

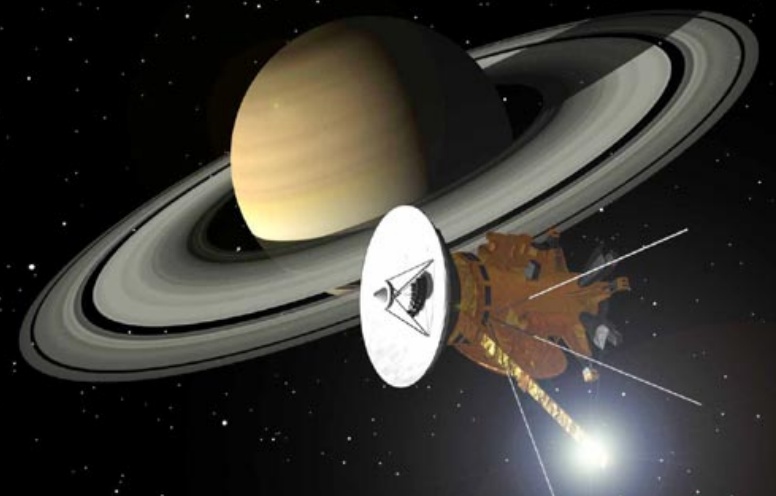


HOKKAIDO
UNIVERSITY

土星プラズマディスク中におけるダスト-プラズマ相互作用と磁気圏-電離圏結合によるイオン速度遅延

博士後期課程 1 年

堺 正太郎



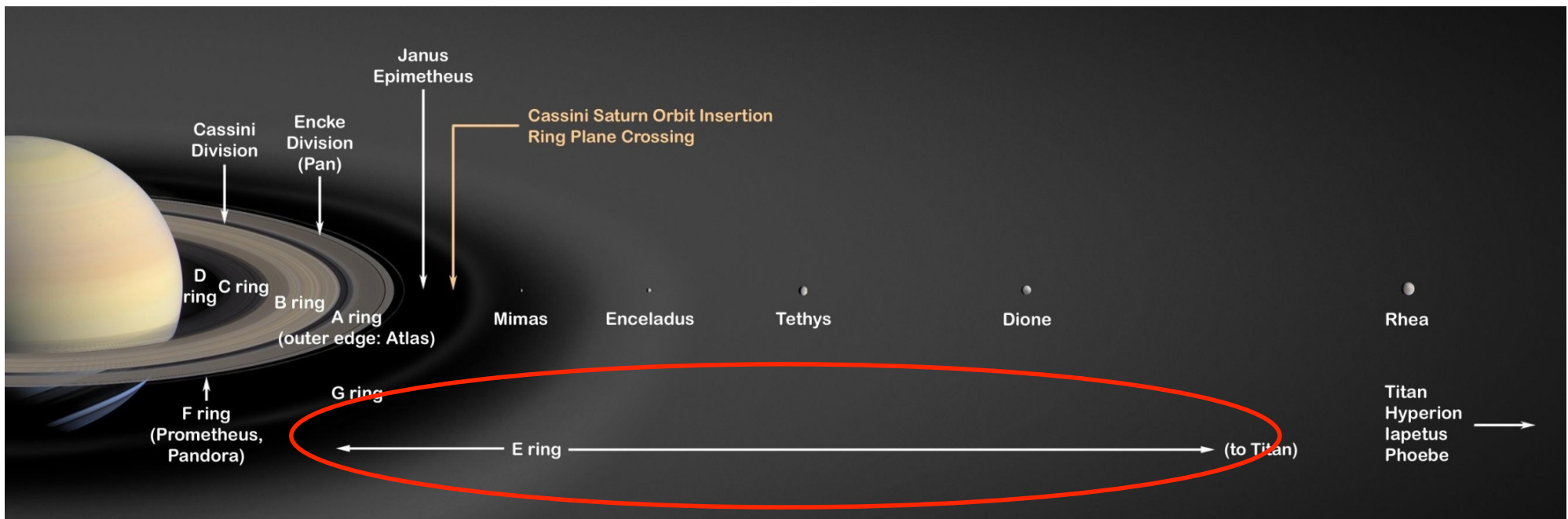
1. ダスト-プラズマ相互作用 (1次元モデリング)
 1. 土星系
 - 土星, Enceladus, E リング, 磁気圏
 2. 内部磁気圏
 - ダスト, 電子密度の減少, 共回転遅延
 3. Cassini データ解析と1次元モデリング
2. 電離圏-磁気圏 (M-I) 結合 (2次元モデリングのために)
 1. 電離圏伝導度
 2. モデル概要
 3. まとめ



ダスト-プラズマ相互作用

土星系

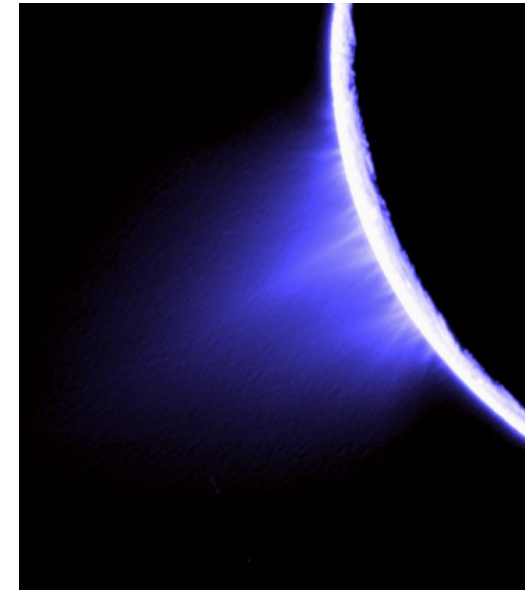
- 赤道半径: 60,268 km (1 R_s)
- 質量: 5.68×10^{26} kg
- 密度: 690 kg/m³
- 赤道重力: 10.44 m/s²
- 公転周期: 29.46 year
- 自転周期: 0.436 day
- 磁気モーメント: 4.6×10^{18} T/m³
- 自転軸に対する磁気軸の傾き : $< 1^\circ$
- リング: 内側から D, C, B, A, F, G, E
- 衛星の数: 64



Enceladus & E リング



- Enceladus
 - 赤道半径
 - 247 km
 - 大気組成
 - 主成分: 水蒸気
 - 特徴
 - 南極からのプルーム
- E ring
 - 位置
 - 3 – 8 Rs
 - 組成
 - 水グループのイオン (~80 %)
 - ダスト (水氷)
 - 供給源
 - Enceladus プルームがメイン

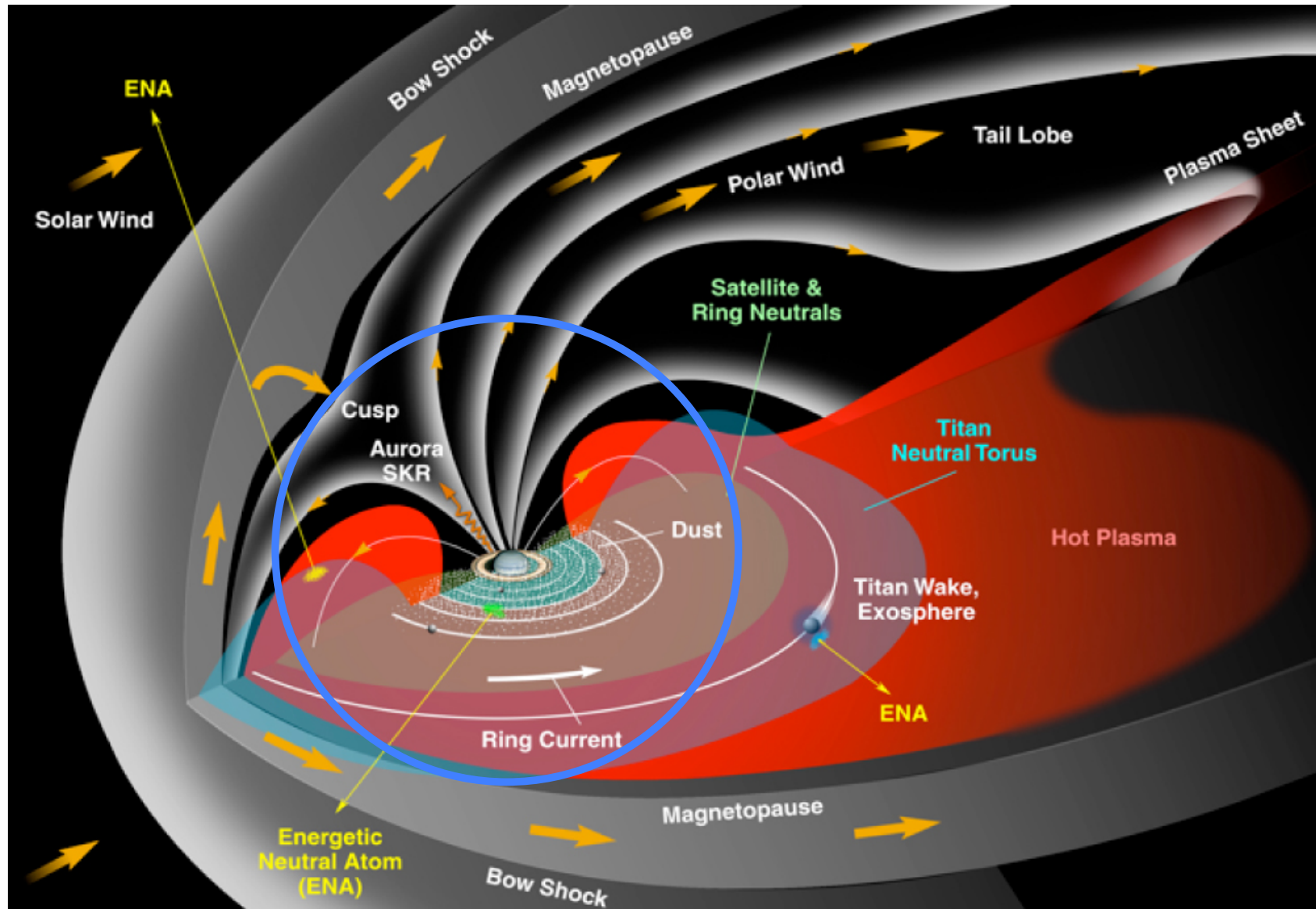


Enceladus plume [NASA/JPL/Space Science Institute]



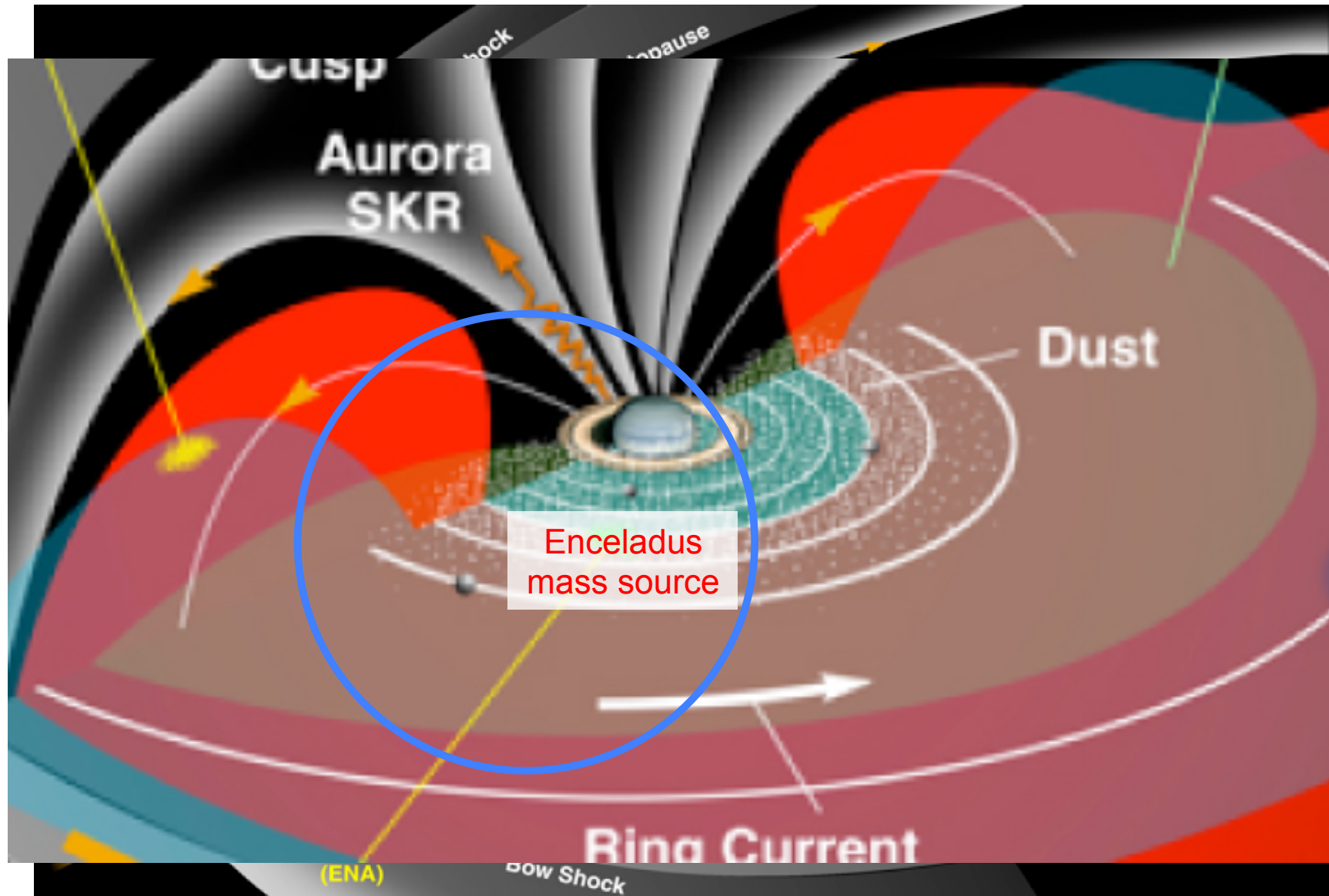
Enceladus & E ring [NASA/JPL/Space Science Institute]

土星磁気圏



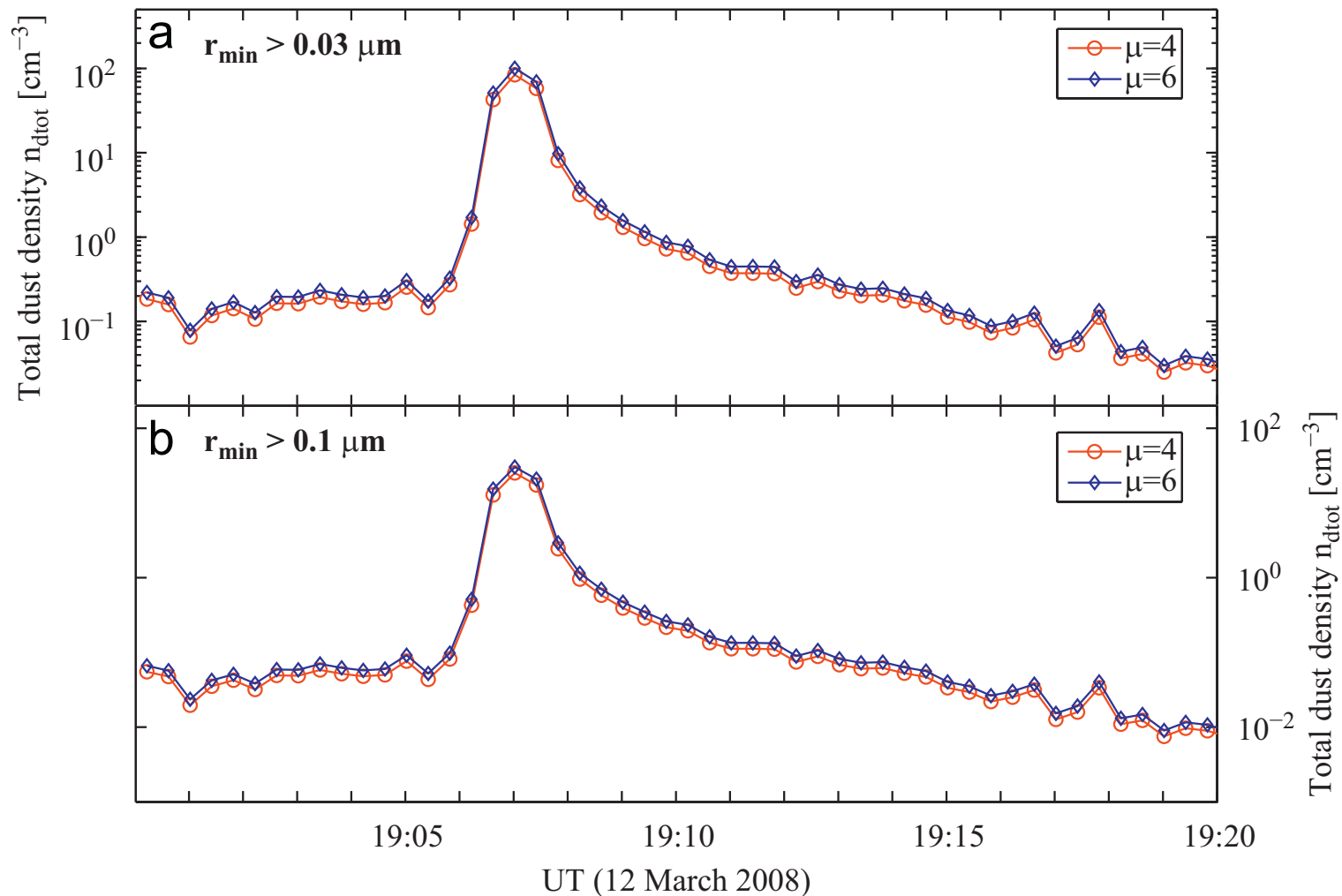
Courtesy of the Cassini MIMI team

土星磁気圏



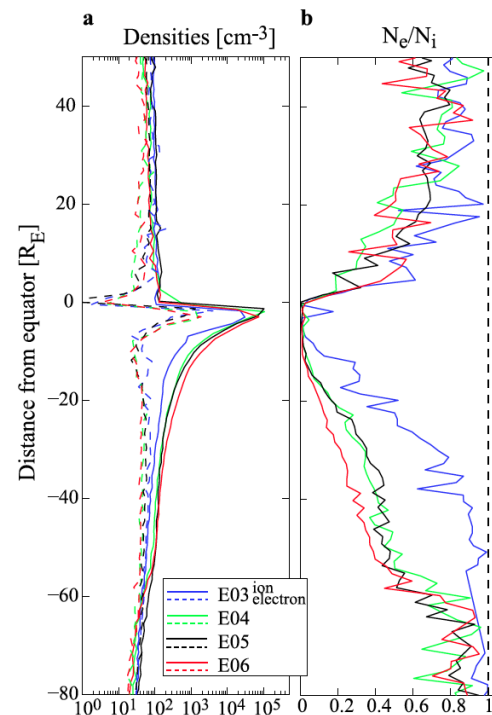
内部磁気圏中のダスト

- Enceladus 周辺では
 - トータルなダスト密度: 10^4 — 10^7 m^{-3}



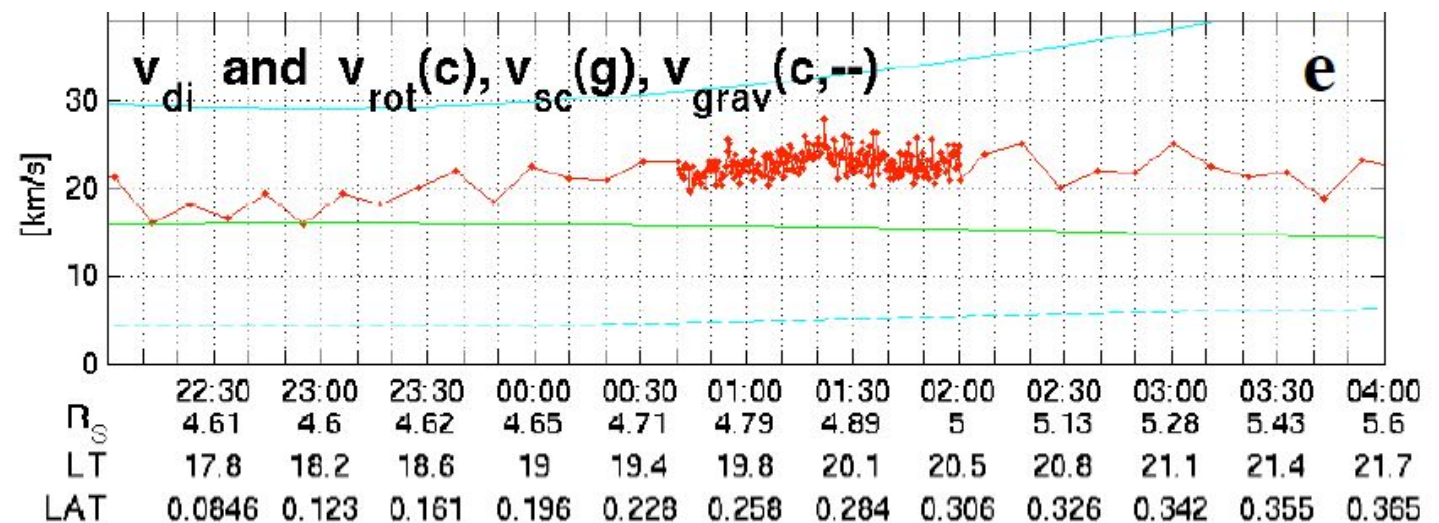
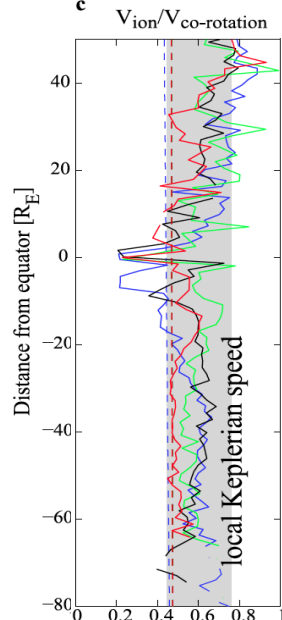
- 電子密度がイオン密度に比べて小さい [Wahlund et al., 2009, Yaroshenko et al., 2009, Morooka et al., 2011]
 - 電子密度は本来, イオン密度と等しくなければならない (プラズマの準中性状態)
 - しかし, 電子密度は $50 - 70 \text{ cm}^{-3}$ 少ない

→Wahlund et al. [2009] では負に帯電したダストが大量に存在していると予想 [Wahlund et al., 2009].



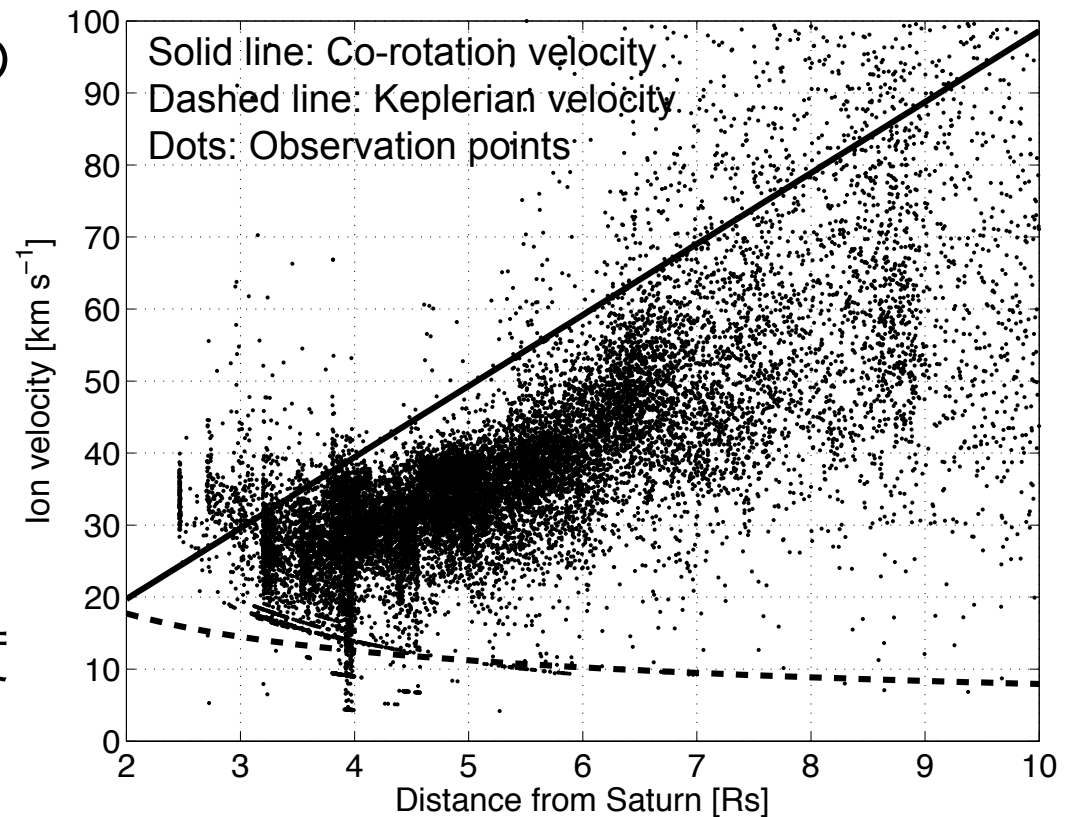
Density profile [Morooka et al., 2011]

- 土星磁気圏での共回転
 - 土星磁気圏プラズマは惑星自転のため共回転しているはず (プラズマの磁場凍結) [Blanc et al., 2005].
 - しかし Cassini による観測から, イオン速度が共回転速度より遅く, 同時に電子密度がイオン密度より減少していることが明らかになった [Wahlund et al., 2009; Morooka et al., 2011].
- Wahlund et al. [2009] は負に帯電したダストがそのダストポテンシャル内にイオンを捕捉して, 速度を遅らせていると提案



Ion speed [Wahlund et al., 2009; Morooka et al., 2011]

- 2005年2月—2010年6月
- イオン速度は共回転速度の50--70% 程度
- $r < 4 R_s$
 - 速度幅が大きい
 - ケプラー速度から共回転速度
- $4 R_s < r < 7 R_s$
 - 共回転速度とケプラー速度の間
- $r > 7 R_s$
 - イオン速度が増加, 散乱
 - ダストポテンシャルが負から正に変化する領域



イオン速度モデリング



基礎方程式

$$\frac{\partial \mathbf{v}_k}{\partial t} + (\mathbf{v}_k \cdot \nabla) \mathbf{v}_k = \frac{q}{m_k} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_k \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\rho_k} \nabla p_k + \mathbf{g} + \sum_l \mathbf{P}_{kl} + \sum_j \mathbf{R}_{kj} + \mathbf{M}_k$$

$$\mathbf{P}_{kl} = -\nu_{kl} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_l) \quad \mathbf{M}_k = -\frac{S_k}{n_k} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_n)$$

$$\mathbf{R}_{kj} = -\frac{m_k \kappa n_j n_n}{m_k n_k} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_{k0})$$

磁気圏電場 (M-I 結合)

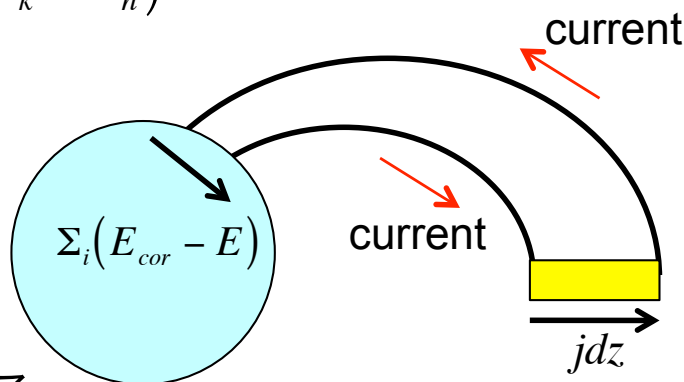
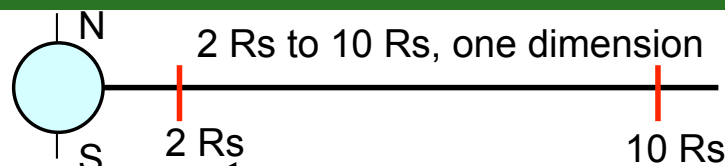
仮定

- 電流はダストが存在する領域のみで運ばれる
- 電場は jdz が大きい時, 小さくなる

$$\Sigma_i (\mathbf{E}_{cor} - \mathbf{E}) = \mathbf{j} dz$$

$$\mathbf{j} = en_i \mathbf{v}_i - en_e \mathbf{v}_e - q_d n_d \mathbf{v}_d$$

$$\Sigma_i = 1.0$$



ダスト層の厚さ: dz

フリーパラメター

(1) $dz = R_s$

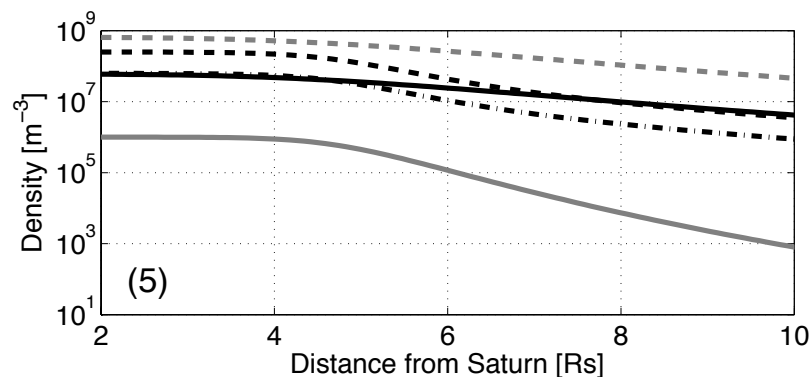
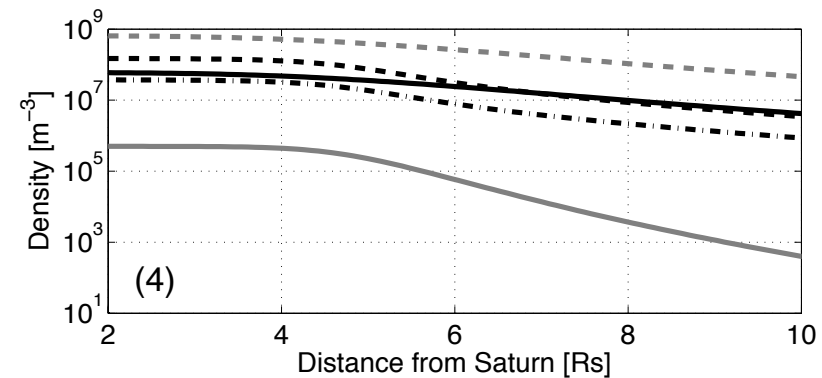
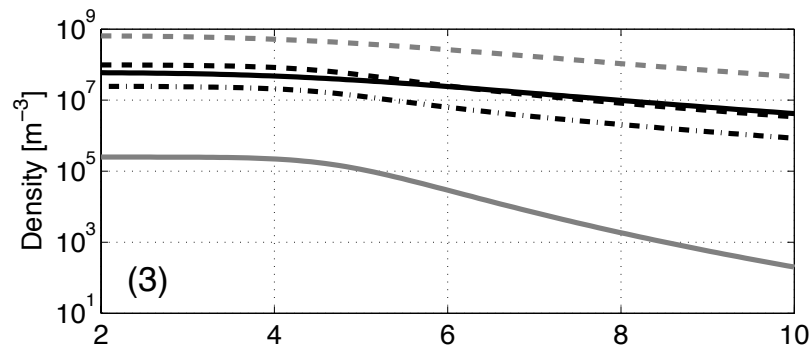
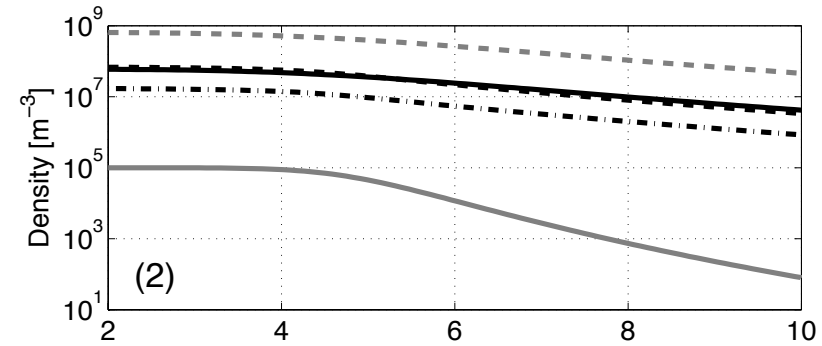
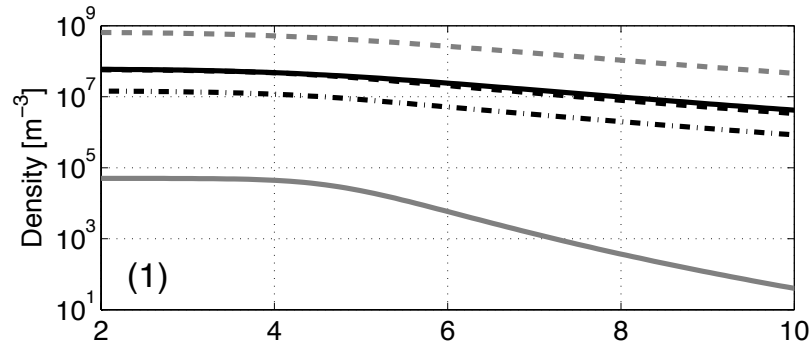
(2) $dz = 2R_s$

(3) $dz = 3R_s$

\mathbf{V}	Velocity
\mathbf{E}	Electric field
\mathbf{B}	Magnetic field
\mathbf{g}	Gravity
\mathbf{P}_{kl}	Momentum transfer
m	Mass
ρ	Mass density
p	Pressure
q	Charge quantity
ν_{kl}	Collision frequency
\mathbf{M}_k	Mass loading
S_k	Production rate
\mathbf{R}_{kj}	Charge exchange
κ	Reaction rate
\mathbf{j}	Current
\mathbf{E}_{cor}	Co-rotational Electric field
Σ_i	Ionospheric conductivity
n_k	Number density
dz	Thickness of dust

イオン速度モデリング

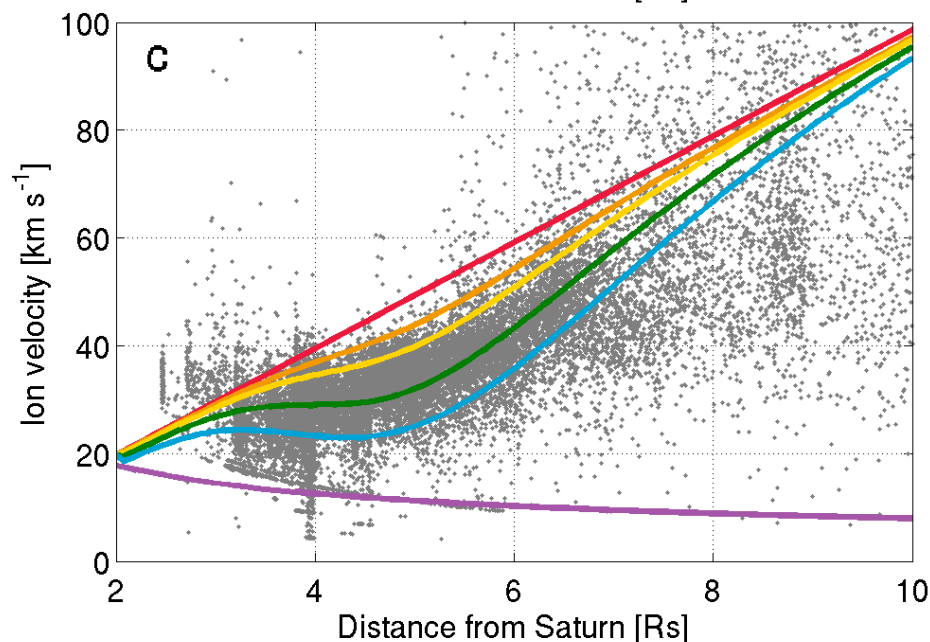
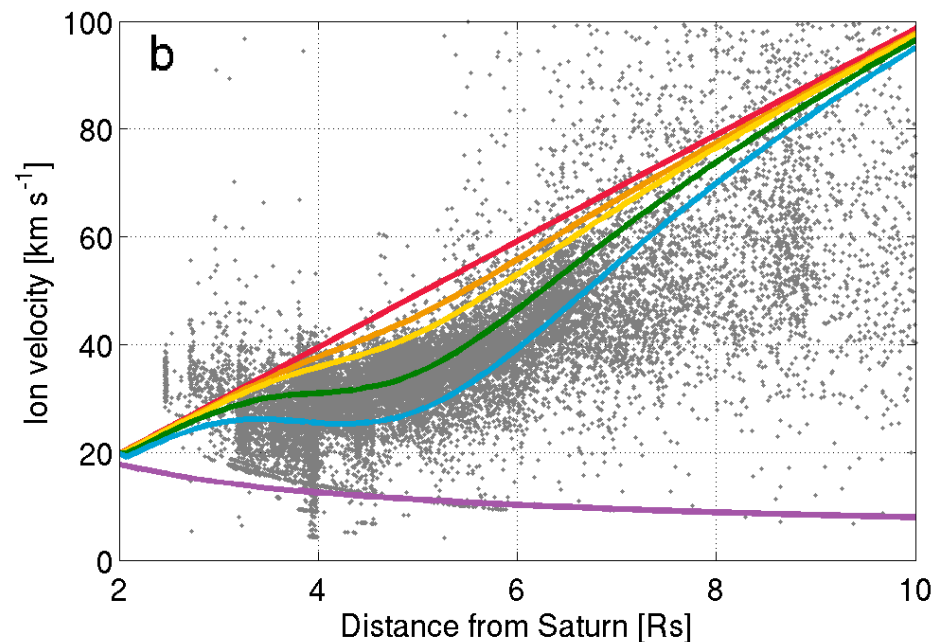
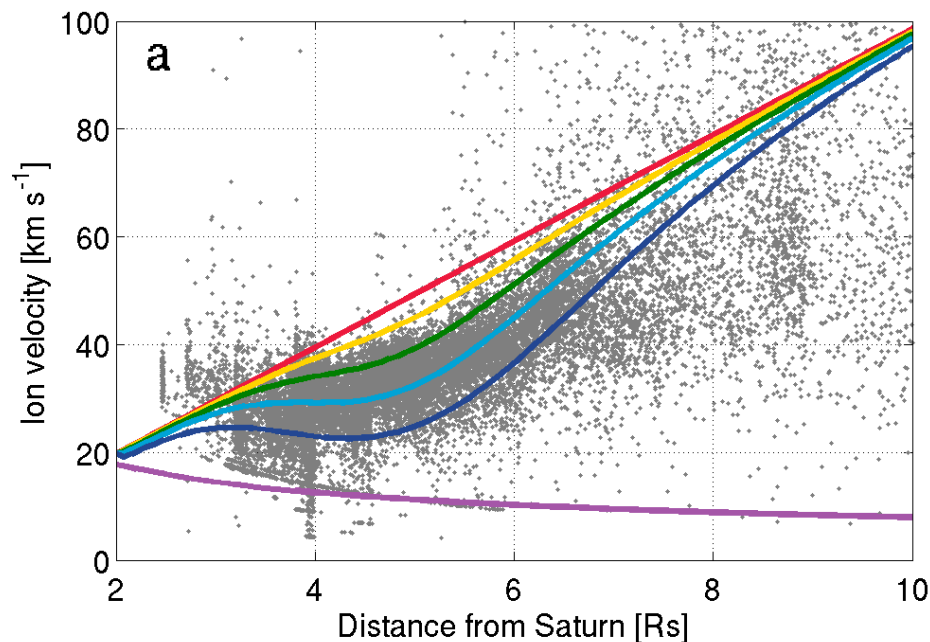
• 密度分布



$$n_w = n_e + \frac{q_d}{e} n_d - n_p$$

- Black solid line: Electron density
- Black dashed line: Water group ion density
- Black dashed-dotted line: Proton density
- Grey solid line: Dust density
- Grey dashed line: Neutral density

イオン速度モデリング



観測との比較

- ダスト密度が大きいと一致
- M-I 結合を通じてダスト
- プラズマ相互作用は重要

- Red: Co-rotation velocity
- Purple: Keplerian velocity
- Orange: Ion velocity (1)
- Yellow: Ion velocity (2)
- Green: Ion velocity (3)
- Cyan: Ion velocity (4)
- Blue: Ion velocity (5)

- 基礎方程式

$$\frac{\partial \mathbf{v}_k}{\partial t} + (\mathbf{v}_k \cdot \nabla) \mathbf{v}_k = \frac{q}{m_k} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_k \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\rho_k} \nabla p_k + \mathbf{g} + \sum_l \mathbf{P}_{kl} + \sum_j \mathbf{R}_{kj} + \mathbf{M}_k$$

$$\sum_i (\mathbf{E}_{cor} - \mathbf{E}) = \mathbf{j} dz$$

$$\mathbf{j} = en_i \mathbf{v}_i - en_e \mathbf{v}_e - q_d n_d \mathbf{v}_d$$

$$\sum_i = 1.0$$

- Pedersen 伝導度

$$\sigma_p = \sum_i \frac{\nu_i}{\nu_{in}^2 + \omega_{ci}^2} \frac{n_i e^2}{m_i} + \frac{\nu_e}{\nu_{en}^2 + \omega_{ce}^2} \frac{n_e e^2}{m_e}$$

$$\nu_i = \sum_n \nu_{in}$$

$$\nu_e = \sum_n \nu_{en}$$

$$\Sigma_p = \int_{z_1}^{z_2} \sigma_p ds$$

- 電場は伝導度に大きく依存
- 不確定性が大きい

- ~0.1—100 S [Connerney et al., 1983; Cheng and Waite, 1988]
- 0.014 S (Voyager 1), 0.035 S (Voyager 2) [Saur et al., 2004]
- 1—10 S [Cowley et al., 2004; Moore et al., 2010]

- 電離圏伝導度による磁気圏プラズマへの影響について
 - 電離圏伝導度は磁気圏電場にとって非常に重要なパラメーター
 - 伝導度を含めた速度計算はまだされていない
 - 電離圏イオン密度, 速度から電離圏伝導度を計算し, 磁気圏プラズマ速度に反映させる
- 手法
 - 半径方向—緯度方向 2次元モデリング
- 今回は電離圏伝導度の重要性について



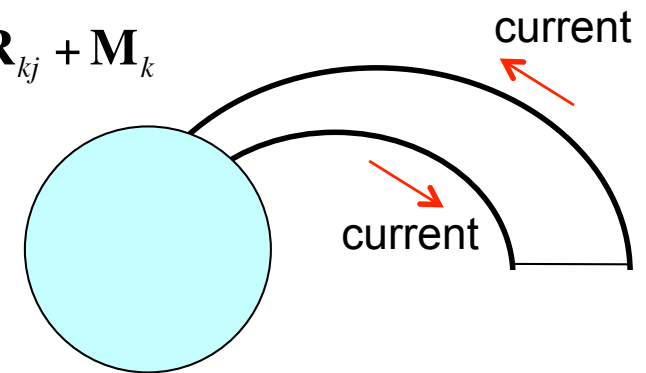
電離圏-磁気圏 (M-I) 結合 (2次元モデリングのために)

- 基礎方程式

$$\frac{\partial \mathbf{v}_k}{\partial t} + (\mathbf{v}_k \cdot \nabla) \mathbf{v}_k = \frac{q}{m_k} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_k \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\rho_k} \nabla p_k + \mathbf{g} + \sum_l \mathbf{P}_{kl} + \sum_j \mathbf{R}_{kj} + \mathbf{M}_k$$

$$\Sigma_i (\mathbf{E}_{cor} - \mathbf{E}) = \mathbf{j} dz$$

$$\mathbf{j} = en_i \mathbf{v}_i - en_e \mathbf{v}_e - q_d n_d \mathbf{v}_d$$



- 試しに電離圏伝導度をパラメターとして数値実験を実施

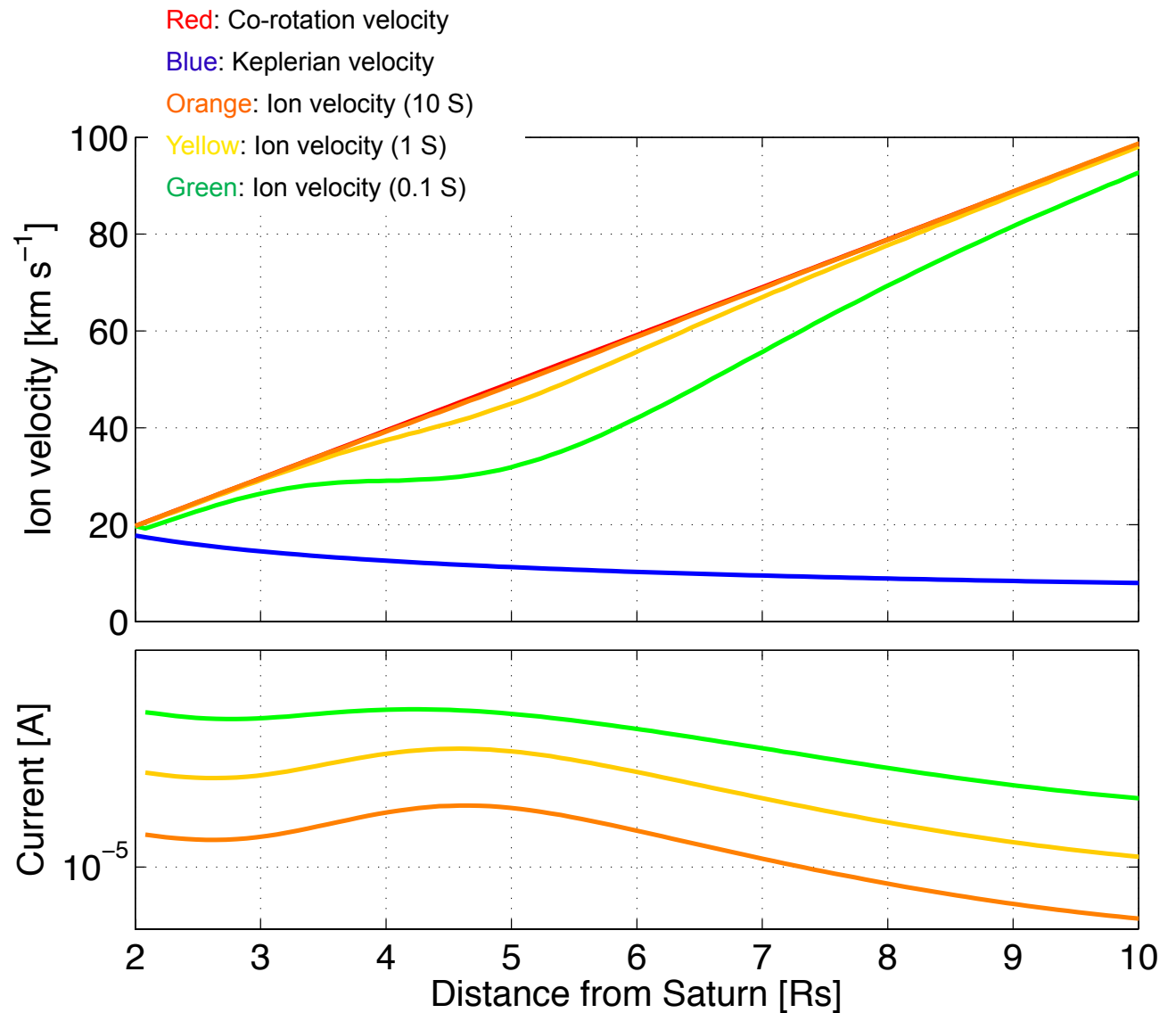
1. 0.1 S

2. 1 S

3. 10 S

結果

- $dz = R_s$ で計算
- イオン速度 ($5 R_s$)
 - 0.1 S
 - ~60% of co-rotation
 - 1 S
 - ~90% of co-rotation
 - 10 S
 - ~co-rotation
- 電流
 - 伝導度が小さい時, 電流が大きくなる
- 電離圏伝導度が磁気圏イオン速度において非常に重要



- モデル
 - MHD 方程式 (質量保存, 運動量保存)
 - 磁力線方向と磁力線に垂直な方向で解く

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i \mathbf{v}_i) = P_i - L_i$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_k}{\partial t} + (\mathbf{v}_k \cdot \nabla) \mathbf{v}_k = \frac{q}{m_k} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_k \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\rho_k} \nabla p_k + \mathbf{g} + \sum_l \mathbf{P}_{kl} + \sum_j \mathbf{R}_{kj} + \mathbf{M}_k$$

P_i Production rate
L_i Loss rate

- 連続の式

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial(n_i v_i^{\parallel} A)}{\partial s^{\parallel}} + \frac{\partial(n_i v_i^{\perp})}{\partial s^{\perp}} = P_i - L_i$$

- 運動方程式

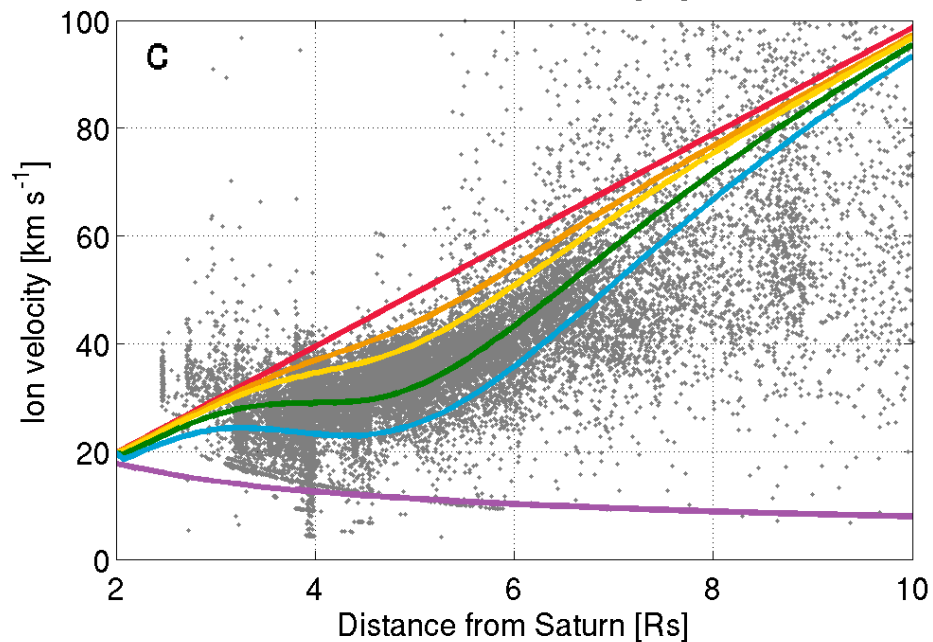
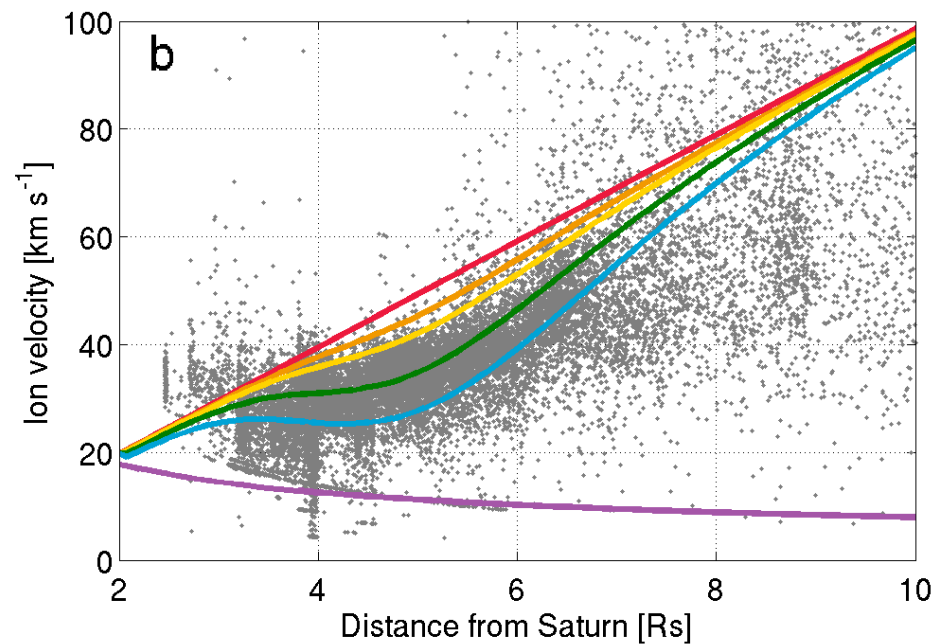
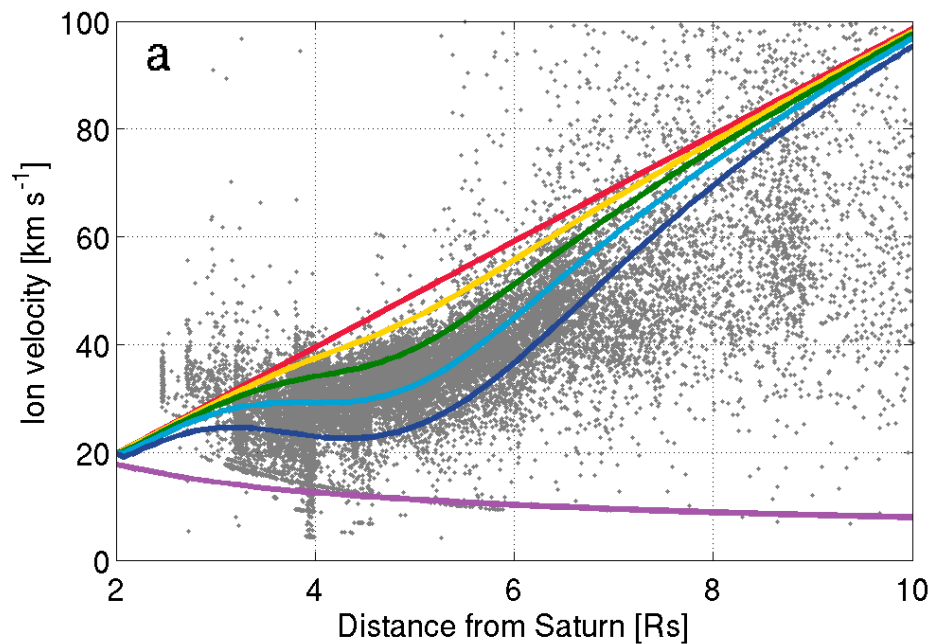
$$\frac{\partial v_k^{\parallel}}{\partial t} + v_k^{\parallel} \frac{\partial v_k^{\parallel}}{\partial s^{\parallel}} + v_k^{\perp} \frac{\partial v_k^{\parallel}}{\partial s^{\perp}} - ((\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{e}^{\parallel} = \frac{q}{m_k} \mathbf{E} \cdot \mathbf{e}^{\parallel} - \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial p_k}{\partial s^{\parallel}} + \mathbf{g} \cdot \mathbf{e}^{\parallel} + \sum_l P_{kl}^{\parallel} + \sum_j R_{kj}^{\parallel} + M_k^{\parallel}$$

$$\frac{\partial v_k^{\perp}}{\partial t} + v_k^{\parallel} \frac{\partial v_k^{\perp}}{\partial s^{\parallel}} + v_k^{\perp} \frac{\partial v_k^{\perp}}{\partial s^{\perp}} - ((\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{e}^{\perp} = \frac{q}{m_k} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{e}^{\perp} + (\mathbf{v}_k \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{e}^{\perp}) - \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial p_k}{\partial s^{\perp}} + \mathbf{g} \cdot \mathbf{e}^{\perp} + \sum_l P_{kl}^{\perp} + \sum_j R_{kj}^{\perp} + M_k^{\perp}$$

$\boldsymbol{\Omega}$ Angular velocity of Saturn
 \mathbf{e} Unit vector

- ダスト-プラズマ相互作用
 - 電離圏-磁気圏結合を介して卓越
 - 衝突により磁気圏に流れる電流が電離圏ダイナモ電場を小さくする
 - ダスト密度が大きい時, 観測と一致
- 磁気圏-電離圏結合
 - 電離圏伝導度によって磁気圏プラズマの描像が変化
 - 伝導度が小さい: イオン速度が減少
 - 電流量が大きくなる
 - 伝導度が大きい: イオン速度が増加
 - 電流量が小さくなる
 - 半径方向-緯度方向の2次元モデルから磁気圏プラズマを調査

イオン速度 (観測との比較)



- Red: Co-rotation velocity
- Purple: Keplerian velocity
- Orange: Ion velocity (1)
- Yellow: Ion velocity (2)
- Green: Ion velocity (3)
- Cyan: Ion velocity (4)
- Blue: Ion velocity (5)