

木星近赤外オーロラの高度・水平構造

宇野 健¹, 笠羽 康正¹, 坂野井 健¹
¹東北大・理

Introduction：オーロラ構造

オーロラ観測は、木星の「自転駆動型」磁気圏を探る有効な手段

木星オーロラの主な構造

- メインオーバル (MO)：中間磁気圏 (30 R_J 付近)
= 磁力線に沿った電流回路に対応 (結合系に大きく寄与)
- 高緯度発光 (HL)：MOより遠方の磁気圏
= 開いた、または遠方の閉じた磁力線に対応
- 低緯度発光 (LL)：MOより近傍の磁気圏
= 内部磁気圏、衛星フットプリントに対応

これらの他、

- 地方時に固定した発光成分 (LA)
- 木星システムIII経度に固定した発光成分 (SA) も存在する

木星の磁気圏-電離圏-熱圏結合系において、熱圏の中性大気とイオンが重要な役割を果たしていることが、近年のシミュレーション研究で明らかになってきた (e.g., Smith et al., 2005; Tao et al., 2009)

Introduction : 近赤外オーロラ

熱圏の中性大気とイオンの同時観測・比較が重要

- 中性大気： H_2 オーロラ発光
 - $\nu=1 \rightarrow 0$ の遷移：2 μm 帯
 - 電気伝導度の大きい高度
- イオン： H_3^+ オーロラ発光
 - $\nu=1 \rightarrow 0$ の遷移：4 μm 帯
 - $\nu=2 \rightarrow 0$ の遷移：2 μm 帯
 - $\nu=3 \rightarrow 1$ の遷移：2 μm 帯



2 μm オーロラ観測が有効な手段

- しかし、2 μm で見られるオーロラは、それぞれ発光高度が違うと考えられてきた
 - H_2 発光高度 ~ 500 km (Cravens et al., 1987)
 - H_3^+ ($\nu=1 \rightarrow 0$) ~ 600 km (Melin et al., 2005)
 - H_3^+ ($\nu=2 \rightarrow 0$) ~ 1000 km (Melin et al., 2005)

3

Introduction : 2 μm 先行研究

2 μm 帯のオーロラは4 μm に比べて発光強度が小さいため観測例が少ないが、 H_2 と H_3^+ の同時観測が可能であり、いくつか興味深い結果が報告されている

- H_2 と H_3^+ の発光分布の違いを見出す (Raynaud et al., 2004)
- H_2 と H_3^+ の風速場を導出 (H_2 : < 1 km/s; H_3^+ : 1-3 km/s) (Chaufray et al., 2011)
- H_3^+ の4 μm (700-1000 K) に比べ、2 μm (1100 K) では温度が高い

詳細なメカニズムは不明だが、これらの違いは観測高度が異なるためだと考えられてきた



高度の観測例はない

本研究の目的

2 μm 帯でのオーロラ発光高度を明らかにするため、すばる望遠鏡を用いた直接観測を行う

4

Vertical profiles : AO

- 観測は、国立天文台すばる望遠鏡（口径8.2 m）搭載の分光器 IRCSを用いて実施した
 - IRCSは波長分解能（ $\lambda/\delta\lambda=20000$ ）と広い波長範囲（ $\sim 0.5\ \mu\text{m}$ ）を特徴とする
- 観測では補償光学（Adaptive Optics; AO）を用いた
 - 大気のゆらぎの影響を補正
 - 回折限界に近い空間分布を得られる

これまでAOを用いるためには、点光源が必要であり、惑星での利用は困難であった

今回の観測では、ガリレオ衛星をガイド星として利用することで、

初めて、AOを用いて木星オーロラ帯の観測に成功した

5

Vertical profiles : AOの効果

- AOによる空間分解能改善：スリットビューワーによる $2\ \mu\text{m}$ 帯撮像の例（* 解析に用いたのは分光観測データ）
 - AOなしの場合、空間分解能 $0.6\ \text{arcsec}$ 程度（ $= 2000\ \text{km}$ ）
 $\Rightarrow$ AOありの場合、 $0.1\sim 0.2\ \text{arcsec}$ 程度（ $= 600\ \text{km}$ ）に改善

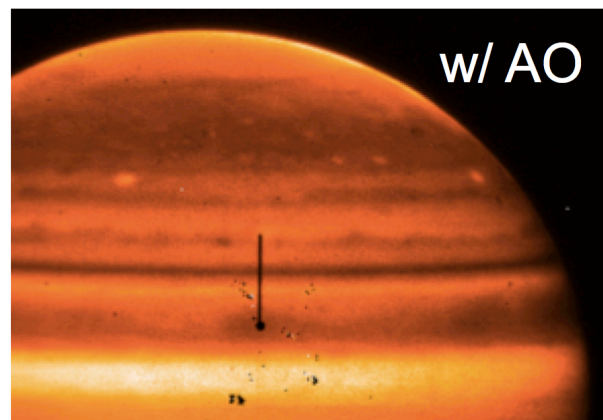
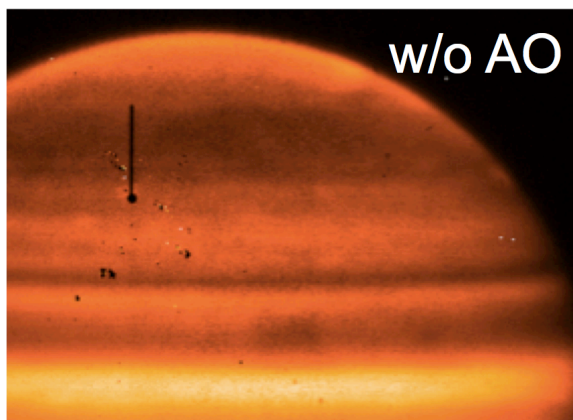


Fig. すばる望遠鏡IRCSを用いて得られた木星画像。
（左）AOなし。（右）AOあり。

AOを用いることで、リムや縞構造などを詳細に観測可能

6

Vertical profiles : 観測ジオメトリ

- AOを用いて、3回の観測に成功
 - 中心経度 (CML) $\sim 260^\circ$
 - 積分時間 5分
 - スリット 0.14×5.17 arcsec
- #AO1はメインオーバルを横切るジオメトリ
- #AO2, 3はメインオーバルの縁を横切るジオメトリ
 - H_3^+ ($\nu=2 \rightarrow 0$)を24本
 - H_3^+ ($\nu=3 \rightarrow 1$)を11本
 - H_2 ($\nu=1 \rightarrow 0$)を3本 観測

Table. 観測時刻とジオメトリ

#	Time (2011/12/1, UT)	CML(III)
1	9:34	259
2	9:44	265
3	9:50	269

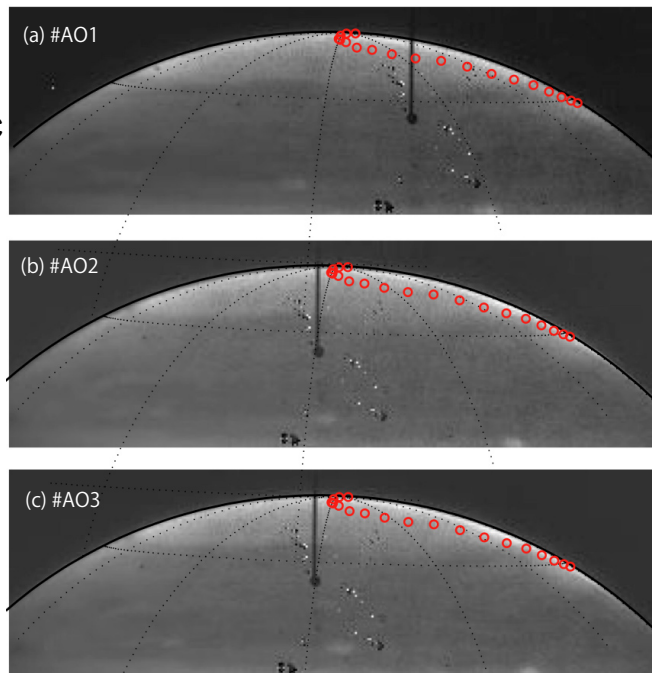


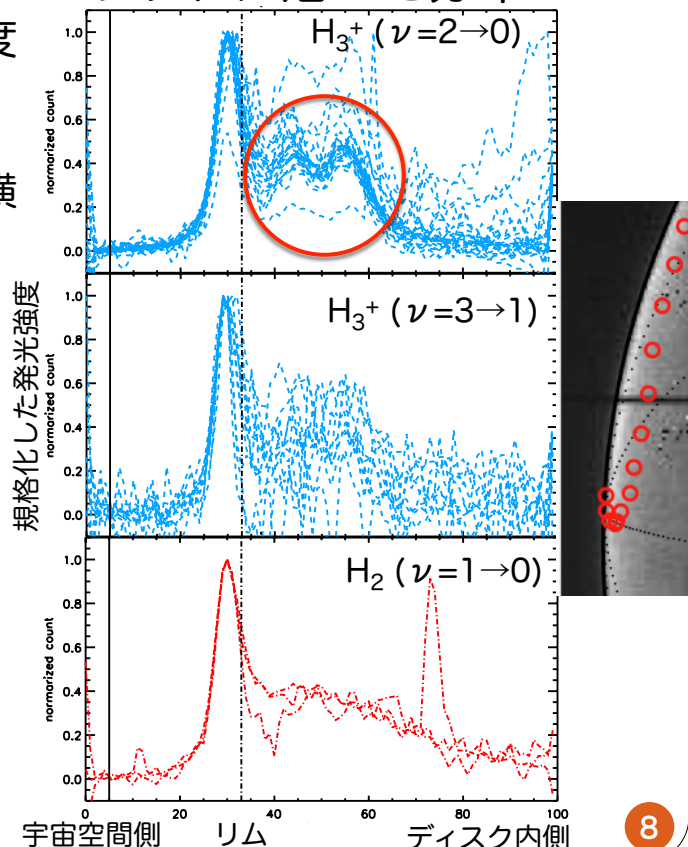
Fig. AO観測時のジオメトリ。黒い縦線がスリット位置。赤い点線は予想されるメインオーバル位置。

7

Vertical profiles : スリットに沿った分布

- スリットに沿った発光強度分布 (1次処理後: ダーク、フラット、波長較正、背景光引)
- #AO1 (メインオーバルを横切る: 右図)
- リムよりも外側 : 広がった発光が見られる $\Rightarrow$ 高度分布を反映?
- ディスク内側 : 赤丸で示した領域の発光 $\Rightarrow$ 空間分布を反映?

Fig. #AO1のスリットに沿った発光強度分布。複数の線は、観測された個々の輝線に対応する。右図はグラフの向きに合わせた観測ジオメトリ。



8

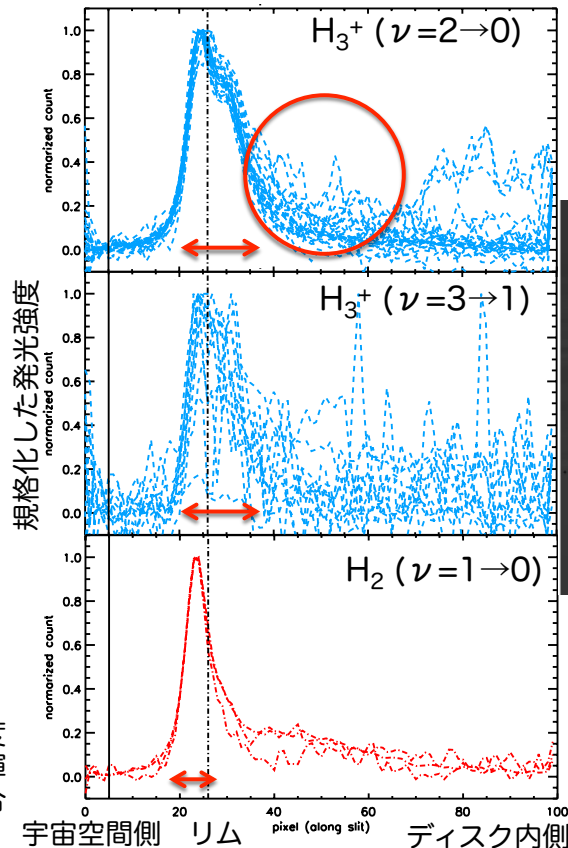
Vertical profiles : スリットに沿った分布

- #AO2 (メインオーバルの縁を横切る：右図)

- リムよりも外側：
#AO1に似ている
- ディスク内側：
#AO1に比べ弱い発光
- リム付近：
 - H_3^+ は#AO1に比べ広がっている
 - H_2 は#AO1と同様

* #AO3は#AO2に近いジオメトリのため、以後、割愛

Fig. #AO2のスリットに沿った発光強度分布。複数の線は、観測された個々の輝線に対応する。右図はグラフの向きに合わせた観測ジオメトリ。



9

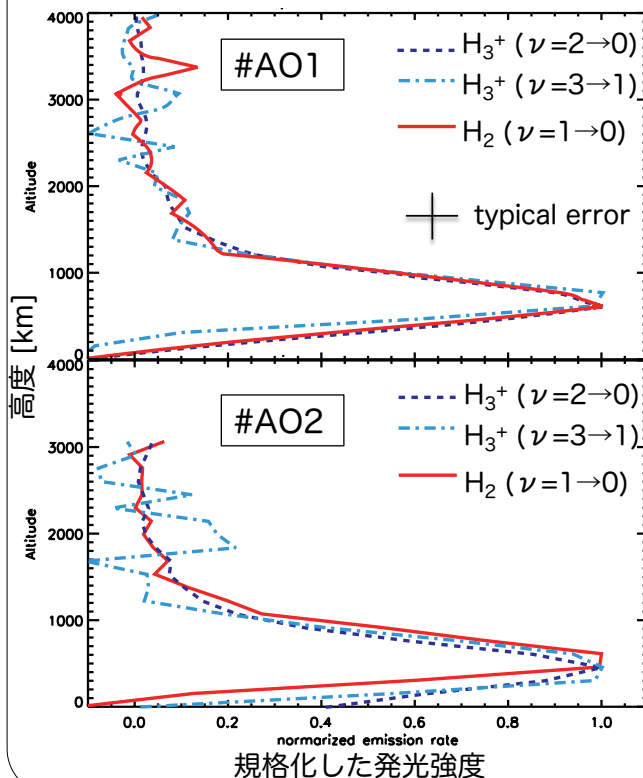
Vertical profiles : 高度解析

- オニオンピーリングの手法を用いて、高度構造を導出した
 - 発光層を薄い層に分割して考える
 - 観測値は各層の発光強度を視線方向に積分したものと仮定
 - 最上層から順に、単位体積あたりの発光強度を求める
 - 2つの仮定を含んでいる：
 - 大気が光学的に薄い
 - 赤外オーロラに関しては成立 (Lystrup et al., 2008; Kim, private communication)
 - 空間分布が一様
 - 実際には、オーロラは空間構造を持つ
- ⇒ 空間分布の影響は、本研究の後半で検証

10

Vertical profiles : H_3^+ , H_2 高度分布

高度分布導出結果



- H_3^+ ($\nu=2 \rightarrow 0$), H_3^+ ($\nu=3 \rightarrow 1$), H_2 ($\nu=1 \rightarrow 0$) の高度をはじめて導出



予想に反し、

- H_3^+ ($\nu=2 \rightarrow 0$), H_3^+ ($\nu=3 \rightarrow 1$), H_2 ($\nu=1 \rightarrow 0$) は、ほぼ同じ高度(600km)で光っている

- #AO1の方が、#AO2よりもピーク高度が200kmほど高い

Fig. H_3^+ ($\nu=2 \rightarrow 0$), H_3^+ ($\nu=3 \rightarrow 1$), H_2 ($\nu=1 \rightarrow 0$) の発光高度分布。上が #AO1, 下が #AO2 の結果。

11

Vertical profiles : H_3^+ , H_2 高度の解釈

高度の解釈

- 先行研究にもとづき、観測されたオーロラ発光高度(~600 km)に対応する降込み電子エネルギーを推定すると、
 - H_3^+ : > 100 keV
 - H_2 : 10~100 keVの間 となり、

降込み電子のエネルギーを考慮するだけでは、 H_3^+ と H_2 の高度を同時に説明できない

- H_3^+ にnon-LTEの効果が強く効いている可能性がある
 - non-LTE : LTE (局所熱力学平衡) が成り立たない
 - 大気が薄い高高度 (放射の時定数 < 衝突の時定数)
 - 衝突が少ないために励起が起きにくく、放射が抑制
 - 放射の時定数が短い H_3^+ ($\nu=2 \rightarrow 0$) や H_3^+ ($\nu=3 \rightarrow 1$) は影響を受けやすい

12

Vertical profiles : 考察

- Non-LTE効果が強いことの解釈
 - 高高度の密度が予想よりも小さい
= H_3^+ のスケールハイト (温度) が小さい
 - $\Rightarrow$ 今後、温度の高度分布導出で検証が可能
 - 2 μm で H_3^+ と H_2 が同じ高度であることのインパクト
これまでの理解
 - 風速：2 μm では H_3^+ と H_2 は高度が異なるため、風速が大きく異なる
 - 温度：2 μm の H_3^+ は高い高度を見ているため、4 μm の H_3^+ より温度が高い
- 
- 風速： H_3^+ と H_2 は同じ高度で、大きく異なる風速を持つ
 - Tao et al., ら近年の研究で、 $V(H_2)/V(H_3^+) \sim 0.3$ 程度は妥当
 - 温度：2 μm での H_3^+ の高い温度は、時間変動による可能性

13

Vertical profiles : 水平分布の影響

- オーロラ水平分布の影響を検証
 - Satoh et al., 1996のモデルを改良
 - 空間分解能 360km $\rightarrow$ 15km
 - 高度構造を含める
 - メインオーバルの位置 O6モデル $\rightarrow$ 経験モデル (Nichols et al., 2009)
- オーロラの各領域の発光強度は、Satoh et al., 1996の結果を利用 (イメージング観測にもとづく)
 - MO, HL, LL, LA, SA および、ディスク発光 (DS)
 - * このモデルでは、MOの成分はほぼSAとして表現されている。

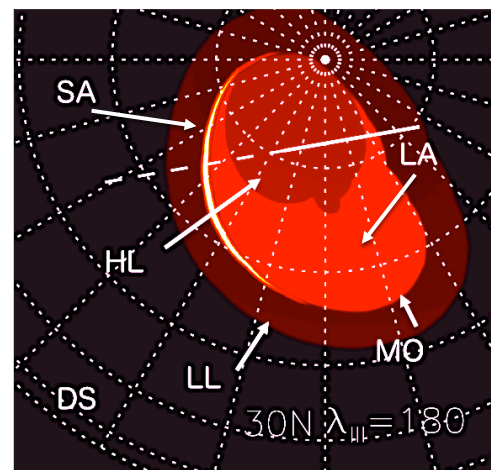


Fig. 作成したオーロラ発光分布モデルを極展開した図。白線は#AO1に対応するスリット位置

14

Vertical profiles : モデル計算-スリットに沿った分布

- スリットに沿った発光強度分布の特徴をよく再現
 - #AO1のディスク内側：赤丸で示した領域の発光 $\Rightarrow$ SA, LAの寄与
 - #AO2のリム付近：#AO1に比べ広がっている $\Rightarrow$ SA, LLの寄与

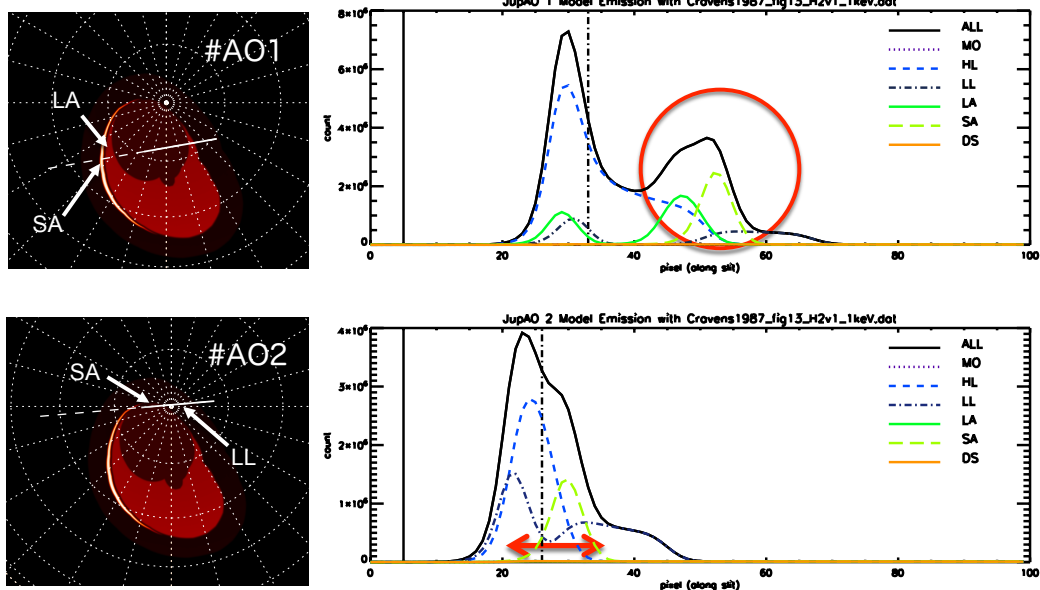


Fig. (左) オーロラ発光分布モデルの極展開。白線はスリット位置で、実線がリムより上に寄与する領域を示す。(右) スリットに沿った発光強度分布。各成分の寄与も示す。

15

Vertical profiles : モデル計算- H_3^+ 高度分布

- オニオンピーリングによる高度分布： H_3^+ の例
 - 導出した高度分布（黒実線）は、もとの高度分布（黒点線）をよく再現
 - #AO1では、HL（青破線）の寄与が支配的
 - #AO2では、HLに加え、LL（濃い青の一点鎖線）の寄与もある。

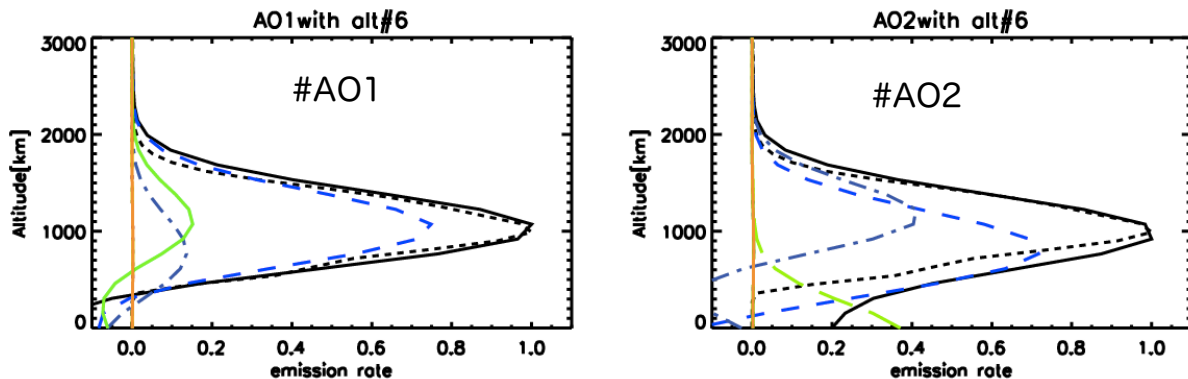


Fig. H_3^+ ($v=2 \rightarrow 0$)のNon-LTE時の高度分布 (Melin et al., 2005) を与えた時の、高度分布導出結果。点線（黒）がもとの高度分布、実線（黒）がオニオンピーリングで導出された高度分布。カラーの線はオーロラ各成分の寄与。

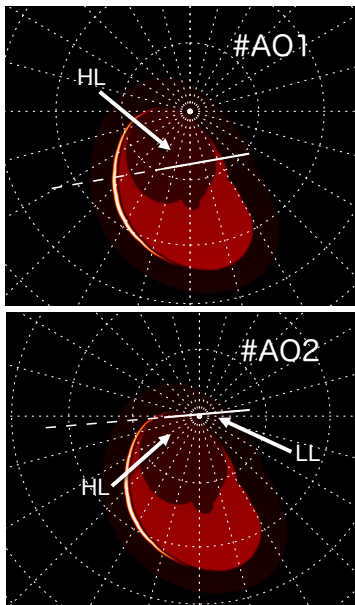
ピーク高度については、もとの高度をよく再現
(± 300 km以内の誤差)

16

Vertical profiles : 結論

- 空間分布の影響を評価した結果・・・

今回得られたオーロラ発光高度の結果は妥当



ただし、

- #AO1はHL
 - #AO2はHLとLL
- のオーロラ高度を見ている可能性が高い



- 今後は、磁気圏-電離圏-熱圏結合に大きく寄与するMOの観測が必要
- MO単体の観測は困難
 - HLのみ、LLのみ、およびMOを含む観測を組み合わせ、HLとLLの影響を除く必要がある

17

Summary

- 新しいAO観測の手法を用いて、2 μ m帯でH₃⁺, H₂の発光高度分布をはじめて導出した

今まで不明だったオーロラの観測高度を知るために、地上望遠鏡+AOの観測が有効であることを示した

- これまでの予想と異なり、2 μ m帯でH₃⁺, H₂の発光高度に大きな差はなかった (高度 400~600 km)



これまでの観測の解釈に変更

- 風速：H₃⁺ とH₂は同じ高度でも、大きく異なる風速を持つ
- 温度：2 μ mで観測されたH₃⁺ の高い温度は、時間変動の可能性はある

18

Summary and future works

今回の成果の限界

- オーロラの空間分布モデルを用いて検討した結果、MOではなく主にHLとLLの寄与を見ていた
- 仮定したオーロラ分布は先行研究にもとづいており、観測時刻のオーロラ分布を反映していない
- H_3^+ , H_2 の発光分布は異なるが、 H_3^+ のみの分布を用いている



今後のAO観測展望

- HLとLL、およびMOを含む複数ジオメトリのAO観測
 - HLとLLの寄与を除き、MOの情報を引き出す
- IRCSの3.4 μm オーロラ撮像と分光を組み合わせたAO観測
 - 観測時刻のオーロラ構造を反映した空間分布モデルの作成
 - よりピンポイントに、見たい場所を狙った観測
- 風速、温度、密度の高度分布観測