

オーロラ比較惑星研究

情報通信研究機構(NICT) 埜 千尋

発表概要

オーロラは惑星環境を反映し、惑星間のオーロラの相違は惑星環境の普遍的な理解へつなぐと期待される。惑星発光・発電モデルによる外惑星を対象とした比較惑星研究などの紹介を行った。最近の観測からも、オーロラ電子加速や発光分布等、新たな謎が提示されている。モデルも発展途上であり、観測との比較によるモデル向上や、天王星・海王星・系外惑星への適用や高精度化等、今後の発展が期待される。

参考文献 (モデル設定や画像のみの引用文献を除く)

- Arridge, C. S. et al. (2009), Plasma electrons in Saturn's magnetotail: Structure, distribution and energisation, *Planet. Space Sci.*, 509, 2032–2047.
- Clark, G., C. Tao, B. H. Mauk, et al. (2018), Precipitating electron energy flux and characteristic energies in Jupiter's main auroral region as measured by Juno/JEDI, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2018JA025639.
- Hiraki, Y., and C. Tao (2008), Parameterization of ionization rate by auroral electron precipitation in Jupiter, *Ann. Geophys.*, 26, 77–86.
- Lamy, L. et al. (2013), Multispectral simultaneous diagnosis of Saturn's aurorae throughout a planetary rotation, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, doi:10.1002/jgra.50404.
- Mauk, B. H., et al. (2017), Discrete and broadband electron acceleration in Jupiter's powerful aurora, *Nature*, 549, 66–69.
- Nichols, J. D. (2011), Magnetosphere–ionosphere coupling at Jupiter-like exoplanets with internal plasma sources: implications for detectability of auroral radio emissions, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 414, 2125–2138.
- Rees, M. H. (1963), Auroral ionization and excitation by incident energetic electrons, *Planet. Space Sci.*, 11, 1209–1218.
- Stallard, T. et al. (2008), Complex structure within Saturn's infrared aurora, *Nature*, 456, 214–217.
- Tao, C., H. Fujiwara, and Y. Kasaba (2010), Jovian magnetosphere-ionosphere current system characterized by diurnal variation of ionospheric conductance, *Planet. Space Sci.*, 58, 351–364.
- Tao, C., S. V. Badman, M. Fujimoto (2011), UV and IR auroral emission model for the outer planets: Jupiter and Saturn comparison, *Icarus*, 213, 581–592.
- Tao, C., L. Lamy, and R. Prangé (2014), The brightness ratio of H Lyman- α /H₂ bands in FUV auroral emissions: A diagnosis for the energy of precipitating electrons and associated magnetospheric acceleration processes applied to Saturn, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 6644–6651, doi:10.1002/2014GL061329.
- Zhang, Y., L. J. Paxton, and A. T. Y. Lui (2007), Polar rain aurora, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2007GL031602.
- Zarka, P. (2007), Plasma interactions of exoplanets with their parent star and associated radio emissions, *Planet. Space Sci.*, 55, 598–617.

はじめに: NASA, HST, J. Clarke, Setoh & Connerney 1999, Gurnett+2002, Clarke+2002, Levin+2001, Vasavada+1999, Gladstone+

オーロラ

Step1 発電

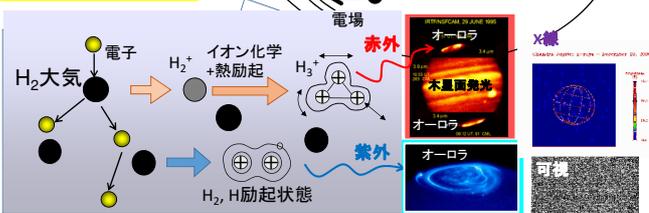
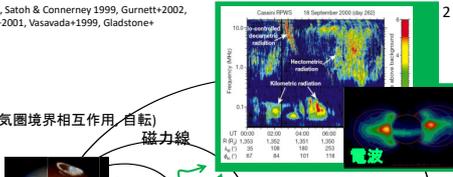
(荷電粒子降込みの駆動: 磁気圏境界相互作用, 自転)

Step2 加速

Step3 惑星大気発光

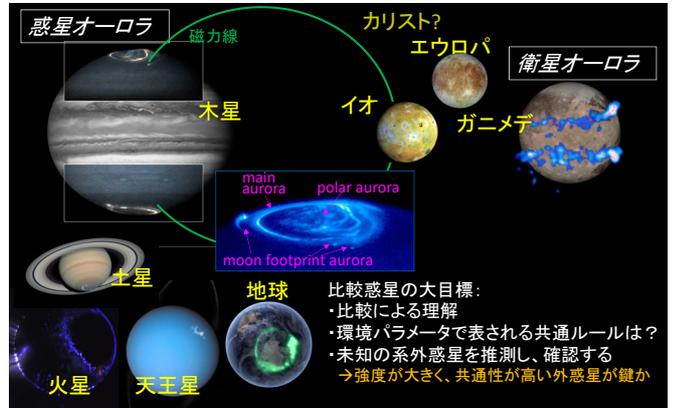
それぞれの波長は異なる過程を反映

オーロラ→惑星環境を反映



はじめに: NASA, HST, J. Clarke, L. Lamy, D. Bernard. <https://www.sciencenews.org/article/aurora-shift-confirms-ganymede%E2%80%99s-ocean>

太陽系内のオーロラ



比較惑星の大目標:
 ・比較による理解
 ・環境パラメータで表される共通ルールは?
 ・未知の系外惑星を推測し、確認する
 →強度が大きく、共通性が高い外惑星が鍵か

はじめに: 4

惑星パラメータ比較

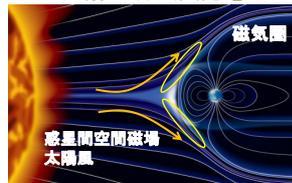
[NASA planetary fact sheet, Bhardwaj and Gladstone, 2000]

	地球	木星	土星	天王星	海王星
惑星半径 [km]	6378	71,492	60,268	25,559	24,764
自転周期 [時間]	24	9.9	10.7	17.2	16.1
表面磁場[G], モーメント比	0.3, 1	4, 20,000	0.2, 590	0.2, 48	0.14, 27
太陽-惑星距離 [AU]	1	5.2	9.6	19.2	30.0
磁気圏界面 [惑星半径]	10	50-100	20	18	25
オーロラ発光Power [W]	~10 ⁹	~10 ¹²	~10 ¹⁰	~10 ¹⁰	~10 ⁷
大気組成	N ₂ , O ₂ , ...	H ₂ , He, H, CH ₄ , ...			
オーロラの発光物質	O, N	H ₂ , H ₃ ⁺ , H, ...			
地上観測(@各惑星)	◎	—	—	—	—
リモート観測	◎	探査機、地球から	探査機、地球から	探査機、地球から	探査機
その場観測(粒子・発光)	◎	○	○	△	△

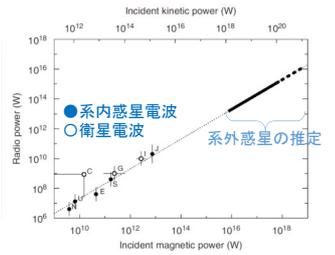
動機1: 5

比較惑星: 発電

太陽風-磁気圏発電



http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/chigaku/chigaku_003.html



①異なるプラズマ・磁場の境界
 →オーロラ発光@open-closed境界
 地球、土星、ガニメデ、...

オーロラ電波放射強度の太陽風・磁場エネルギー依存性 [Zarka et al. 2007PSS]

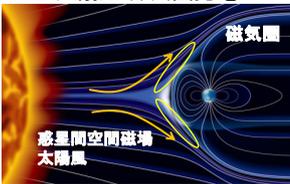
$$P_d \sim \epsilon (VB_{\perp}^2 / \mu_0) \pi R_{obs}^2$$

消費 周囲プラズマ 障壁範囲
 エネルギー 流風・磁場

動機1: 6

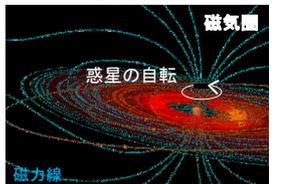
比較惑星: 発電

太陽風-磁気圏発電



http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/chigaku/chigaku_003.html

自転発電



<http://lasp.colorado.edu/mop/resources/graphics/TorusioMag.jpg>

①異なるプラズマ・磁場の境界
 →オーロラ発光@open-closed境界
 地球、土星、ガニメデ、...

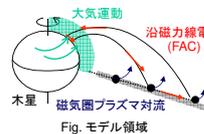
②惑星自転と周囲プラズマの相互作用
 →オーロラ発光@プラズマ共回転遅れ
 木星、土星、...

[1] 電流形成モデル+特徴調査

③自転軸vs磁軸、自転軸vs周囲プラズマ流が大きい 天王星、海王星
 ④太陽高エネルギー粒子の直接降込み 火星

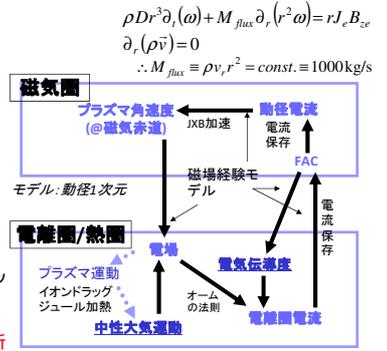
電流形成モデル: 7

モデル概要



木星熱圏・電離圏モデル

結合電流モデル: 外向き輸送フラックスをもつ磁気圏プラズマ流の対流速度/電流分布
 →対流電場・電子フラックスの更新



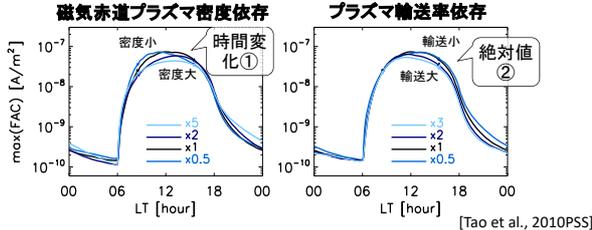
モデル: 緯度高度2次元+経度方向成分

[今回の紹介は熱圏大気固定計算]

$$J_p = \sum E_n = \sum B(v_n - v_i(\omega))$$

$$j_{||} = \nabla \cdot J_p$$

電流の磁気圏パラメタ依存性

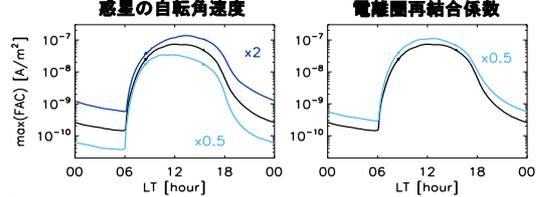


$$\rho r^3 \frac{\partial}{\partial t} (\omega) + M_{flux} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \omega) = r J_e B_{ze}$$

① ② ③

→①②の大小でFAC時間変化と電流密度が異なる

電流の惑星パラメタ依存性

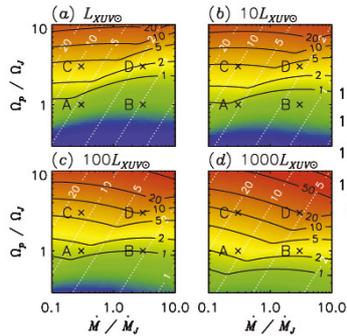


$$\frac{dn_{ion}}{dt} = P - k n_{ion} n_{e^-} \approx P - k n_{ion}^2 \xrightarrow{\text{steady}} \therefore n_{ion} = \sqrt{P/k} \propto \sqrt{j_{||}/k}$$

P: Production rate \propto auroral flux $\propto j_{||}$, k: recombination rate
 $j_{||} = \nabla_{horizon} \cdot J = \nabla_{horizon} \cdot (\Sigma E) \propto \Sigma E$
 $= 2 B_J \Sigma r_f \Omega_J (1 - \omega/\Omega_J)$
 $\propto r_f \Omega_J (1 - \omega/\Omega_J) \sqrt{j_{||}/k}$
 $\therefore j_{||} \propto \Omega_J^2 (1 - \omega/\Omega_J)^2 k^{-1}$ [Tao et al., 2010PSS]

系外惑星環境まで

木星MI結合のプラズマ&自転角速度依存性 [Nichols, 2011MNRAS]
電波放射強度 $P_r \propto$ (オーロラ降込みpower) \propto (沿磁力線電流 $j_{||}$)² $\propto \Omega^4$



比較惑星: 発光・変動

UV HST/STIS (12:26) IR IRTF/NSFCAM (12:24) 地球からの観測 [Clarke et al., 2004]

16 Dec 2000

Juno obs. [Gerard et al., 2018Icarus] 木星オーロラ UV UV発光比

UV(H) UV(H₂) IR(H₃⁺)

土星オーロラ Sep 10, 2008 Cassini obs. [Melin et al., 2011]

UV: 降込粒子による電子軌道遷移・発光
 IR: H₂ + e⁻ → H₂⁺ + 2 e⁻, H₂⁺ + H₂ → H₃⁺ + H
 高温大気によるH₃⁺振動回転準位の励起・発光

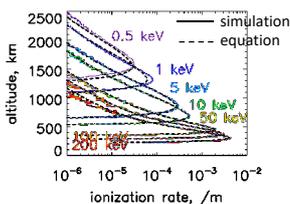
・大型望遠鏡・探査機の詳細分布観測
 ・発光分布に惑星間・波長間の相違点

【2】汎(H₂主要)惑星オーロラモデル

電子降込過程

地球のパラメータ化式 Rees [1963]等

1. 仮定大気の下でモンテカルロ計算
 2. 得られた結果のパラメータ化
- 任意の大気およびエネルギー分布での電子降込み効果が得られる [Hiraki and Tao 2008AnnGeo]



cf. Earth case [e.g., Rees, 1963]

ionization rate: $q_{aurora} = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_{ion}} \frac{\rho}{R_0} \lambda(z) \times F$ [1/m³/s]

Ion production altitude dep.

It determines arbutral atmosphere, energy spectrum as inputs

ϵ_{ion} : energy for an ion production, 0.035 [keV/ion]
 ϵ_0 : incident electron energy [keV]
 F : incident electron flux [1/m²/s]
 $Z = nmH = P(z)/g$
 ρ : atmospheric thickness [kg/m²]
 ρ : neutral atmosphere density [kg/m³]
 λ : electron energy distribution function
 $R_0 = 4.6 \times 10^{-3} \epsilon_0^{1.75}$ [kg/m²]
 ρ : atmospheric thickness at stopping altitude

発光モデル概要

Maxwellian distribution is assumed for electron spectrum.

INPUT PARAMETERS: auroral electron energy & flux, atmospheric density & temperature

Electron precipitation

H₂ excitation rate, H₂ ionization rate, Ion chemistry

UV emission spectrum, H₃⁺ density

UV transmit spectrum, H₃⁺ vib. excited states, Non-LTE correction

OUTPUT PARAMETERS: UV emission rate, IR emission rate

(a) Jupiter, (b) Jupiter, (c) Saturn, (d) Saturn

Fig. Vertical profiles assumed in this study for (a)(b) Jupiter [Grodent et al., 2001; Gladstone et al., 1996; Perry et al., 1999] and (c)(d) Saturn [Gérard et al., 2009; Moses et al., 2000; Muller-Wodarg et al., 2006; Moore et al., 2009].

発光高度分布

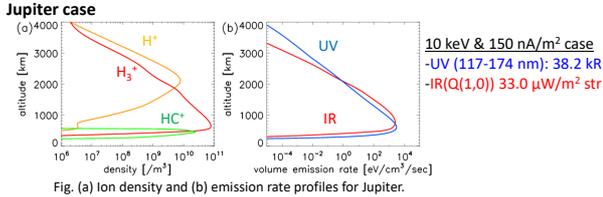


Fig. (a) Ion density and (b) emission rate profiles for Jupiter.

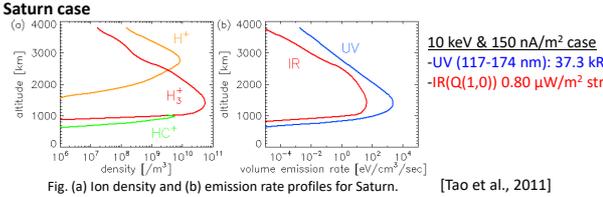


Fig. (a) Ion density and (b) emission rate profiles for Saturn. [Tao et al., 2011]

発光の降込み粒子・温度依存

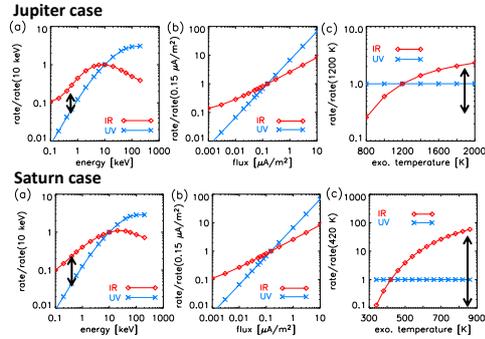


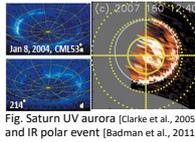
Fig. (a) UV & (b) IR ratio to 10 keV & 0.15 μA/m² case, (c) required temperature decrease/increase to compensate for the IR variation at Jupiter and Saturn.

[Tao et al., 2011]

UV/IR比の変化は、
土星では大きく、
木星では小さい
∴温度範囲のIR
感度の違い
→UV・IR発光は土
星より木星で類似
と推測

モデル適用例①土星極

Assumption : intensity ratios of
<IR> (main oval) : (polar event [Stallard et al., 2008]) = 1 : 1
<UV> (main oval ~10s kR) : (polar emission <1 kR) = 1 : <0.1



Comparison with observations at Earth:

"Polar rain" aurora [Zhang et al., 2007]
(DMSF) flux : 0.2-0.9 erg/s/cm² mean E : 0.6-1.6 keV
x 0.01 (∴@Saturn 9.6 AU)
→ 0.002-0.01 erg/s/cm² = 0.002-0.01 μA/m² & 1 keV
→ ~100 K enhancement would provide polar IR
emission of intensity equal to that of the main oval.

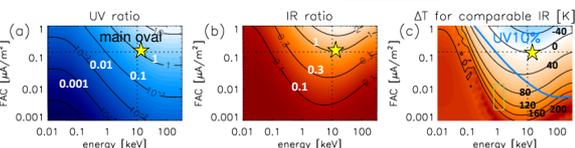
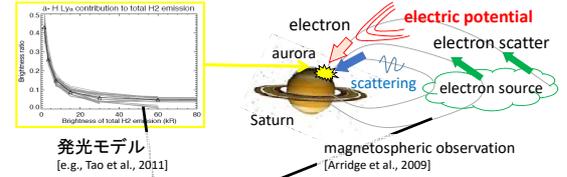


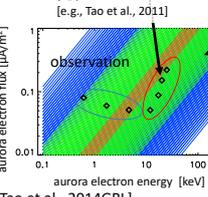
Fig. (a)UV & (b)IR ratio to 10 keV 0.15 μA/m² case, (c)required temperature change to compensate for IR variation at Saturn.

モデル適用例②土星加速域

Saturn aurora observation [Lamy et al., 2013]



発光モデル

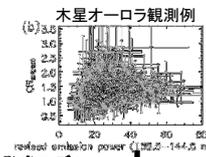


木星オーロラは炭化水素化合物吸収があるが、
土星は低エネルギーのため顕著でない

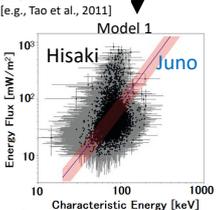
- (1) H₂発光強度比は数10keV以下の低エネルギー帯に感度を持つ
- (2) Knight理論に沿う加速に加え、非加速粒子とみられる分布が検出された

[Tao et al., 2014GRL]

モデル適用例③木星加速域



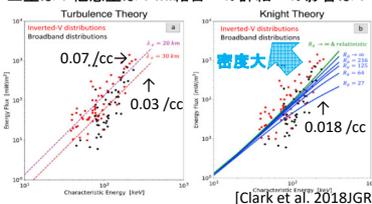
発光モデル



ひさき望遠鏡による木星オーロラ観測スペクトル情報から、オーロラ粒子エネルギー・フラックスの導出
大気モデル設定依存があるが、Juno木星極域探査機による粒子その場観測とよい一致

Juno粒子スペクトル観測から、乱流加速と静電場加速があり前者の卓越が発見[e.g. Mauk+2017]。エネルギー・フラックス関係は類似。

土星は？他惑星は？MI結合への詳細への影響は？



まとめ

- オーロラは、惑星環境を反映
惑星間のオーロラ相違→普遍的な理解へつながると期待
- 系内でもさまざまな例
- 「現在」+「史実」@地球、ガニメデ？
- オーロラ発電および粒子降込み・発光モデルを開発し、外惑星の発電・加速・発光について、特徴を調査してきた
- 最近の観測からも、加速や発光分布等、新たな謎が提示されている。モデルも発展途上で、観測との比較によるモデル向上や、天王星・海王星・系外惑星への適用や高精度化等、今後の発展が期待される