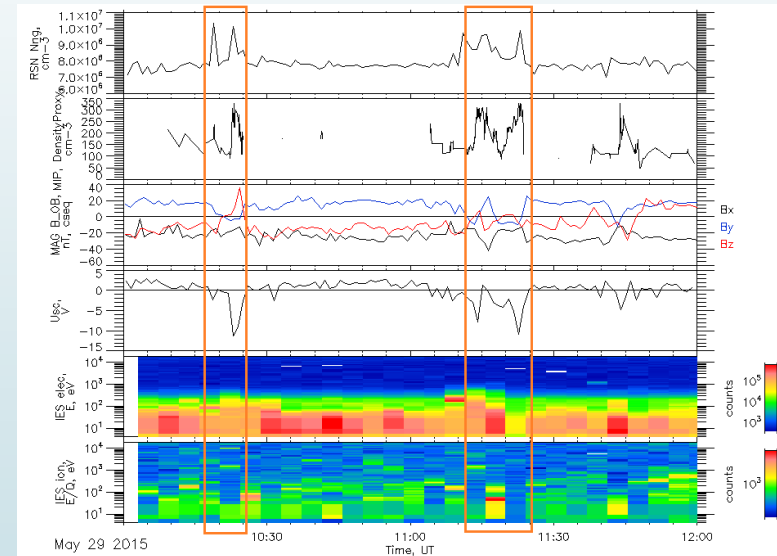
$$\text{➤ } \rightarrow y^2 \left( r \frac{y'}{y} - 1 \right) + \lambda \frac{y'}{y} - 1 = 0$$

➤ Megoldható

➤ „Inflációs megoldás”: Exponenciális felfutás  $r_0$  körül, messzebb visszaadja a Cravens megoldást

# Visszahatás a semleges gázra

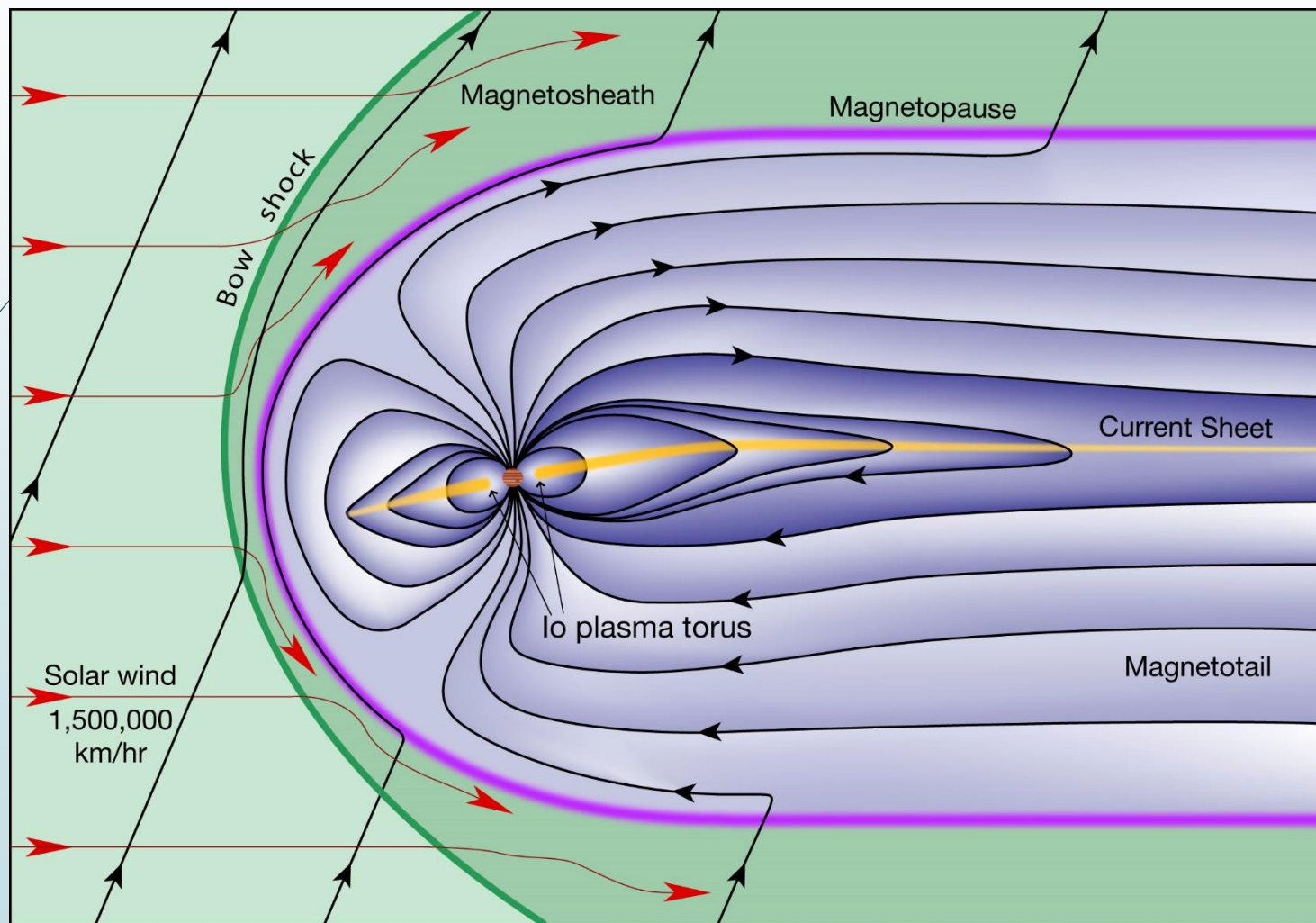
- Az üreget az ion-semleges súrlódás tartja fenn
- Látszik-e a kölcsönhatás eredménye a semleges gáz tulajdonságaiban?
- Esetenként igen! Az üreg határán
  - a semleges sűrűség megugrik,
  - a sebesség lecsökken.
- Számításaink alapján csak akkor lehet ilyen erős a visszahatás, ha a semleges gáz sebessége közel van a lokális hangsebességhez, és **lökéshullám** alakul ki.



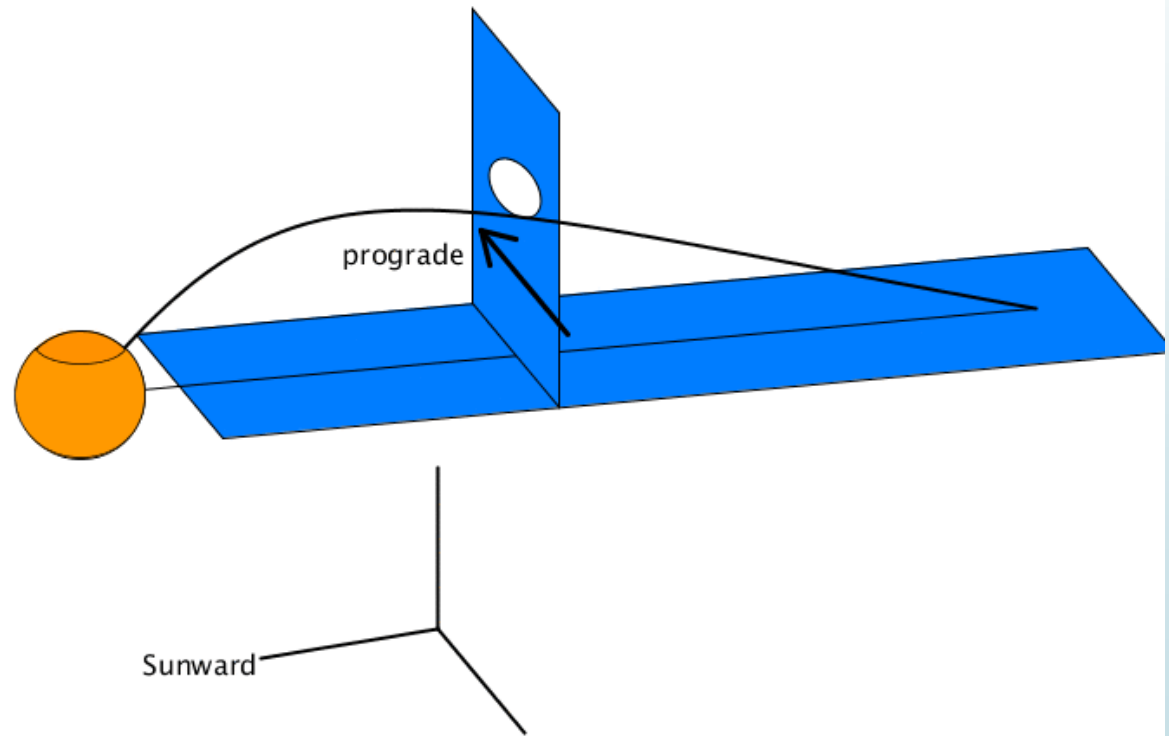
# Összefoglalás - Rosetta

- 127 üregáthaladási eseményt fedeztünk fel részecske mérések alapján
- Eredményeink lehetővé tették a magnetométer pontos kalibrálását
- Meghatároztuk a plazma és a nagyobb energiájú részecskék tulajdonságait az üregben és annak közelében
- Megmagyaráztuk a megfigyelt részecske események okait
- Új pontosabb elméleti modellt alkottunk a diamágneses üreg leírására
- Pontosan modelleztük az üreg dinamikusan változó méretét
- Számításaink lehetővé teszik, hogy a mágneses tér mérések alapján meghatározzuk a napszél tulajdonságait az üstökös előtt
- Megtaláltuk az ion-semleges kölcsönhatás nyomait a semleges gáz mérésekben
- Elméleti magyarázatot adtunk a vártnál jelentősebb visszahatásra

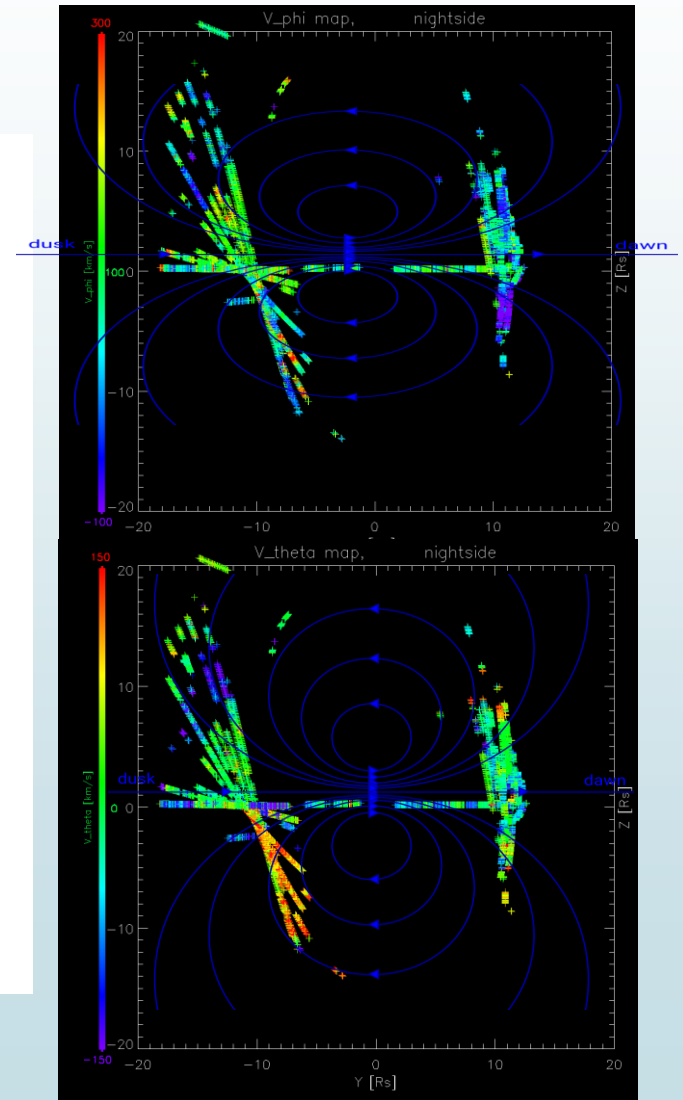
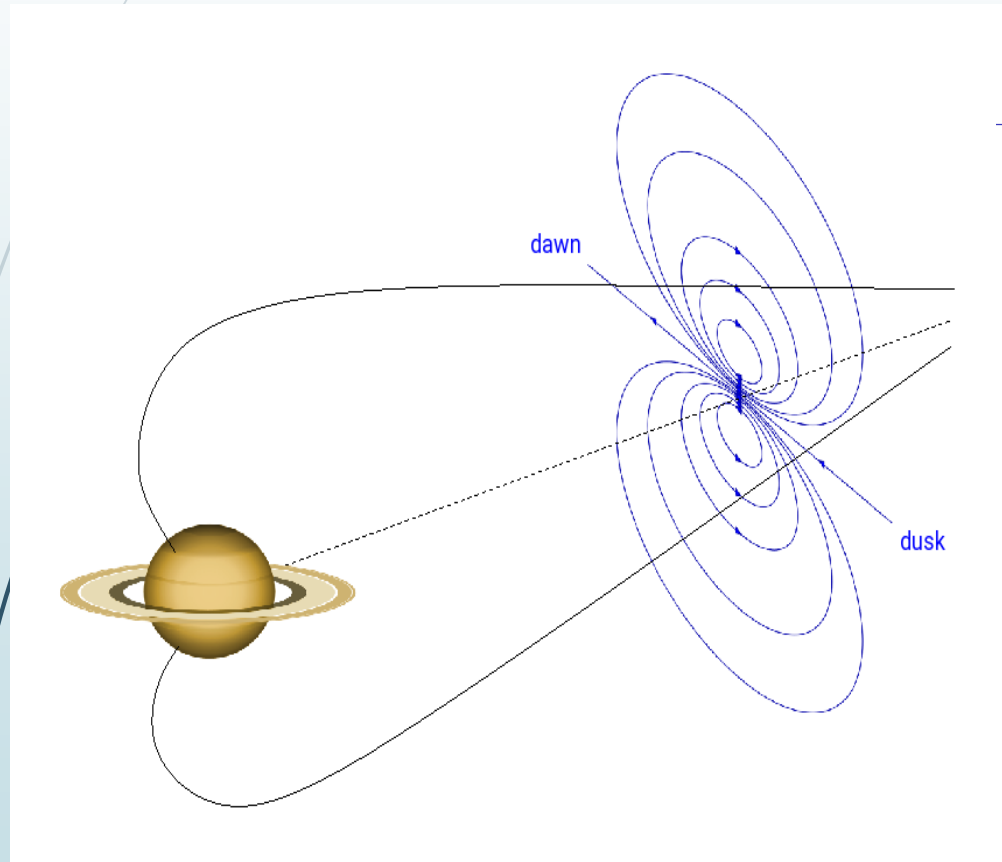
# Óriásbolygók



# Óriás plazmaörvények a Szaturnusznál



# Megtaláltuk az örvényeket a Cassini adatokban



# Összefoglalás - Cassini

- ▶ A Szaturnusz magnetoszférájának **globális szerkezete egészen más**, mint korábban gondolták
- ▶ A csóva zárt erővonalakat tartalmazó részében **két óriás plazmaörvény** található
- ▶ Ennek megfelelően a csóva egyenlítői síktól távoli részein **a plazma** a bolygó forgásához képest visszafelé, **retrográd módon mozog**

A Cassini űrszonda ugyan megsemmisült a Nagy Fináléban, de az általa összegyűjtött adatok tartogatnak még meglepetéseket!



# Köszönöm a figyelmet!

25

Németh Zoltán

*MTA Wigner FK, Úrfizikai és Űrtechnikai Osztály*