

[P-11 / O-D2-25]

ひさき衛星の極端紫外分光データを用いた エウロパ軌道におけるプラズマ診断

*松下 奈津子¹, 土屋 史紀¹, 笠羽 康正¹, 吉岡 和夫², 佐藤 晋之祐¹,
堺 正太郎¹, 眞田 聖光^{3,4}, 山崎 敦⁵, 村上 豪⁵, 木村 智樹⁶, 北 元⁷,
吉川 一朗²

1. 東北大学, 2. 東京大学, 3. University of Texas at San Antonio,
4. Southwest Research Institute, 5. JAXA/ISAS, 6. 東京理科大学, 7. 東北工業大学



* 理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター M1

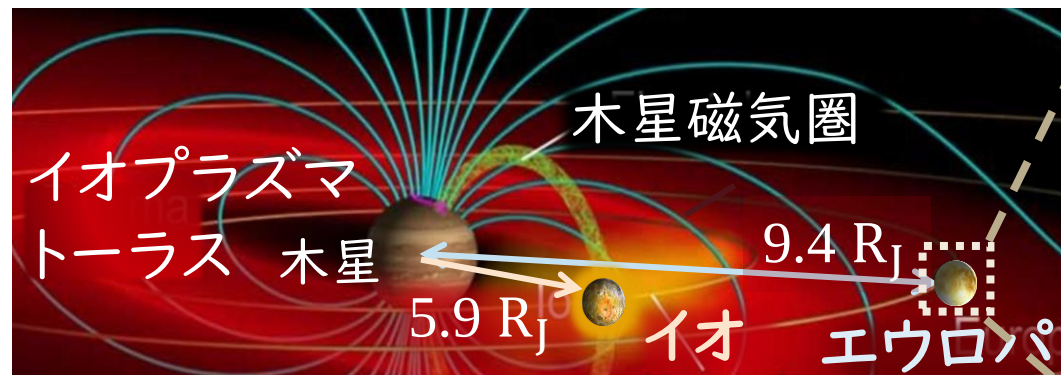
matsushita.n@pparc.gp.tohoku.ac.jp

Bagenal, F., et al. (2015). doi:[10.1016/j.icarus.2015.07.036](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.07.036) Bagenal, F., Dols, V. (2020). doi:[10.1029/2019JA027485](https://doi.org/10.1029/2019JA027485)
Bagenal, F. (1994). doi:[10.1029/93JA02908](https://doi.org/10.1029/93JA02908) Del Zanna, G., et al. (2021). doi:[10.3847/1538-4357/abd8ce](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abd8ce)
Delamere, P.A., Bagenal, F. (2005). doi:[10.1029/2005JA011251](https://doi.org/10.1029/2005JA011251) Kurth, W.S., et al. (2001). doi:[10.1016/S0032-0633\(00\)00156-2](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(00)00156-2)
Hikida, R., et al. (2020). doi:[10.1029/2019JA027100](https://doi.org/10.1029/2019JA027100) Nerney, E.G., et al. (2017). doi:[10.1002/2016JA023306](https://doi.org/10.1002/2016JA023306)
Roth, L., et al. (2023). doi:[10.3847/PSJ/accdde](https://doi.org/10.3847/PSJ/accdde) Satoh, S., et al. (2024). doi:[10.1029/2024GL110079](https://doi.org/10.1029/2024GL110079)
Smyth, W.H., Marconi, M.L. (2006). doi:[10.1016/j.icarus.2005.10.019](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.10.019) Steffl, A.J., et al. (2004). doi:[10.1016/j.icarus.2004.04.016](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.04.016)
Yoshioka, K., et al. (2017). doi:[10.1002/2016JA023691](https://doi.org/10.1002/2016JA023691) Yoshioka, K., et al. (2018). doi:[10.1029/2018GL079264](https://doi.org/10.1029/2018GL079264)

Key Points

- 木星磁気圏の大部分は、衛星イオ由来のプラズマが占めているが、衛星エウロパの寄与もあると考えられている。
- エウロパ大気と磁気圏プラズマの相互作用の理解には、エウロパ周辺におけるトーラスのプラズマ特性の解明が必要である。
- ひさき衛星での紫外線分光観測によって、エウロパ軌道での硫黄イオンと酸素イオンの輝線を初検出した。
- スペクトルをプラズマ診断し、イオ軌道からエウロパ軌道にかけてのプラズマ特性(電子温度、電子密度、イオン組成比)を決定した。
- 現行のプラズマ診断では、視線方向のプラズマ特性の一様を仮定したことで、熱い電子の割合が過大評価されている。
- 今後は、プラズマ特性の指数関数分布を仮定したプラズマ診断を行い、イオ火山活動のエウロパ軌道への影響を調べる。

木星磁気圏 & エウロパ



木星半径:
1 R_J = 71,492 km

Fig.1(a) 木星磁気圏
(Bagenal et al., 2020)

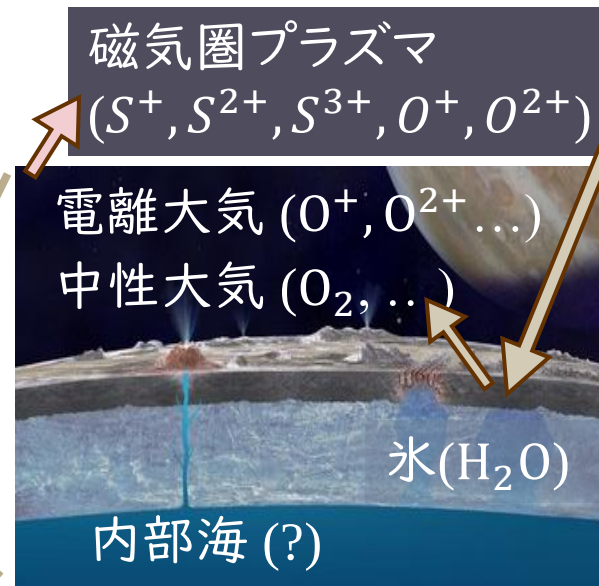


Fig.1(b) エウロパ環境
(NASA/JPL-Caltech)

イオプラズマトーラス

- イオの大気から散逸した硫黄酸化物のガスが電離
→ **重いイオン** ($S^+, S^{2+}, S^{3+}, O^+, O^{2+}$) と **電子** が木星の磁力線に束縛され、ドーナツ状に分布
- 木星磁気圏のプラズマの質量の約9割を占める

エウロパ

- 内部海、エネルギー、有機物が揃うと考えられる
- 磁気圏のプラズマが表面の氷に衝突し、**薄い酸素大気**を生成
- 大気がさらに電離し、イオとは別のプラズマ発生源に (Smyth & Marconi, 2006)

エウロパ周辺におけるトーラスのプラズマ特性を知ること
→ 衛星大気と磁気圏プラズマの相互作用の理解に必要

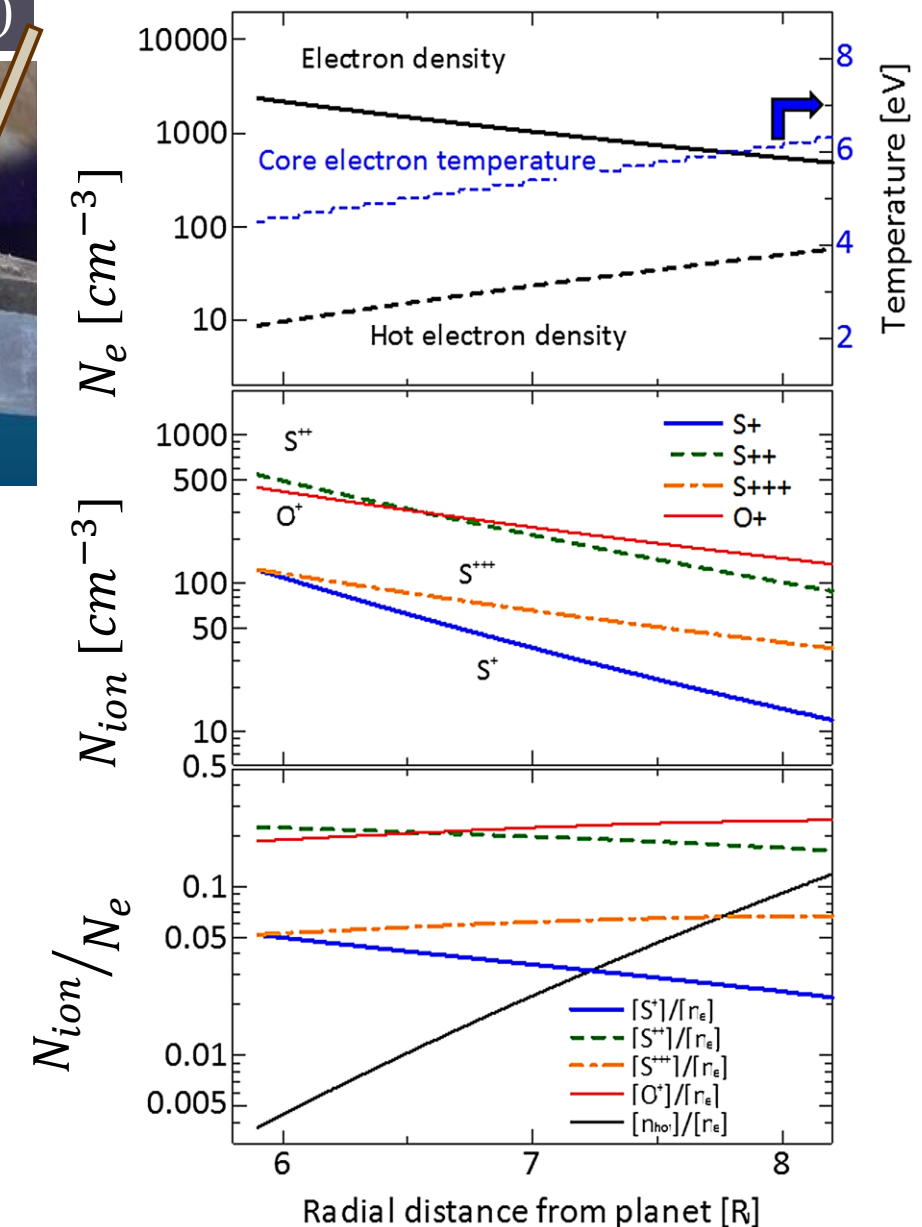


Fig.2
Hisaki による観測から求めた、
プラズマ特性の動径方向分布
(Yoshioka+2017)

イオプラズマトーラスの先行研究

イオ軌道～8 R_J (ひさき衛星) (Yoshioka+2017)

- 密度:イオ軌道から動径方向外側にかけて減少
- 外側ほど価数の大きなイオンの割合が大きい
...トーラス外側ほど、**熱い電子との電子衝突電離**が増えるため
...フラックスチューブの交換により、**熱く希薄な電子が内向きに、冷たく重いイオンが外向きに輸送**
- 2015年1月にイオの火山が噴火 → トーラスのイオンの組成が変化
(噴火後約1ヶ月間はS⁺が増加、その後はS³⁺が増加) (Hikida+2020)

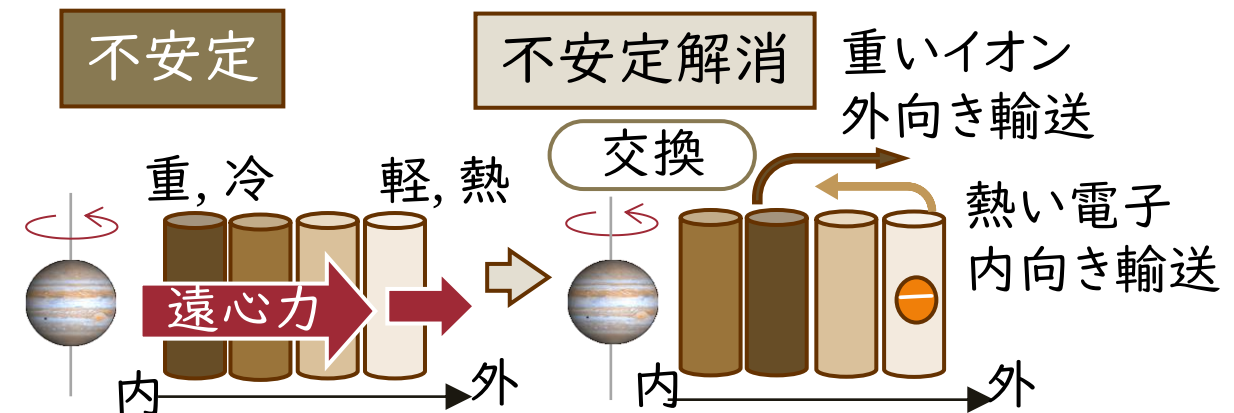


Fig.3: トーラス中の物質輸送の模式図

エウロパ軌道

- その場観測: ○物理量の直接測定が可能 △時間・空間ともに限定的
1979年 Voyager (Bagenal, 1994) / 2001年 Cassini (Steffl+2004) /
1996~2001年 Galileo (Kurth+2001) / 2022年 Juno (Szalay+2024) ← M/Q が同じイオン (S²⁺とO⁺) の区別がつかない
- 地球周回軌道の HST によるリモートセンシング
 - 硫黄、酸素イオンの検出なし (113.5-127.5 nm, 129-143 nm) (Roth+2023)
 - エウロパフットプリントオーロラの観測 → イオン質量密度と温度の導出 (Sato+2024)

本研究の目的

ひさき衛星の紫外線分光観測により、エウロパ軌道で**硫黄イオン**と**酸素イオン**の輝線を検出し、エウロパ軌道での**電子密度**、**電子温度**、**イオン組成**を求める

エウロパ軌道でのプラズマ特性の導出

プラズマ診断 (Steffl+2004; Yoshioka+2017; Nerney+2017)

n_{ion} : イオン密度 / l : 視線方向の長さ
 f_j : イオンのうちエネルギー状態が j の割合
 T_e : 電子温度 / n_e : 電子密度
 A_{ji} : 自然遷移確率(状態 $j \rightarrow i$)

電子衝突励起による輝線強度:

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

ひさき衛星: 極端紫外の分光観測 (55~145 nm)

{ 2015/03/01~05/14 (火山活発期を含む)
 LT 20 ~ 4 (ひさきが地球の影にいる), 積分時間: 15,497分

CHIANTI: 体積放射率の計算

$$\varepsilon(r) = n_{ion} f_j(T_e, n_e) A_{ji}$$

初期値を入力:

電子温度 T_e

電子密度 n_e

イオン組成比 f_{ion}

仮定した視線積分
 $\times los$

各動径距離での
 モデルスペクトル

観測スペクトル

$$X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_{obs,i} - y_{fit,i})^2}{\sigma_i^2}$$

を動径距離ごとに計算

N : 波長方向の分割数

$y_{obs,i}$: 観測スペクトル強度

$y_{fit,i}$: モデルスペクトル強度

σ_i : 観測誤差

X^2 の最小化

ベストフィット

<仮定>

- $r [R_J]$ での視線長さ: $los = 2\sqrt{(r + 0.5)^2 - (r - 0.5)^2} [R_J]$
- 視線上ではパラメータが一様として計算
- プラズマ (S^+ , S^{2+} , S^{3+} , O^+ , O^{2+} , H^+ , e^-) は準電荷中性
- 固定パラメータ (Yoshioka+2017):
 熱い電子の温度 = 300eV, $O^{2+} / O^+ = 0.1$, $H^+ / e^- = 0.1$
- 観測されたスペクトルのうち、 $S/N > 2$ のみをプラズマ診断に使う

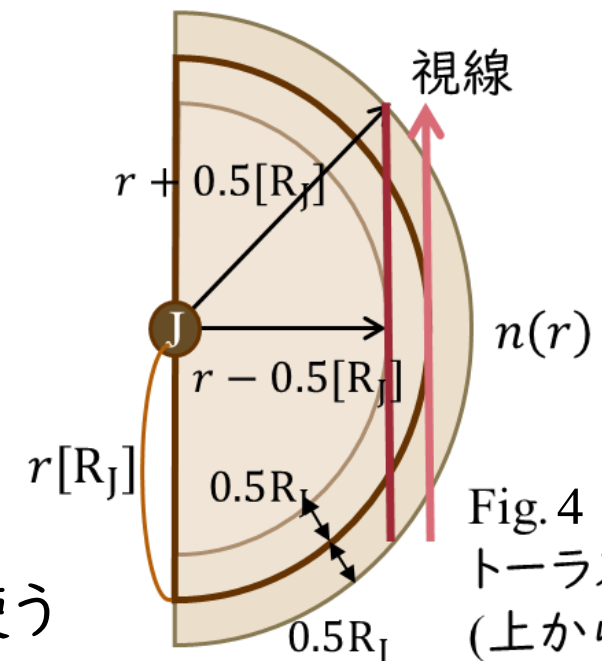


Fig. 4
 トーラス模式図
 (上から)

1. エウロパ軌道での輝線

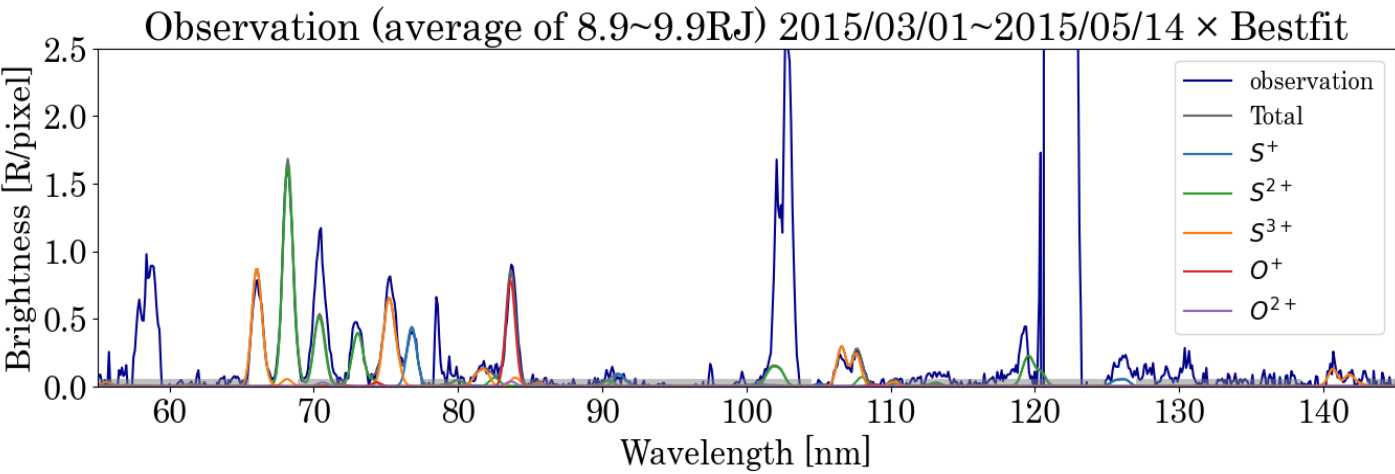


Fig.5: ひさき衛星の観測スペクトルとベストフィット (S^+ , S^{2+} , S^{3+} , O^+)

Table 1: プラズマ診断によって得られたプラズマ特性

	イオ 5.9 R _J	エウロパ 9.4 R _J
電子数密度 [cm ⁻³]	2967 ± 12	245 ± 30
Core 電子温度 [eV]	5.2 ± 0.02	6.1 ± 1.5
Hot 電子の割合 [%]	3.2 ± 0.03	38.7 ± 7.5
S^+ 数密度 [cm ⁻³]	184 ± 3	6 ± 6
S^{2+} 数密度 [cm ⁻³]	666 ± 3	44 ± 5
S^{3+} 数密度 [cm ⁻³]	172 ± 3	28 ± 5
O^+ 数密度 [cm ⁻³]	530 ± 4	37 ± 6

2. プラズマ特性の動径方向分布

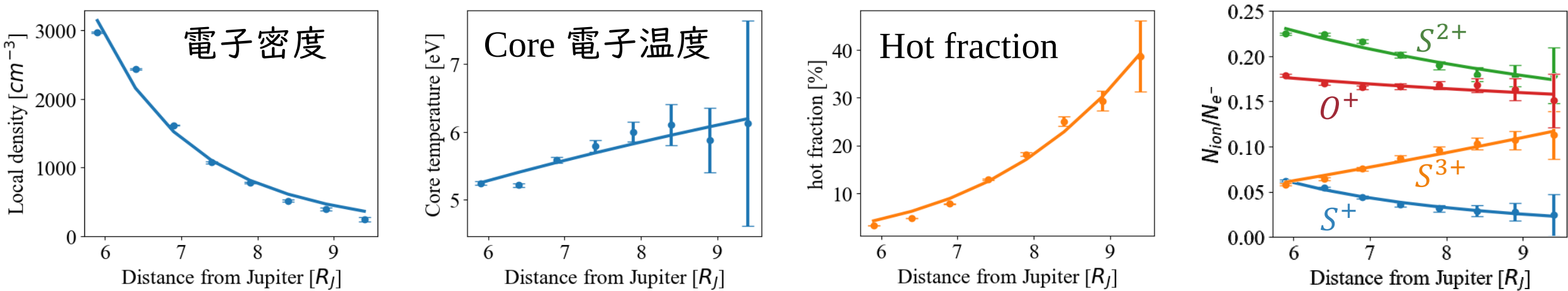


Fig.6: プラズマ診断から得られたプラズマ特性の動径方向分布と指数関数フィッティング

Table 2: 指数関数フィッティングの値

	電子密度	Core 温度	Hot fraction	S^+/e^-	S^{2+}/e^-	S^{3+}/e^-	O^+/e^-
$X_0(5.9R_J)$	3140 cm ⁻³	5.25 eV	4.18 %	6.2 %	23.0%	6.1 %	17.6 %
γ	-4.62	0.35	4.81	-2.14	-0.61	1.41	-0.25

$$X(r) = X_0 \left(\frac{r}{5.9 R_J} \right)^\gamma$$

明るさのフォワードモデルの作成

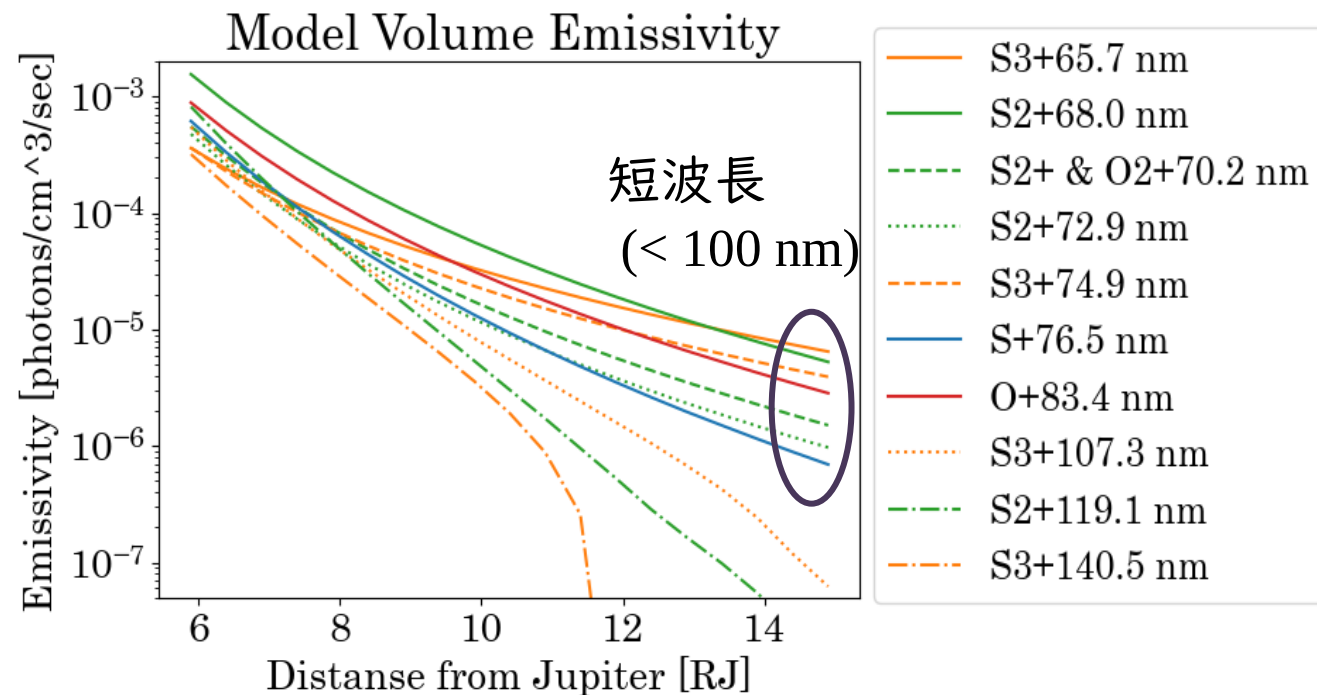


Fig.7: Fig.6のプラズマ特性の指数関数分布をもとに計算した体積放射率の動径方向分布

遠方では、

- 短波長側は長波長側よりも体積放射率が高い
- S^{3+} の相対的な体積放射率が大きくなる

↑ 高温電子は動径方向外側ほど多いため、

- 短波長側の輝線の放射効率が高い
- 電離が進み、価数の大きいイオンが増える

→ 視線積分すると、短波長側の方が明るい

→ フォワードモデルのスペクトルをプラズマ診断すると、高温電子の割合が過大評価される可能性がある

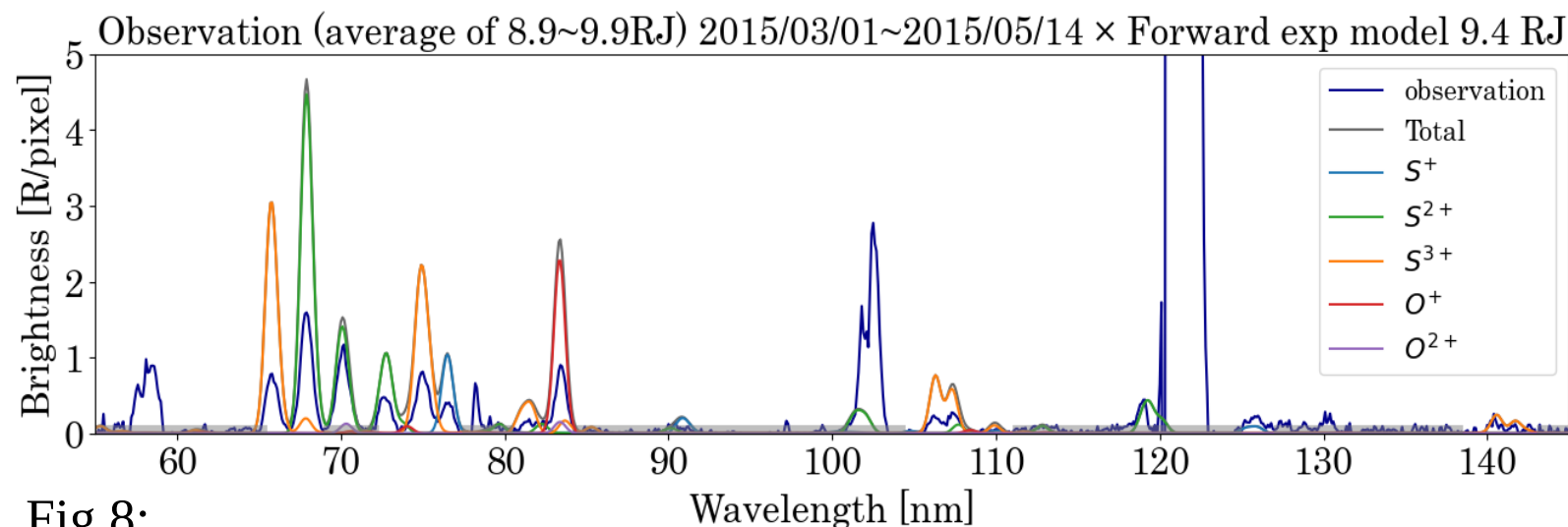


Fig.8: ひさき衛星の観測スペクトルとフォワードモデル(S^+ , S^{2+} , S^{3+} , O^+)

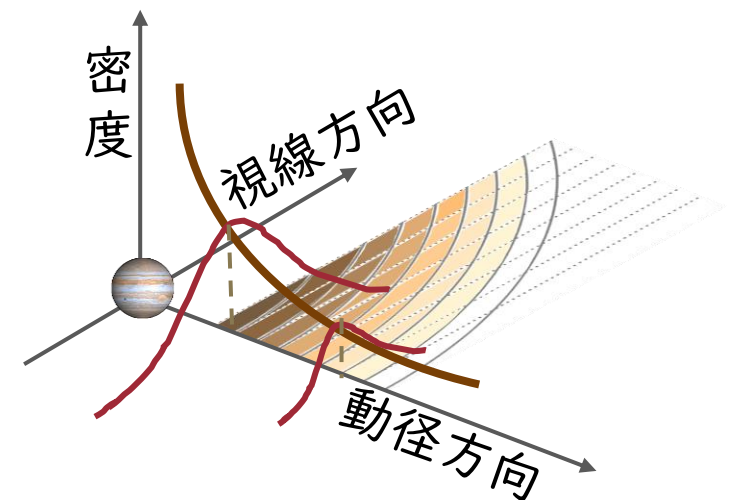
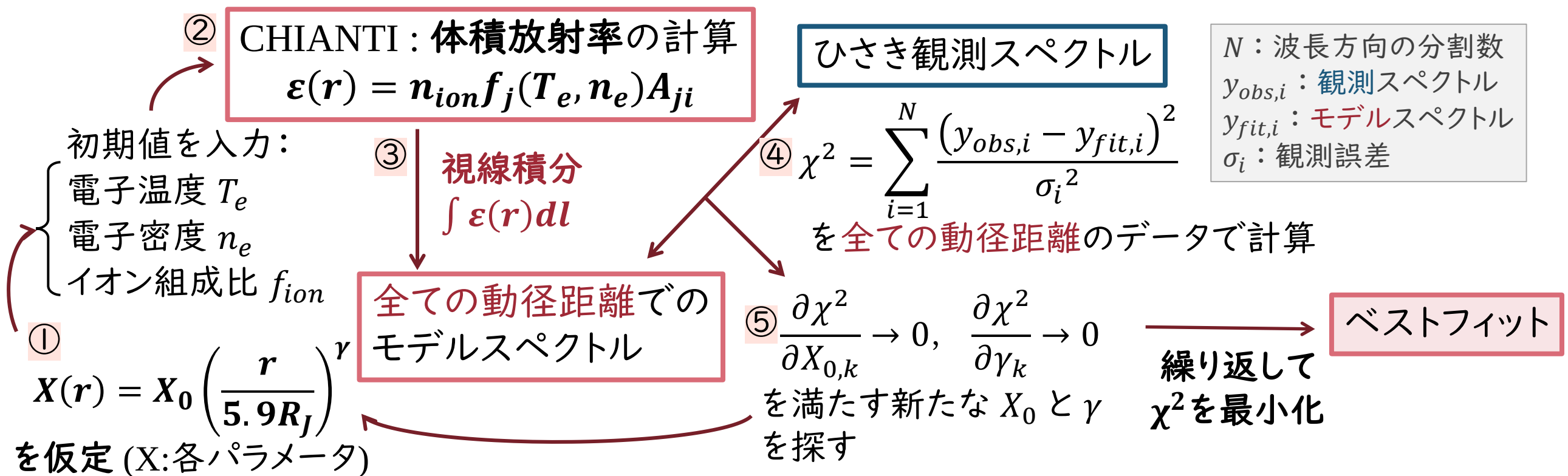


Fig.9: トーラスの密度分布の模式図

プラズマ診断手法の改良

今までの「視線長さを全部の輝線で一律に決める」方法では、熱い電子の割合を過大評価している可能性がある

→ トーラスのパラメータが指数関数分布であることを仮定し、イオ軌道での値(X_0)と指数(γ)を求める方法の開発に取り組む (JpGUに向けた目標)



イオ火山活動のエウロパ軌道への影響

ひさき衛星はトーラスを連続的に観測 → イオの火山活動(2015年1月)の前後で解析

→ イオの火山活動度の変化とエウロパ軌道でのプラズマ密度・組成の変動の関係を調べる