

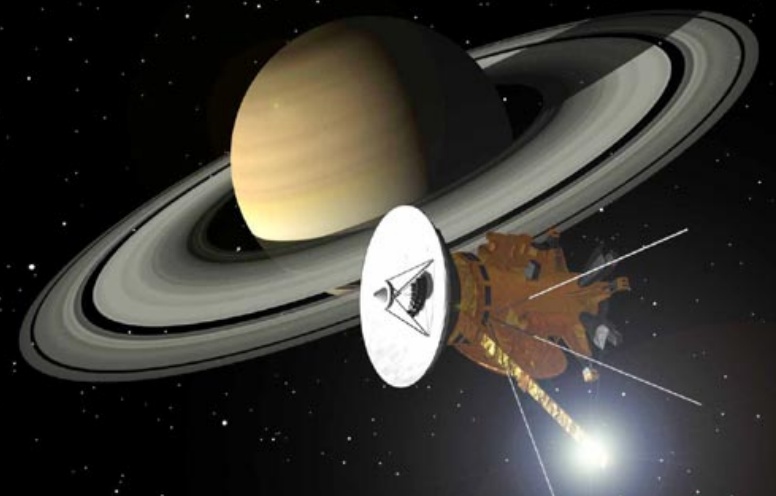


HOKKAIDO
UNIVERSITY

土星内部磁気圏におけるダスティプラズマと電離 圏の影響によるイオン速度遅延

博士後期課程 2年

堺 正太郎



1. Introduction

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

2. モデリング

1. モデル, パラメター

2. 結果, 議論

3. まとめ

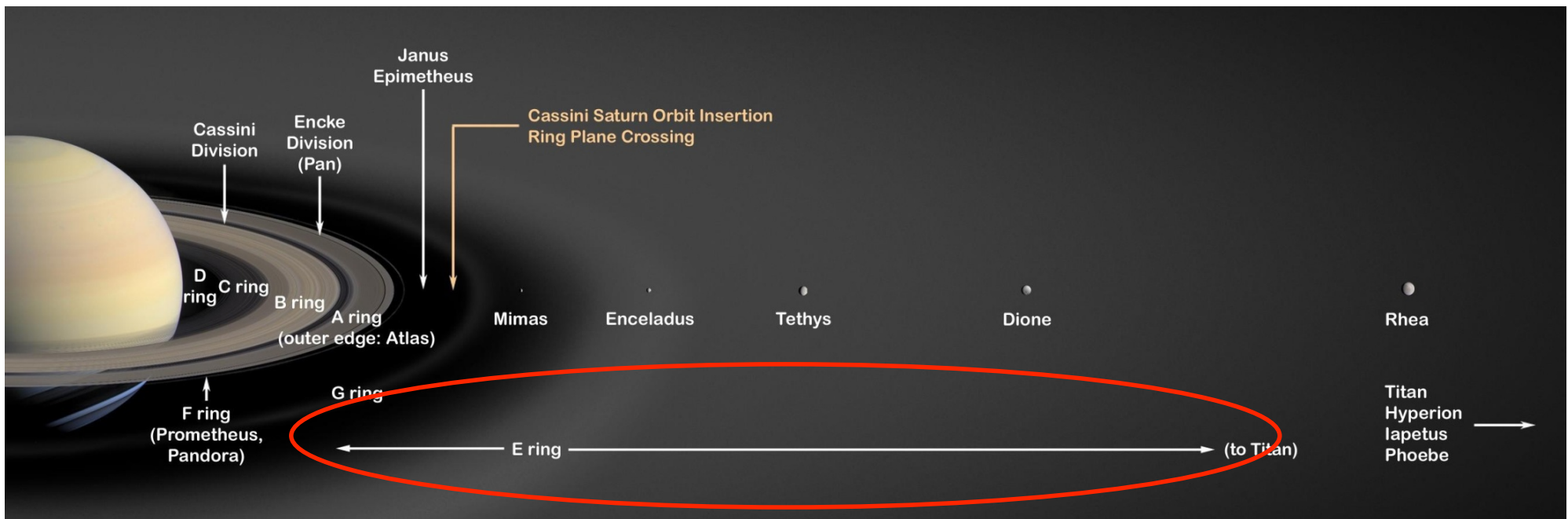


Introduction

Saturn's system



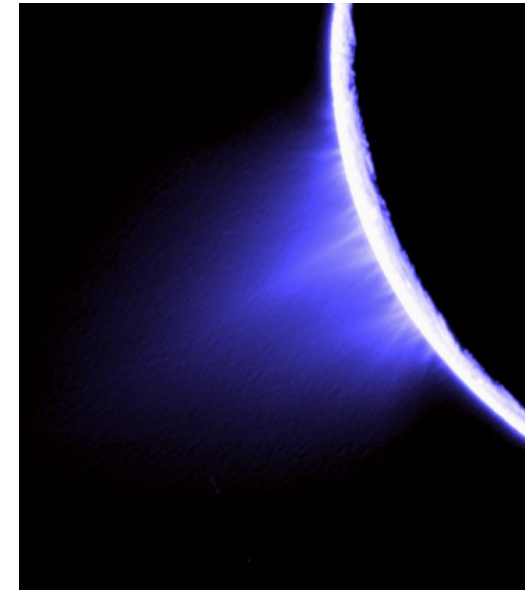
- 赤道半径: 60,268 km (1 R_s)
- 質量: 5.68×10^{26} kg
- 密度: 690 kg/m^3
- 赤道重力: 10.44 m/s^2
- 公転周期: 29.46 year
- 自転周期: 0.436 day
- 磁気モーメント: $4.6 \times 10^{18} \text{ T/m}^3$
- 赤道磁場: $2.1 \times 10^{-5} (R_s/r)^3 \text{ T}$
- 自転軸に対する磁気軸の傾き
: $< 1^\circ$
- リング: 内側から D, C, B, A, F, G, E
- 衛星の数: 64



Enceladus & E ring



- Enceladus
 - 赤道半径
 - 247 km
 - 大気組成
 - 主成分: 水蒸気 [*Waite et al.*, 2006]
 - 特徴
 - 南極からのプルーム [*Porco et al.*, 2006]



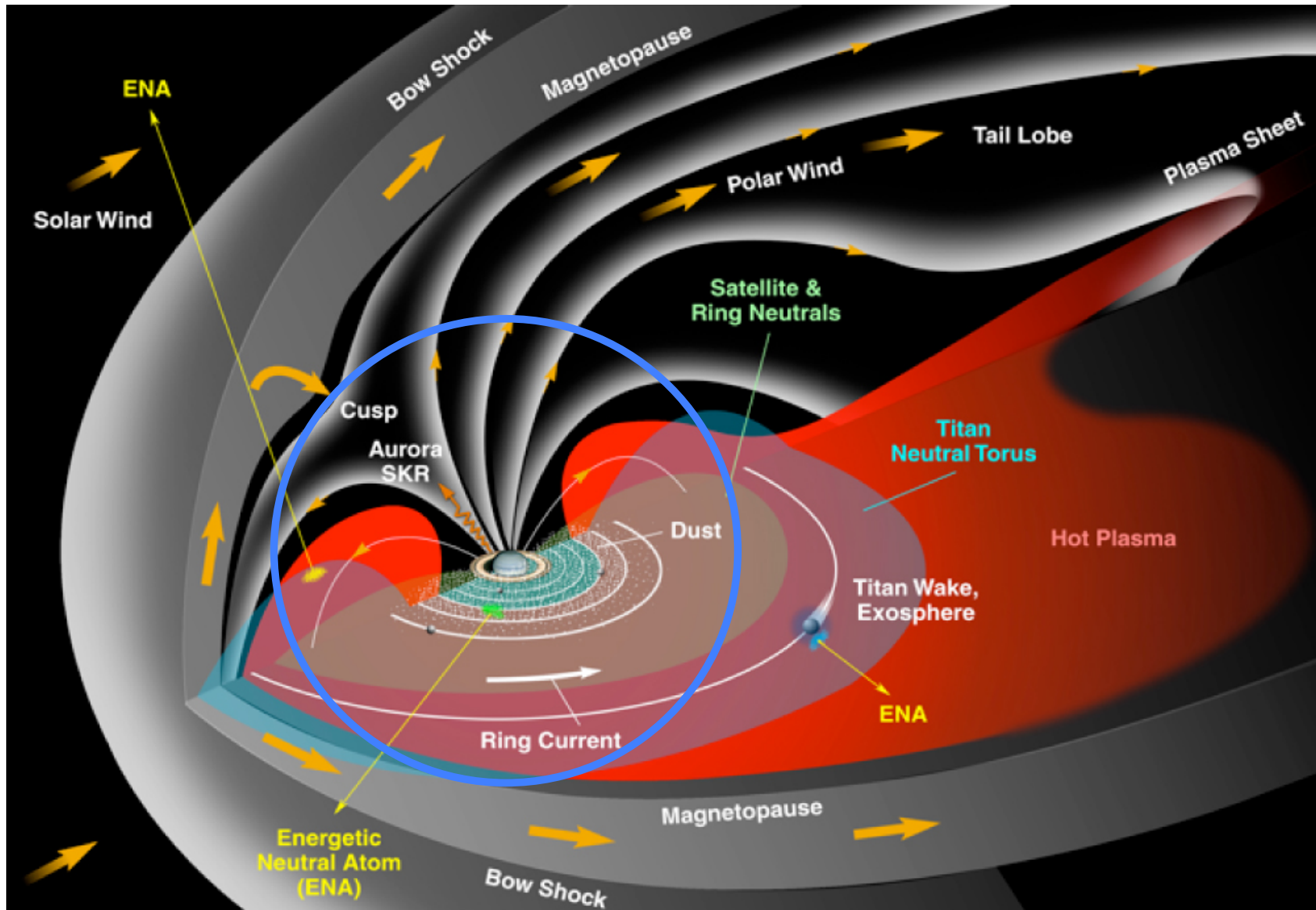
Enceladus plume [NASA/JPL/Space Science Institute]

- E ring
 - 位置
 - 3 – 8 Rs
 - 組成
 - 水グループのイオン (~80 %) [*Young et al.*, 2005]
 - ダスト (水氷) [*Kurth et al.*, 2006; *Kempf et al.*, 2008]
 - 供給源
 - Enceladus プルームが主

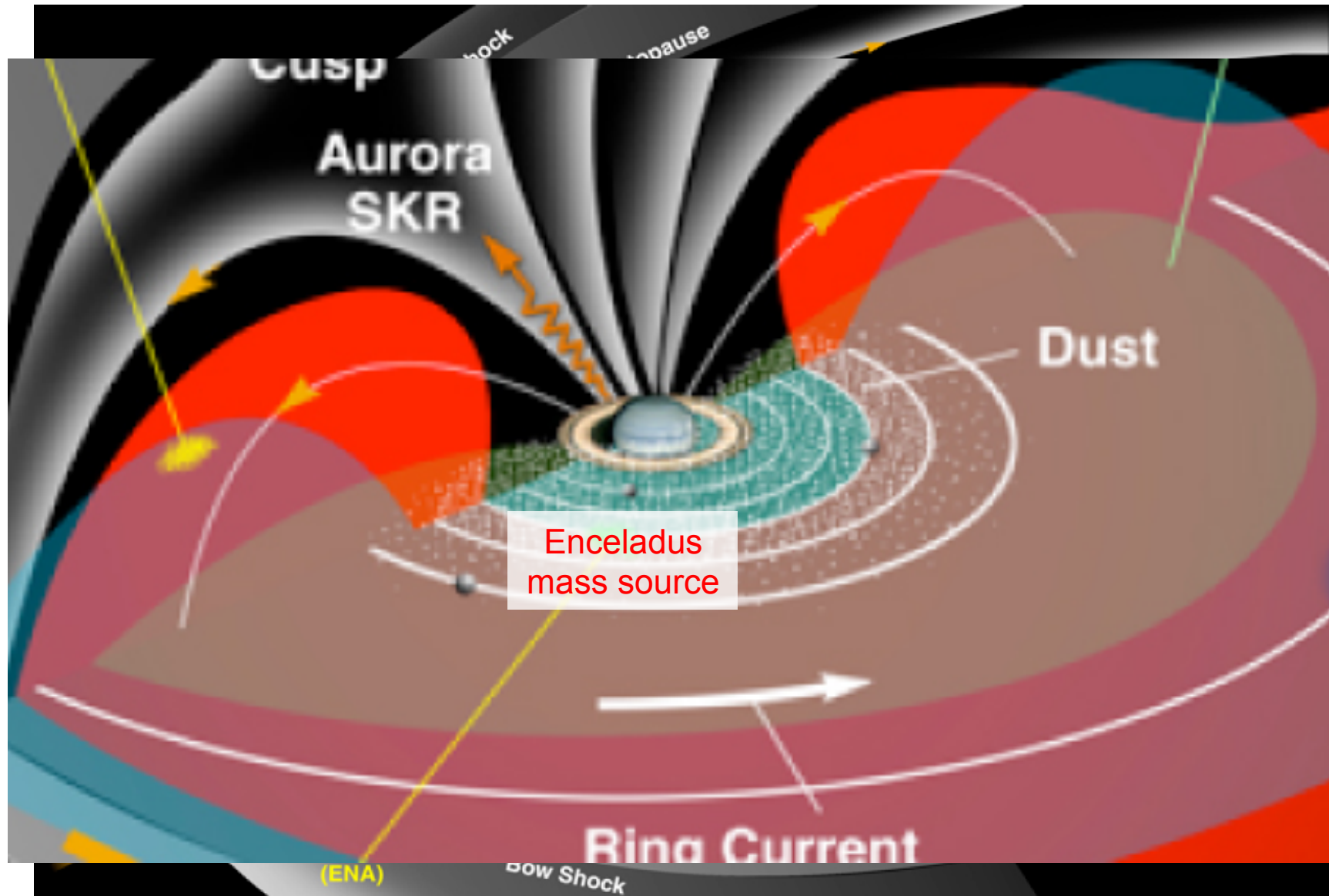


Enceladus & E ring [NASA/JPL/Space Science Institute]

Saturn's magnetosphere



Saturn's magnetosphere



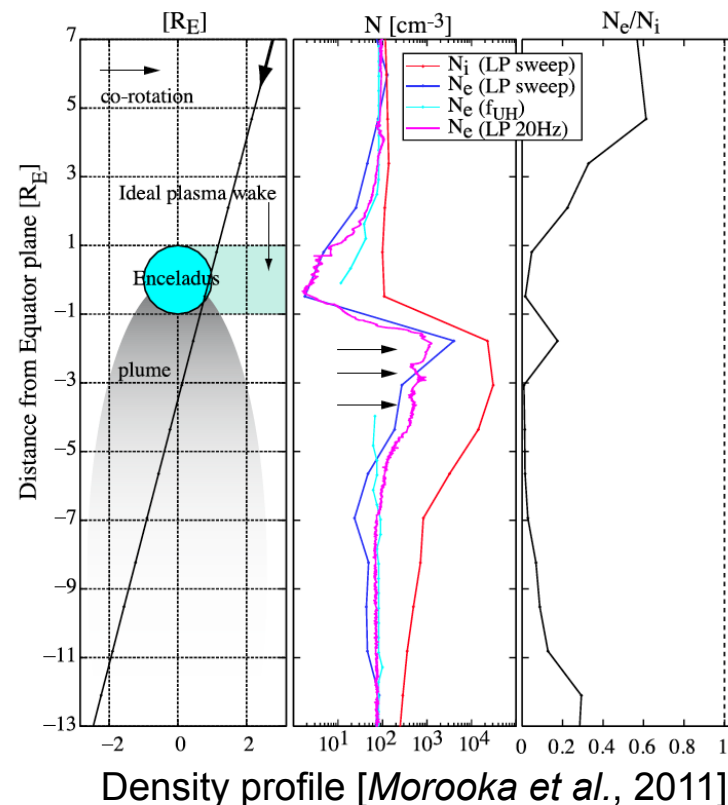
Why Saturn?



- 土星磁気圏は地球磁気圏とは全く異なる構造
 - プラズマ供給源
 - 衛星やリング [*Moncuquet et al.*, 2005; *Persoon et al.*, 2005; *Wahlund et al.*, 2005; *Sittler et al.*, 2006]
 - Enceladus プリューム [*Porco et al.*, 2006; *Waite et al.*, 2006]
 - ダスト
 - 衛星起源の E リング荷電ダスト [*Wahlund et al.*, 2005, 2009]
 - 木星磁気圏とも異なる構造
 - 木星磁気圏にもダストは存在 [*Johnson et al.*, 1980; *Morfill et al.*, 1980]
 - 木星の赤道磁場は土星よりも ~200倍大きい
 - ダストが電磁気力によって加速される [*Horányi et al.*, 1993]
- 土星磁気圏では磁場が木星ほど大きくないためにプラズマがダストの影響を受ける可能性がある！！
- 本当に影響されるのだろうか？？

Depletion of electrons

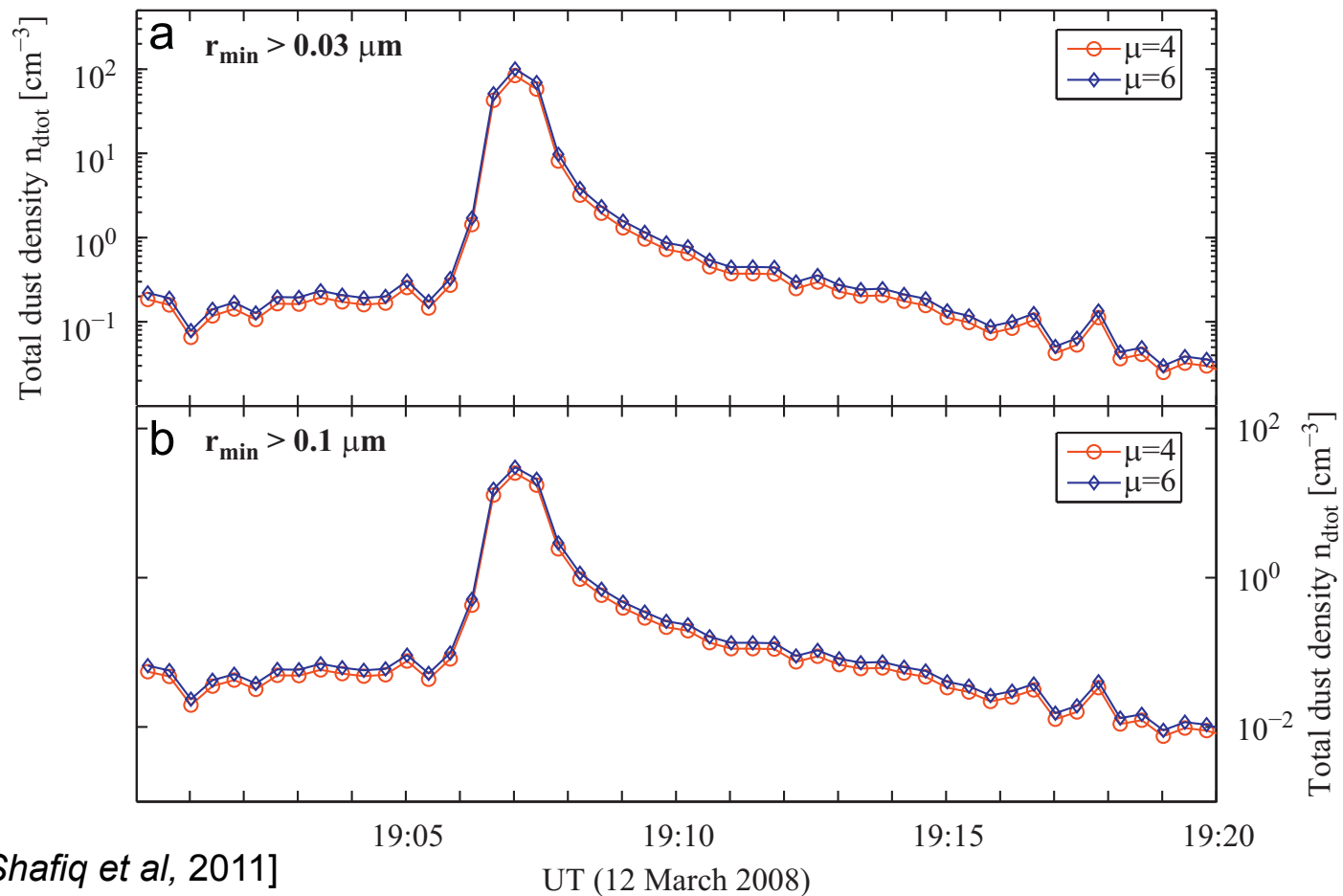
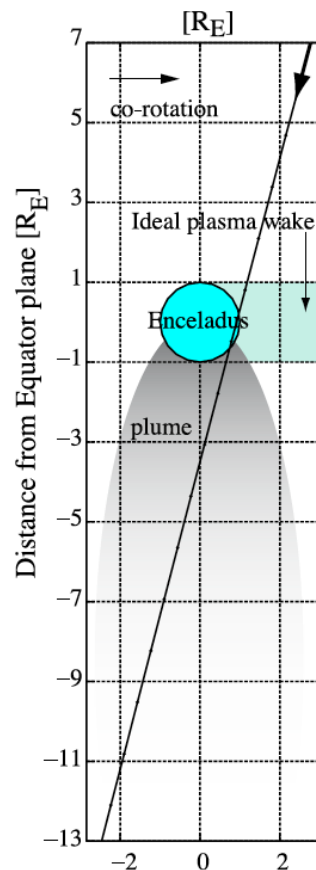
- 電子密度がイオン密度に比べて小さい [*Wahlund et al.*, 2009, *Yaroshenko et al.*, 2009, *Morooka et al.*, 2011]
 - $n_e/n_i < \sim 0.5$
 - しかし、プラズマは準中性状態のはず ($n_e = n_i$)
- *Wahlund et al.* [2009] では負に帯電したダストが大量に存在していると予想 [*Wahlund et al.*, 2009].



Dusts around Enceladus

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

$$n_{\text{d tot}} = \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} n_d(r_d) dr_d \approx \frac{e(n_i - n_e)}{4\pi\epsilon_0\alpha U_{SC}} \frac{2 - \mu}{1 - \mu} \frac{1}{r_{\text{min}}} \quad [\text{Shafiq et al, 2011}]$$



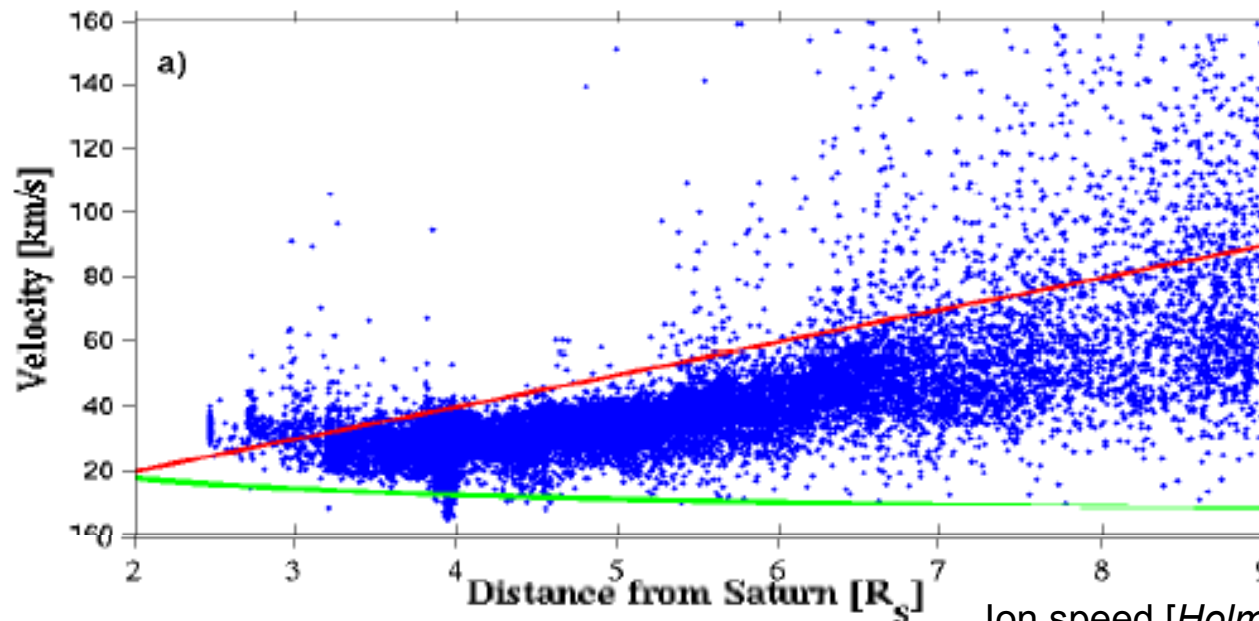
Total dust density (E03) [Shafiq et al, 2011]

UT (12 March 2008)

Co-rotation deviation by dusts?



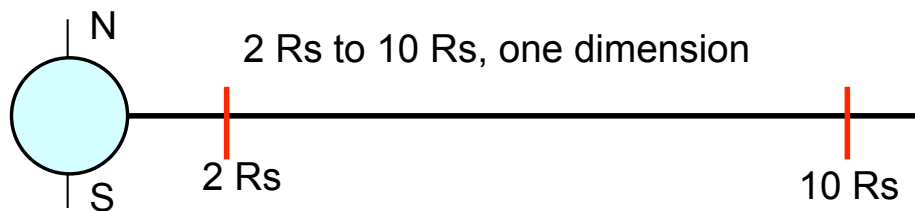
- Cassini RPWS/LP による内部磁気圏イオン観測
 - プラズマ圏中のプラズマは普通, 惑星の自転と共に運動するはず (共回転運動) [e.g. *Blanc et al.*, 2005].
 - イオン速度が共回転速度より遅い. [*Wahlund et al.*, 2005, 2009; *Morooka et al.*, 2011; *Holmberg et al.*, submitted].
 - ケプラー速度に近いイオンも存在
 - ダストがイオンの運動に影響?



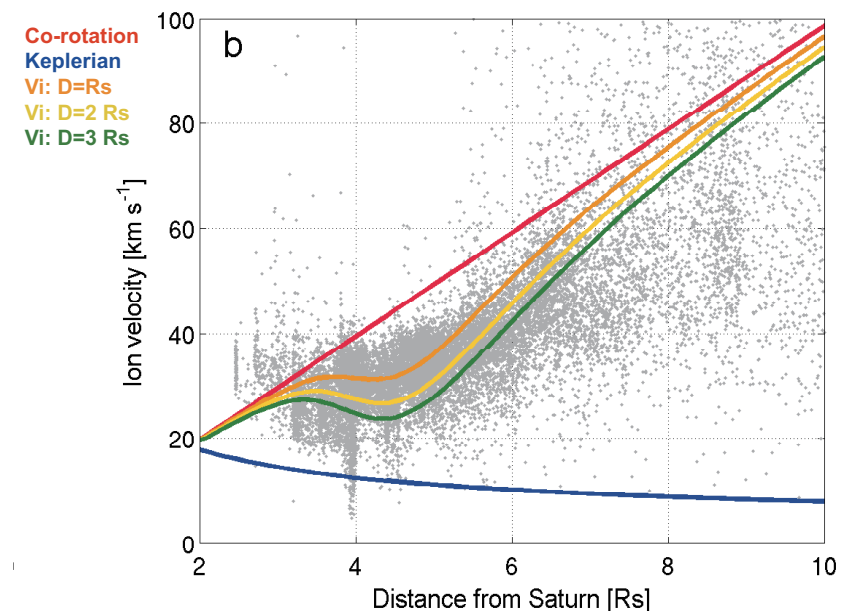
Co-rotation deviation by dusts?



- イオンモデリング
 - イオン速度は共回転速度 50-90%
 - ダスト密度が大きい and/or ダスト層の厚さが大きい時 LP による観測と一致 [Sakai et al., submitted]
 - $n_d > \sim 10^5 \text{ m}^{-3}$ and/or $D > 1 \text{ Rs}$
 - このモデルは電離圏の影響を考慮していない
 - 伝導度を定数で与えている
 - $\Sigma_i = 1.0 \text{ S}$



Ion speed profile [Sakai et al., submitted]



- 電離圏伝導度
 - 磁気圏電場は電離圏伝導度に強く依存

$$\frac{\partial(\rho_k \mathbf{v}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k) = n_k q_k [\mathbf{E} + \mathbf{v}_k \times \mathbf{B}] - \nabla p_k - \rho_k \mathbf{g} + \sum_l \rho_k \nu_{kl} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_l) + \sum_l S_{k,l} \mathbf{v}_l - L_k \mathbf{v}_l$$

$$\sum_i [\mathbf{E}_{cor} - \mathbf{E}] = \mathbf{j} D$$

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

- 伝導度はまだよくわかっていない
 - ~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]

- 内部磁気圏プラズマの電離圏による影響を調査
 - 電離圏伝導度, 特に Pedersen 伝導度は磁気圏プラズマの速度に影響する
 - Pedersen 伝導度がダスト-プラズマ相互作用にどのような影響を与えるか示す
- 手法
 - イオンモデリング
 - 2次元: 磁力線に平行方向と垂直方向



モデリング

~電離圏~

- 基礎方程式

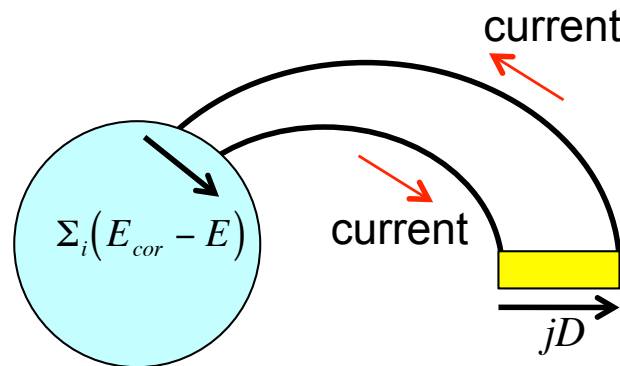
$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \mathbf{v}_k) = S_k - L_k$$

$$\frac{\partial (\rho_k \mathbf{v}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k) = n_k q_k (\mathbf{E} + \mathbf{v}_k \times \mathbf{B}) - \nabla p_k - \rho_k \mathbf{g} + \sum_l \rho_k \nu_{kl} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_l) + \sum_l S_{k,l} \mathbf{v}_l - L_k \mathbf{v}_l$$

- M-I 結合

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

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



- Pedersen 伝導度

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

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

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

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

\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
L_k	Loss rate
κ	Reaction rate
n_k	Number density
\mathbf{j}	Current
\mathbf{E}_{cor}	Co-rotational Electric field
Σ_i	Ionospheric conductivity
dz	Thickness of dust

Chemical reactions



- 55 chemical equations

- 電離圏での H^+ , H_2^+ , H_3^+ , He^+ , CH_4^+ , CH_5^+ , $C_3H_5^+$, H_2O^+ , H_3O^+ の密度を計算

Chemical reaction	Rate coefficients	References
$H + h\nu \rightarrow H^+ + e^-$		original
$H_2 + h\nu \rightarrow H^+ + H + e^-$		original
$H_2 + h\nu \rightarrow H_2^+ + e^-$		original
$He + h\nu \rightarrow He^+ + e^-$		original
$CH_4 + h\nu \rightarrow CH_4^+ + e^-$		original
$H_2O + h\nu \rightarrow H_2O^+ + e^-$		original
$H^+ + e^- \rightarrow H + h\nu$	$6.3 \times 10^{-18} (300/T_e)^{0.64}$	Yell and Miller, 2004
$H_2^+ + e^- \rightarrow H + H$	$2.3 \times 10^{-13} (300/T_e)^{0.4}$	Kim and Fox, 1994; Auerbach, 1977
$H_3^+ + e^- \rightarrow H_2 + H$	$7.6 \times 10^{-13} (1/T_e)^{0.5}$	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$H_3^+ + e^- \rightarrow 3H$	$9.7 \times 10^{-13} (1/T_e)^{0.5}$	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$He^+ + e^- \rightarrow He + h\nu$	$4.0 \times 10^{-18} (250/T_e)^{0.7}$	Matcheva, 2001; Kim and Fox, 1994
$CH_4^+ + e^- \rightarrow {}^3CH_2 + 2H$	3.0×10^{-12}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$CH_4^+ + e^- \rightarrow CH_3 + H$	3.0×10^{-12}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$CH_5^+ + e^- \rightarrow {}^3CH_2 + H + H_2$	$1.5 \times 10^{-11} (1/T_e)^{0.5}$	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$CH_5^+ + e^- \rightarrow CH_3 + 2H$	$3.8 \times 10^{-12} (1/T_e)^{0.5}$	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$C_3H_5^+ + e^- \rightarrow C_3H_3 + H_2$	$2.6 \times 10^{-12} (1/T_e)^{0.5}$	Moses and Bass, 2000; Miller et al., 1997
$C_3H_5^+ + e^- \rightarrow CH_3C_2H + H$	$2.6 \times 10^{-12} (1/T_e)^{0.5}$	Moses and Bass, 2000; Miller et al., 1997
$H_2O^+ + e^- \rightarrow O + H_2$	$2.0 \times 10^{-13} (300/T_e)^{0.5}$	Tao et al., 2011; Miller et al., 1997
$H_2O^+ + e^- \rightarrow OH + H$	$1.6 \times 10^{-13} (300/T_e)^{0.5}$	Tao et al., 2011; Miller et al., 1997
$H_3O^+ + e^- \rightarrow H_2O + H$	$3.5 \times 10^{-11} (300/T_e)^{0.5}$	Tao et al., 2011; Miller et al., 1997
$H_3O^+ + e^- \rightarrow OH + 2H$	$6.5 \times 10^{-11} (300/T_e)^{0.5}$	Tao et al., 2011; Miller et al., 1997
$H^+ + H_2 \rightarrow H_2^+ + H$	$1.0 \times 10^{-15} \exp(-21960/2000)$	Yell and Miller, 2004
$H^+ + H_2 + M \rightarrow H_3^+ + M$	3.2×10^{-41}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$H^+ + CH_4 \rightarrow CH_4^+ + H$	8.1×10^{-16}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$H^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + H$	8.2×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Anicich, 1993
$H_2^+ + H \rightarrow H^+ + H_2$	6.4×10^{-16}	Moses and Bass, 2000; Anicich, 1993
$H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H$	2.0×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$H_2^+ + CH_4 \rightarrow CH_3^+ + H + H_2$	2.3×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$H_2^+ + CH_4 \rightarrow CH_4^+ + H_2$	1.4×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$H_2^+ + CH_4 \rightarrow CH_5^+ + H$	1.1×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$H_2^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + H_2$	3.9×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Anicich, 1993
$H_2^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + H$	3.4×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Anicich, 1993
$H_3^+ + H \rightarrow H_2^+ + H_2$	2.0×10^{-15}	Yell and Miller, 2004
$H_3^+ + CH_4 \rightarrow CH_5^+ + H_2$	2.4×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Anicich, 1993
$H_3^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + H_2$	5.3×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Anicich, 1993
$He^+ + H \rightarrow H^+ + He$	2.1×10^{-15}	高橋, 2005
$He^+ + H_2 \rightarrow H^+ + H + He$	8.8×10^{-20}	Matcheva et al., 2001; Perry, 1999
$He^+ + H_2 \rightarrow H_2^+ + He$	9.4×10^{-21}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$He^+ + CH_4 \rightarrow H^+ + CH_3 + He$	4.8×10^{-16}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$He^+ + CH_4 \rightarrow CH^+ + H + H_2 + He$	2.4×10^{-16}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$He^+ + CH_4 \rightarrow CH_2^+ + H_2 + He$	8.5×10^{-16}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$He^+ + CH_4 \rightarrow CH_3^+ + H + He$	8.5×10^{-17}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$He^+ + CH_4 \rightarrow CH_4^+ + He$	5.1×10^{-17}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$He^+ + H_2O \rightarrow H^+ + OH + He$	1.9×10^{-16}	Moses and Bass, 2000; Anicich, 1993
$He^+ + H_2O \rightarrow OH^+ + H + He$	2.6×10^{-16}	Moses and Bass, 2000; Anicich, 1993
$He^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + He$	5.5×10^{-17}	Moses and Bass, 2000; Anicich, 1993
$CH_4^+ + H_2 \rightarrow CH_5^+ + H$	3.0×10^{-17}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$CH_4^+ + CH_4 \rightarrow CH_5^+ + CH_3$	1.5×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$CH_4^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + CH_3$	2.5×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Anicich, 1993
$CH_5^+ + H \rightarrow CH_4^+ + H_2$	1.5×10^{-16}	Moses and Bass, 2000; Kim and Fox, 1994
$CH_5^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + CH_4$	3.7×10^{-15}	Tao et al., 2011, Anicich, 1993
$H_2O^+ + H_2 \rightarrow H_3O^+ + H$	7.6×10^{-16}	Tao et al., 2011; Anicich, 1993
$H_2O^+ + CH_4 \rightarrow H_3O^+ + CH_3$	1.1×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Anicich, 1993
$H_2O^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH$	1.9×10^{-15}	Moses and Bass, 2000; Anicich, 1993

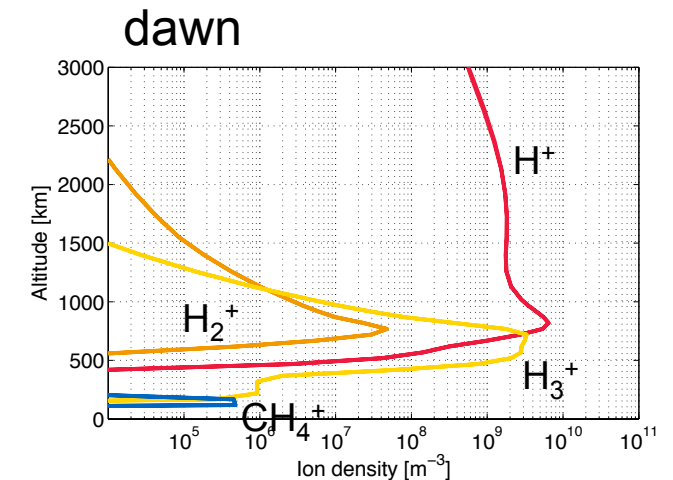
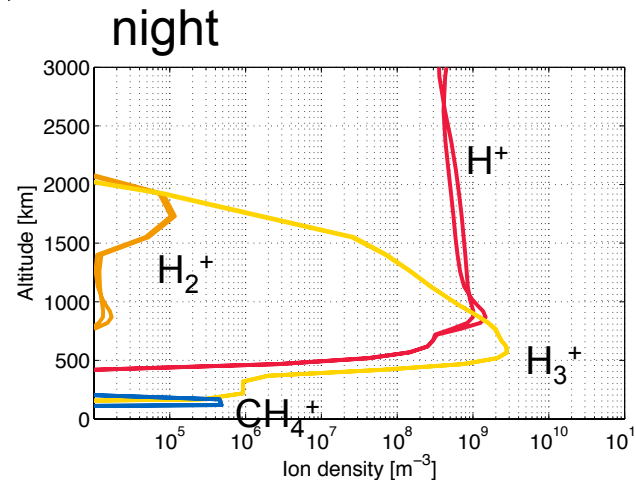
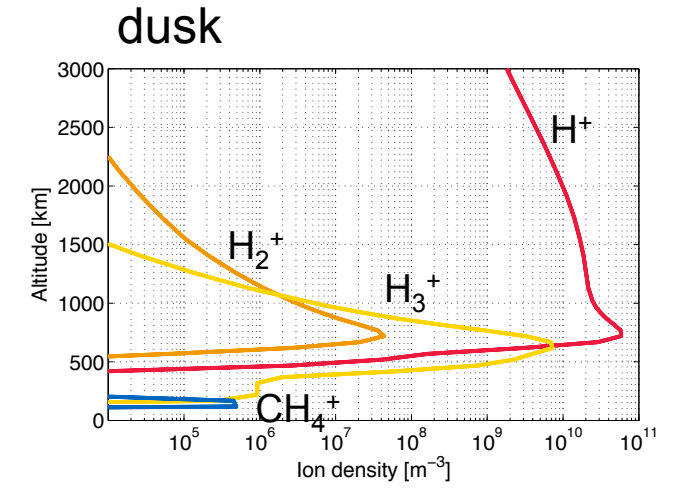
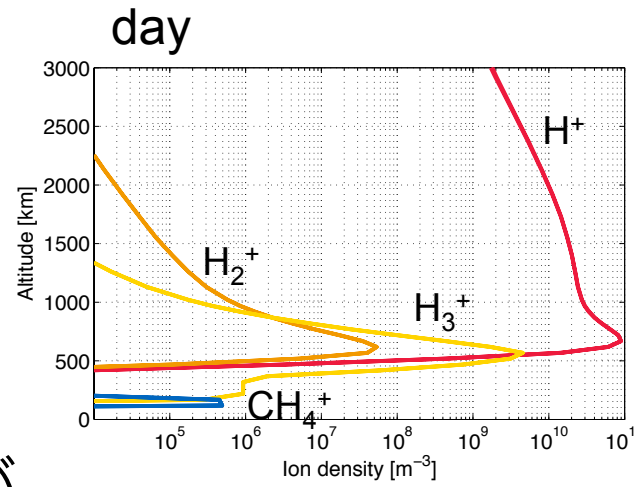
Density profile in the ionosphere



HOKKAIDO UNIVERSITY

- 昼, 夕方
 - H^+ が全高度で主成分
- 真夜中と明け方
 - 高高度では H^+ が主成分
 - 低高度では H_3^+ が主成分
- 伝導度に効くのは密度の大きい低高度領域

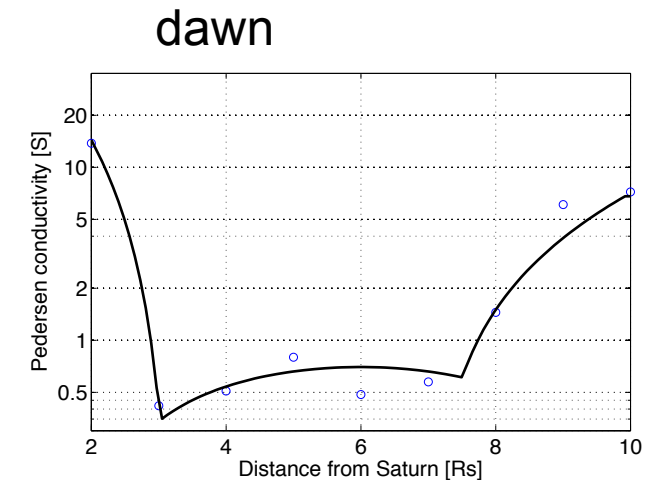
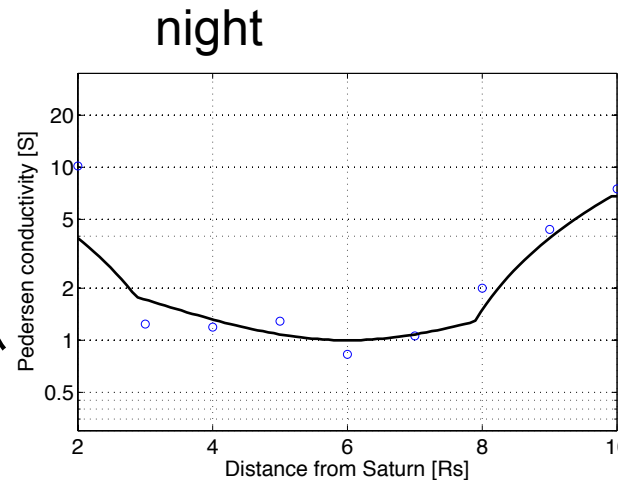
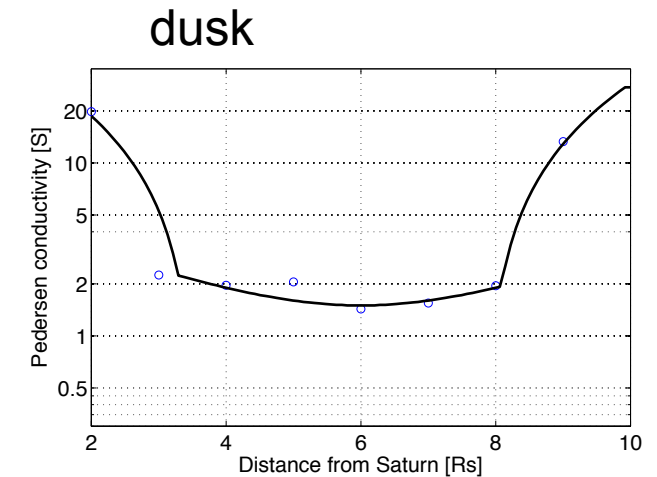
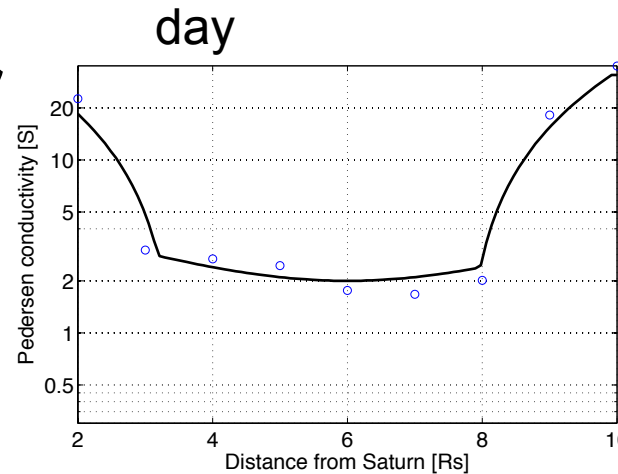
ex. 6 Rs



Pedersen conductivity



- 昼, 夕方, 真夜中
 - 全伝導度はほとんど同じ大きさ
 - ~ 2 S
- 明け方
 - 伝導度が小さい
 - $< \sim 1$ S
- 生成される電場は明け方で大きくなる
 - ダイナモ電場を小さくする



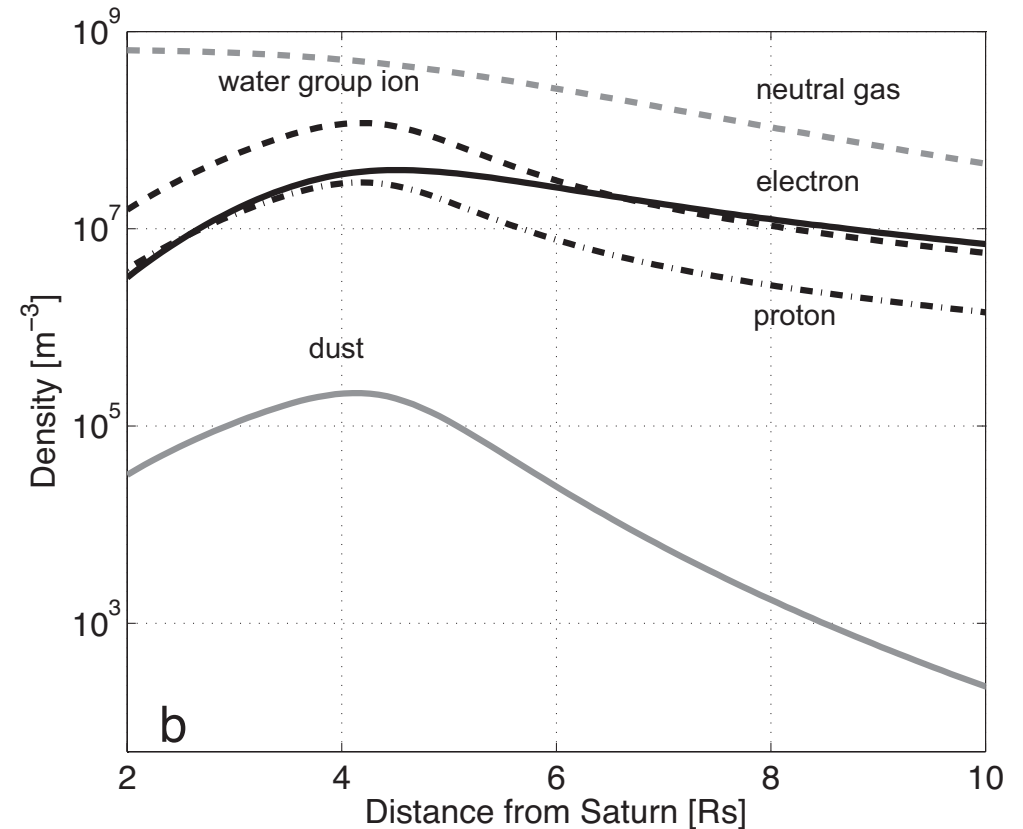
$$\Sigma_i (\mathbf{E}_{cor} - \mathbf{E}) = \mathbf{j}D$$



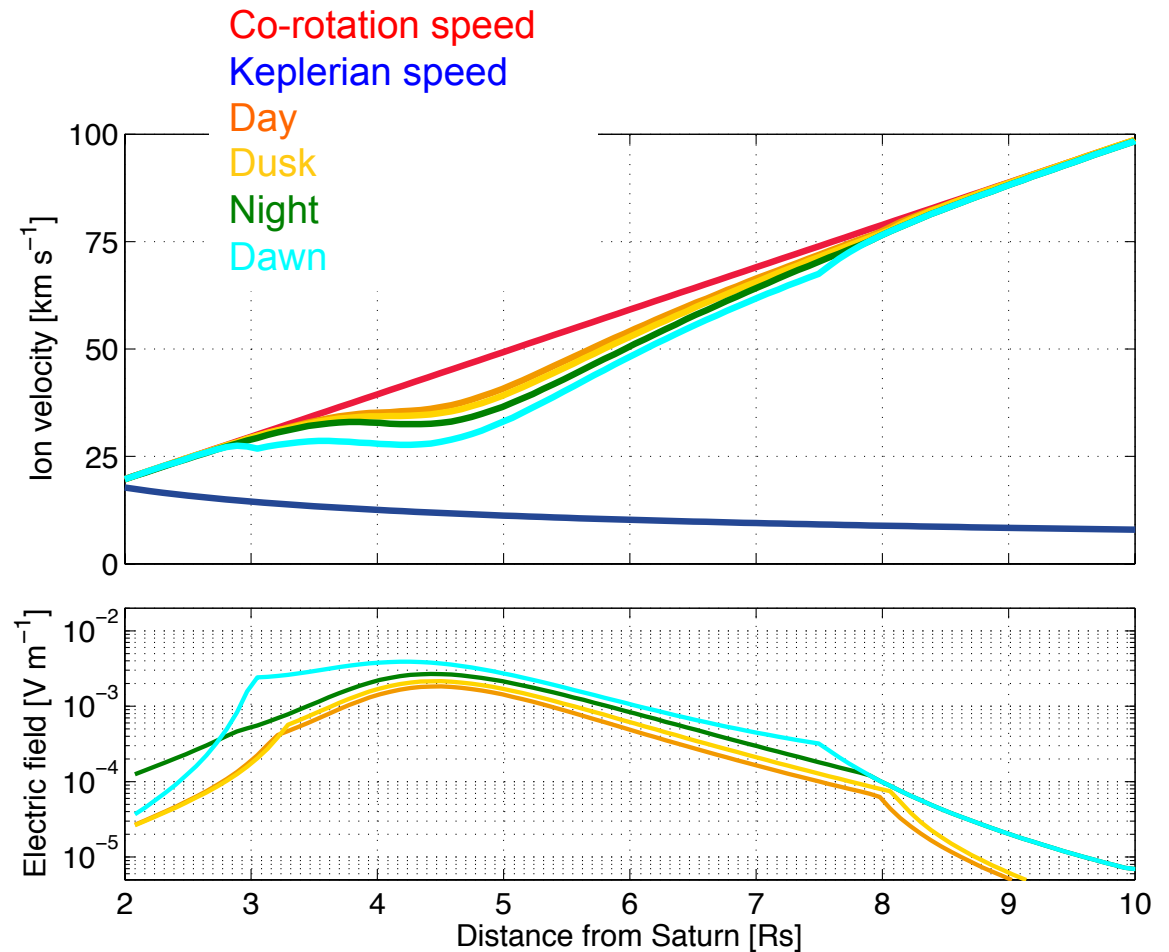
モデリング

~内部磁気圏~

- 内部磁気圏中の密度プロファイル
 - $n_d = 3.2 \times 10^4 \text{ m}^{-3}$ at 2 Rs
 - $n_w = n_e + \frac{q_d}{e} n_d - n_p$
 - $n_w : n_p = 5 : 1$
- ダスト層の厚さ
 - $D = 1 \text{ Rs}$



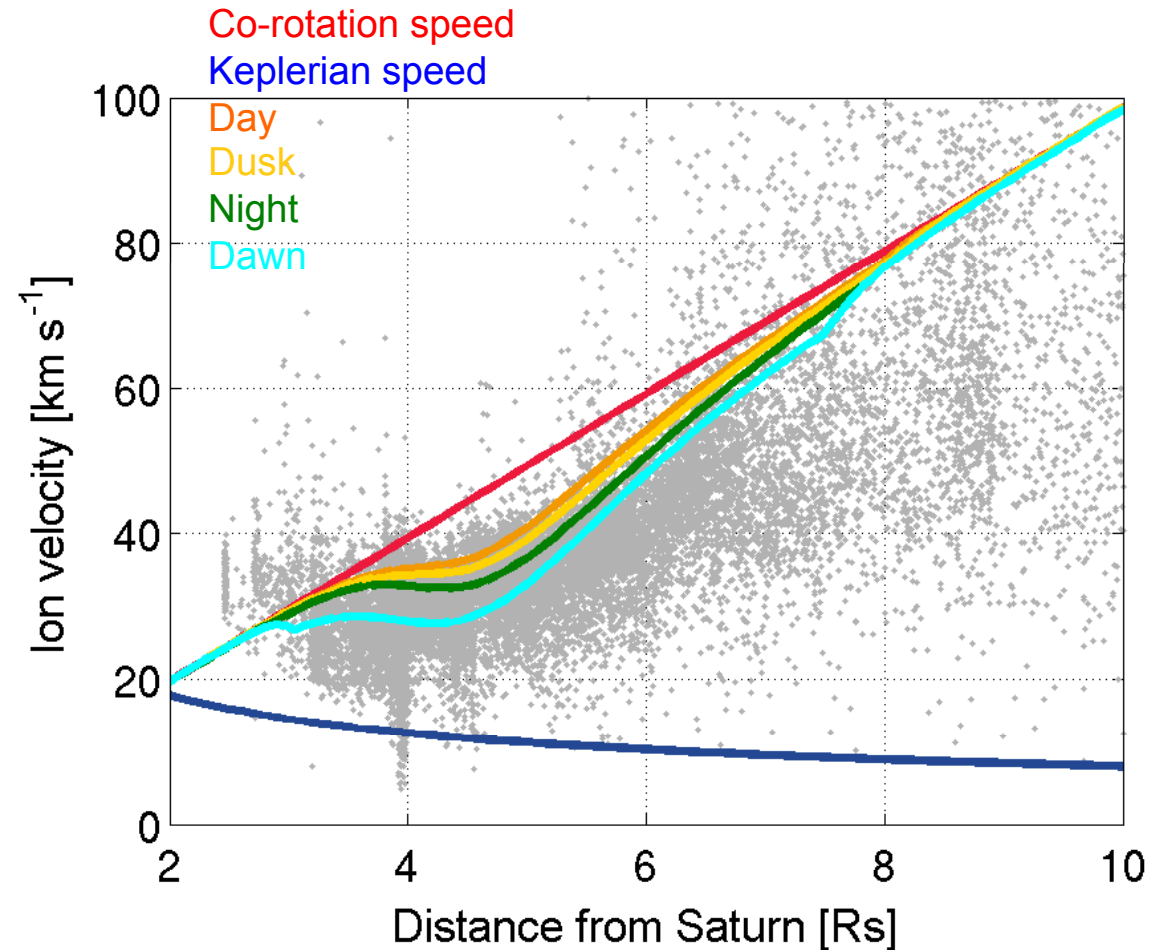
- 速度の LT 依存性
 - 昼 > 夕方 > 真夜中 > 明け方
- 明け方
 - イオン速度が特に小さい
 - 電離圏イオン密度が特に小さいため, 伝導度も小さくなる



Comparison with observations



- $< 5 R_s$
 - 基本的に観測と一致
- $> 5 R_s$
 - センスが少し違う
 - ダスト密度の与え方次第で速度分布が変わる
- 観測値のばらつきはイオン速度の LT 依存性を反映している可能性
 - 電離圏伝導度が速度の LT 依存に寄与



- イオン速度モデリング
 - 昼 > 夕方 > 真夜中 > 明け方 の LT 依存性が見られる
 - $< 5 R_s$
 - 基本的には観測と一致
 - $> 5 R_s$
 - 観測と速度分布のセンスが異なる
 - ダスト密度の分布を変えることで対応できそう
 - 観測のばらつきはイオン速度の LT 依存性を反映している可能性
- Future works
 - 太陽照射の高度依存を考慮
 - 磁気圏側の電気伝導度の影響
 - 伝導度のフィッティング方法
 - 内部磁気圏密度の与え方