

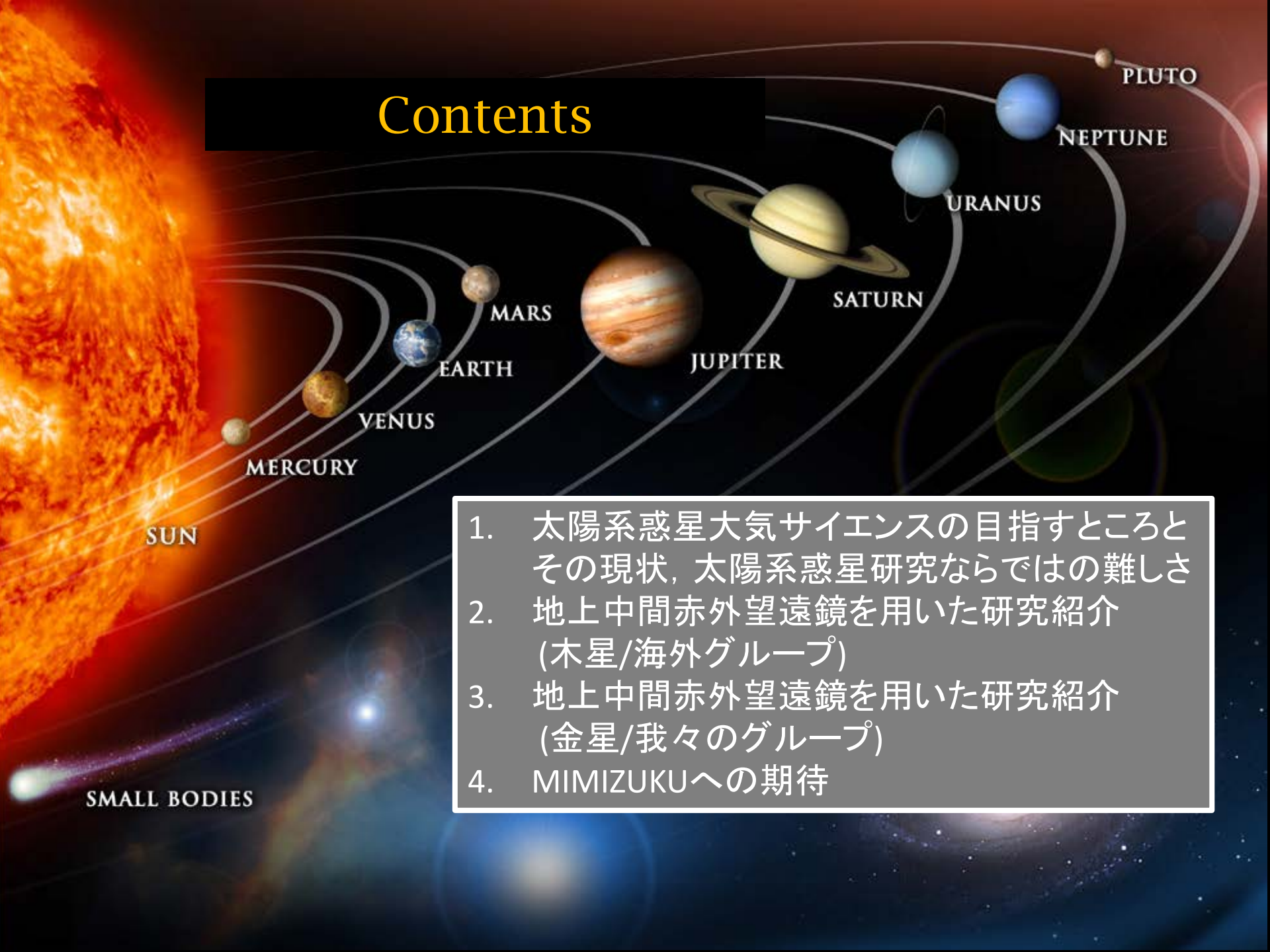
# MIMIZUKUによる太陽系惑星研究の新展開

佐藤隆雄

学振特別研究員 (PD)

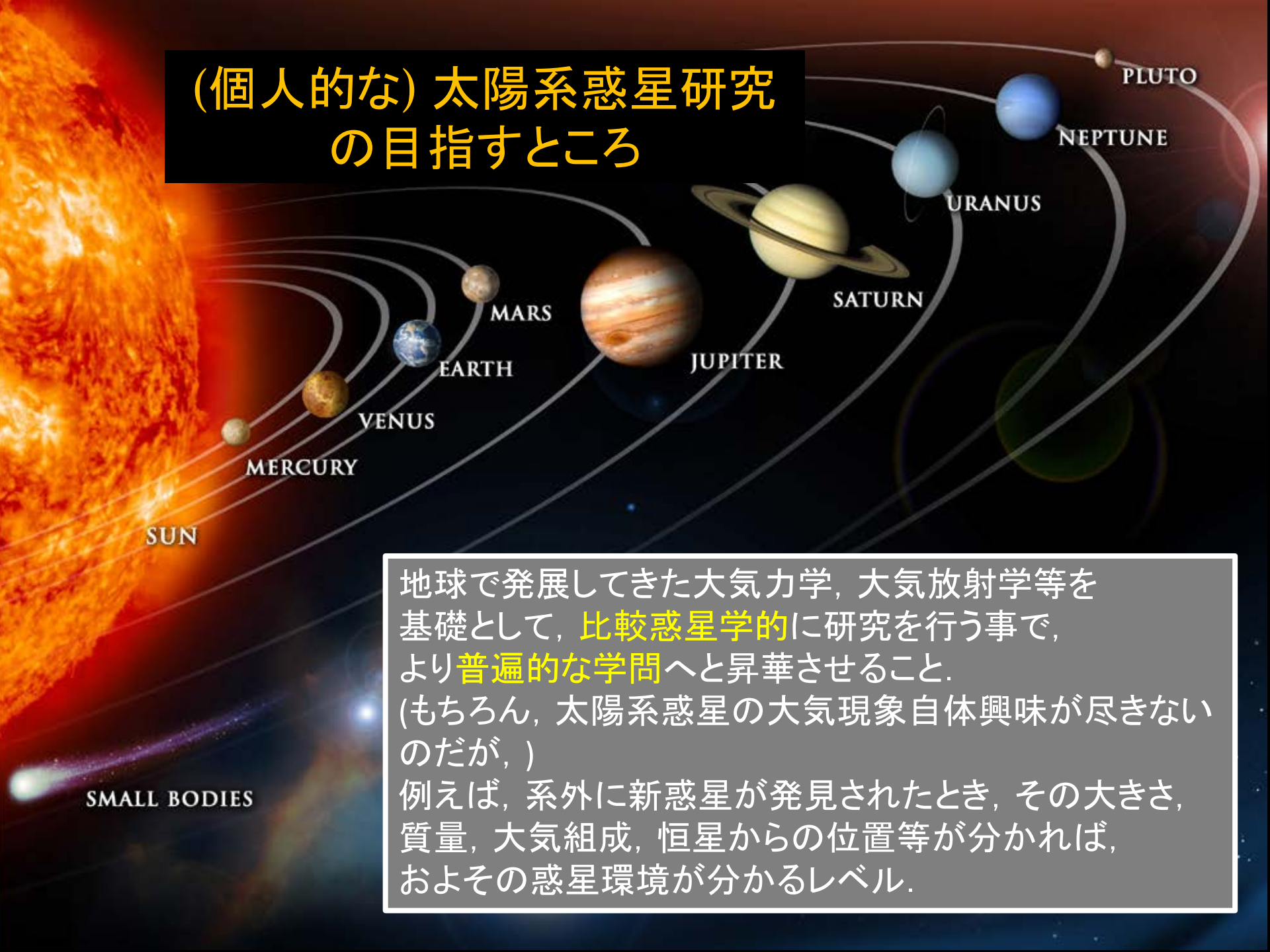
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

# Contents



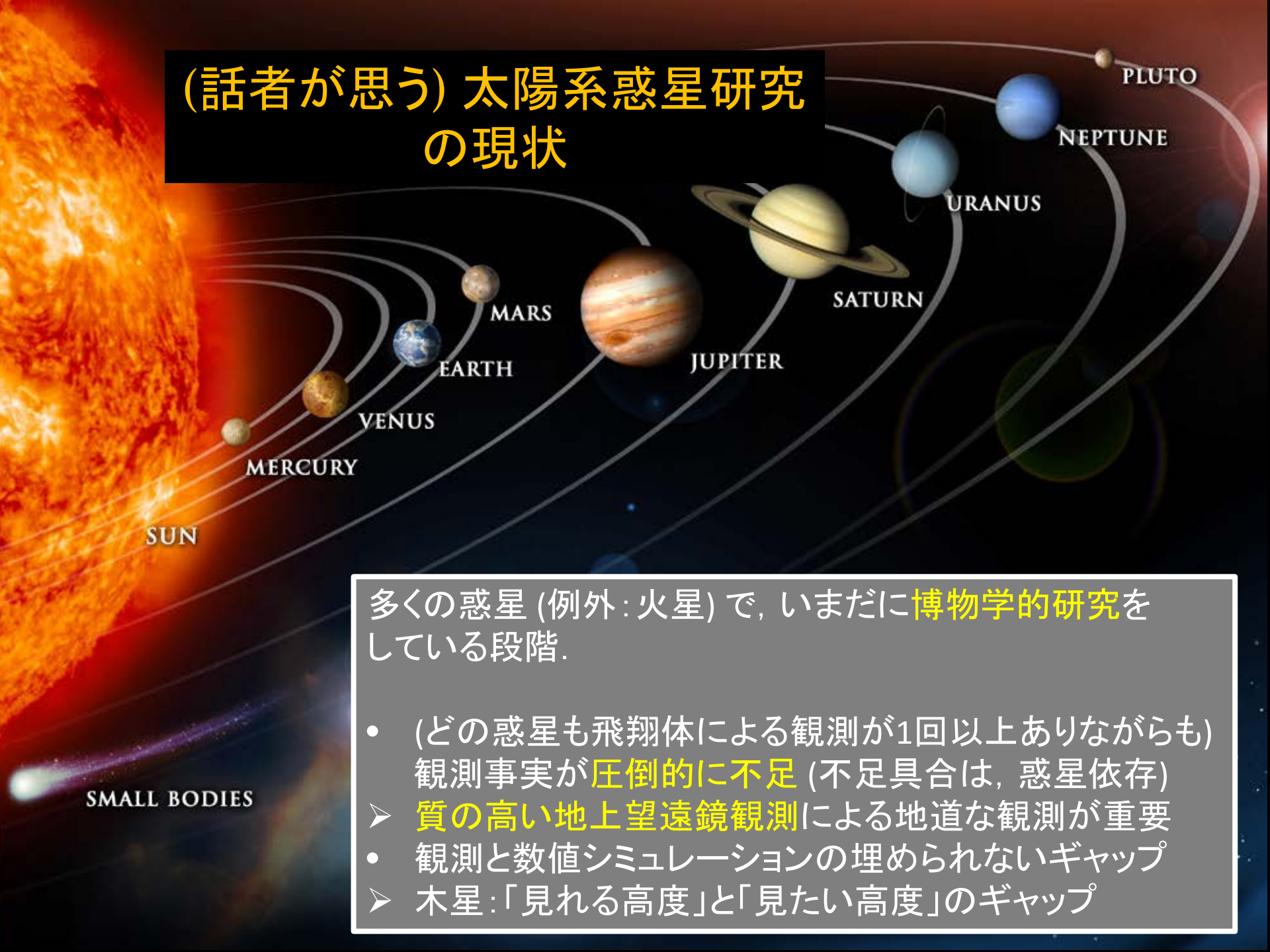
1. 太陽系惑星大気サイエンスの目指すところとその現状, 太陽系惑星研究ならではの難しさ
2. 地上中間赤外望遠鏡を用いた研究紹介 (木星/海外グループ)
3. 地上中間赤外望遠鏡を用いた研究紹介 (金星/我々のグループ)
4. MIMIZUKUへの期待

# (個人的な) 太陽系惑星研究 の目指すところ



地球で発展してきた大気力学，大気放射学等を  
基礎として，**比較惑星学的**に研究を行う事で，  
より**普遍的な学問**へと昇華させること。  
(もちろん，太陽系惑星の大気現象自体興味が尽きない  
のだが，)  
例えば，系外に新惑星が発見されたとき，その大きさ，  
質量，大気組成，恒星からの位置等が分かれば，  
およその惑星環境が分かるレベル。

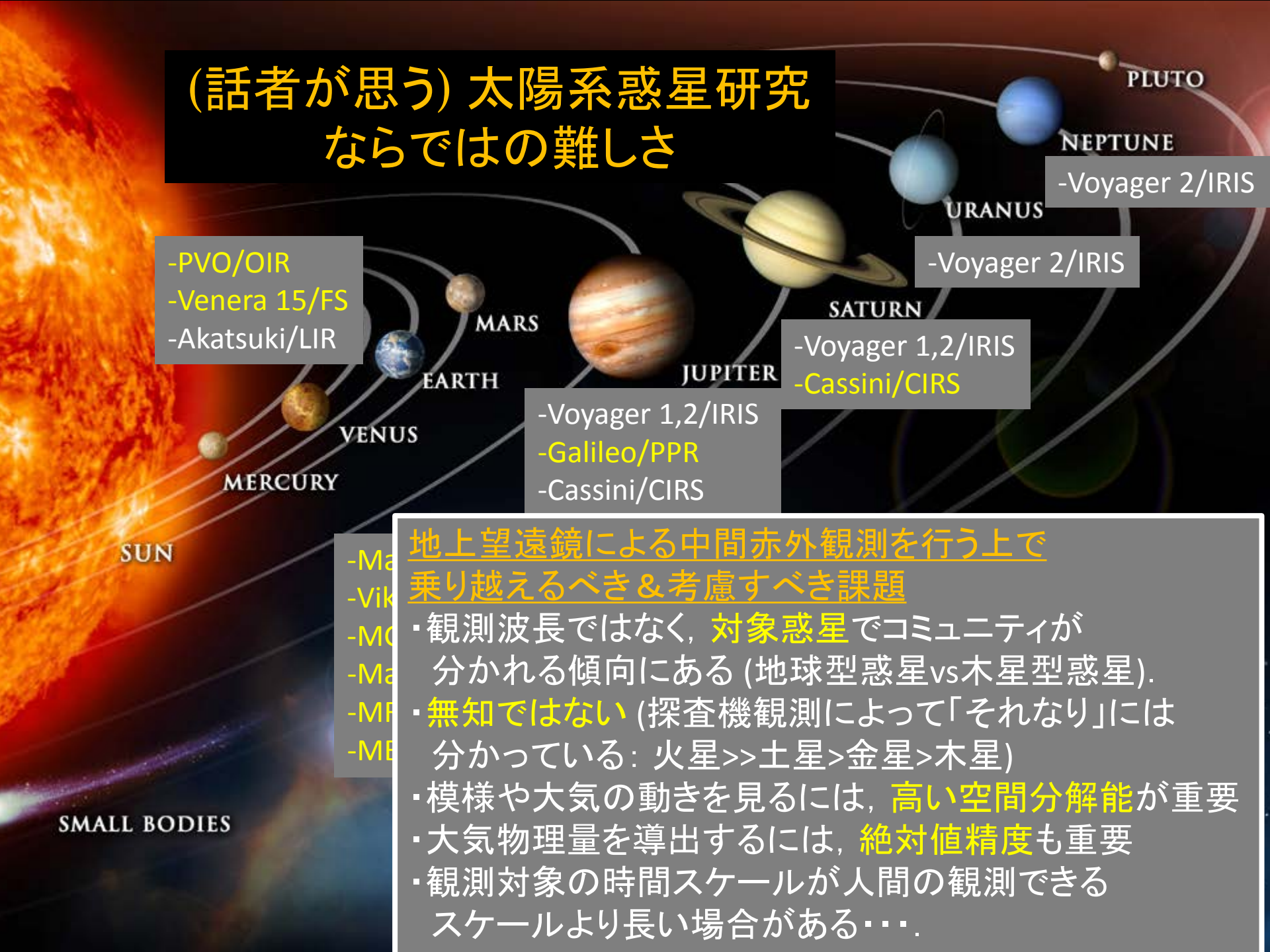
# (話者が思う) 太陽系惑星研究 の現状



多くの惑星 (例外: 火星) で, いまだに**博物学的研究**をしている段階.

- (どの惑星も飛翔体による観測が1回以上ありながらも) 観測事実が**圧倒的に不足** (不足具合は, 惑星依存)
  - **質の高い地上望遠鏡観測**による地道な観測が重要
- 観測と数値シミュレーションの埋められないギャップ
  - 木星: 「見れる高度」と「見たい高度」のギャップ

# (話者が思う) 太陽系惑星研究 ならではの難しさ



## 地上望遠鏡による中間赤外観測を行う上で 乗り越えるべき&考慮すべき課題

- ・観測波長ではなく、**対象惑星**でコミュニティが分かれる傾向にある (地球型惑星vs木星型惑星).
- ・**無知ではない** (探査機観測によって「それなり」には分かっている: 火星>>土星>金星>木星)
- ・模様や大気の動きを見るには、**高い空間分解能**が重要
- ・大気物理量を導出するには、**絶対値精度**も重要
- ・観測対象の時間スケールが人間の観測できるスケールより長い場合がある...

# Jupiter: 魅力的な大気現象

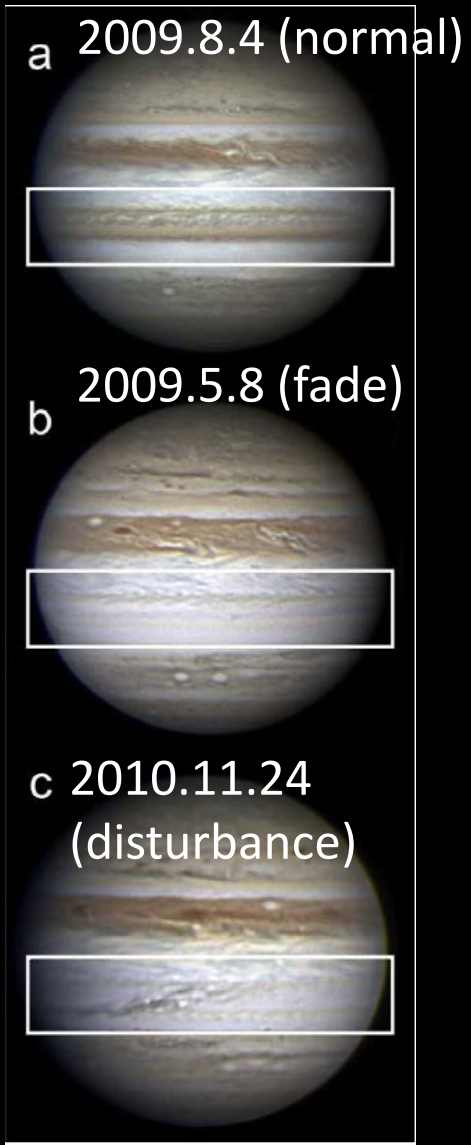
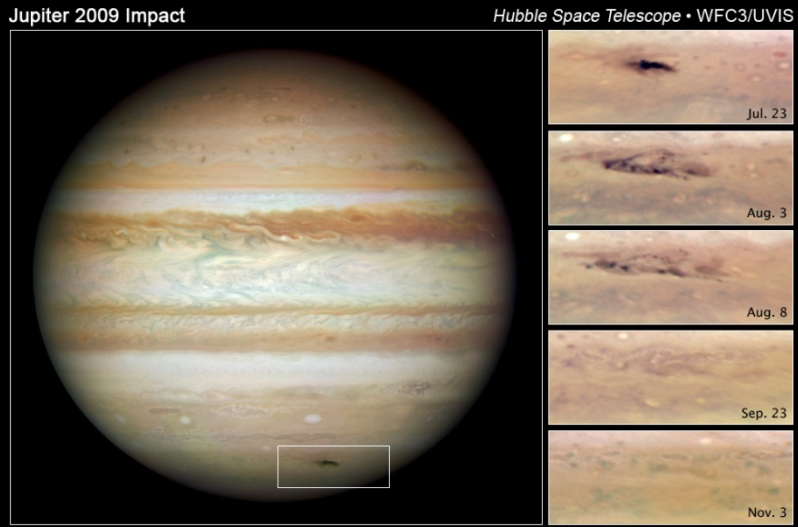
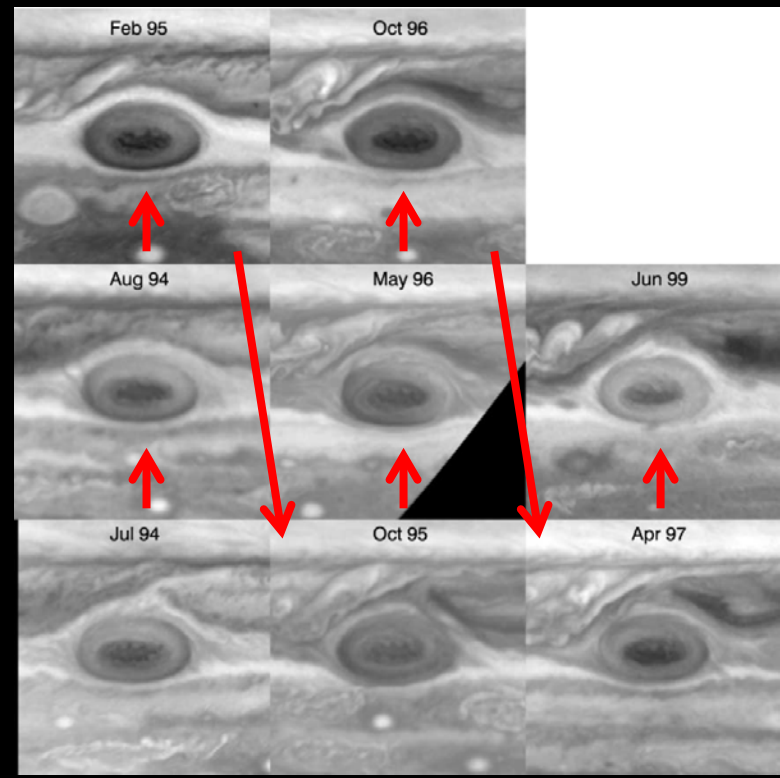


Fig. HST (410 nm) で取得した  
大赤斑 (GRS) の時間変化  
(1996年-2000年)  
[Simon-Miller et al., 2002].

大赤斑は、徐々に小さく  
なっている  
[Simon-Miller et al., 2002].



NASA, ESA, M. Wong (University of California, Berkeley), H. B. Hammel (Space Science Institute, Boulder, Colo.), I. de Pater (University of California, Berkeley), and the Jupiter Impact Team STScI-PRC10-16

Fig. 2009年に発見された木星衝突痕

Fig. 南赤道縞 (SEB) 攪乱  
[Pérez-Hoyos et al., 2012]

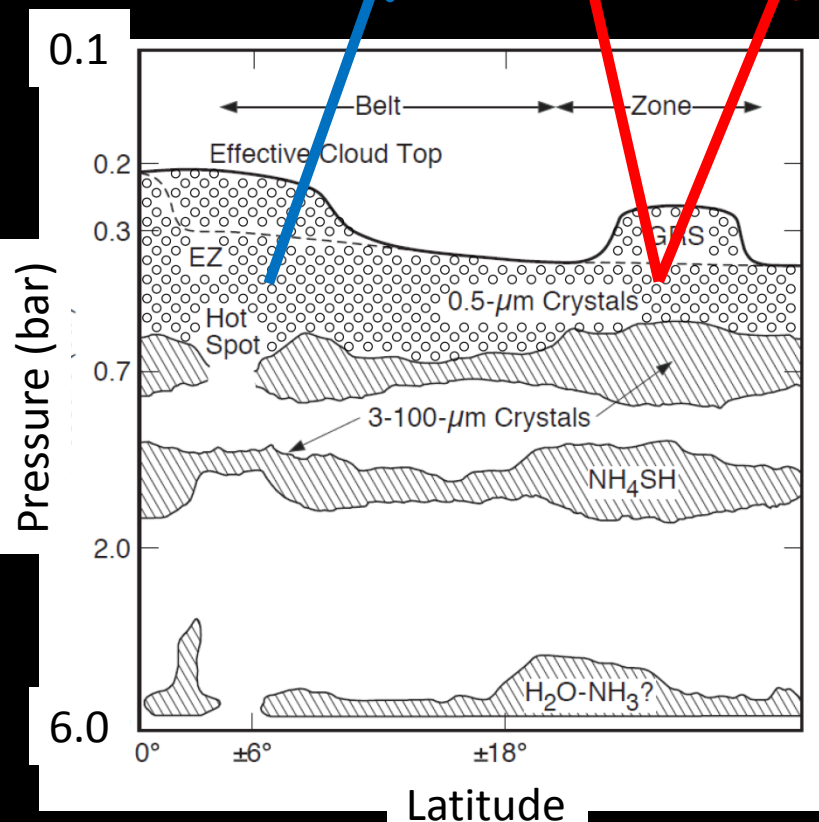
# Jupiter: 可視・近赤外波長, 中間赤外波長で分かること



Fig. Cassini/ISS MT3 (890 nm)

中間赤外波長

可視・近赤外波長



可視・近赤外波長 (含むメタン吸収帯)

- ・雲の高度
- ・雲の光学的厚さ
- ・雲の散乱特性 (一次散乱アルベド)

中間赤外波長 (8-25 μm)

- ・温度分布
- ・雲の光学的厚さ
- ・大気成分 (NH<sub>3</sub>, PH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, Para-H<sub>2</sub>)

可視・近赤外波長と中間赤外波長は同一高度領域に感度があり, 相補的な関係にある。

# 探査機による中間赤外観測

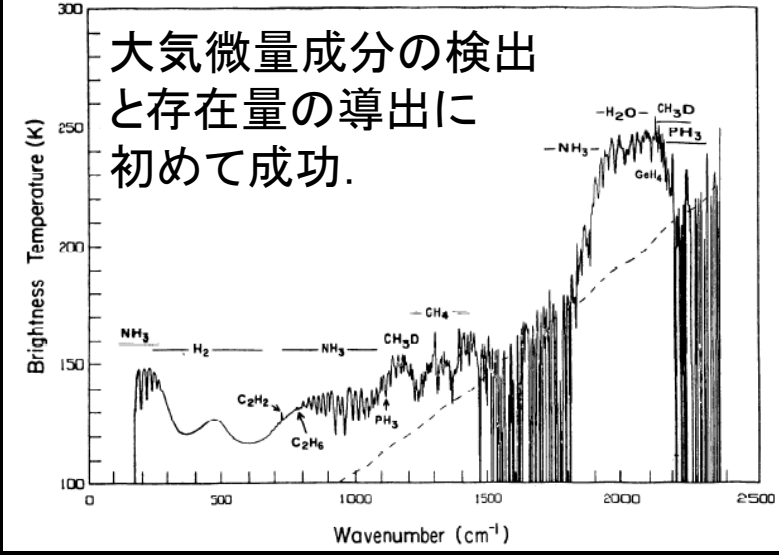
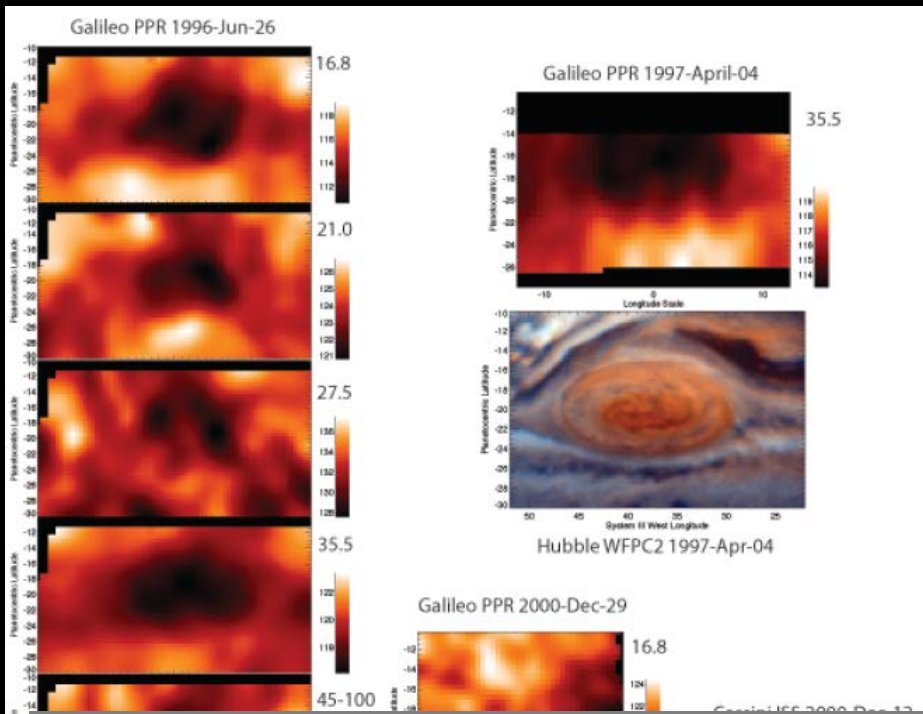
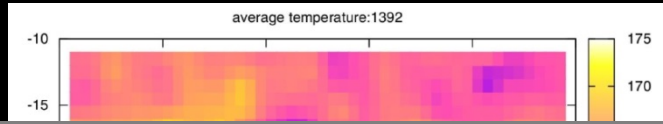


Fig. Voyager/IRISが取得した北赤道縞 (NEB) における平均スペクトル [Carlson et al., 1994].



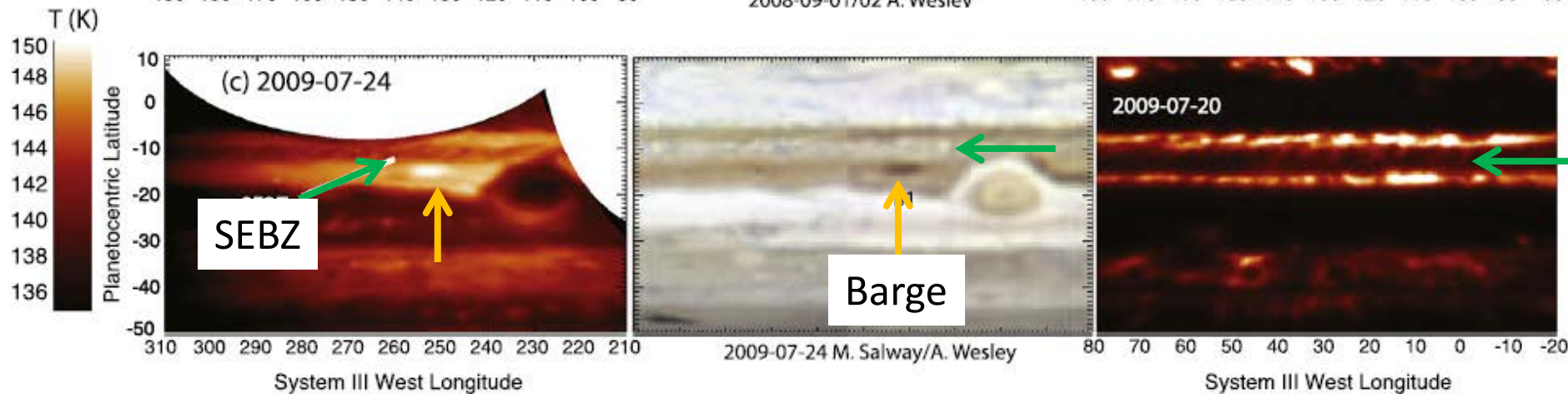
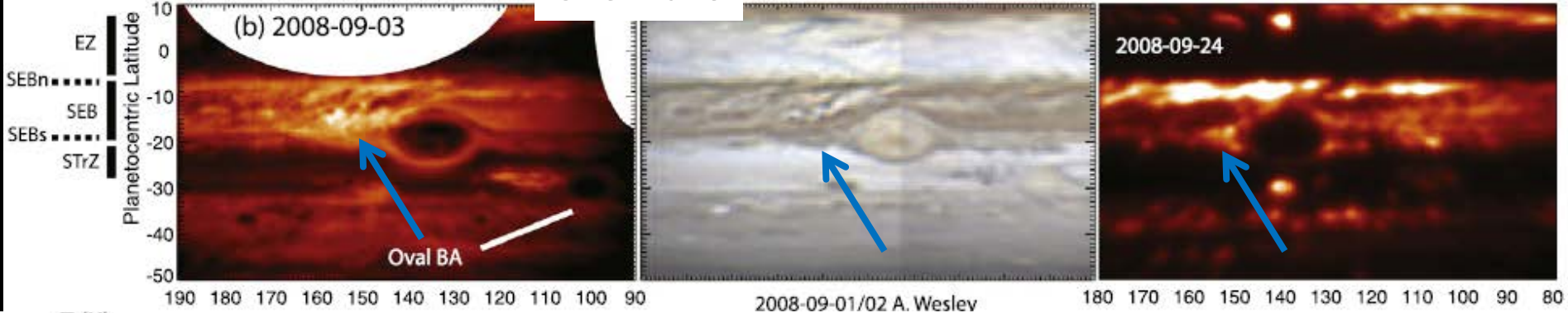
- 木星周回時の撮像観測: Galileo/PPR
- (ハイゲインアンテナの故障, PPR自体の故障もあり) 空間分解能は低く, かつ十分な観測はできなかった.
- 木星フライバイ時の分光観測: Voyager/IRIS, Cassini/CIRS
- (地上からは不可能な波長帯も含む) 中分散スペクトルから温度や大気成分を導出→大気力学や大気化学に関する重要な知見を提供.
- マッピング能力: (距離が遠かったこともあり) 可視画像との比較は困難.
- 大型望遠鏡を用いた撮像観測によるブレイクスルーの可能性あり.



VLT/VISIR 8.6  $\mu\text{m}$   
( $<0.8$  bar)

Visible light  
(0.2-0.3 bar)

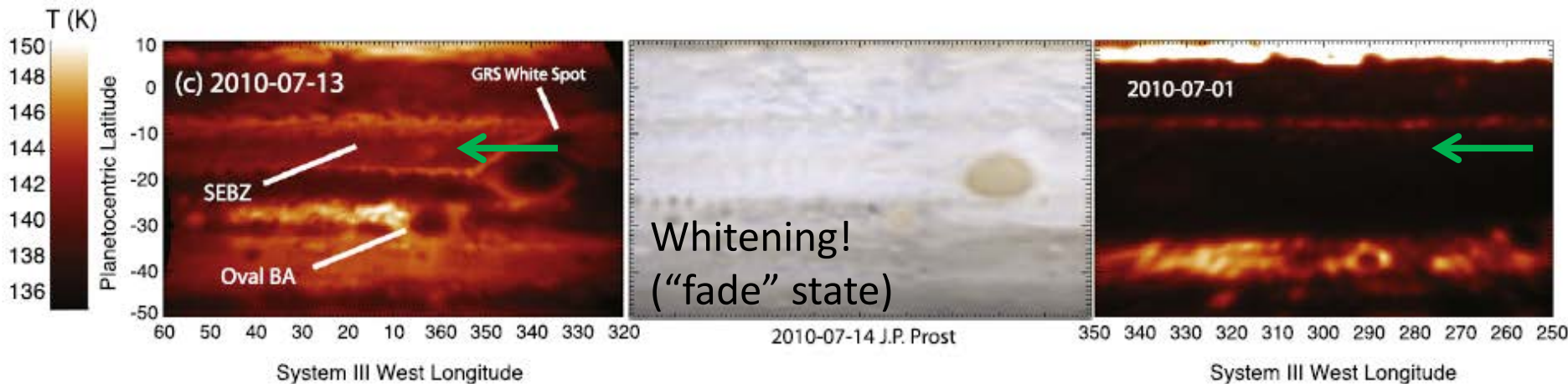
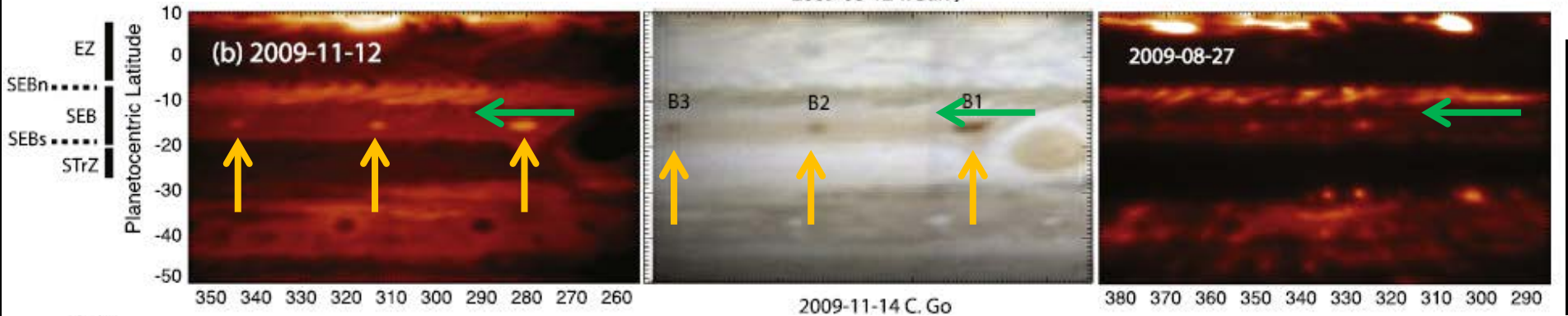
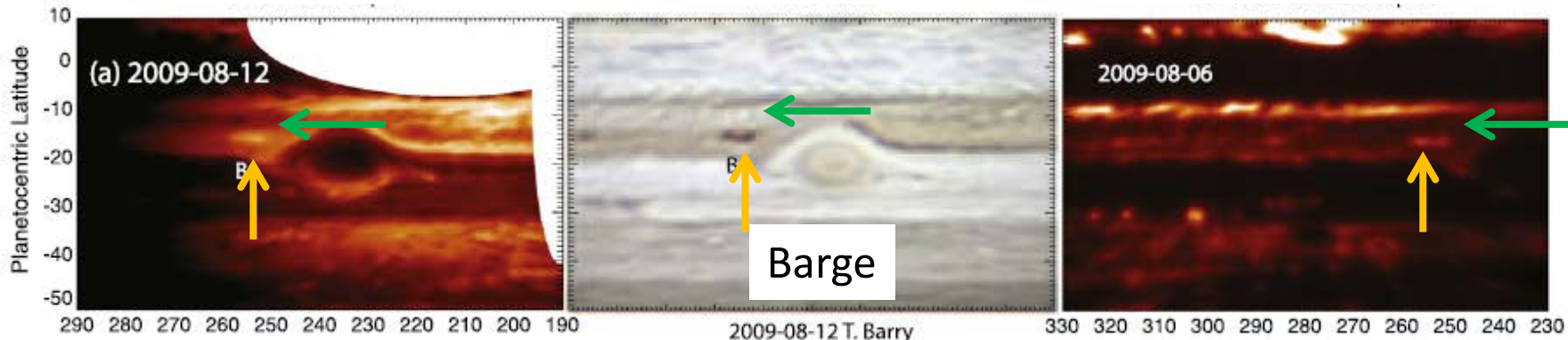
IRTF/NSFCAM2 4.8  $\mu\text{m}$   
( $<2-3$  bar)



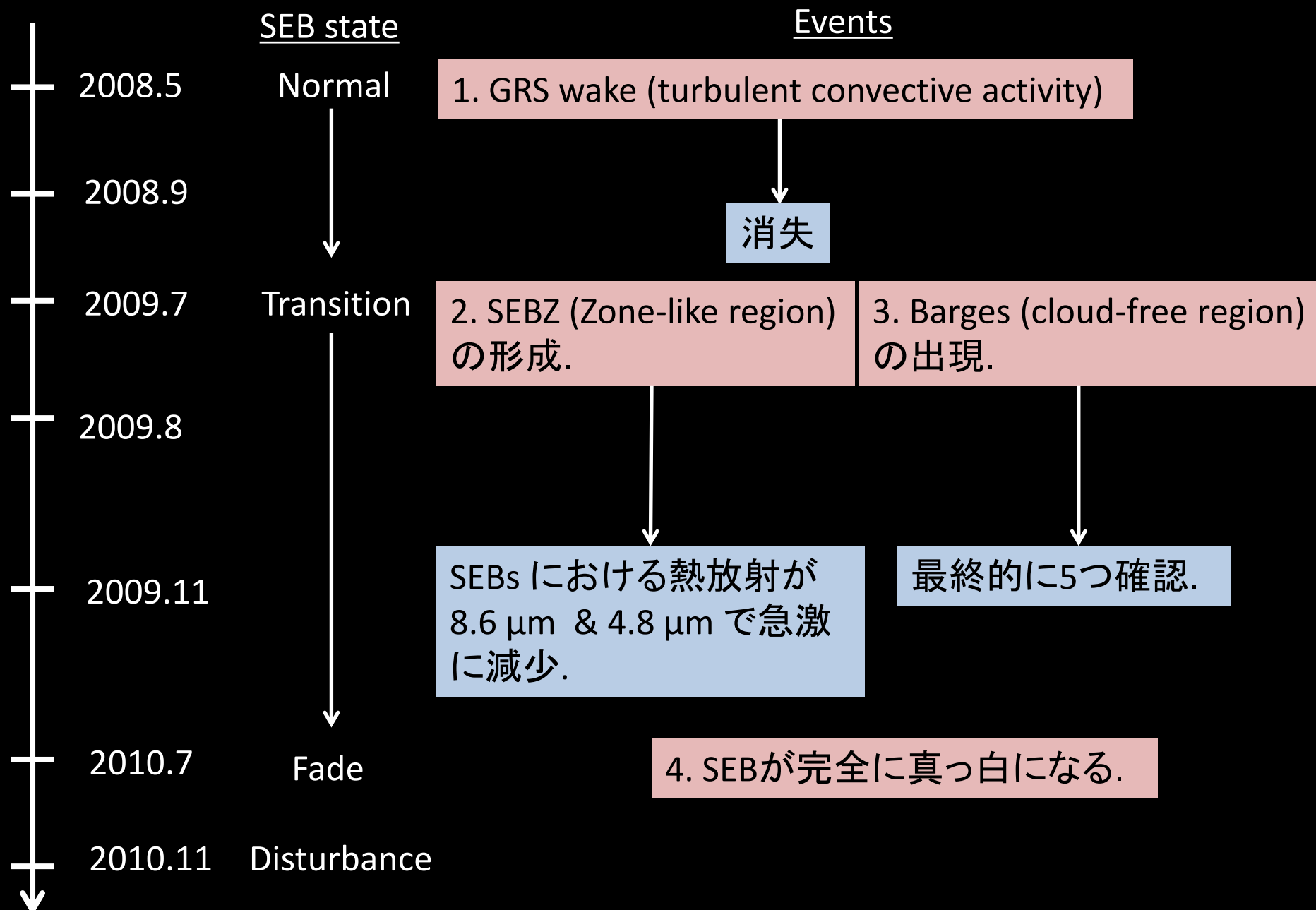
VLT/VISIR 8.6  $\mu\text{m}$   
( $<0.8$  bar)

Visible light  
(0.2-0.3 bar)

IRTF/NSFCAM2 4.8  $\mu\text{m}$   
( $<2-3$  bar)

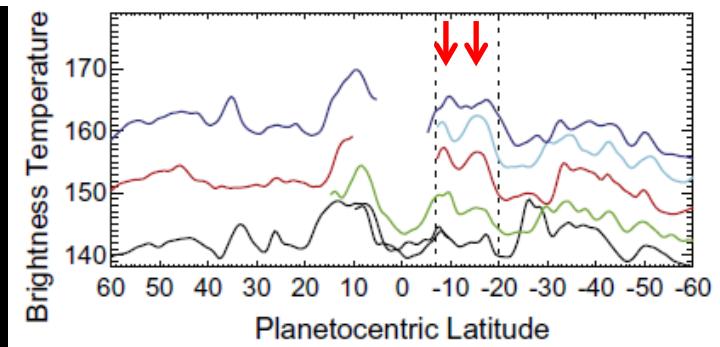


# 観測まとめ

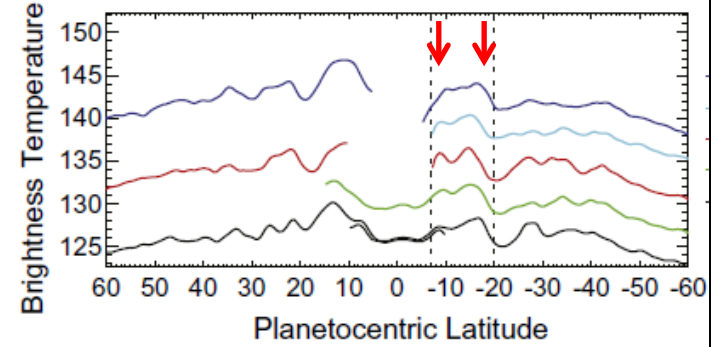


# 輝度温度の時間変化

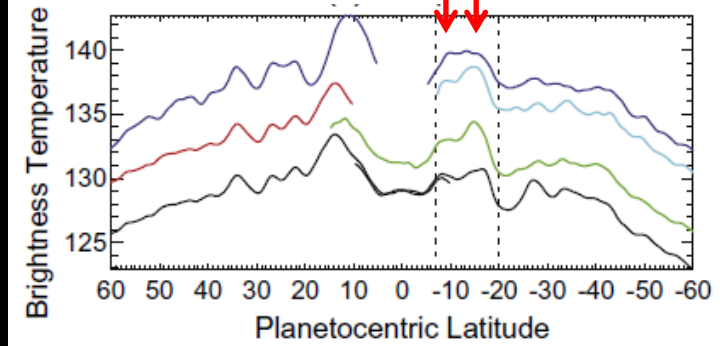
8.6  $\mu\text{m}$  (Aerosol, T(p) at 0.65 bar)



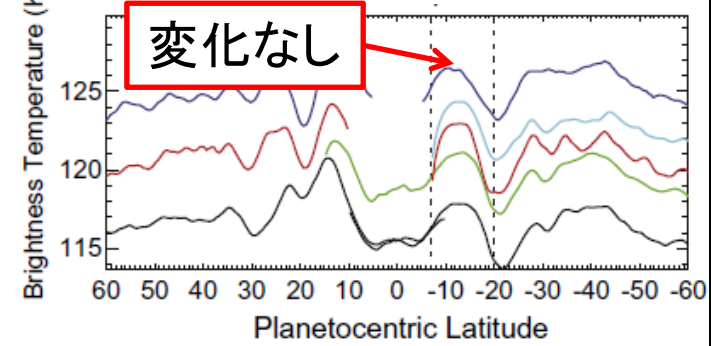
10.8  $\mu\text{m}$  (T(p) at 0.4 bar)



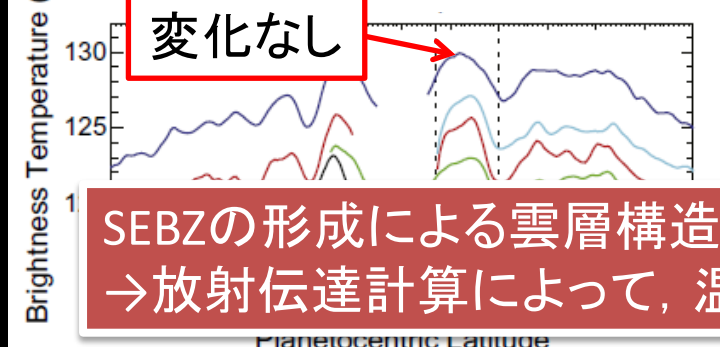
13.0  $\mu\text{m}$  (T(p) at 0.46 bar)



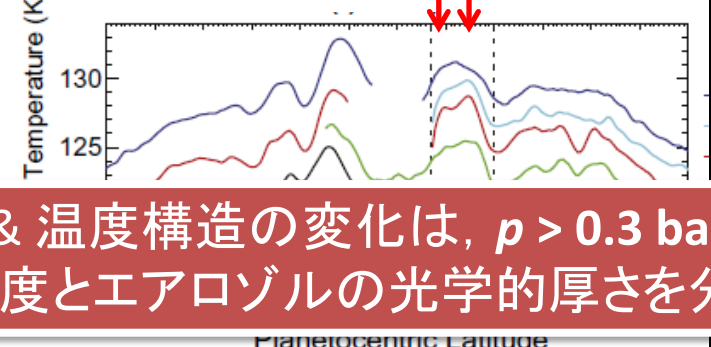
17.6  $\mu\text{m}$  (T(p) at 0.2 bar)



18.7  $\mu\text{m}$  (T(p) at 0.27 bar)



19.5  $\mu\text{m}$  (T(p) at 0.4 bar)



normal

— 2008 Sep

normal  $\rightarrow$  fade

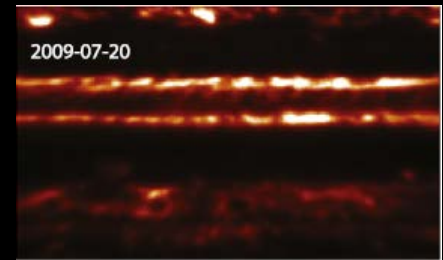
— 2009 Jul

— 2009 Aug

— 2009 Nov

fade

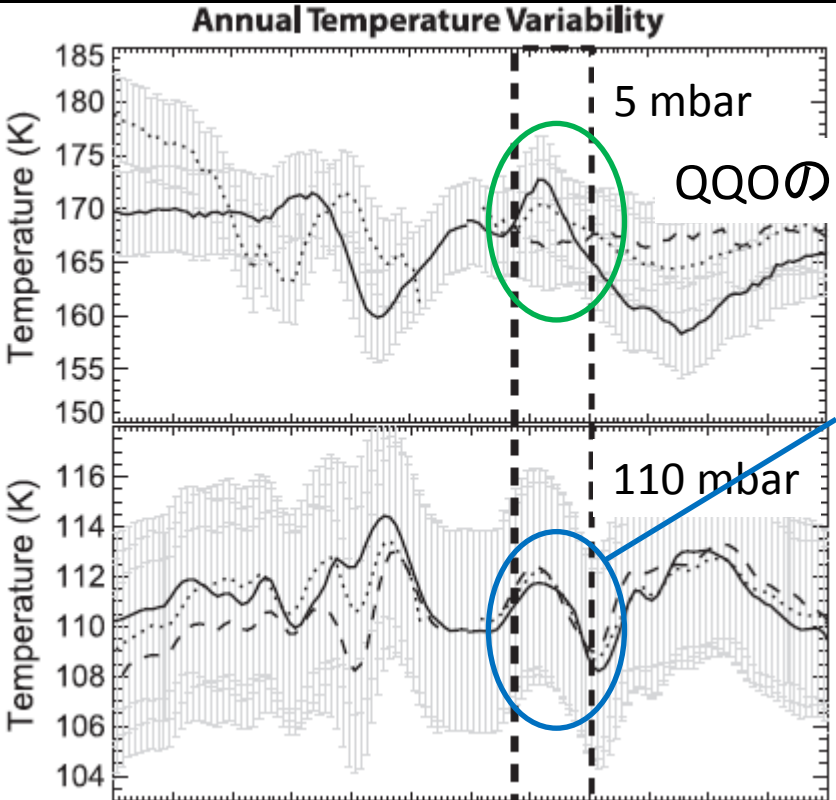
— 2010 Jun/Jul



4.8  $\mu\text{m}$ における熱放射。

SEBZの形成による雲層構造 & 温度構造の変化は,  $p > 0.3$  barでおきている。  
 $\rightarrow$ 放射伝達計算によって, 温度とエアロゾルの光学的厚さを分離する。

# 温度構造の時間変化



QQOの影響?

変化なし

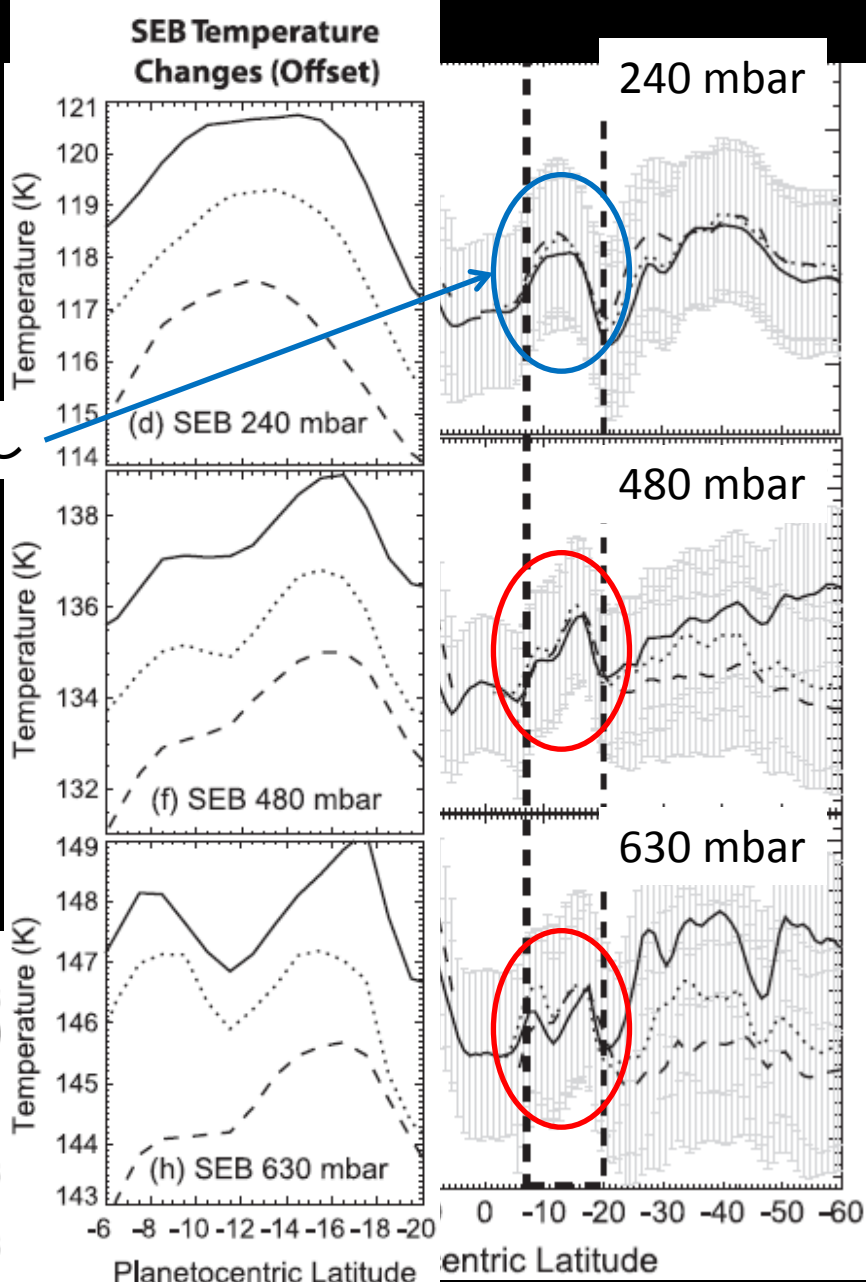


Fig. 高度毎の温度構造の緯度分布.

SEBZでは周辺に比べて  
温度が減少  
(e.g., 2010年7月  
コントラスト @0.63 mbar  
1±0.5 K).

- |        |            |
|--------|------------|
| North: |            |
| —      | 2010-06-23 |
| ⋯      | 2009-08-10 |
| - - -  | 2008-09-01 |
| South: |            |
| —      | 2010-07-13 |
| ⋯      | 2009-11-11 |
| - - -  | 2008-09-03 |

# エアロゾルの光学的厚さの時間変化

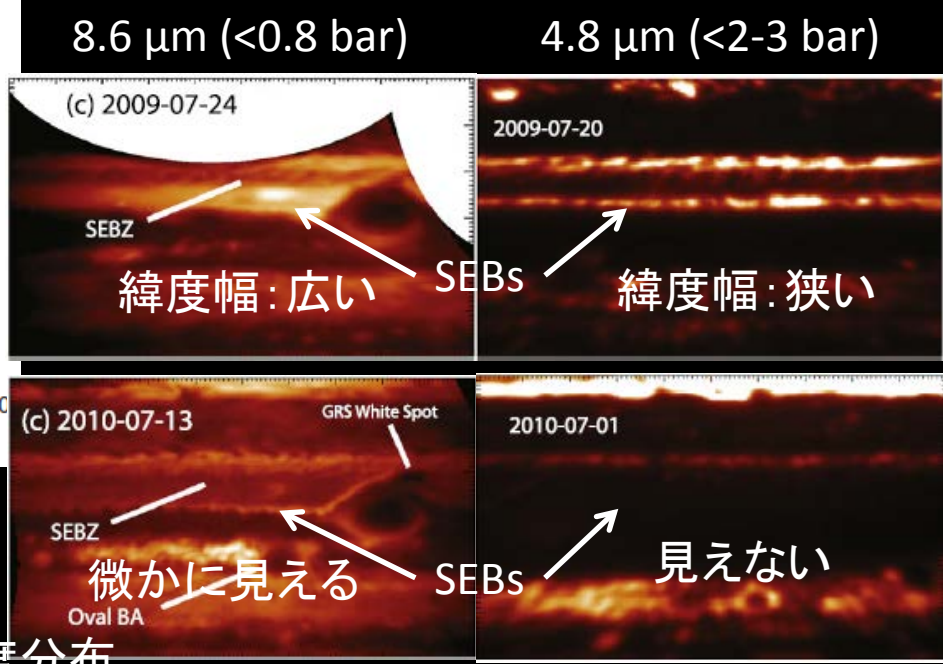
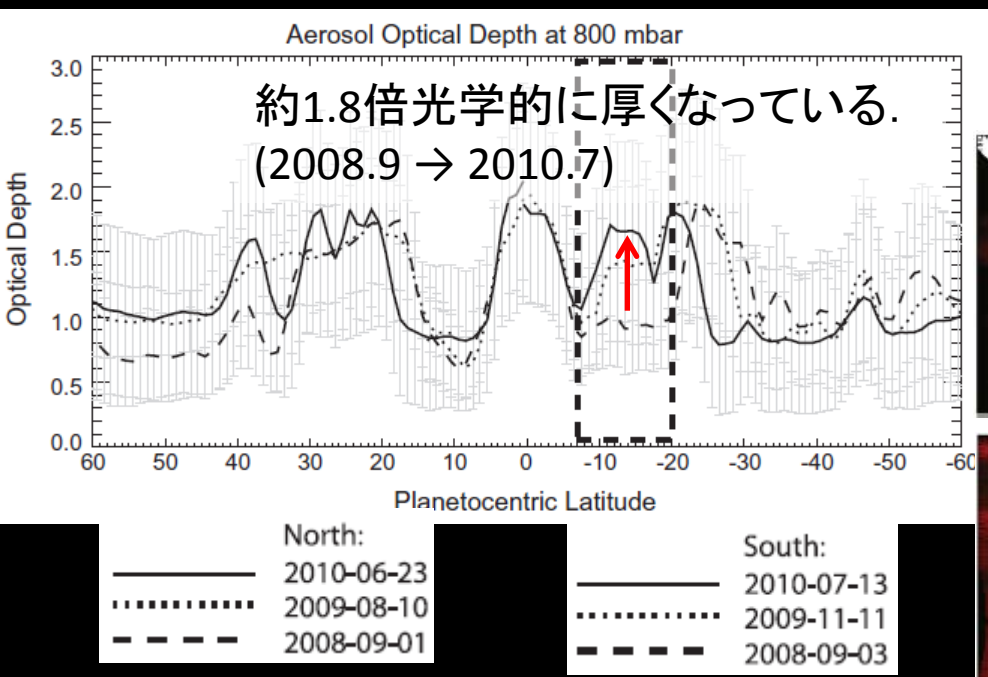


Fig. エアロゾルの光学的厚さ ( $p < 0.8$  bar) の緯度分布.

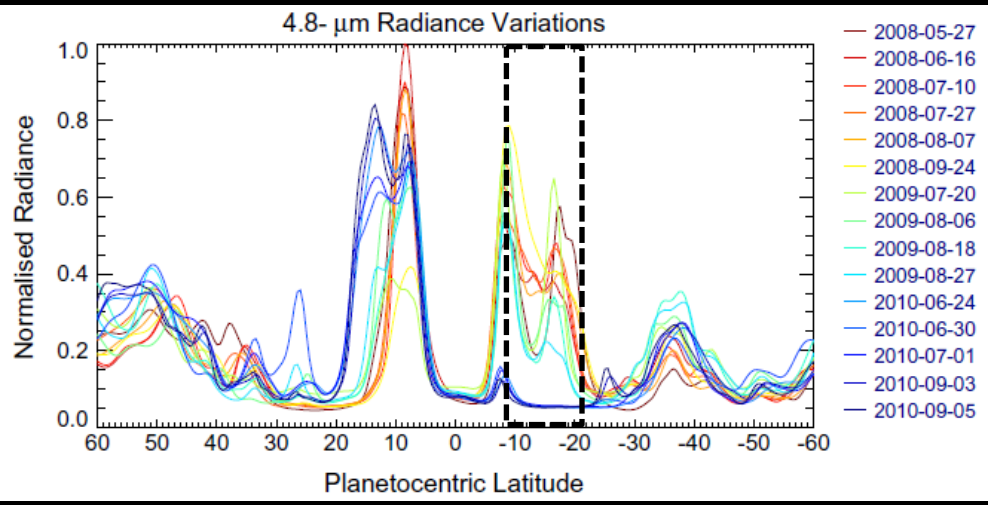


Fig. 4.8  $\mu\text{m}$ における熱放射の時間変化.

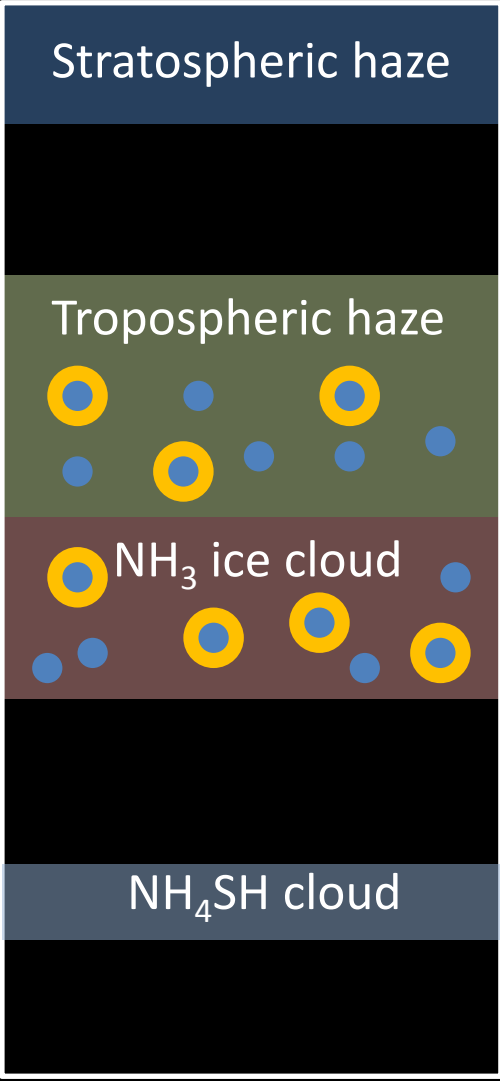
- 2008.9 → 2010.7 にかけて, SEBZでは温度減少とともに, エアロゾルが増大. →whitening (fade) よりも前に起きている.
- 8.6  $\mu\text{m}$ と4.8  $\mu\text{m}$ のmorphology →2種類のエアロゾルが存在することを示唆. ( $\text{NH}_3\text{-ice}$  &  $\text{NH}_4\text{SH}$ ?)

# 南赤道縞 (SEB) 攪乱のシナリオ

● Chromophore (未知の青色吸収物質)

● 雲 (NH<sub>3</sub>-ice?)

Normal State



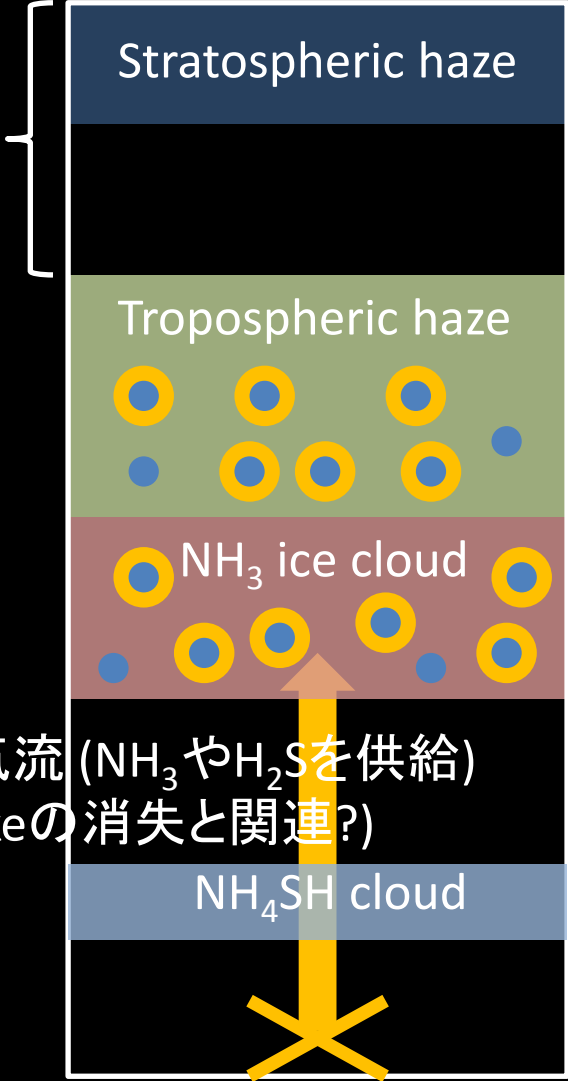
SEB fadeに関連する  
成層圏温度, 雲頂高度,  
風速場の変化は見られず.

- 2. 凝結して雲が厚くなる.
- 3. 周囲に比べて温度減少 (同時期).

↓ 数カ月

- 4. whitening (凝結核として chromophore が取りこまれる?)

Fade state



- 1. 上昇気流 (NH<sub>3</sub> や H<sub>2</sub>S を供給) (GRS wake の消失と関連?)

# Venus: Our activity with Subaru/COMICS

佐藤隆雄, 佐川英夫, 神山徹, 今村剛, 佐藤毅彦,  
Subaru/COMICS金星観測チーム



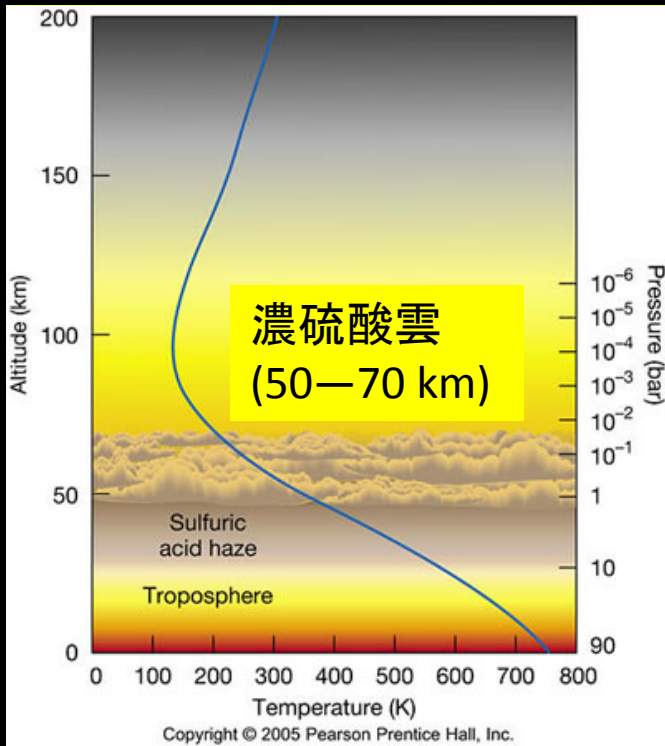


Fig. 金星大気構造

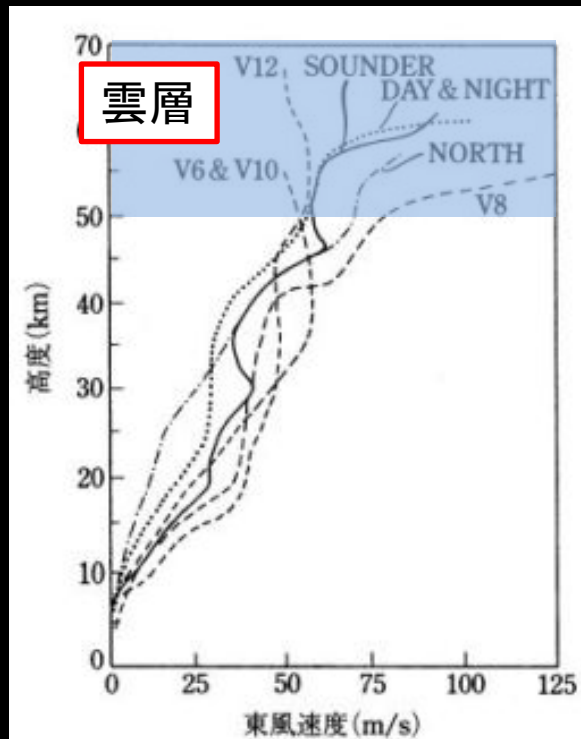


Fig. 探査機プローブによる  
風速の直接観測

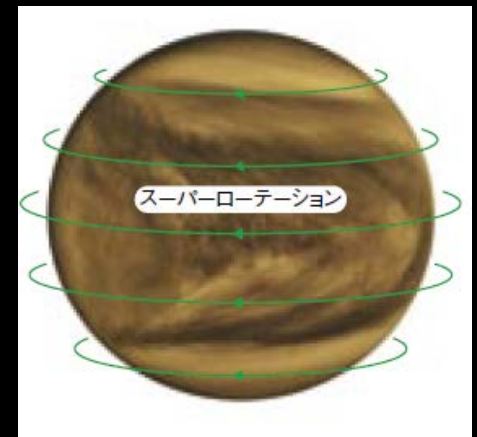


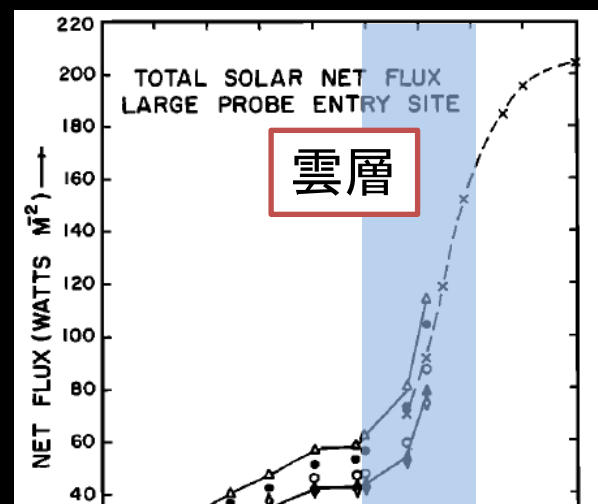
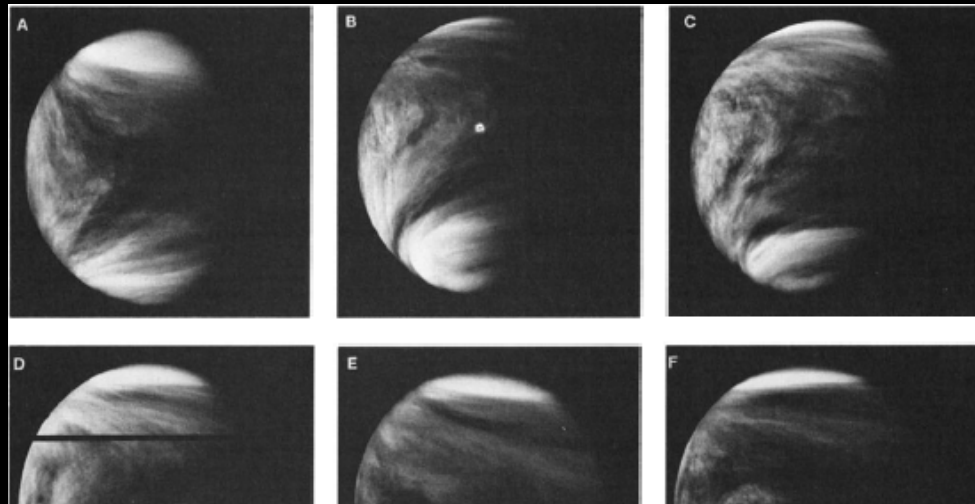
Fig. スーパーローテーションのイメージ

### 金星大気最大の謎・・・スーパーローテーション

固体部分の自転が西向きに243地球日 (~1.8 m/s) に対して、  
大気は同方向に約60倍の速さで回転する (4-5日で金星を一周) 現象

(地球では、自転460m/sに対して、最大でも数十m/sの偏西風程度・しかも局在的)

⇒ 駆動・維持メカニズムは明らかではない。



- 紫外観測
- ✓ 昼面情報のみ
- ✓ 地上観測によるモニタリングは不可能
- ✓ そもそも観測している物質がよく分からない

大気運動の駆動源は、雲層高度における太陽光吸収

➤ 入射エネルギーの空間非一様性は、温度分布にも反映されるはず。

- 中間赤外観測
- ✓ 昼面・夜面に関係なく観測可能
- ✓ 空間分解能は、望遠鏡の回折限界で決まる。  
→ 大型望遠鏡を用いれば、探査機データとの比較可能。
- ✓ 温度や雲の光学的厚さという物理量を抽出できる。

Fig. PVO/OCPPの紫外 (365 nm) イメージ [Rossow et al., 1980]



Figs. (左) 周辺減光を除去した疑似カラー画像 (10.6-12.6  $\mu\text{m}$ ) [Apt et al., 1984],  
 (中) PVO/OIRの北極中心画像 (11.5  $\mu\text{m}$ ) [Taylor et al., 1980],  
 (右) 周辺減光を除去した全球画像 (8-12  $\mu\text{m}$ ) [Taguchi et al., 2012].

- ✓ 地上観測 [Apt et al., 1979]  
 Raster scanning methodによる長期 (26日) 観測 (1977)
- ✓ Pioneer Venus Orbiter (PVO) Infrared Radiometer (OIR) [Taylor et al., 1980]  
 放射計, 北半球観測 (1978.12-1979.2)
- ✓ Venera 15 Fourier Spectrometer [e.g., Zasova et al., 2007]

現時点では, 2次元アレイによる金星赤道面からの撮像観測は,

- ✓ Subaru/COMICS観測とAkatsuki/LIR観測のみ...
- ✓ →時間変動を観測したのは, Subaru/COMICSのみ.

ホルメータ, 亦追面軌道からの観測 (2010.12.9)

- **Subaru/COMICSによる金星撮像観測** [2007.10.25-29 (HST)]
- ✓ 明けの明星, 太陽位相角 (太陽—金星—地球のなす角度):  $\sim 90^\circ$
- ✓ 視直径:  $\sim 25''$  (COMICSのFOVに入るサイズ)
- ✓ 観測波長:  $8.59 \mu\text{m}$ ,  $11.24 \mu\text{m}$ ,  $12.81 \mu\text{m}$
- ✓ 空間分解能:  $0.5''$  ( $\sim 240 \text{ km}$ )- $0.9''$  ( $\sim 440 \text{ km}$ ) (標準星のFWHMより推定)

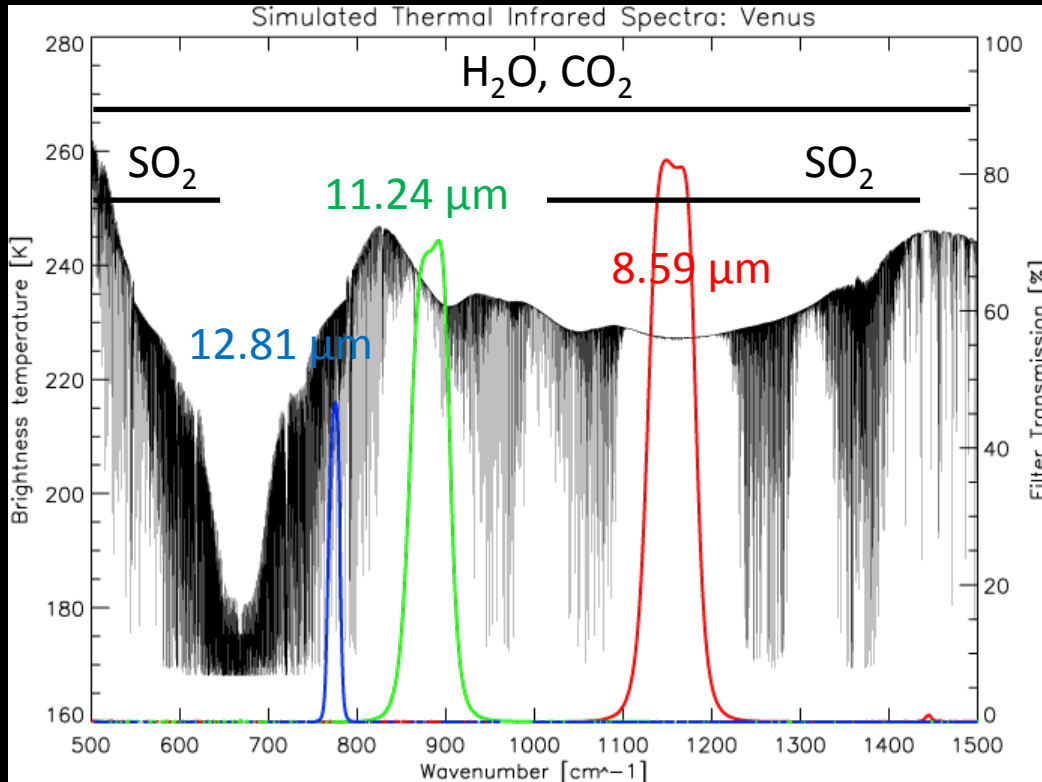


Fig. 放射伝達モデルを用いて計算した金星スペクトル.

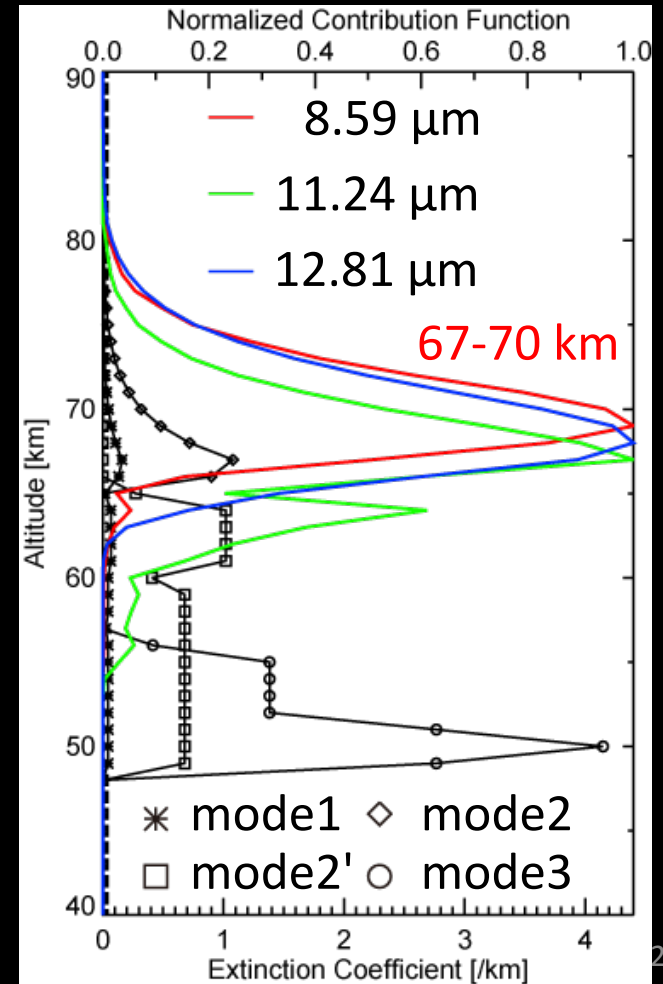
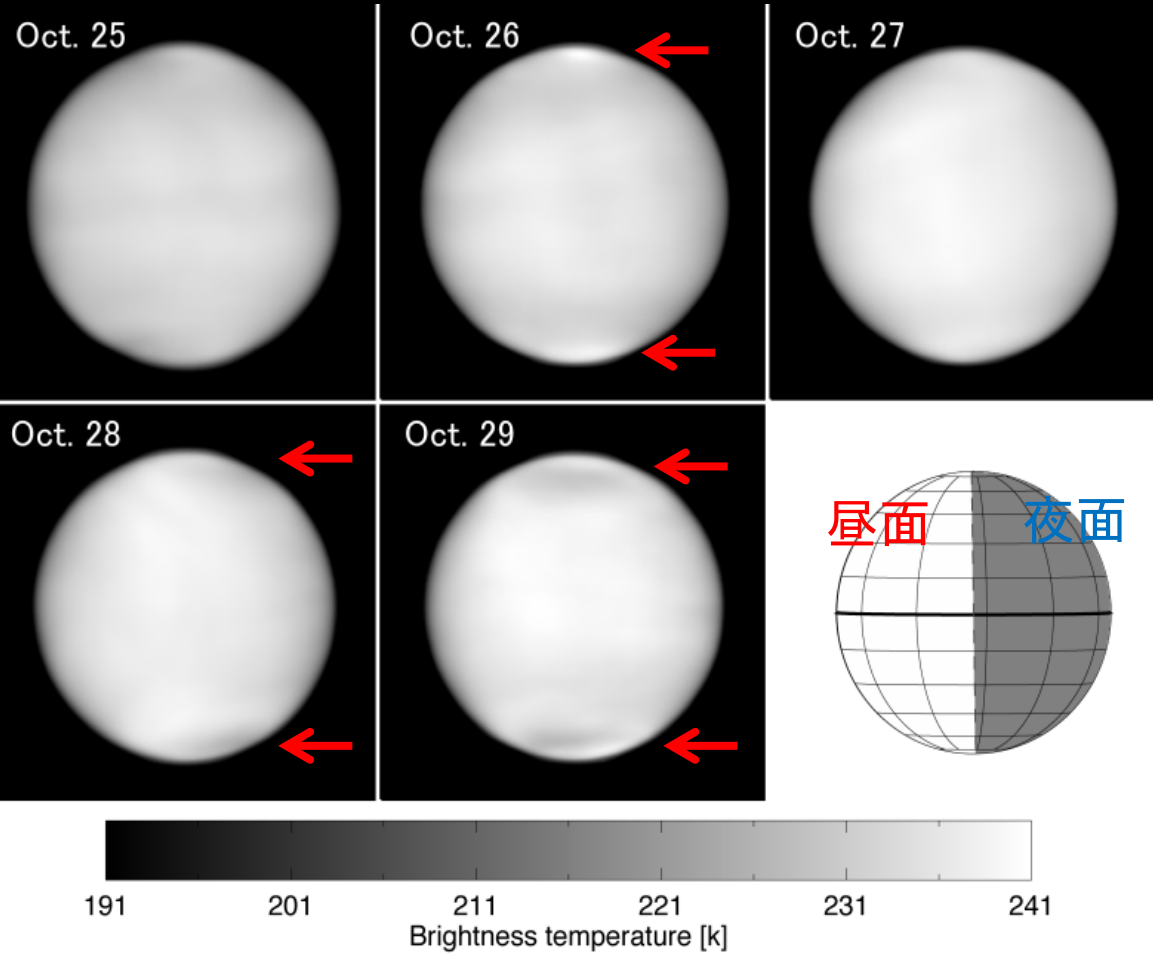


Fig. 雲モデルと観測波長の寄与関数.



- 校正画像 (8.6  $\mu\text{m}$ )
- ✓ Polar vortex & Cold collarが見えたり, 見えなかったり.
- ✓ 南北極域で明暗模様が同期?

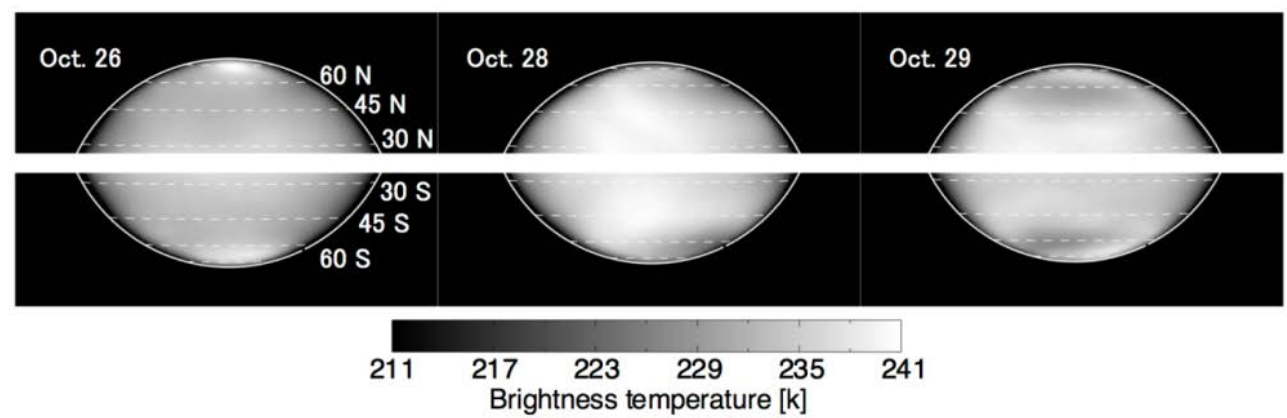
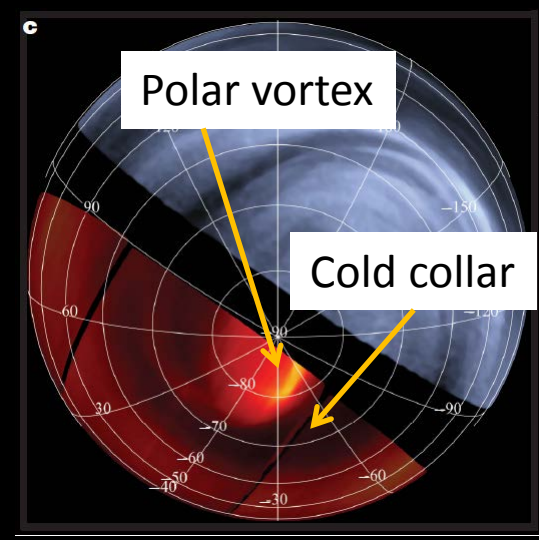
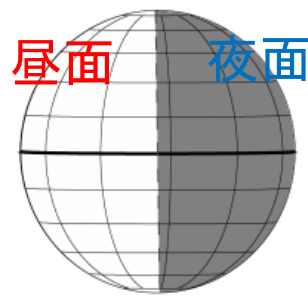


Fig. 紫外 (右上) と赤外 (~4  $\mu\text{m}$ , 左下) の合成画像 [Titov et al.].

- ハイパス処理後の画像 ( $8.59 \mu\text{m}$ )  
校正画像からガウシアン関数 (FWHM:  $\sim 1000 \text{ km}$ ) で平滑化した画像を減算.

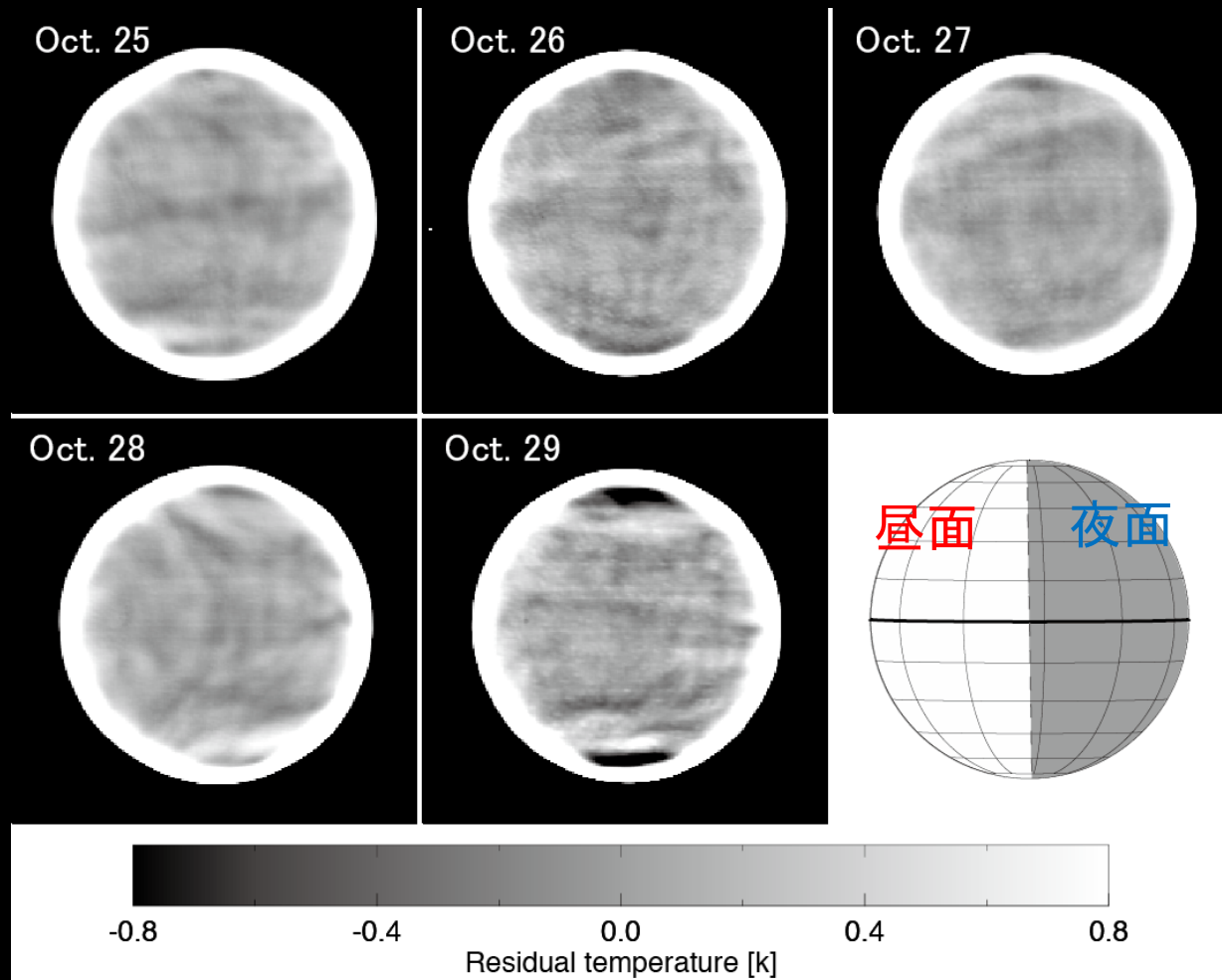


Fig. Subaru/COMICSで取得した微細構造の日変化.

微細構造は、明らかに**時空間変動**している。  
紫外波長 (感度高度: 62-70 km) で顕著な**横Y字模様**が見えるような日がある。

● 10/28のハイパス画像の比較

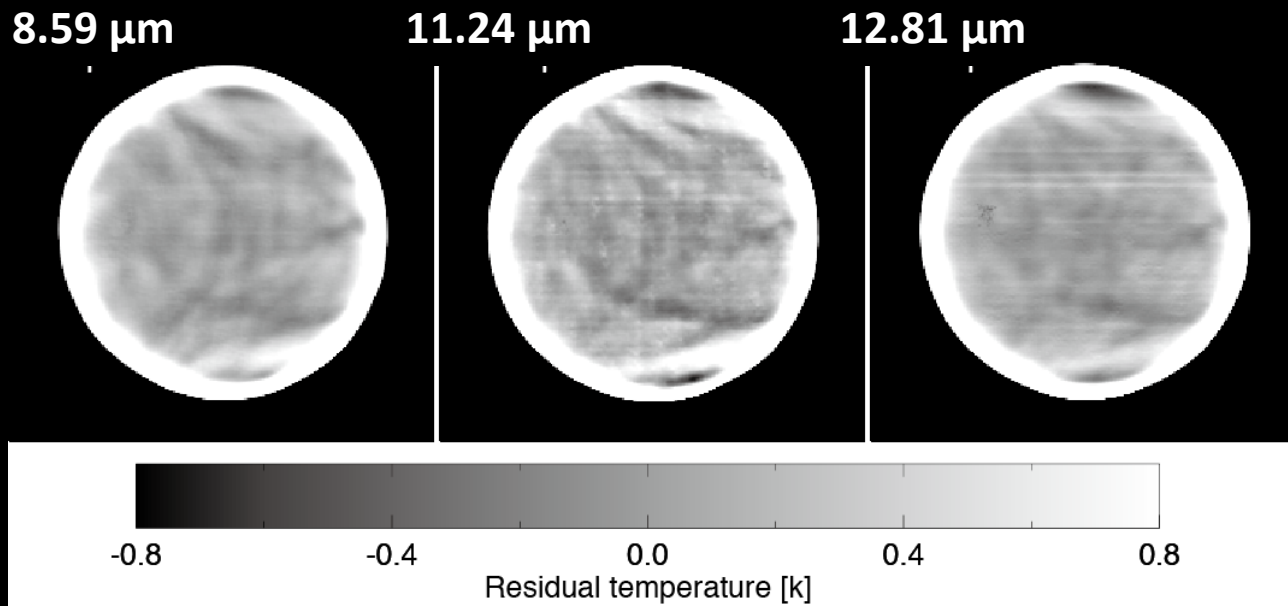


Fig. 微細構造の波長間比較 (10/28).

特定波長で横Y字模様が見えているわけではない

Sato, Sagawa, Kouyama et al., in preparation  
高空間分解撮像観測によって金星雲頂温度の微細構造を世界で初めて捉えた。  
・模様はリアルか？(COMICS特有のスカイフラット問題)→リアルのようだ。  
・この輝度温度振幅の大きさは？(フィルター透過特性のリーク問題)→検証中

この輝度温度振幅を生み出す大気パラメータは何か？  
また、その大気パラメータの変動量はどれくらい必要か？  
といった疑問を放射伝達モデル計算によって明らかにしていく。

除算した画像 [Belton et al., 1991].

# MIMIZUKUへの期待 (MIMIZUKUだったら可能かもしれないと思う事)

- 金星, 木星 (, 土星, 天王星, 海王星) では, 「**高空間分解**」+「**中間赤外撮像観測**」+「**時間変動**」というキーワードで, 探査機観測を凌ぐ観測的知見を得る事ができるだろう. (惑星は視直径が大きいので, )60”の視野を確保したい.
- Subaru/COMICSで初めて見つかった金星濃淡模様は, 紫外模様と同じく4-5日で一周するのかわ?
- (proposal形式の大型望遠鏡では, まず採択されないと思うが...) **長期観測** (>8, 10日) の可能性はあるのだろうか? (金星は日の出or日の入り2-3時間なので, 観測夜を占有することは全くない)
- この濃淡模様を説明する大気波動の振幅を観測から導出することが次への一歩であるが, それには**長期観測**+ (対象とする振幅が小さいので, ) **観測日ごとの観測精度**が理想的には同じであってほしい.
- 金星と標準星の同時観測によってエアマスの違いや金星と標準星の観測時刻の差による地球大気変動はキャンセルできるかもしれない.