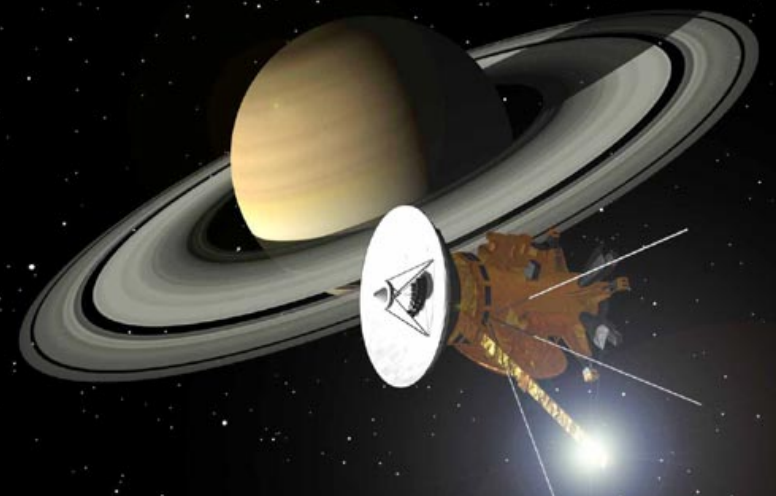
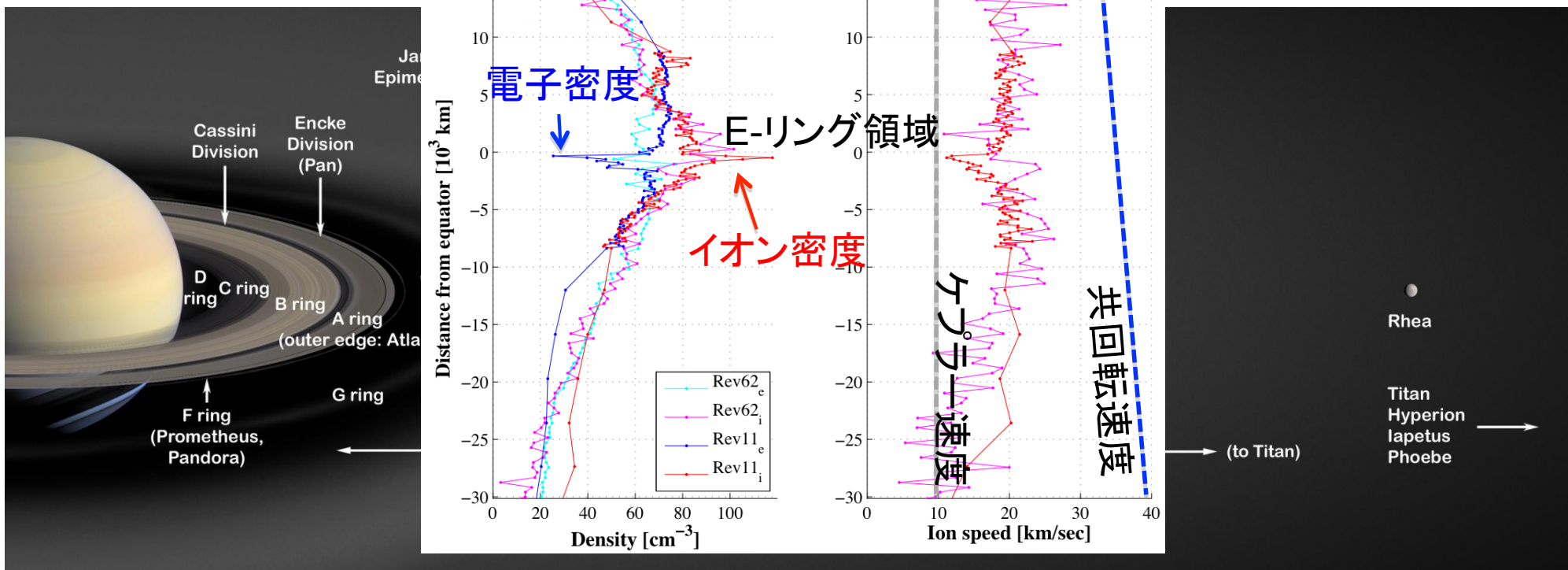


# カッシーニ・リングミュアプローブによる 土星内部磁気圏のイオン速度観測とモデリング

惑星宇宙グループ修士課程 2年  
堺 正太郎



- 土星磁気圏プラズマは惑星の自転が速いため少なくとも  $20 R_S$  以上の広い範囲で共回転運動しているとされていた
- カッシーニの観測によりイオン速度が E リング領域では共回転速度を大きく下回り, 同時に電子密度がイオン密度に比べて顕著に減少していることが明らかになった
- 負に帯電したダストが大量に存在し, そのダストがポテンシャル内にイオンを捕捉していることが示唆された [Wahlund et al, 2009]



- Eリング領域におけるダスト-プラズマ相互作用の解明
  - イオン速度観測
    - カッシーニ・ラングミュアプローブのデータ解析
  - ダスト-プラズマ相互作用モデリング
    - イオン, 電子, ダストの3流体MHD方程式
  - 観測とモデルを比較

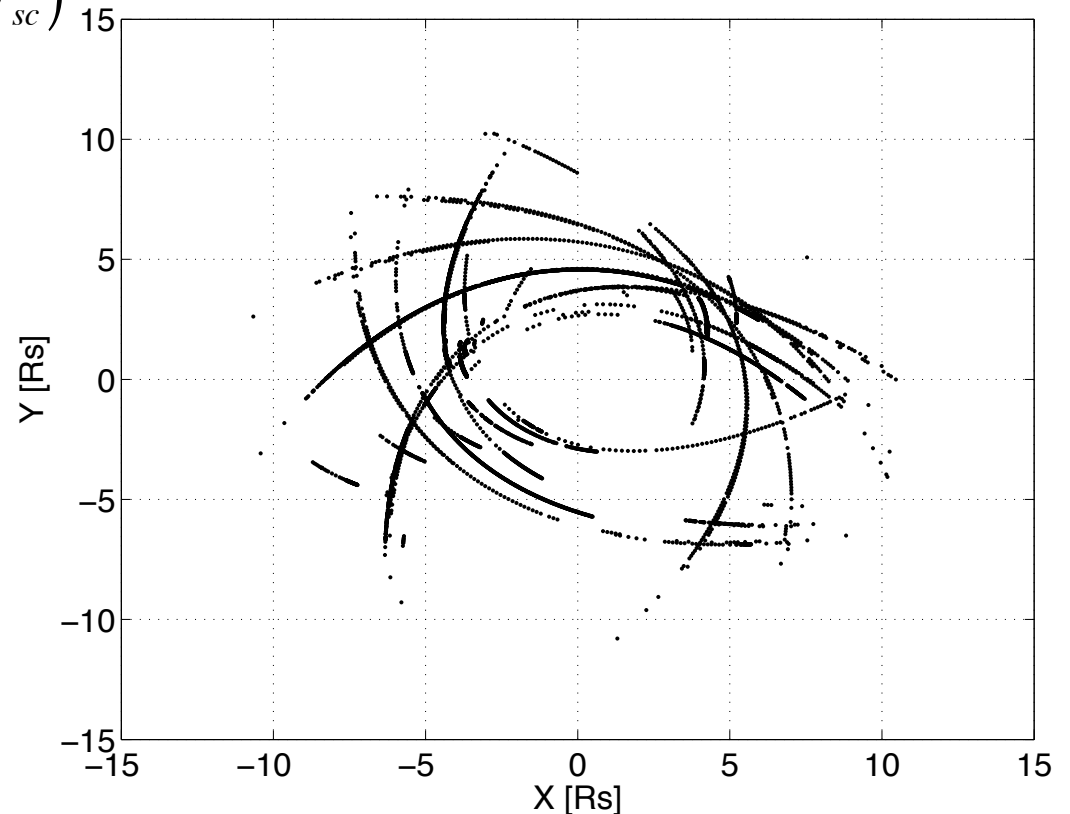
# RPWS/LP によるイオン観測

- イオン情報の出力
  - 相対電位-32 – 32 V までを1秒以下で測定
  - イオン電流:  $U_{bias} < 0$

$I_i$	イオン電流	$e$	電気素量
$A_{LP}$	プローブ表面積	$m_i$	イオン質量
$n_i$	イオン密度	$U_{bias}$	バイアスポテンシャル
$q_i$	イオン電荷量	$U_{sc}$	フローティングポテンシャル
$v_i$	イオン速度		

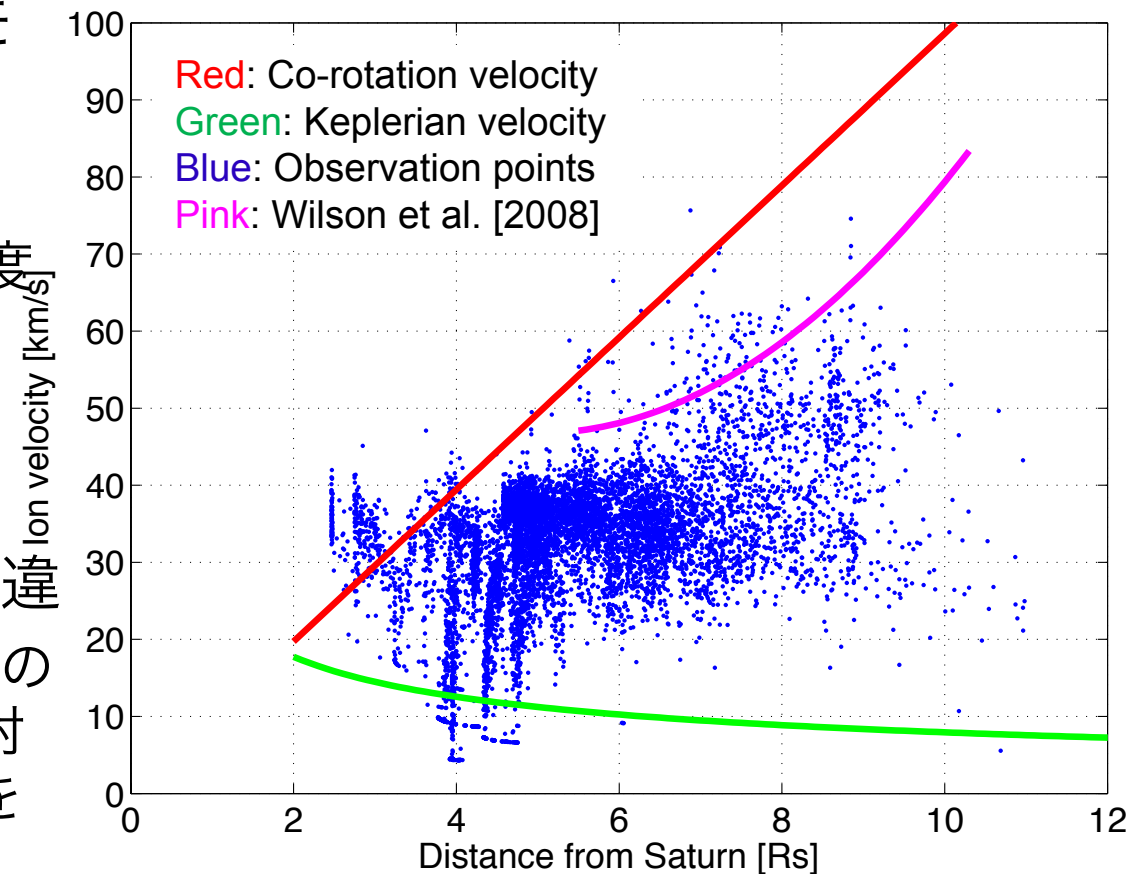
$$I_i \approx A_{LP} n_i q_i \frac{|v_i|}{4} - A_{LP} n_i q_i \frac{1}{2} \frac{e}{m_i |v_i|} (U_{bias} + U_{sc})$$

- 使用データ
  - 2005年2月—2008年3月 (Rev003--087)
  - 赤道面のみ使用

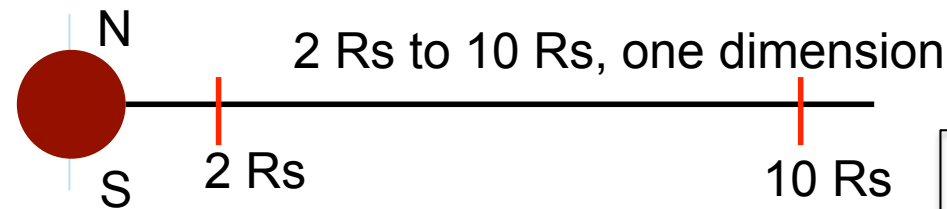


- 結果

- イオン速度は従来の速度モデルよりも遅い
- < 7  $R_s$ 
  - 共回転速度とケプラー速度の間
- > 7  $R_s$ 
  - 速度が増加・散乱
- Wilson et al. [2008] との相違
  - Wilson et al. では数百 eV の粒子を観測しているのに対し, LP では数 eV の粒子を観測しているため



- イオン速度計算モデル
  - イオン, 電子, ダストの 3 流体 MHD 方程式
  - 衝突による運動量利得を考慮
  - 電荷交換によるマスローディングを考慮



イオン(水)

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} + (\mathbf{v}_i \cdot \nabla) \mathbf{v}_i = \frac{e}{m_i} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\rho_i} \nabla p_i + \mathbf{g} + (\mathbf{P}_{id} + \mathbf{P}_{ie} + \mathbf{P}_{in}) + \mathbf{M}_i$$

ダスト

$$\frac{\partial \mathbf{v}_d}{\partial t} + (\mathbf{v}_d \cdot \nabla) \mathbf{v}_d = -\frac{q_d}{m_d} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_d \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\rho_d} \nabla p_d + \mathbf{g} + (\mathbf{P}_{di} + \mathbf{P}_{de} + \mathbf{P}_{dn})$$

電子

$$0 = -\frac{e}{m_e} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) + (\mathbf{P}_{ed} + \mathbf{P}_{ei} + \mathbf{P}_{en})$$

$$\mathbf{P}_{kl} = -\mathbf{v}_{kl} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_l) \quad \mathbf{M}_i = -\frac{S_i}{n_i} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_n)$$

$\mathbf{v}$	速度
$\mathbf{E}$	電場
$\mathbf{B}$	磁場
$\mathbf{g}$	重力加速度
$\mathbf{P}_{kl}$	運動量利得
$m$	質量
$\rho$	質量密度
$p$	圧力
$e$	電気素量
$q_d$	ダストの電荷量
$\mathbf{v}_{cor}$	共回転速度
$\mathbf{v}_{kl}$	衝突周波数
$\mathbf{M}_i$	マスローディング
$S_i$	イオン生成率

# 衝突周波数



$$v_{id} = n_d \left\{ 4\pi \left[ \frac{q_d e}{4\pi\epsilon_0 (|v_i - v_d|^2 + v_{ith}^2)} \right]^2 + \pi r_d^2 \right\} \sqrt{|v_i - v_d|^2 + v_{ith}^2}$$

$$v_{ed} = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3} n_d v_{eth} \frac{r_d^2 e^2 \phi^2}{k_B^2 T_e^2} \times 2 \ln \frac{2k_B T_e}{e\phi r_d} \lambda$$

$$v_{ei} = \left( 34 + 4.18 \ln \frac{T_e^3}{n_e \times 10^{-6}} \right) n_e \times 10^{-6} T_e^{-3/2}$$

$$v_{in} = (2.6 \times 10^{-9}) (n_n + n_i) A^{-1/2} \times 10^{-6}$$

$$v_{en} = (5.4 \times 10^{-10}) n_n T_e^{1/2} \times 10^{-6}$$

$$v_{dn} = \frac{8\sqrt{2\pi}}{3} \frac{m_n}{m_d} r_d^2 n_n v_{nth}$$

$$v_{kl} = \frac{n_l m_l}{n_k m_k} v_{lk}$$

$T_e$  電子温度 [K]  
 $r_d$  ダスト半径 [m]  
 $\phi$  ダストポテンシャル[V]  
 $k_B$  ボルツマン定数 [J/K]  
 $\lambda$  デバイ長 [m]  
 $A$  ガスの平均分子量 [amu]  
 $v_{kth}$  熱速度 [m/s]

# パラメター



ダスト密度, ダスト半径, ダストポテンシャル, 温度, イオン密度, 中性粒子密度, ダスト質量, 中性粒子質量, イオン質量, イオン生成率がパラメター

$$n_i = \begin{cases} 6.0 \times 10^7 & (R_s < 5) \\ \left[ 5.0 \left( \frac{r}{R_s} \right)^{-4.3} + 0.16 \left( \frac{r}{R_s} \right)^{-3.2} \right] \times 10^{10} & (R_s > 5) \end{cases} \quad [\text{m}^{-3}]$$

$$n_d = \begin{cases} 6.0 \times 10^4 & (R_s < 5) \\ \left[ 5.0 \left( \frac{r}{R_s} \right)^{-4.3} + 0.16 \left( \frac{r}{R_s} \right)^{-3.2} \right] \times 10^7 & (R_s > 5) \end{cases} \quad [\text{m}^{-3}]$$

$$n_e = n_i - \frac{q_d}{e} n_d \quad [\text{m}^{-3}]$$

$$r_d = 10^{-7} \text{ [m]} \quad q_d = \alpha 4\pi r_d \phi \text{ [C]} \quad S_i = 10^4 \text{ [m}^{-3} \text{ s}^{-1}]$$

$$\phi = 1.0 \text{ [V]} \quad T = 1.0 \text{ [eV]}$$

イオン密度  
Persoon et al., 2009

ダスト半径  
Yaroshenko et al., 2009

イオン生成率  
Cowee et al., 2009

温度  
Wahlund et al., 2009

ダストポテンシャル  
Wahlund et al., 2009

ダスト密度  
Yaroshenko et al., 2009



- 電場

- 磁気圏と電離圏を結合

仮定

- (1) 磁気圏電場はダストが担う ( $E_{kep}$ )
- (2) 磁力線方向の伝導度は電離圏が担う

$$E = \frac{\Sigma_i E_{cor} + \Sigma_{md} E_{kep}}{\Sigma_i + \Sigma_{md}}$$

$$\Sigma_i = 1.0$$

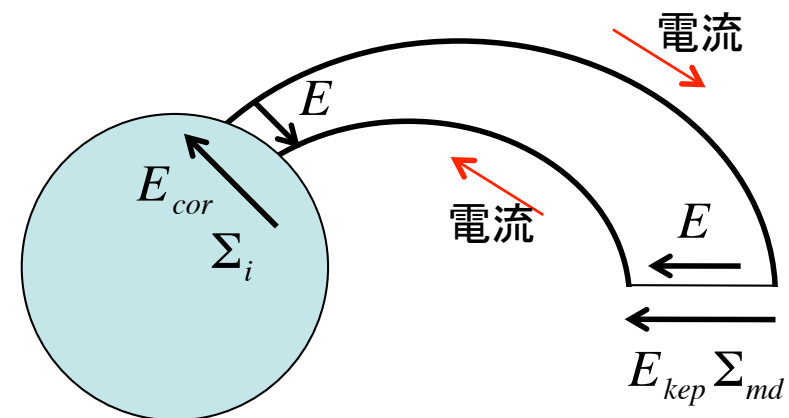
$$\Sigma_{md} = \frac{v_{di} + v_{de} + v_{dn}}{(v_{di} + v_{de} + v_{dn})^2 + \omega_d^2} \frac{n_d q_d^2}{m_d} 10 dz$$

$\Sigma_i$	電離圏伝導度
$\Sigma_{md}$	ダストが担う磁気圏伝導度

- ダスト層の厚さ  $dz$

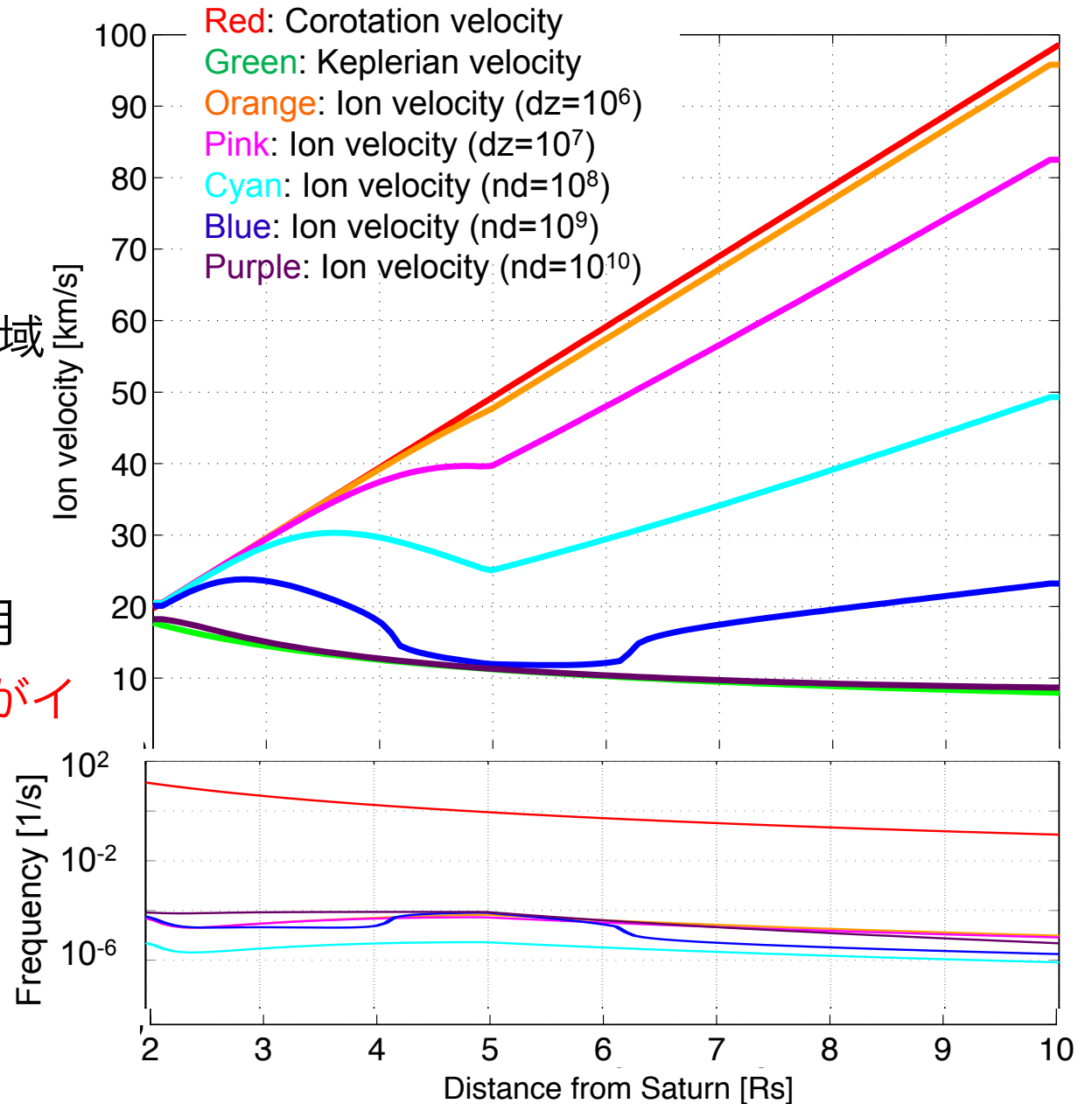
- フリーパラメーターとして計算

- $dz = 10^6$  m
- $dz = 10^7$  m
- $dz = 10^8$  m
- $dz = 10^9$  m
- $dz = 10^{10}$  m

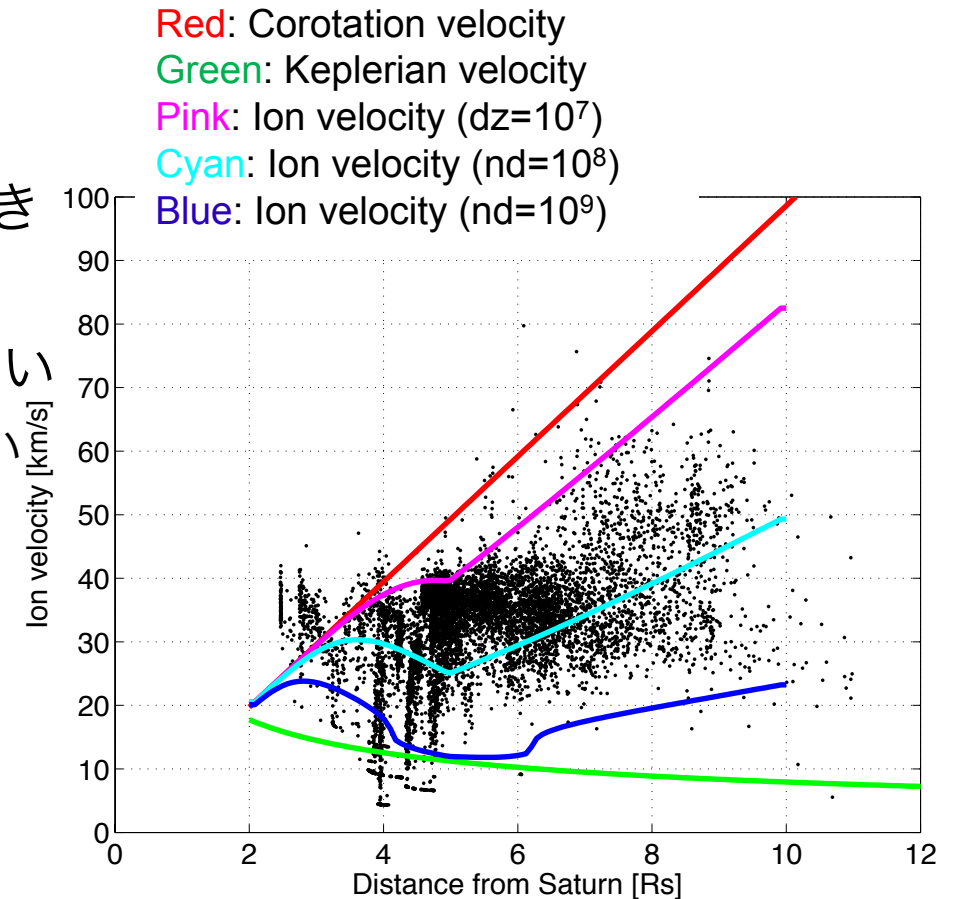


# 結果 (dz を変化)

- ダスト層の厚さを変化
  - ダスト密度が一定の領域
    - 速度が減少
      - $\Sigma_{md}$  が増加
  - ダスト密度が減少する領域
    - 速度が増加
      - $\Sigma_{md}$  が減少
- ダスト-プラズマ相互作用
  - ダストが作る電場 ( $E_{kep}$ ) がイオン速度に大きく影響
  - クーロン衝突は影響せず



- 観測との比較
  - 観測とよく一致
    - ダスト層の厚さが  $\sim 10^8$  m のとき
      - 土星直径の大きさ
    - クーロン衝突のみでは一致しない
      - ダストはイオンを捕捉できない
        - ダスト密度が小さい
        - 温度が低すぎる
    - ダストが担う電場  $E_{\text{kep}}$  が重要
      - 電離圏との結合
  - 課題
    - イオン密度とダスト分布の与え方について
    - Z方向の広がりについて



- 観測
  - $< 7 R_s$ 
    - 共回転速度とケプラー速度の間
  - $> 7 R_s$ 
    - イオン速度が全体的に増加・散乱
- モデリング
  - $dz$  を固定
    - イオンと電子のみが存在
      - イオンは共回転運動
    - イオンとダストのみが存在
      - イオンは始め共回転運動し, その後遅延
  - $dz$  を変化
    - $dz$  が厚い時, イオンは共回転遅延
- 比較
  - 観測とモデルはよく一致
    - $dz \sim 10^8 \text{ m}$  の時
    - ダスト密度にも影響

# 付録

- 打ち上げ

日付: 1997年10月15日

開発・運用機関: NASA, ESA

土星軌道投入: 2004年12月

現在も観測中

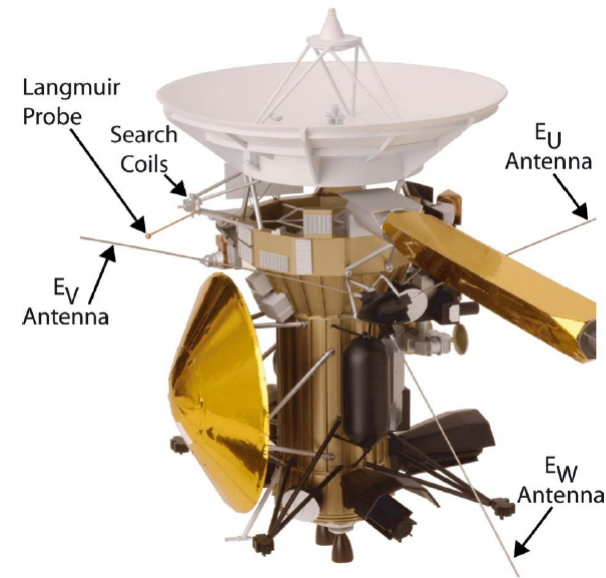
- 高さ: 6.7 m, 幅: 4 m

- 重量: 2125 kg

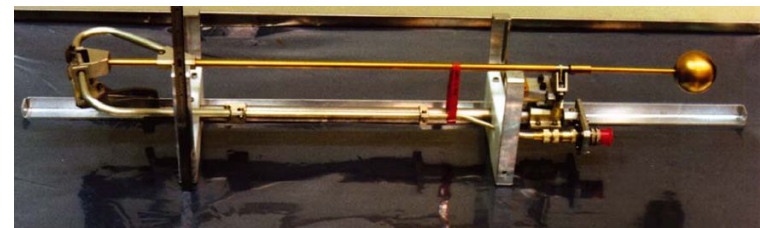
- ラングミュアプローブ (LP)

- 長さ: 1.5 m, 球の直径: 50 mm

- チタン製 (窒化チタン皮膜)



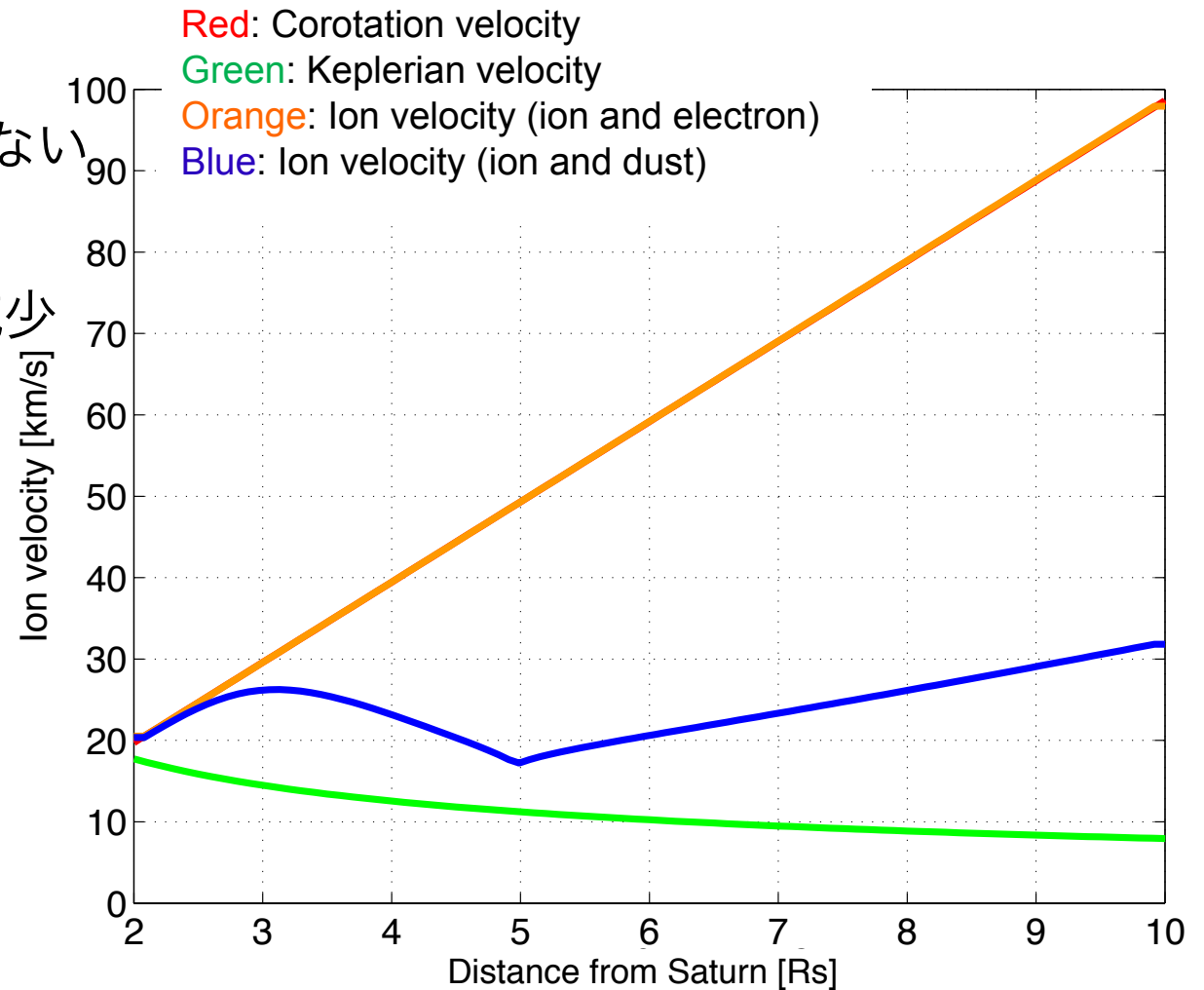
Cassini [Gurnett et al., 2004]



Langmuir Probe [Gurnett et al., 2004]

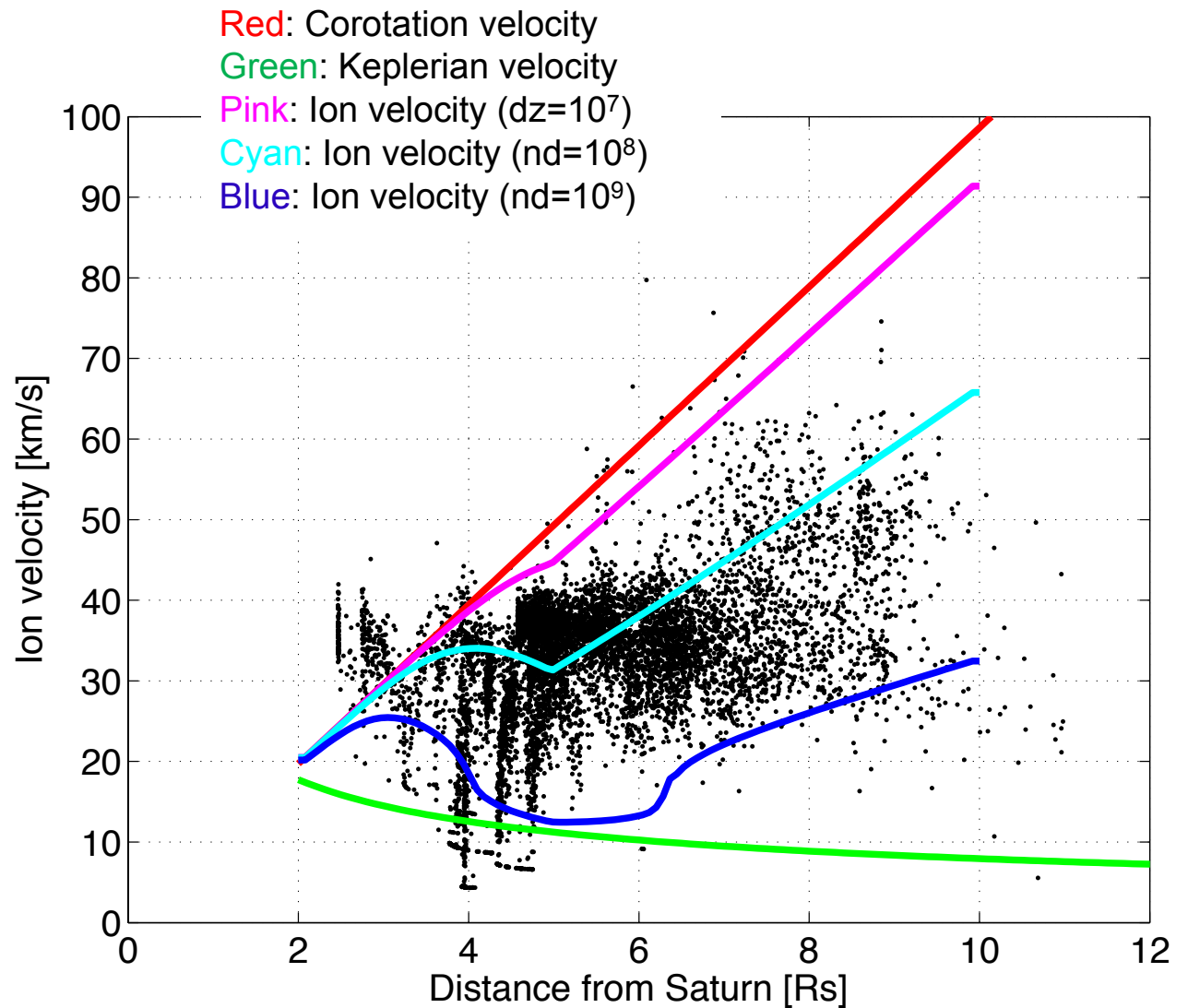
# 結果 ( $dz=10^8$ に固定)

- イオンと電子のみ存在
  - 共回転速度
    - ダストと相互作用しない
- イオンとダストのみ存在
  - $< 5 R_s$  速度が緩やかに減少
    - ダスト密度一定
    - $\Sigma_{md}$  が増加
  - $> 5 R_s$  速度増加
    - ダスト密度減少
    - $\Sigma_{md}$  が減少
- **ダスト密度に影響**



# 結果 ( $T=3$ eV, $\Phi=3$ )

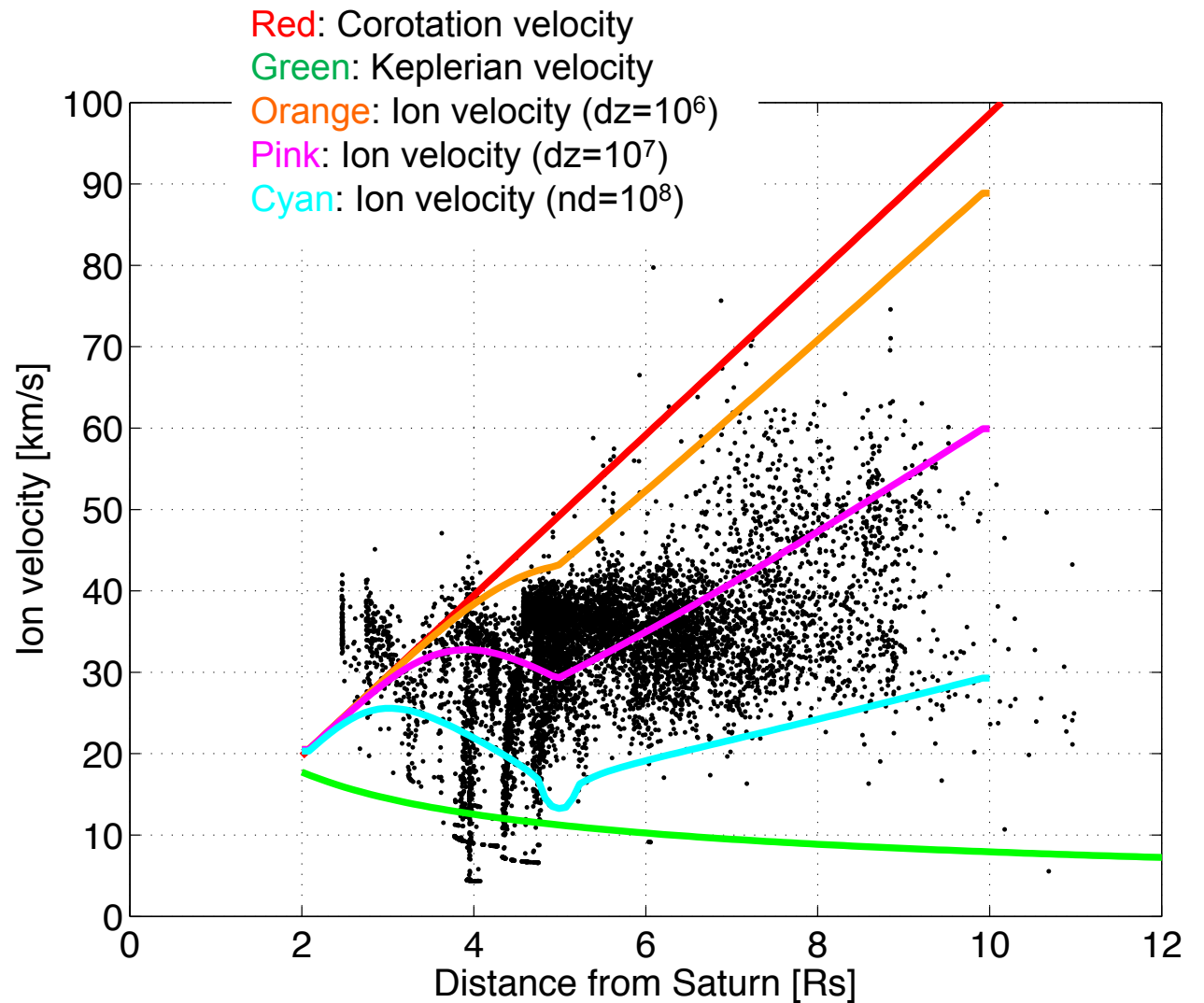
- dzを変化
  - ポテンシャルを3倍
    - ダスト密度 1/3
  - 観測に合うのは  $dz \sim 10^8$  m





# 結果 (rd=500 nm)

- dzを変化
  - ダスト半径を5倍
    - ダスト密度 1/5
  - 観測に合うのは  $dz \sim 10^7$  m



# 電離圈-磁氣圈結合

