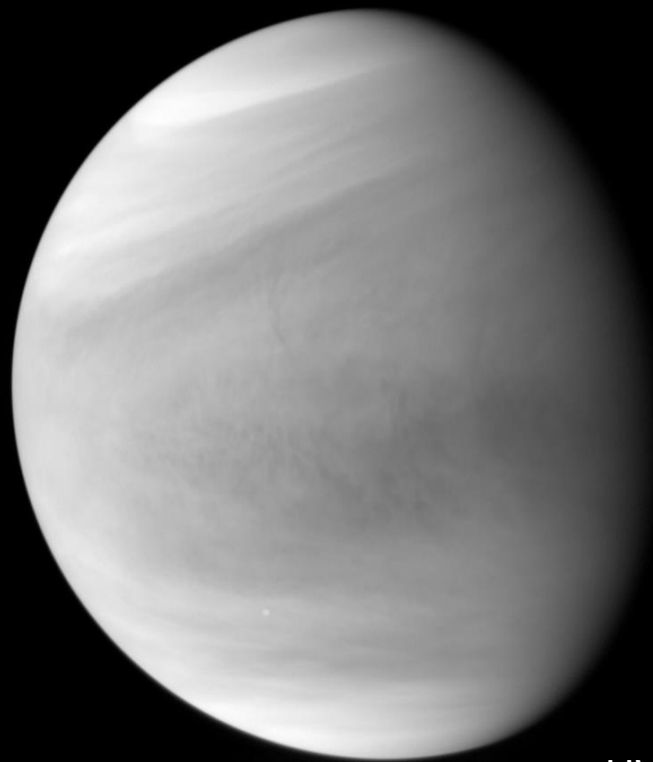


探査機あかつきで探る金星の大気大循環



UVIによるSO₂吸収帯(283nm)画像

今村 剛 (東京大学)

金星探査機あかつき

金星周回軌道から雲の下まで透視する3次元的なリモートセンシングによって金星の気象を調べる

知りたいこと

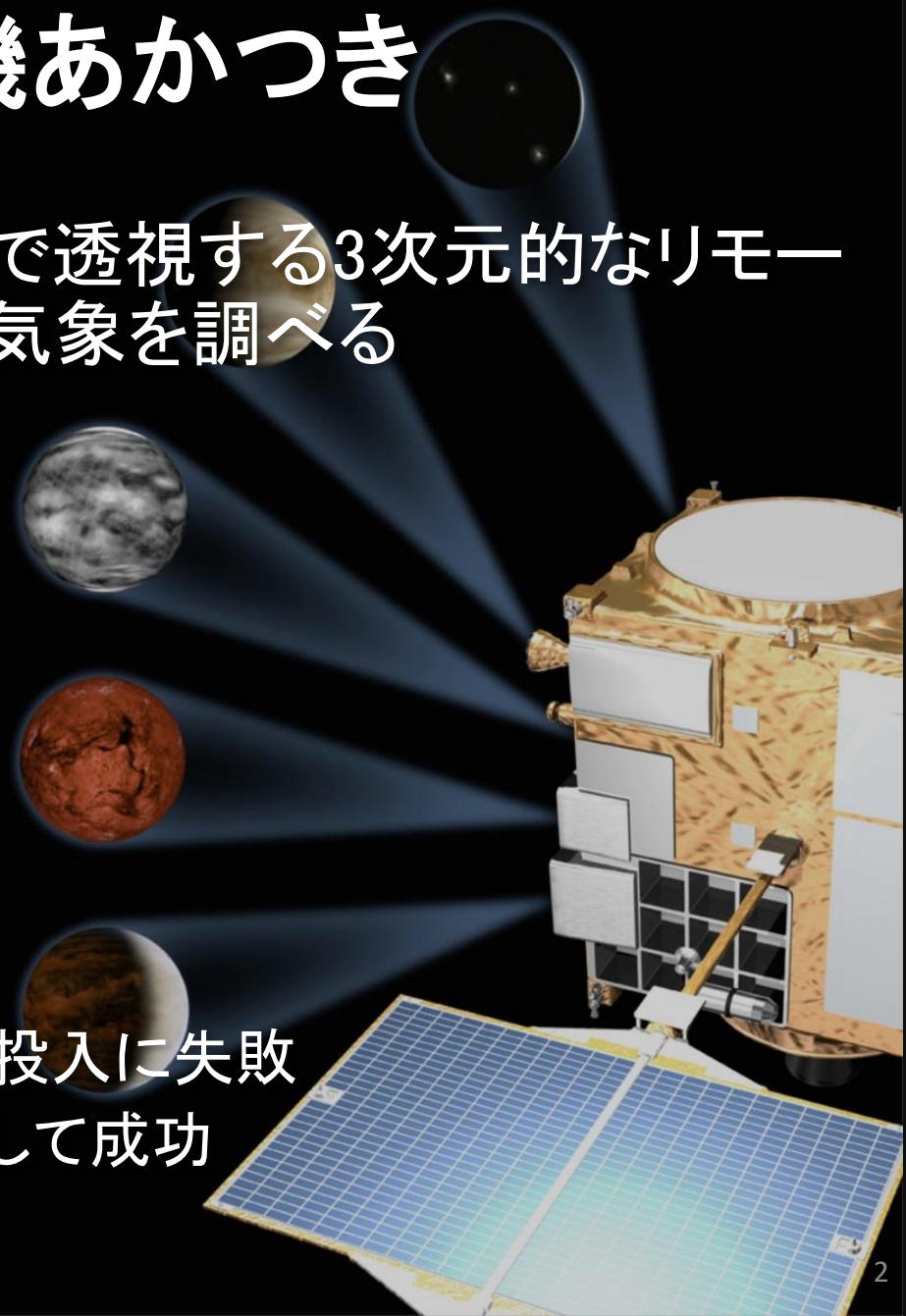
低速自転惑星の大気力学
硫酸雲の物理化学

2010年5月 打ち上げ

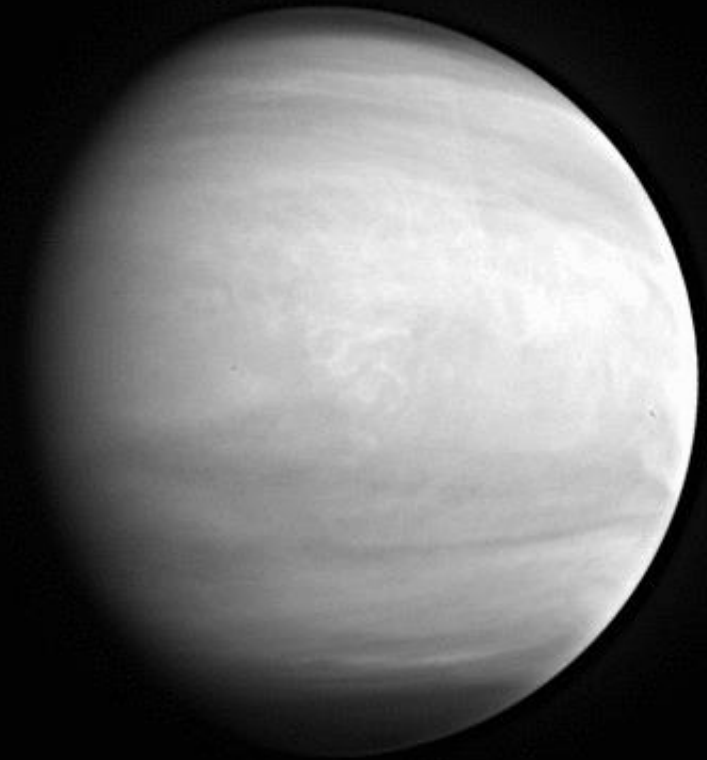
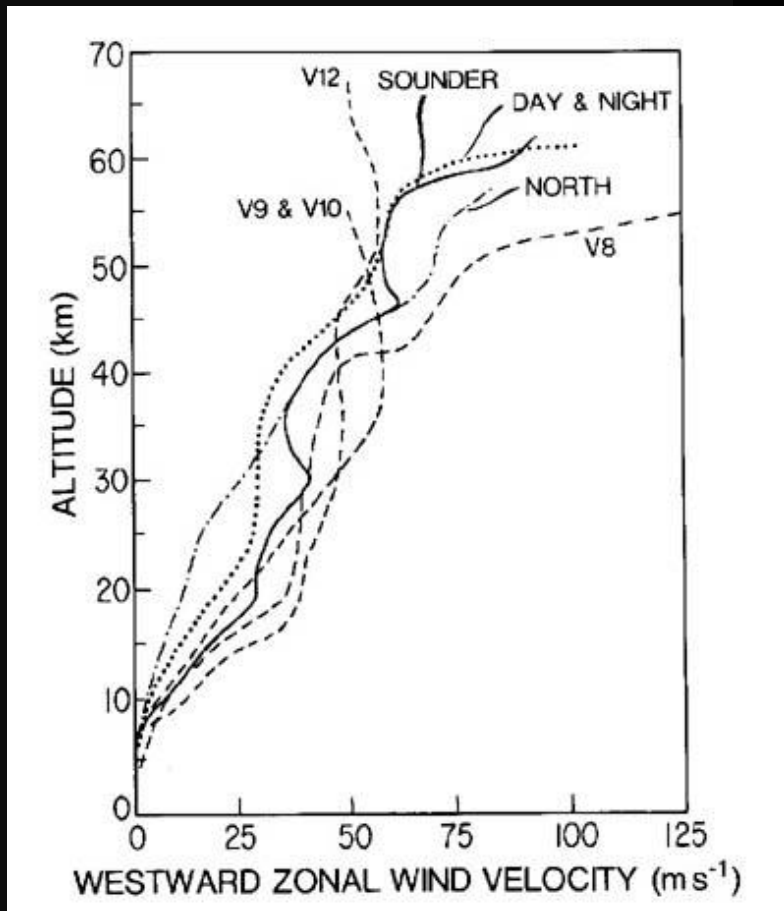
2010年12月 金星周回軌道への投入に失敗

2015年12月 軌道投入に再挑戦して成功

2016年4月 定常観測開始



スーパーローテーション

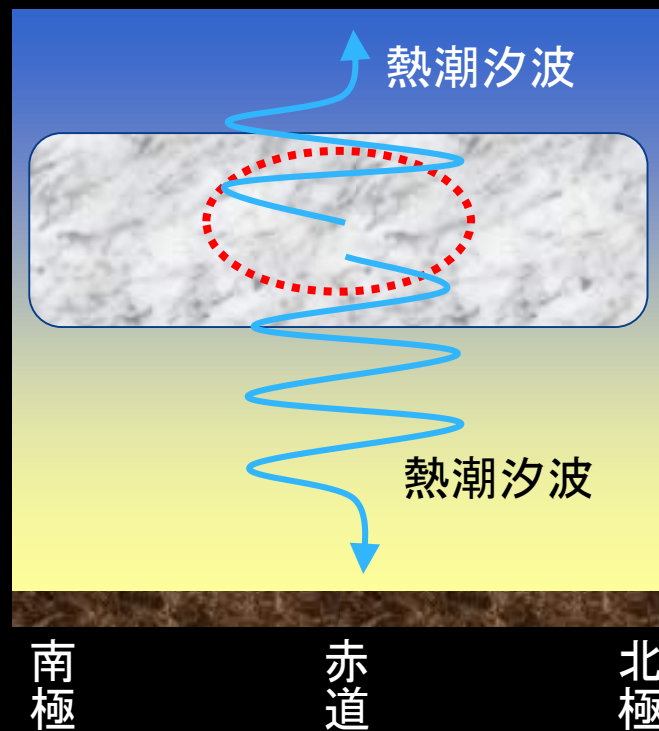
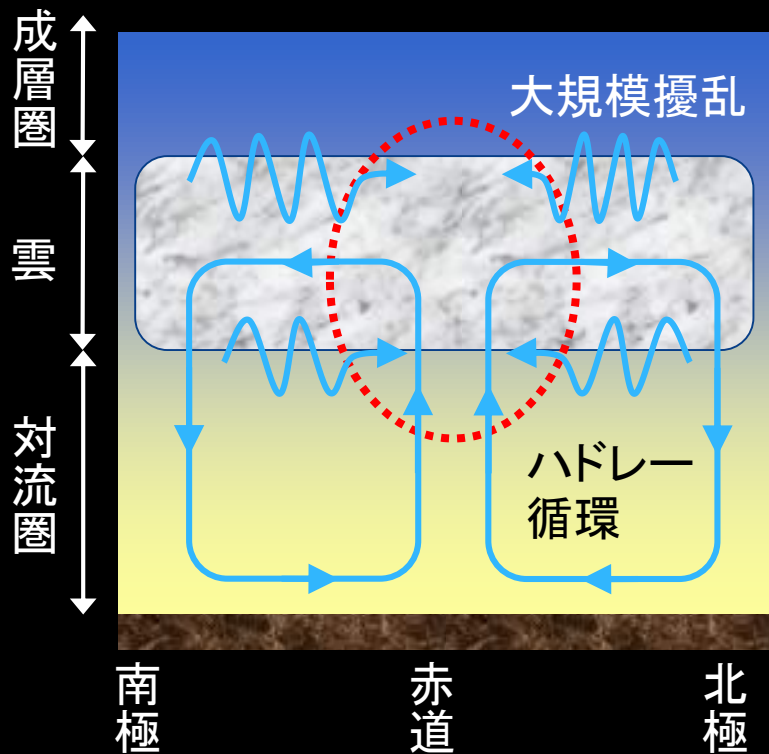


あかつき搭載IR2によるCO₂吸収帯 (2.02 μm)画像

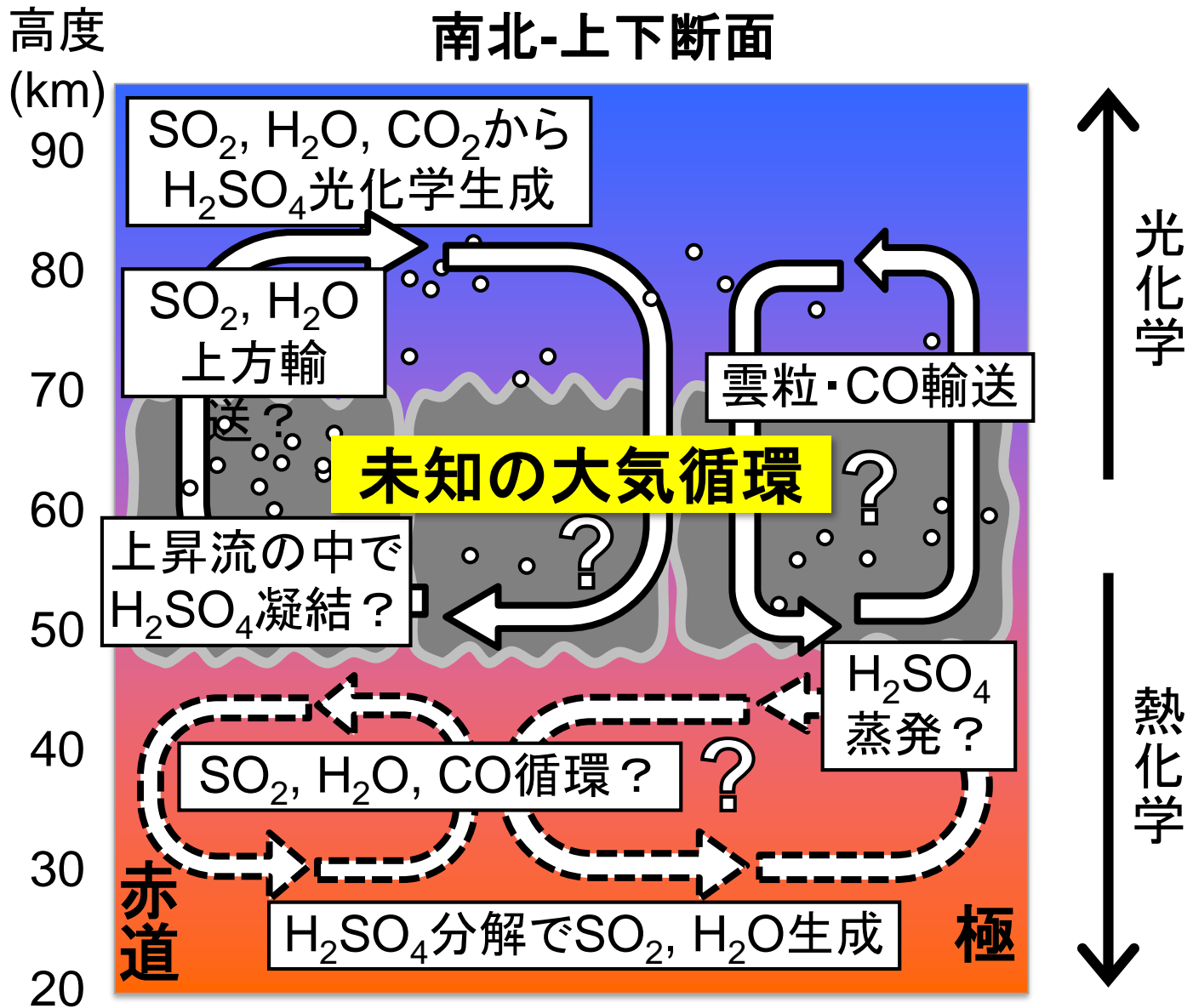
大気が毎秒100 m(自転の60倍)の速さで同じ方向に循環

ありうるメカニズムの例

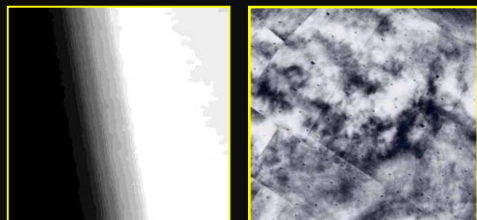
○ 加速域



硫酸雲を維持する物理化学

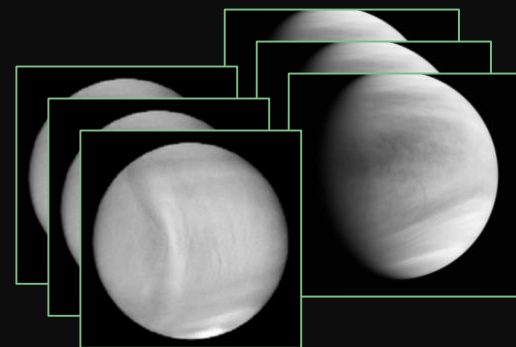


2015年12月 再挑戦して周回軌道に入った



クローズアップ撮影
層構造の撮影

雲や微量ガスの変動を
3次元・連続的に撮影して
動画として可視化



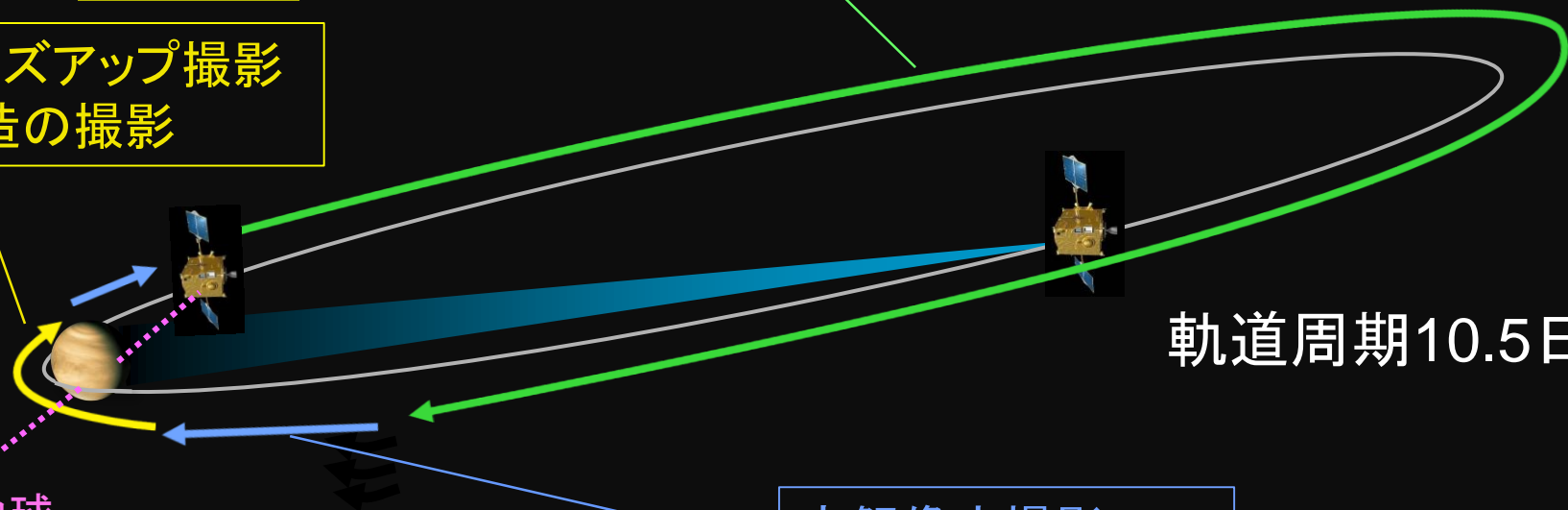
軌道周期10.5日

地球



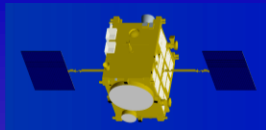
大気を水平に貫く電波
を地上で受信して大気
の層構造をとらえる

高解像度撮影
雷・大気光の観測



5カメラと電波による 3次元観測

あかつき



気温・硫酸蒸気の高度分布
(電波掩蔽)

大気光
(雷・大気光カメラ)

二酸化硫黄
(紫外イメージャ)

雲の温度
(中間赤外カメラ)

下層の雲
(1 μ m/2 μ mカメラ)

風速ベクトル
(雲の動きから)

一酸化炭素
(2 μ mカメラ)

雷放電
(雷・大気光カメラ)

水蒸気(1 μ mカメラ)

地表物質・活火山
(1 μ mカメラ)

地表面

90 km

65 km

50 km

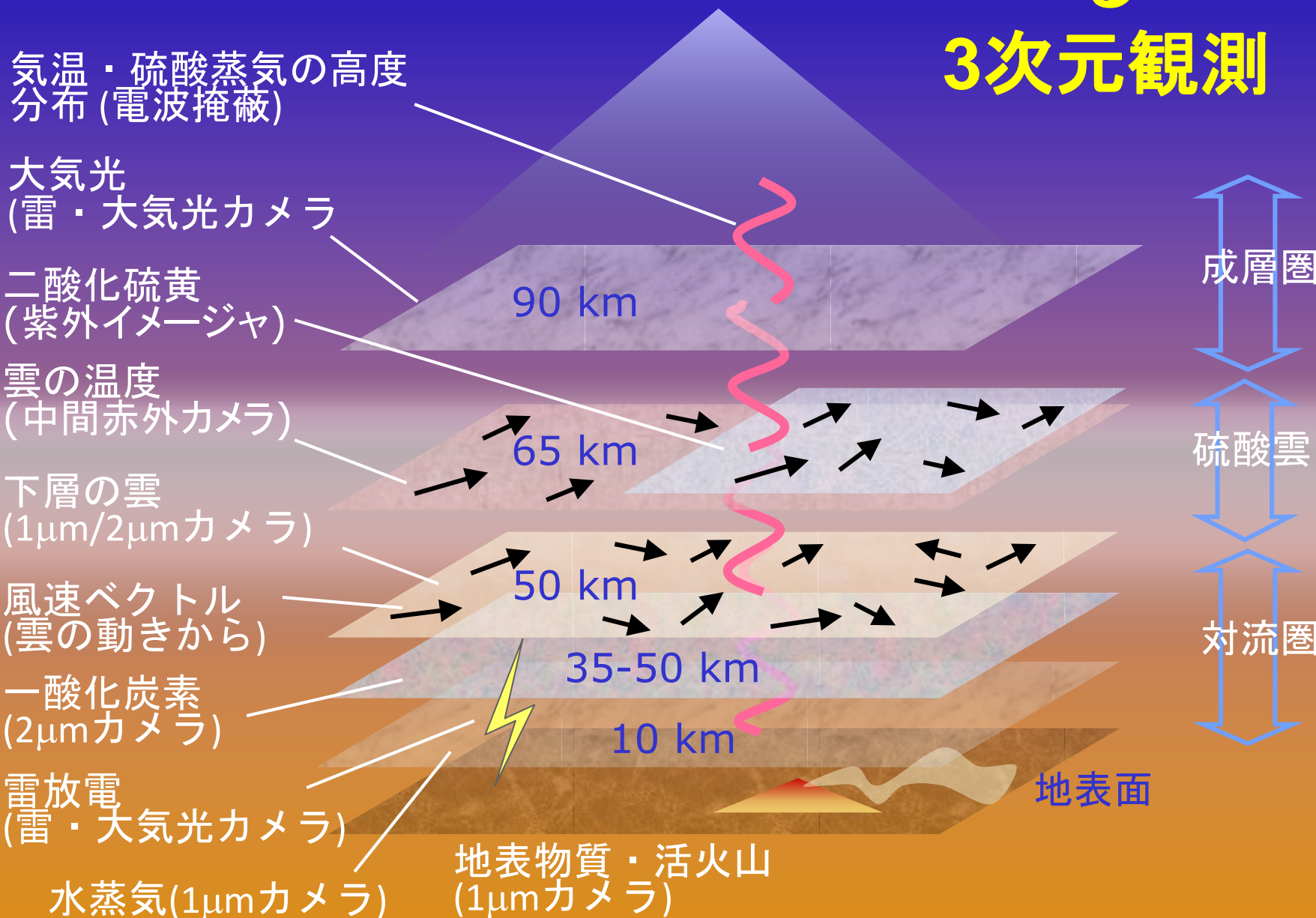
35-50 km

10 km

成層圏

硫酸雲

対流圏



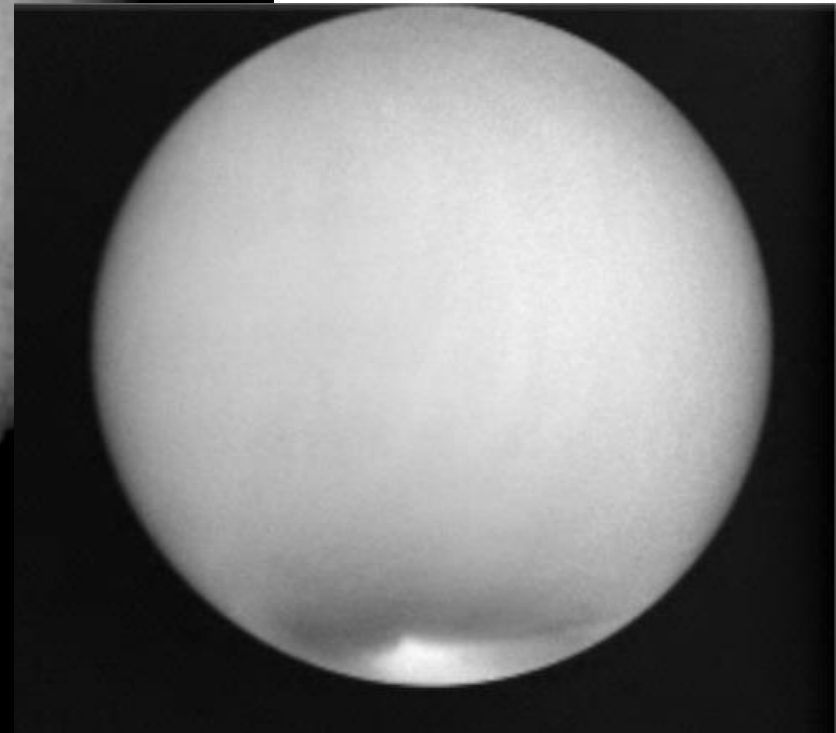
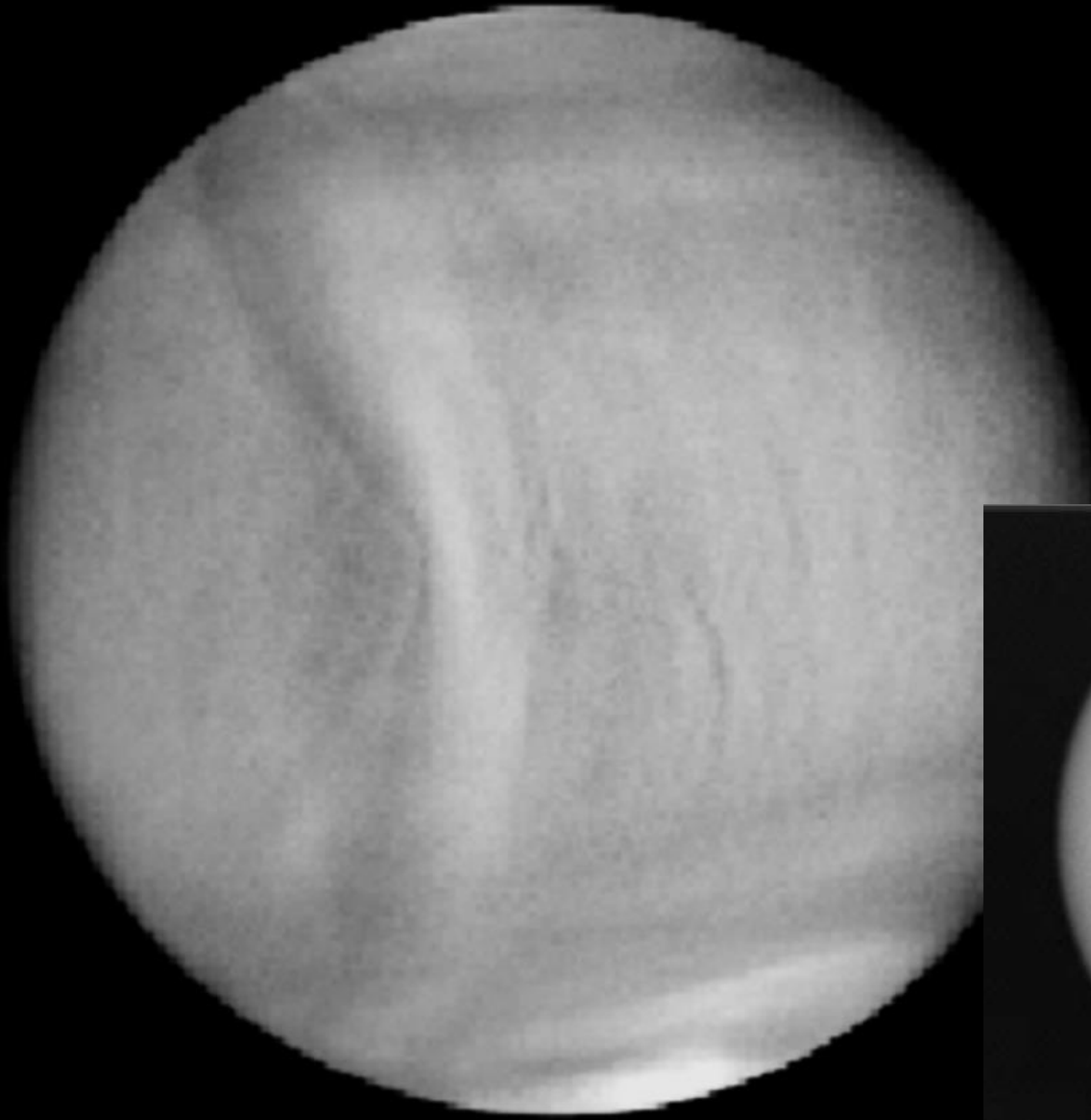
いろいろな想定外

- 周回軌道が極端に大きくなり、解像度低下、電波掩蔽機会減少
 - 軌道周期 30時間→10.5日
 - 遠金点高度 8万km→36万km
- 近赤外の窓波長で下層大気を狙うIR1, IR2が長期連続観測の前に停止
- 昼夜均等に雲追跡できると期待したLIR画像(10 μ m)に雲追跡可能な模様が見えない
- 一方で雲形態に様々な新発見 新たなサイエンスの可能性

中間赤外カメラ (LIR)

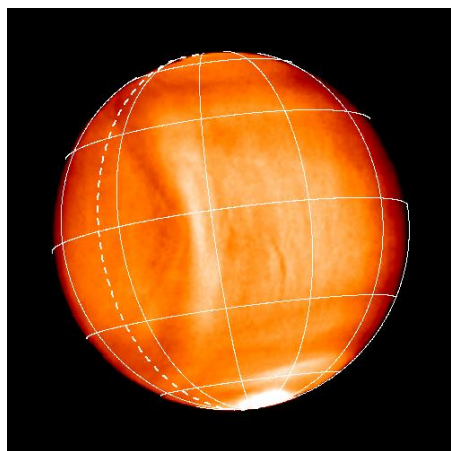
波長 $10\ \mu\text{m}$
(雲頂からの熱放射)

高度70km(雲頂)

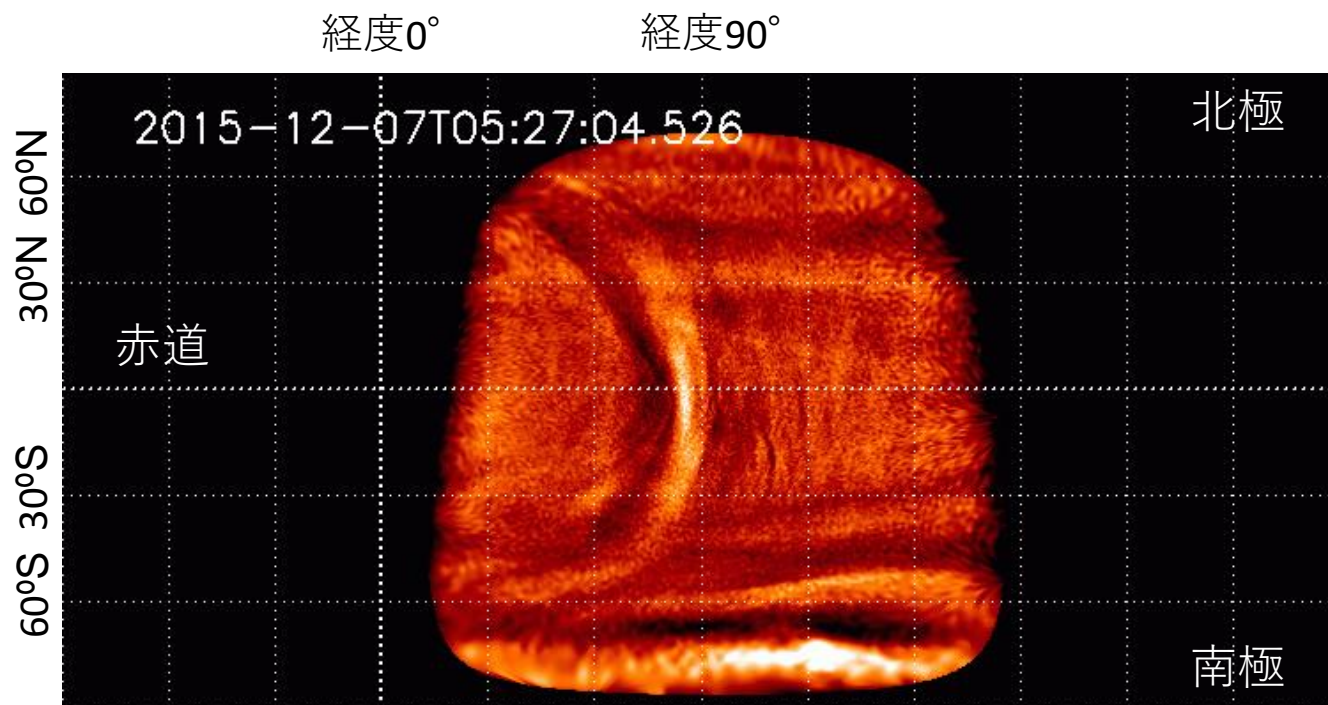


巨大弓状温度構造(LIR)

秒速100mの風が吹く中、ほとんど動かない

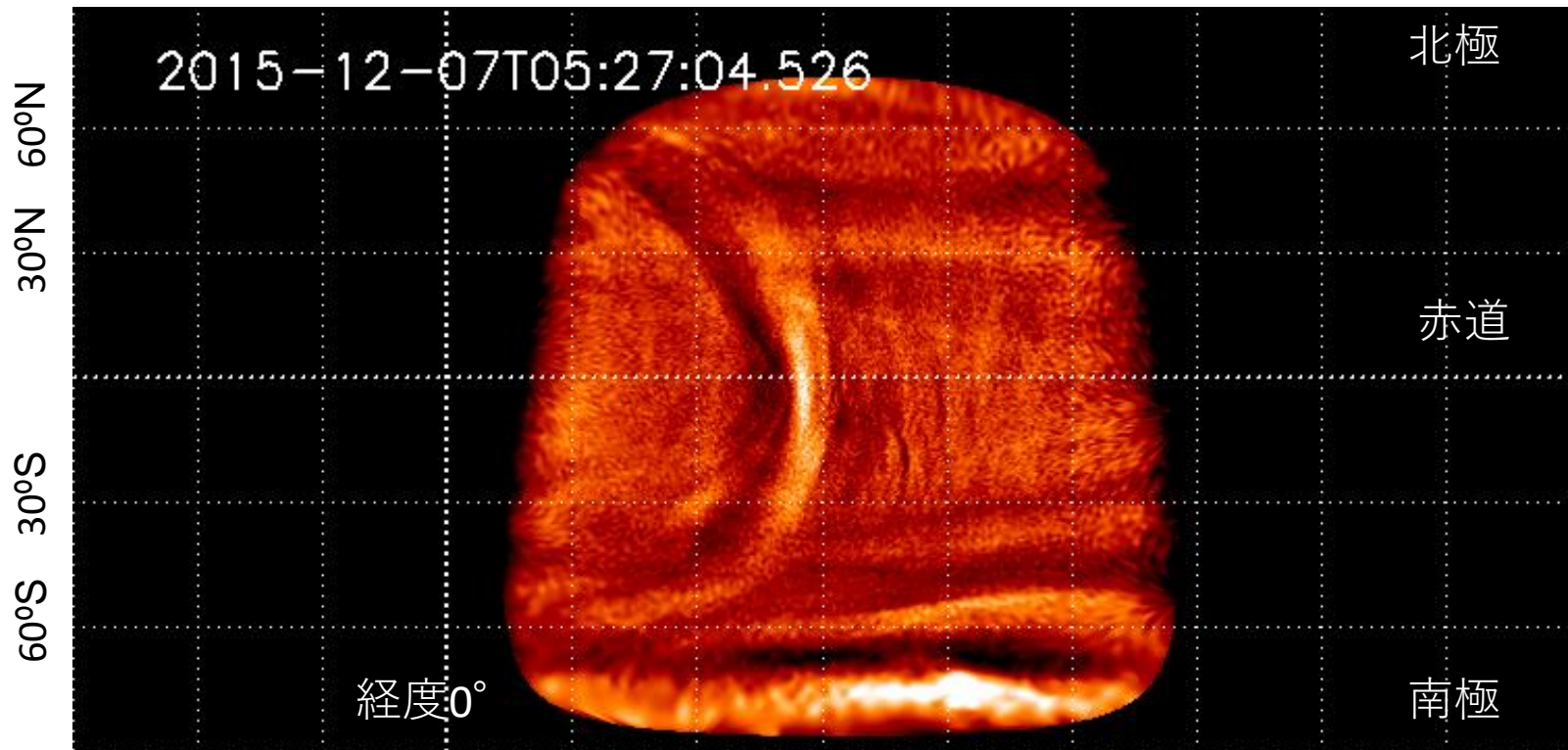


緯度経度の
地図上に展開

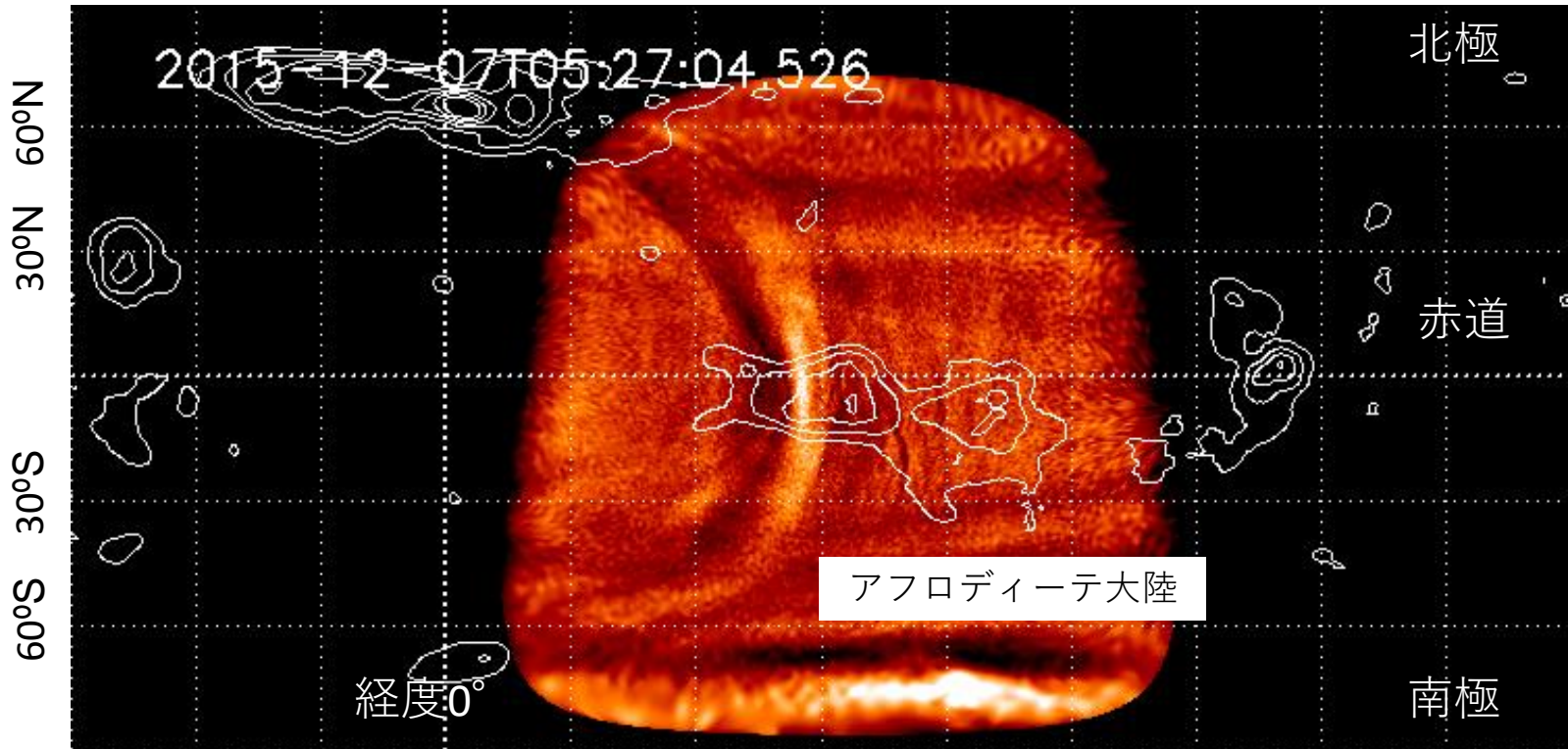


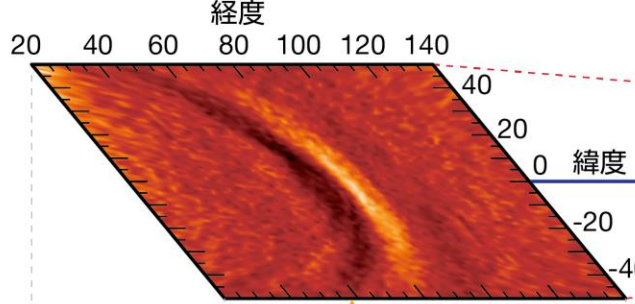
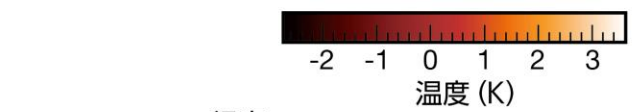
12/7 ~ 12/11までの観測画像アニメーション (模様を強調)

金星の地形図(等高線)を重ねる



金星の地形図(等高線)を重ねる



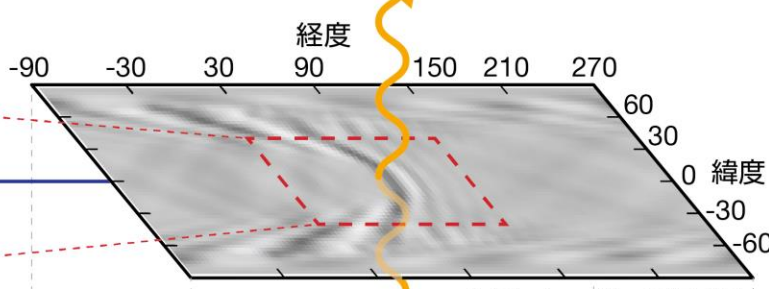
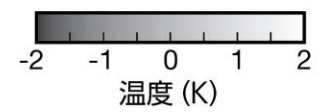


あかつき LIR による
温度分布

?

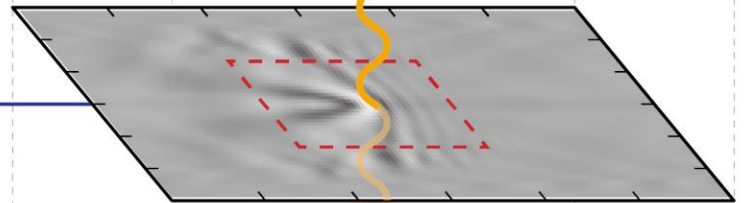


観測データ

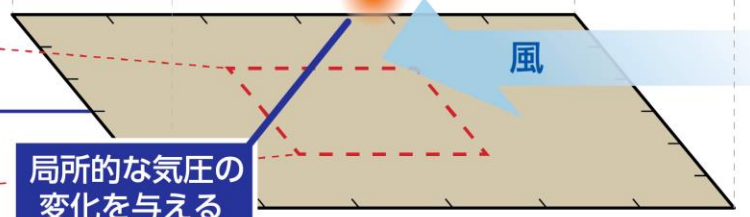


シミュレーションによる
温度分布

上空に
伝わる波



高度 20km

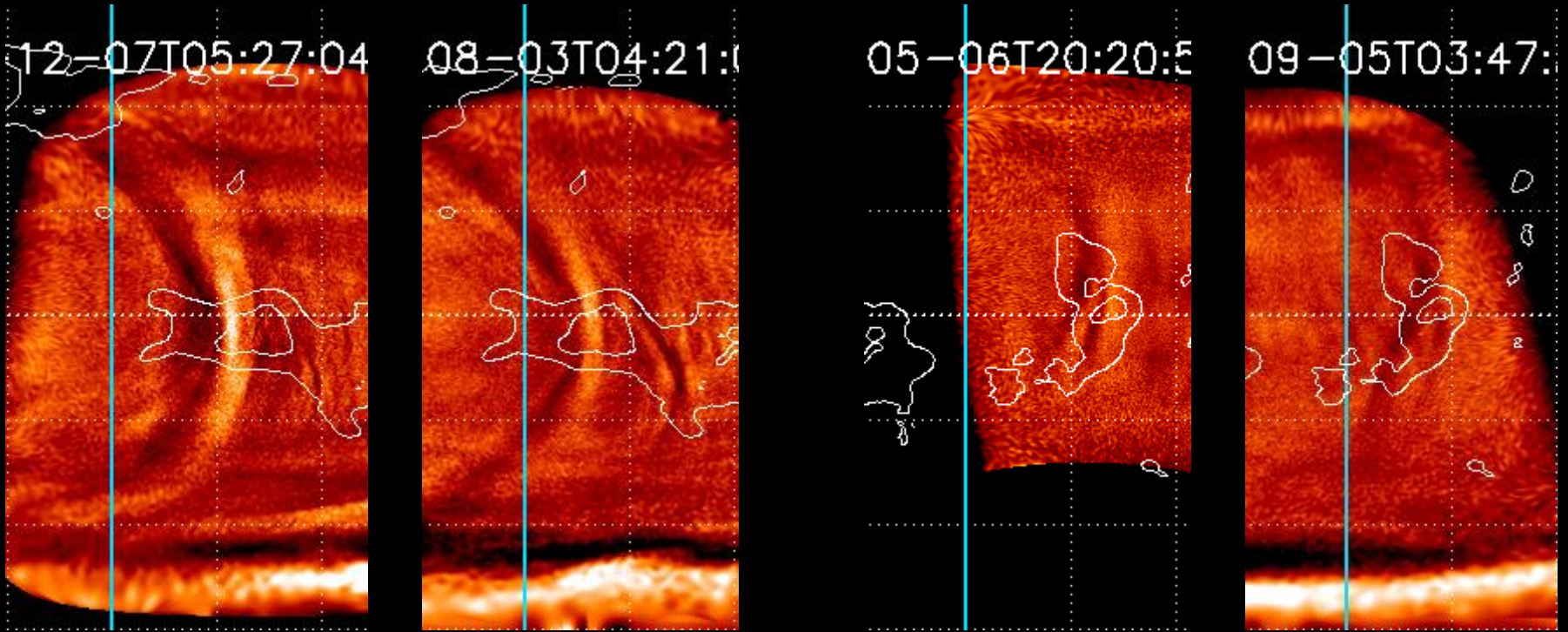


高度 10km

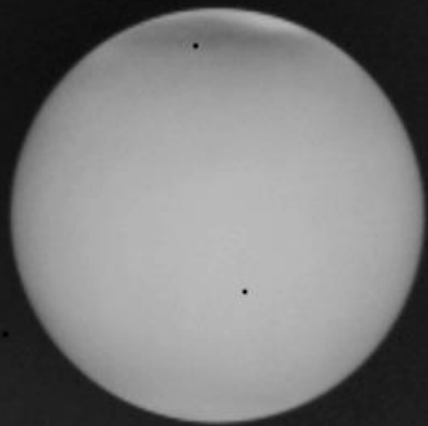
金星地表

数値シミュレーション

午後～夕方までしか現れない



地表付近の大気の状態に新たな制約



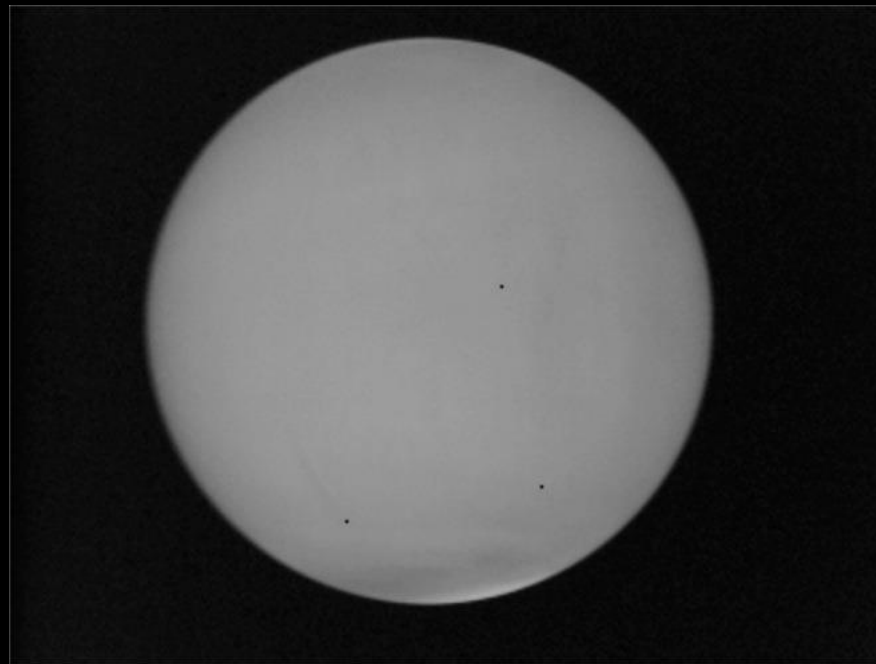
lir_20160325_074625_pic_l2b_v10.fit



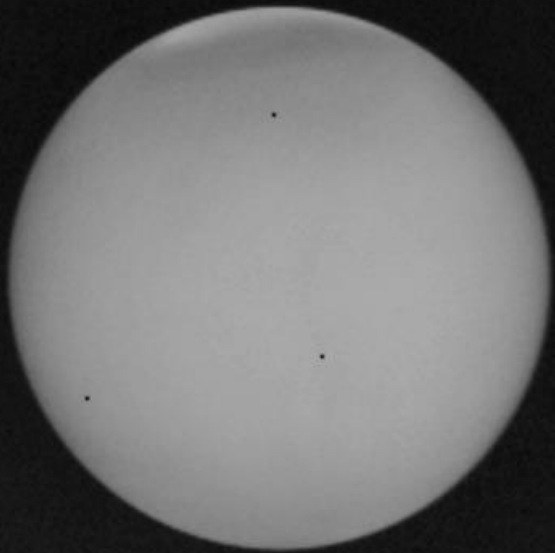
lir_20160403_205057_pic_l2b_v10.fit



lir_20160507_062055_pic_l2b_v10.fit



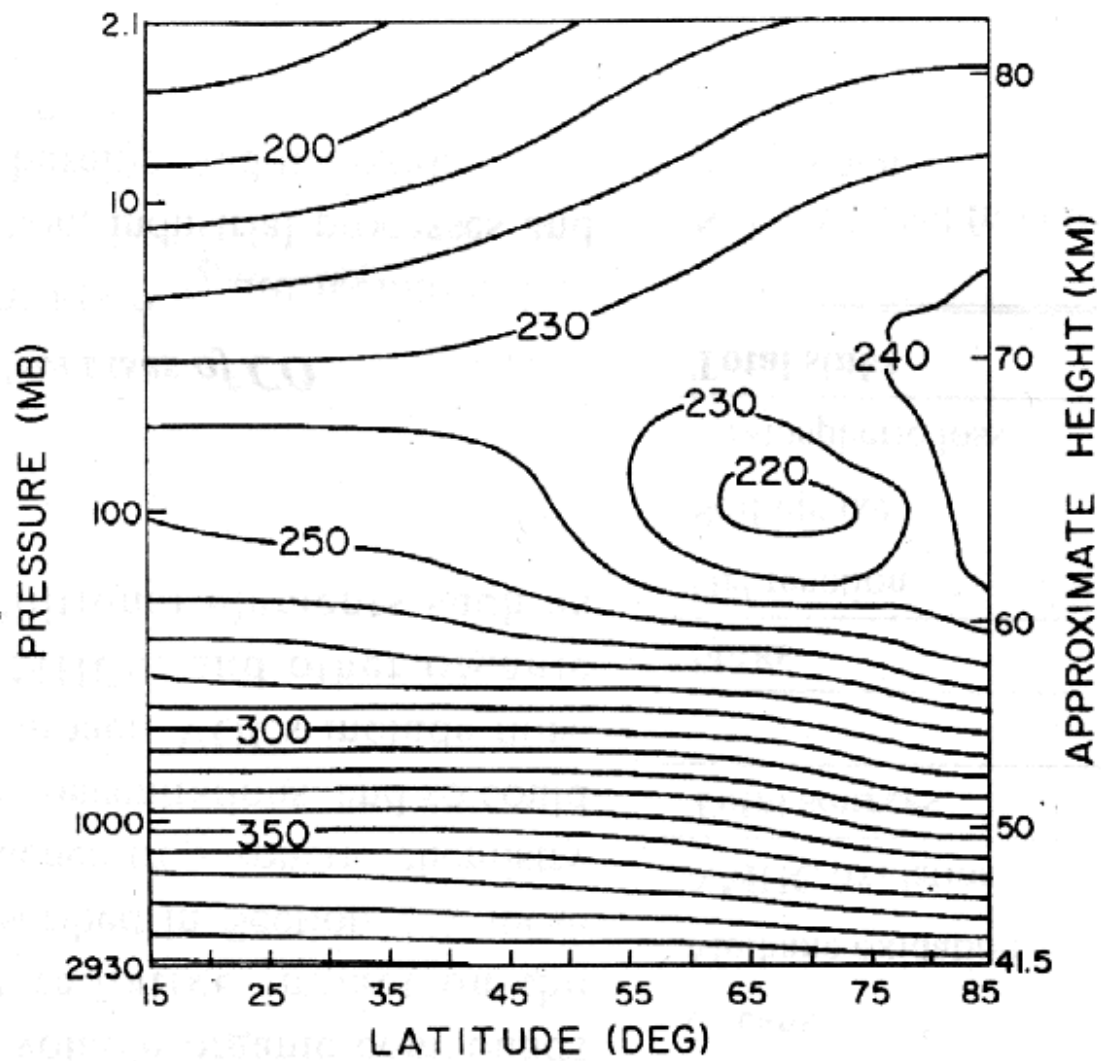
lir_20160517_202051_pic_l2b_v10.fit

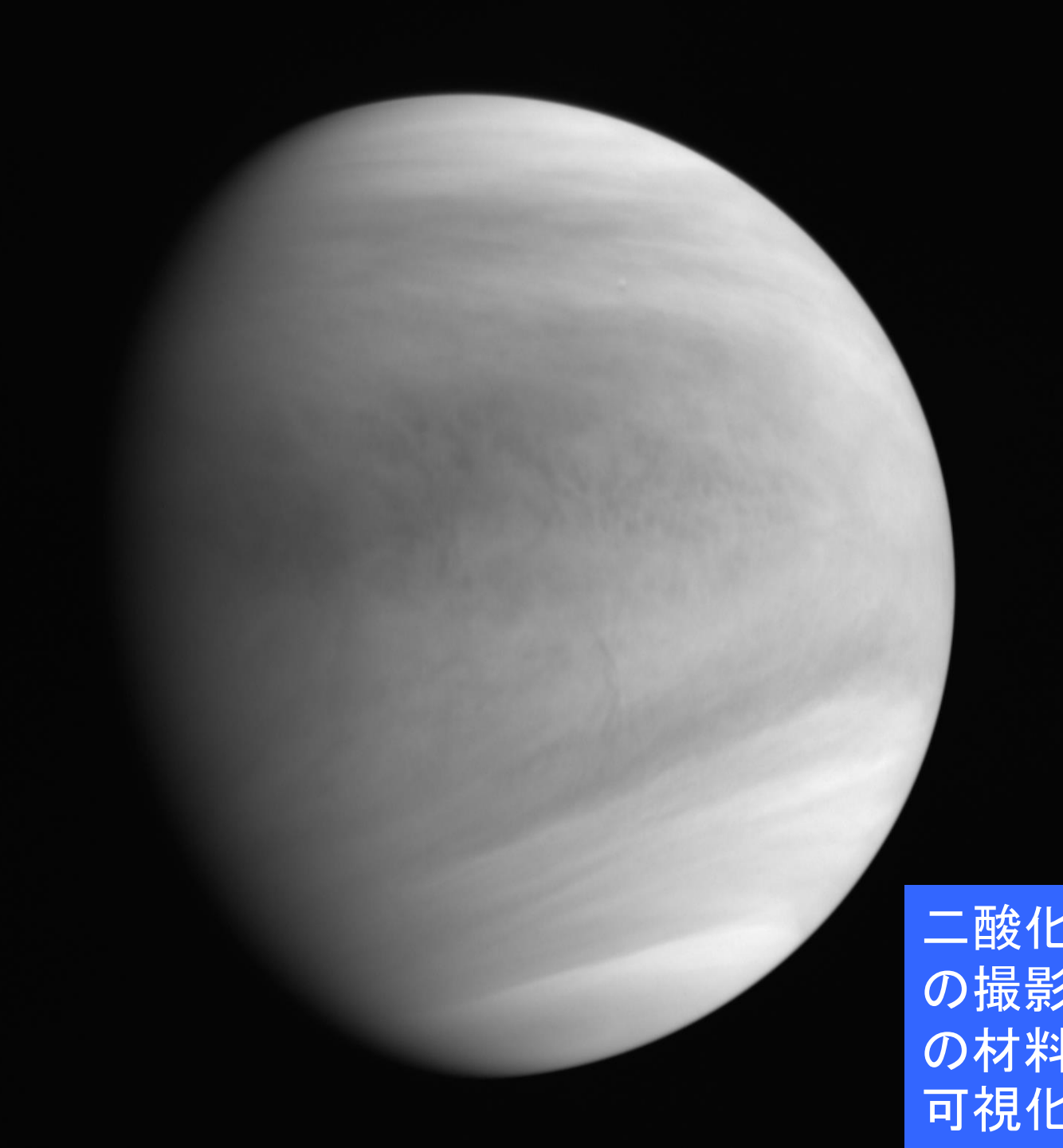


lir_20160426_071622_pic_l2b_v10.fit



lir_20160506_142053_pic_l2b_v10.fit





紫外イメージャ (UVI)

波長 283 nm
(二酸化硫黄吸収)

高度70km(雲頂)

二酸化硫黄の吸収波長での撮影はこれが初。硫酸雲の材料物質の輸送過程を可視化する。

SO₂ : Origin of H₂SO₄

SO₂ measurements by Vega landers

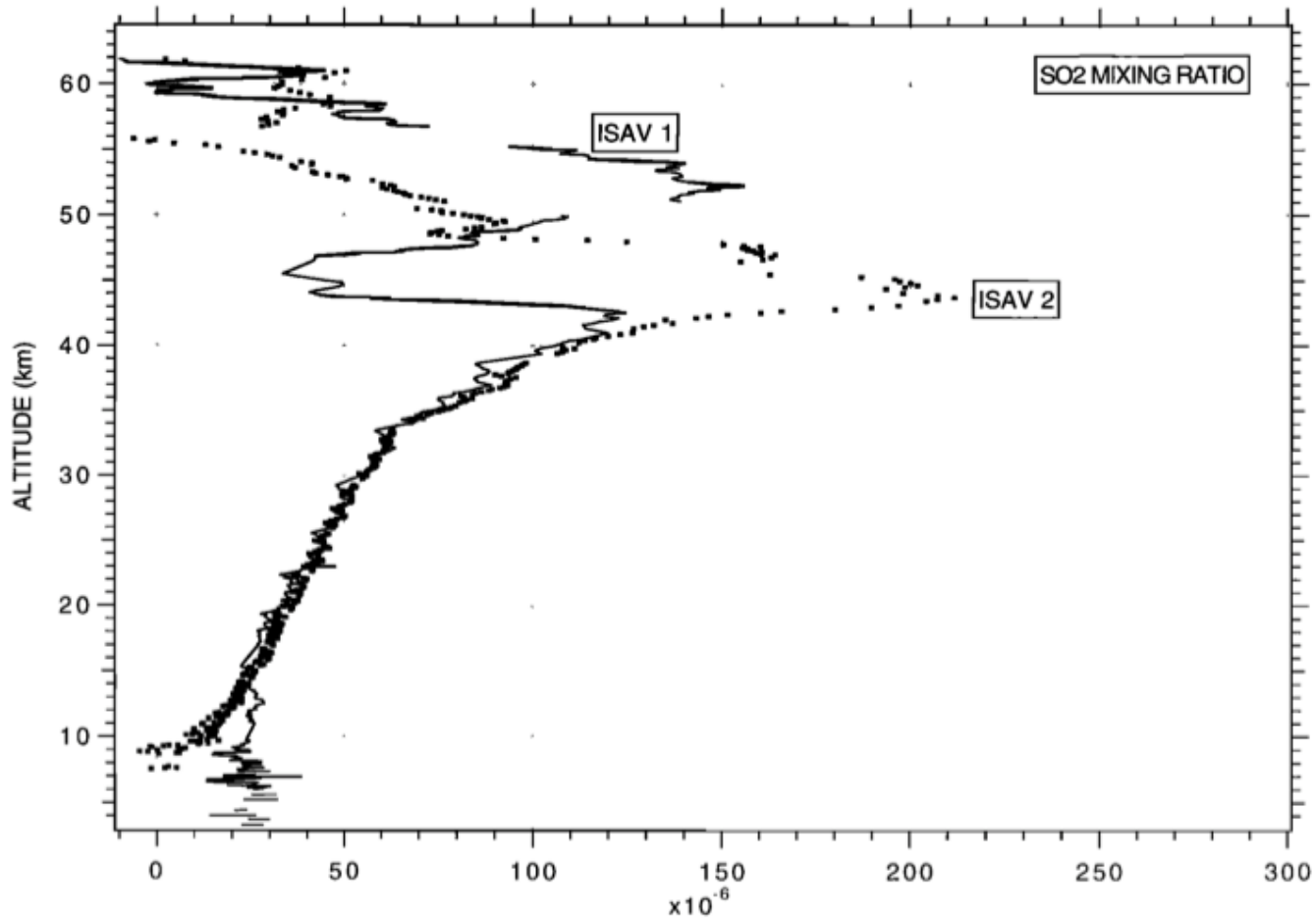
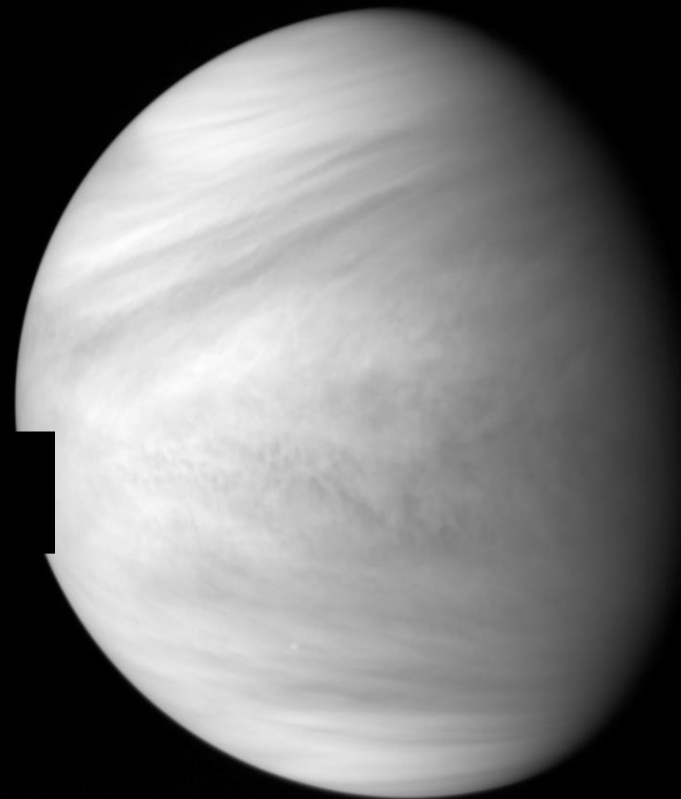
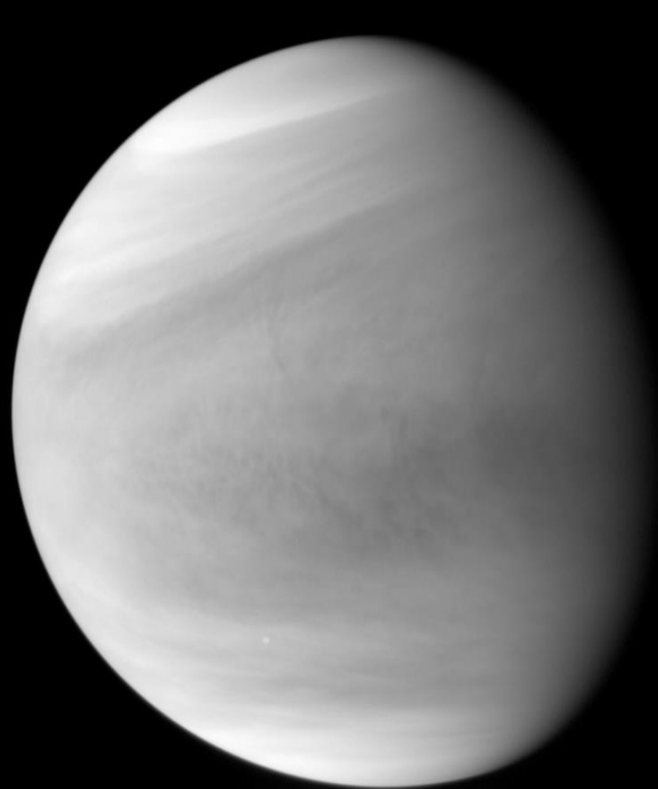


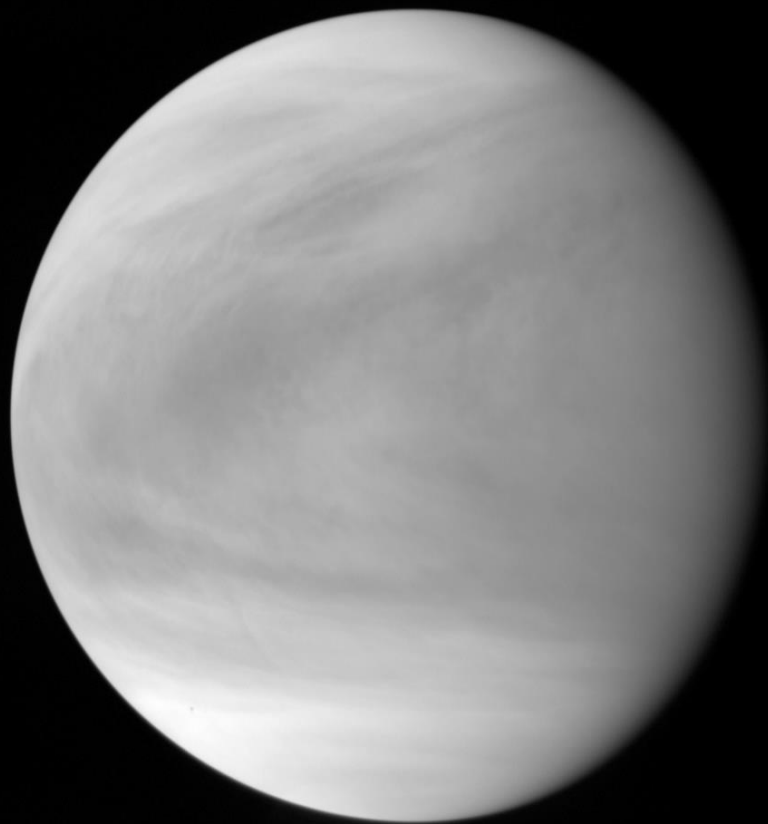
Figure 24. The SO₂ mixing ratio vertical profile retrieved for ISAV 2 (data points) is compared to that determined for ISAV 1. There is a large difference of structure above 40 km, while the profiles are nearly identical below 40 km. A peak of 210 ppm is observed at 43 km in the ISAV 2 data.

283 nm (SO₂) と 365 nm (未知吸収物質)

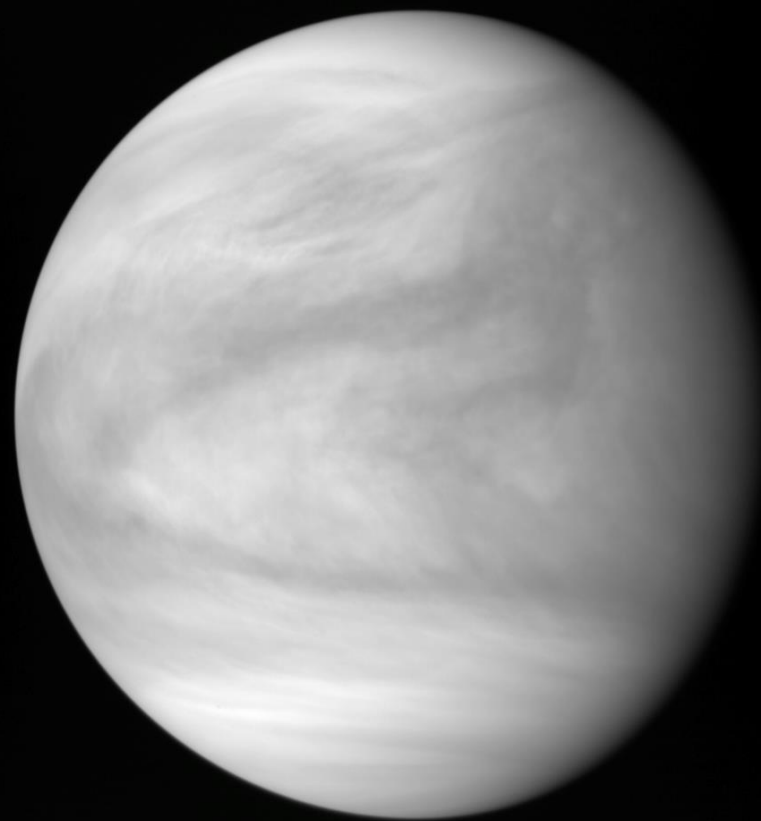


uvi_20151207_051953_283_l2b_v10.fit

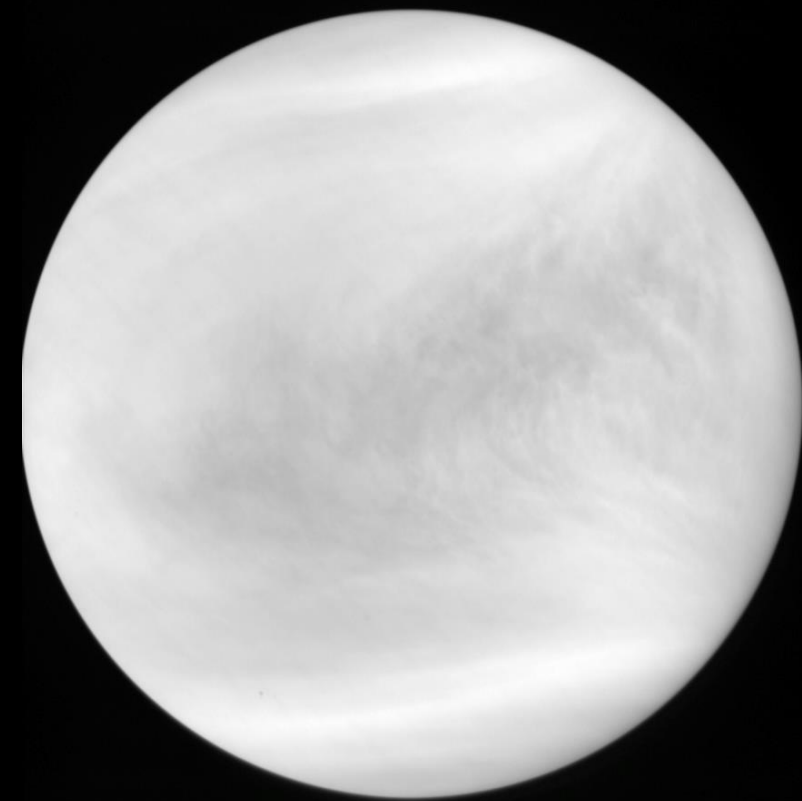
uvi_20151207_052330_365_l2b_v10.fit



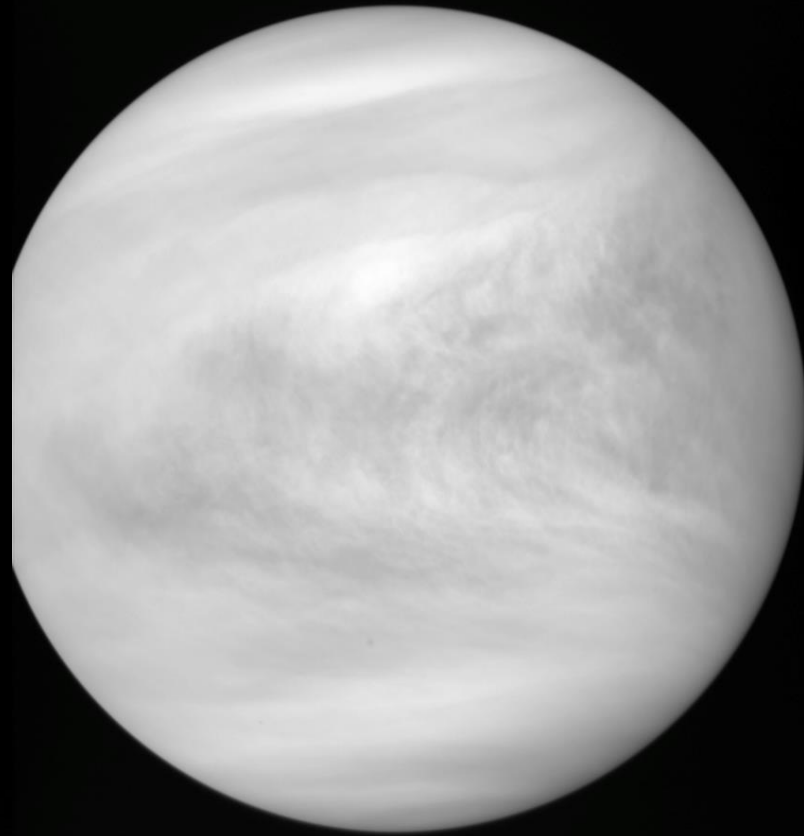
uvi_20160517_201339_283_l2b_v10.fit



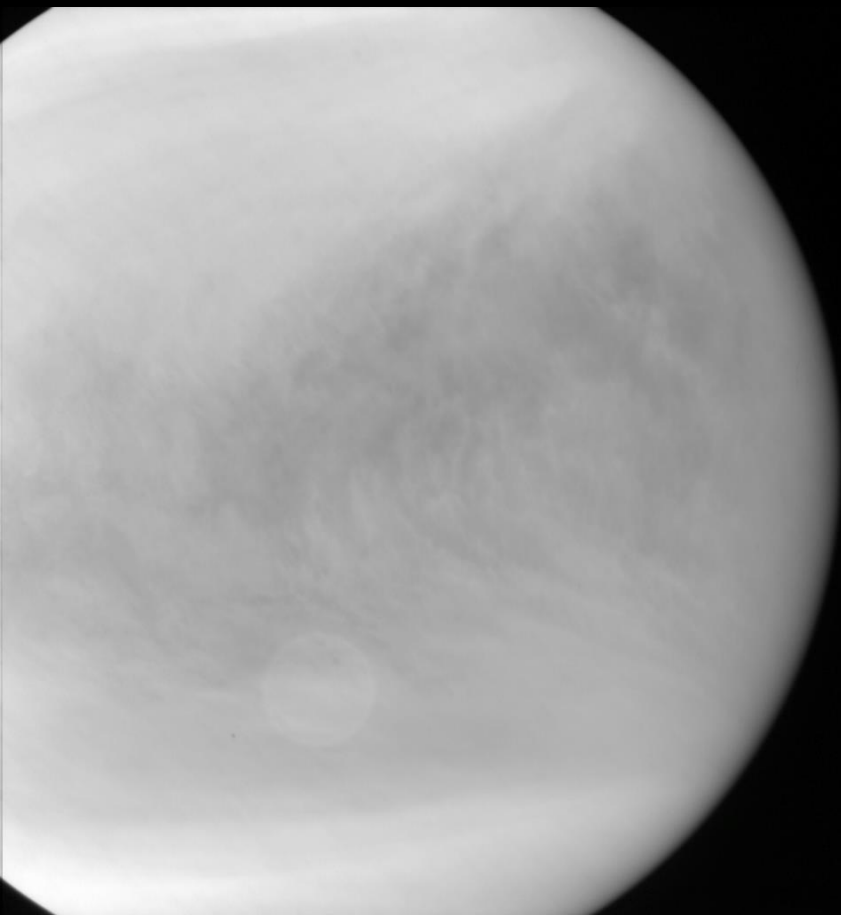
uvi_20160517_201715_365_l2b_v10.fit



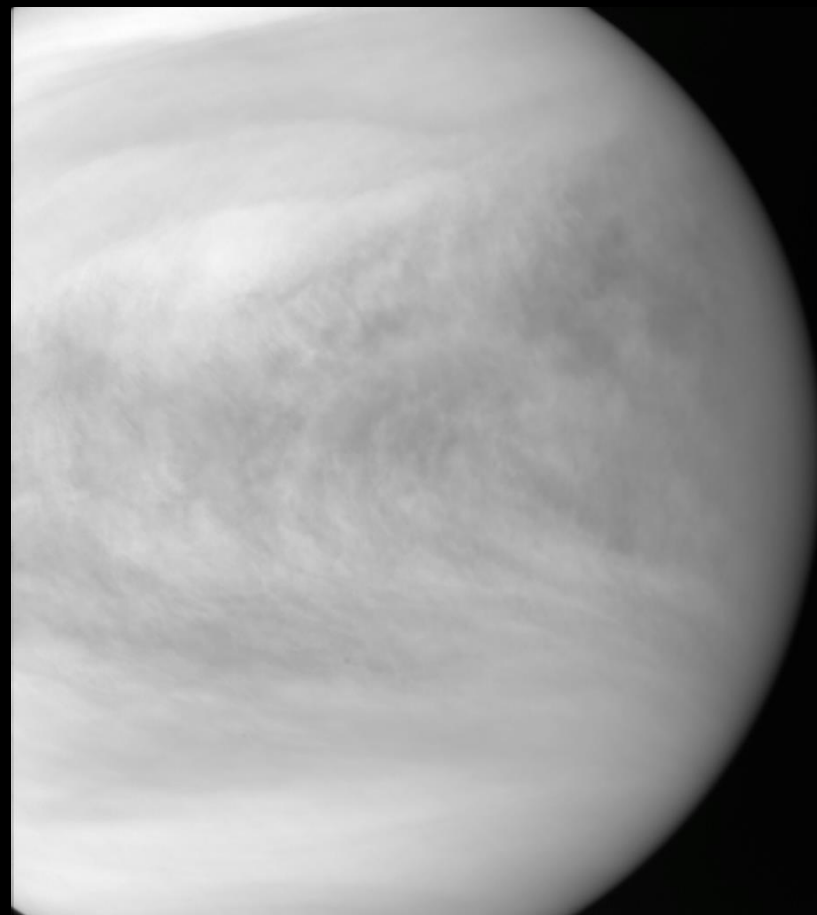
uvi_20160506_181341_283_l2b_v10.fit



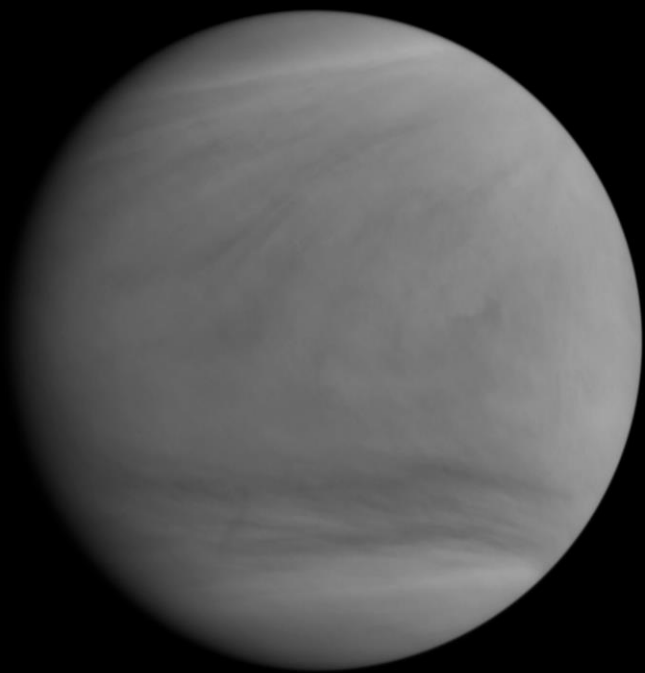
uvi_20160506_181716_365_l2b_v10.fit



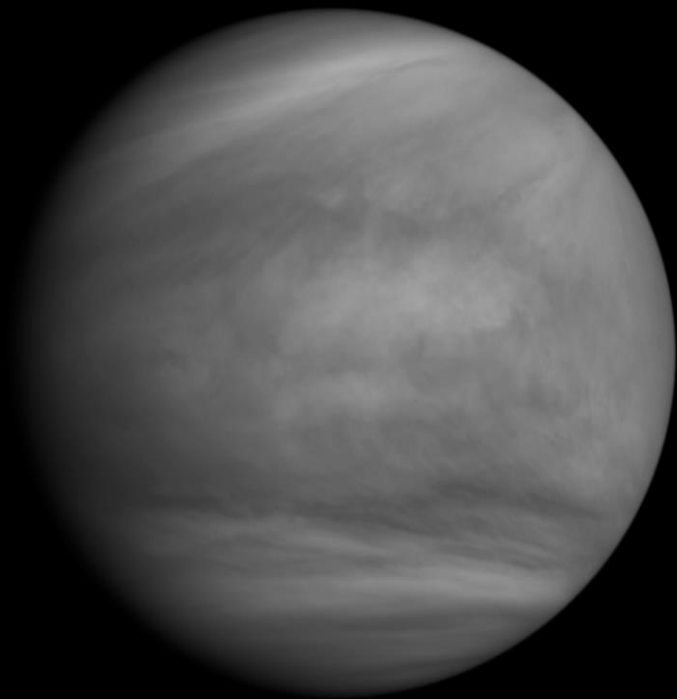
uvi_20160506_201341_283_l2b_v10.fit



uvi_20160506_201717_365_l2b_v10.fit

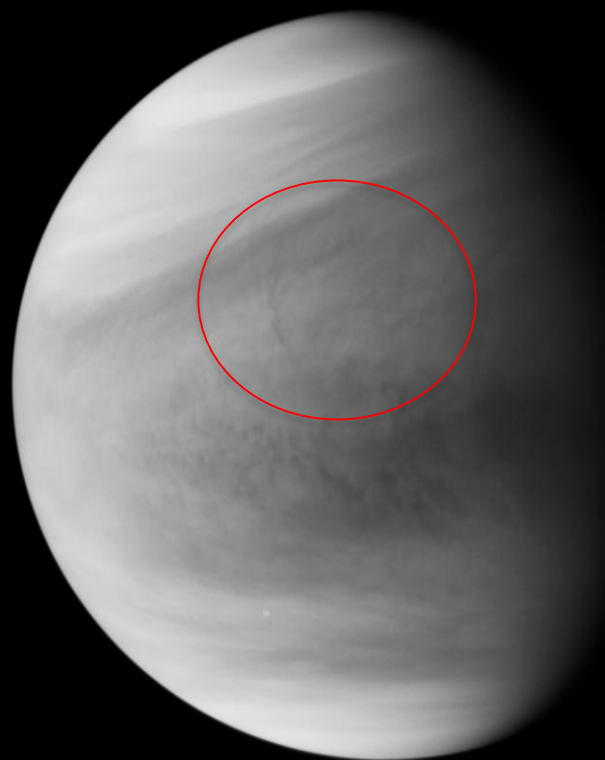


uvi_20160425_171339_283_l2b_v10.fit

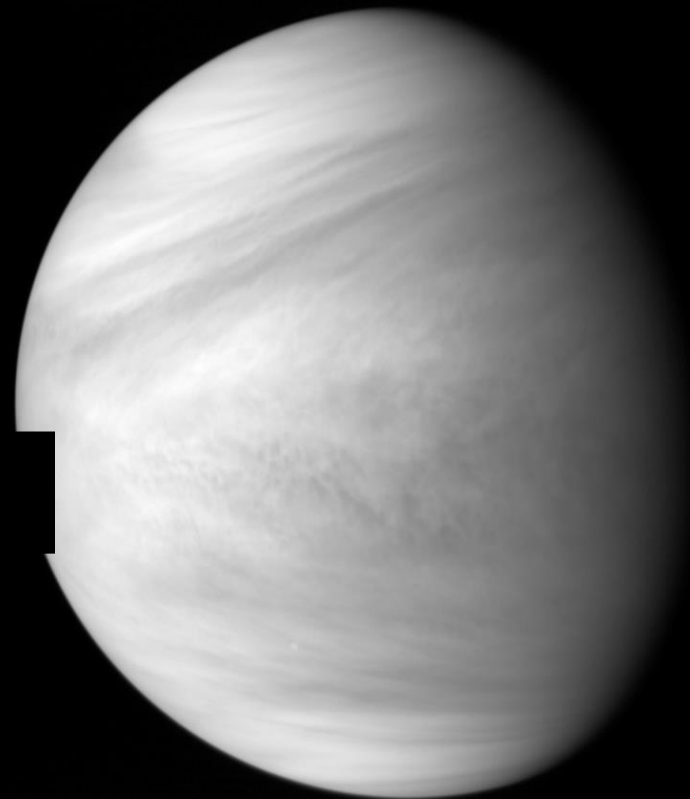


uvi_20160425_171716_365_l2b_v10.fit

283 nm (SO₂) と 365 nm (未知吸収物質)



uvi_20151207_051953_283_l2b_v10.fit

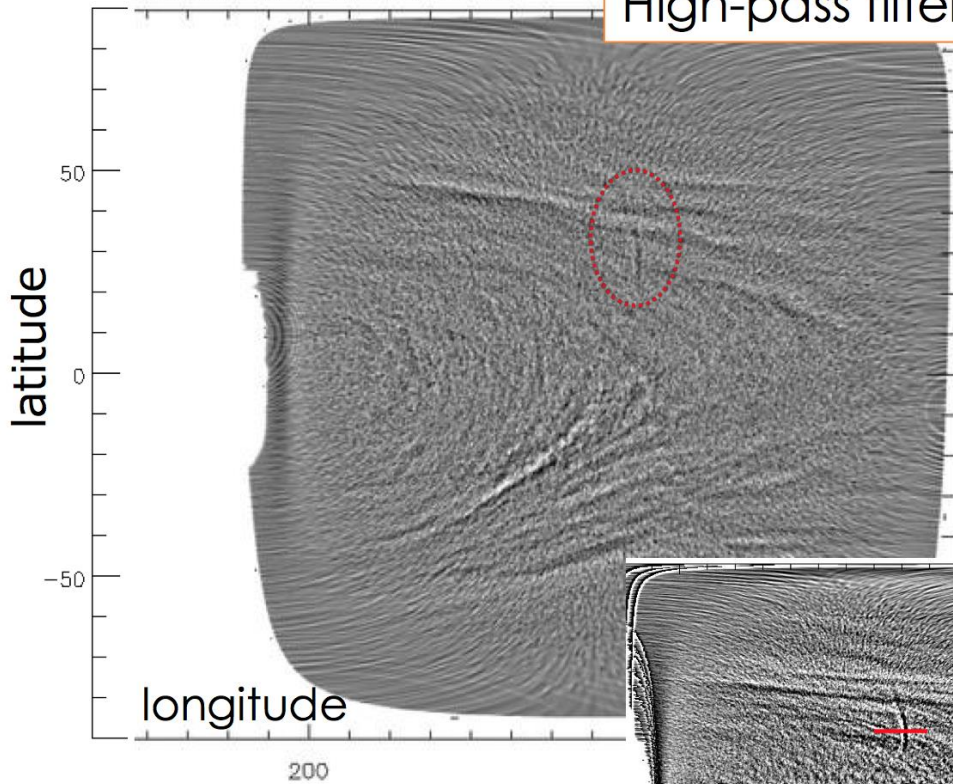


uvi_20151207_052330_365_l2b_v10.fit

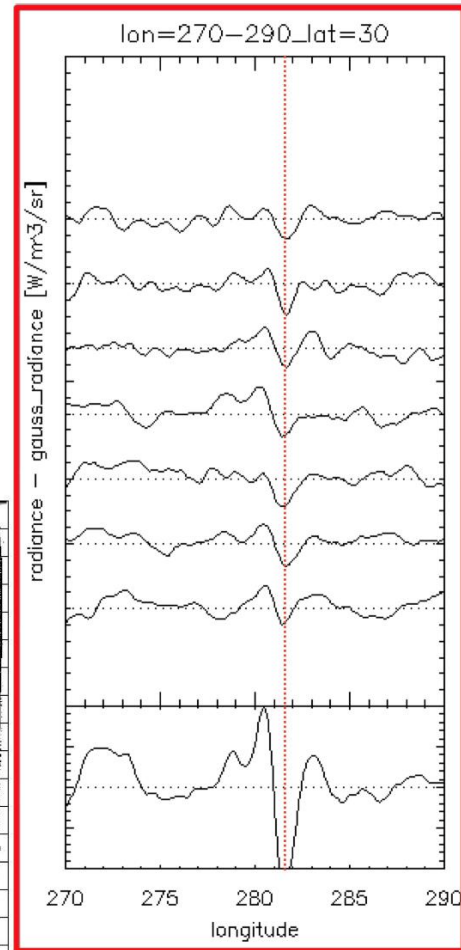
2016/05/17 (283nm: SO₂)

_081341_283_I3_v0.0.0.0.nc

High-pass filter



Original and averaged images



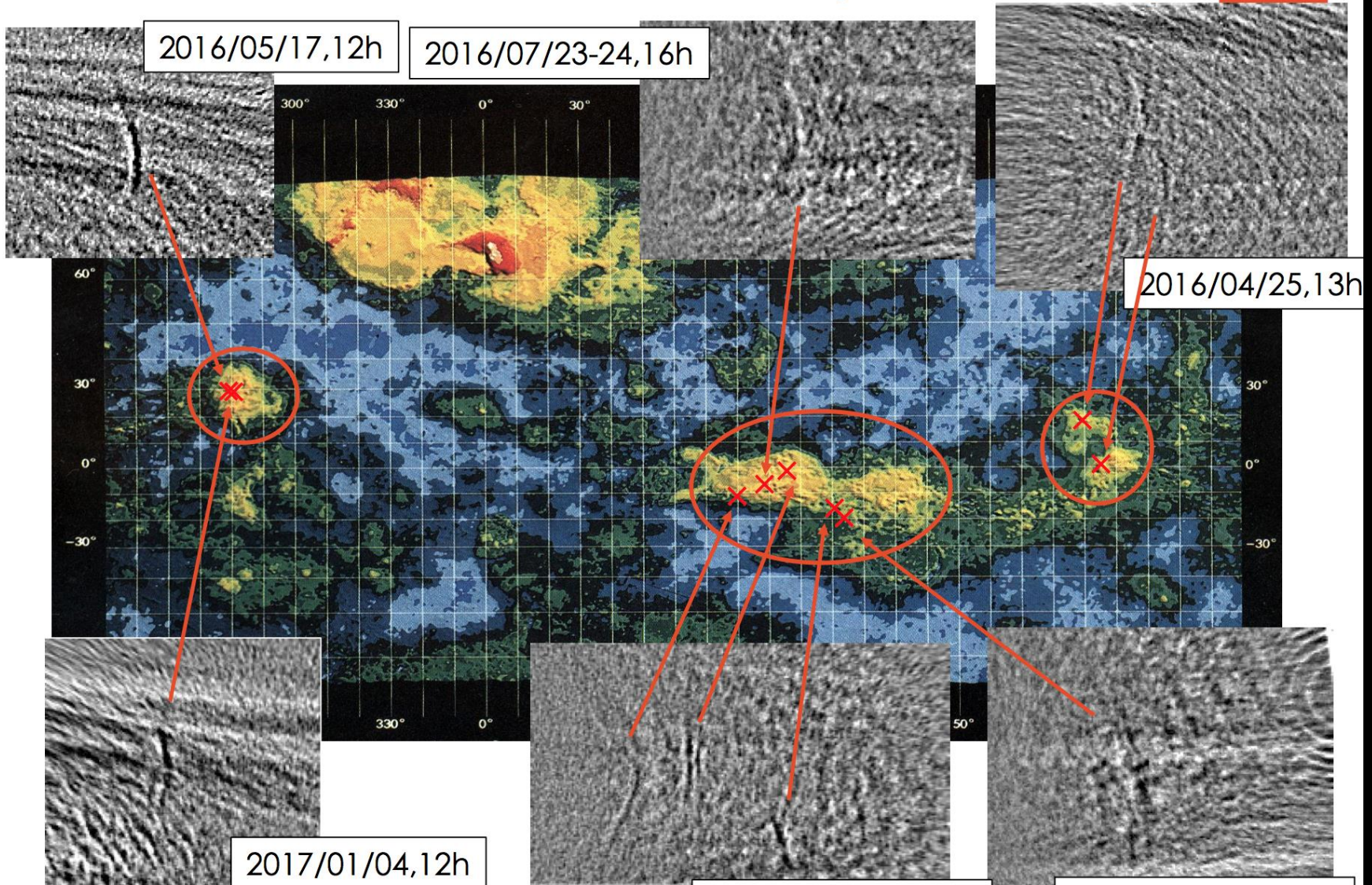
08:13
10:13
12:13
14:13
16:13
18:13
20:13

Average

- Stationary features are clearly seen.
- Local time: 12:00

Average (7 images/12h)

Stationary features identified (283nm: SO₂)



*All UVI images are same magnification

2015/12/07, 14-16h

2016/08/03-04, 15h

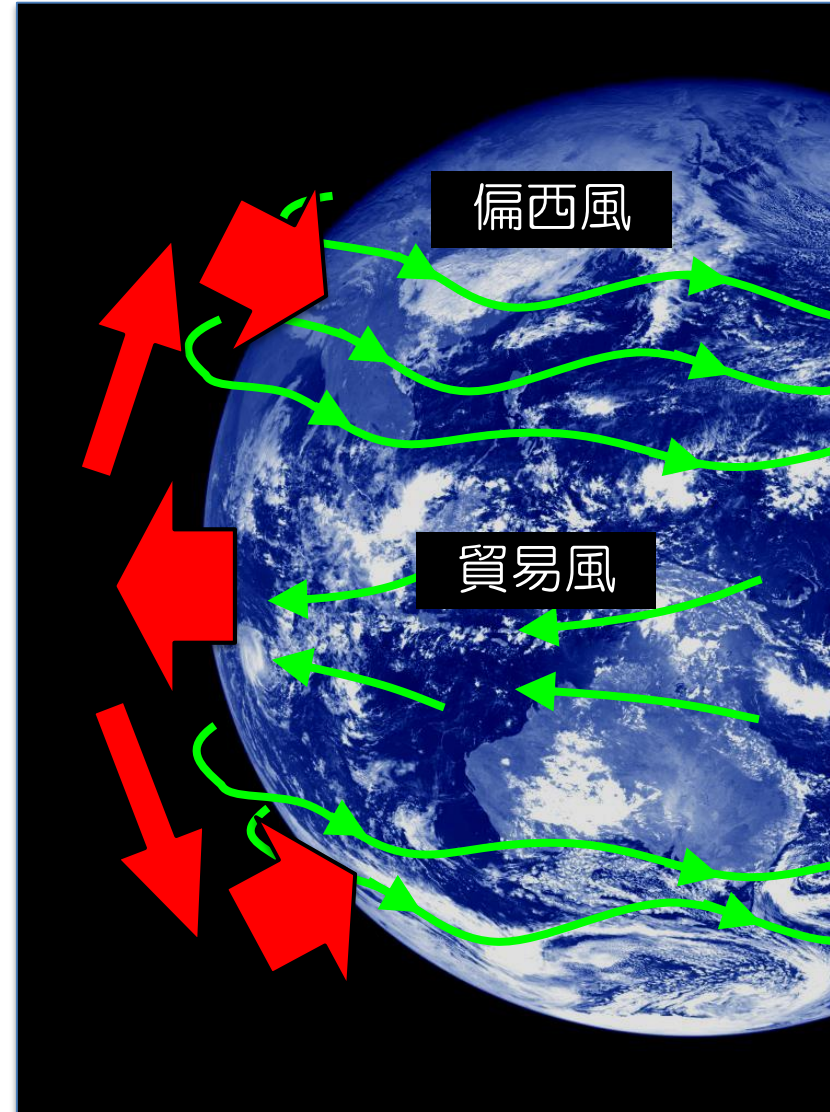
283nm (SO₂) と 365nm (未知吸収物質) の 違い

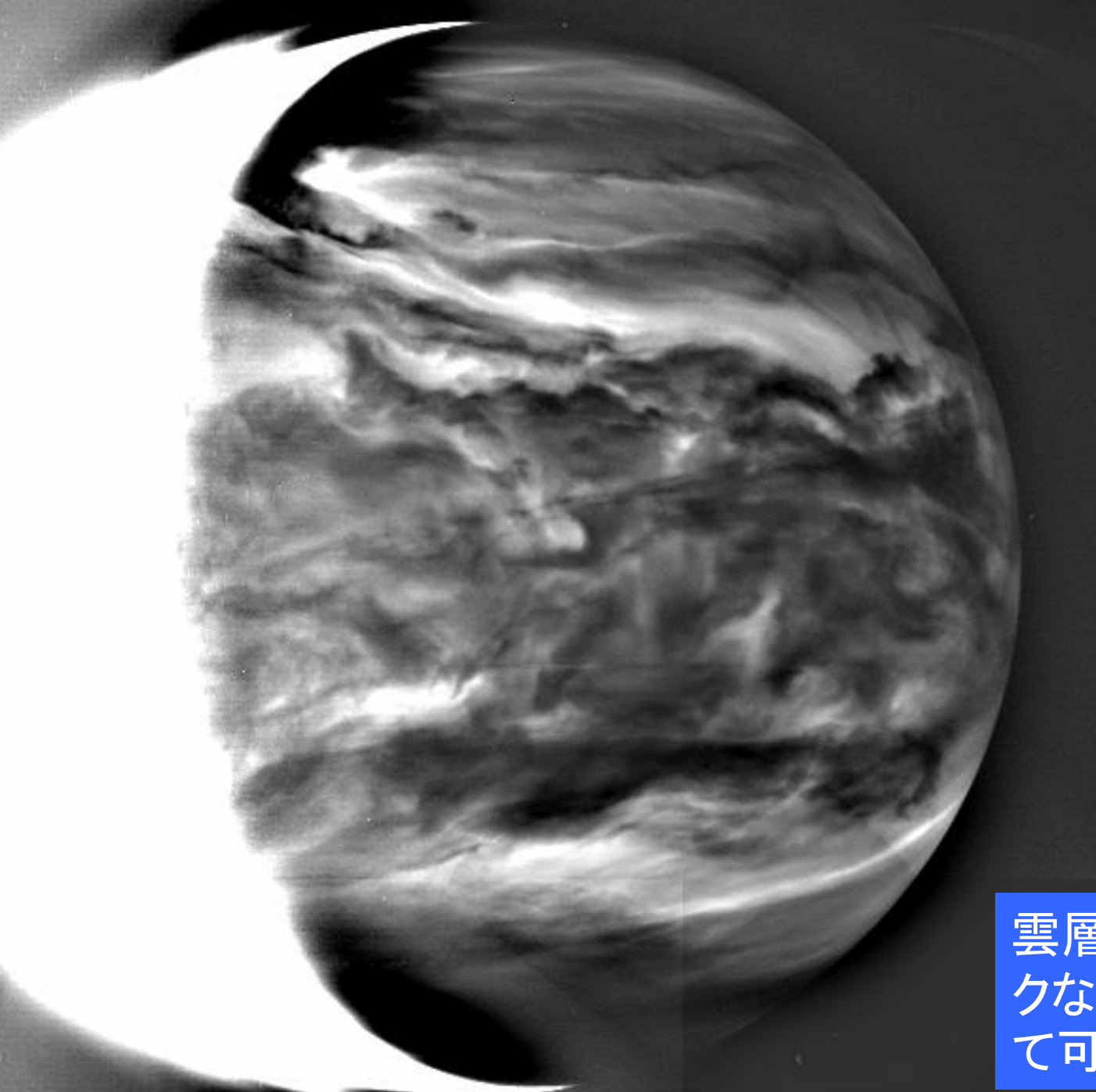
- 重力波は雲層と吸収物質の層を同時に揺らす
- (簡易モデリングによると) 雲と吸収物質のスケール
ハイトが異なると重力波により雲頂より上の吸収物
質のコラム量が増加する → 弓状構造が観察される
- たとえば、雲頂付近でのSO₂のスケールハイトは雲
のスケールハイト(~4km)より小さく、未知吸収物質
のスケールハイトは雲と同程度だと、見え方の違い
を説明できそう

地球での角運動量の循環

- 中高緯度：偏西風のため大気が地面を引きずり、大気から固体惑星へ角運動量輸送
- 低緯度：偏東風のため地面が大気を引きずり、固体惑星から大気へ角運動量輸送
- (対流圏上層：Rossby波の効果により低緯度から高緯度へ角運動量輸送)

金星でも低緯度は自転と逆方向の地表風と想ってきたが...





2 μm カメラ (IR2)

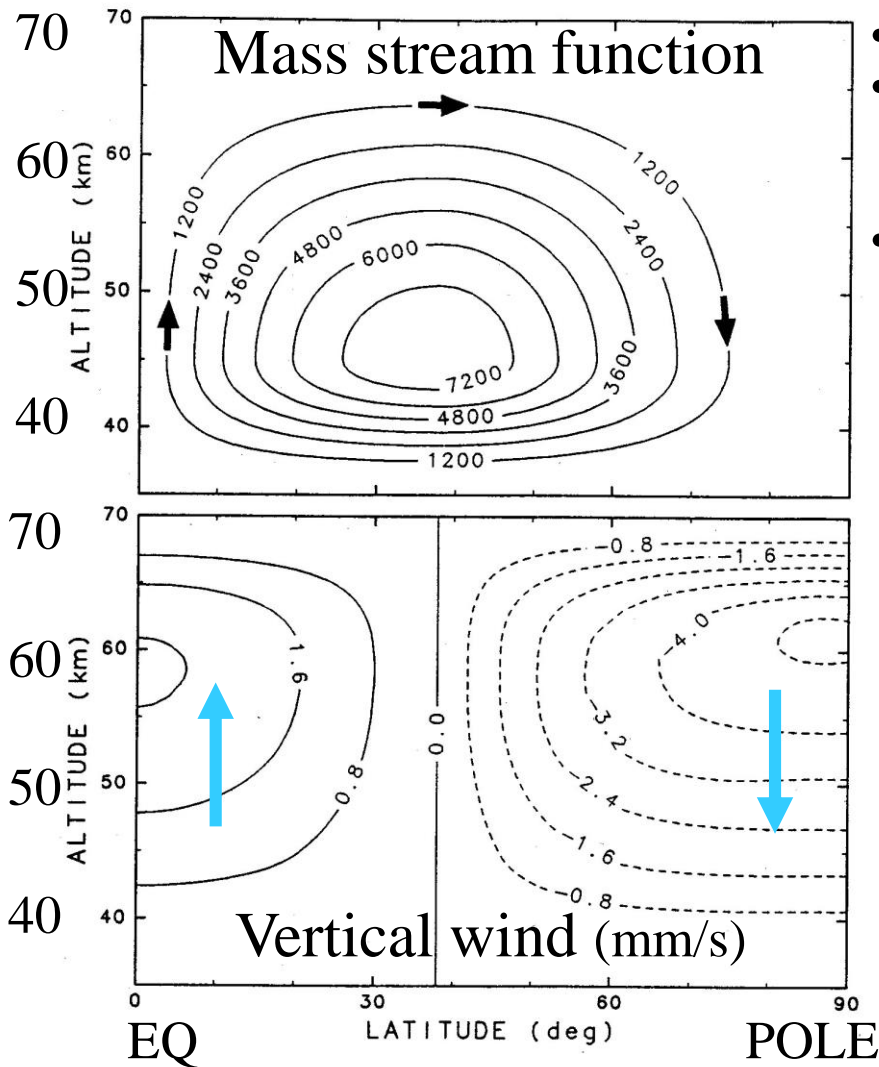
波長 2.26 μm
(雲の下の大気
から発せられる
熱放射を光源と
して雲が影絵と
して見える)

高度50km(雲底)

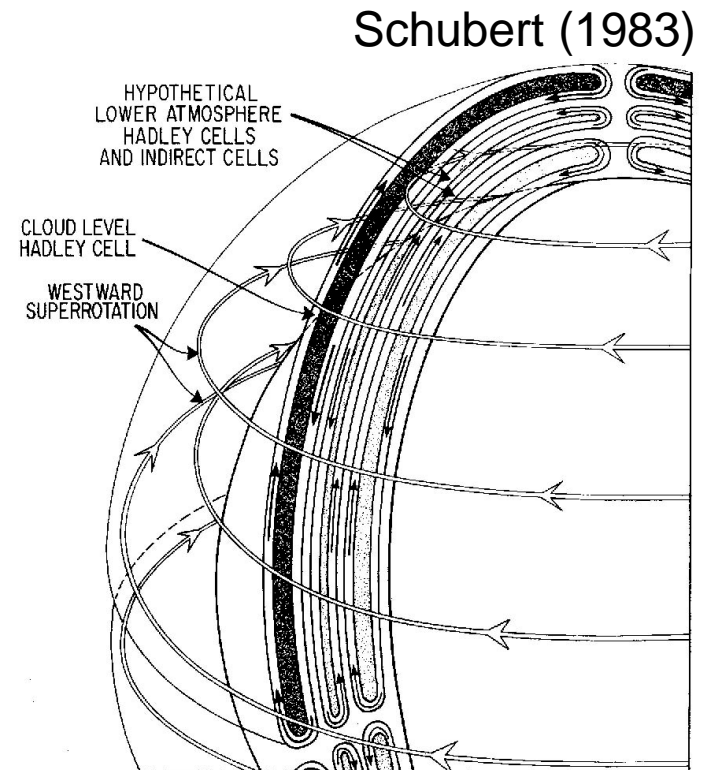
雲層深部のダイナミッ
クな大気現象が初め
て可視化された

2次元モデルによる考察

(Imamura & Hashimoto, *J. Geophys. Res.*, 1998)

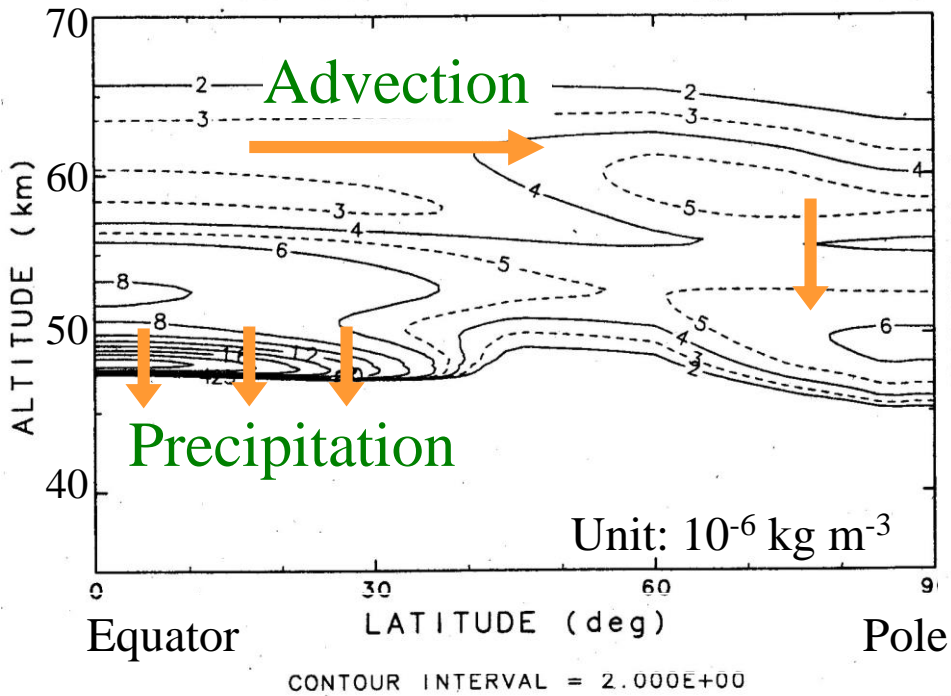


- Transport/condensation of H_2SO_4 and H_2O
- Particle radius is fixed:
 - $r = 1.15 \mu\text{m}$ for $z > 58 \text{ km}$
 - $r = 3.65 \mu\text{m}$ for $z < 58 \text{ km}$
- H_2SO_4 production at 60-64 km

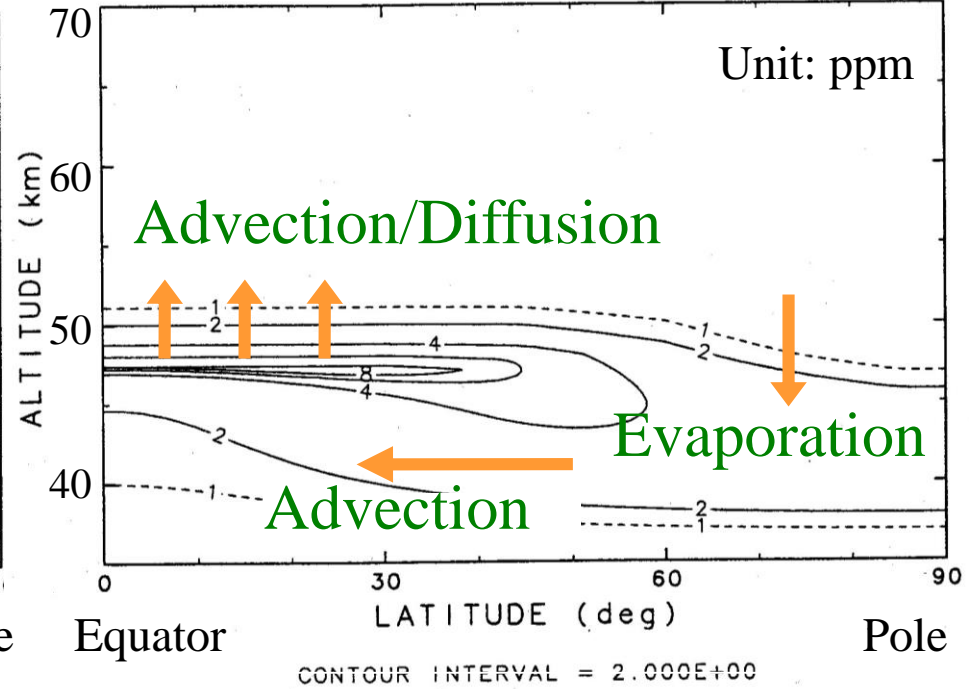


結果

Cloud Mass Loading



H₂SO₄ Vapor



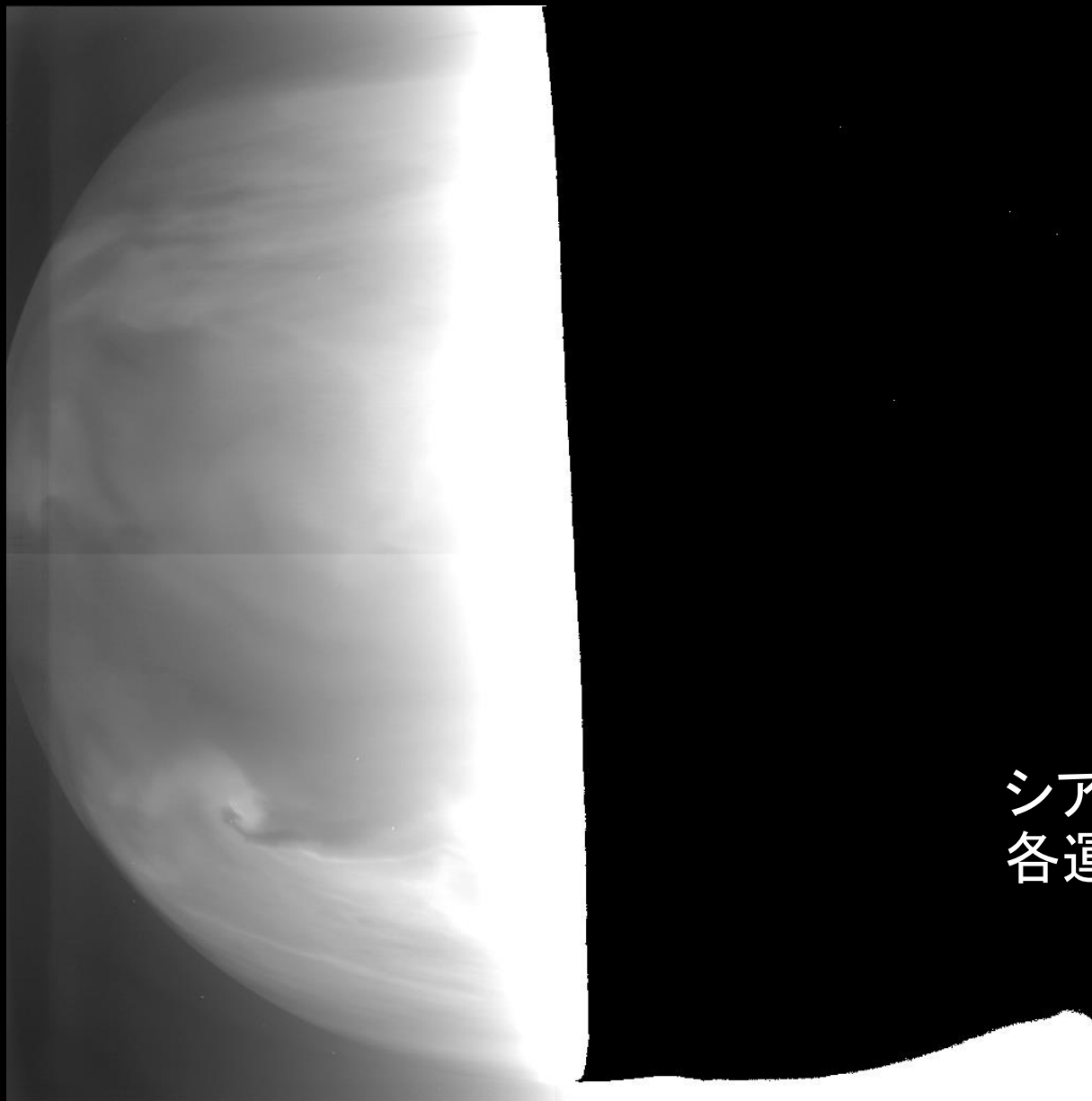


ir2_20160415_100211_174_l2b_v10.fit



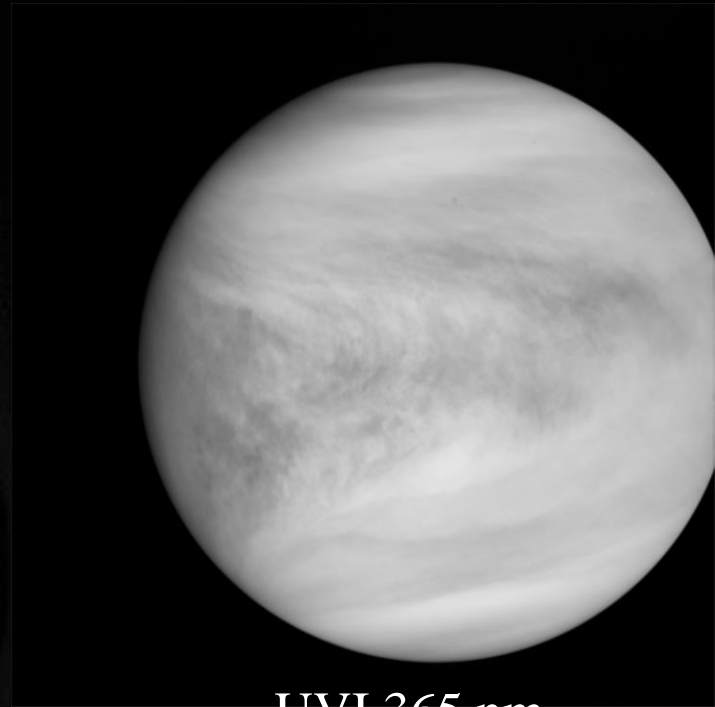
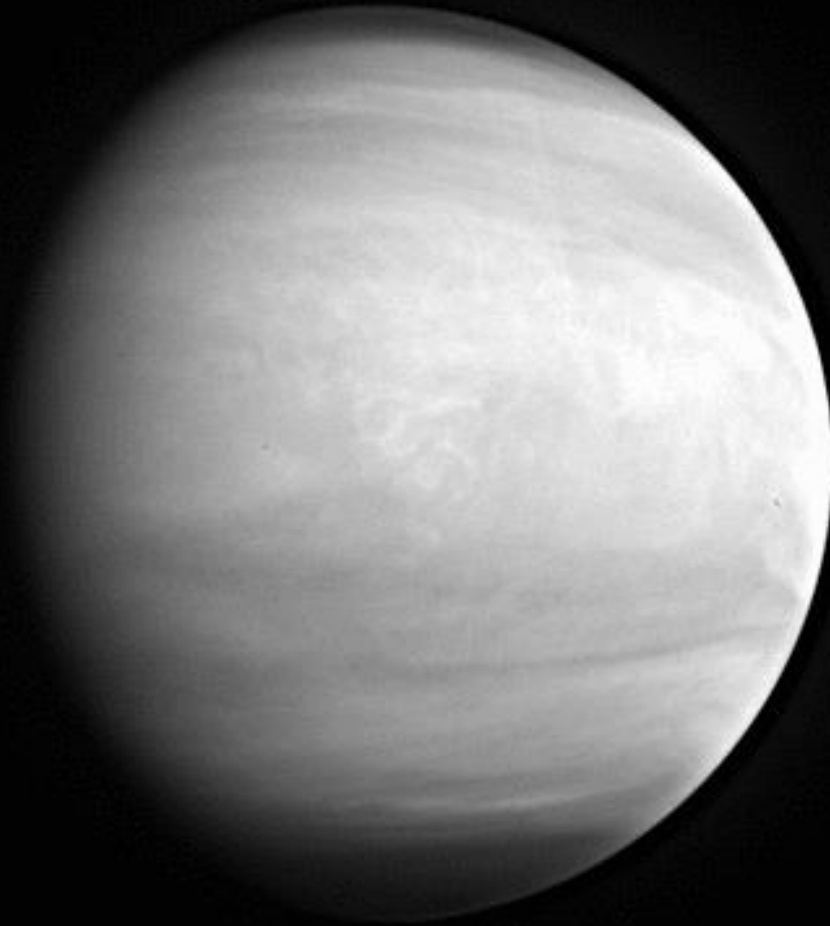
ir2_20160415_081039_232_l2b_v10.fit

惑星スケールの波？ 赤道加速の可能性



シアー解消にともなう
各運動量輸送？

CO₂吸收帯 (IR2 2.02 μm)



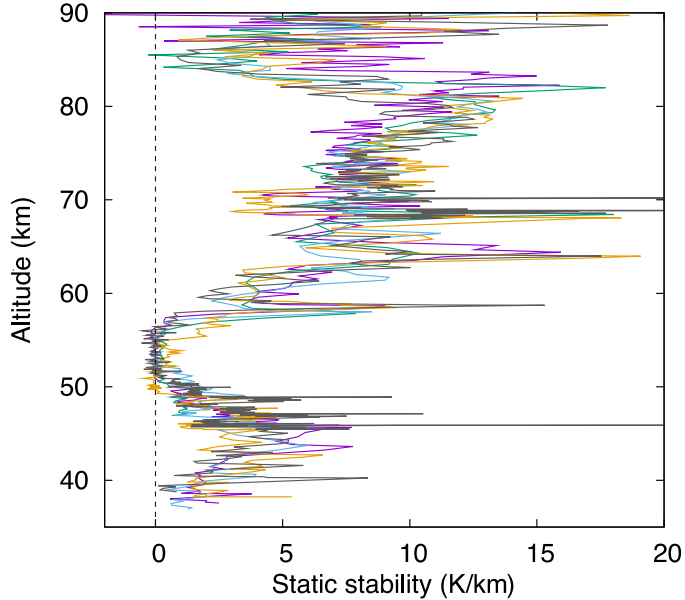
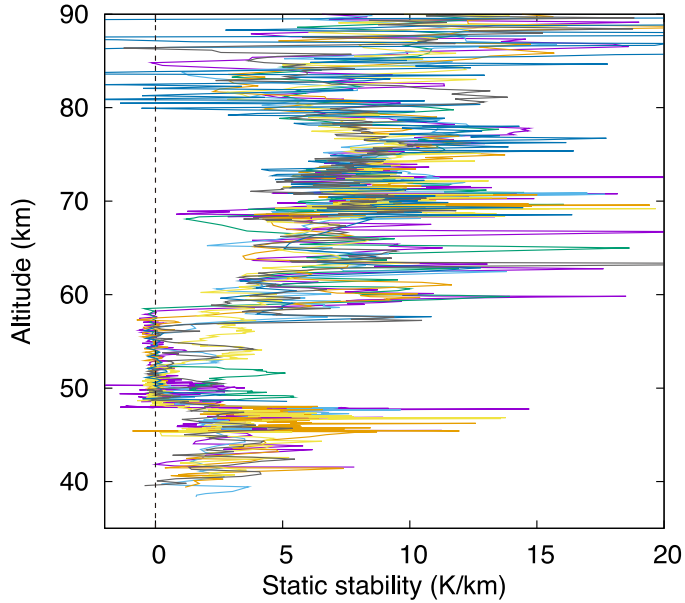
UVI 365 nm

2 July 2016 @ 0.175-234 M km

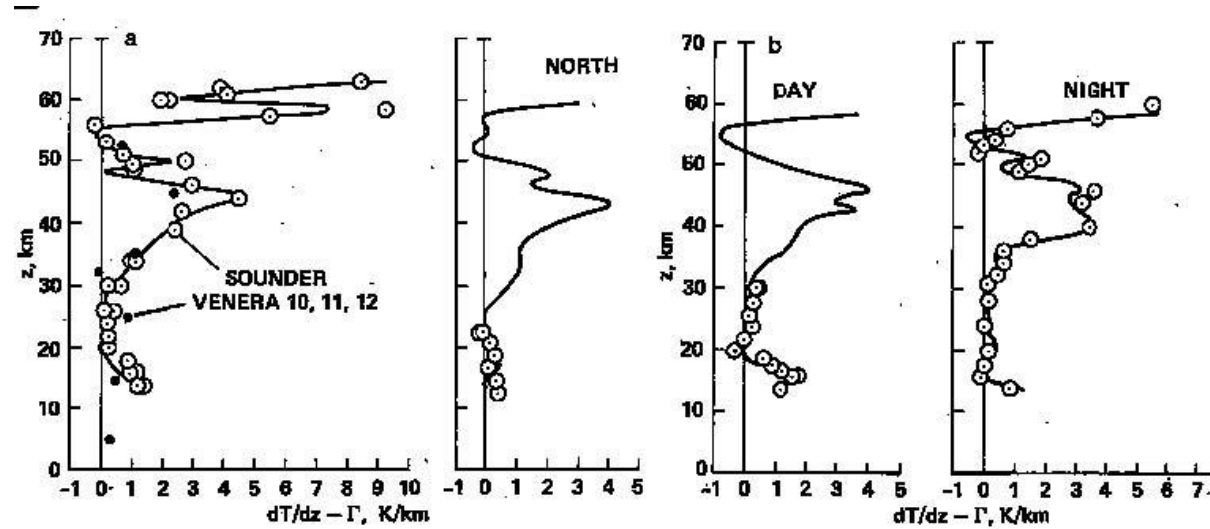
佐藤 (ISAS) 提供

雲頂付近の大気安定度

あかつきRS



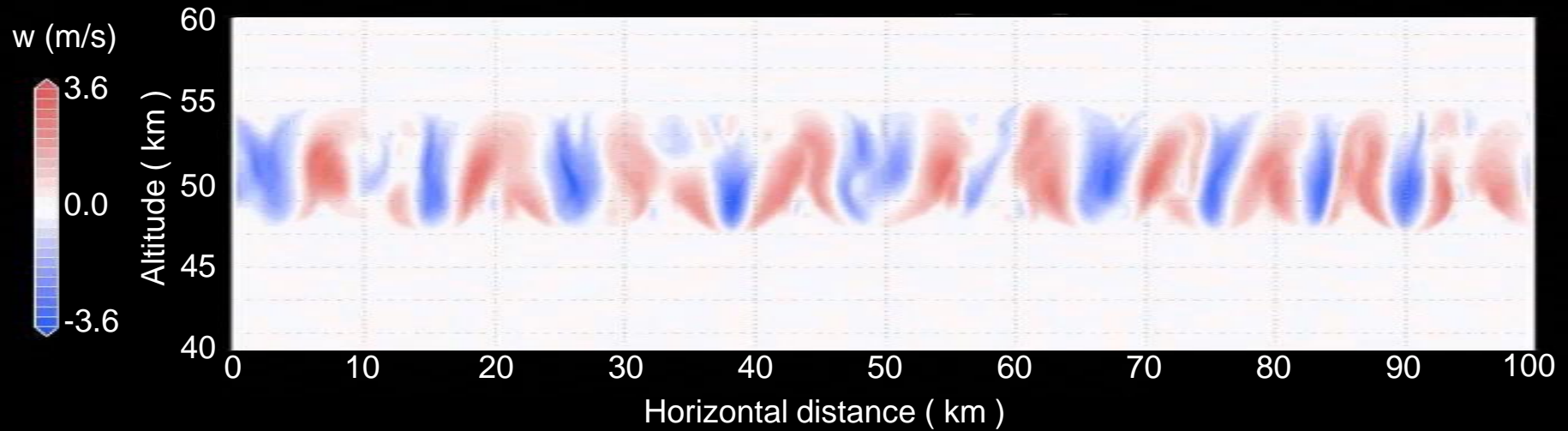
Pioneer Venus probes



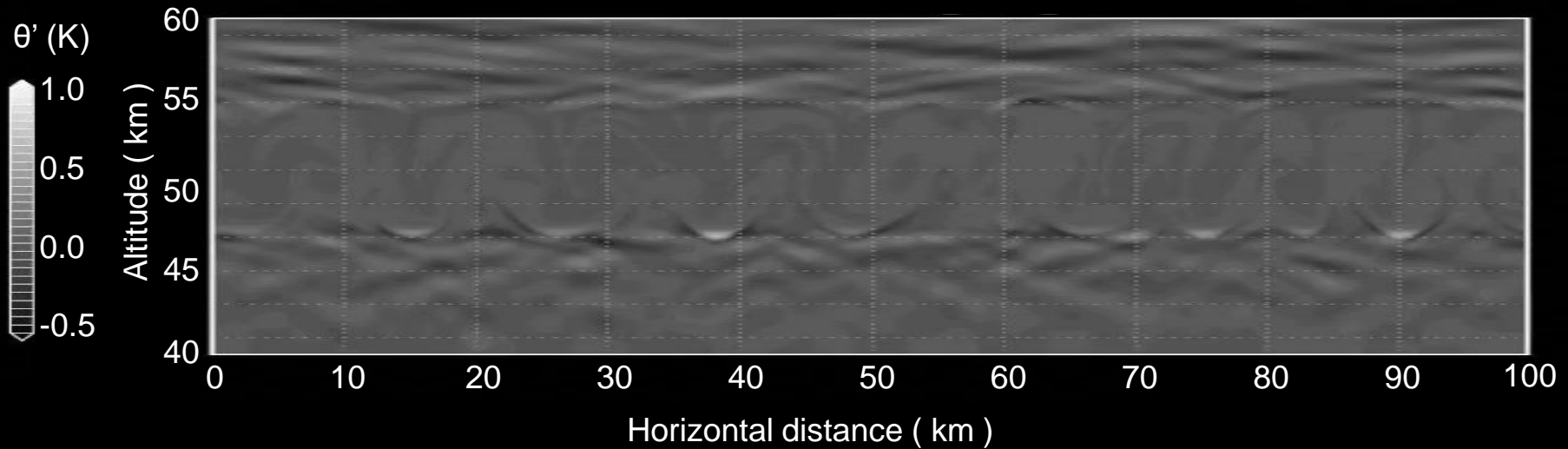
細かな凸凹が観察された雲頂(高度70km)は基本的に安定成層

全球平均条件での対流構造

鉛直速度

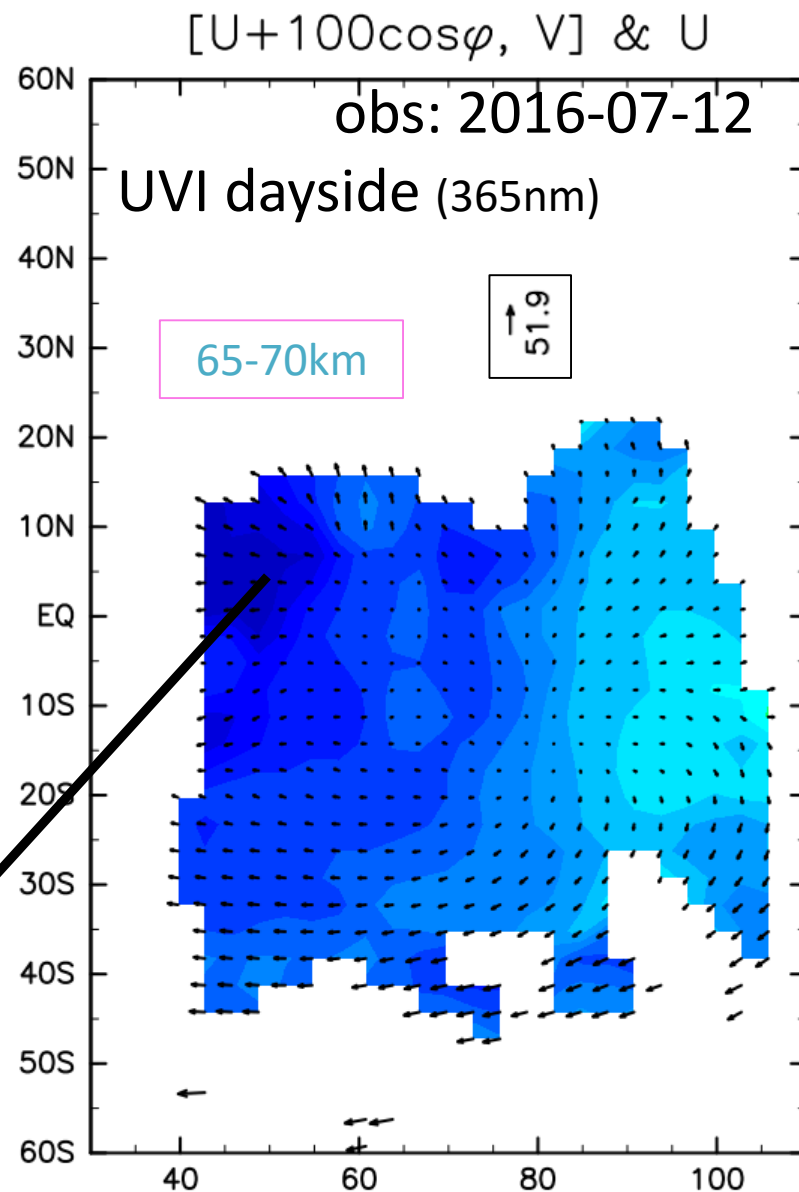
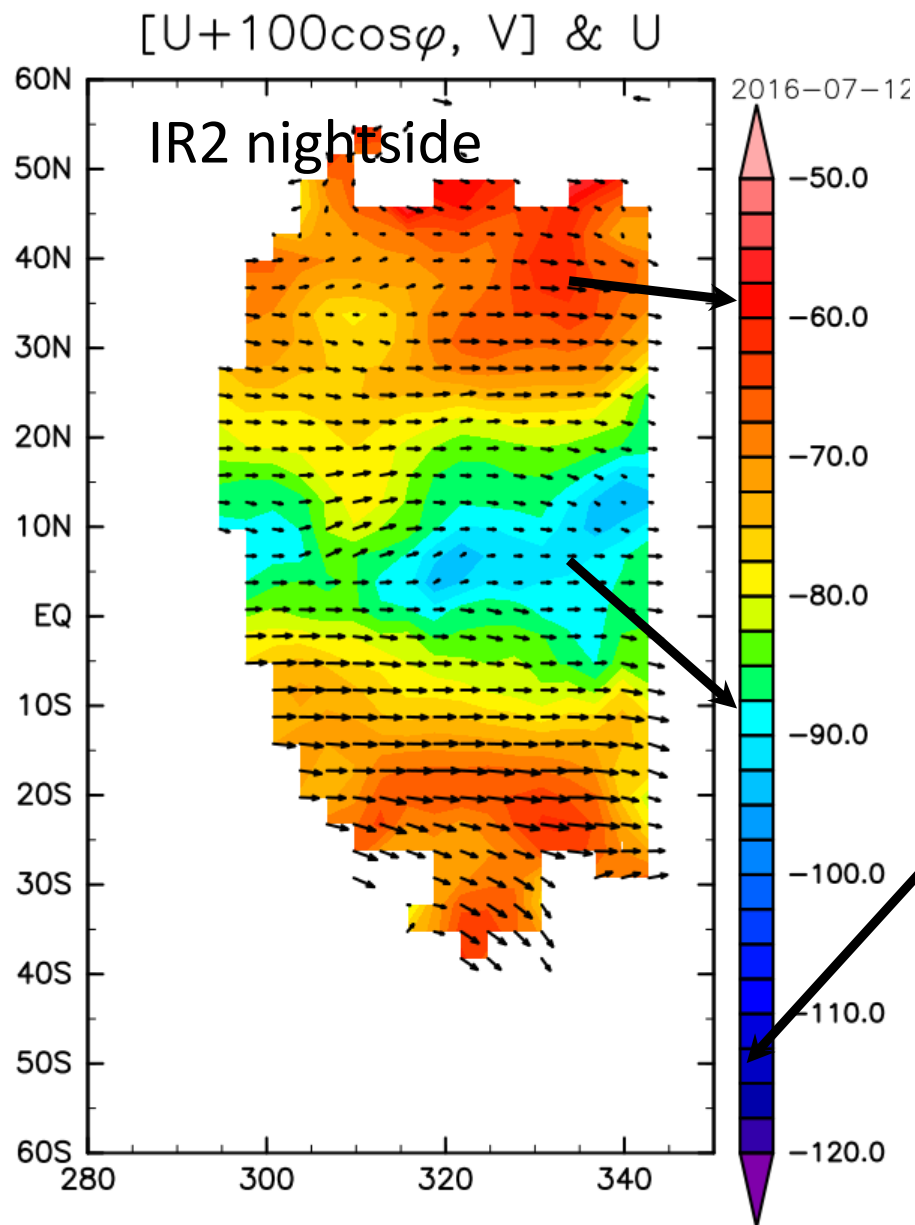


温位擾乱



雲追跡による風速場

堀之内(北大)提供



LMD Venus GCM (Lebonnois et al. 2016)

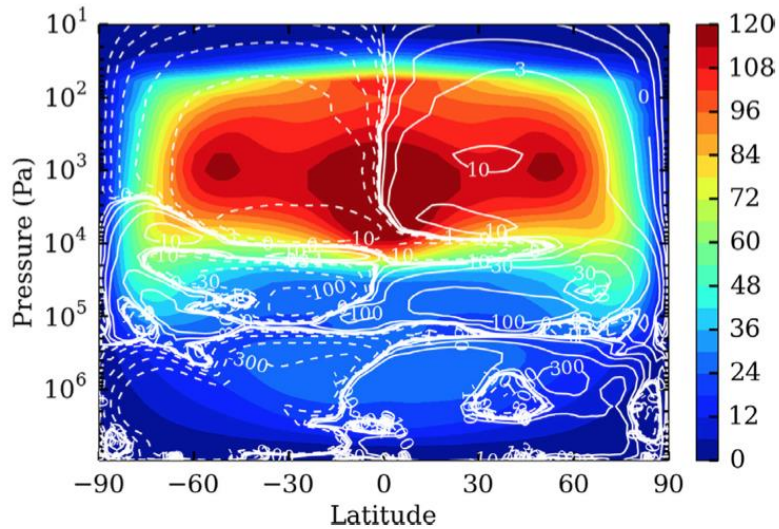


Fig. 5. Distribution of the mean zonal wind field (white contours show the mean meridional stream function, in units of 10^9 kg/s) obtained in the simulation started from superrotation, after 190 Vd.

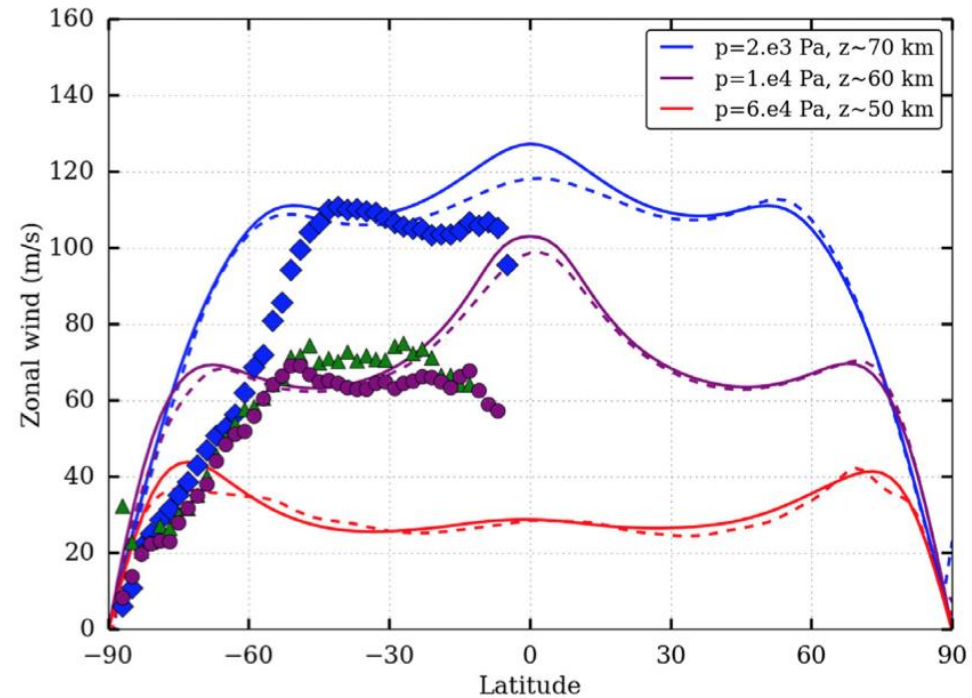
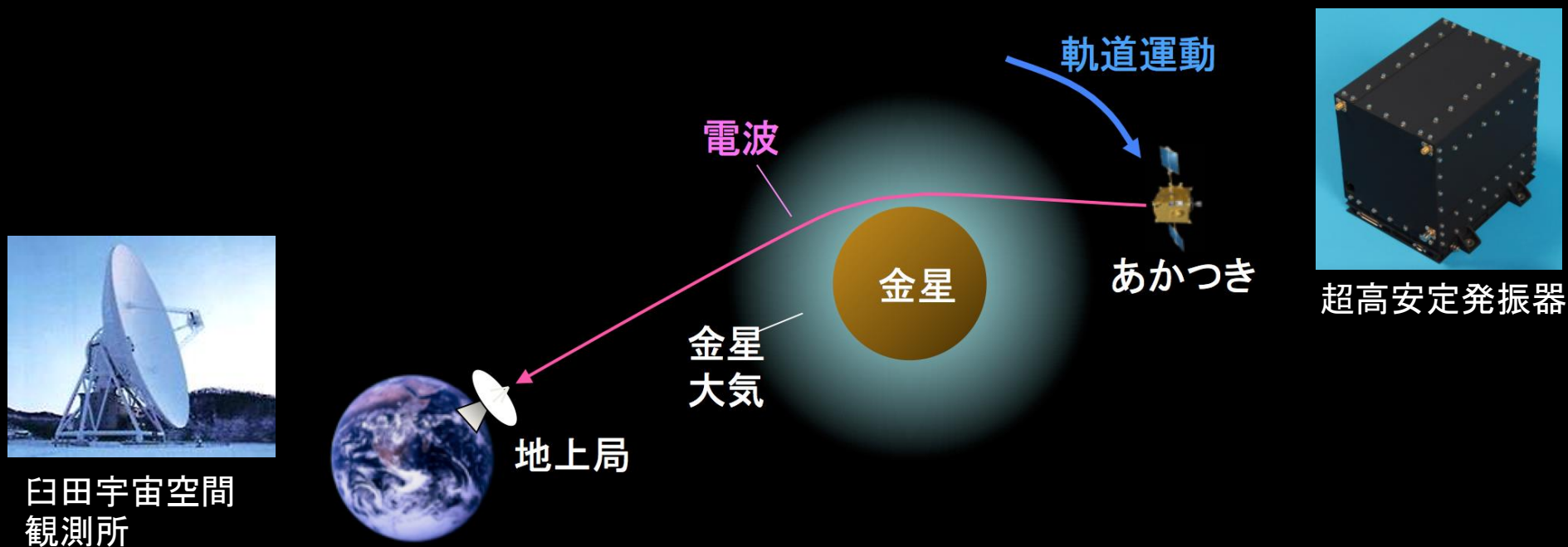


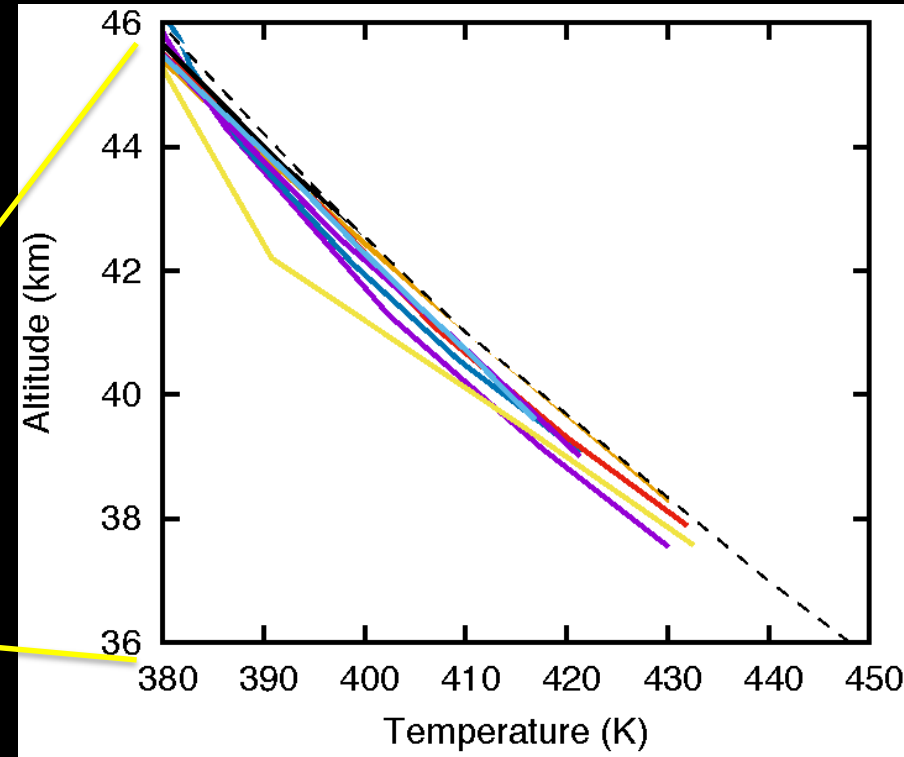
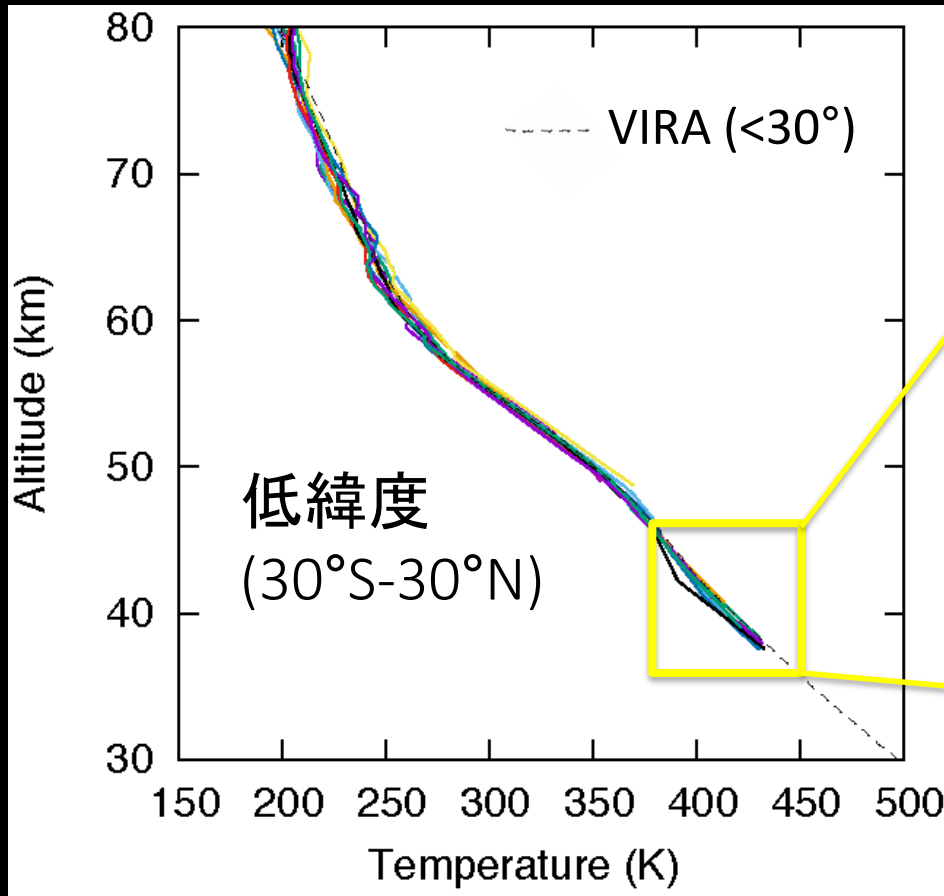
Fig. 6. Zonal and temporal averaged profiles of the zonal wind: (a) vertical profiles at three different latitudes, compared to observed profiles from Venera and Pioneer Venus probes (gray, adapted from Schubert, 1983); (b) latitudinal profiles at roughly 50, 60 and 70 km altitude, compared to averaged cloud-tracking zonal wind profiles obtained with VIRTIS-M images at UV (blue diamonds), visible (green triangles) and near-IR (magenta circles) wavelengths. They correspond to altitudes 66–72 km for UV spectral range, and a few kilometers below that level for visible/near-IR wavelengths (adapted from Hueso et al., 2015). The dashed lines are from the simulation started from rest, after 300 Vd. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

電波掩蔽観測による大気鉛直構造

あかつきが地球から見て金星の背後に隠れるときと金星の背後から出てくるとき、金星大気を通して地上局に届く電波の周波数と強度が変化する様子から、大気鉛直構造を高度分解能 $< 1 \text{ km}$ で求める。

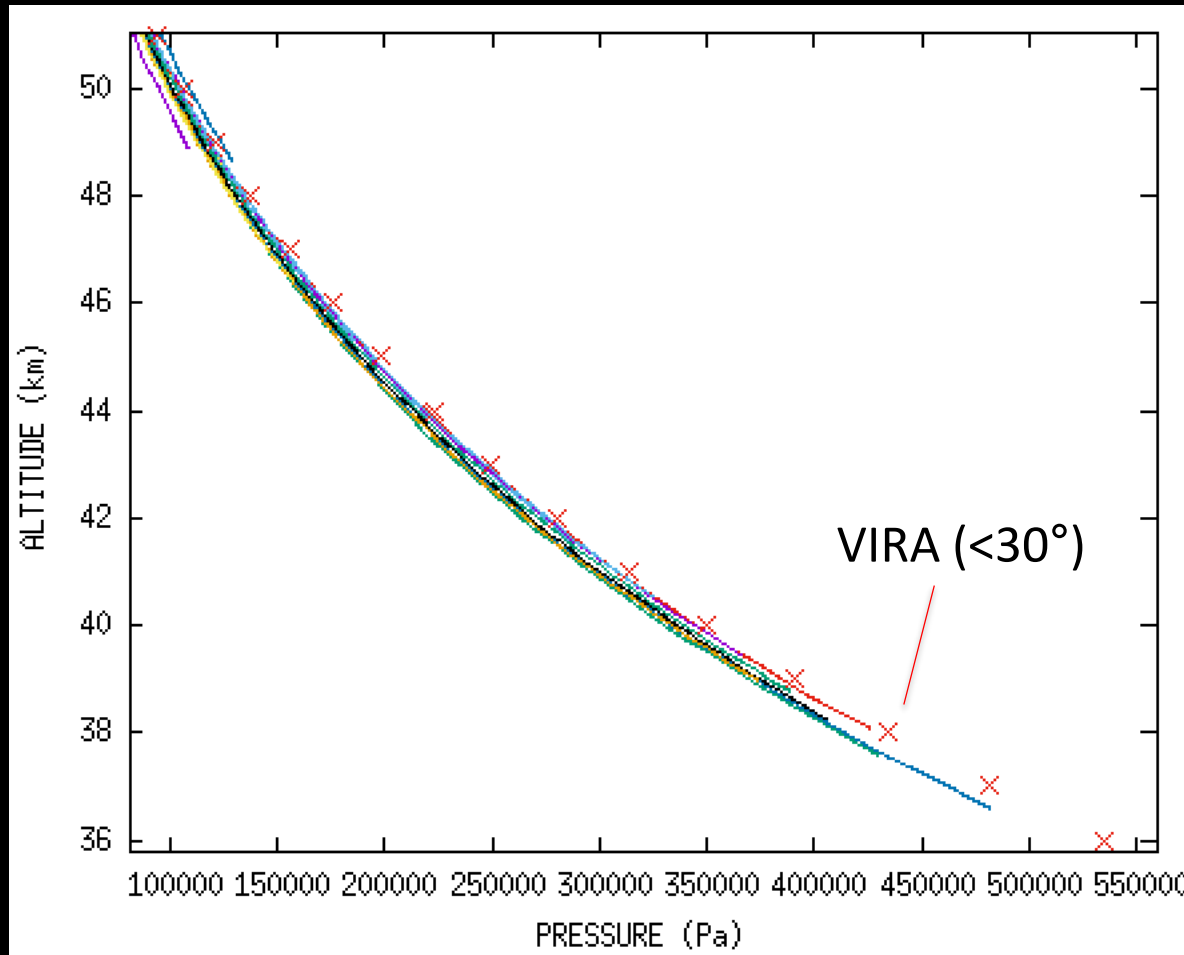


雲層の下の気温



1980年ごろの直接観測に基づく標準大気モデル (VIRA) からずれる傾向

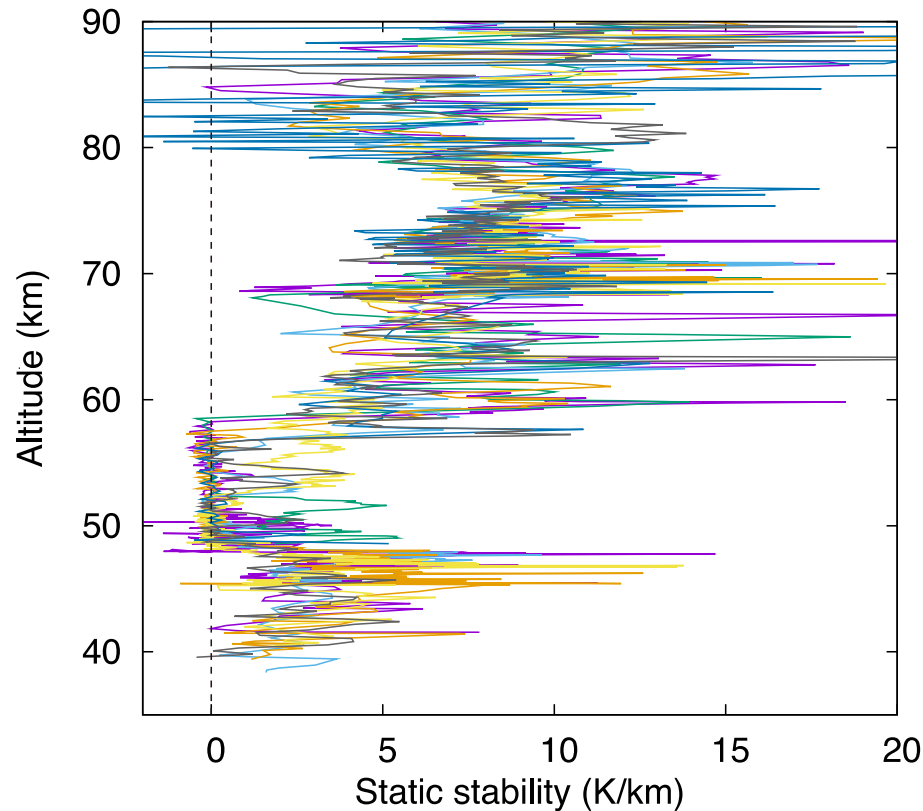
雲層の下の気圧



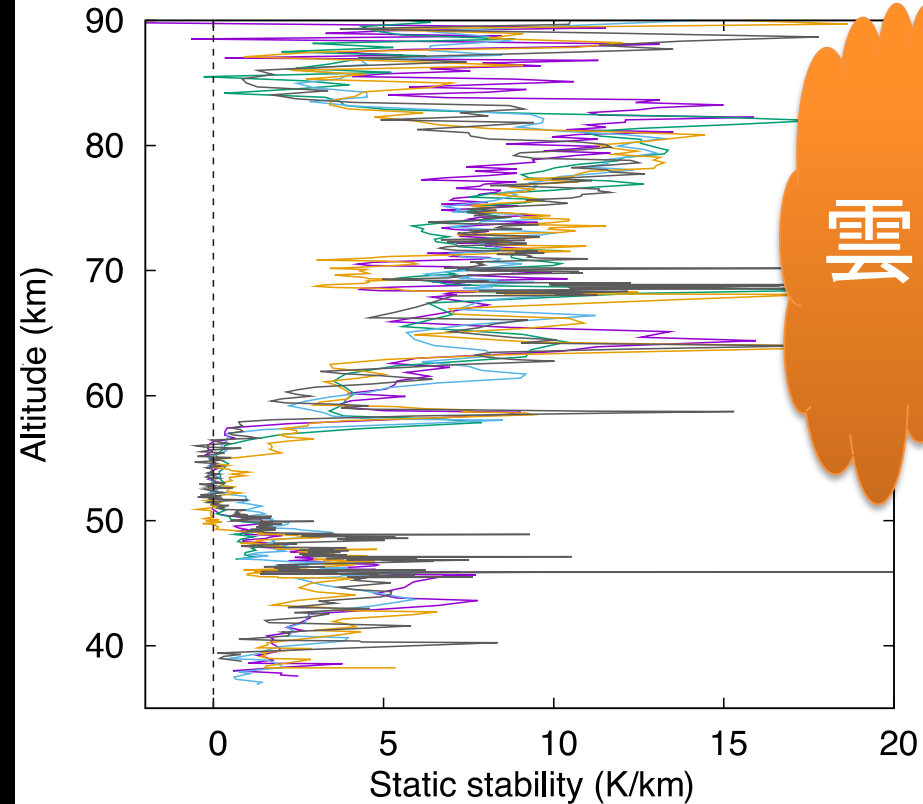
1980年ごろの直接観測に基づく標準大気モデル (VIRA) からずれる傾向

雲層内の大気安定度の変動

LT = 1.2-5.5



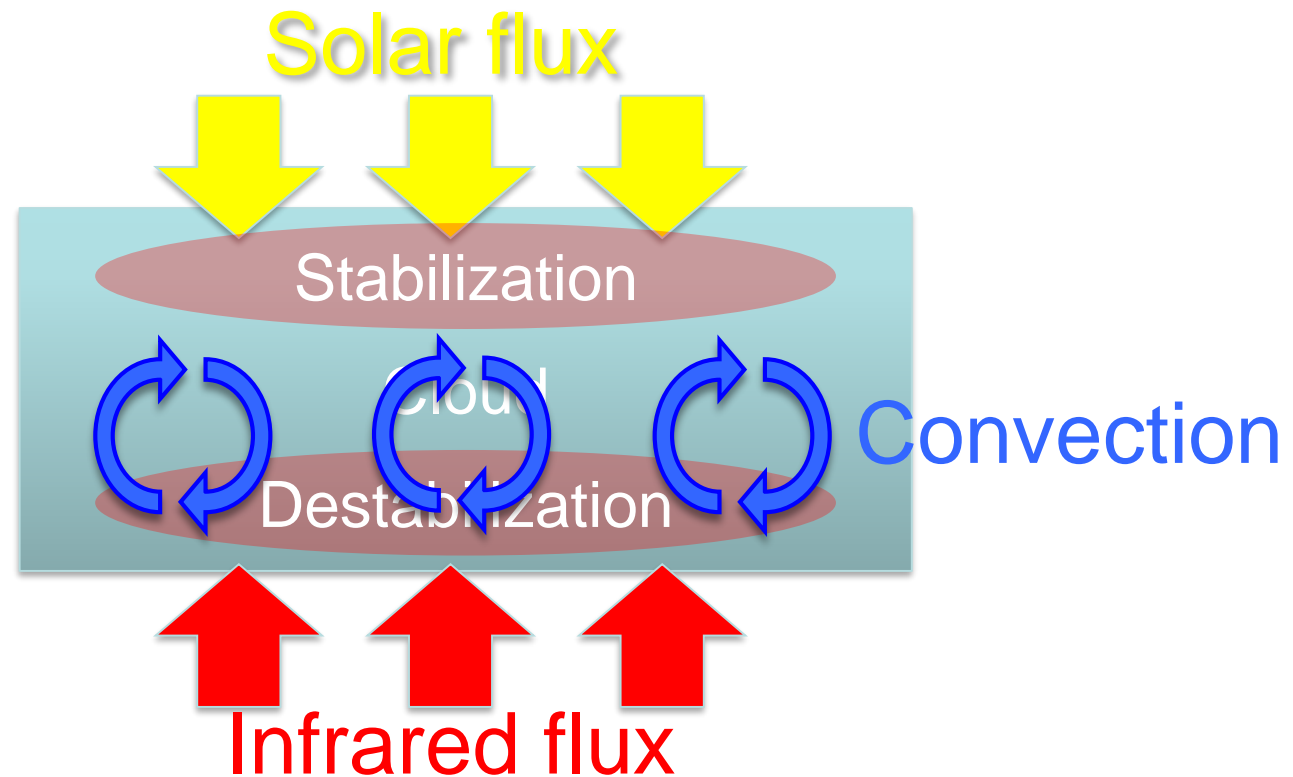
LT = 16.2-17.5



雲層下部の対流層、その上の微細擾乱にローカルタイム依存性

Role of radiation in cloud-level convection

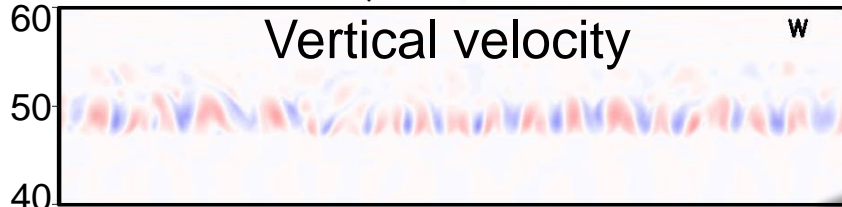
Imamura et al. (2014)



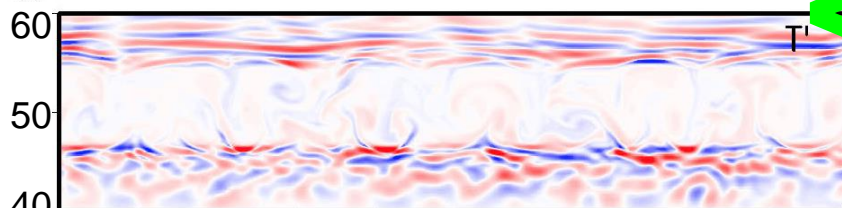
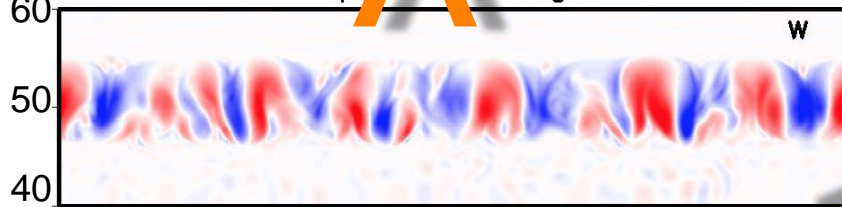
- Infrared flux from the hot lower atmosphere heats the cloud base to drive convection.
- Solar flux preferentially heats the upper part of the cloud to stabilize the atmosphere.

Equator

Equator, Noon

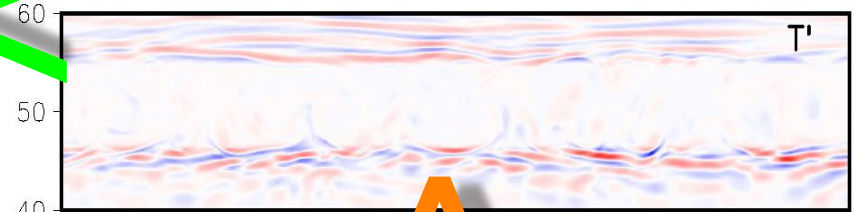
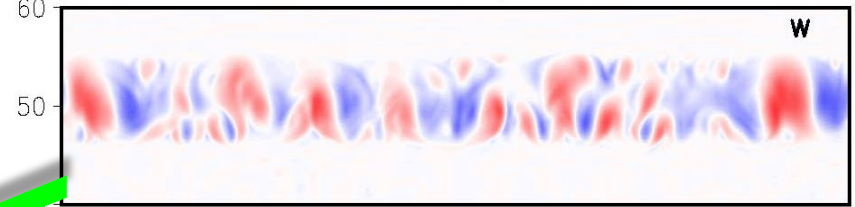


Equator, Midnight

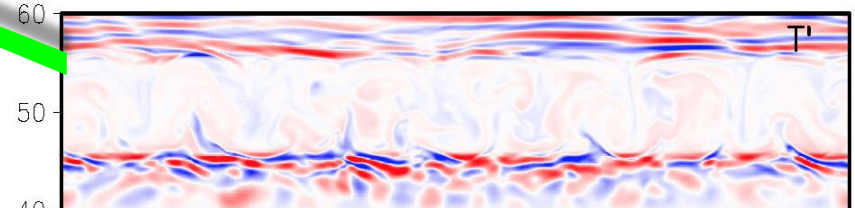
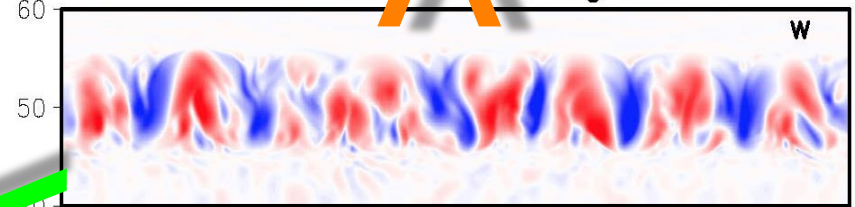


60° latitude

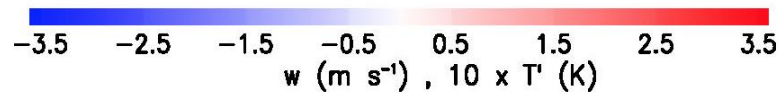
60° latitude, Noon



60° latitude, Midnight



Horizontal distance (km)



Noon

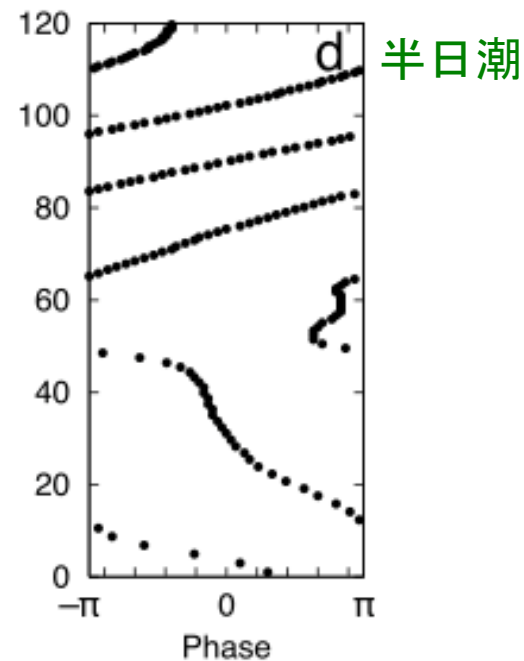
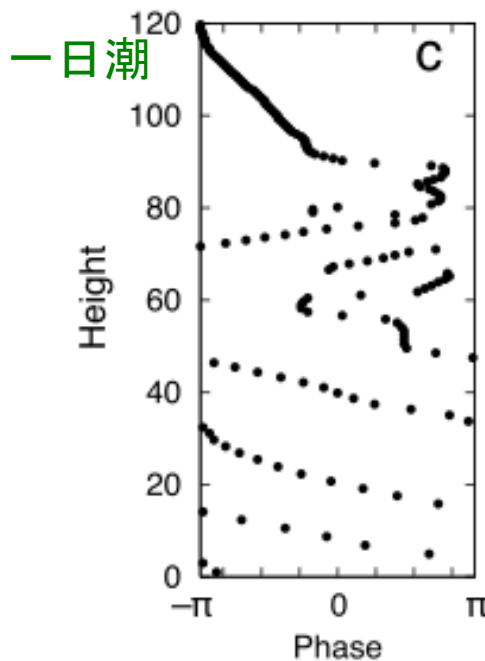
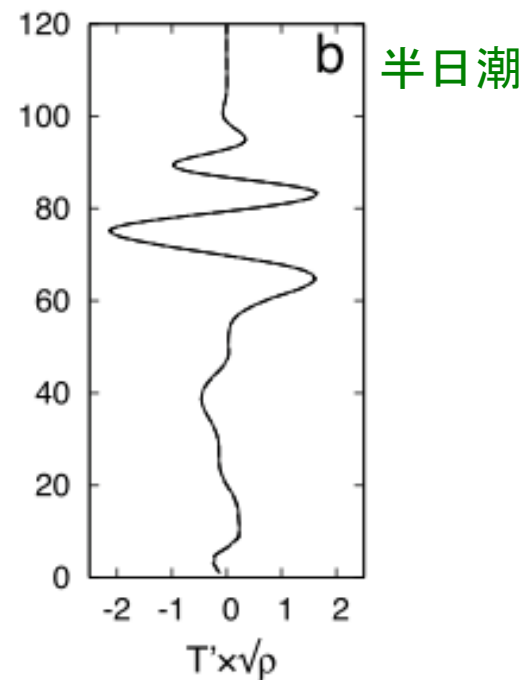
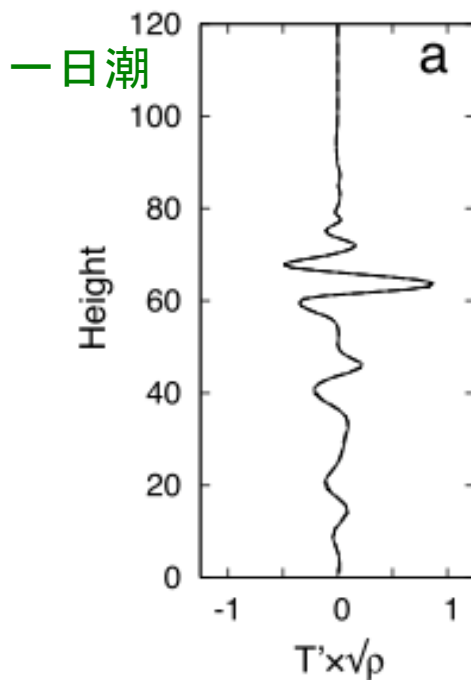
Midnight

Convection and gravity waves are enhanced in the high latitude and on the nightside.

熱潮汐波の鉛直構造 (Takagi & Matsuda, 2006)

下向きに伝播する波が地面近くまで到達して地面に運動量を渡すことにより大気を加速する可能性がある

今後の電波掩蔽 データに期待



まとめ

- あかつきはこれまでに把握されていなかった金星の様々な大気現象を網羅的に検出、同定、記述しつつある。
- このような博物学的アプローチは新分野を切り拓くうえで最初のステップ。日本の惑星大気研究はようやくここにたどりついた。
- 必ずしも想定どおりの研究ができつつあるわけではないが、想定外の手がかりもいろいろ得られている。(だから面白い！)

