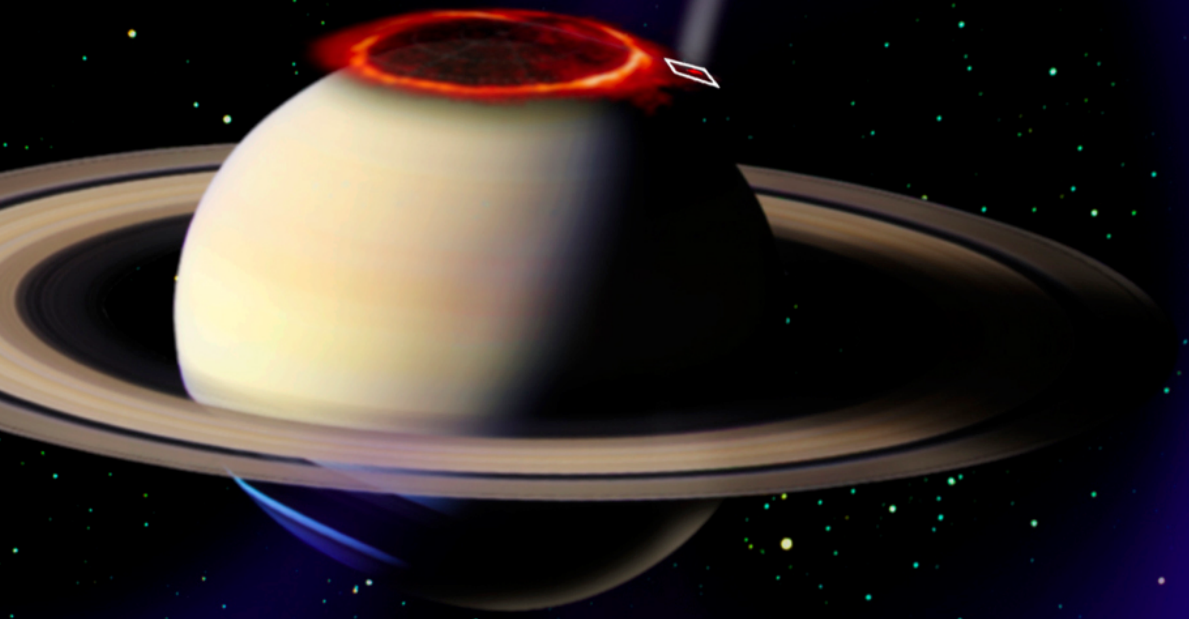
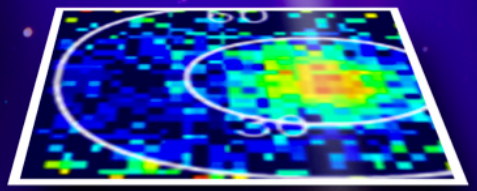
衛星系研究会：衛星系と噴火現象

衛星周囲のプラズマ環境と惑星-衛星電磁相互作用

木村智樹
ひさきサイエンスチーム
（理化学研究所・仁科加速器研究センター）





Contents

1. 磁気圏スケールで見える噴出
   - イオ火山
   - エンセラダス水噴出
2. 惑星-衛星電磁相互作用
   - 木星-イオ相互作用
   - 放射現象
   - 土星-エンセラダス相互作用
   - 木星-ガニメデ相互作用
   - 系外惑星への拡張
3. 噴出現象に支配される磁気圏
   - 交換型不安定
   - オーロラ電流系
   - リコネクション
4. 噴出現象に関わる取り組み

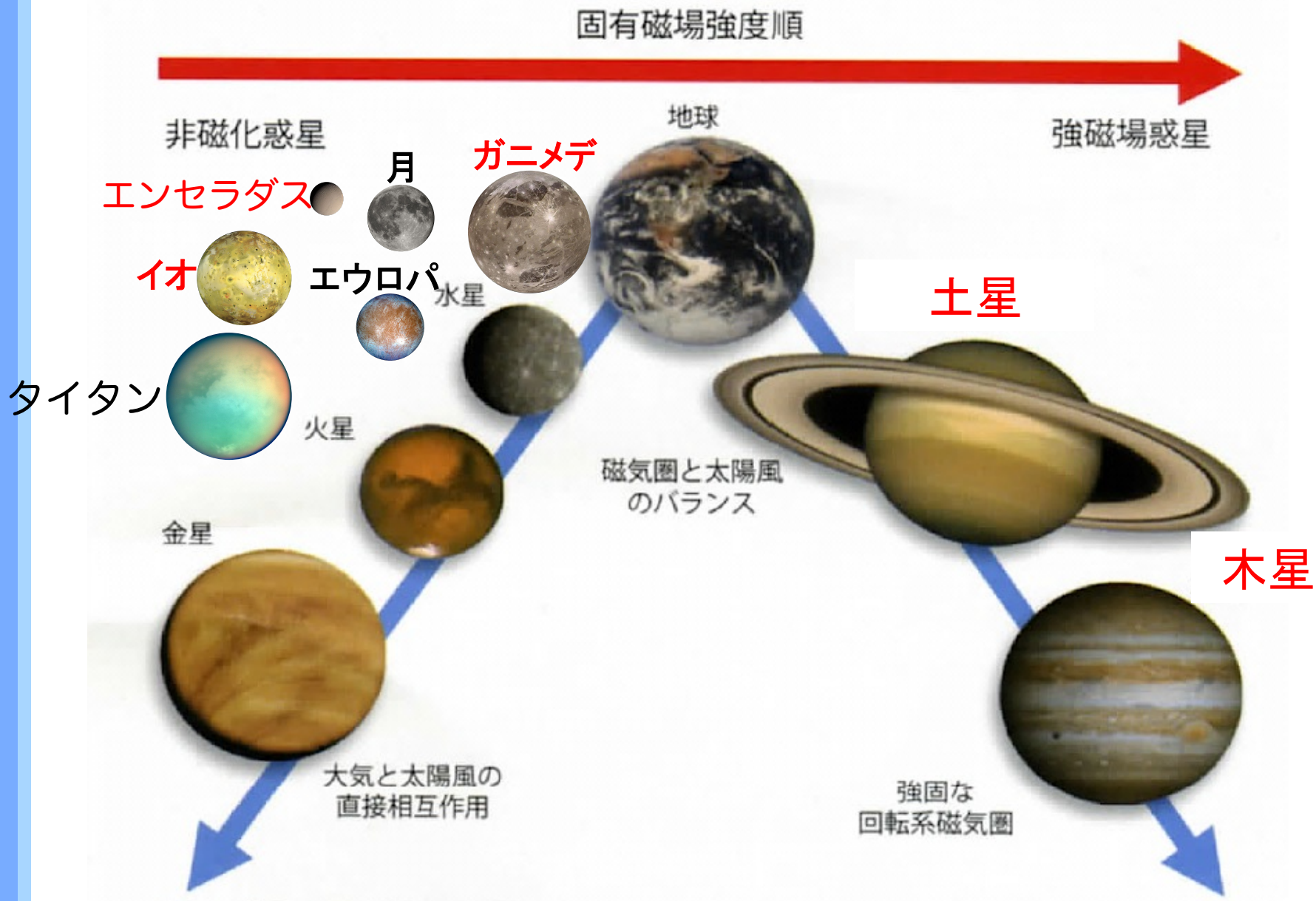


図　惑星の固有磁場強度順

惑星のサイズは，土星と木星は約 1/10 の縮尺，そのほかは同じ。

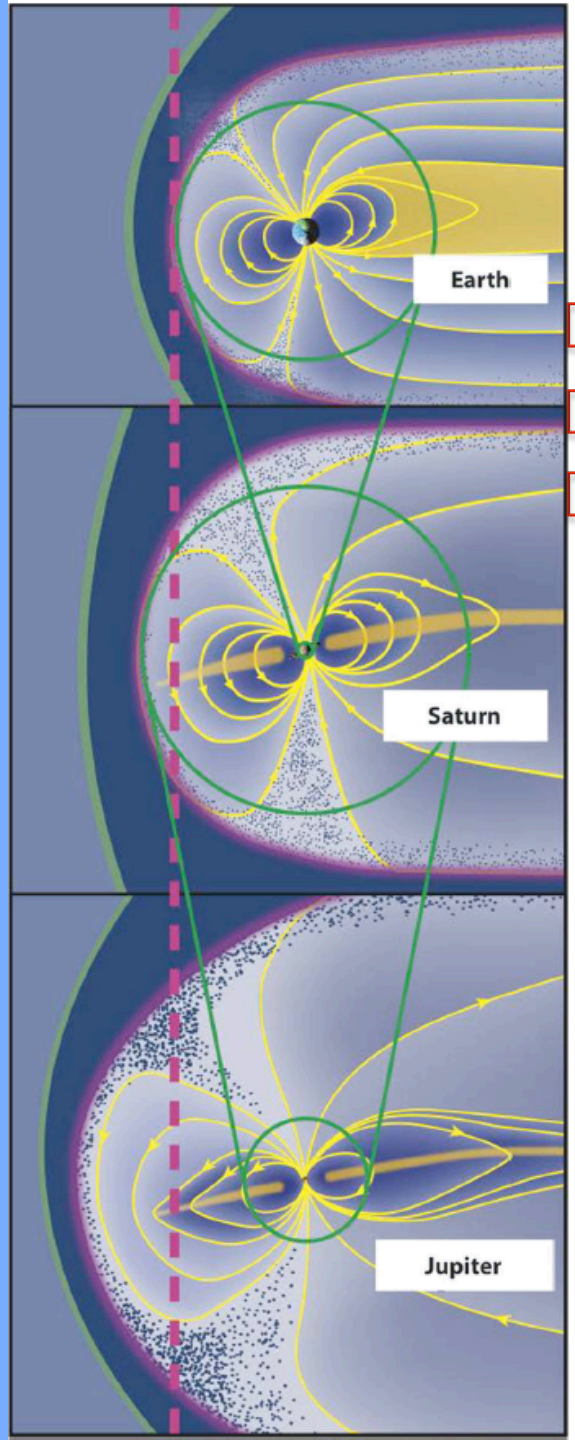


Table 1 Comparison of magnetospheres of Earth, Jupiter and Saturn

	Earth	Jupiter	Saturn
Radius, R_P (km)	6,373	71,492[a]	60,268
Distance from Sun[b] (AU)	1	5.2	9.5
Spin period (hours)	24	9.92492	10.56[c]
Solar wind density, n_{sw} (cm^{-3})	7	0.2	0.07
Magnetic moment[d] (M_E)	1	20,000	600
Equatorial magnetic field, B_o (nT)	30,600	430,000	21,400
Plasma source (kg/s)	5	260–1400[e]	12–250[e]
Plasma source (ions/s)	2×10^{26}	$>10^{28}$	$3–5 \times 10^{26}$
Dipole R_{CF}[f] (R_P)	10 R_E	46 R_J	20 R_S
Observed R_{MP} (R_P)	8–12 R_E	63–92 R_J	22–27 R_S
Plasma Transport Time[g]	hours-days	11–60 days[e]	5–40 days[e]
Auroral UV Emission Power (W)	10^{10}	10^{12}	10^{11}
Auroral Radio Emission Power (W)[h]	$\sim 4 \times 10^7$	8×10^{10} DAM	4×10^8
		4×10^{10} HOM	
		5×10^8 bKOM	
		2×10^8 nKOM	
		5×10^9 QP	

[a] We define 1 $R_J = 71{,}492$ km (see discussion in the Appendix)

[b] Semi-major axis of orbit. 1 AU = 1.5 × 108 km

[c] Voyager value. The rotation rate of Saturn is an important issue of scientific debate

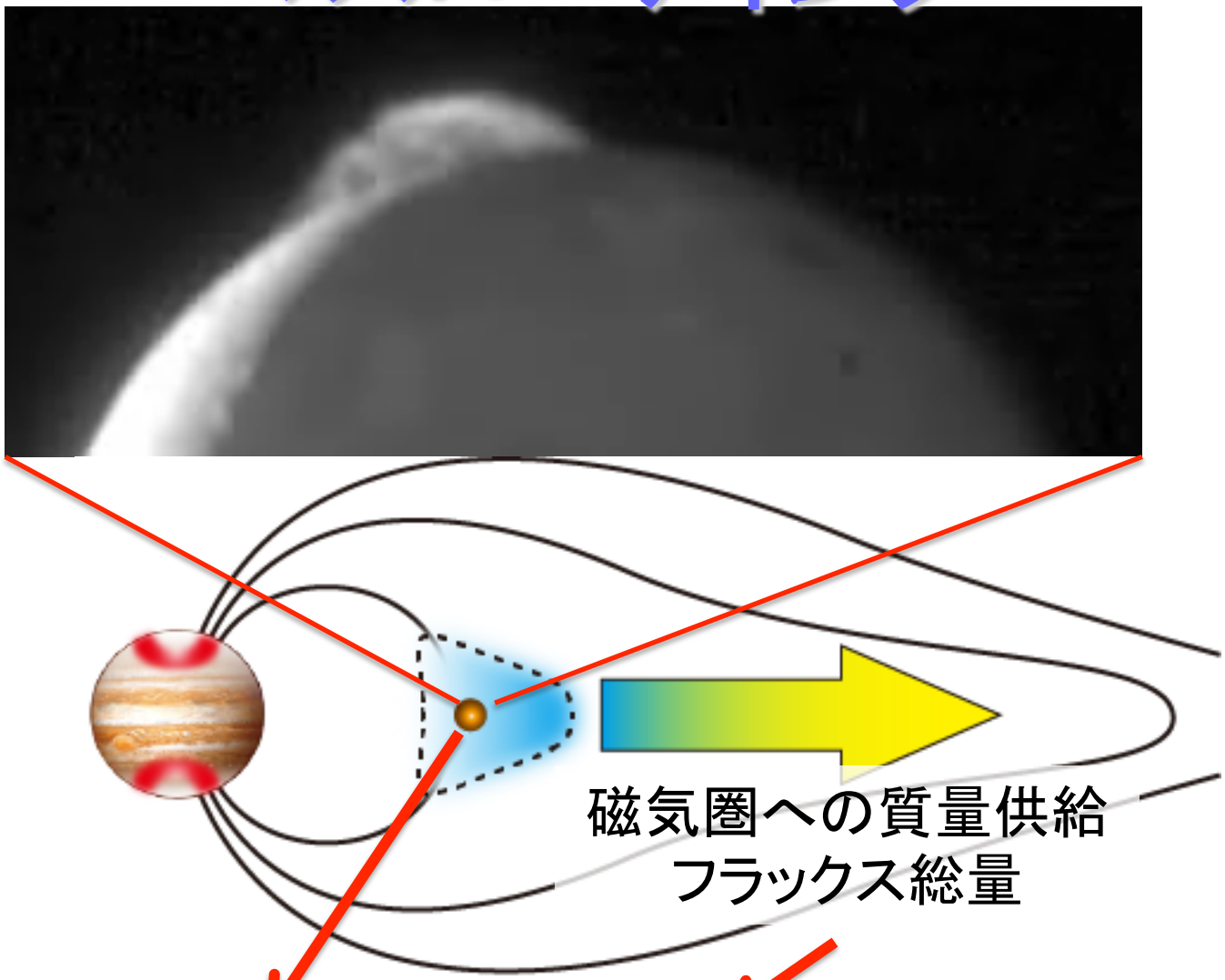
[d] $M_{Earth} = 7.9 \times 10^{25}$ Gauss $cm^3 = 7.9 \times 10^{15}$ Tesla m^3

[e] Summarized by Bagenal and Delamere (2011)

[f] R_{CF} is calculated using $R_{CF} = \xi(B_o^2/2\mu_o\rho_{sw}V_{SW}^2)^{1/6}$ for typical solar wind conditions of $\rho_{sw} = m_p n_{sw}$ given above and $V_{SW} \sim 400$ km s^{-1} and ξ an empirical factor of ~1.4 to match Earth observations (Walker and Russell 1995)

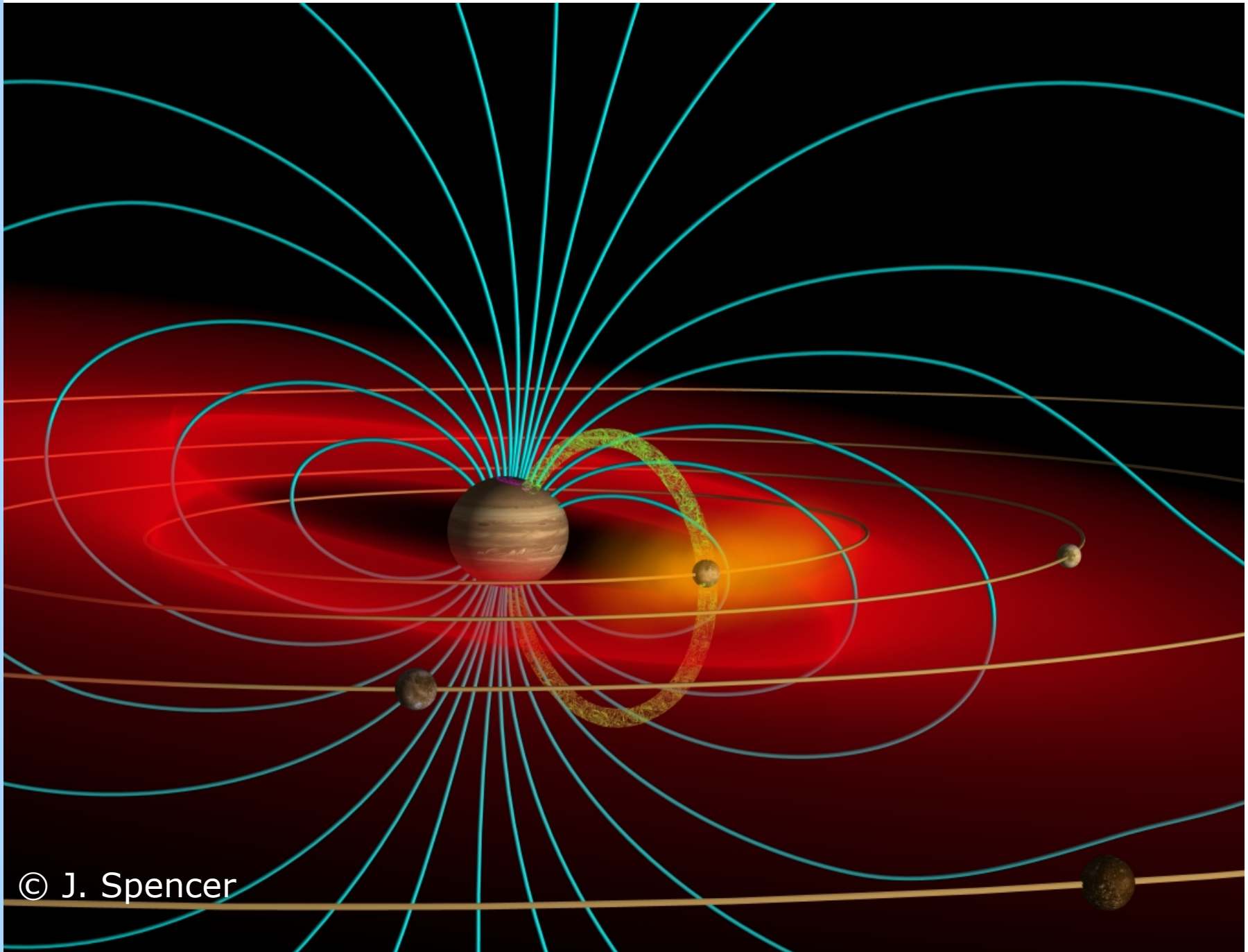
Bagenal+14

"マスローディング"



$$\dot{M} = 2\pi r h \rho v_r$$

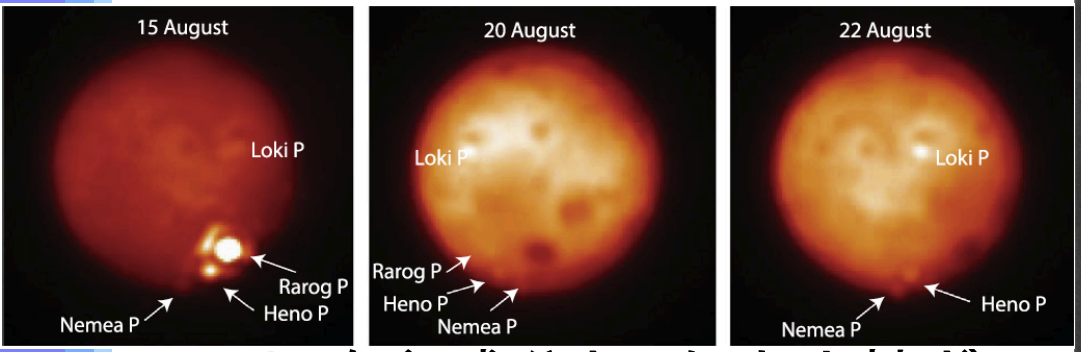
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_r \frac{\partial \rho}{\partial r} = 0$$


© J. Spencer

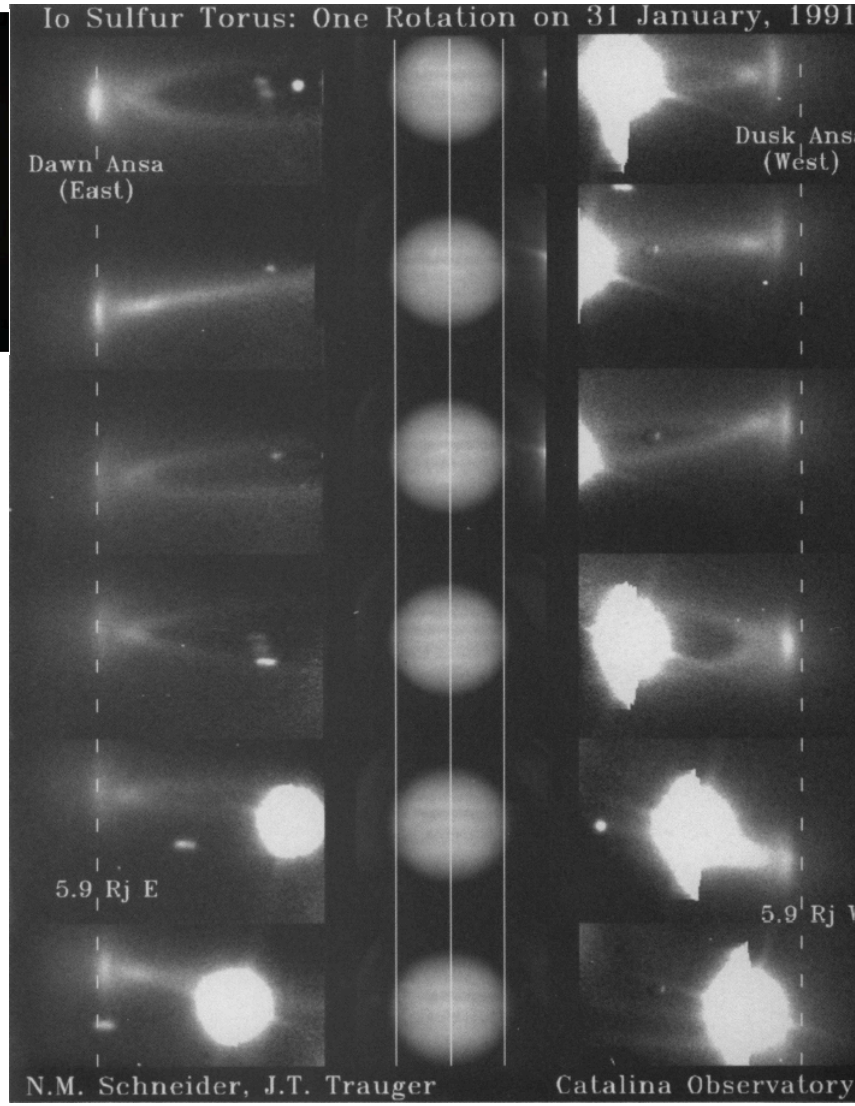
1.磁気圏スケールで見える噴出

イオ火山

2.2μmで観測された火山スポット
de Pater +14



SII6731Åで観測されたイオプラズマトーラス[Schneider&Trauger, 96]



- S/Oを主成分とした火山性ガスが、260-1400kg/sで磁気圏へ供給される
- 主に電子衝突電離によりイオン化、木星磁場(~2000nT)により補足され、共回転(74km/s)を開始する。
- 6Rjを密度ピークに磁気圏プラズマのソース領域であるイオプラズマトーラス(IPT)を形成

中性粒子

- イオ火山起源の微量なナトリウム化合物の乖離・電離・電荷交換反応が、高速中性ナトリウムを生成。
- 強力な可視共鳴散乱光NaI589nmを広範囲で励起->火山活動の指標

$$\mathrm{NaX}^{+}_{\mathrm{pickup}} + e^{-}$$

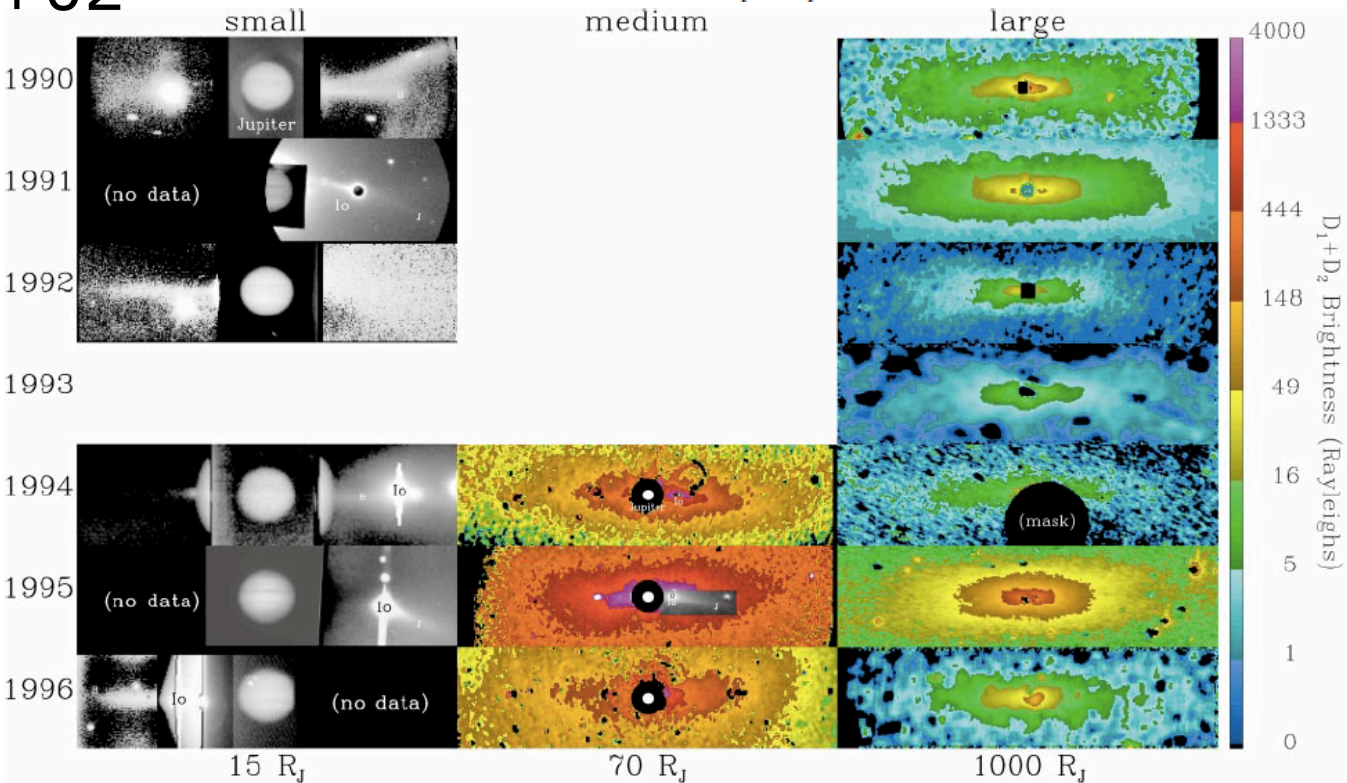
$$\rightarrow \mathrm{Na}_{\mathrm{fast}} + \mathrm{X}_{\mathrm{fast}} \quad \text{(dissociative recombination)} \qquad (1a)$$

$$\rightarrow \mathrm{Na}_{\mathrm{fast}} + \mathrm{X}^{+} + e^{-} \quad \text{(dissociation)} \qquad (1b)$$

$$\rightarrow \mathrm{Na}^{+} + \mathrm{X}_{\mathrm{fast}} + e^{-} \quad \text{(dissociation)} \qquad (1c)$$

Wilson+02

$$\mathrm{Na}^{+}_{\mathrm{torus}} + \mathrm{Na}_{\mathrm{exosphere}} \rightarrow \mathrm{Na}^{*} + \mathrm{Na}^{+}_{\mathrm{pickup}}. \qquad (3)$$

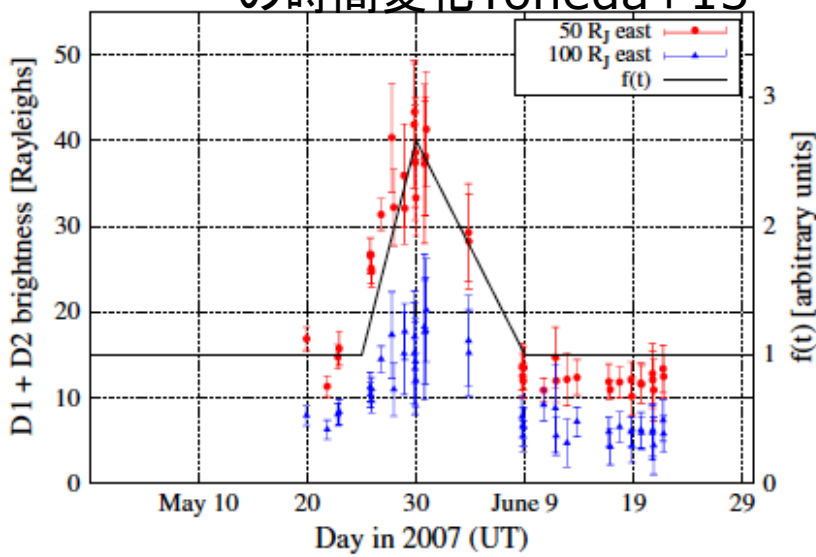


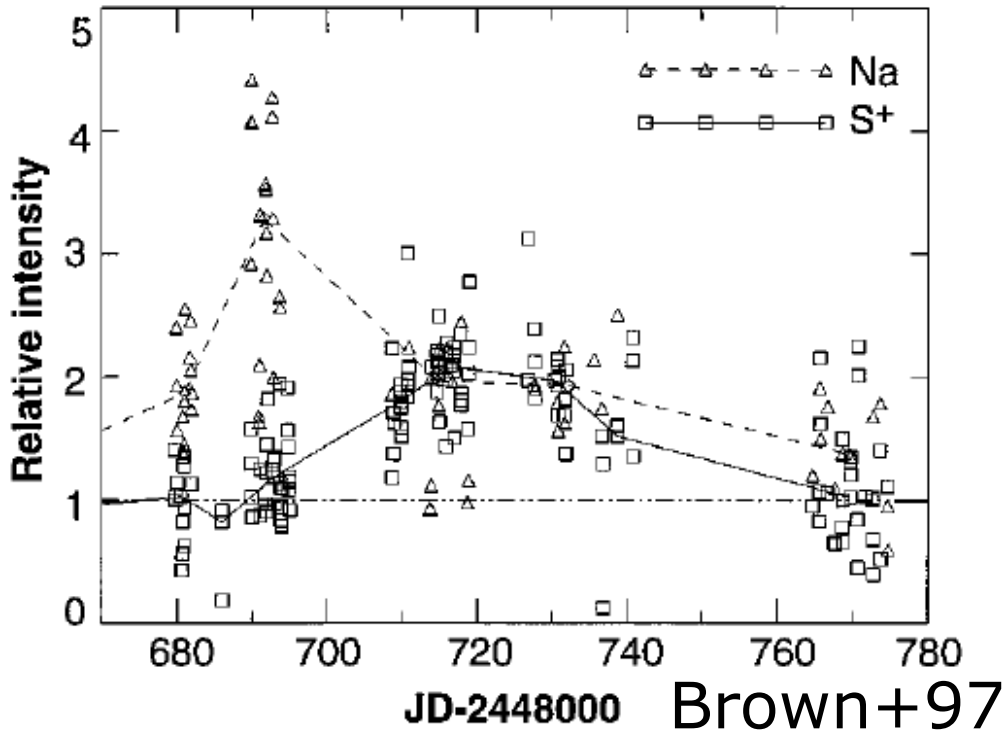
火山プロキシ

- 火山活動に伴う中性ナトリウムと硫黄イオンの”out burst” [Brown+97]
- 中性粒子の変動タイムスケール律速因子：
  - ソース：火山噴出・化学・スパッタリング
  - ロス：系からの脱出・化学
- イオンの変動タイムスケール：
  - ソース：化学・イオンピックアップ
  - ロス：イオンの動径輸送スケール・化学

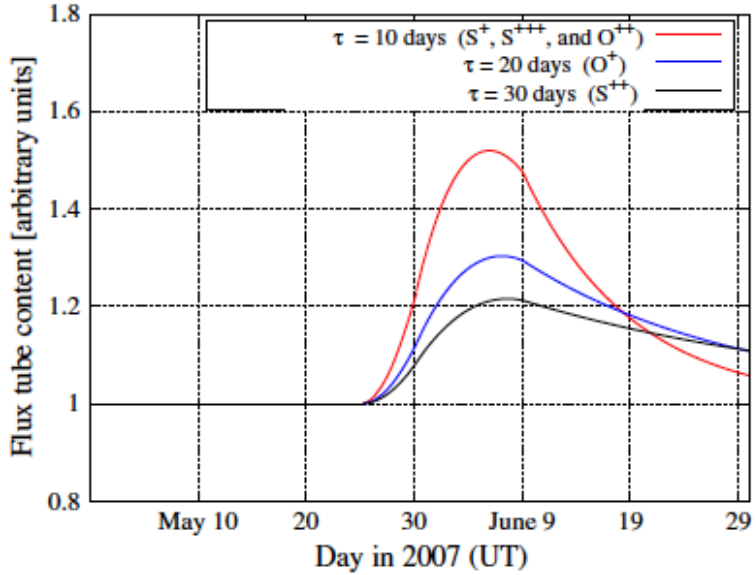
のバランス。

火山噴火時Na共鳴散乱光の時間変化Yoneda+13





Brown+97



エンセラダス水噴出

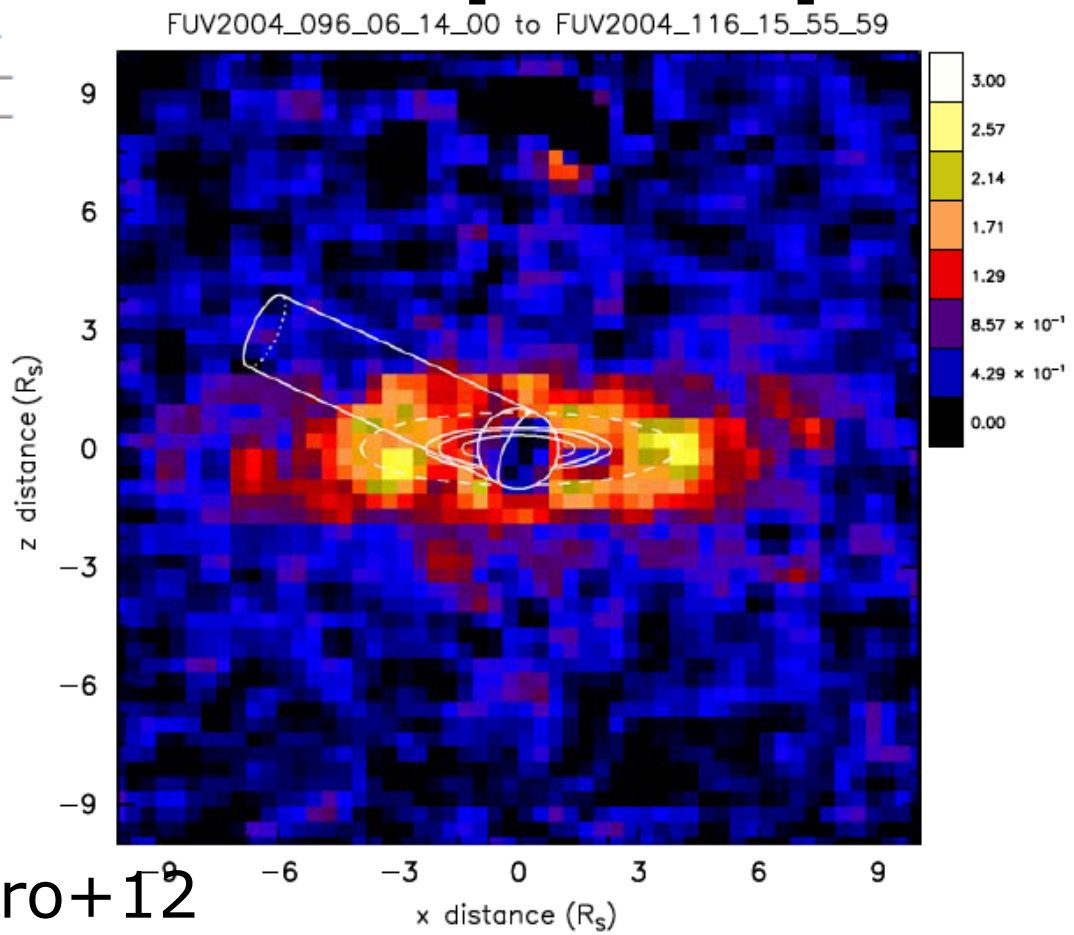
- 12-250kg/sでH_20,OH,O,Hを磁気圏へ供給
- 3.9Rsにエンセラダストーラスを形成
- 中性粒子、光、イオン、電子間の複雑な化学でプラズマ・中性の組成が決まる。

$$H_2O + h\nu \rightarrow H + OH$$
$$H_2O + h\nu \rightarrow H_2 + O$$
$$H_2O + h\nu \rightarrow H + H + O$$
$$H_2O + h\nu \rightarrow OH^+ + H + e^-$$
$$H_2O + h\nu \rightarrow H^+ + OH + e^-$$
$$H_2O + h\nu \rightarrow O^+ + H_2 + e^-$$
$$H_2O + h\nu \rightarrow H_2O^+ + e^-$$
$$OH + h\nu \rightarrow O + H$$
$$OH + h\nu \rightarrow OH^+ + e^-$$
$$O + h\nu \rightarrow O^+ + e^-$$

$$H_2O + e^- \rightarrow H_2 + O + e^-$$
$$H_2O + e^- \rightarrow OH + H + e^-$$
$$H_2O + e^- \rightarrow H_2O^+ + 2e^-$$
$$H_2O + e^- \rightarrow O^+ + H_2 + 2e^-$$
$$H_2O + e^- \rightarrow OH^+ + H + 2e^-$$
$$H_2O + e^- \rightarrow H^+ + OH + 2e^-$$
$$OH + e^- \rightarrow O + H + e^-$$
$$OH + e^- \rightarrow OH^+ + 2e^-$$
$$OH + e^- \rightarrow O^+ + H + 2e^-$$
$$OH + e^- \rightarrow H^+ + O + 2e^-$$
$$O + e^- \rightarrow O^+ + 2e^-$$

$$H_2O + H^+ \rightarrow H_2O^+ + H$$
$$H_2O + H_2^+ \rightarrow H_3O^+ + H$$
$$H_2O + H_2^+ \rightarrow H_2O^+ + H_2$$
$$H_2O + O^+ \rightarrow H_2O^+ + O$$
$$H_2O + OH^+ \rightarrow H_3O^+ + O$$
$$H_2O + OH^+ \rightarrow H_2O^+ + OH$$
$$H_2O + H_2O^+ \rightarrow H_3O^+ + OH$$
$$H_2O + H_2O^+ \rightarrow H_2O^+ + H_2O$$
$$OH + H^+ \rightarrow OH^+ + H$$
$$OH + H_2^+ \rightarrow OH^+ + H_2$$
$$OH + H_2^+ \rightarrow H_2O^+ + H$$
$$OH + O^+ \rightarrow OH^+ + O$$
$$OH + O^+ \rightarrow O_2^+ + H$$
$$OH + OH^+ \rightarrow H_2O^+ + O$$

Cassiniで見たOI1304Åの共鳴散乱光分布[Melin+09]



Tadokoro+12

ひさきで捉えられた水噴出変動

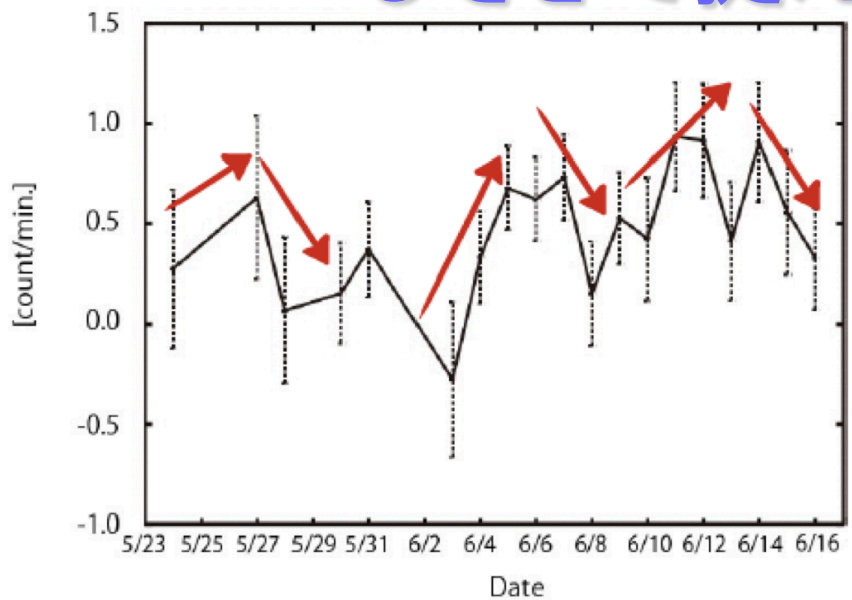


図 2　観測された中性酸素原子の日変動

- OI1304共鳴散乱光
- 地球大気のコンタミを注意深く除去することで、日々変動の検出に成功[Tadokoro+14]

- 変動要因候補
  - 太陽風変動＆磁気圏変動：△
  - エンセラダス位相：×
  - 水噴出の変動：〇？
- 上記要因を切り分けるのがこれからの課題。

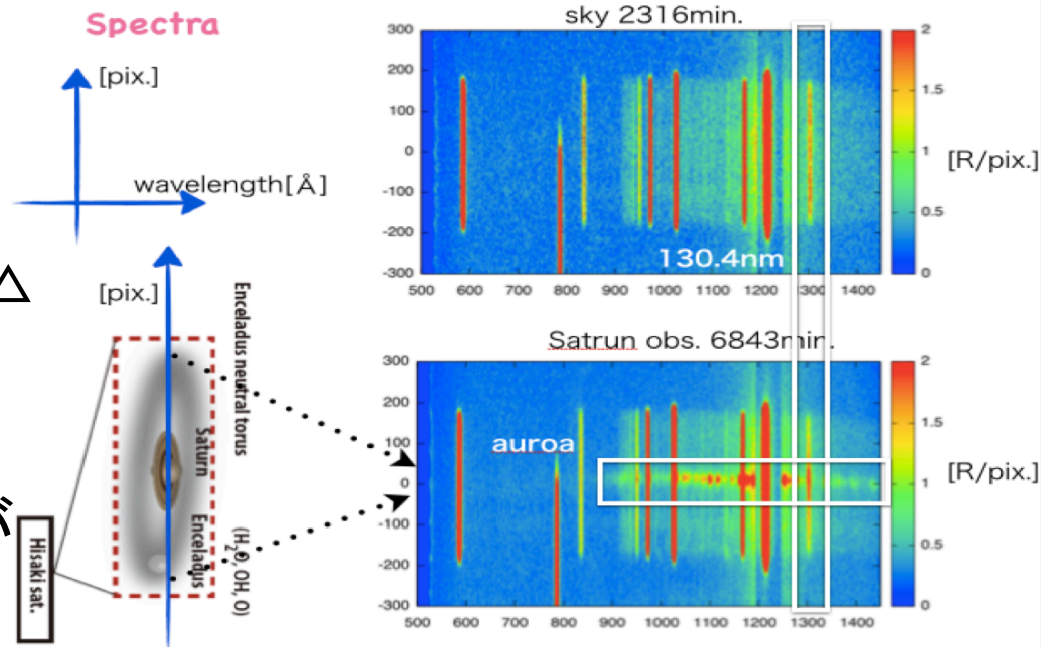
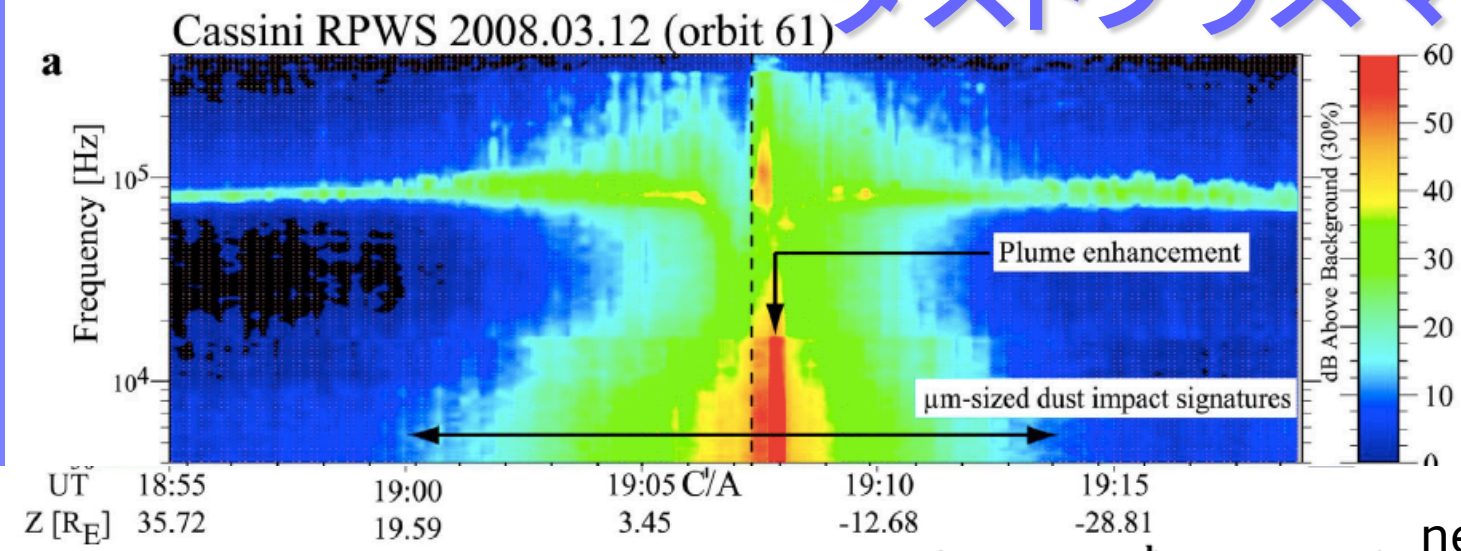
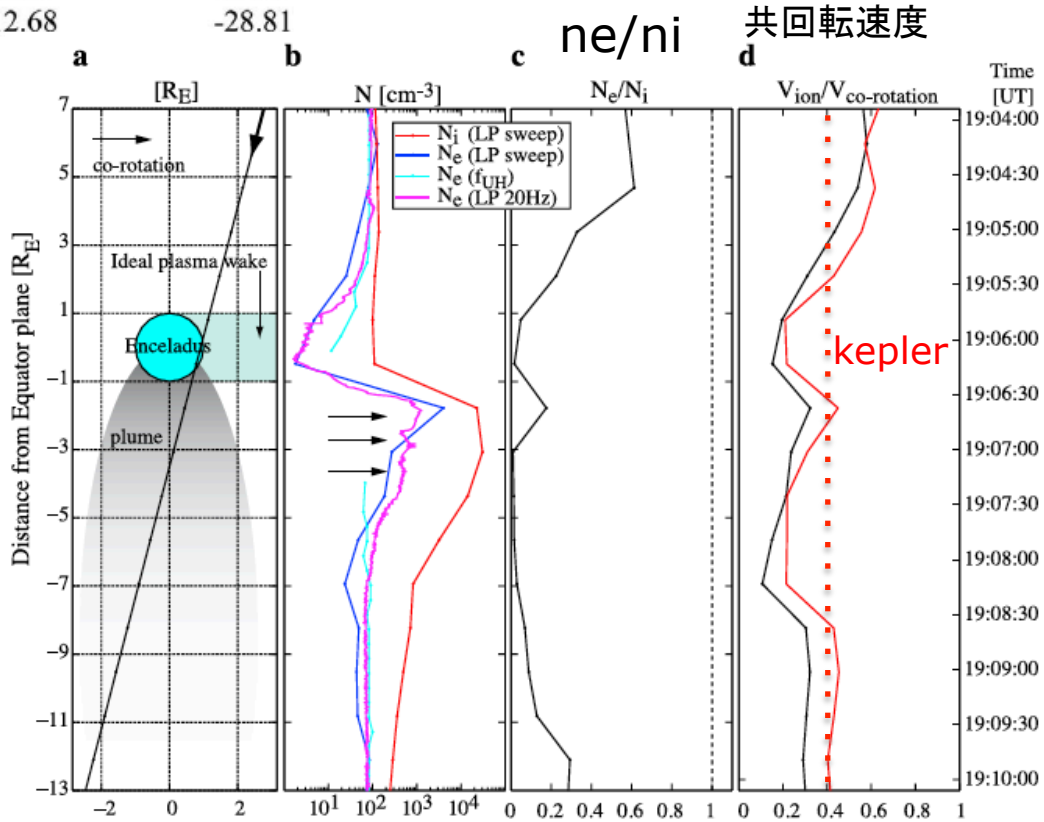


図 1. 観測スペクトル

ダストプラズマ供給



- エンセラダス南半球プリュームでダストの存在を示すその場観測 [e.g., Morooka+11]
- 波動観測機にダスト衝突を示す低周波信号
- イオンに対する電子の割合が低い
  - ne/ni<0.01@プリューム
- バルク速度がケプラー速度に近い
- 電子吸着したダストとイオンの混合プラズマの存在を示唆
- ダストプラズマはどのように電磁場を変調させるのか？



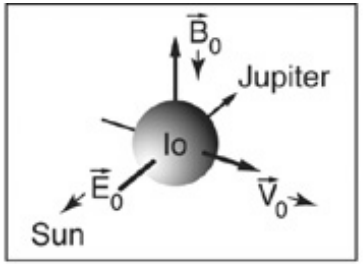
問題点

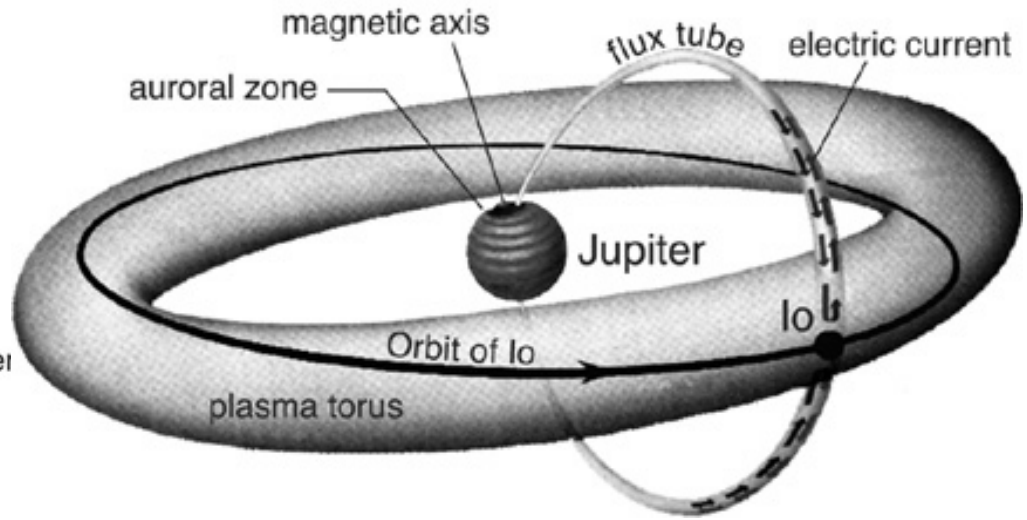
- 噴出が供給する中性物質が、どこで・どのような過程でプラズマに変換されるのか？
- 衛星周囲でプラズマ化した物質はどのように磁気圏にピックアップされ、輸送されていくのか？
- 中性とプラズマのソース・ロスレート・組成の評価
- イオ・エンセラダストーラス発光の日々変動要因
- 衛星周囲・磁気圏内におけるダストプラズマの基本的振る舞い（電気伝導度、電磁波動分散関係、磁気圏-電離圏結合…）

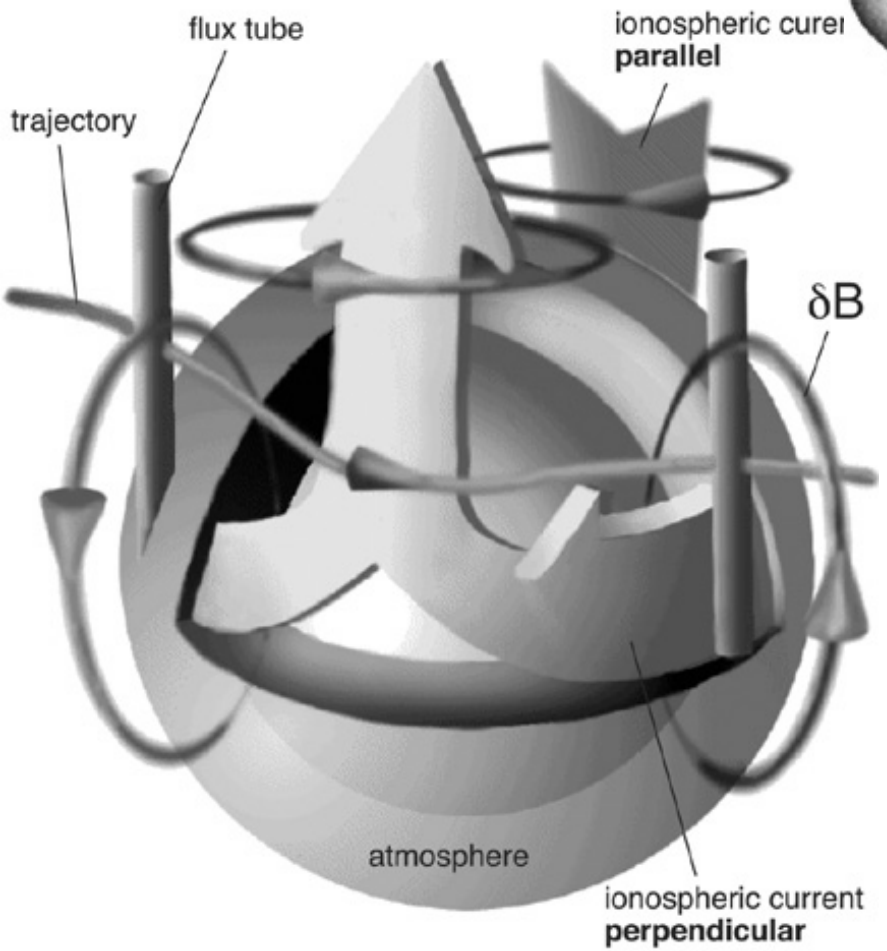
2.惑星-衛星電磁相互作用

木星-イオ相互作用

Saur+04



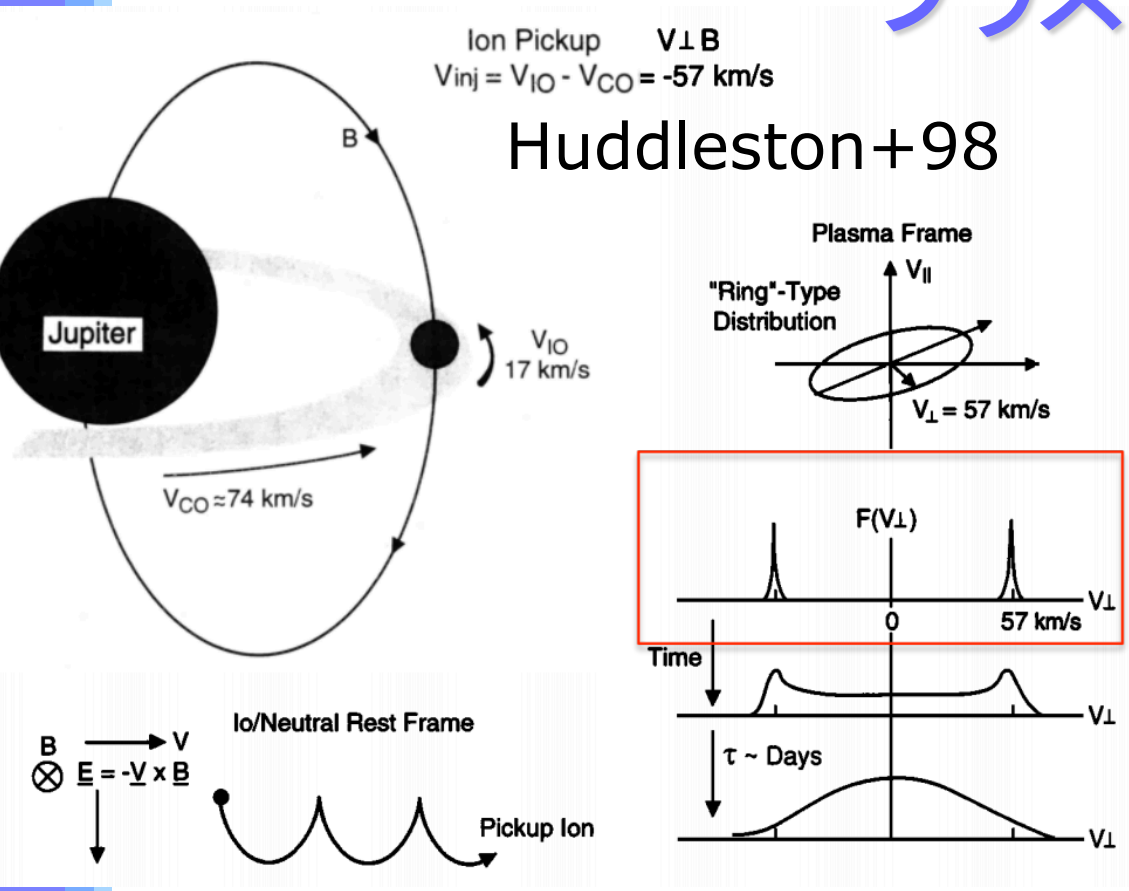




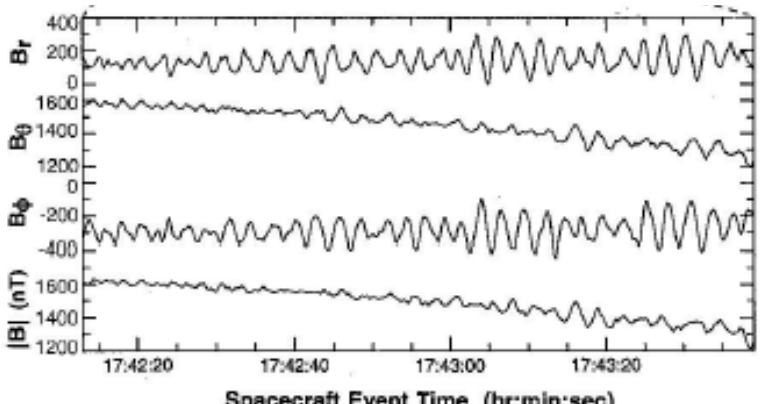
- イオ電離圏プラズマ(ne<277,000/cc)が、木星固有磁場(2000nT)に貫かれる
- 磁気圏-イオ相対速度57km/s
  - イオケプラー速度:17km/s
  - 磁気圏プラズマ共回転速度:74km/s
- 磁気圏磁場のダイナモ電場:

  $|vxB|*2R_{io}=410kV$
- 有限の電気伝導度をもった球体に電圧が印加されている状態–>「単極誘導」
- イオから湧きでた沿磁力線電流が木星とイオを電磁結合

プラズマピックアップ



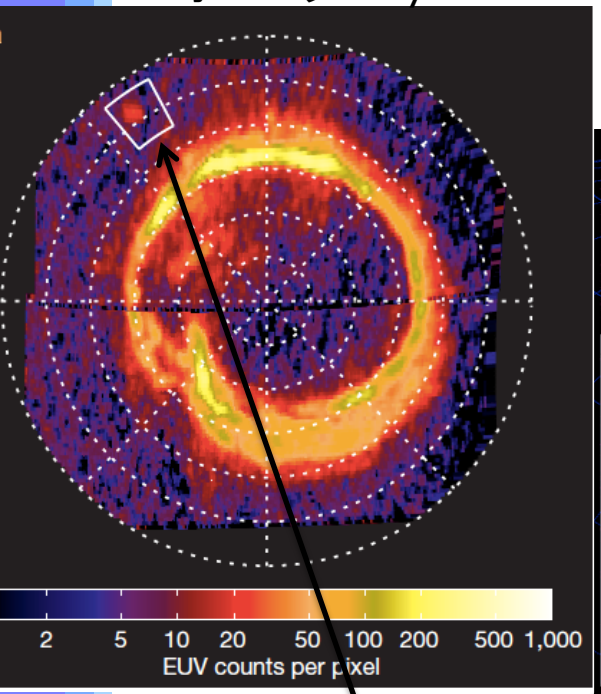
- 電子衝突などで電離した火山起源プラズマは木星磁場に補足されジャイロ運動を始める「ピックアップ」
- イオ-共回転の相対速度に対応した磁力線垂直方向速度をもつ速度分布「リング分布」
- プラズマ不安定や粒子衝突を介して、低周波磁場波動や紫外線放射をすることで、エネルギーを解放する。
- イオの下流で速度分布が安定化していく。
- 磁気圏への「マスローディング」の開始点
- ピックアップ量と火山活動との対応が未評価。



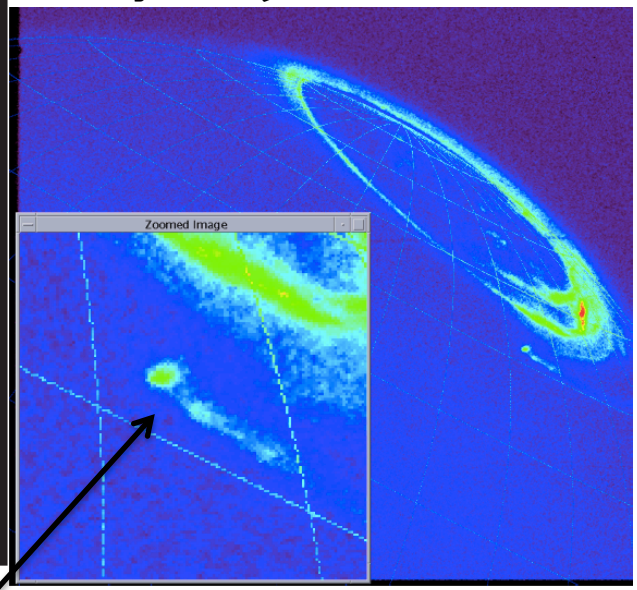
イオ下流で観測された
リング分布に起因する低周波波動

オーロラ放射

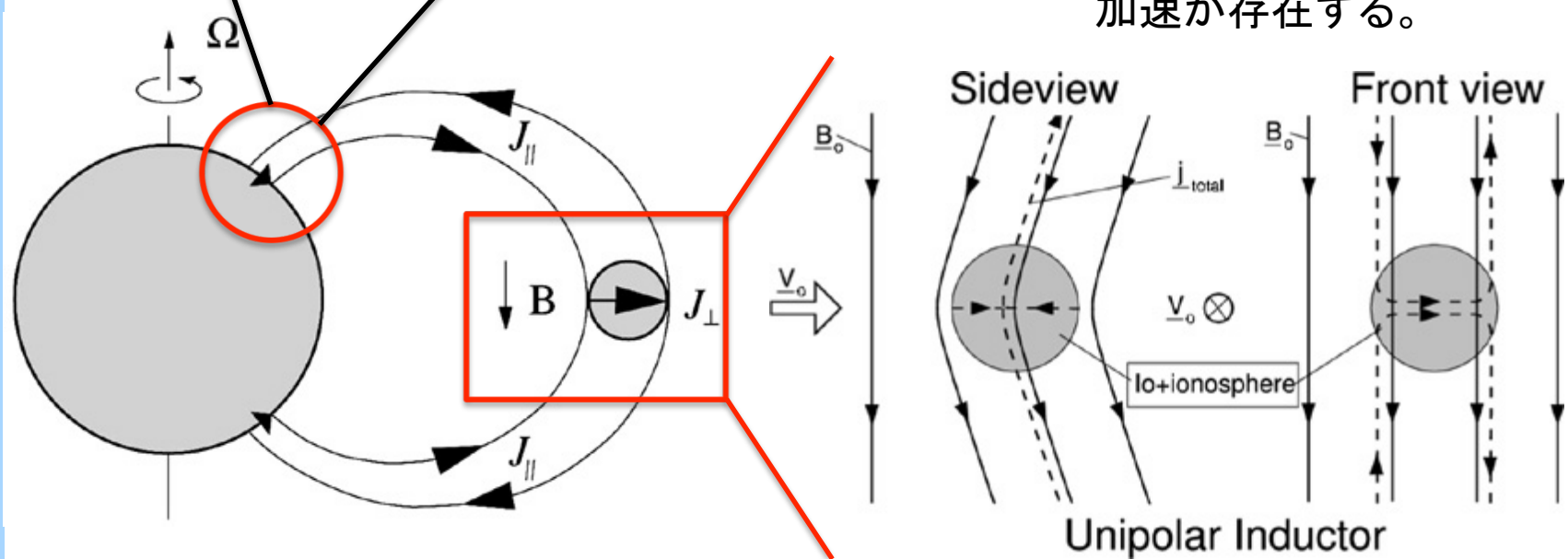
土星のエンセラダスフットプリント
オーロラ　Pryor+12



木星のイオフットプリント
オーロラ　Gerard+06

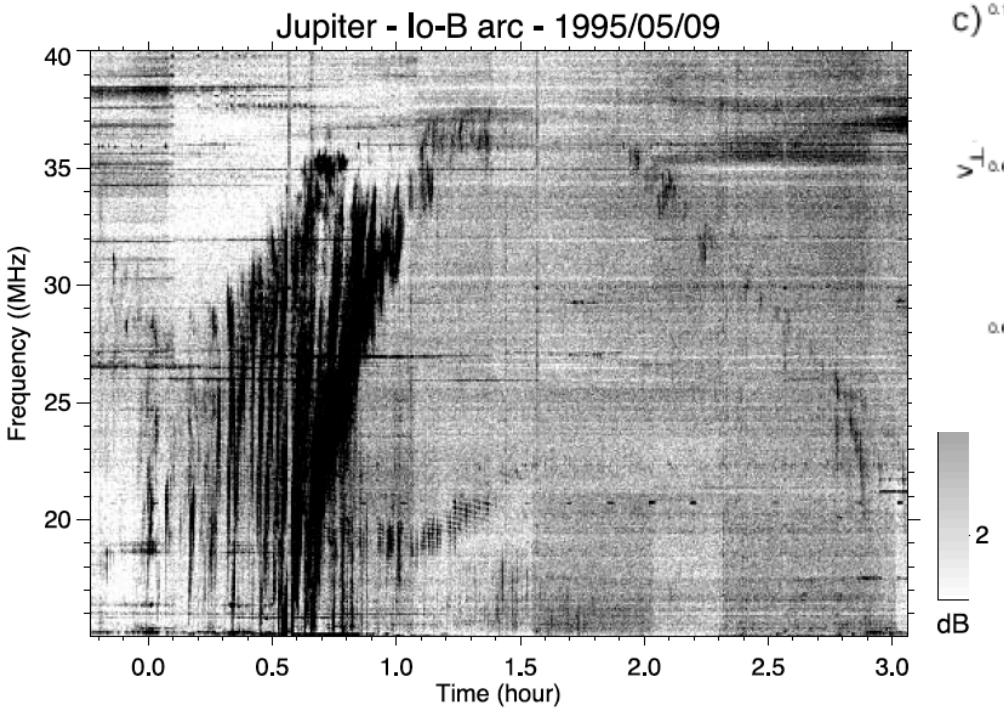


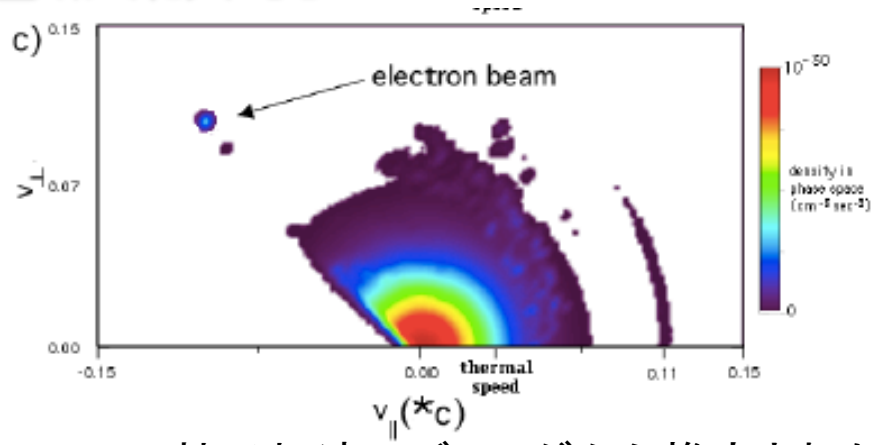
- 多くの衛星-惑星結合電流は、粒子加速(10keV-100keV)を伴い、衛星を貫く磁力線の根本にオーロラを励起する。
- イオがフットプリント中最も強力なオーロラを放射する(<10^{11}W)。
- 衛星-磁気圏相互作用(電流量など)をリモセンできる貴重な現象。動的結合がまだ未解明。
- 後述の磁気圏-電離圏を往復する低周波波動による動的な加速が存在する。



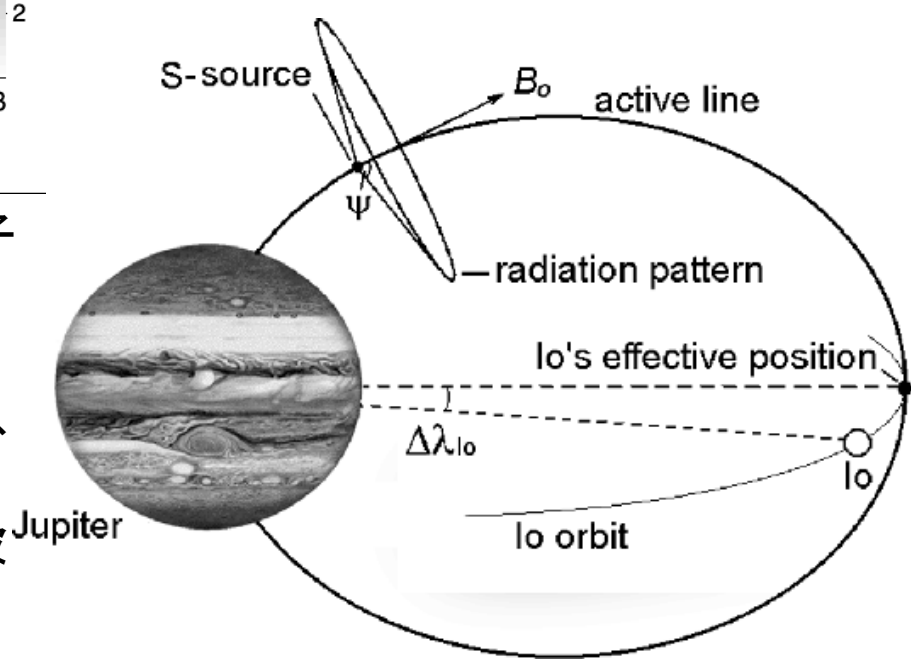
電波放射

イオフットプリントで励起される電波
Hess+08





粒子加速モデリングから推定された
プラズマの速度分布Hess+06

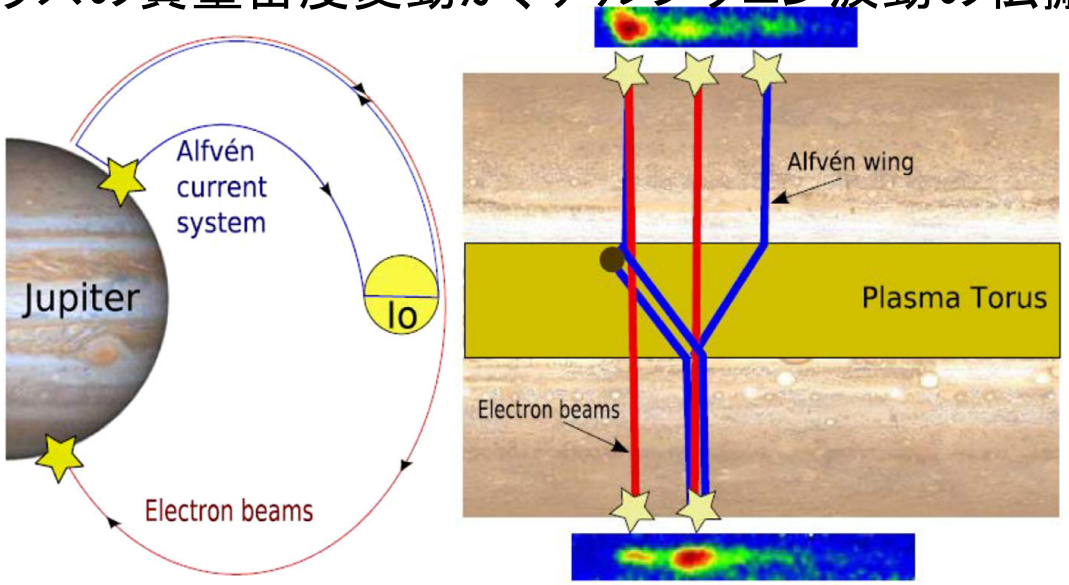


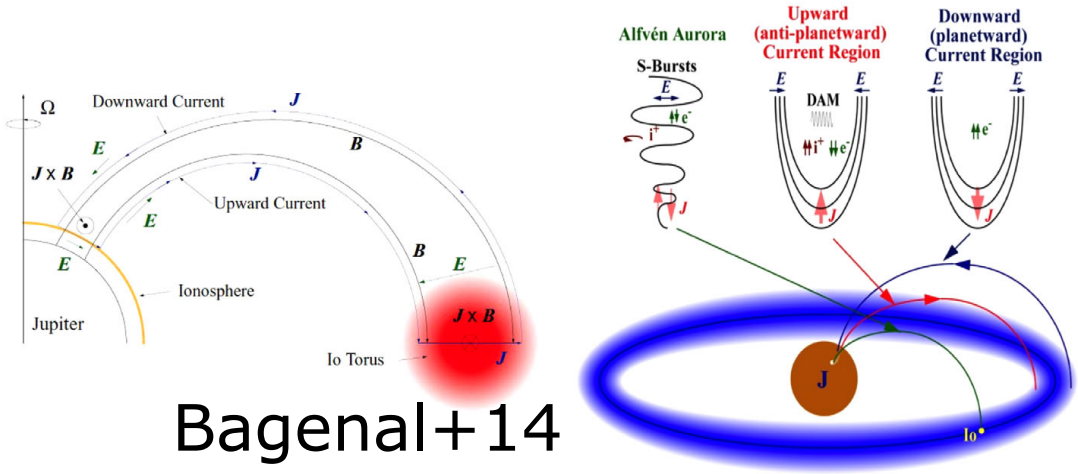
- 衛星惑星結合電流は、沿磁力線電流や粒子加速（数keV）を伴う。
- 加速粒子は惑星大気と相互作用して、プラズマの速度分布に不安定構造をつくる。ロスコーン、シェル、ビーム等が候補だが未解明
- 不安定構造がエネルギーソースとなり、電波放射（数MHz-45MHz）を励起する。
- スペクトル形状から、粒子加速高度や衛星付近の磁力線のベンドバック量が推定できる。

Arkhypov+2008

低周波波動による沿磁力線加速

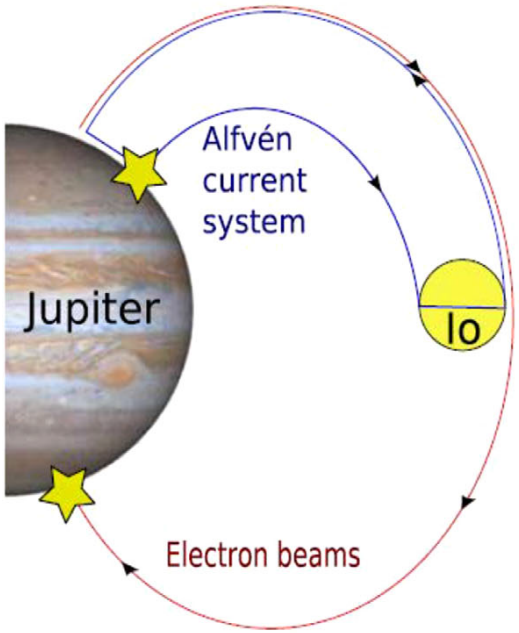
- イオ付近で励起された分散性アルフヴェン波動という低周波波動がプラズマトーラスを経由して木星南北極域を往復。
- 磁力線方向に動的な粒子加速を励起する。->オーロラ・電波放射。
- プラズマトーラスの質量密度変動が、アルフヴェン波動の伝搬を制御する。

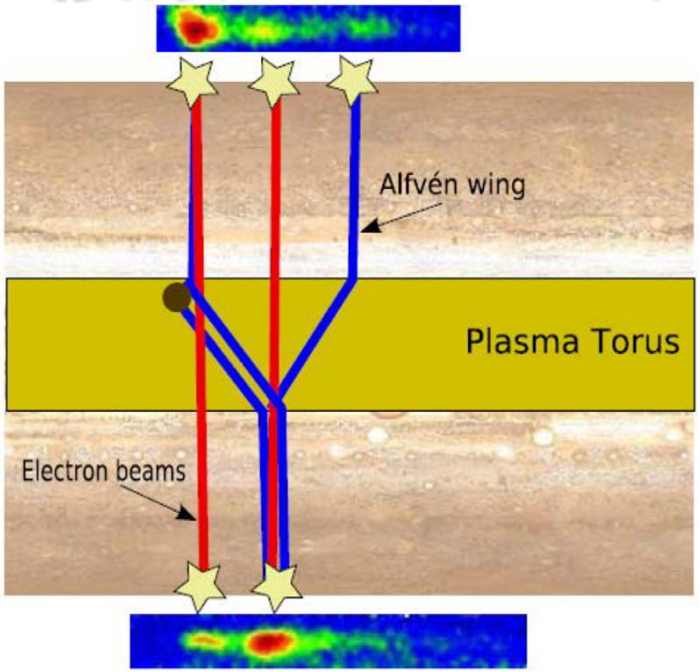




Bagenal+14

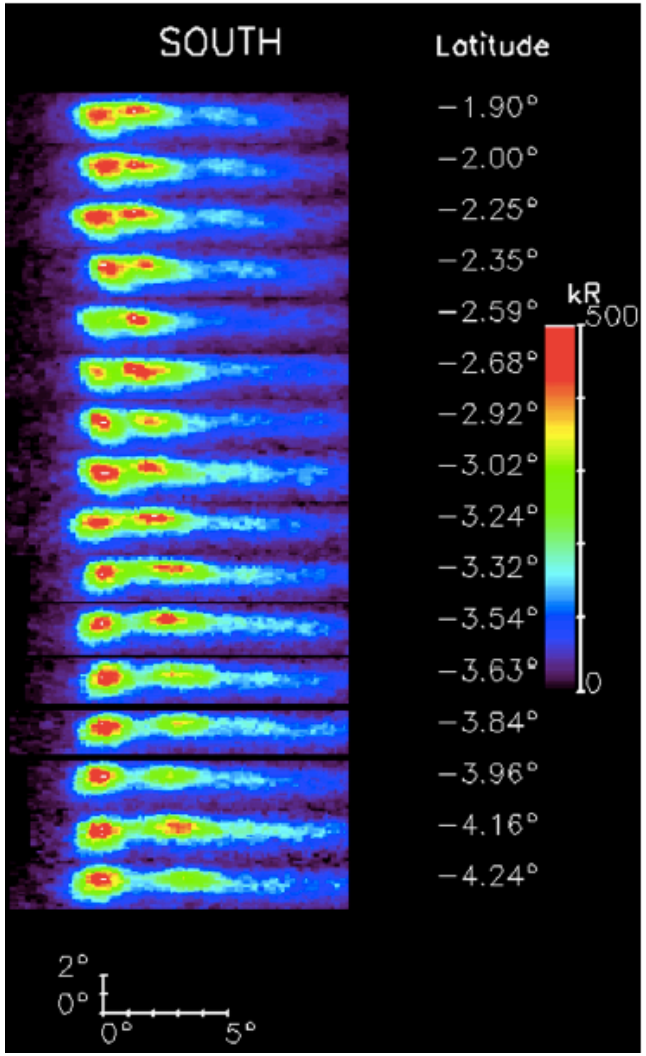
複数のフットプリント





南半球のイオフットプリント

プラズマトーラス中心からのイオの緯度



Gerard+06

- アルフヴェン波の南北往復時間に対応して、イオフットプリントオーロラのスポット間隔が決まる
- 火山活動-プラズマトーラスの質量密度変化に応じて間隔変化が期待されるが、火山活動で特徴づけできるほどデータが揃っていない。
- スポット間隔と火山活動を同時長期モニタすることで、動的な衛星-惑星相互作用の理解が進むと期待される。

土星-エンセラダス相互作用

- 高負帯電ダスト-中性が担う電気伝導度は、衛星周囲の電子イオン-中性が担う電流配位を変調させる[e.g., Saur+07, Simon+11]
- ダストプラズマによる衛星-惑星間電流系の全球的変化は理解の途上。
- 噴出の空間スケールと衛星本体の大きさの比率が電流系の形状に重要なファクタ？

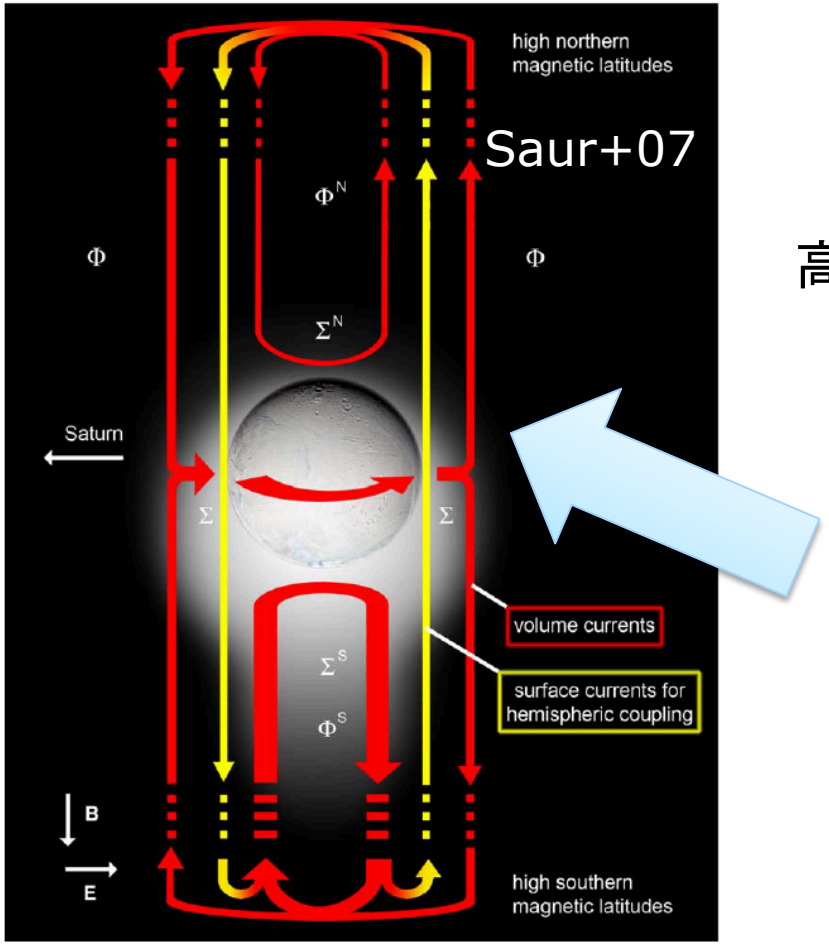


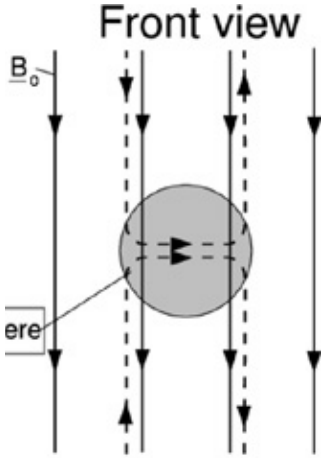
Figure 1. Sketch of the electric current system for a nonsymmetric plasma interaction due to a south

電子・イオンのみのホール伝導度

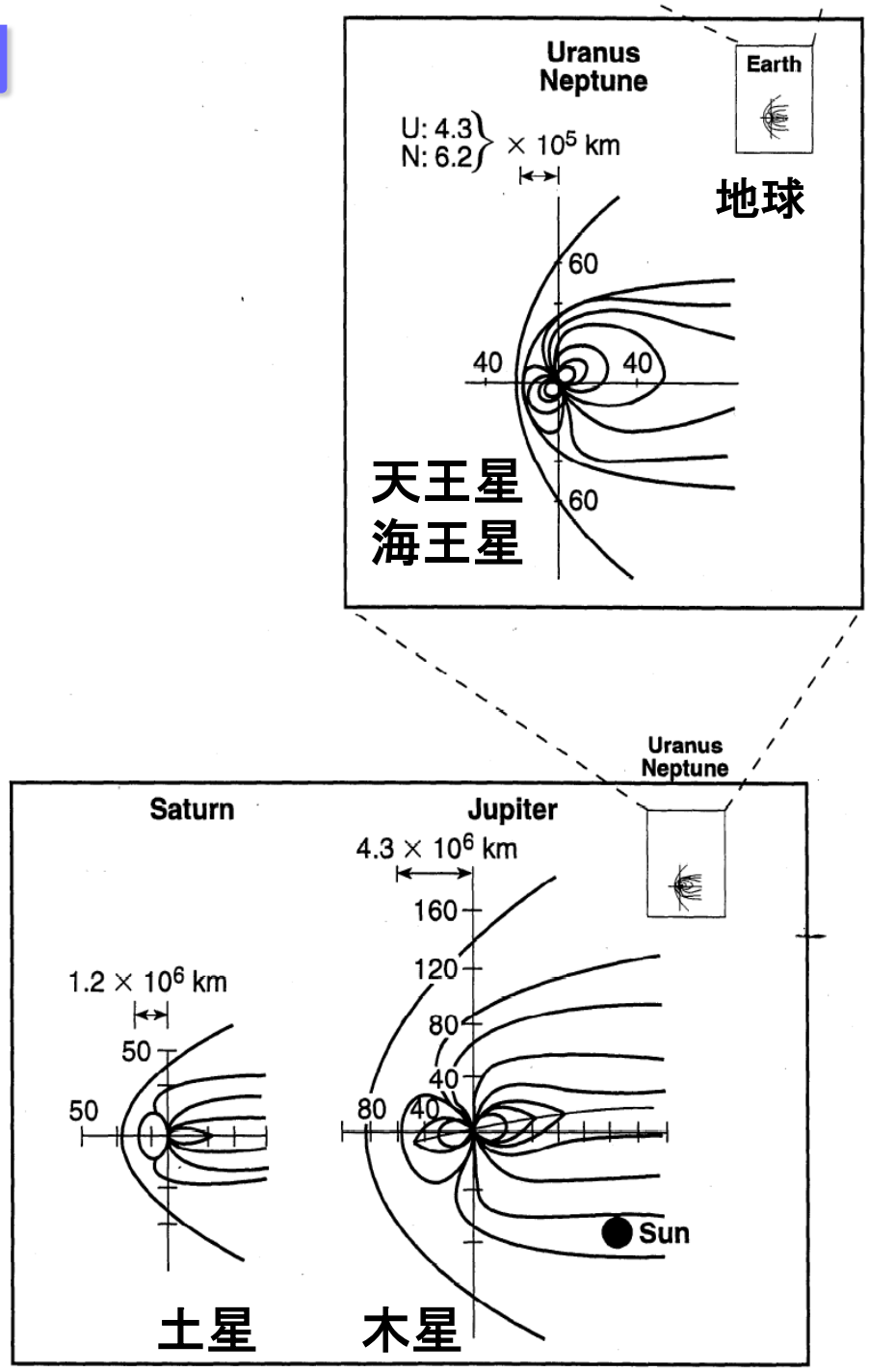
$$\sigma_H = -\sum_{\alpha=i,e} \frac{n_\alpha q_\alpha}{B_0} \frac{\Omega_\alpha^2}{\nu_\alpha^2 + \Omega_\alpha^2} \qquad \text{(Hall)} \quad ,$$

高負帯電ダストを考慮したホール伝導度

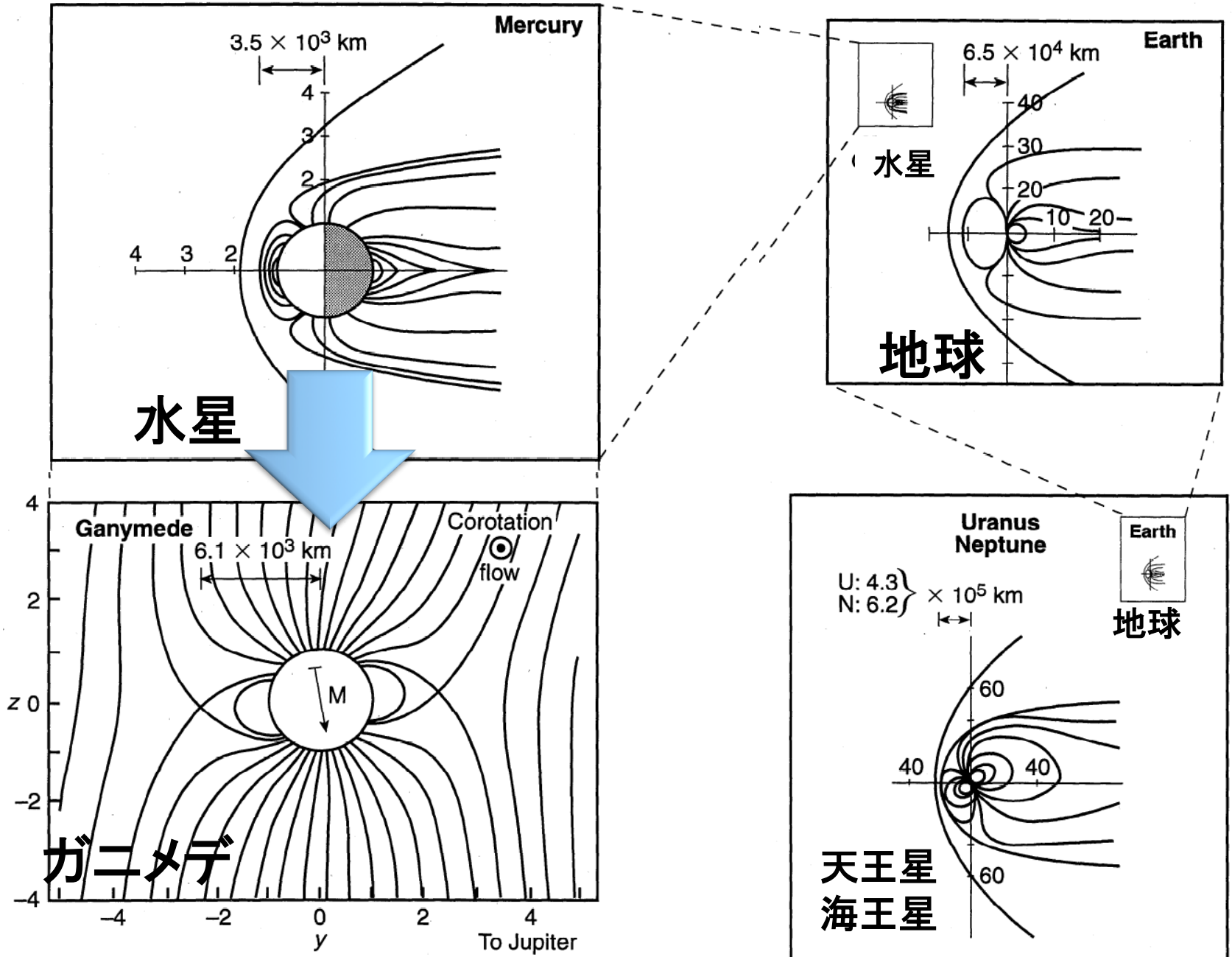
$$\sigma_H = -\frac{e}{B_0} \frac{\xi n_D \left(\nu_i^2 + \Omega_i^2\right) - n_i \nu_i^2}{\nu_i^2 + \Omega_i^2} \quad .$$



木星-ガニメデ相互作用

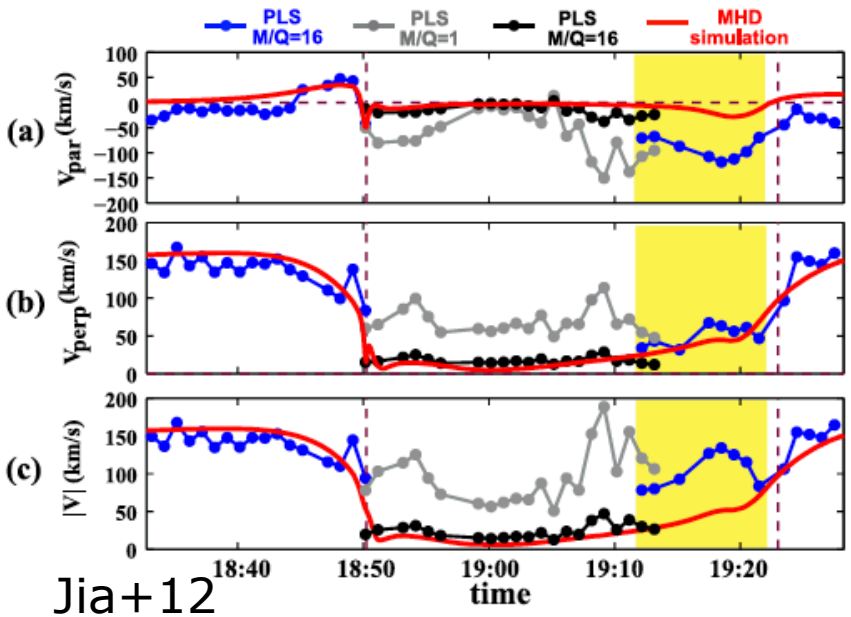

Uranus
Neptune
Earth
U: 4.3
N: 6.2
× 10^5 km
地球
60
40
40
60
天王星
海王星
Uranus
Neptune
Saturn
Jupiter
4.3 × 10^6 km
160
120
80
40
80
40
1.2 × 10^6 km
50
50
Sun
土星
木星

木星-ガニメデ相互作用

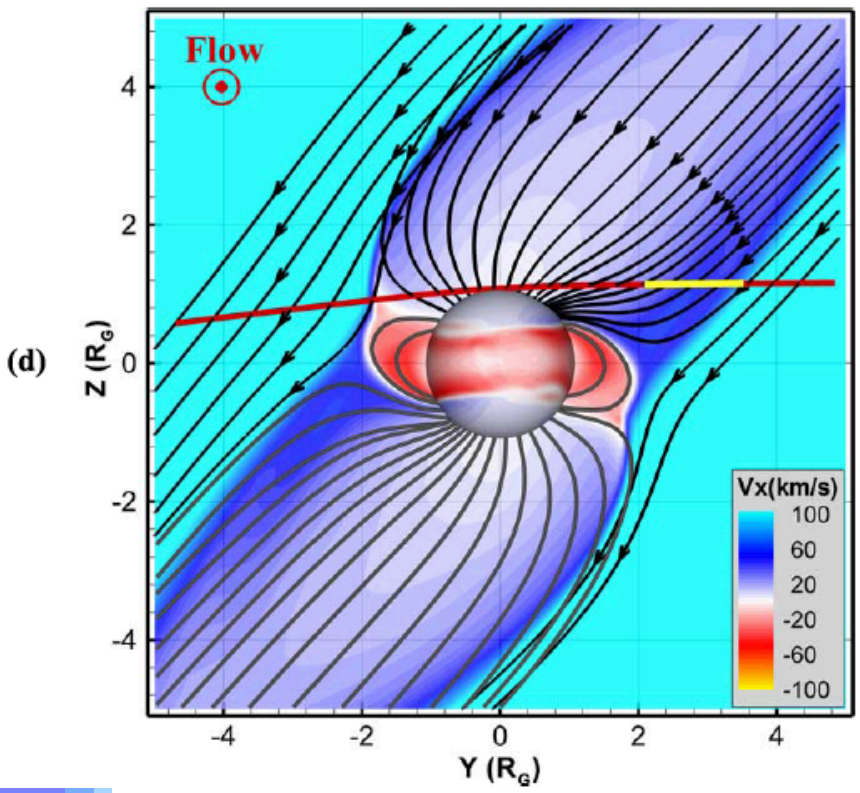

Mercury
3.5 × 10³ km
水星
Earth
6.5 × 10⁴ km
水星
地球
Ganymede
6.1 × 10³ km
Corotation flow
M
ガニメデ
To Jupiter
Uranus
Neptune
U: 4.3
N: 6.2
× 10⁵ km
Earth
地球
天王星
海王星

ガニメデ磁気圏

"Mercury in Jupiter's m'sphsere"



Jia+12

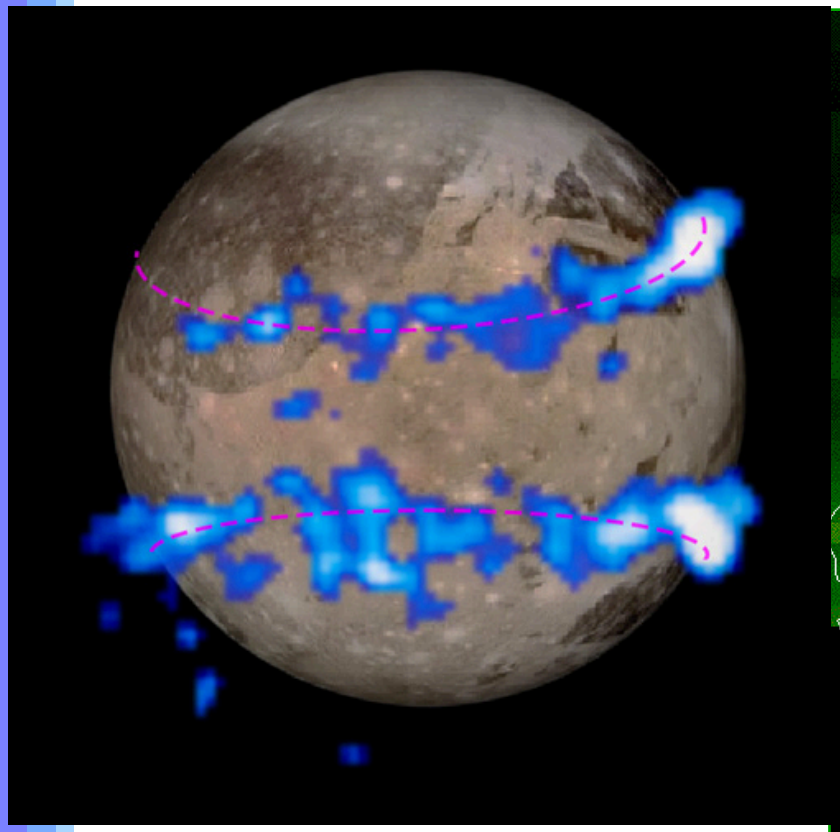


	Ganymede	Mercury
Radius(solid)	2631km	2436km
Radius (m'sphere)	6.1x10^3km~2.3Rg	3.5x10^3km~1.4Rm
Surface mag. field	~<1500nT	~<300nT
External mag. field	~<100nT	~<50nT
Composition of external plasma	Oxygen, Sulfur, and proton	proton

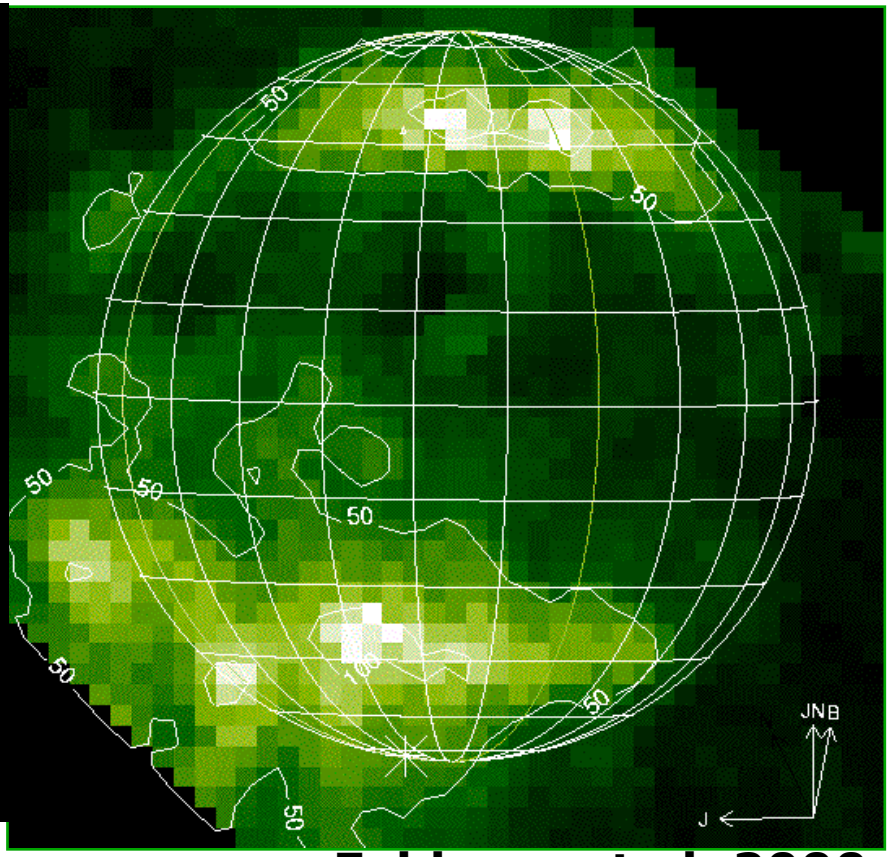
- 水星スケールのミニ磁気圏が木星と電磁相互作用。
- オーロラ、放射線帯、リコネクション？などの磁気圏活動。
- プラズマのアウトフローがあり、少量ながら木星磁気圏へプラズマ供給も？

ガニメデオーロラ

- 木星磁気圏起源の電子が、中性酸素OI1356を励起
- 発光の緯度は、おそらく木星磁場とガニメデ磁場が繋がる境界領域
- 非常に時間変化が大きい–>木星磁場との相互作用の時間変化
- 木星磁気圏の磁場方向、プラズマ密度が制御要因か？



Saur+15

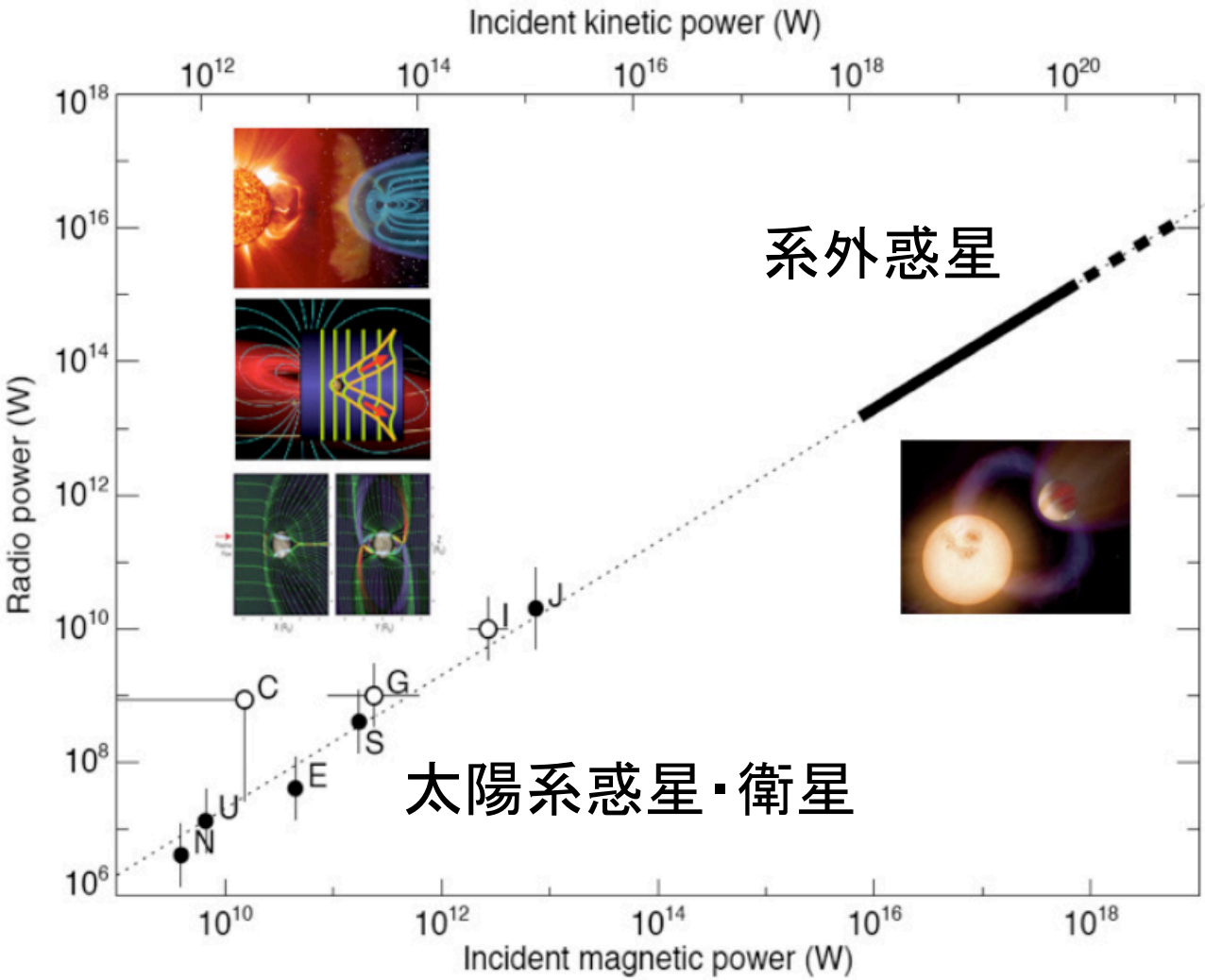


Feldman et al, 2000.

系外惑星への拡張

Zarka+14

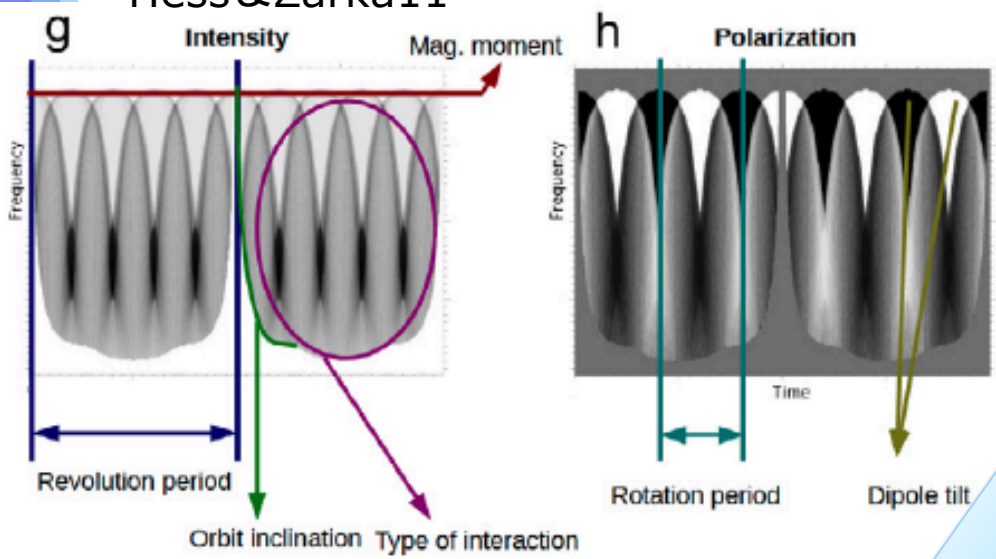
近接連星系

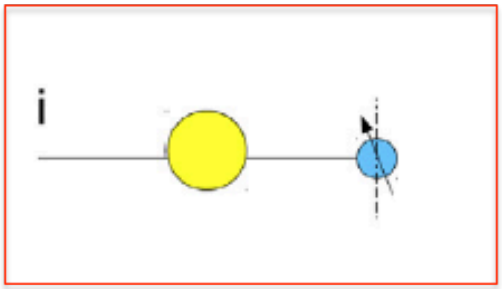


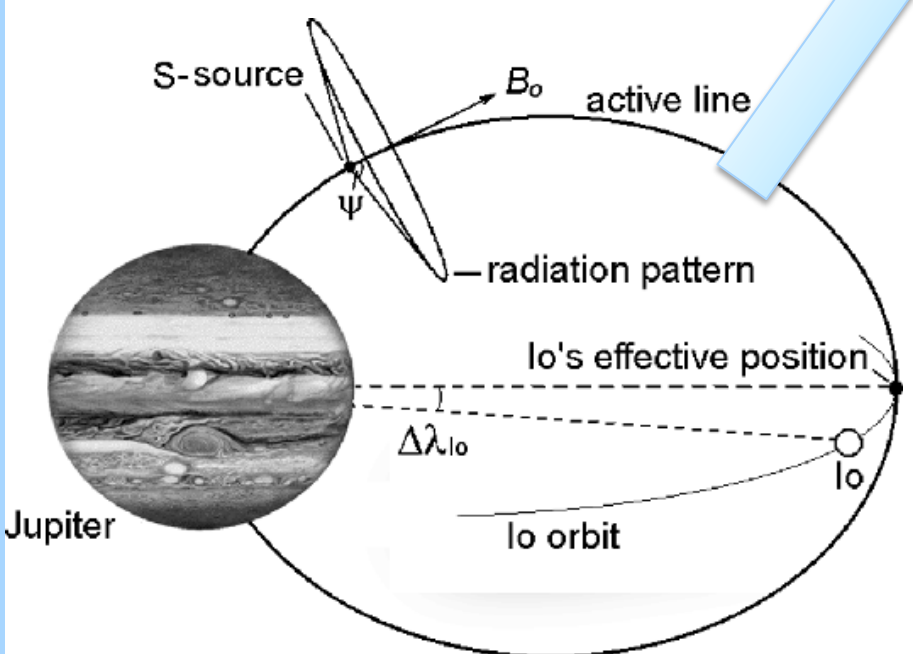
- 天体外部のプラズマ流が天体に印加する電磁・運動エネルギーでオーロラ電波強度をパラメタライズ。
- 1つの直線にのる「電波版ボーデ則」
- 評価されていないパラメータ軸が沢山。
- 惑星-衛星結合の制御パラメータ導入？

系外惑星への拡張

Hess＆Zarka11

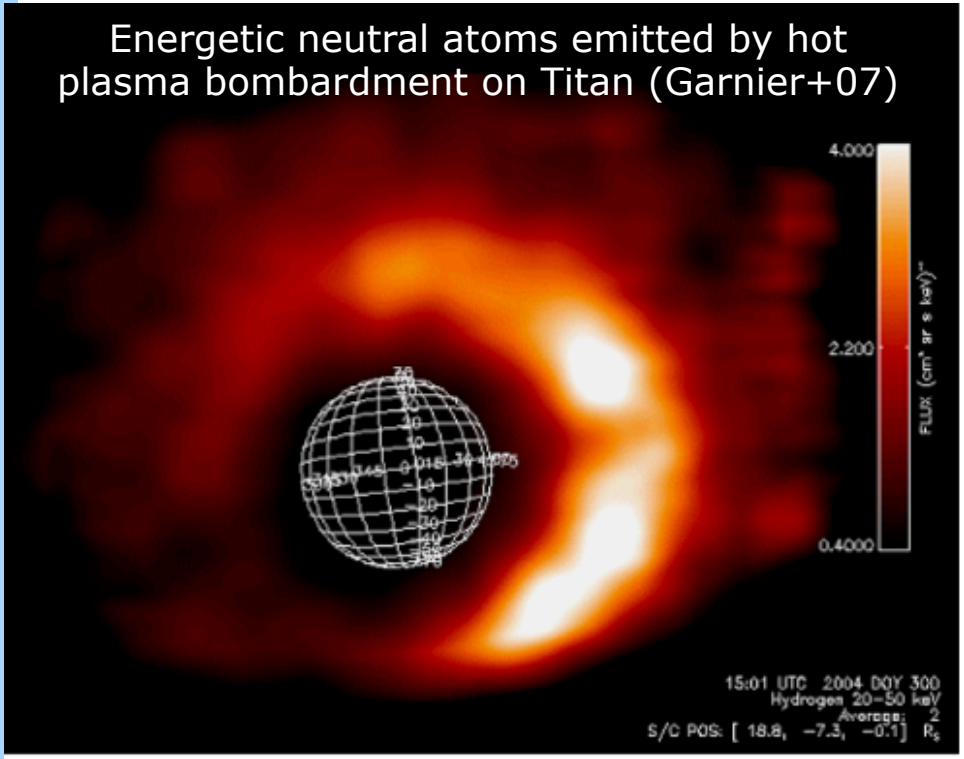


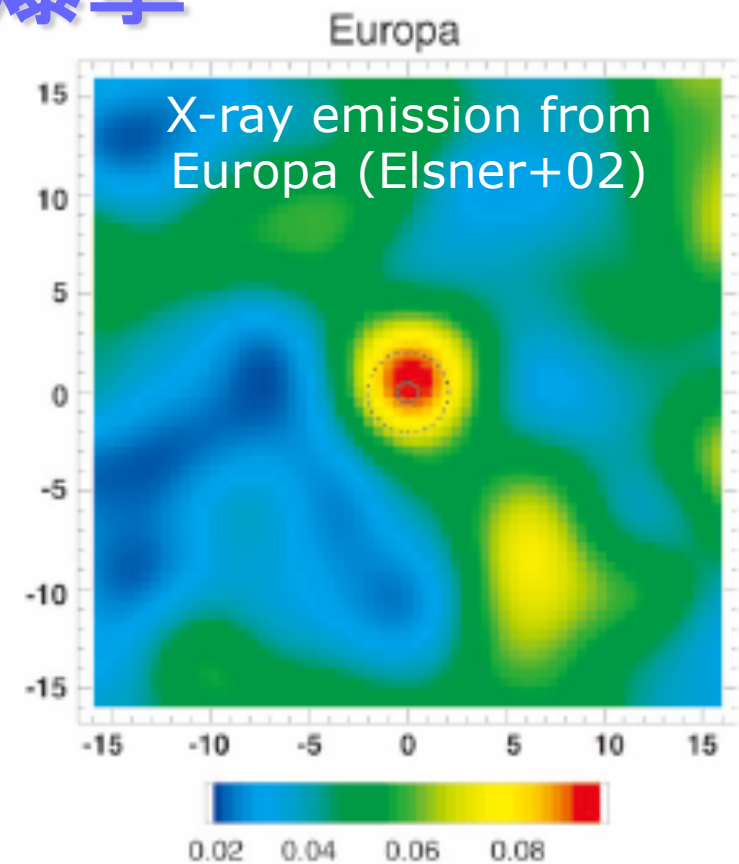




- イオ関連電波で得られた電波放射の理論スペクトルモデルを、主星-系外惑星系へ応用[Hess&Zarka11]
- 惑星間プラズマ密度、惑星磁場強度、自転周期、公転周期などの診断が可能。
- LOFARなど低周波電波干渉計プロジェクトでの観測検証中
- 木星土星の惑星-衛星相互作用から、火山活動、トーラス領域の変動、磁気圏構造などが推定できないか？

プラズマ爆撃





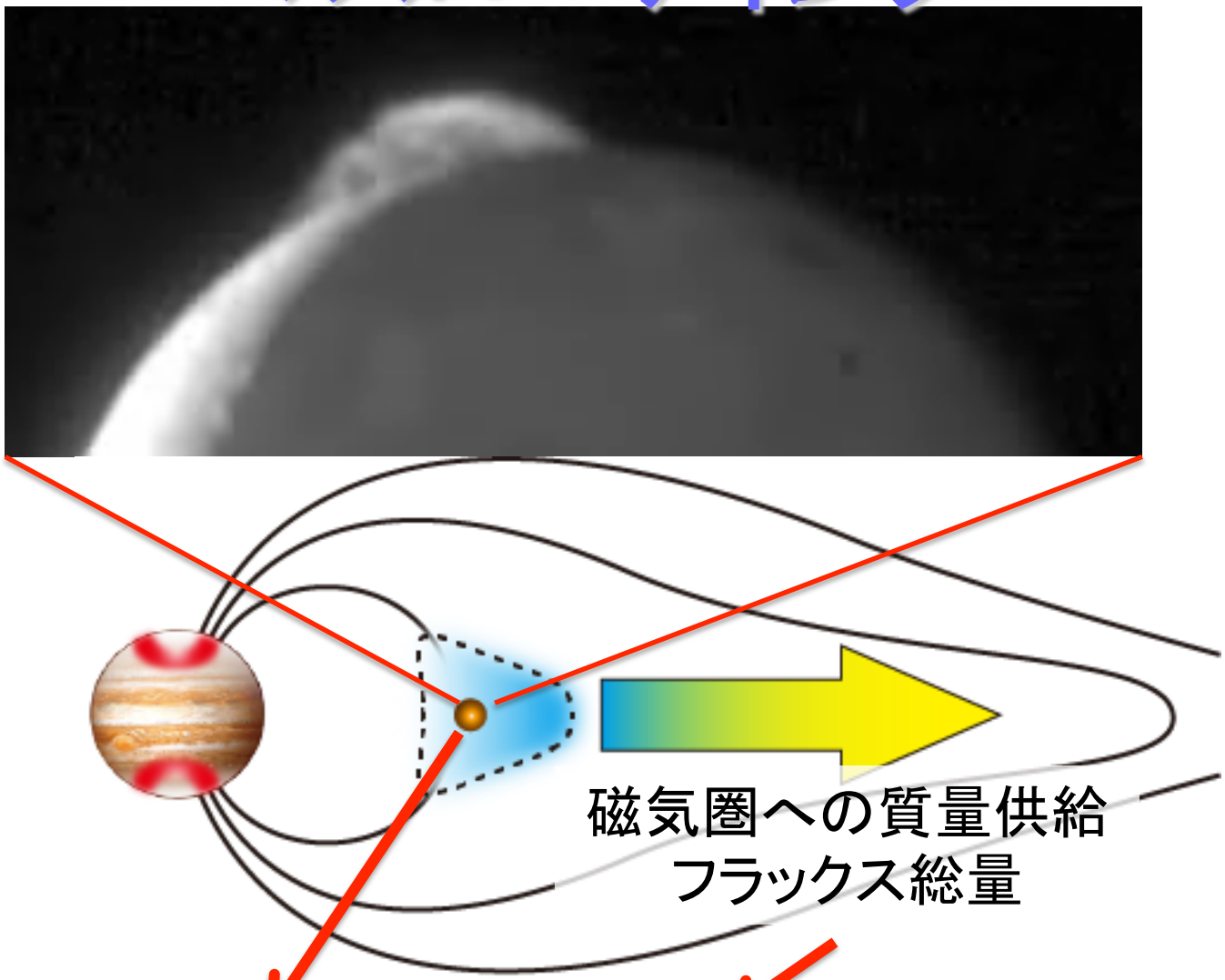
- 希薄大気・濃密大気を有する衛星両者で、磁気圏プラズマ爆撃による蛍光X線や高速中性粒子の放射が観測されている[e.g.,Garnier+07]
- おそらく粒子注入現象等の磁気圏現象をともなう時がある？
- 宇宙風化、表面・大気物質の化学過程のエネルギー源？
- 頻度、エネルギーフラックス変動幅、面積等の基本量が不明。
- 噴出現象変動が粒子注入の頻度を増やし、爆撃量の変化を制御している？

問題点

- 噴出活動とプラズマピックアップレートは1体1対応なのか？
- 惑星-衛星結合電流系におけるアルフヴェン粒子加速の動力学
- 噴出領域の大きさや物性が結合電流系にどのような変調をもたらすのか？
- 弱磁場天体磁気圏活動は外部環境でどう制御されるのか？（あるいはその逆は？）
- 惑星-衛星相互作用の系外惑星への適用。入力エネルギー以外のパラメタライゼーション。

3.噴出現象に支配される磁気圏

"マスローディング"

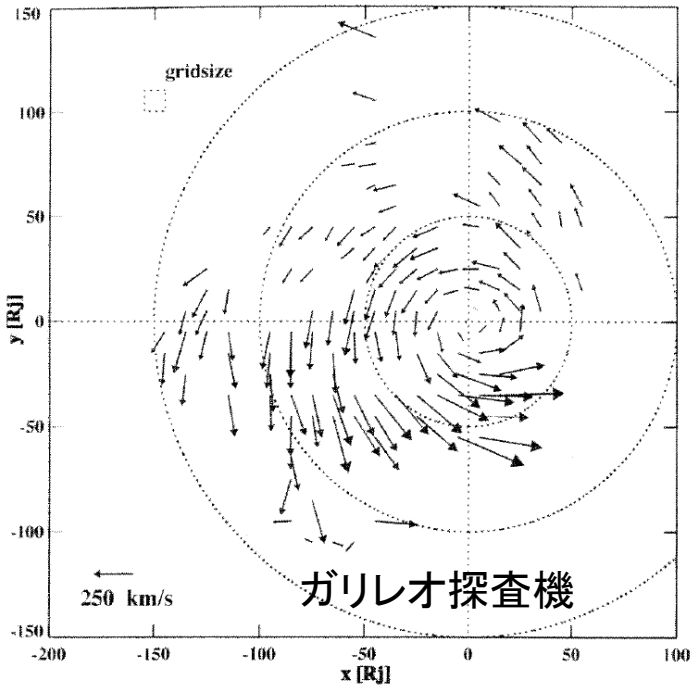


$$\dot{M} = 2\pi r h \rho v_r$$

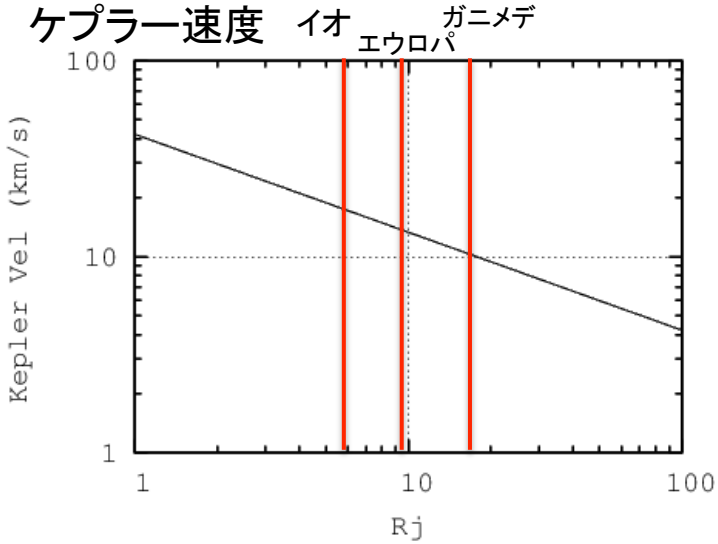
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_r \frac{\partial \rho}{\partial r} = 0$$

共回転プラズマ

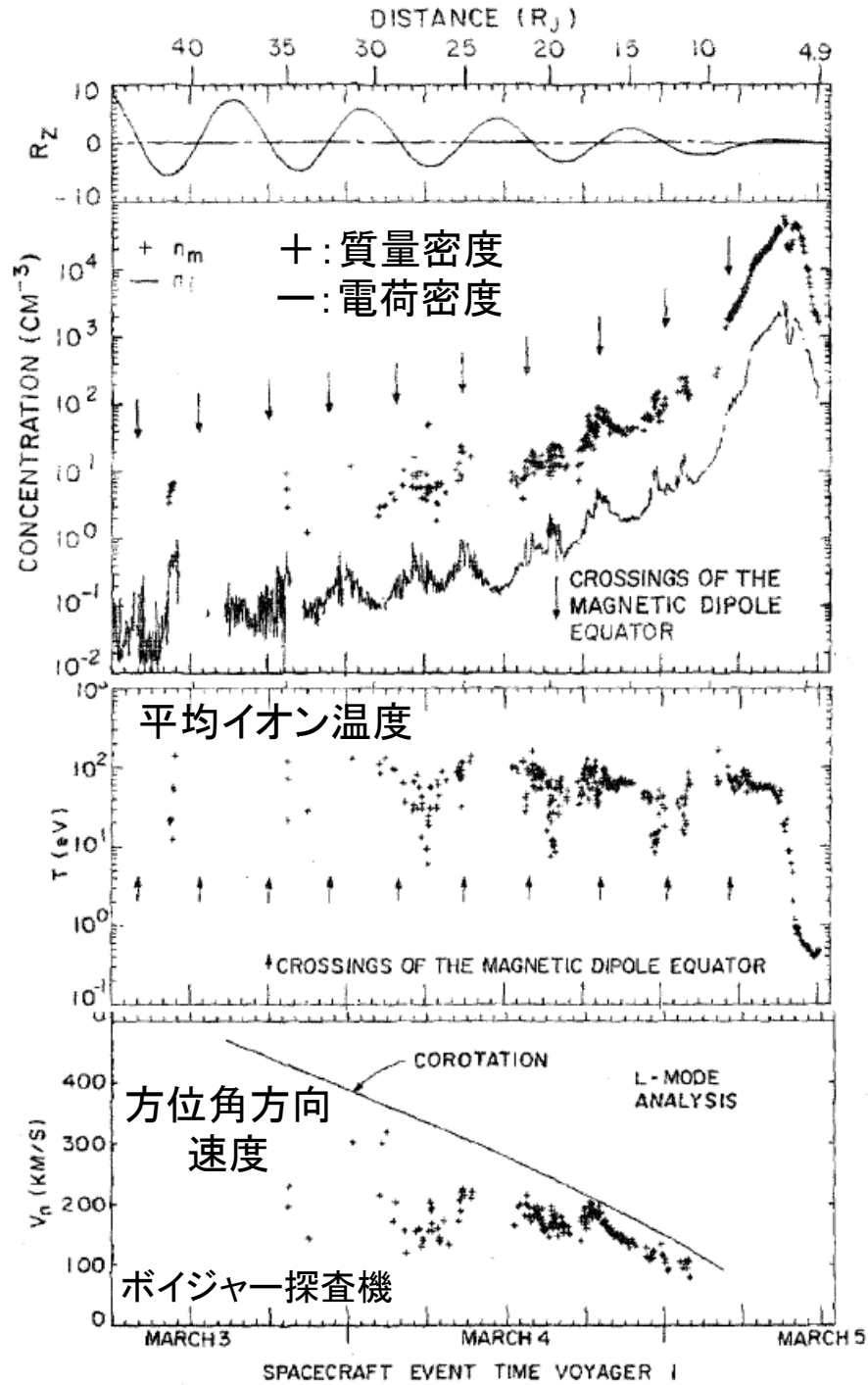
赤道面内速度



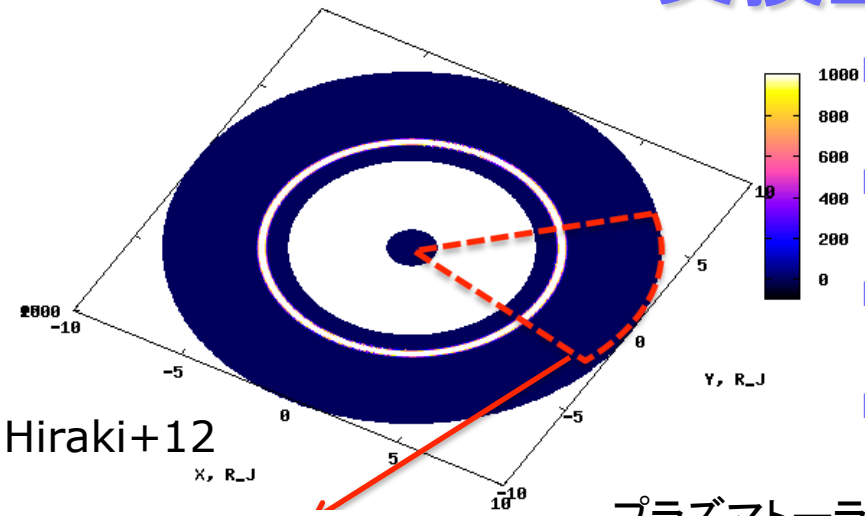
ケプラー速度



Khurana +04

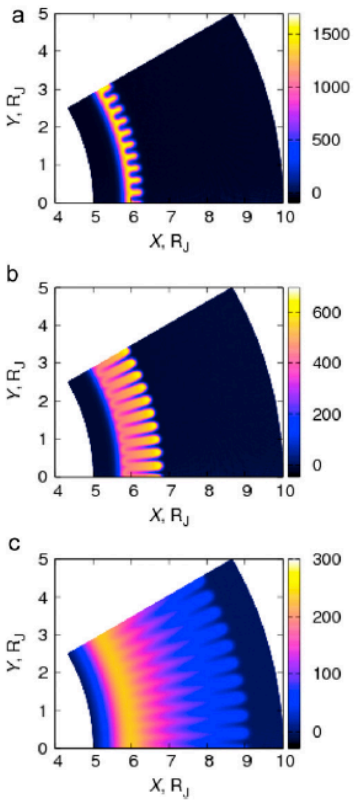


交換型不安定性



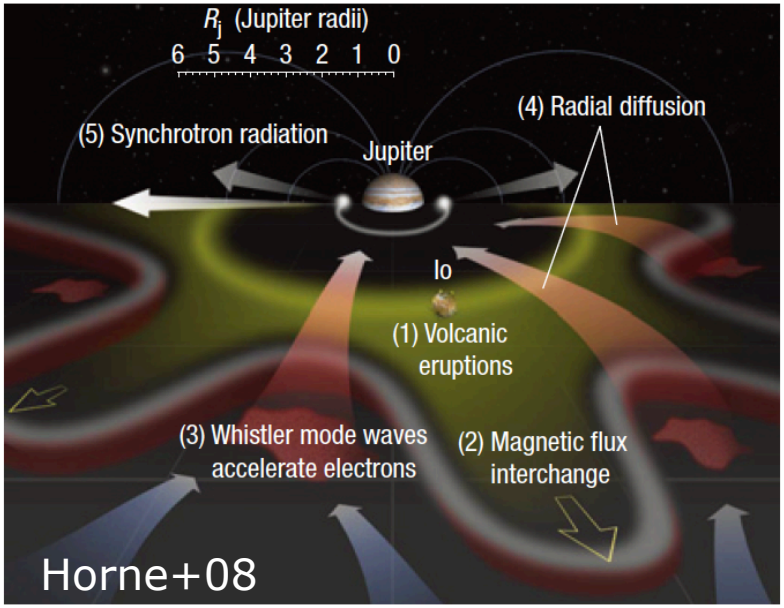
Hiraki+12

- 遠心力場で、IPT内側の低温高密度プラズマの磁束が、外側の高温低密度プラズマの磁束と交換される。
- 内部磁気圏（～<15Rj）におけるマスローディングの担い手であると期待される。
- 高温低密度プラズマの粒子注入をともなう？同時におきているか不明。
- これらが担う実効的な質量フラックス（マスローディングレート）の評価が不完全。

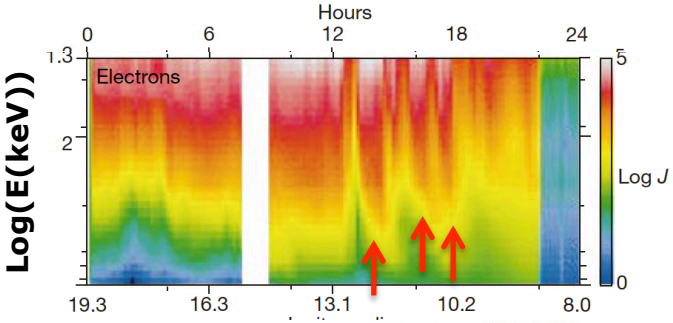


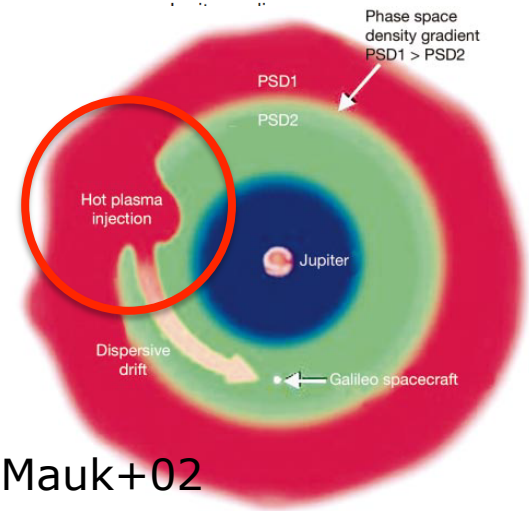
プラズマトーラス周辺での
力の釣り合いの式

$$\nabla p - \vec{j} \times \vec{B} = nm\vec{g}$$



Horne+08

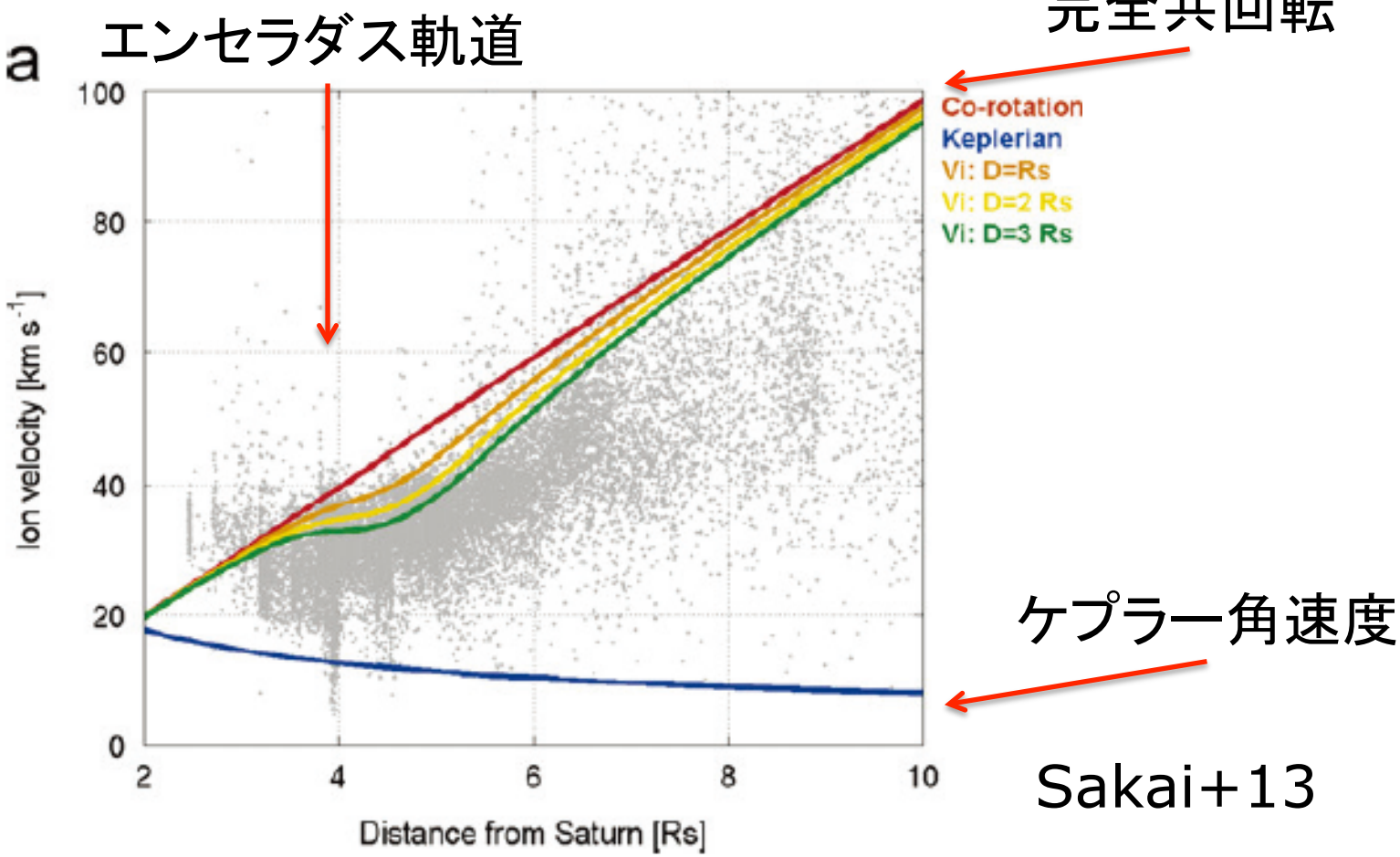




Mauk+02

ダストプラズマ

- エンセラダスダストプラズマは、磁気圏に放出されて間もなく土星完全共回転とケプラー運動の中間速度になる[Sakai+13]
- 通常の完全電離プラズマと惑星の相互作用に対して、ダストプラズマはどのような変調をもたらすのか？？
- 磁気圏のマスローディングはどう変調されるのか？



自転駆動オーロラ電流系

Hill+01

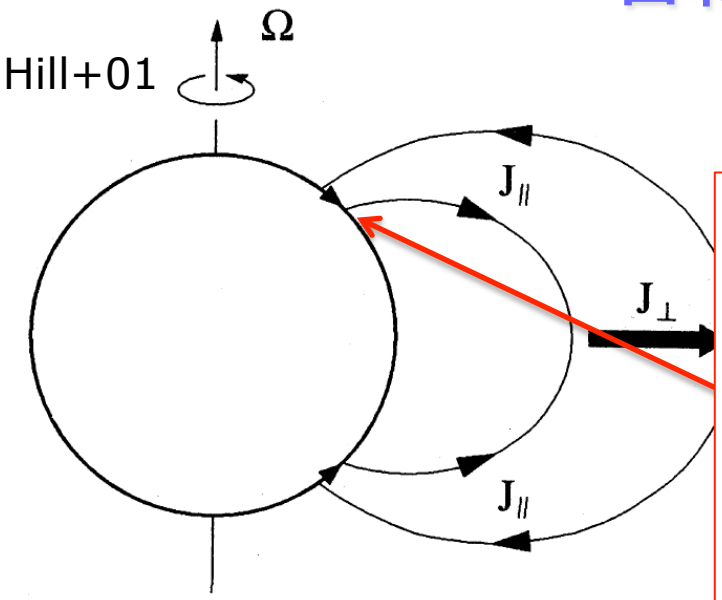
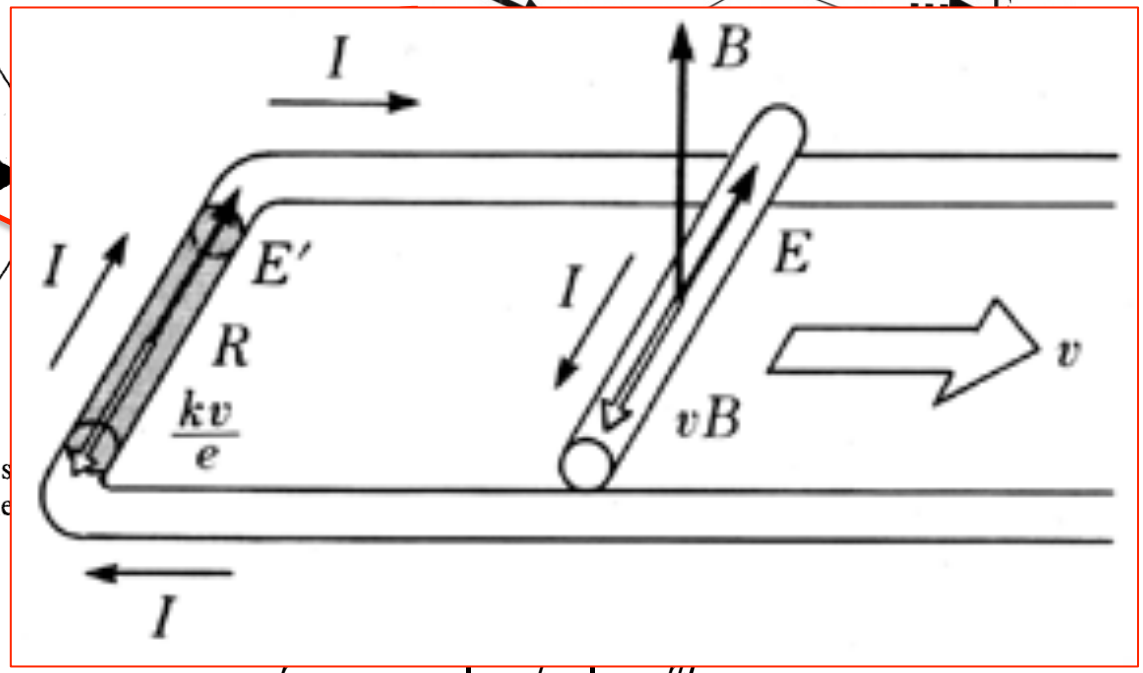


Figure 1. Topology of the meridional current sys
delivers angular momentum from Jupiter's atmosphe
magnetosphere.

磁気圏の共回転
遅延領域



02

極域電離圏上空の
沿磁力線電流

$$j_{\parallel i}(\theta) = -\frac{\quad}{2\pi R_i^2(\theta)\sin\theta}\left(\frac{\quad}{B_{i_n}}\right)\frac{\quad}{d\theta}$$

電離圏面内の緯
度方向に流れる
電流

$$I_{hP}(\theta) = 2\pi\Sigma_p^*\Omega_J B_{ip} R_i^2(\theta)\sin^2\theta\left(1-\frac{\omega}{\Omega_J}\right)\left(\frac{B_i^2}{B_{ip}\left|B_{i_n}\right|}\right)$$

共回転遅延項

ω ：磁気圏プラズマの
回転角速度

Ω_J ：惑星の自転角速度

Σ_p^* ：高度積分した実効的な電離
圏面内電気伝導度

オーロラ電流系による角運動量輸送

- 電流系を介して、主星のトルクが磁気圏に印加されて（あるいはその逆で）磁気圏-電離圏間の角運動量の交換が行われる。全体の角運動量分布は上記の釣り合いで決定される。
- 角運動量分布の特徴的な空間スケールは、マスローディングや惑星磁場強度に依存->マスローディングが磁気圏プラズマの回転運動を全球的に制御する。

$$L_0^4 = \pi \Sigma R^2 B_p^2 / \left| \dot{M}_0 \right|$$

Hill+01

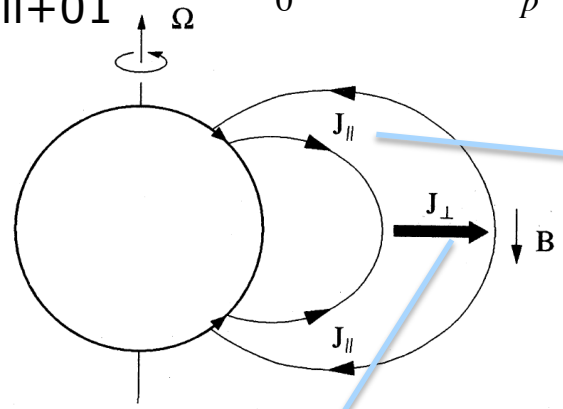
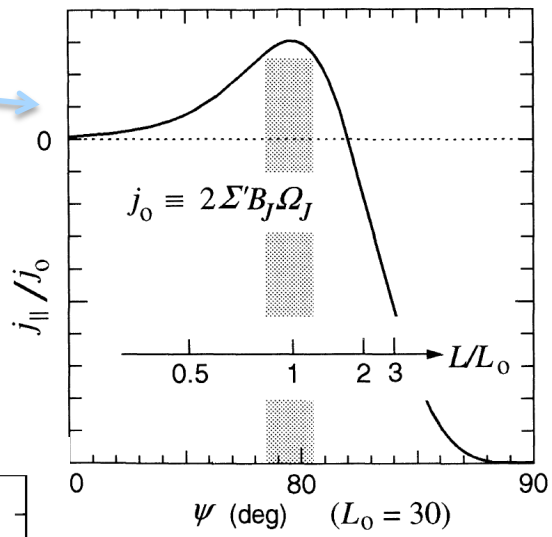
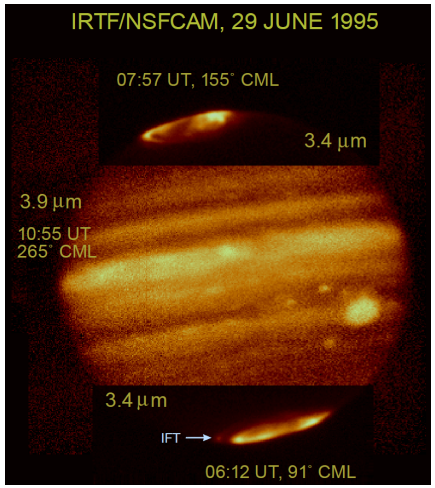


Figure 1. Topology of the meridional current system that delivers angular momentum from Jupiter's atmosphere to its magnetosphere.

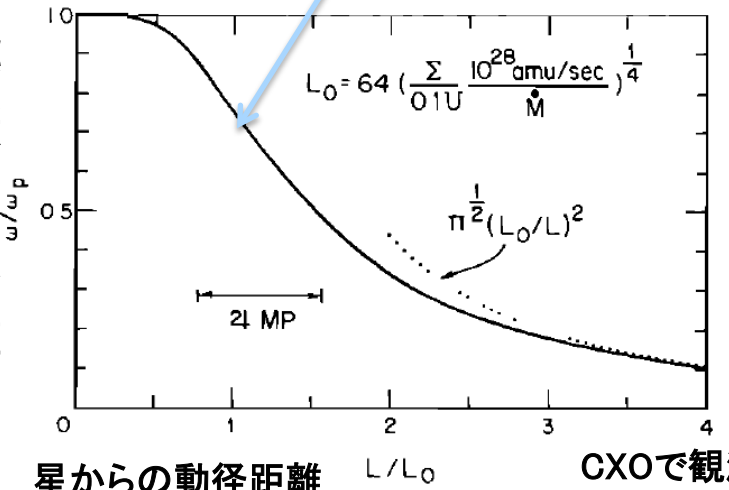
沿磁力線電流量



星の緯度

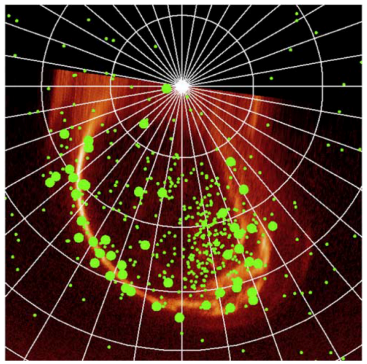


IRTFで観測された
木星赤外オーロラ



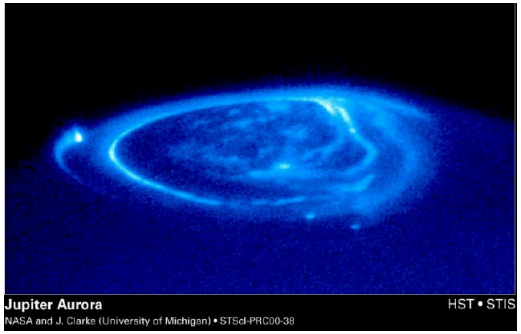
磁気圏プラズマの角速度

星からの動径距離



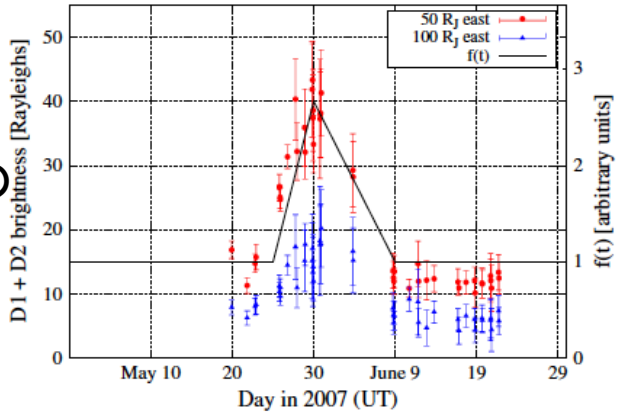
CXOで観測された
木星X線オーロラ

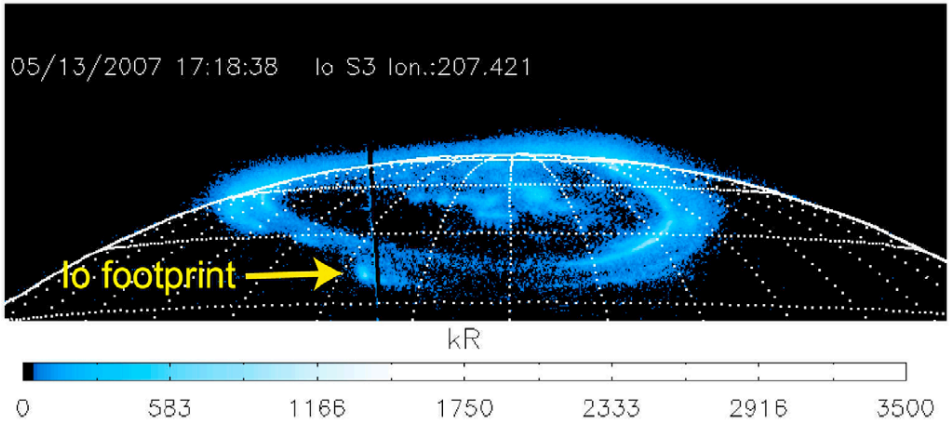
HSTで観測された
木星紫外オーロラ

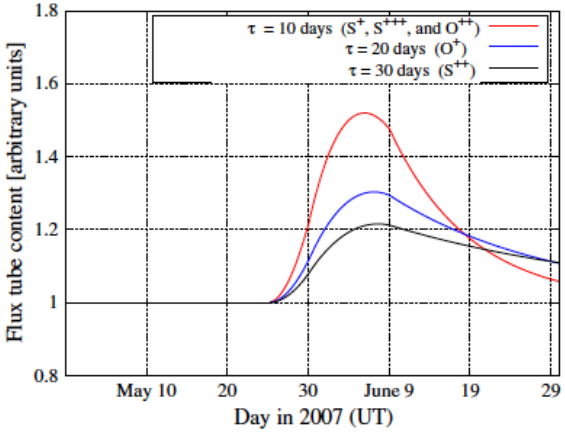


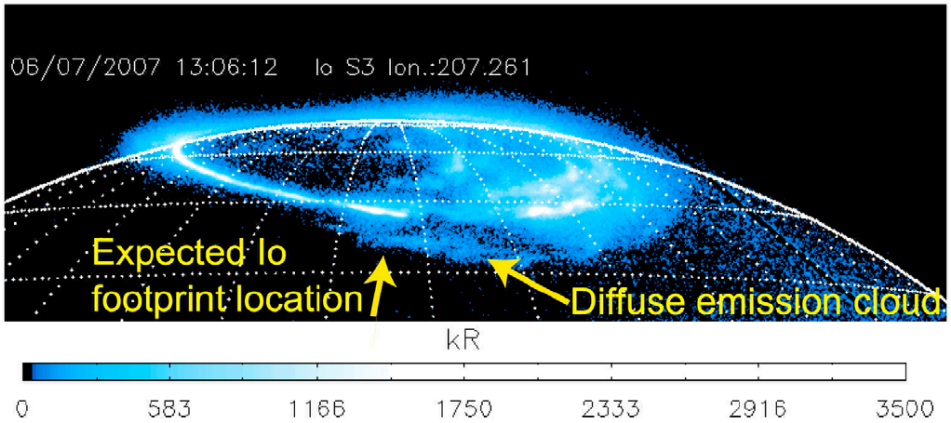
火山活動によるオーロラ電流系制御

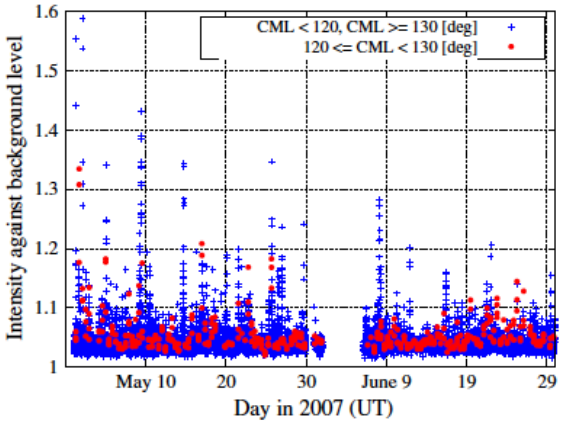
- IPTナトリウム発光とオーロラ電波同時監視[Yoneda+13]：火山活動によりオーロラ電波の減少が確認された
- HSTの観測[Bonfond+12]では、UVメインオーバルの拡大が報告されたが、減少は起きていない。
- 火山活動・マスローディングの増大が、磁気圏角運動量分布を大幅に変えた？統一的な解釈がまだ。





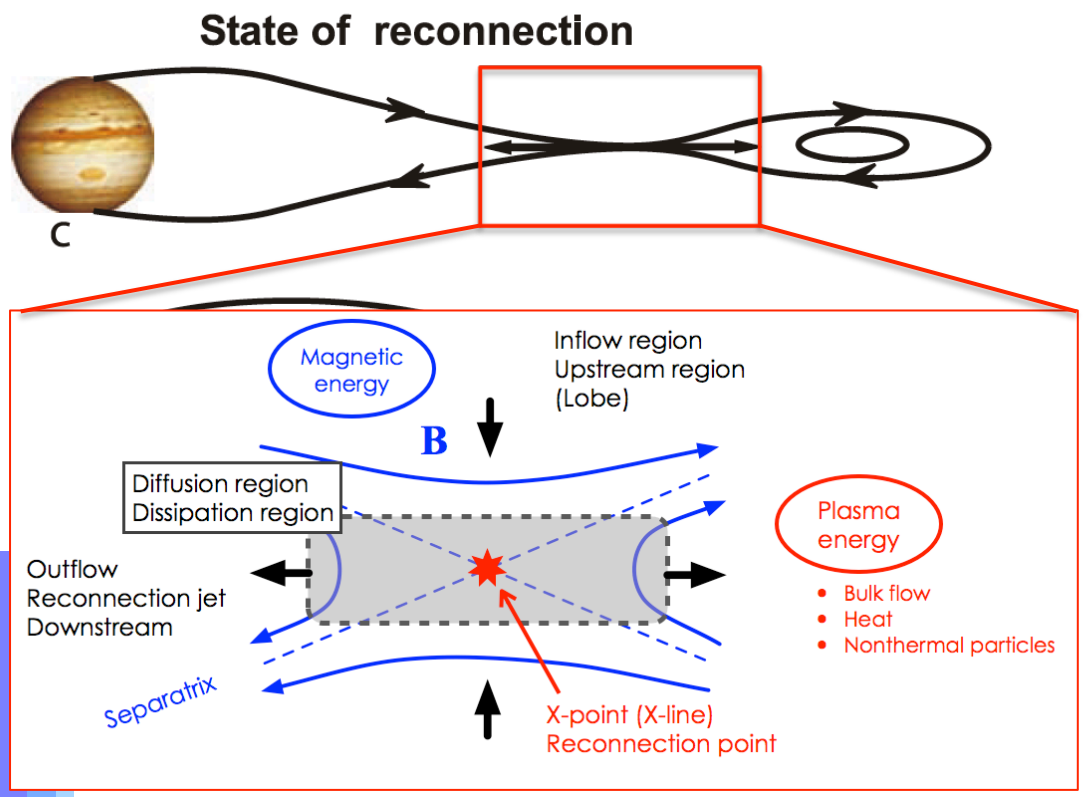






内部駆動リコネクション

Krongerg+07



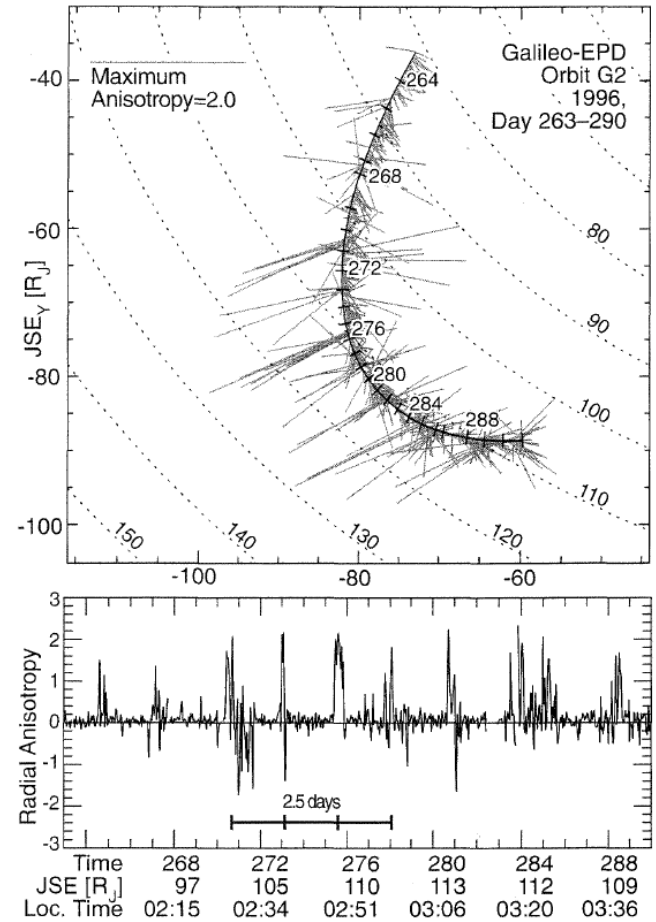
中間・外部磁気圏での力のバランス

$$\dot{\rho}\boldsymbol{\Omega}\times\mathbf{r}+2\rho\boldsymbol{\Omega}\times\dot{\mathbf{r}}+\rho\boldsymbol{\Omega}\times(\boldsymbol{\Omega}\times\mathbf{r})+\nabla\cdot\mathbf{P}=\mathbf{j}\times\mathbf{B_0},$$

$$-\frac{B_rB_\theta}{\mu_0 d}\simeq\rho\Omega^2 r-\frac{\partial P}{\partial r}.$$

尾部リコネクションによるプラズマ塊放出のタイムスケール

$$\tau\simeq\frac{2\mu_0\rho_{rec}\Omega^2 r-2\mu_0\rho_0\Omega^2 r}{2\dot{\rho}\mu_0\Omega^2 r}=\frac{(\rho_{rec}-\rho_0)}{\dot{\rho}}.$$



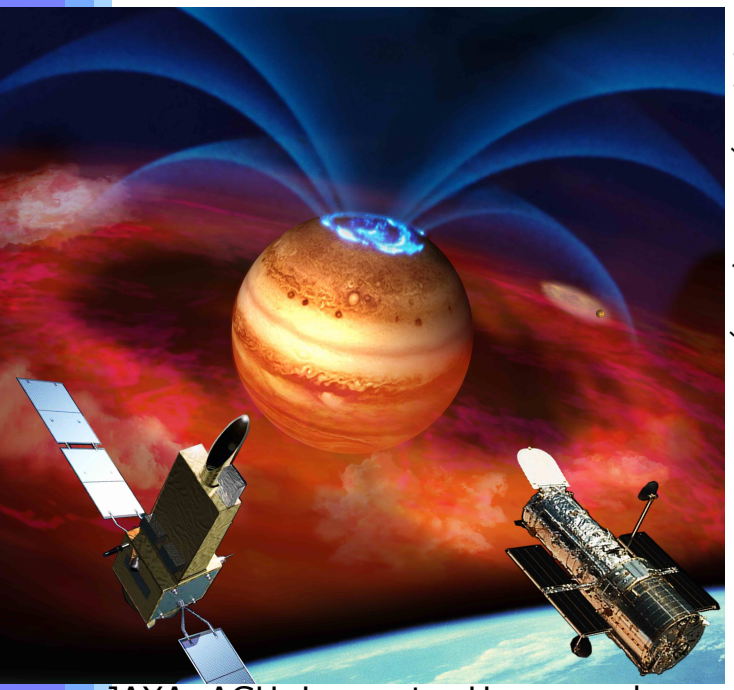
問題点

- マスローディングの変化に対する磁気圏変動の特徴付け
  - 交換型不安定や粒子注入はマスローディングをになっているとすると、その実効量は？
  - マスローディングはオーロラ電流系・角運動量分布をどう制御するのか？
  - マスローディングは磁気圏外縁部の磁気リコネクションの規模や頻度をどう制御するのか？
- ダストプラズマがもたらす惑星-磁気圏結合の変調は？

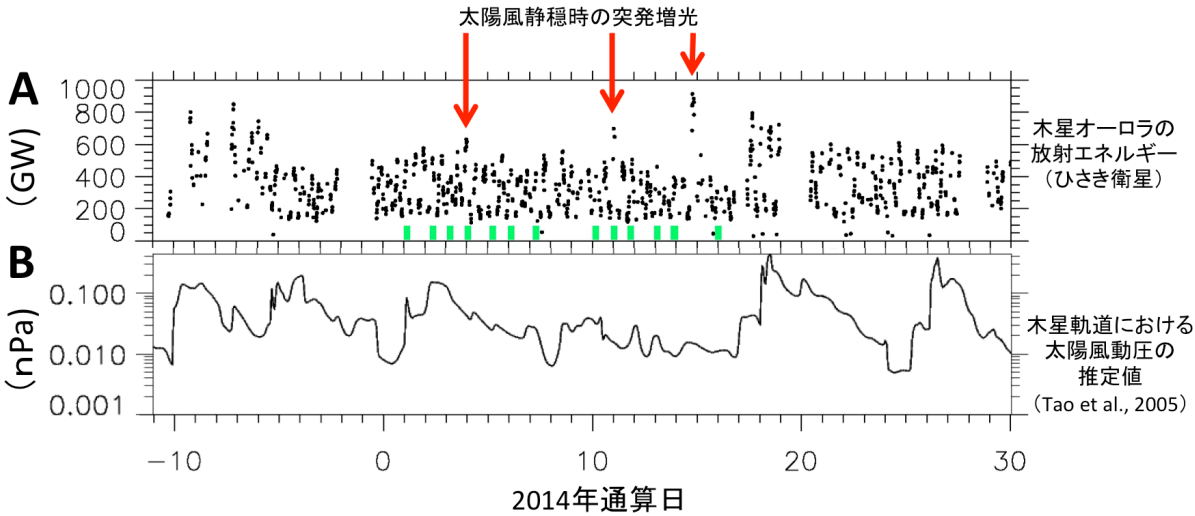
4.噴出現象に関わる取り組み

Hisaki-HST観測キャンペーン

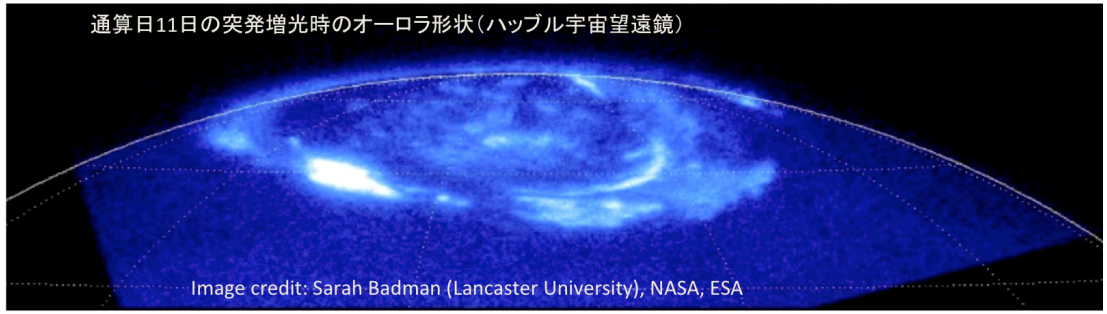
- ひさきの木星EUVオーロラ連続監視により、内部駆動型と考えられる急峻な(3-10h)オーロラ爆発現象が発見された。
- HSTは、内部駆動型オーロラ爆発時のオーロラ形状を捉えることに成功し、低緯度から高緯度に渡る広範囲のオーロラ形状の卓越を同定した。これは磁気圏全球の急速な活発化を意味する。
- 内部駆動型オーロラ爆発の出現周期は4.7日。これは尾部リコネクションや内部磁気圏粒子注入の周期 1.5-7に類似する。
- 自転とマスローディングがこの爆発現象の主要な原因として考えられる。



JAXA, AGU, Lancaster U press releases



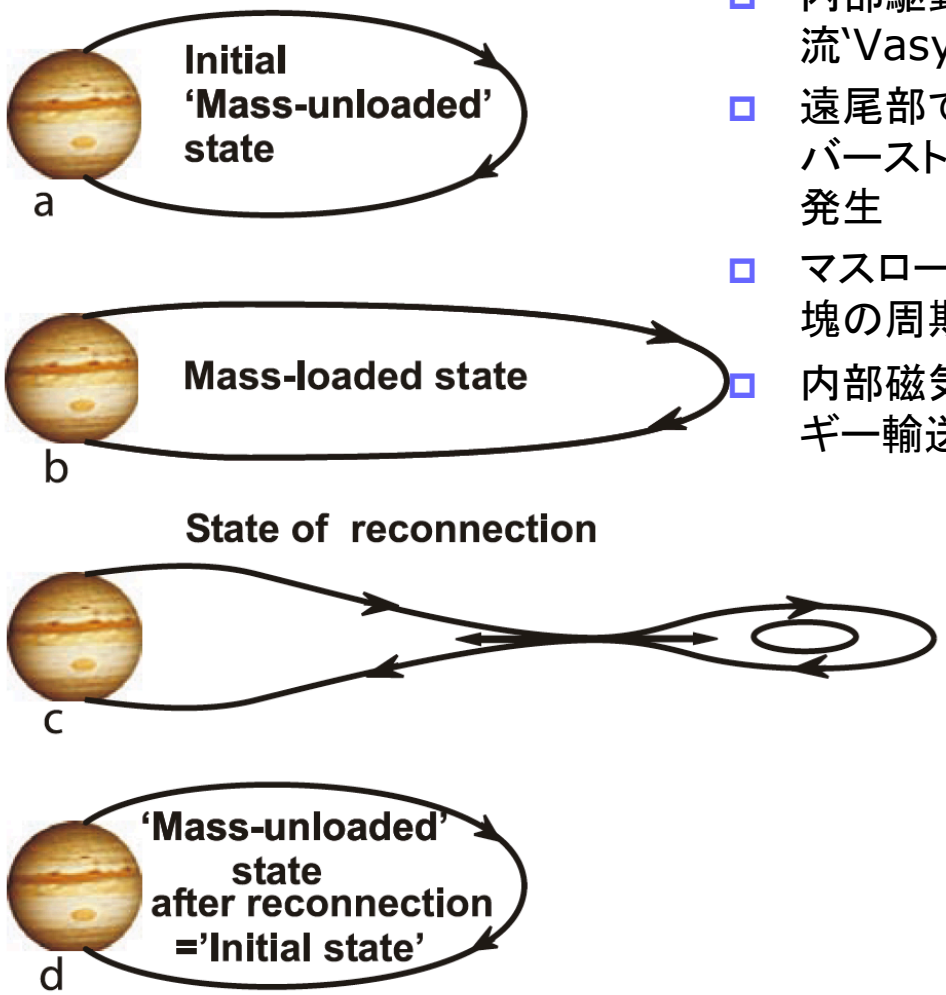
C



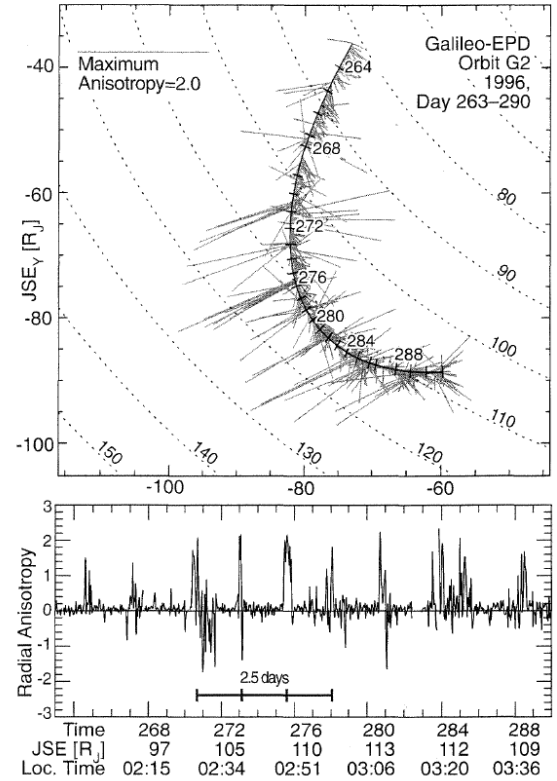
Kimura+15, Geophysical Research Letter

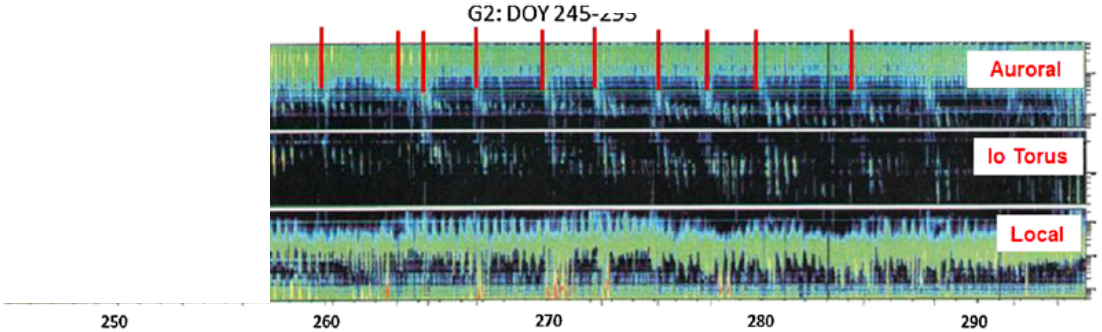
解釈1：尾部リコネクション

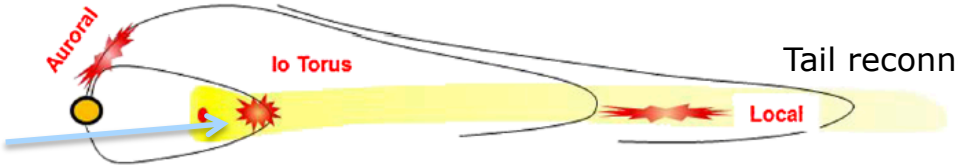
"Vasyliunas cycle"



- 内部駆動型の磁気圏滞対流'Vasyliunas cycle'
- 遠尾部で動径方向フローバーストが 1.5-7日周期で発生
- マスローディングプラズマ塊の周期的解放
- 内部磁気圏へのエネルギー輸送のトリガ？



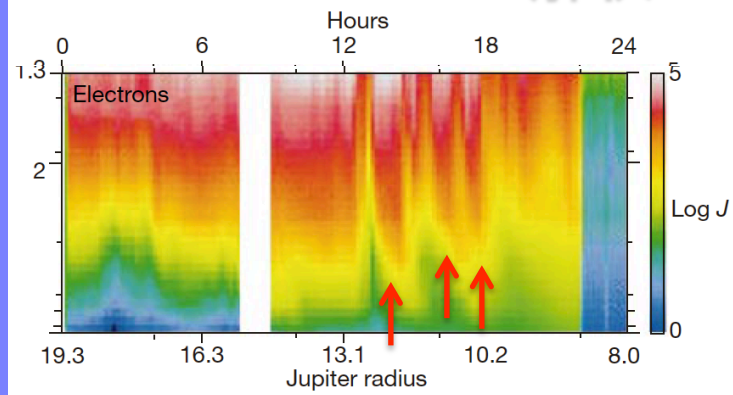




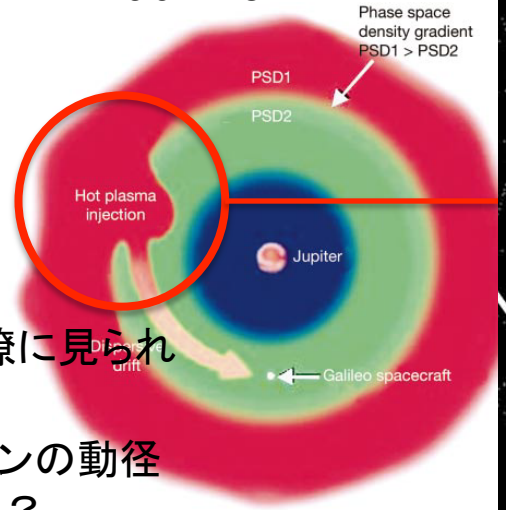
Tail reconnection

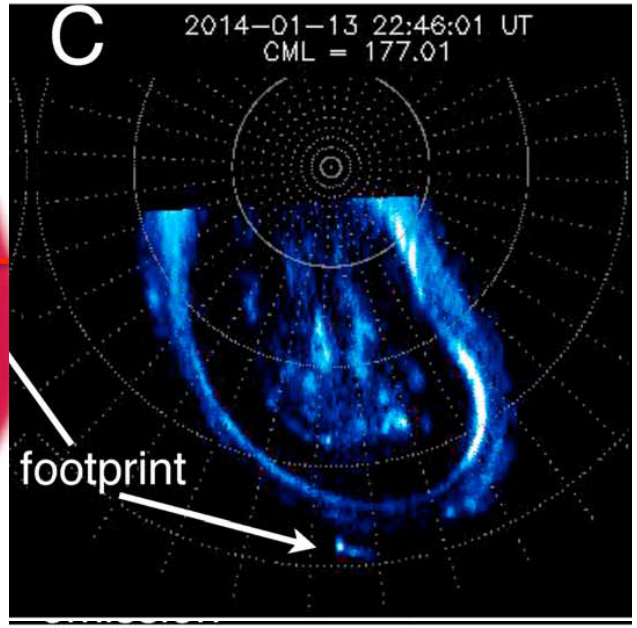
Any activation in the inner m-sphere?

解釈2:高エネルギー粒子注入

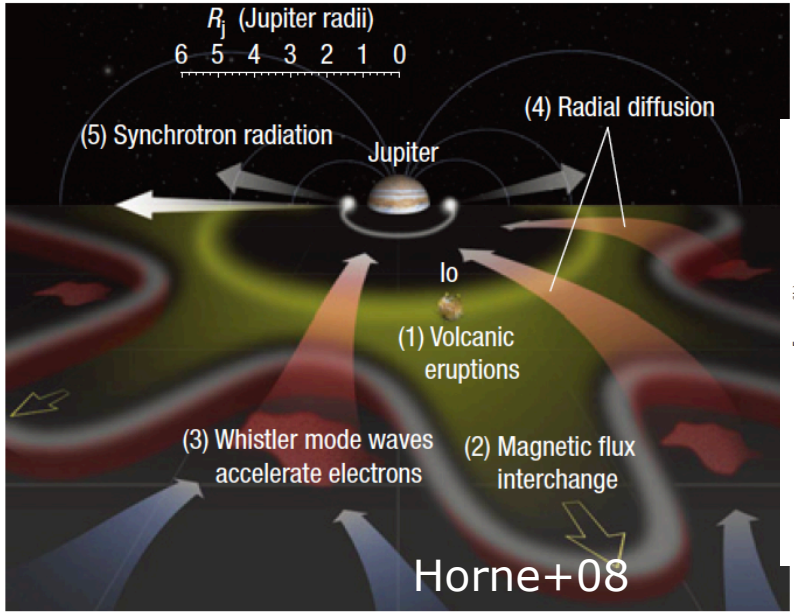


Mauk+02



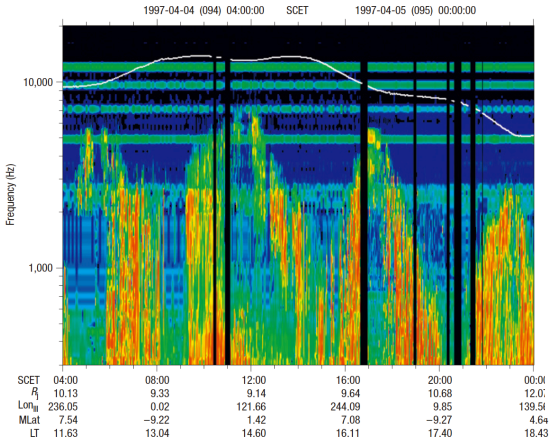


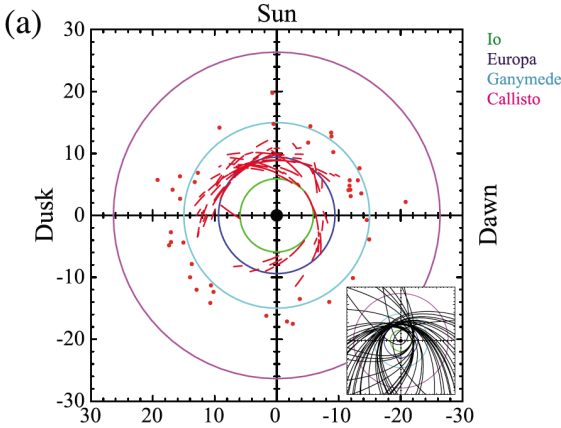
- 数10keV-数100keVの電子に明瞭に見られる、内部磁気圏への粒子注入
- 交換型不安定性か尾部リコネクションの動径内側方向流によって輸送されてきた？
- 内部磁気圏フットプリントに低緯度オーロラを励起。



Horne+08

- 注入された高エネルギー粒子は波動を励起し、それらrが更に波動-粒子相互作用でMeV粒子を生成すると考えられている[e.g., Katoh+11]

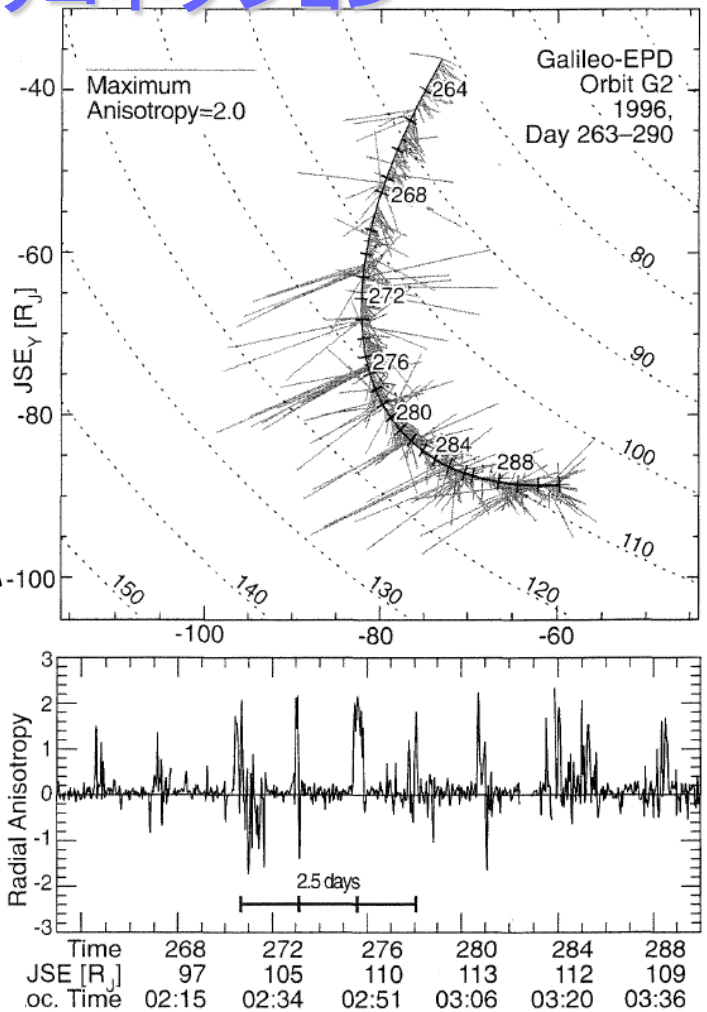




Katoh+11

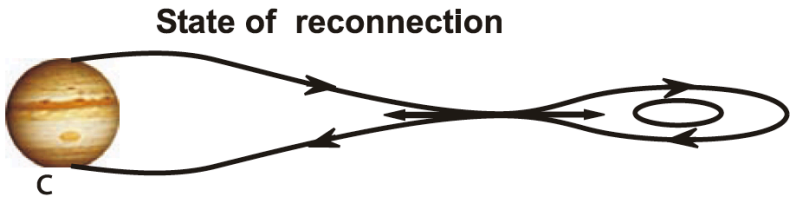
将来課題:火山活動－尾部リコネクション

- HSTキャンペーン時、尾部リコネクションに関連しうるオーロラ形状が発生している[Kimura+15]
- ひさきのIPT観測から密度、空間勾配、時間変化を導出し、連続の式とVasyliunas cycleで定式化されたリコネクションタイムスケールを見積もる予定。
- 火山活動時の前後で、リコネクション発生のタイムスケールが変化していると期待する。
- 尾部と内部磁気圏との対応がまだfixされていないので、IPT観測と合わせる



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_r \frac{\partial \rho}{\partial r} = 0$$

$$\tau \simeq \frac{2\mu_0 \rho_{rec} \Omega^2 r - 2\mu_0 \rho_0 \Omega^2 r}{2\dot{\rho}\mu_0 \Omega^2 r} = \frac{(\rho_{rec} - \rho_0)}{\dot{\rho}}.$$



噴出現象関連将来課題まとめ

- 内部駆動型と外部駆動型のエネルギー解放過程の切り分け
  - マスローディングによるエネルギー蓄積・解放（火山活動時データセットで検証）
  - 太陽風によるエネルギー蓄積・開放
  - ひさきの連続監視からは両者が同時進行しているようにみえる。
  - 独立なのか従属なのか？
  - マスローディングが準備して、太陽風が「着火」する可能性も？
- 火山活動時のIPTの時間変動（組成、温度、密度、、、）
- イオプラズマピックアップ過程の変化
- 衛星周囲の大気の直接検出
- その他火山静穏時に観測できていた種々の磁気圏現象の変化調査。

まとめ

- 噴出現象は、マスローディングというパラメータを介して磁気圏を全球的に制御することが期待される。
- 木星・土星の惑星-衛星の相互作用が理解できれば、近接した系外惑星-主星など電磁気的結合が強い系に応用が可能である。
- ひさきでは火山活動時のIPTとオーロラの連続監視に基づいて、マスローディングによる磁気圏の制御を明らかにしていく。