

ひさき衛星による木星オーロラ・ プラズマトーラスの極端紫外線観測

土屋史紀¹、木村智樹²、埜千尋³、吉岡和夫⁴、田所裕康⁵、鍵谷将人¹、
村上豪⁶、山崎敦⁶、吉川一朗⁴、ひさきサイエンスチーム

¹東北大学、²理研、³情報通信研究機構、⁴東京大学、⁵武蔵野大学、⁶
宇宙科学研究所

Contents

- ひさき衛星概要
- ひさき衛星による木星磁気圏観測
 - プラズマトーラス(プラズマ源@内部磁気圏)
 - オーロラ(磁気圏と惑星本体の電氣的結合)
- プラズマトーラスのプラズマ診断
 - 極端紫外線分光(吉岡)・X線(木村)
- オーロラ発光のスペクトル解析(埜)
 - オーロラ電子のエネルギー推定
 - 惑星大気との相互作用
- もう一つの木星型惑星磁気圏:土星(田所)

極端紫外線観測

- 惑星電離圏および外圏大気(コロナ)・磁気圏内の希薄ガスの観測
- 主な発光過程: 太陽光共鳴散乱・電子衝突励起
 - 「プラズマ診断」によるプラズマパラメータの導出
 - 希薄・低温ガスの同定・定量
- 多くの宇宙機に分光器・撮像装置が搭載

地球

IMAGE

かぐや(月)

天文

IUE

FUSE

EUVE

HST

惑星探査

Voyager 1,2(外惑星)

のぞみ(火星)

Galileo(木星)

Cassini(土星)

New horizon(冥王星)

ひさき衛星

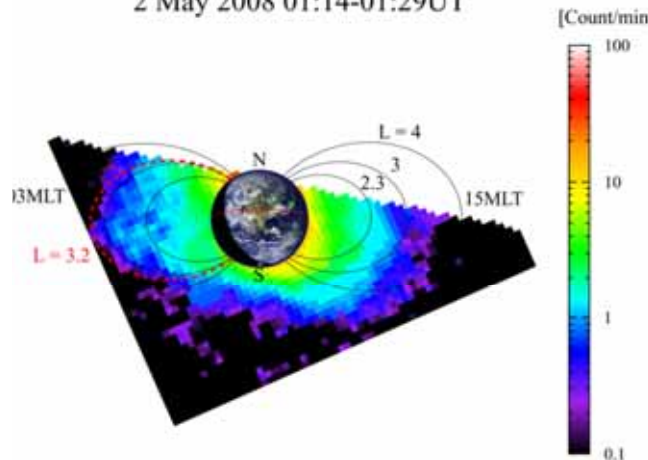
Rosetta(彗星)

JUNO(木星)

JUICE(木星)

MMO/MPO(水星)

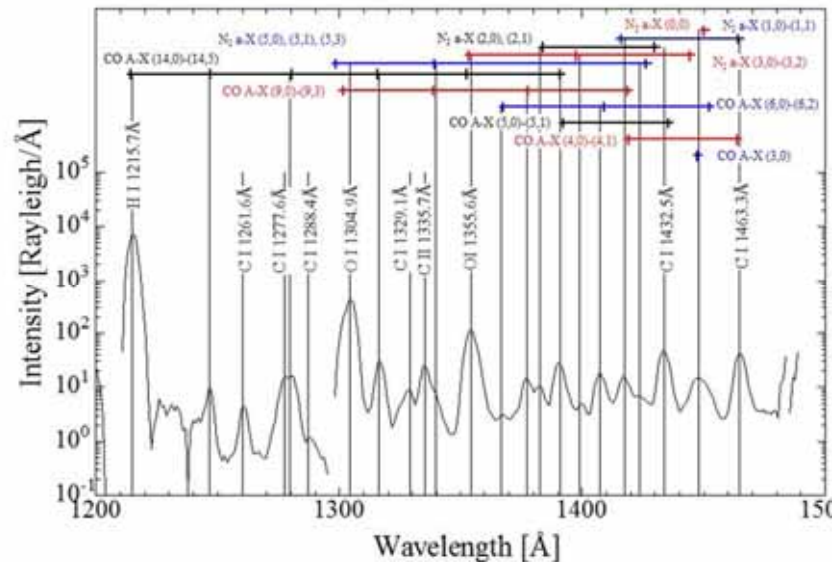
2 May 2008 01:14-01:29UT



プラズマの空間分布の撮像(かぐや)

Murakami et al. [2010]

Yoshikawa et al. [2010]

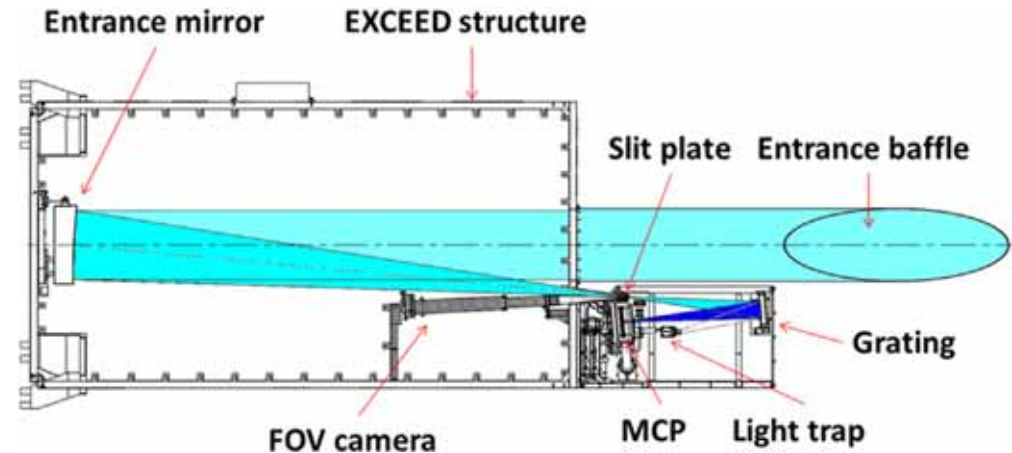


大気組成の探査(ひさき、金星)

Nara et al. 2016 under review

ひさき衛星：概要

- Launch : Sep 14, 2013, Epsilon rocket
- Size : 1m × 1m × 4m
- Orbit : 950km × 1150km (LEO)
- Inclination: 31 deg
- Orbital period : 106 min

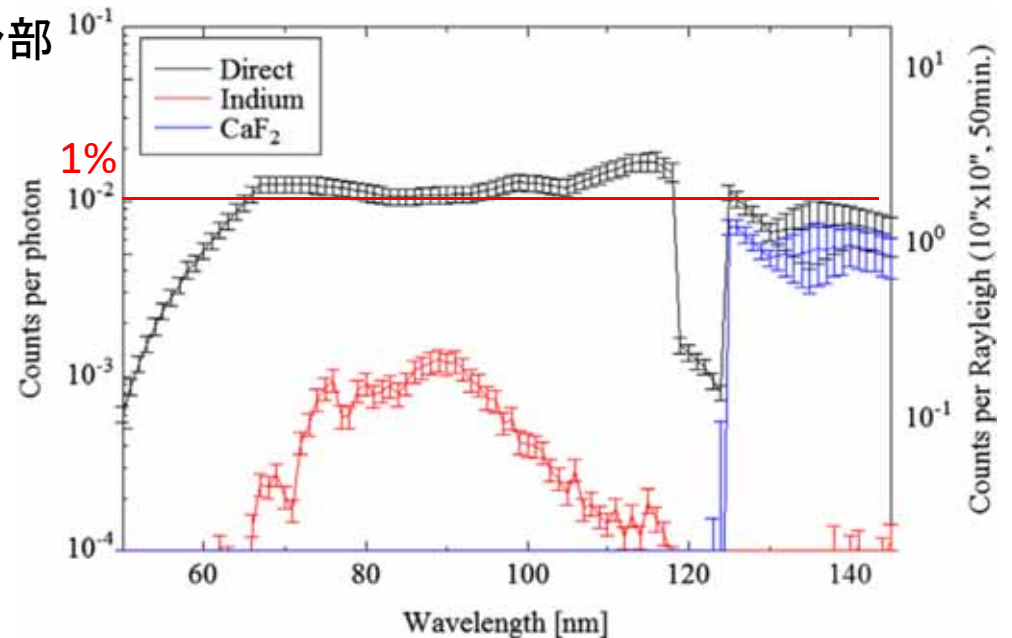


The optical layout of EXCEED.



ミッション部
(EXCEED)

バス部

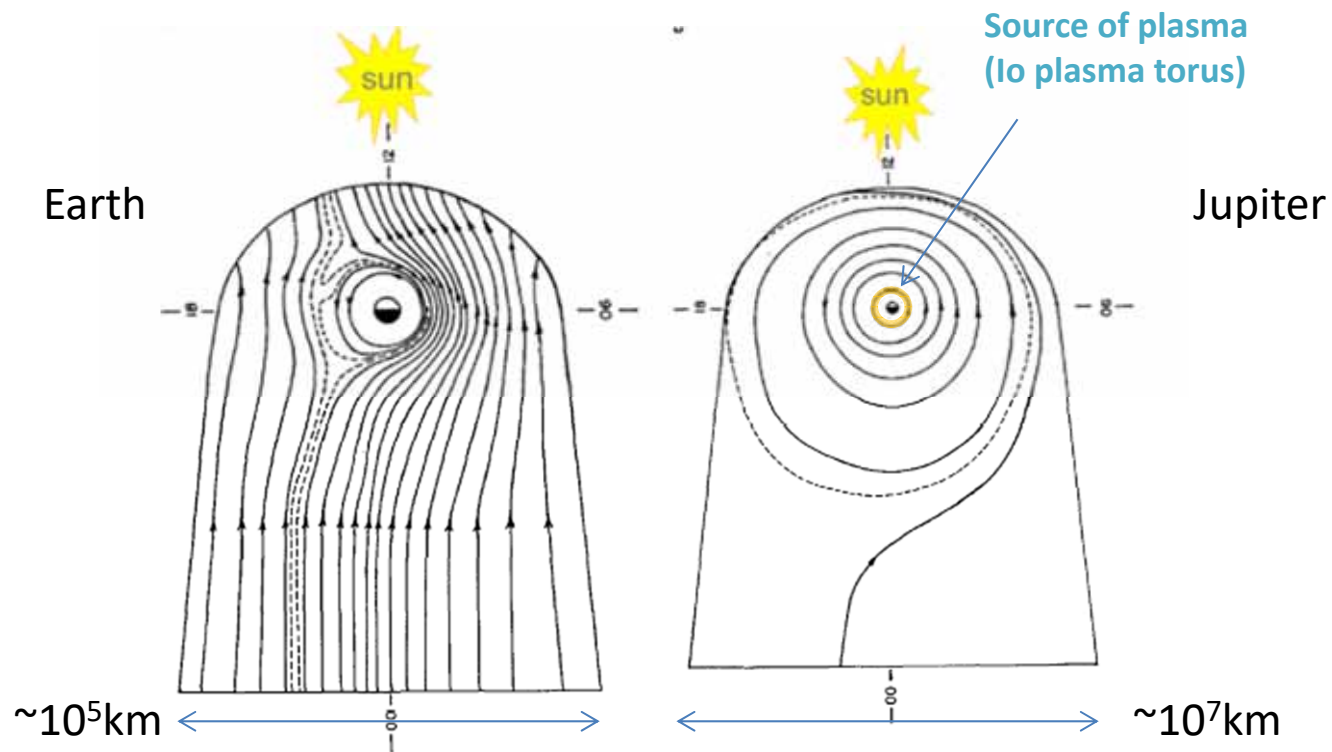


Over all sensitivity of EXCEED (Yoshioka et al. 2014)

木星磁気圏

Jupiter: Corotating flow around the planet

- Driven by the planetary rotation angular momentum transport from planet to magnetospheric plasma



Global plasma convection : Earth vs. Jupiter (Kivelson 2005)

地球
太陽風により駆動される磁気圏

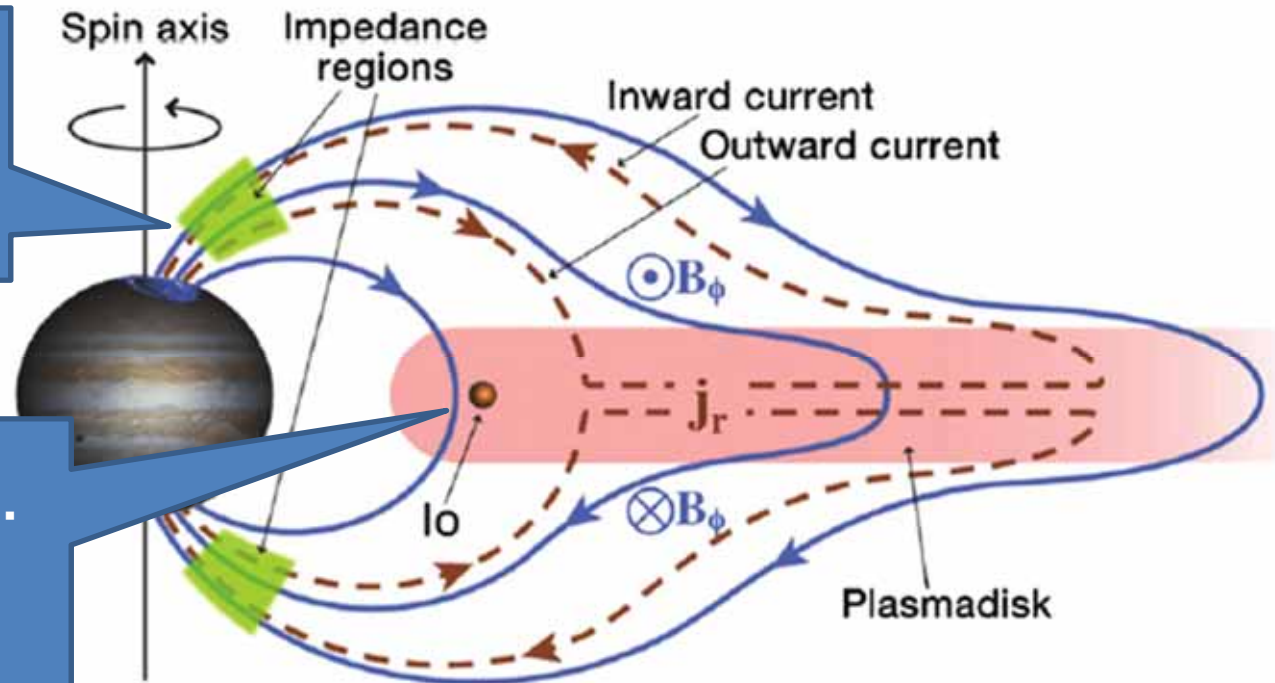
木星・土星
惑星の自転により駆動される磁気圏

木星：オーロラの起源

- 磁気圏・電離圏結合電流系による惑星自転角運動量の磁気圏プラズマへの分配

オーロラスペクトル解析：
電流量・平均エネルギー
=磁気圏と電離圏間の
カップリングの強さ

プラズマスペクトル診断：
プラズマ密度・イオン組成・
電子温度の空間分布
=プラズマ生成・輸送量・
エネルギーバランス

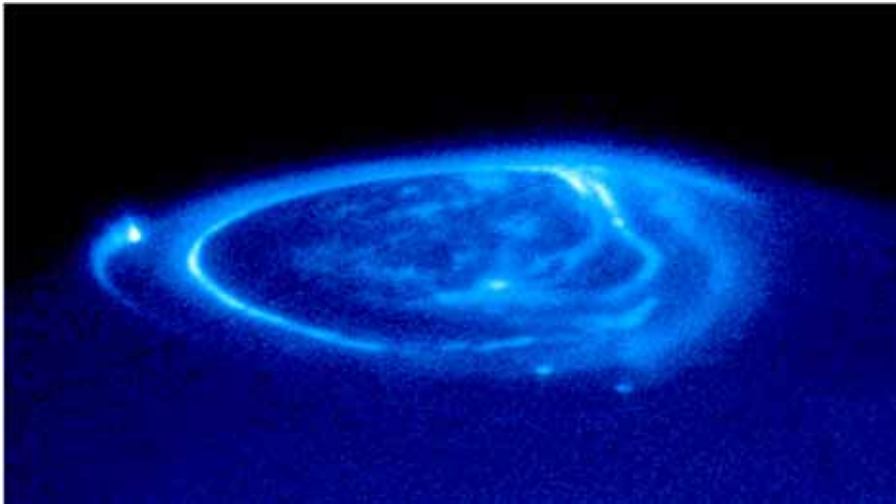


Plasma corotation flow enforced by the M-I coupling current system (Bagenal 2007)

- Primary plasma source: Io (L~6)
- Outward transport of the io-genic plasma cause to decrease azimuthal flow speed due to angular momentum conservation.
- M-I-coupling current system is set up and the radial current accelerates the azimuthal flow by $J \times B$ force.

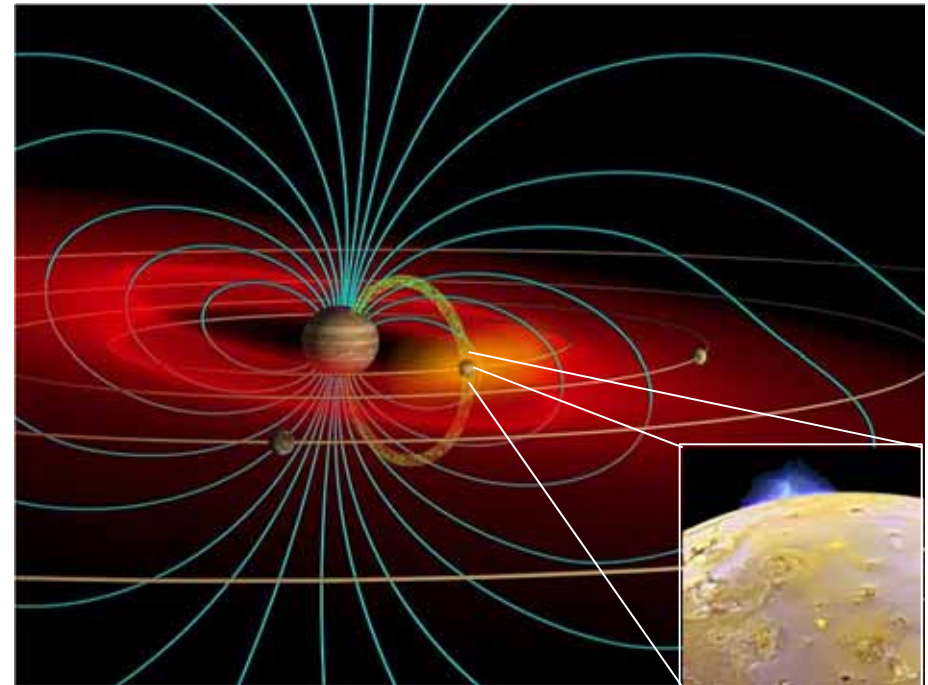
Plasma condition

Aurora



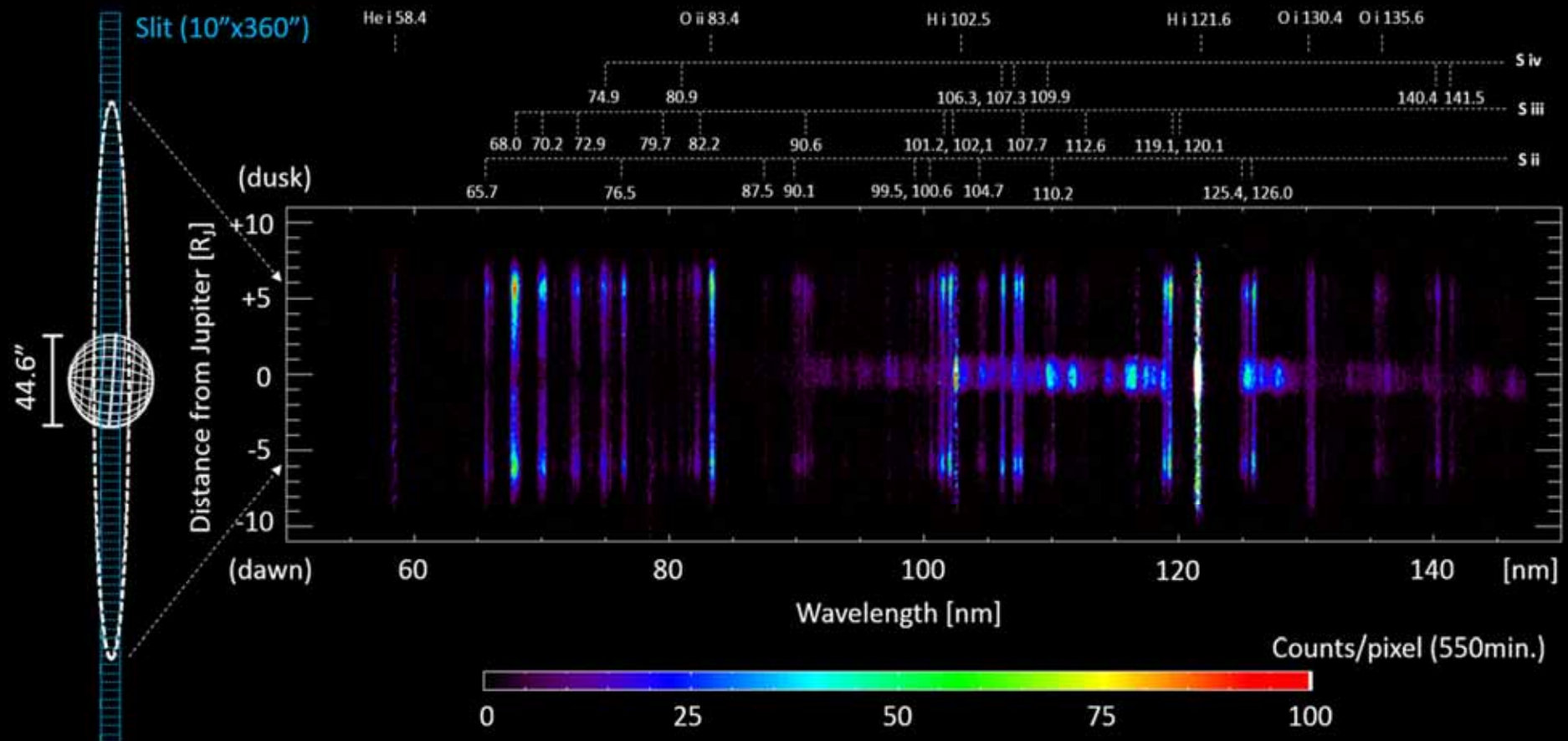
- Electron impact excitation
H₂ Warner & Lyman bands
H Lyman- α
- Electron energy $\sim 100\text{keV}$

Io plasma torus



- SO₂ from Io \rightarrow S⁺, S²⁺, S³⁺, O⁺, O²⁺...
- Electron impact excitation
- Thermal (core) electron:
N $\sim 100\text{-}1000/\text{cc}$, 4-6eV
- Hot electron: $\sim 1\text{-}10\%$, $\sim 10\text{-}100\text{eV}$

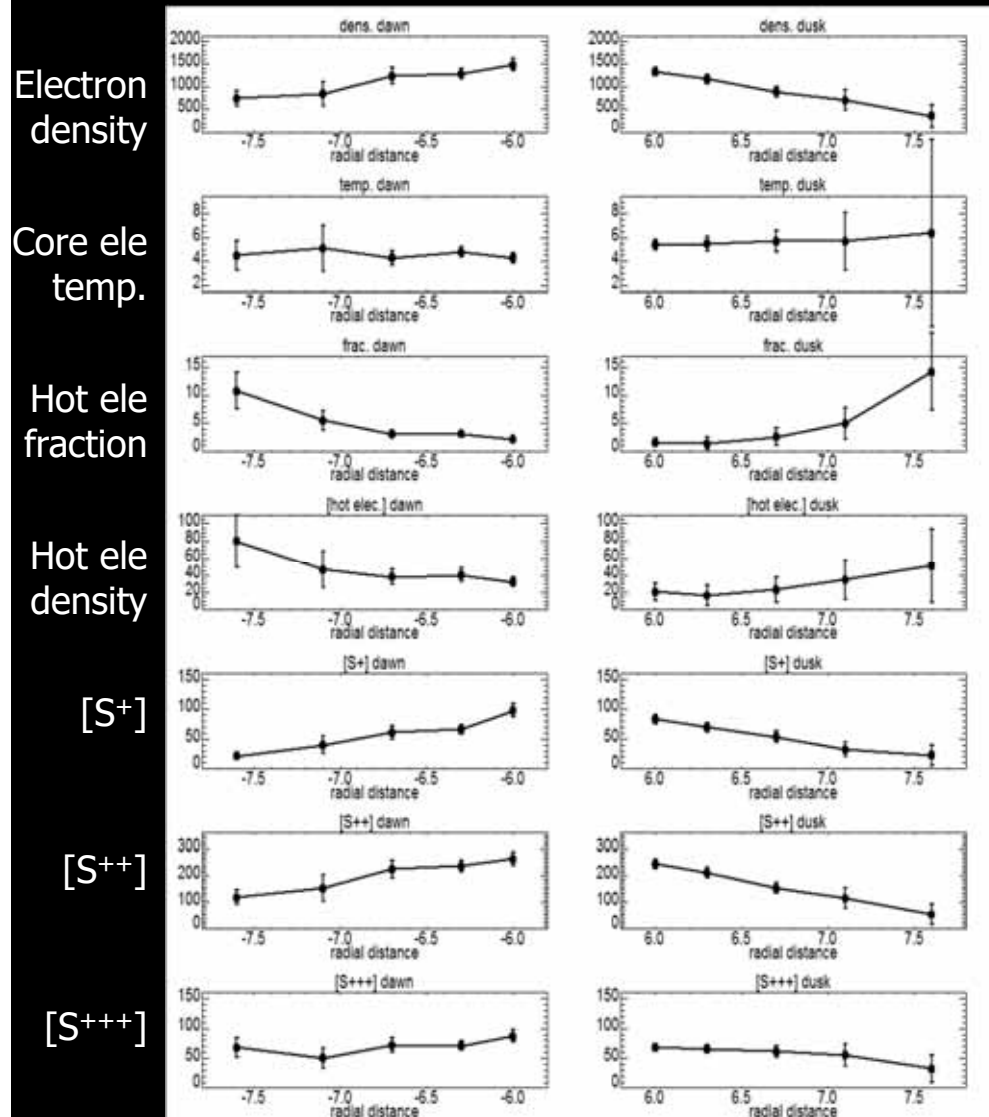
ひさき衛星の観測成果[1] イオプラズマトーラスのプラズマ診断



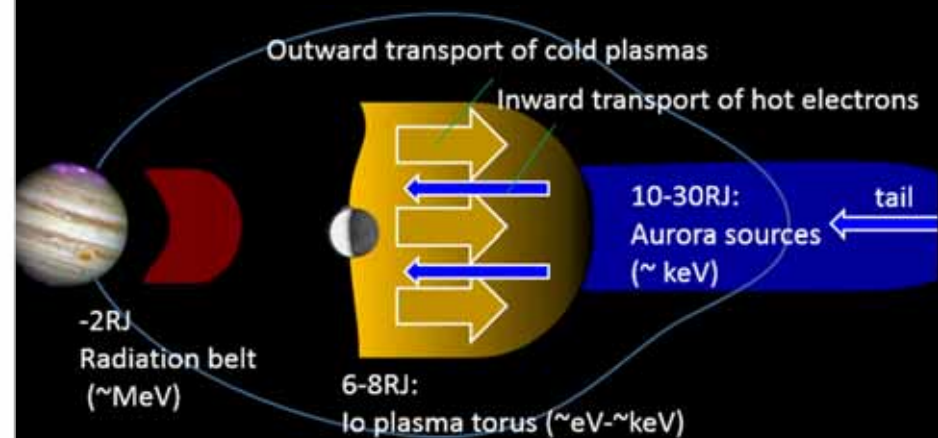
Spatially resolved spectrum
(Integration time 550 min.)

Yoshioka et al. Science, 2014

Radial variation (deduced parameters)



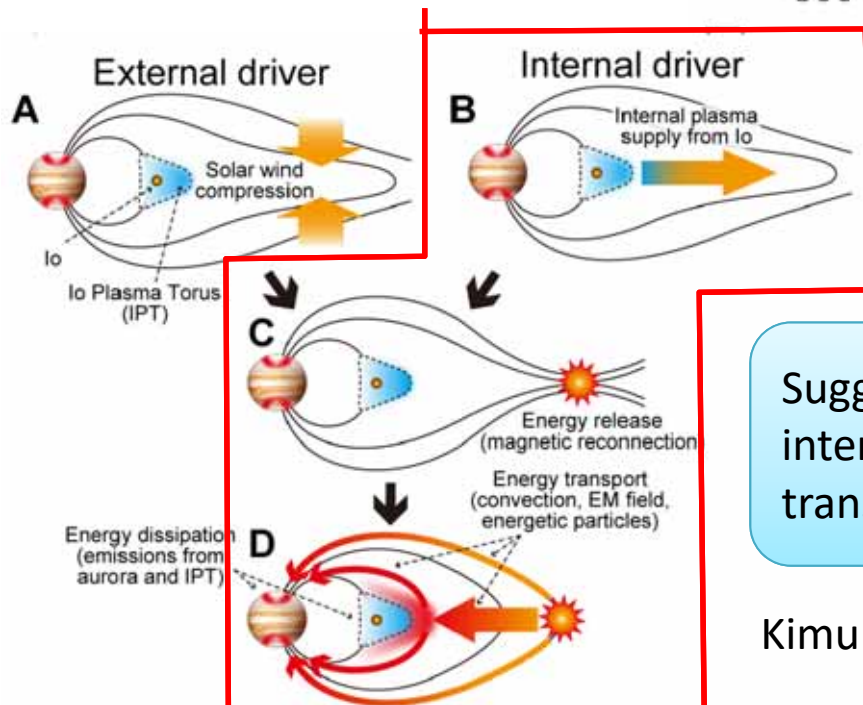
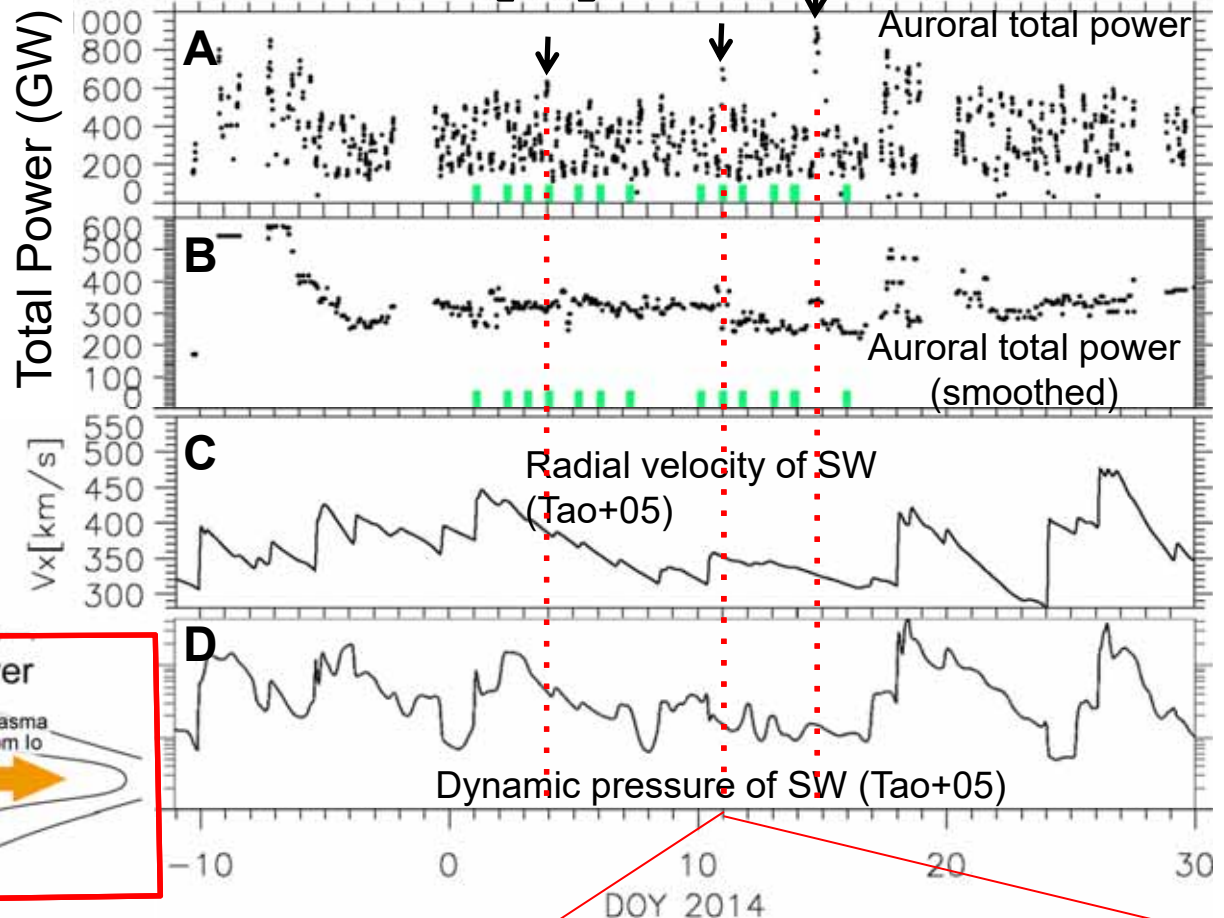
- Electron density is ~ 1500 /cc at 5.9RJ
- Core temperature ~ 5 eV
- Higher density (fraction) of hot electrons at outer torus.
- $[S^{2+}] > [S^+] > [S^{3+}]$ (2:4:1)
- No dawn-dusk asymmetry



ひさき衛星の観測成果[2]:オーロラ

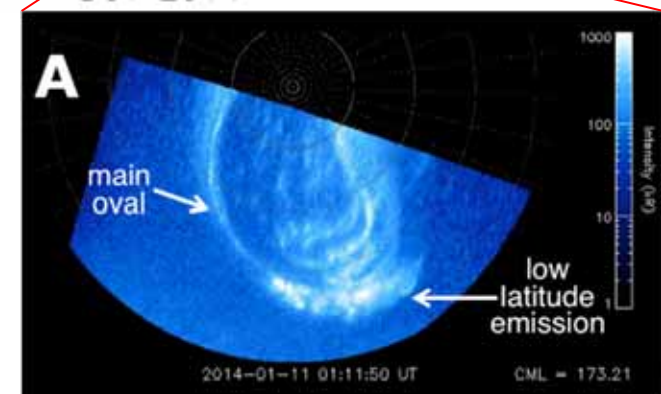
Discovery of internally-driven aurora

- gradual variations over a few days: SW-related variations
- transient brightening on 4th, 11th, and 14th during the quiet period

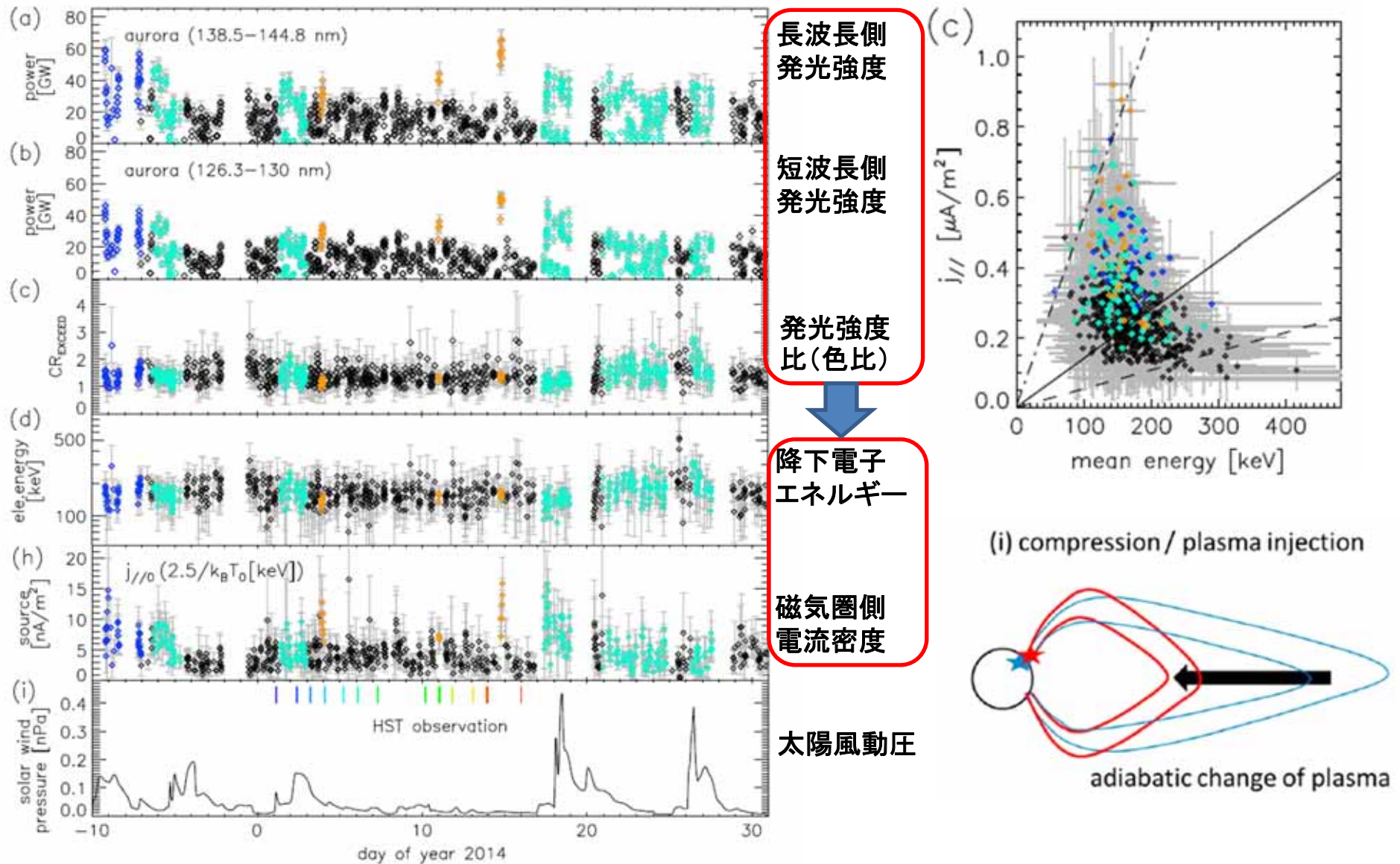


Suggestive of internally driven transient aurora

Kimura et al. 2015



Aurora spectral analysis



プラズマトーラスのプラズマ診断

- 極端紫外線分光
- X線診断

What parameters we can deduce from EUV spectrum?

- **Ion densities [S⁺], [S⁺⁺], [S⁺⁺⁺], [O⁺], [O⁺⁺]**
 - From intensity of each line
- **Electron densities (core and hot)**
 - From total intensities of lines
- **Electron temperature function**
 - From relative intensities between lines

For each ion emission lines (j to i)

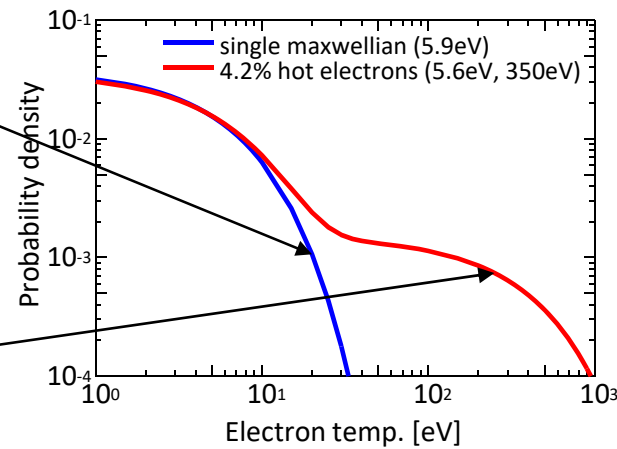
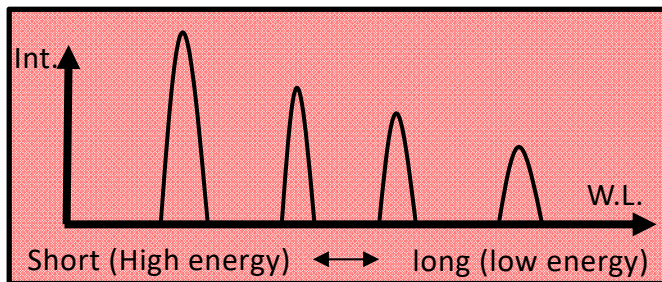
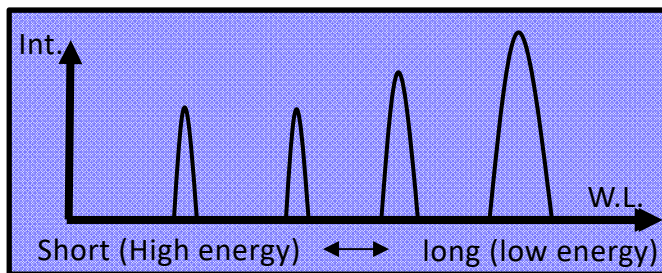
$$I[R] = 10^{-6} \int_{LOS} A_{ji} f_j (T_e, n_e) n_{ion} dl$$

A_{ji} : The Einstein coefficient

f_j : Ion fraction in the state j

T_e, n_e : Temperature & density of electrons

n_{ion} : Ion density



Parameter determination by spectral fitting

モデルスペクトル

Free parameters

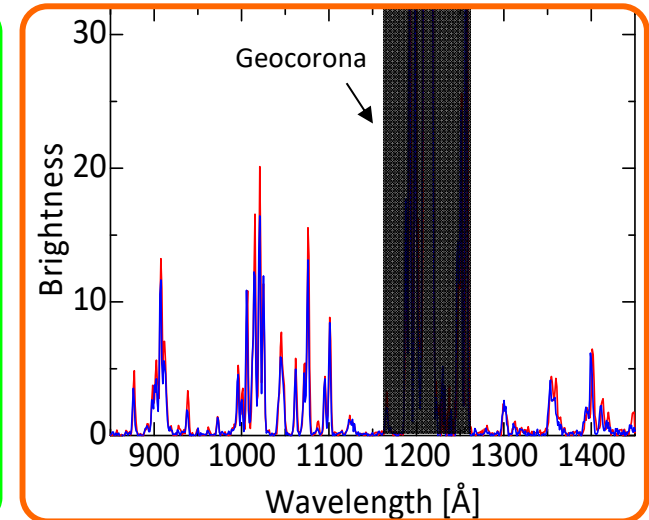
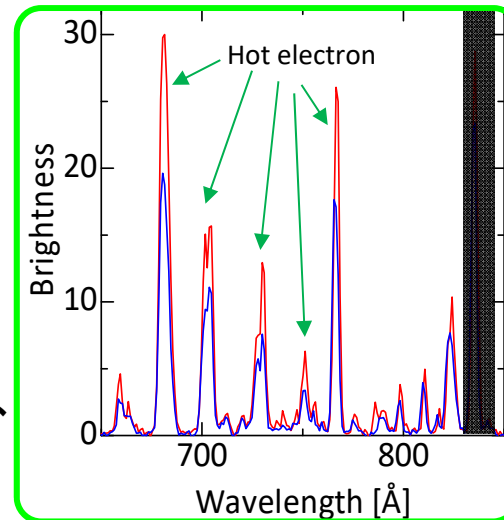
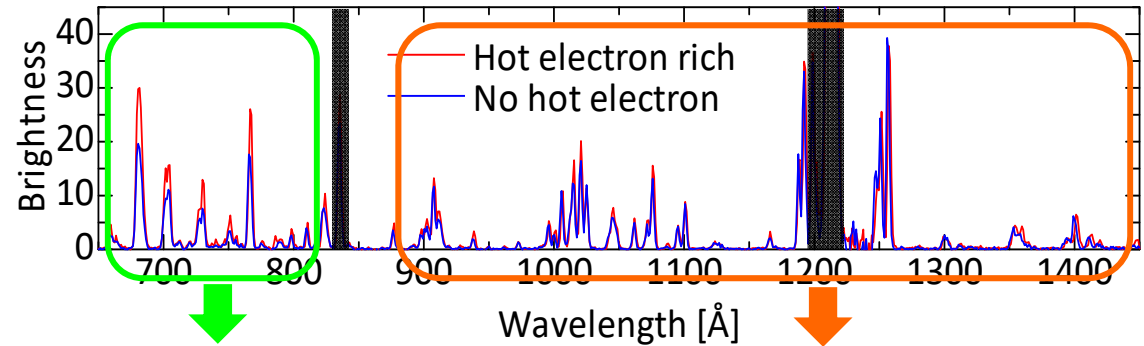
- イオン組成(S+,S2+,S3+,O+)
- 電荷密度
- Core電子温度
- Hot電子fraction

Fixed parameter

- H+密度, O2+密度
- Hot電子温度(~100eV)

$$I[R] = 10^{-6} \int_{LOS} A_{ji} f_j(T_e, n_e) n_{ion} dl$$

観測スペクトルにフィッティングし、
free parameterを決定



A_{ji} and f_j are provided from atomic database

1970'-1990' : COREQ (COLLisional and Radiative EQUilibrium) by D. Shemansky

1997- : CHIANTI (Dere et al. 1997) Atomic database with UV emissions.

2015 : CHIANTI 8.0 released in Sep. 2015 (Del Zanna et al. 2015).

We use the CHIANTI atomic database to obtain

The difference between CHIANTI 8.0 and 7.0

- The difference between the CHIANTI 8.0 and 7.0. (Nerney et al. 2016).
- O⁺ emission at 83.4 nm shows clear difference.
- S⁺ and S⁺⁺ also show difference especially at shorter wavelength.

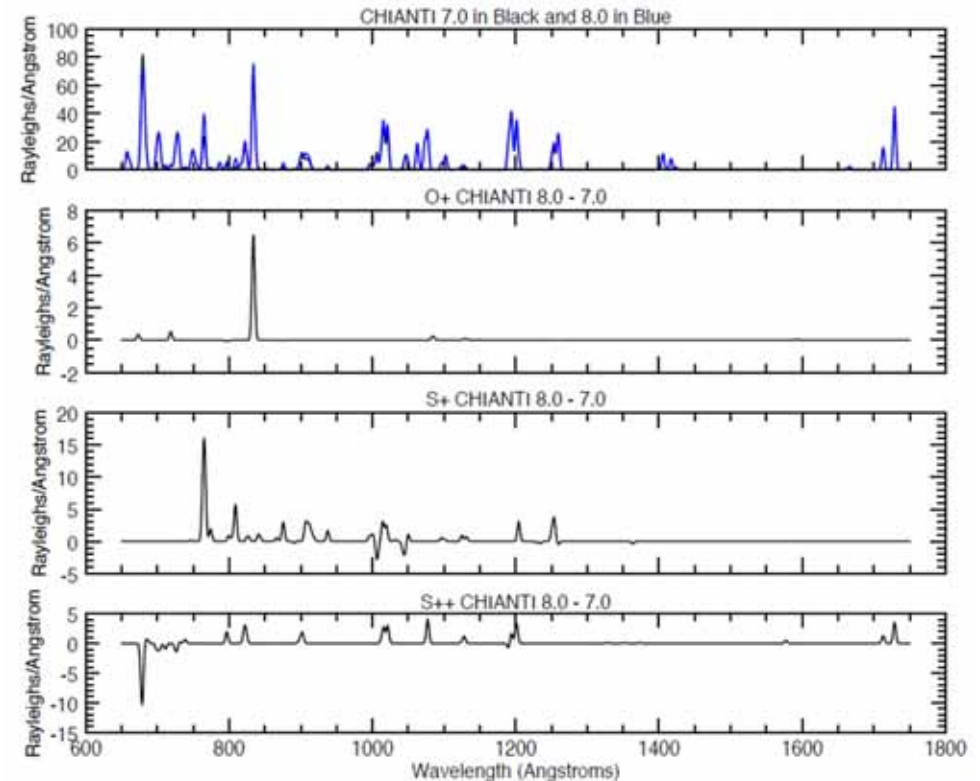


Figure 2b. Differences in emissions predicted by CHIANTI 8.0 and 7.0 for typical parameter conditions shown at the UVIS resolution. The differences in S⁺⁺⁺ and O⁺⁺ emissions between CHIANTI 8.0 and 7.0 are negligible.

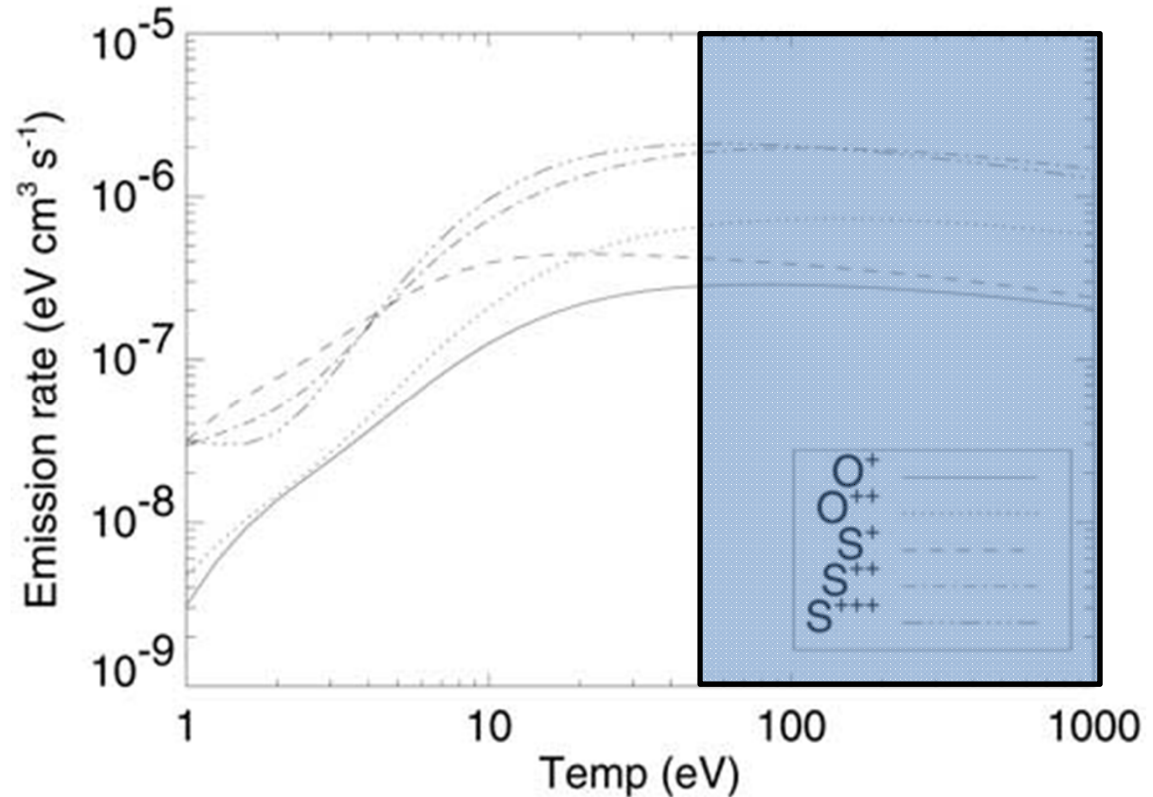
From E. Nerney et al. 2016, JGR

Limitation of EUV spectroscopy

No change in cross section over 50eV...



X-ray spectroscopy
for hot plasma
diagnostics



Ion emission rate vs electron energy
(Delamere and Bagenal 2003)

X-ray from Io plasma torus

- Soft X-rays from IPT observed by CXO/ACIS (Elsner+02)
- electron: bremsstrahlung
- ion: unknown. OVII line via Charge Exchange??

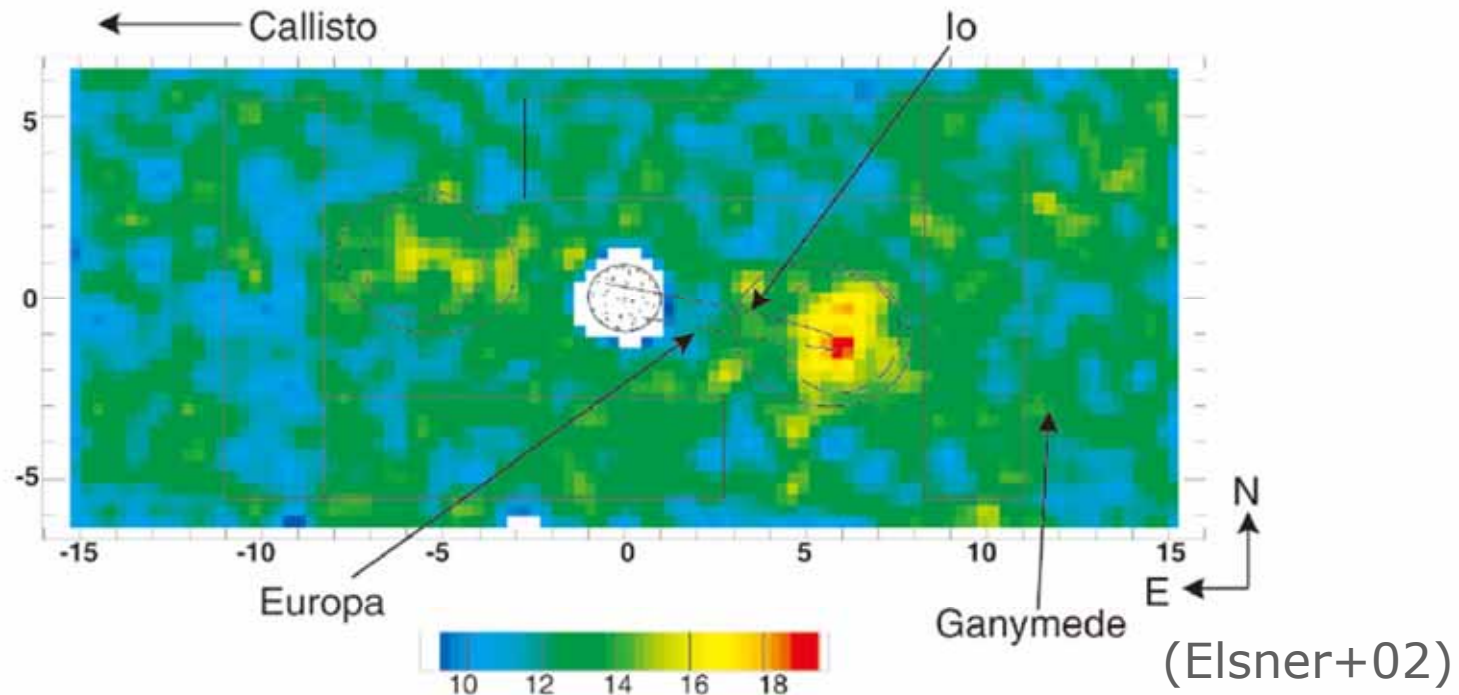
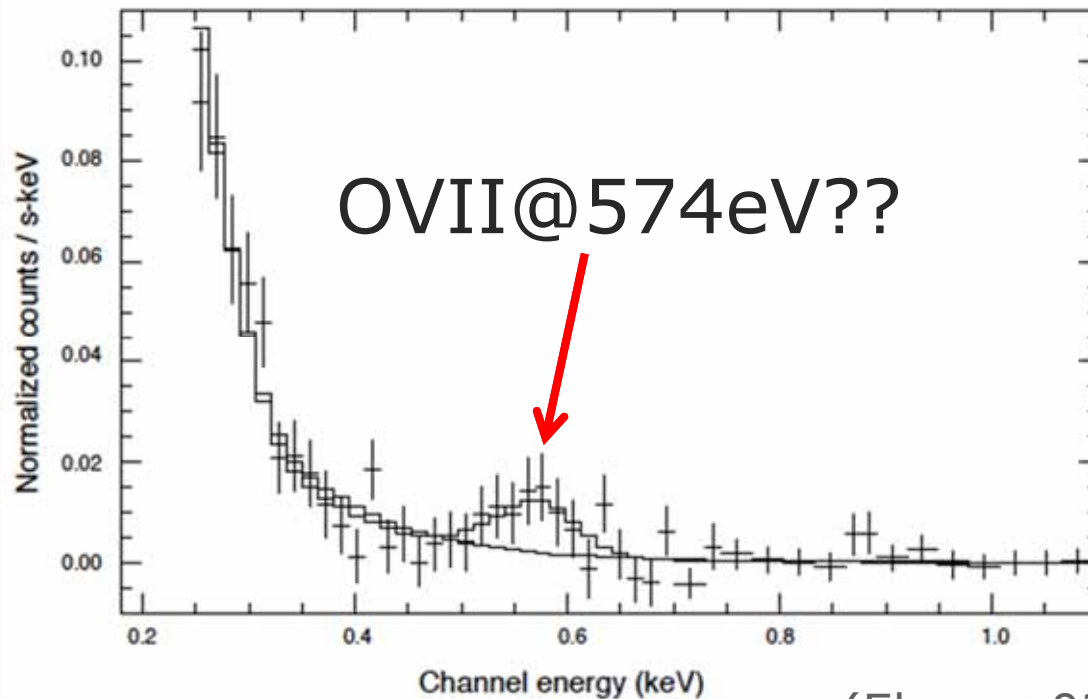


FIG. 2.—HRC-I image of the IPT (2000 December 18). The image has been smoothed by a two-dimensional Gaussian with $\sigma = 7''.38$ (56 HRC-I pixels). The axes are labeled in units of Jupiter's radius, R_J , and the scale bar is in units of smoothed counts per image pixel ($7''.38 \times 7''.38$). The paths traced by Io (solid line, semimajor axis $5.9 R_J$), Europa (dashed line, semimajor axis $9.5 R_J$), and Ganymede (dotted line, semimajor axis $15.1 R_J$) are marked on the image. Callisto (semimajor axis $26.6 R_J$) is off the image to the dawn side, although the satellite did fall within the full microchannel plate field of view. For this observation, Jupiter's equatorial radius corresponds to $23''.9$. The regions bounded by rectangles were used to determine background. The regions bounded by dashed circles or solid ellipses were defined as source regions.

IPT spectra



cf. OVII lines can exist with $T \sim 40\text{eV}-6\text{keV}$ in collisional equilibrium plasma WITHOUT CX (ATOMDB, Smith+)

(Elsner+02)

Thermal Bremsstrahlung Plus Gaussian Line^e

| | |
|---|---------------|
| T (eV)..... | 56 (+6/-5) |
| $EM^d/10^{40}$ | 7 (+4/-2) |
| E_{line} (eV) | 567 (+10/-12) |
| σ (eV)..... | 0 (+28) |
| A (10^{-6} counts s^{-1} cm^2) | 4 (+1/-1) |

electron Bremss
OVII@574eV??

X-ray spectral model of IPT including CX

木村(理研)

Relevant reactions (for O^{6+})

- Contributing to radiative process
 - Electron collision excitation (EXC):
e.g., $O^{6+}+e \rightarrow O^{6*}+e \rightarrow O^{6+}+e+h\nu$
- Contributing to chemical and radiative process
 - Charge transfer (electron capture) (TNS):
e.g., $O^{7+}+X \rightarrow O^{6*}+X^+ \rightarrow O^{6+}+h\nu$
 - Electron recombination (REC):
e.g., $O^{7+}+e \rightarrow O^{6*} \rightarrow O^{6+}+h\nu$
 - Electron collision ionization (COL):
e.g., $O^{5+}+e \rightarrow O^{6*}+2e \rightarrow O^{6+}+2e+h\nu$
- Contributing to chemical process
 - Electron stripping (STR):
e.g., $O^{5+}+X \rightarrow O^{6+}+X+e$, $O^{5+}+X+q \rightarrow O^{6+}+X+q-1$
- Red: charge exchange (CX) processes in this study
- Blue: collisional processes dealt in astrophysical plasma model (CHIANTI/APEC)

Ion balance

$$\frac{dN_q}{dt} = Source_q - Loss_q = 0$$

$$Source_q = \underbrace{N_e N_{q-1} I_{q-1}}_{\text{COL}} + \underbrace{N_e N_{q+1} R_{q+1}}_{\text{REC}} + \underbrace{\sum_{t>q-1} N_t N_{q-1} S_{q-1,t}}_{\text{STR (NEW)}} + \underbrace{\sum_{t<q+1} N_t N_{q+1} T_{q+1,t}}_{\text{TNS (NEW)}}$$

$$Loss_q = N_e N_q I_q + N_e N_q R_q + \sum_{t \neq q} N_t N_q S_{q,t} + \sum_{t \neq q} N_t N_q T_{q,t} + \frac{n_q}{\tau}$$

transport
loss

$$N_p + \sum_{i=0}^q N_i = N_e$$

neutral
source

For $q=0$, neutral source rate is included:

$$Source_q = \underbrace{N_0}_{\text{neutral source}} + N_e N_{q-1} I_{q-1} + N_e N_{q+1} R_{q+1} + \sum_{t>q-1} N_t N_{q-1} S_{q-1,t} + \sum_{t<q+1} N_t N_{q+1} T_{q+1,t}$$

- N_q : density of ion with +q charge [/cc]
- N_p : proton density [/cc]
- N_e : electron density [/cc]
- N_t : fraction of CX target [/cc]
- **I**: electron collision ionization rate [cm^3/s]
- **R**: electron recombination rate [cm^3/s]
- **S**: electron stripping rate [cm^3/s]
- **T**: charge transfer rate [cm^3/s]
- tau: transfer loss rate [days]

These equations are solved as a steady problem by Newton method

Parameters

木村(理研)

| Free parameters | value, range | comments |
|--|--|---|
| ion fraction wrt total ion density n_0, \dots, n_q | 0.0-1.0 | q=+8 for oxygen |
| electron density n_e | 0.0- 10^5 /cc | almost constant~4800/cc in the solutions |
| Fixed parameters | value, range | comments |
| Temperature | 1eV-10keV | Ti=Te (equilibrium) |
| hydrogen/electron ratio | 0.1 | Delamere&Bagenal03 |
| oxygen abundance wrt Hydrogen | 9.0 (no sulfur) | O/S=1.7-5 Delamere&Bagenal03 Bagenal94 |
| cross sections | See below | COL (I), REC (R), TNS (T), STR (S) |
| neutral source rate τN_0 | 10×10^{-4} cm ³ /s | Delamere&Bagenal03 |
| transfer loss rate | 50 days | Delamere&Bagenal03 |
| Neutral velocity relative to corotating plasma v_{rel} | 58 km/s ~ 280 eV for oxygen atom | Velocity btw corotation and Keplerian at 6 R _j |

Cross sections and source rate

- ❑ Cross sections of COL (I) and REC (R) are from CHIANTI database
- ❑ Relative velocity btw neutrals and corotating plasma is incorporated in neutral's rates
- ❑ Charge exchange cross sections are derived from Janev+83, 88
- ❑ **CAVEAT: No complete CX cross section data at low collision energies (<1keV/amu). Especially for O-O reactions. Substituted to O-H reactions as an initial approach.**
- ❑ No energy dependence of S and T on energy is assumed
- ❑ Source rates (alpha=I,R,S,T) are derived by

$$\alpha = \int_0^{\infty} \sigma(v) v f(v) dv$$

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT} \right)$$

- ❑ For n-i reactions at lower temp (<280eV), velocity = v_rel
- ❑ For n-i at >280eV, i-i, velocity = v_i
- ❑ For n-e, i-e, velocity = v_e

オーロラ発光のスペクトル解析

- オーロラ電子のエネルギー推定
- 惑星大気との相互作用

木星UVオーロラスペクトル

- * H₂ Lyman band, Werner band, H Lyman- α
- * 降込む電子のエネルギーが高いと、低い高度にある炭化水素化合物の吸収を受ける

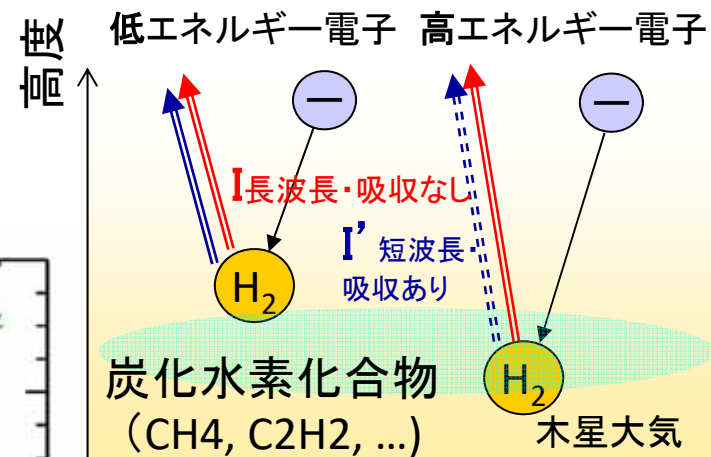
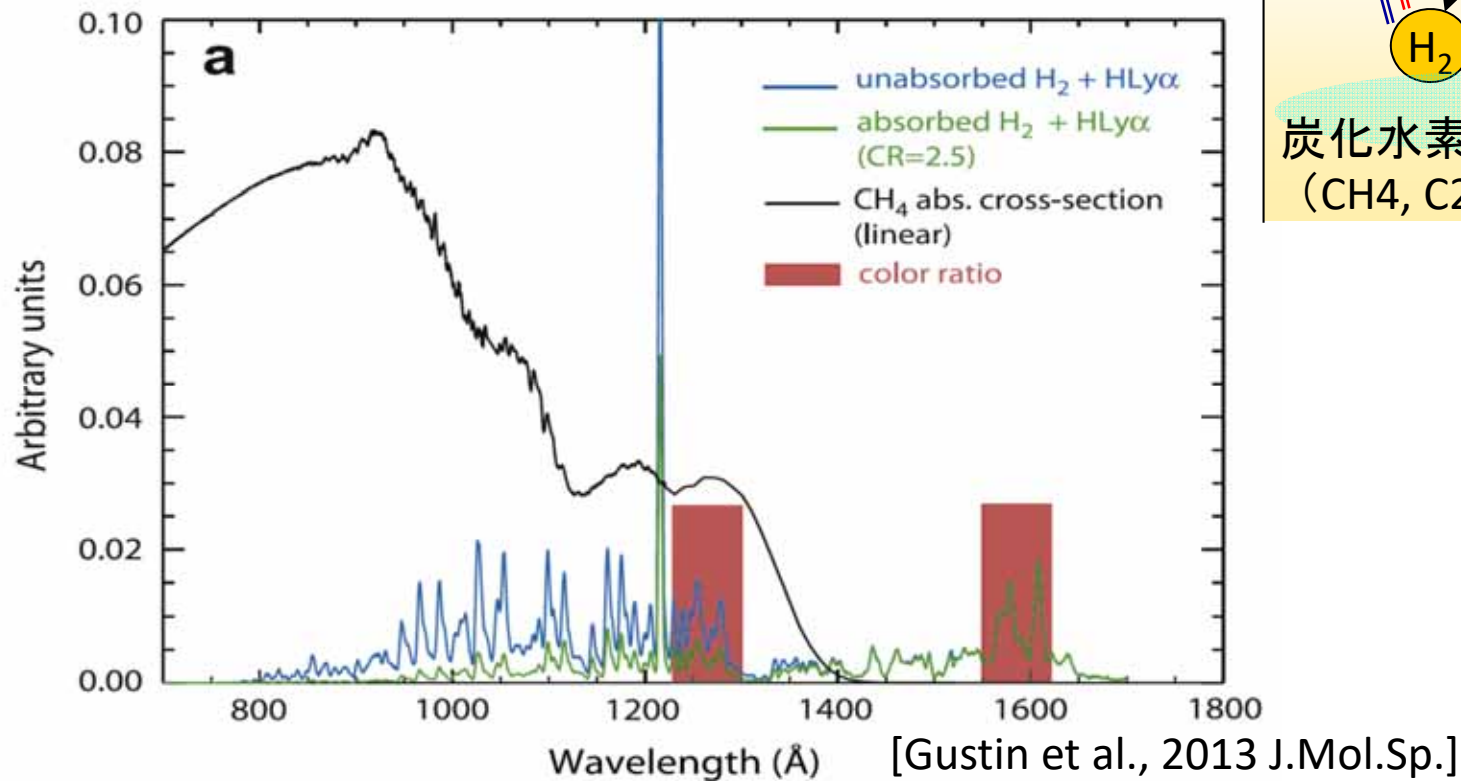


図. H₂への100 eV電子衝突による実験室スペクトル(青線)、メタンによる吸収(断面積は黒線)を受けたスペクトル(緑線)

原子・分子利用データ1

H₂ 発光スペクトルの導出

目的: スペクトルから、炭化水素化合物の吸収量を見積もり、引き起こす電子エネルギー情報を得る。また、スペクトルを用いて吸収前の全発光強度を求め、他の観測と比較する。

方法:

・Gustin et al.(前頁の図)の実験室スペクトルを引用論文著者(J.M.Ajello氏)にリクエスト・コンタクトしたものの未回答。

・モデル計算で導出。B C B' D励起状態への遷移割合が必要で、オーロラ電子降込みモデル[Perry et al., 1999, Hiraki and Tao, 2008]を参照し1:0.9:0.16:0.15としている。

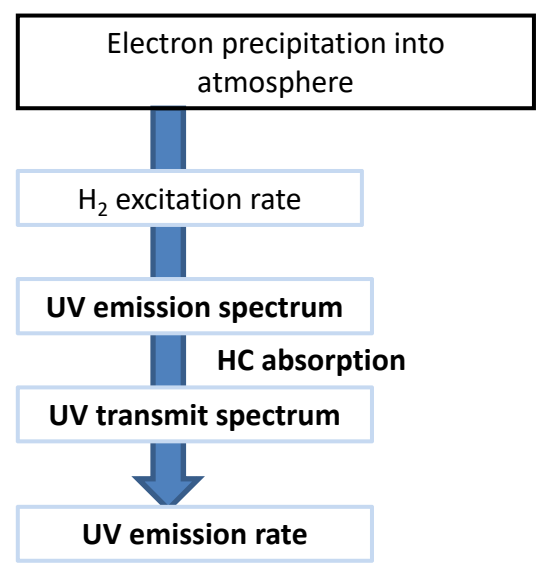
Frank-Condon factorsおよびEinstein係数を用いてスペクトルを導出(次頁)。

・モデル大気を仮定し、炭化水素化合物による吸収(吸収断面積)を考慮する。

・一部、ハッブル宇宙望遠鏡による木星オーロラ観測スペクトルの吸収量を補正して参照している。

←モデルスペクトルと観測と差がある。それに対し、実験室スペクトルの再現性はよい。デジタルデータを入手できると嬉しい。

H₂紫外発光スペクトル導出

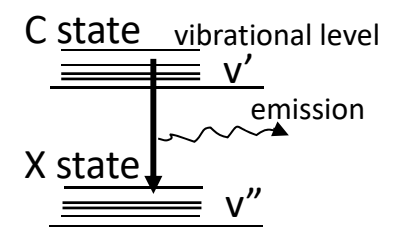


Werner band (C)

$$I_{\nu',\nu''}^W = I_C q_{\nu',0}^{X \rightarrow C} \frac{A_{\nu',\nu''}^{C \rightarrow X}}{\sum_{\nu''} A_{\nu',\nu''}}$$

[Gérard and Singh, 1982]

$I_{\nu',\nu''}^W$: transition rate [/s]
 I_C : excited rate [/s]
 $q_{\nu',0}^{X \rightarrow C}$: Frank-Condon factors (ratio of ν' in C states) [Spindler, 1968]
 $A_{\nu',\nu''}$: Einstein coefficient ($\nu' \rightarrow \nu''$) [Allison and Dalgarno, 1970]



Lyman band (B)
 We add contribution from E&F states (25%) [Gérard and Singh, 1982].
 Transition from B', D states [Fantz and Wunderlich, 2006]

Transmitted spectrum is obtained as follows

$$I_{\text{obs}}(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left(-\int_z \sum_s \sigma_{\text{CH}_s} N_{\text{CH}_s}(z) dz\right)$$

I_0 : original emission intensity
 N_{CH_s} : density of HCs molecule
 σ_{CH_s} : absorption cross section
 [Parkinson et al., 2006]

UV emission rate is obtained as altitude integration of I_{obs} .

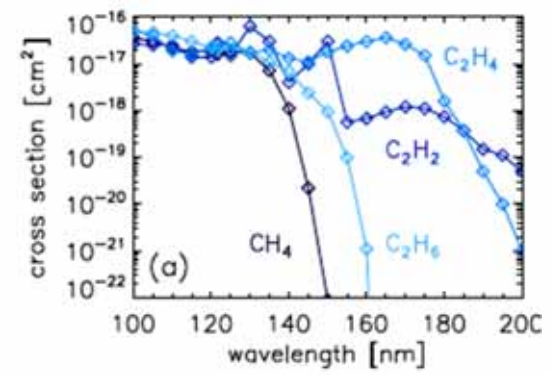


Fig. HC abs. cross section [after Parkinson et al., 2006]

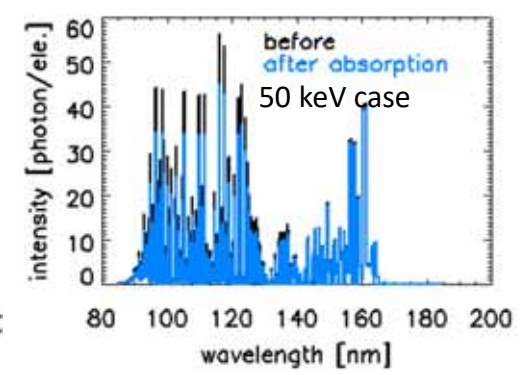


Fig. spectrum before/after HC abs.

原子・分子利用データ2

オーロラ電子降込みモデル

目的:オーロラ電子が、どの大気高度まで侵入し、大気を電離・励起するか評価

方法:

・H₂(+He)大気を仮定し、電子を降りこませる。

大気との衝突や散乱角度を乱数で振る、モンテカルロ計算を行う。

--**衝突断面積** [Tawara et al. 1990] <1 keV。cf. 木星オーロラ ~100 keV、線形外挿

--イオン化の二次電子とのエネルギー分配

[Vahedi and Surendra, 1995]

--**散乱角度**(イオン化・BC励起衝突時)

エネルギー依存性を Rutherford formula で与える

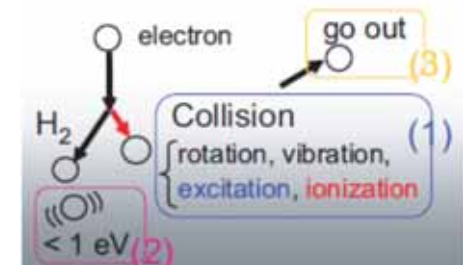
[Lummerzheim et al., 1989]

エネルギー大ほど前方散乱、

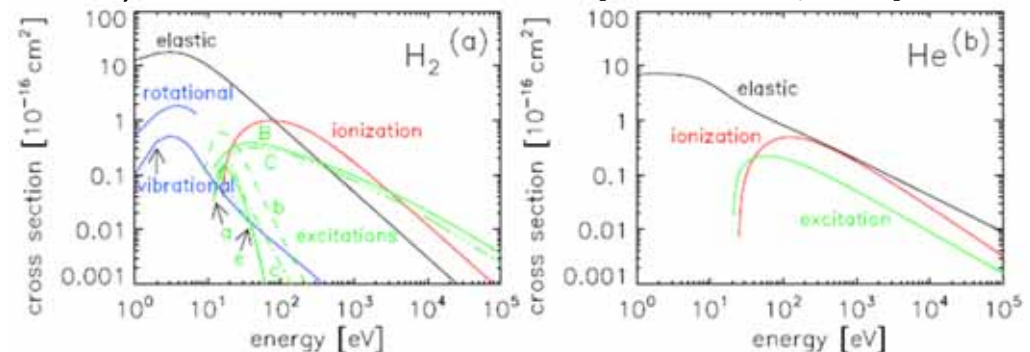
エネルギー小になると等方散乱

cf. 磁場の存在

→モデル間の違いの一要因



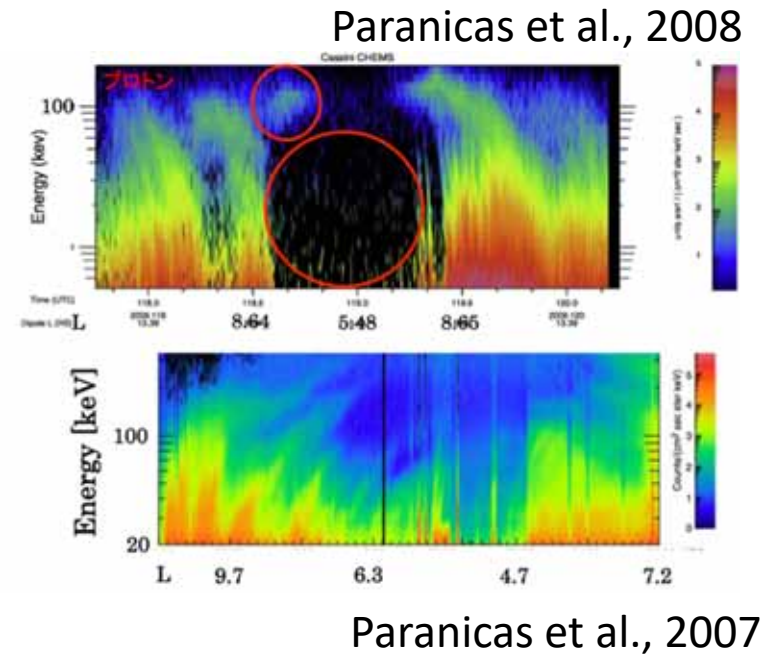
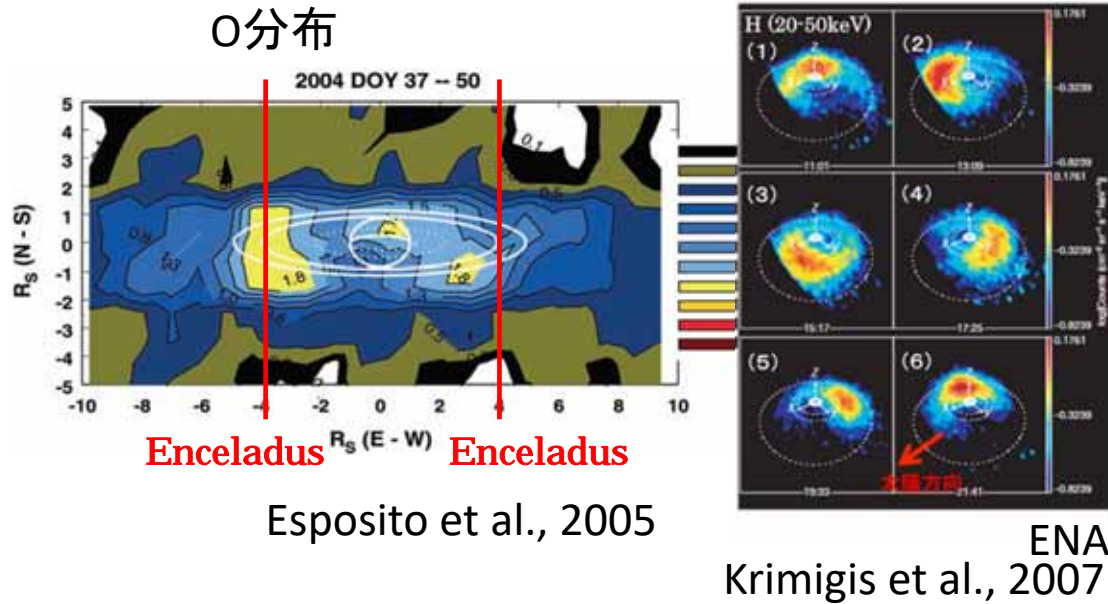
H₂, Heの電子衝突断面積 [Tawara et al., 1990]



土星

- ・プラズマと中性ガス
- ・プラズマとダスト

土星磁気圏



- Enceladus衛星起源の水系中性粒子(H₂O,OH,Oなど)やダスト、ダストプラズマが多い
- 磁気圏プラズマ(電子やイオン)と中性粒子、ダストの3者の相互作用を観測的にも検証可能な惑星
=>モデルの立ち場からアプローチ

土星では、「水系中性粒子(H_2O , OH , O など)」「ダスト、ダストプラズマ」「プラズマ(keV - MeV 帯の電子、プロトン、 O^+)」間の相互作用(含: 化学反応)が存在

- ・ keV 帯プラズマによる弾性衝突データ(例: 電子- H_2O や電子- OH など)
=> 微分散乱断面積は弾性衝突後の電子ピッチ角情報を得るために重要。(ロスコーンに入った場合)オーロラや大気加熱情報源にもなる。
- ・ keV 帯プラズマ(電子)によるイオン化反応データ
(電子や生成された2次電子の散乱角情報)
=> 大気中ではオーロラ、磁気圏中ではプラズマの生成やエネルギーロスの情報を得るのに影響。
- ・衝突後の中性粒子の速度ベクトルは? 電子などと衝突(弾性、イオン化反応など)後。また、中性粒子同士の衝突の場合など。
=> 中性粒子分布の広がりの情報に必要
- ・ダスト-プラズマ、ダスト-中性粒子相互作用のデータ。そもそもダストとの相互作用の実験データの現状は?

Summary

- 紫外線・極端紫外線波長域の分光・撮像観測
 - 今後も惑星大気・電離圏・磁気圏観測の有効なツール
 - 更に高温なプラズマの診断：X線
- 観測から物理量の導出：原子・分子データを使用
 - イオン・原子の電子衝突励起：CHIANTI(バージョンによる相違)
 - 分子-電子間：衝突断面積の高エネルギー電子に対するデータ
散乱角のエネルギー依存性
励起状態の遷移割合
 - 電荷交換反応：多価イオンの実験値
- 紫外線・極端紫外線波長域の分光観測：今後も充実
 - 惑星のスペクトル観測から原子・分子データへの寄与？
- 土星：原子・分子に加え、プラズマとダストとの相互作用も重要