

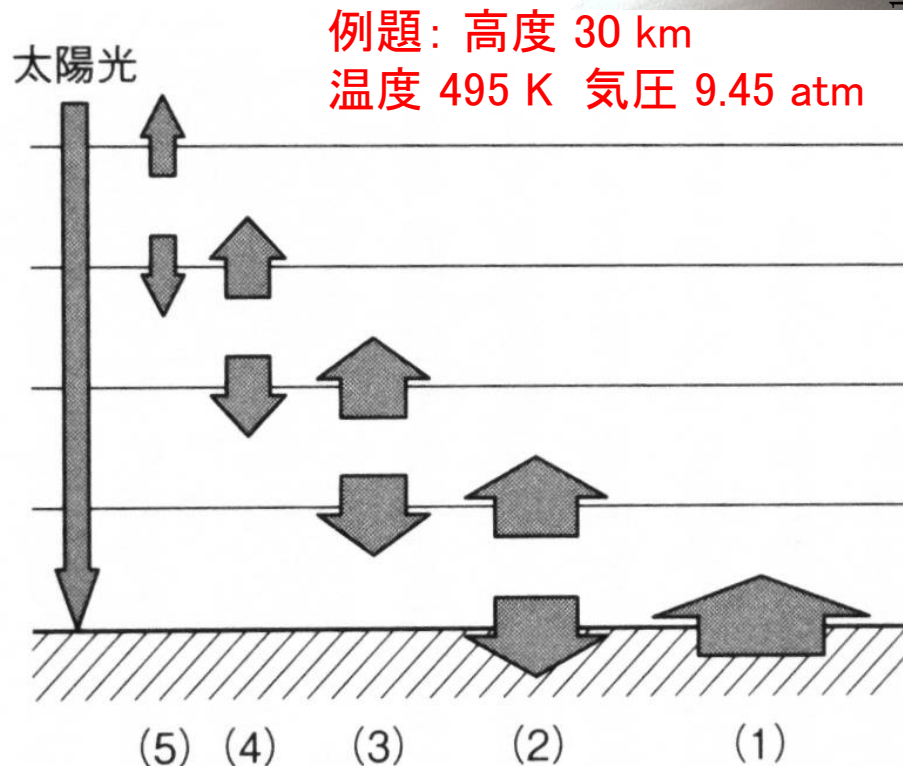
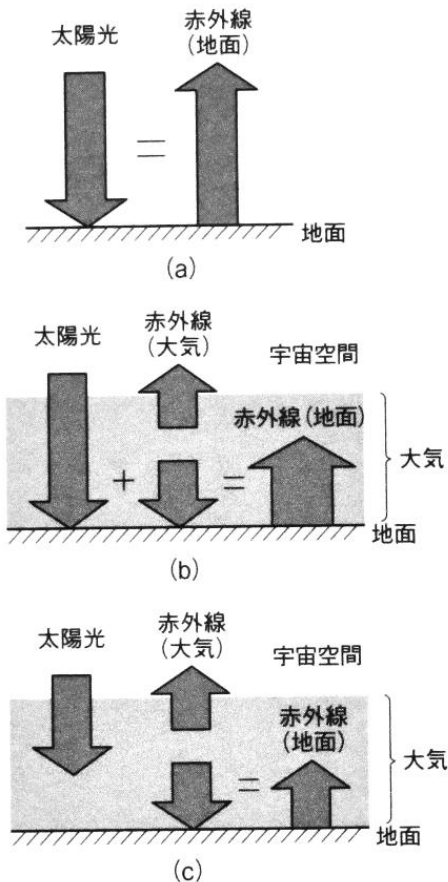
話題を「金星」へ移行する入り口として

- 「惑星気象学入門」(松田佳久著、岩波書店 2011年初版)
 - この書籍は5章からなっています。
 - 1. 焦熱地獄の世界 - 金星
 - 2. 中庸を得た温暖な世界 - 地球
 - 3. 酷寒と乾燥の世界 - 火星
 - 4. 底なしの大気 - 木星
 - 5. 超高速回転する大気 - 金星の謎を解く「あかつき」
 - そこで、まずは第1章に詳述されている「金星の超高温の世界」について見てゆきます。



金星の地面を灼熱にしているもの

- 金星大気で
起きている
温室効果

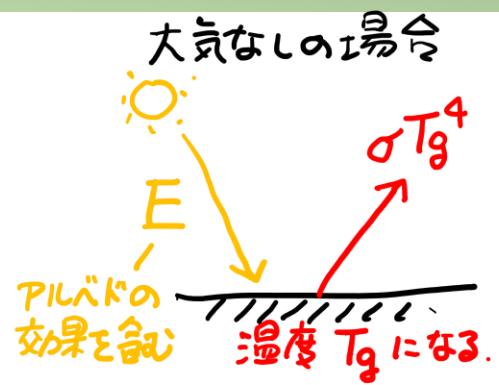




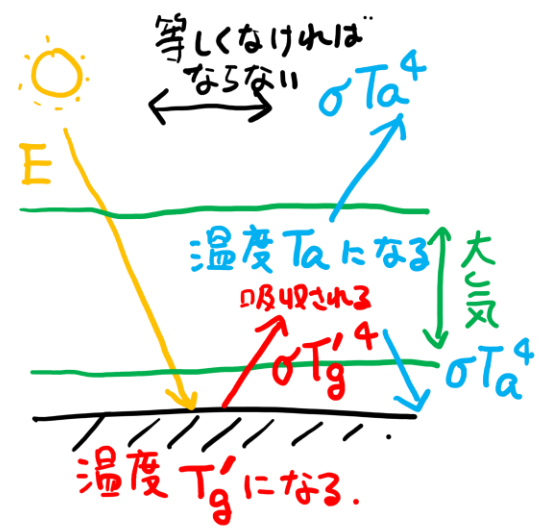
温室効果の「超」簡単化モデル

仮定

- ① 大気は太陽入射光に対して完全に透明である。
- ② 大気は熱放射に対して完全に不透明である。



$$E = \sigma T_g^4 \dots (1)$$



$$E = \sigma T_a^4 \dots (2)$$

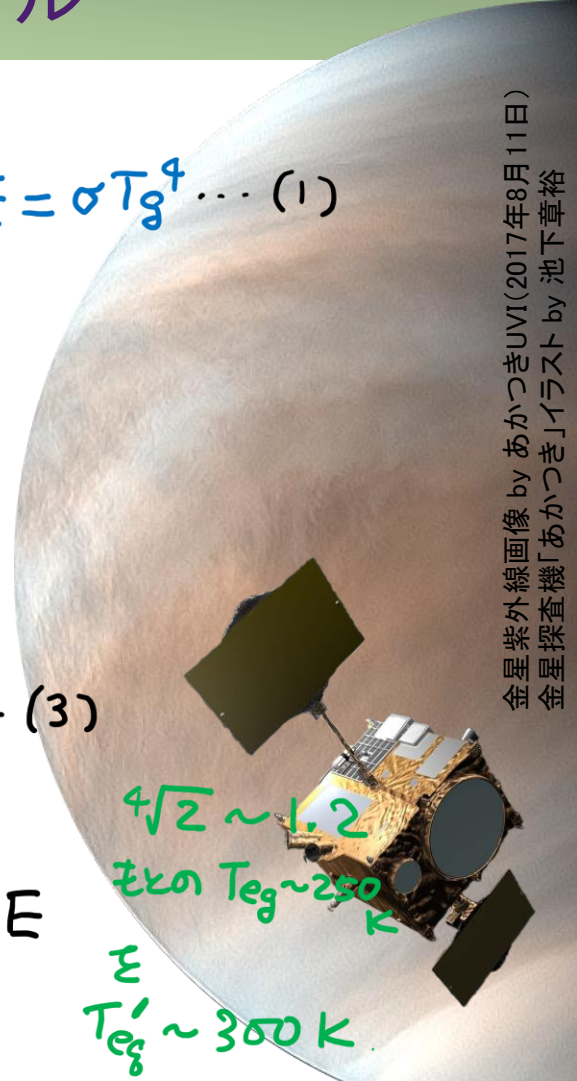
地面では

$$\sigma T_g'^4 = E + \sigma T_a^4 \dots (3)$$

(1)と(3)と比較する。

$$\sigma T_g'^4 = 2E \quad \sigma T_g^4 = E$$
$$\rightarrow T_g' = \sqrt[4]{2} T_g$$

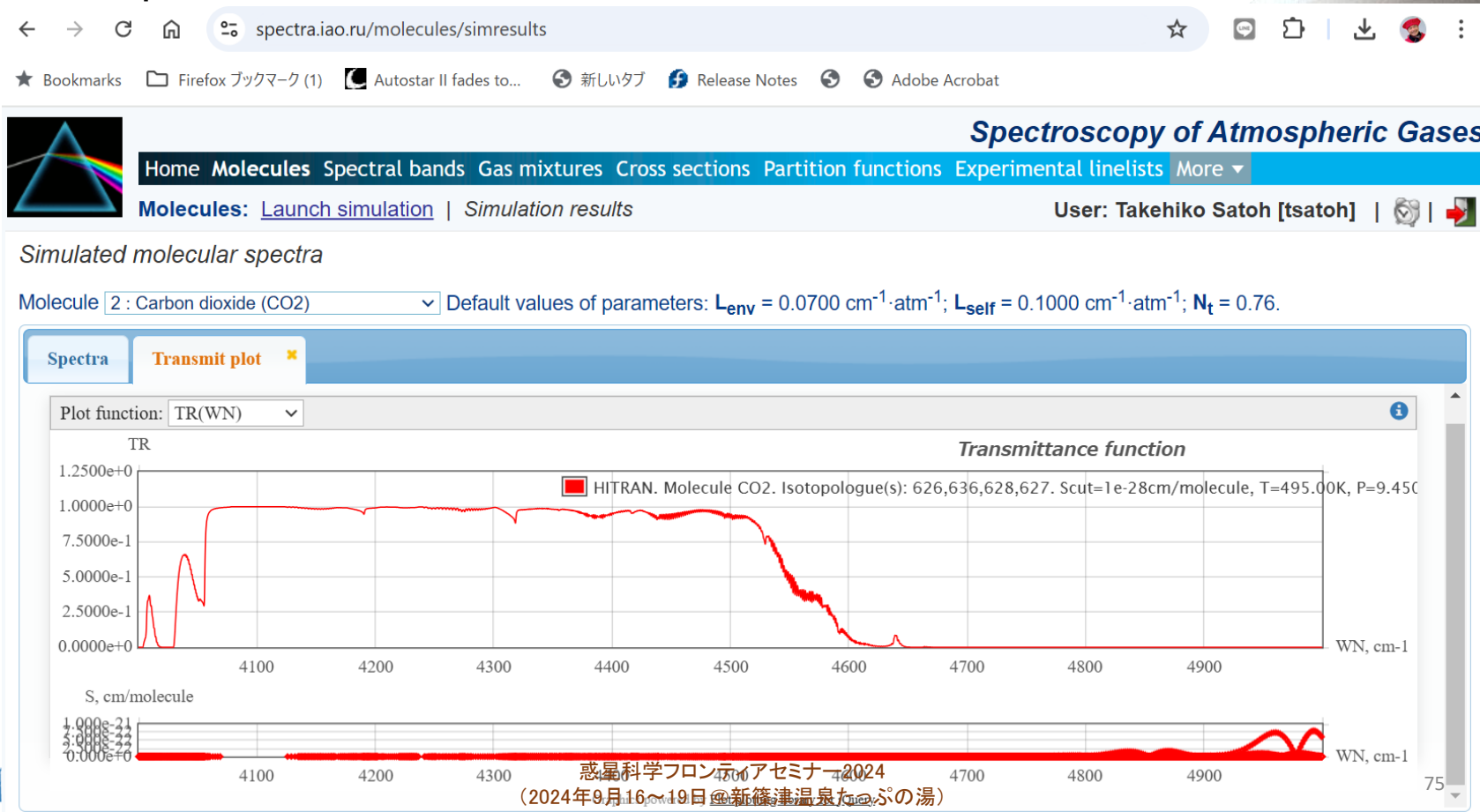
$\sqrt[4]{2} \sim 1.2$
この $T_g \sim 250 \text{ K}$
 Σ
 $T_g' \sim 300 \text{ K}$





CO₂吸収スペクトルのシミュレーション

- ・ サイト spectra.iao.ru でテスト計算、検算用結果取得などが可能

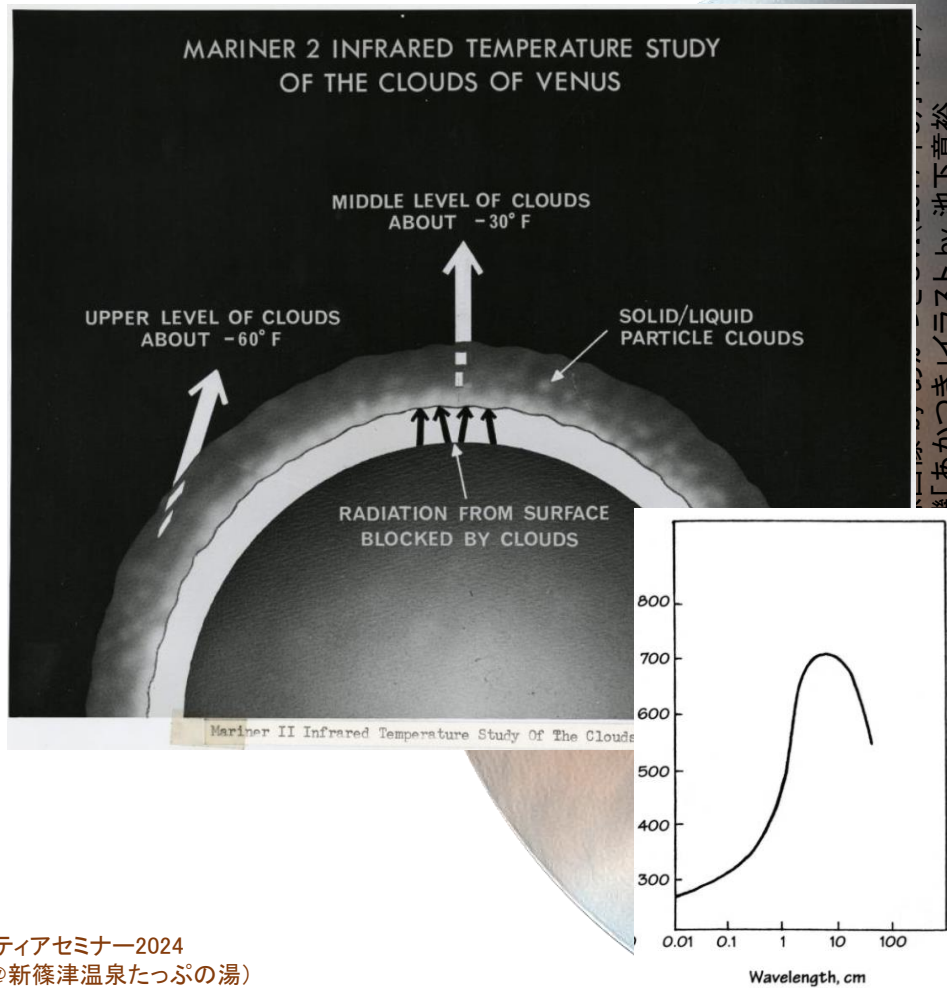


惑星科学フロンティアセミナー2024
(2024年9月16～19日@新篠津温泉たふの湯)

高温地表の観測による証明

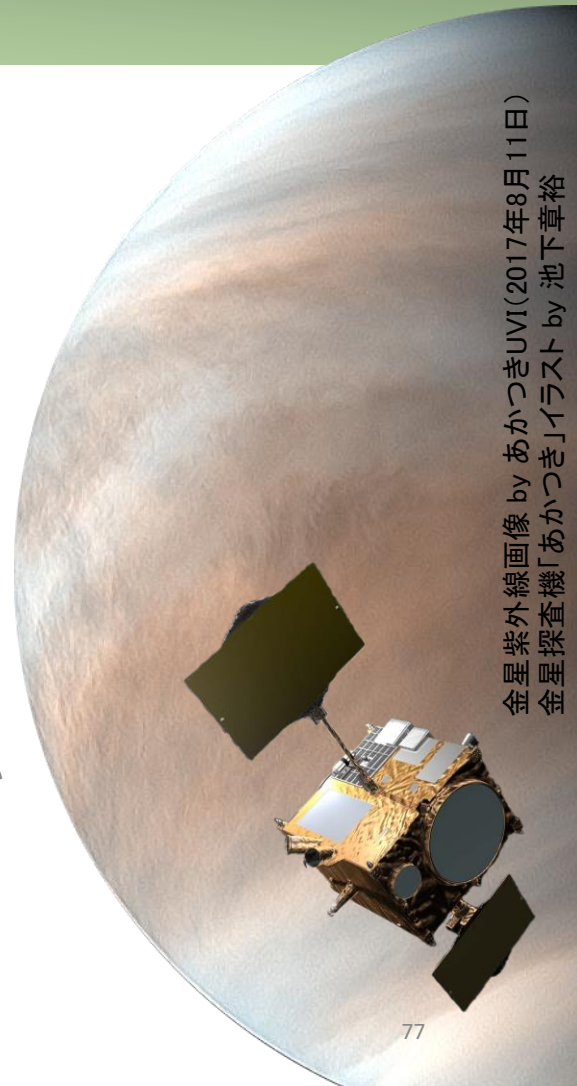
スミソニアン宇宙航空博物館
(米ワシントンDC)の展示

- 1956年に初めて金星からの電波を観測(15mアンテナ、波長3.15cm)
 - その後、多数の電波観測(波長0.4~70cm)が行われる
 - どこかが高温(600-700 K)である
 - 雲より上の大気? 雲より下の地面?
- 1962年12月、マリナー2号(人類初の惑星フライバイ)
 - 放射温度計観測を実施(波長1.9cm)
 - 「地面が高温(400°Cを超える)」の可能性が高まり、
 - 旧ソ連のヴェネラ4号が金星大気に突入し実際に計測(1967年)。大気の主成分がCO₂であることも確認



金星雲は何でできている？

地上から望遠鏡を使い可視光での偏光観測が積み重ねられ、得られた位相曲線を解析することで金星の雲についての驚くべき知見が得られました。



偏光観測と放射伝達計算の威力

• 地上からの偏光観測

- 1920年代にLyotにより最初の観測
 - それ以来多数の観測が行われてきた
 - 金星は内惑星なので、あらゆる位相角を地球から観測できる → 偏光度の位相曲線
- Hansen & Hovenier (1974)
 - 半径が1ミクロンの球形
 - サイズの分散は小さい(揃っている)
 - 屈折率は緑色光に対して1.44
 - 濃硫酸の液滴を示唆 → さまざまな観測事実の説明が可能

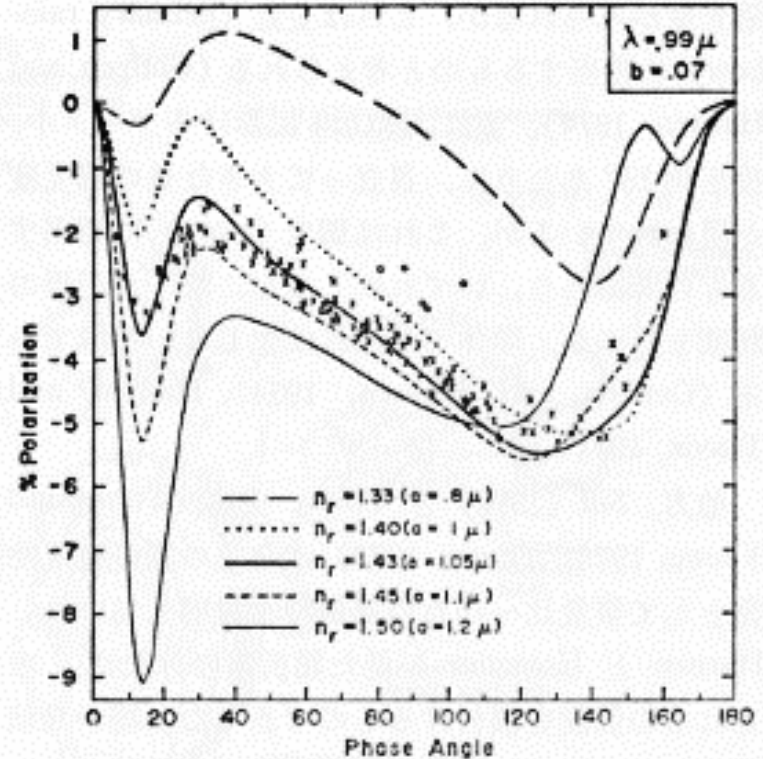
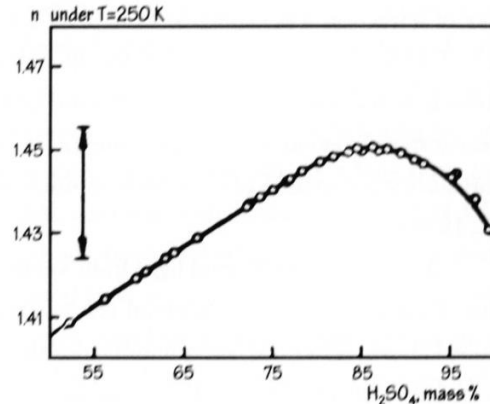


図 8 ミー粒子による多重散乱モデルと金星偏光度の観測データの比較。各屈折率に対して、観測値との一致が最良となる半径を選んである (Hansen and Hovenier, 1974)。

濃硫酸の屈折率

- Palmer and Williams (1975)

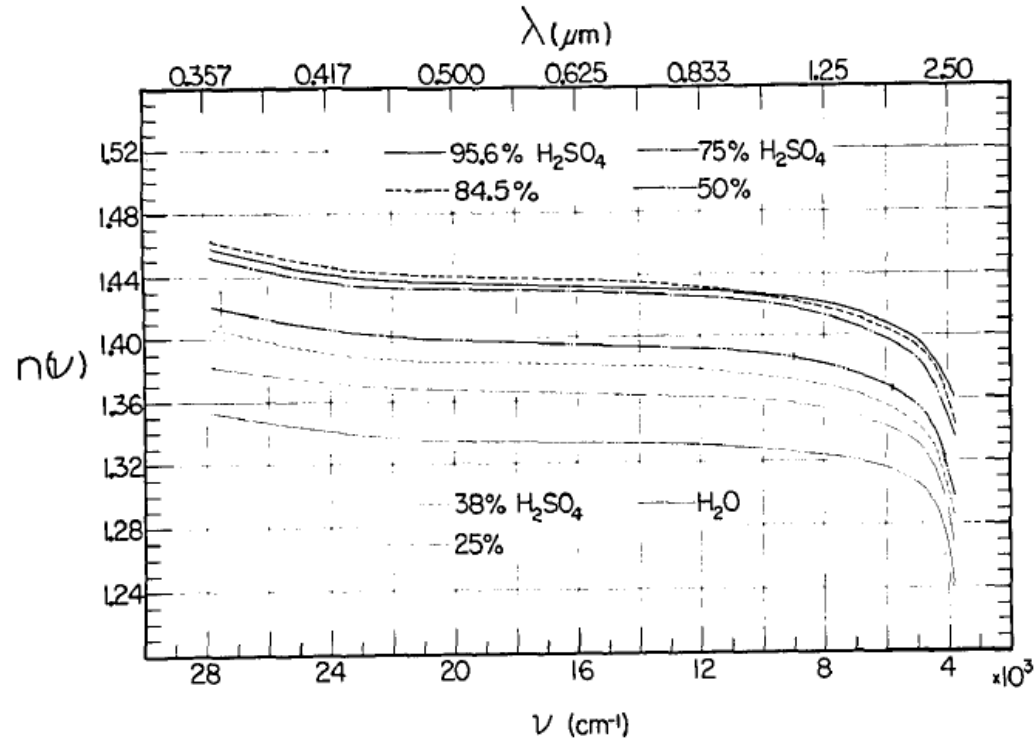


Fig. 4. Refractive indices of H_2SO_4 solutions in the 4000–28,000 cm^{-1} region.

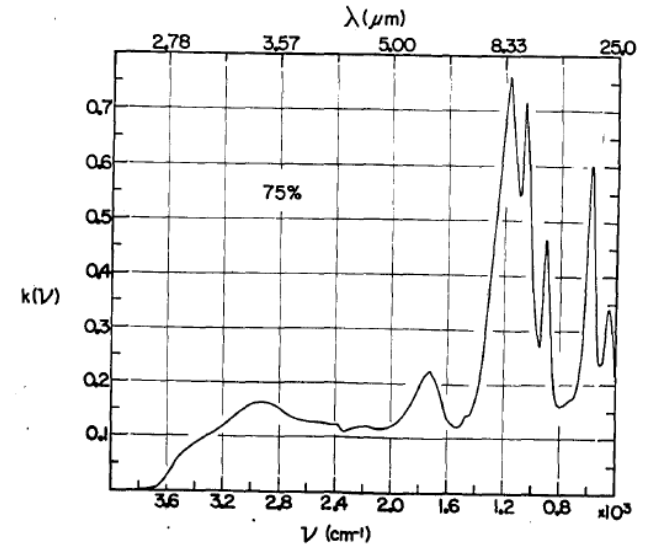
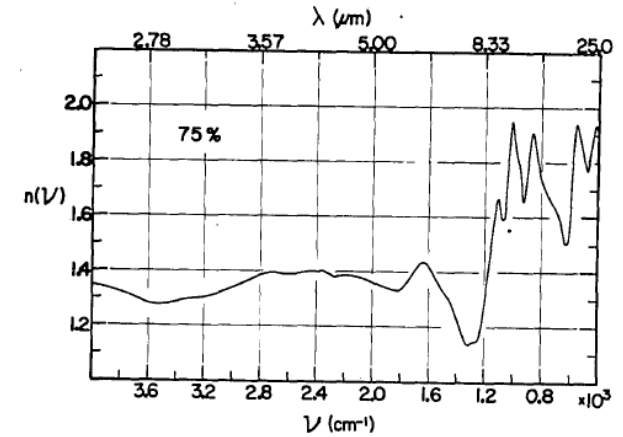
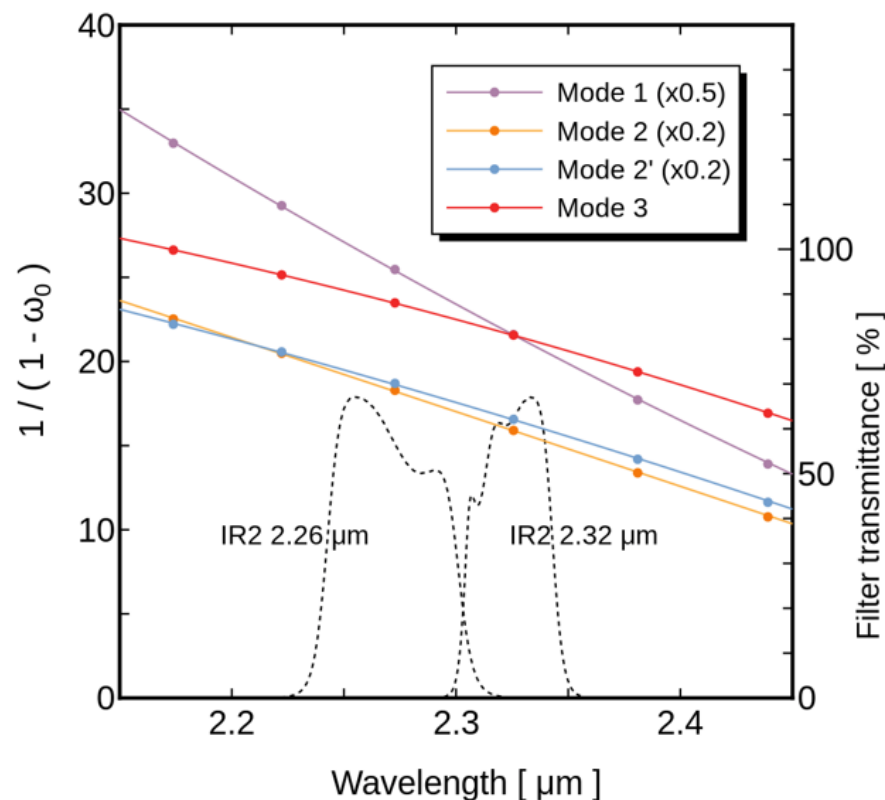
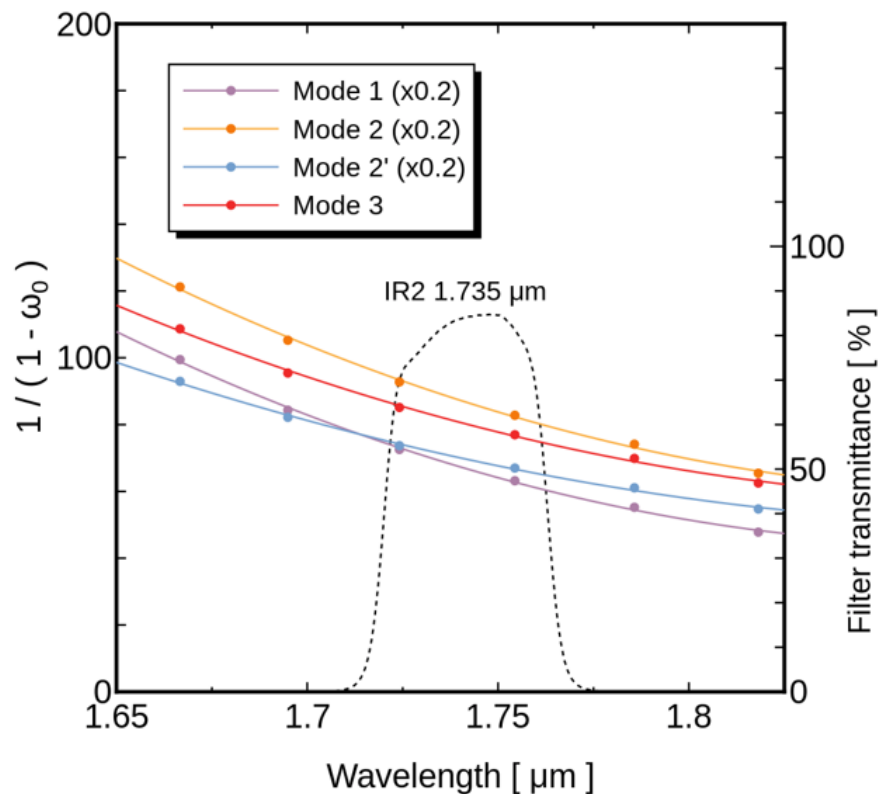


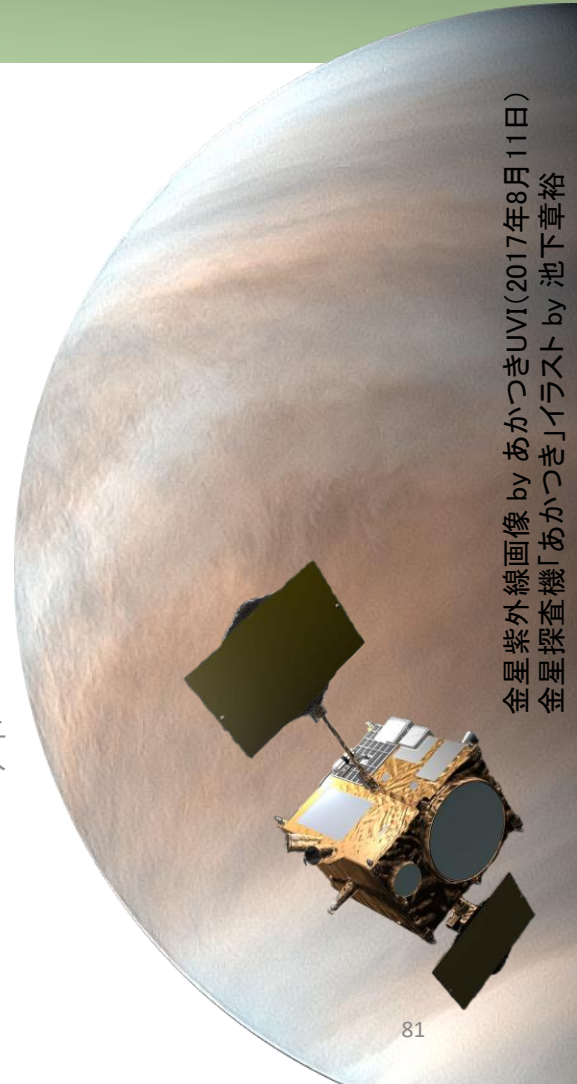
Fig. 8. Reflectivity, refractive index n , and absorption index k of a 75% H_2SO_4 solution in the intermediate infrared.

濃硫酸(75%濃度)屈折率を使用した例



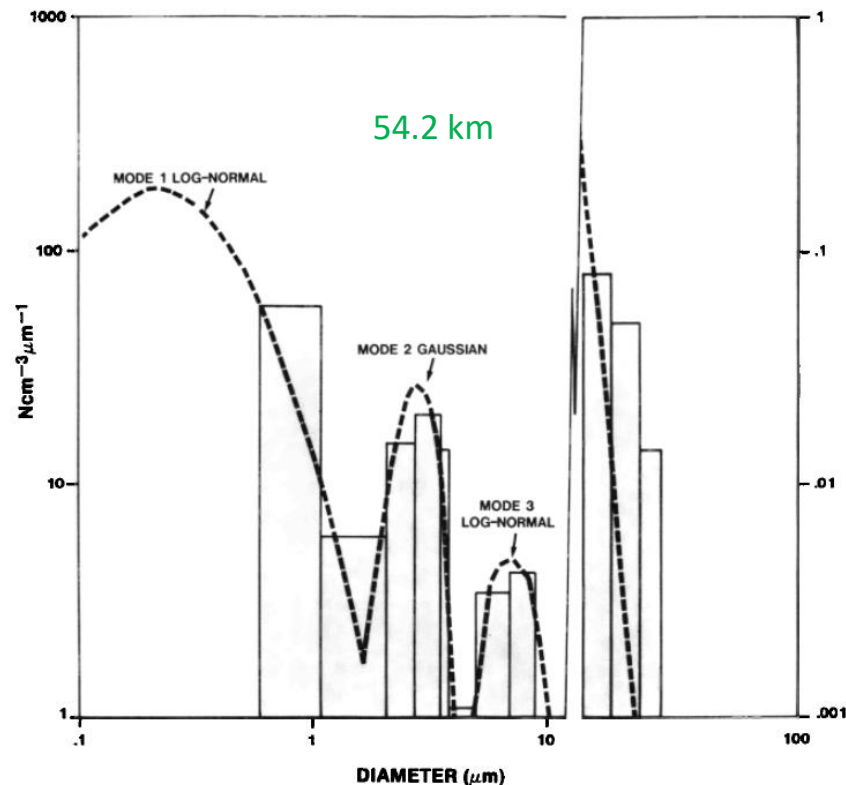
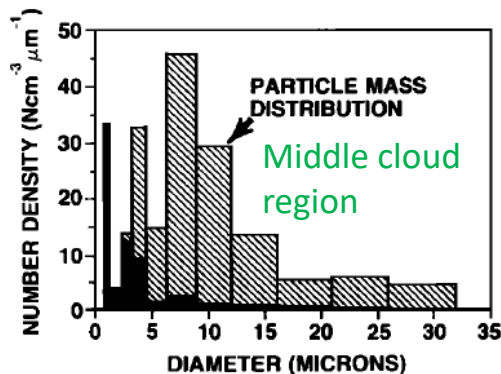
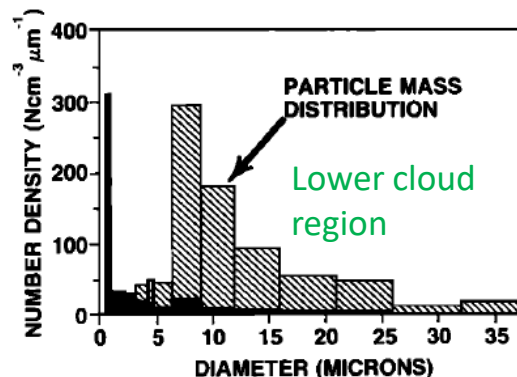
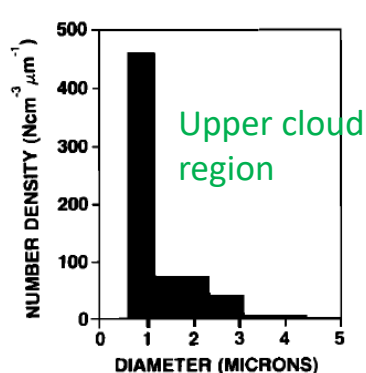
金星雲層の直接観測

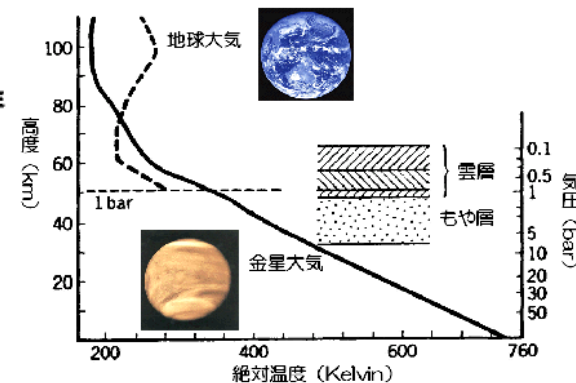
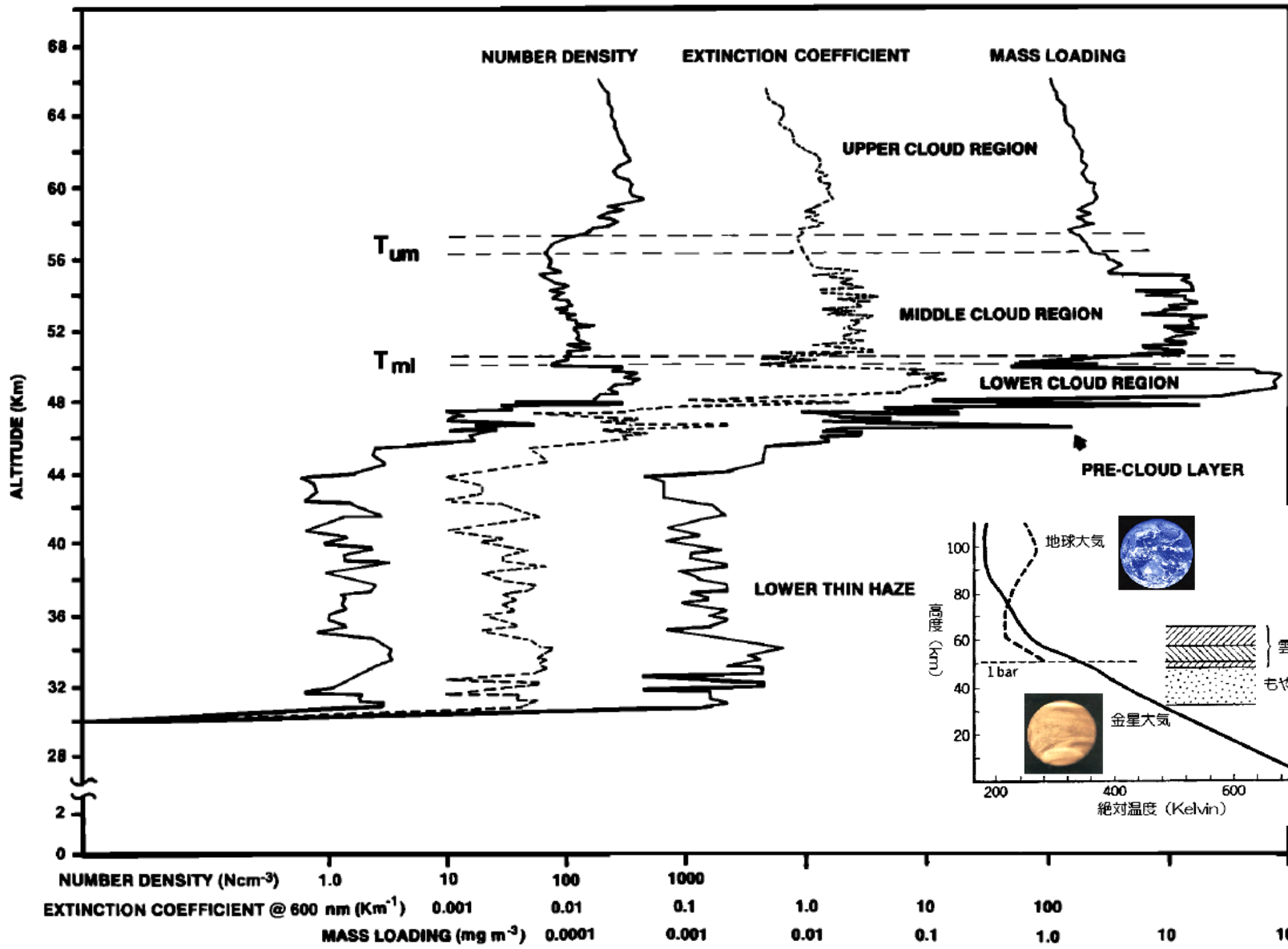
1978年、パイオニア・ヴィーナスの降下プローブが金星雲層の垂直（成層）構造や、各高度での雲粒子サイズ分布を直接観測しました。



パイオニア・ヴィーナスによる雲層の観測

- Knollenberg and Hunten (1980)
 - Large-probe Cloud Particle Size spectrometer (LCPS) experiments





PV/OCPDによる上層雲・ヘイズの観測

- Kawabata et al. (1980)

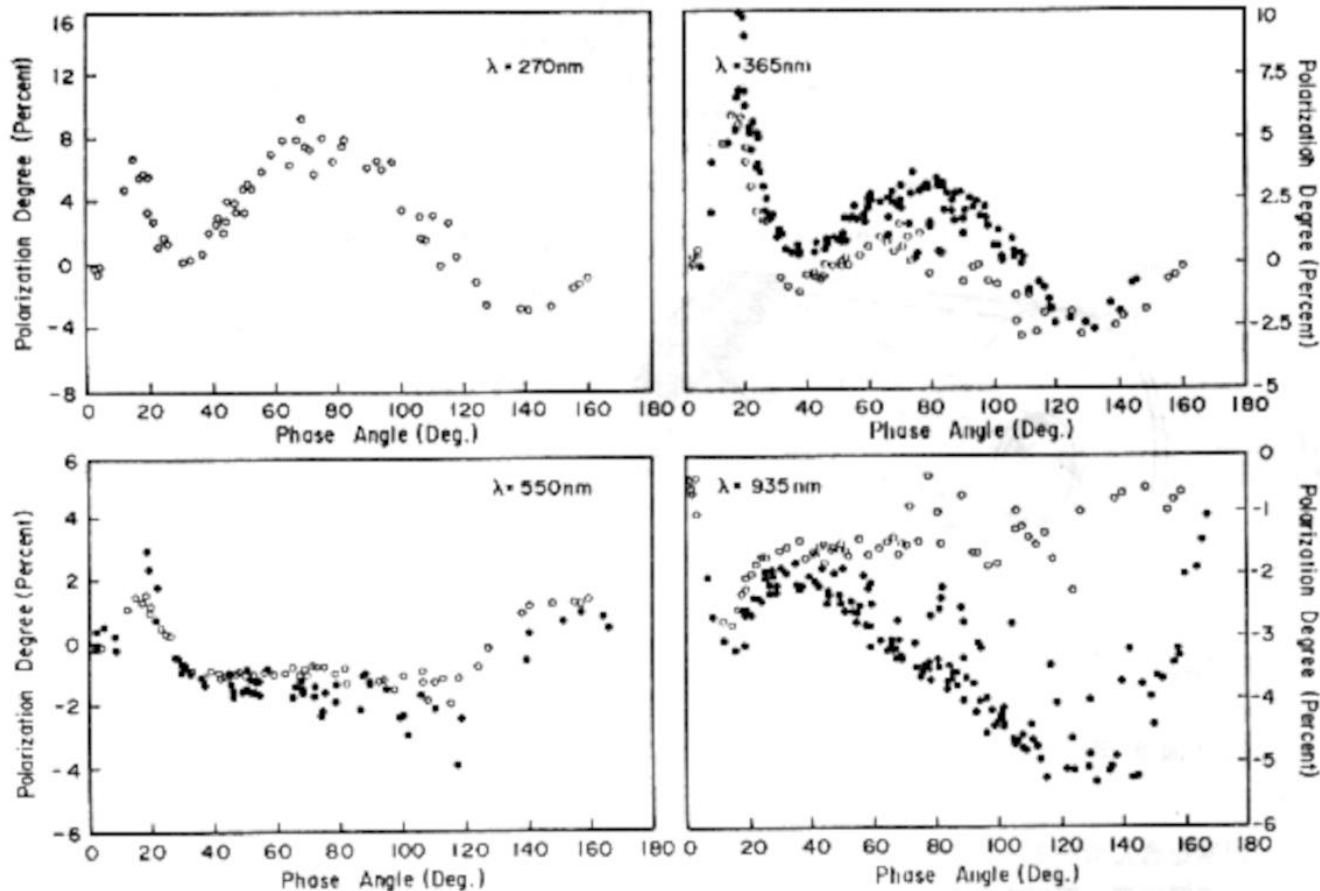


図 11 OCPP 観測データを積分して得られた全面偏光度 (白丸印) と位相角との関係 (Kawabata et al., 1980)。比較のため、1960年代末に得られた地上観測データを黒丸で示してある。

金星スーパーローテーション (発見と初期の研究)

紫外線模様の日々の変化から「四日循環」が示唆されたものの、すでにレーダー観測から求められていた金星のゆっくりした自転とあまりにかけ離れていたため、その実証は探査機の金星接近を待つ必要がありました。



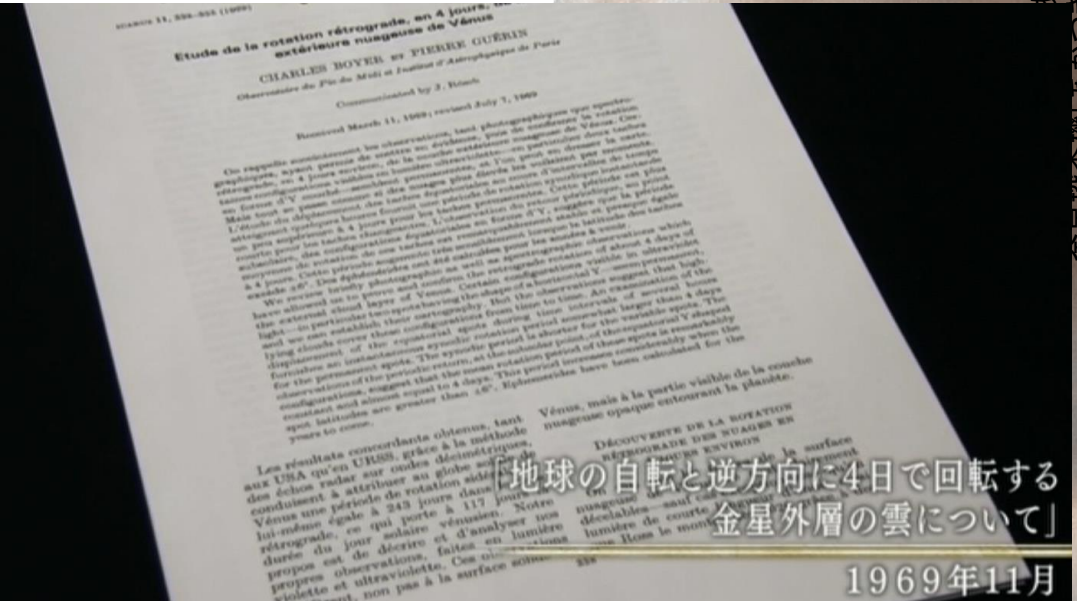
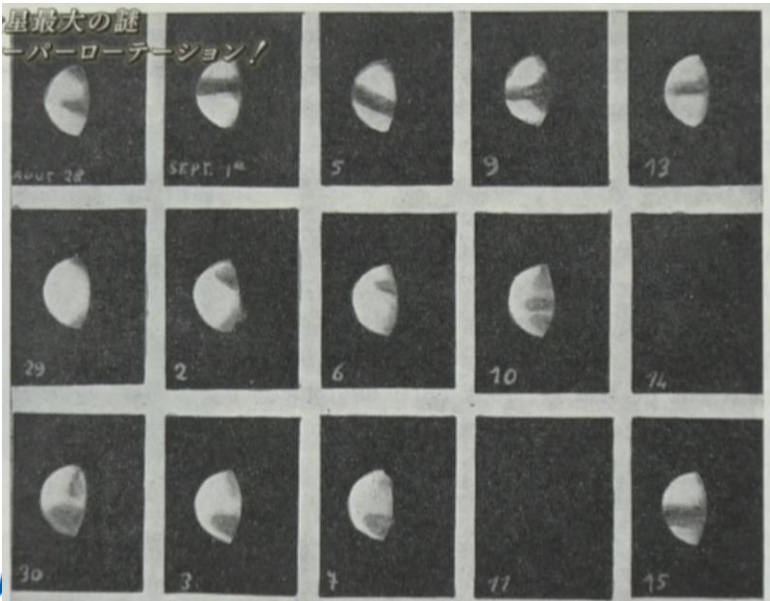
スーパーローテーションの発見

- アマチュア天文家シャルル・ボワイエ
- フランス領コンゴに滞在していた1957年
 - 本国の天文台から「金星の紫外線観測」依頼を受ける
 - 金星紫外線模様の出現パターンに「4日毎に似た模様が出現する」ことを発見
 - 1969年に論文を投稿

NHK番組「コズミックフロントNEXT:
ヴィーナスの素顔」から



シャルル・ボワイエ
アマチュア天文家



1969年11月

金星探査機「あかつき」



却下された「大発見」論文

NHK番組「コズミックフロントNEXT：
ヴィーナスの素顔」から

A young Harvard astronomer named Carl Sagan rejected the paper on the grounds that "the four-day rotation is theoretically impossible, and shows how foolish the work of the inexperienced amateur can be."

「4日間で大気が循環する事など理論的に不可能であり
経験の浅い素人の観測が いかにも愚かな事であるかの証拠だ」

ギーラッシュ理論(1975年)

• 子午面循環

- 低緯度で加熱され(太陽光)高緯度で冷却され下降する
- 水平渦粘性は無限大(小さいスケールの渦が大気を攪拌することによってつくられる粘性)
→ この仮定により、ある高度における東西風速(U)の角速度の緯度分布は一定＝剛体回転

• 初期値は東西風速ゼロ＝惑星本体と同じ角速度

- 剛体回転の U に対応した角運動量 M
- 子午面循環の鉛直速度 W
- 鉛直方向に輸送される角運動量は $M \cdot W$ で表され、それを全緯度で積分するとプラスになる → 下方から上方へ角運動量の汲み上げ
- 下層大気は角運動量を失うが、鉛直渦粘性で固体惑星の回転速度に戻される → 大気では正味として角運動量が増大
- 固体惑星からもらう角運動量の蓄積でSRを説明

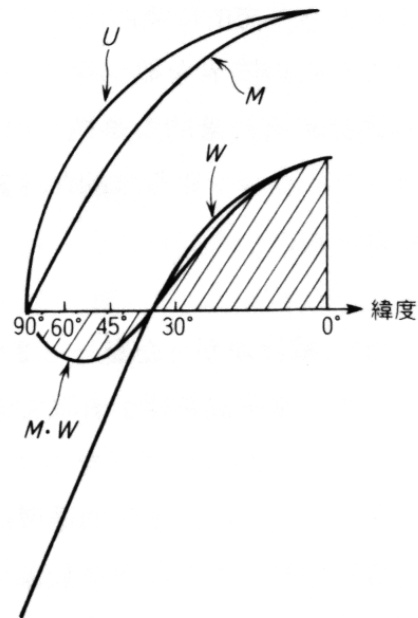
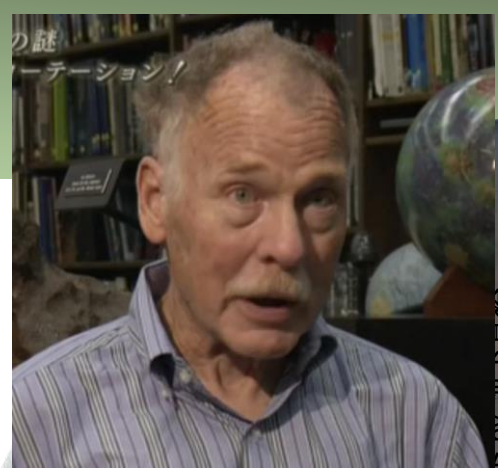
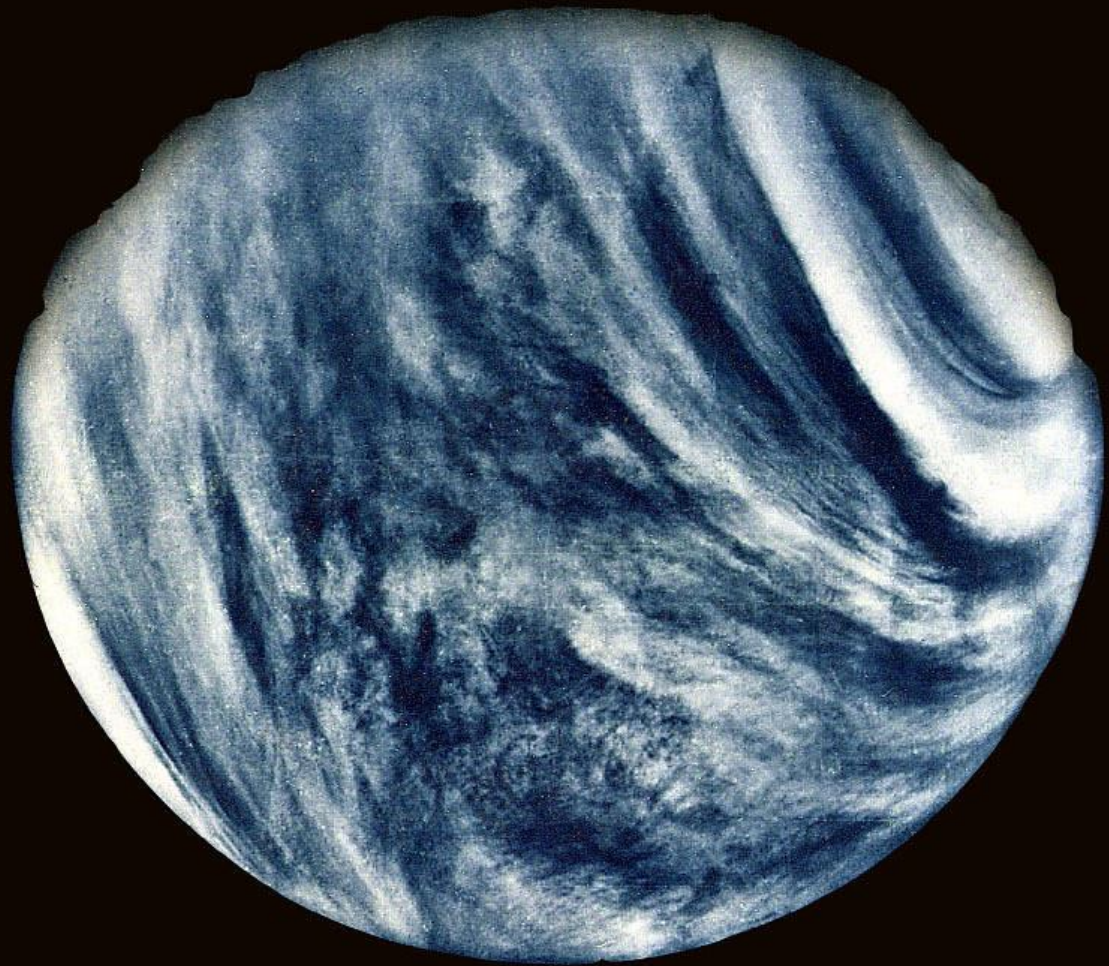


図 3.10 剛体回転の場合の東西流速(U)、角運動量(M)および子午面循環の鉛直速度(W)の緯度分布。惑星の自転軸からの腕の長さの関係上、 U 、 M ともに低緯度で大きくなっていることに注意。 $M \cdot W$ を緯度方向に積分すると(斜線の部分)、プラスになる。

惑星科学フロンティアセミナー2024

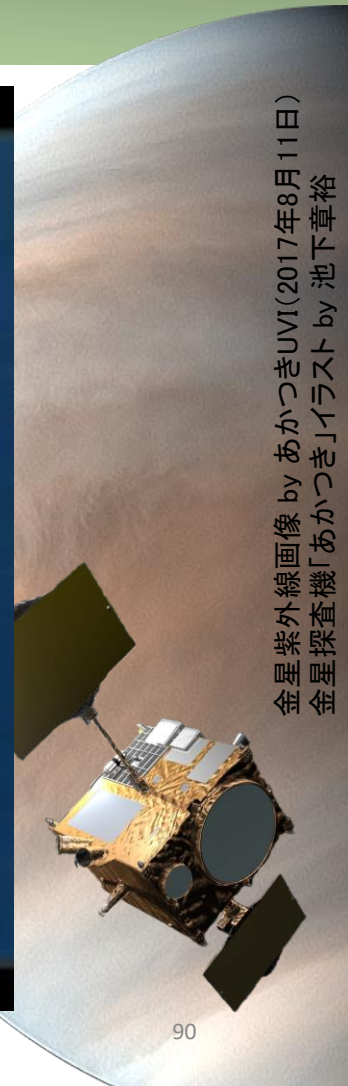
(2024年9月16～19日@新篠津温泉たつぷの湯)



金星紫外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

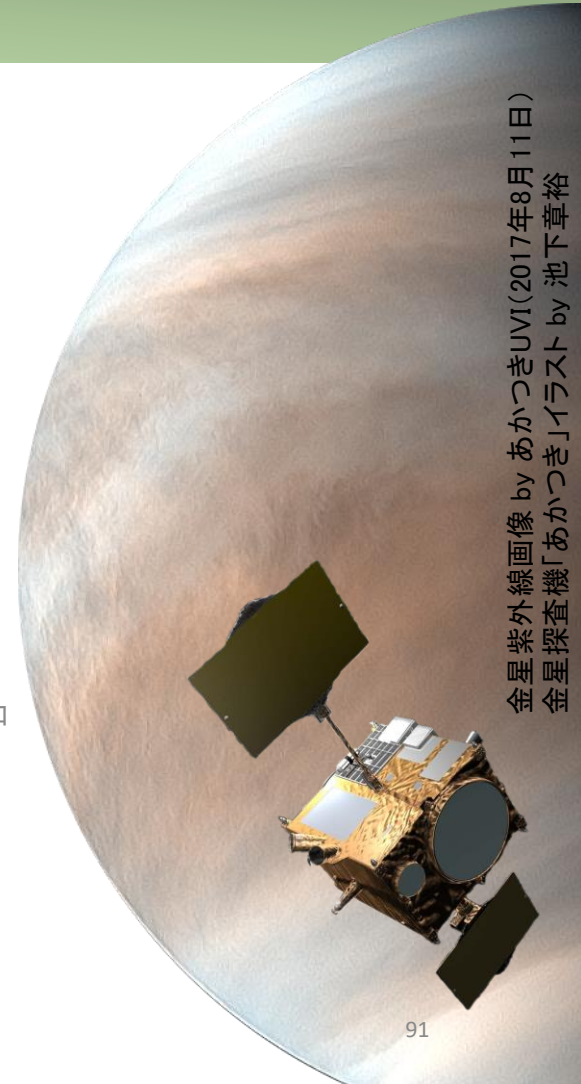


PVO紫外観測による金星SR



20世紀の金星探査

1960年代、米ソの宇宙開発競争は激しさを増し、その中で旧ソ連は金星の探査に執念を燃やします。



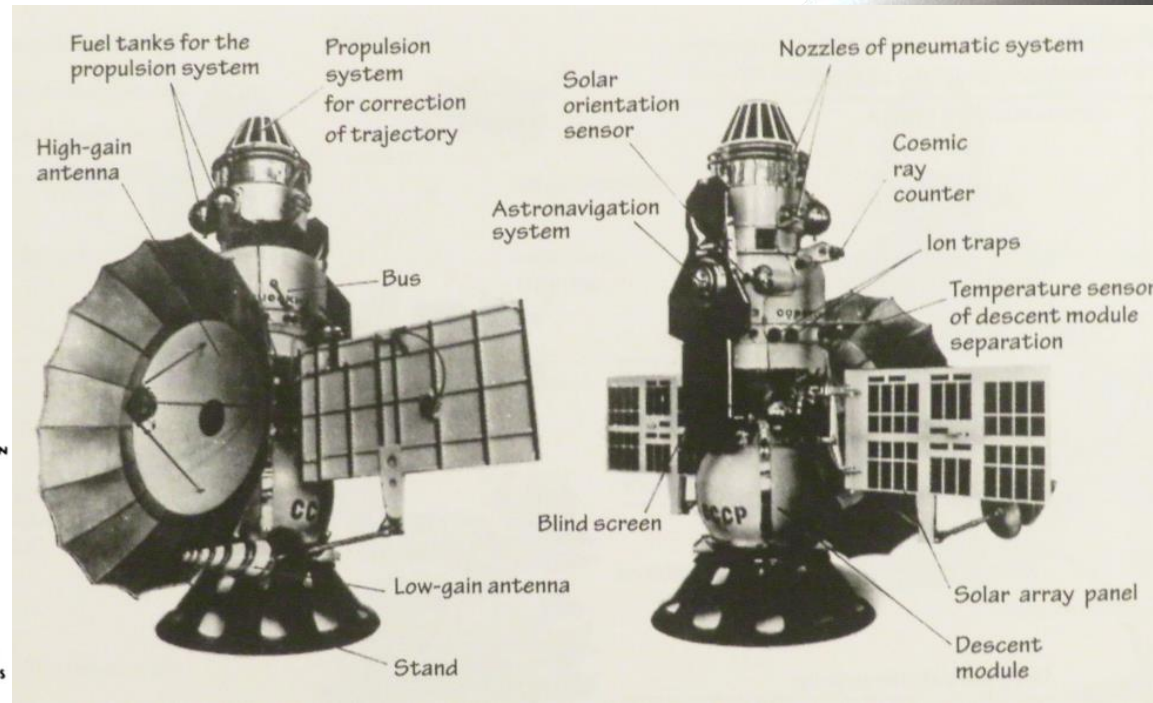
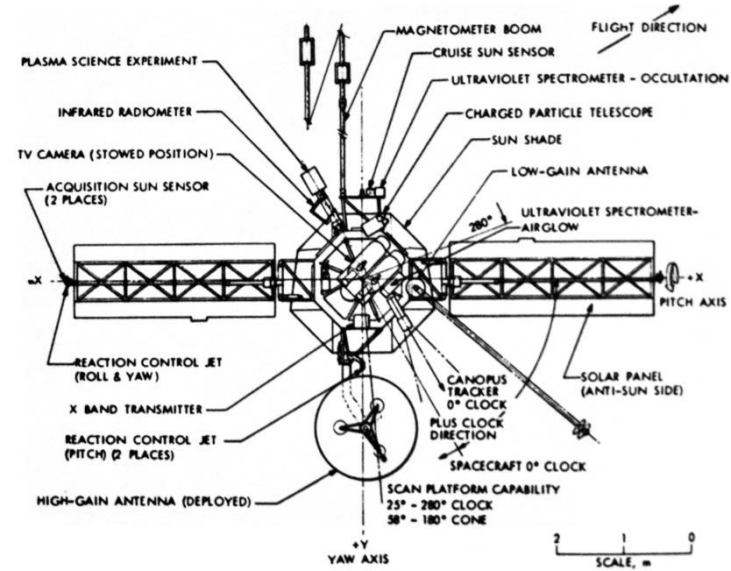
マゼランまでの金星探査一覧

Table 2.2 Chronology of space missions to Venus

Spacecraft	Type of vehicle	Date of launch	Date of fly-by or landing				
Venera-1	Fly-by	2/12/61	5/19/61	Venera-9	Soft lander		
Mariner-2	Fly-by	8/27/62	12/14/62		and satellite	6/8/75	10/22/75
Venera-2	Fly-by	11/12/65	2/27/66	Venera-10	Soft lander		
Venera-3	Entry probe	11/16/65	3/1/66		and satellite	6/14/75	10/25/75
Venera-4	Descent vehicle			Pioneer-Venus			
	and fly-by	6/12/67	10/18/67	Orbiter	Satellite	5/20/78	12/4/78
Mariner-5	Fly-by	6/14/67	10/19/67	Pioneer-Venus			
Venera-5	Descent vehicle			bus and probes	One large and		
	and fly-by	1/5/69	5/16/69		three small probes		
Venera-6	Descent vehicle				and an orbital bus	8/8/78	12/9/78
	and fly-by	1/10/69	5/17/69	Venera-11	Lander and fly-by	9/9/78	12/25/78
Venera-7	Soft lander			Venera-12	Lander and fly-by	9/14/78	12/21/78
	and fly-by	8/17/70	12/15/70	Venera-13	Lander and fly-by	10/30/81	3/1/82
Venera-8	Soft lander			Venera-14	Lander and fly-by	11/4/81	3/5/82
	and fly-by	3/27/72	7/22/72	Venera-15	Satellite	6/2/83	10/10/83
Mariner-10	Fly-by	11/3/73	2/5/74	Venera-16	Satellite	6/7/83	10/14/83
				Vega-1	Lander and fly-by	12/15/84	6/11/85
				Vega-2	Lander and fly-by	12/21/84	6/15/85
				Magellan	Orbiter	5/4/89	8/10/90



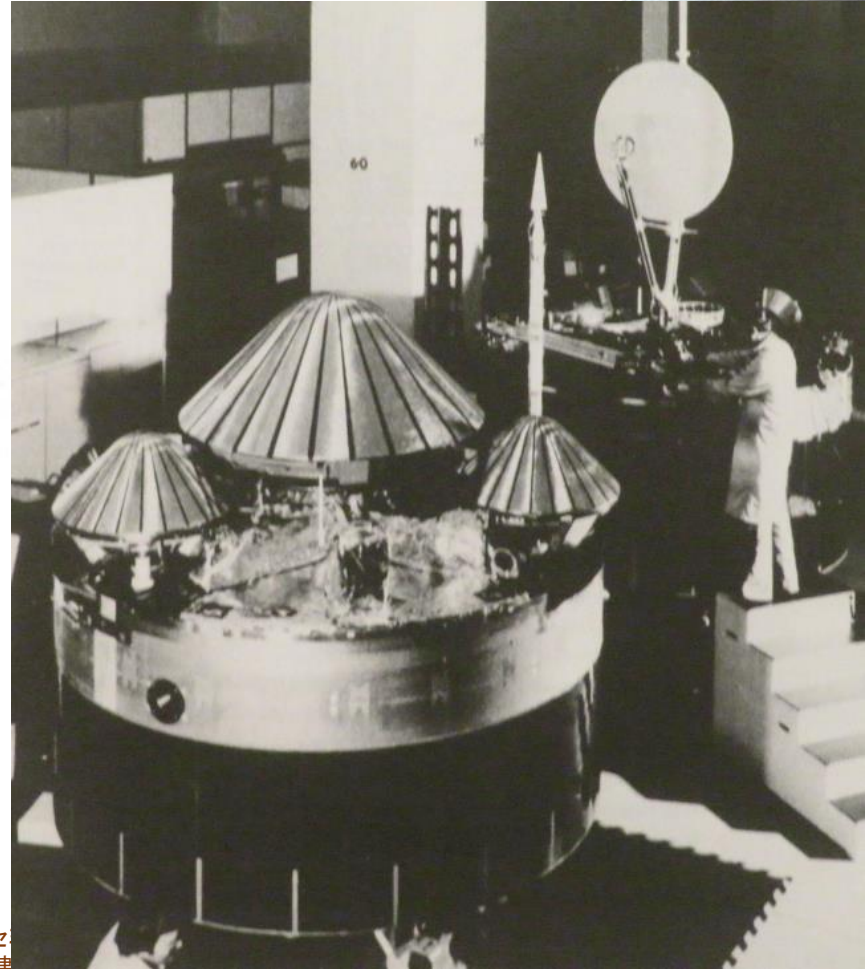
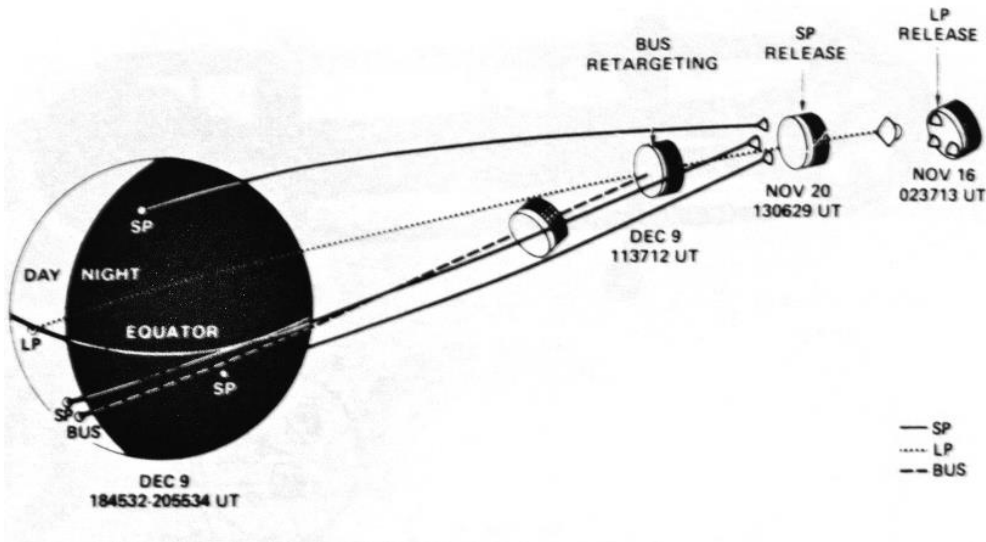
マリナー2号、10号、ヴェネラ5号(6号)



惑星科学フロンティアセミナー2024
¥9月16～19日@新條津温泉たつぷの湯

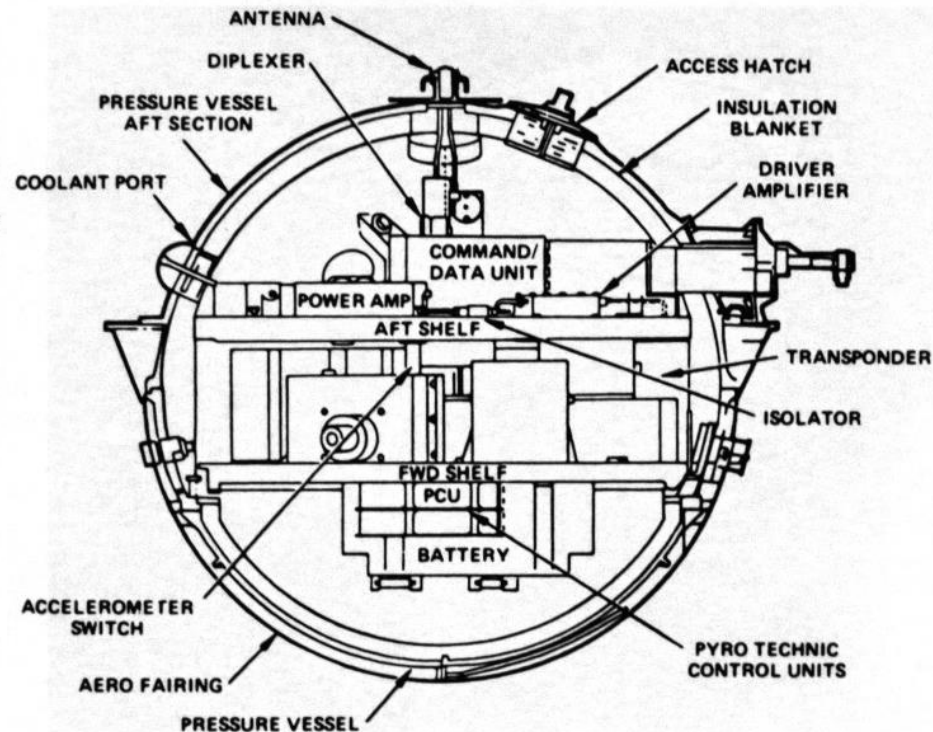
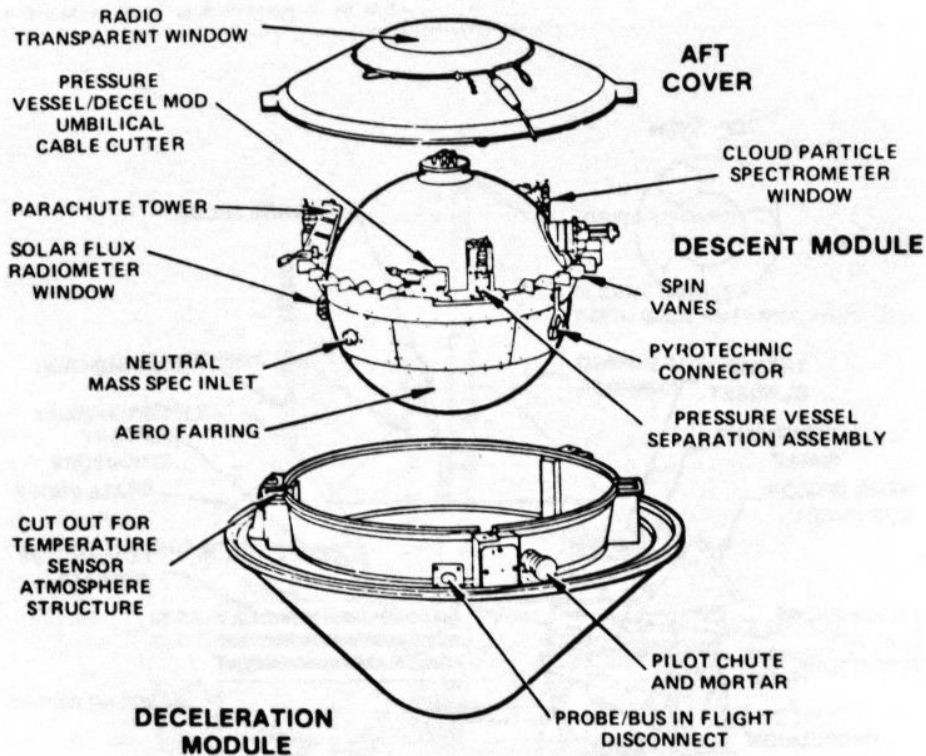


パイオニア・ヴィーナス



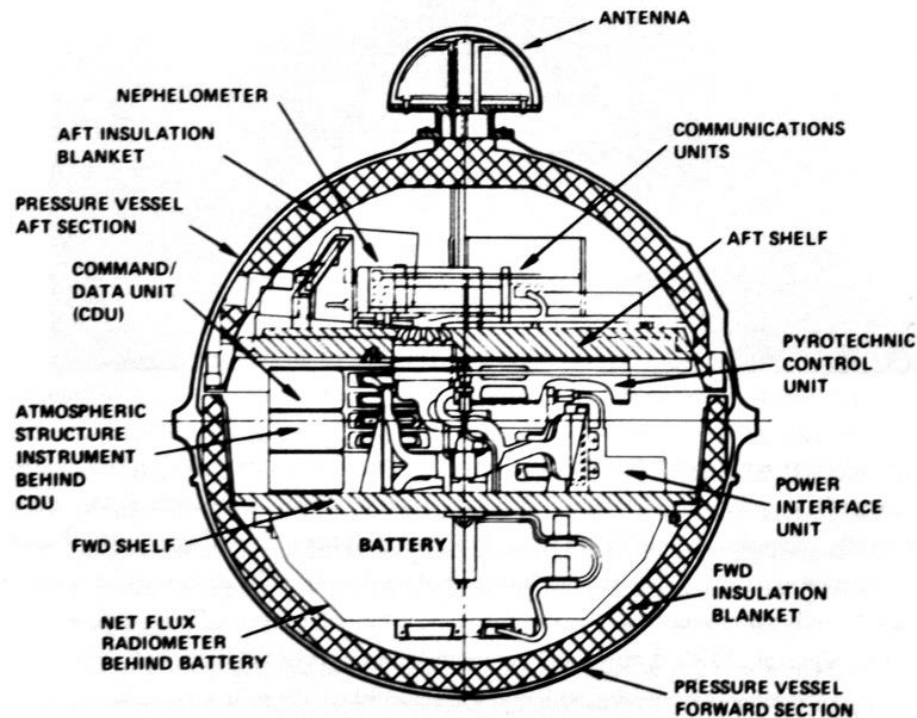
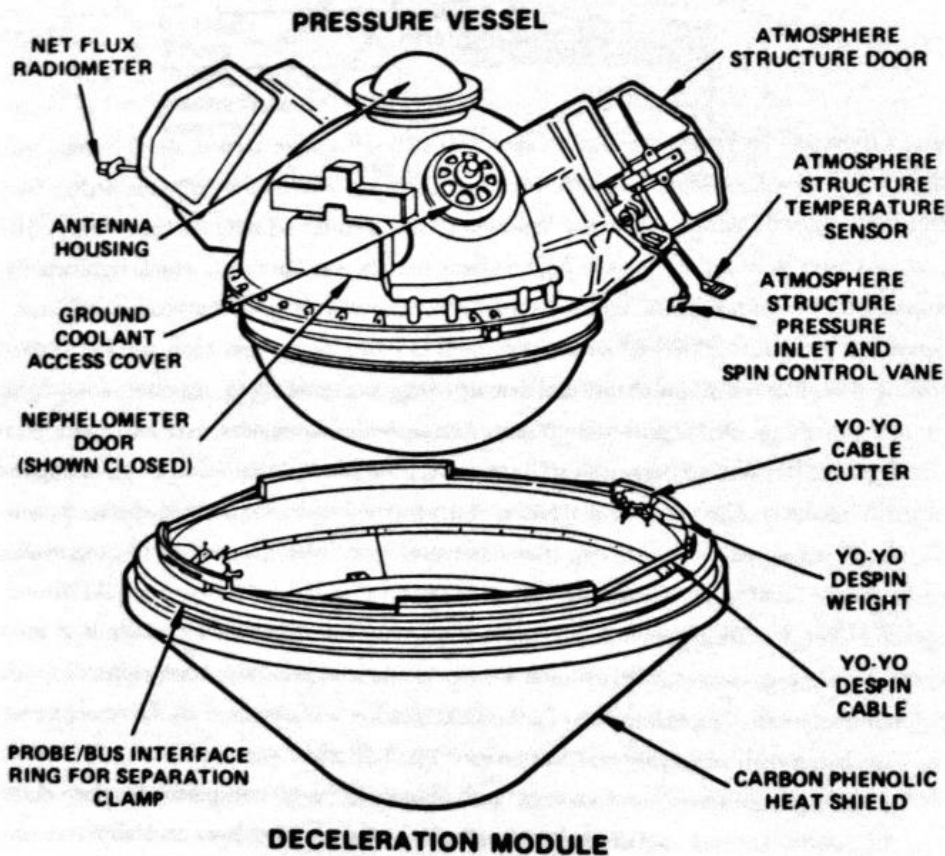
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

PV Large プローブ

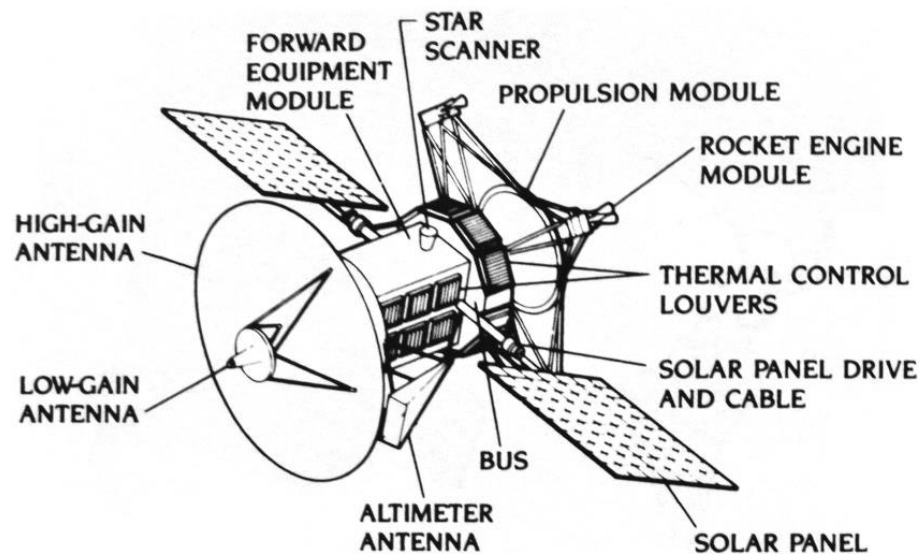
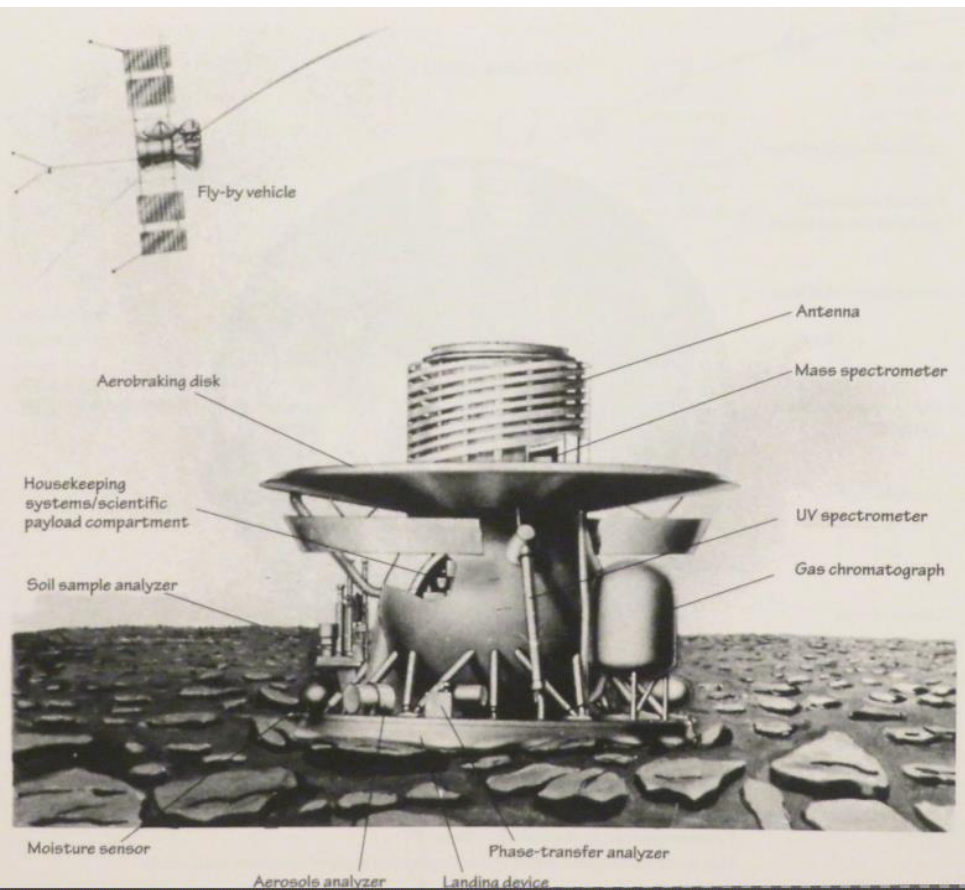


PV Small プローブ

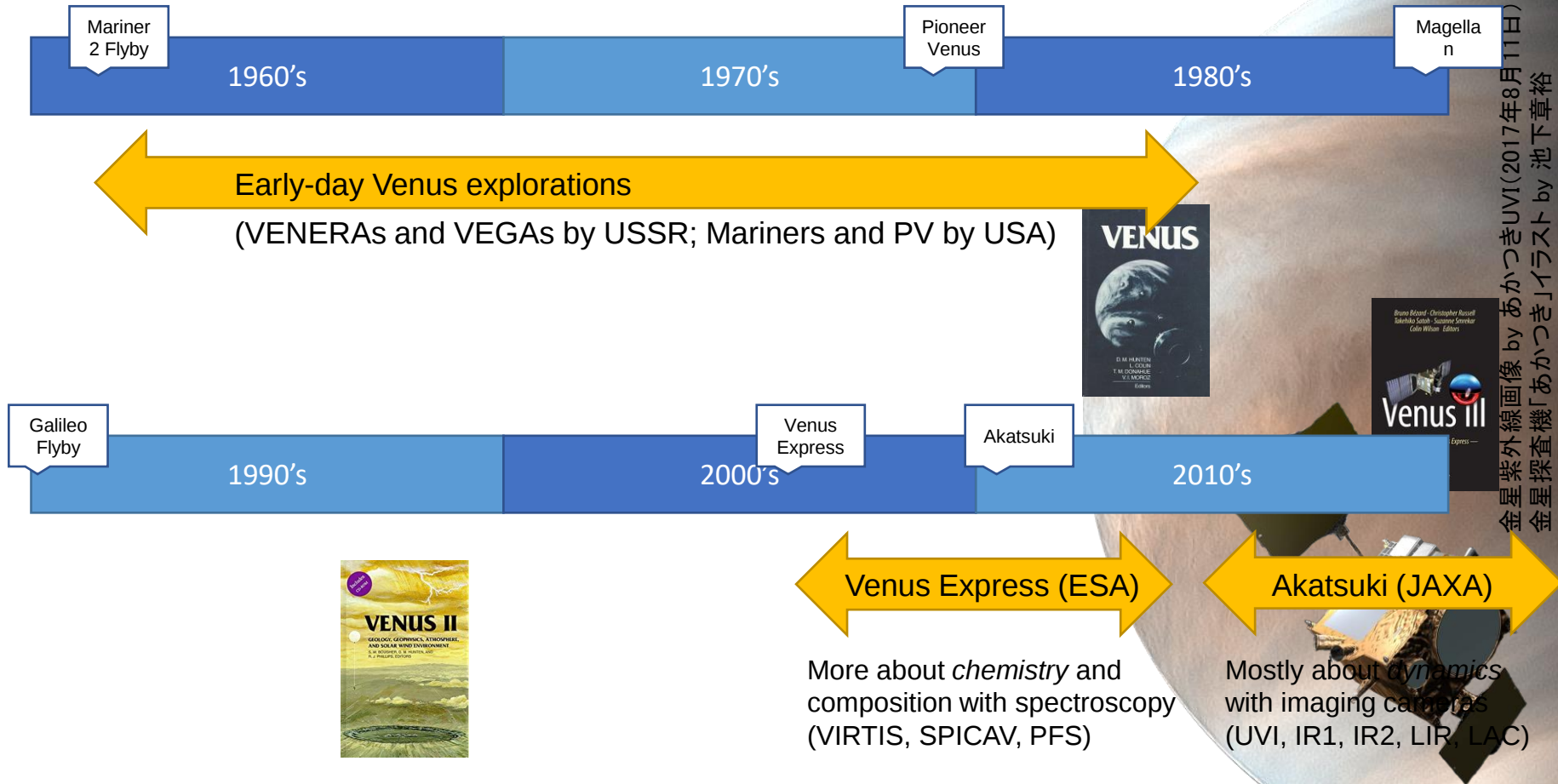
（月11日）
給



ヴェガ着陸船、マゼラン周回機

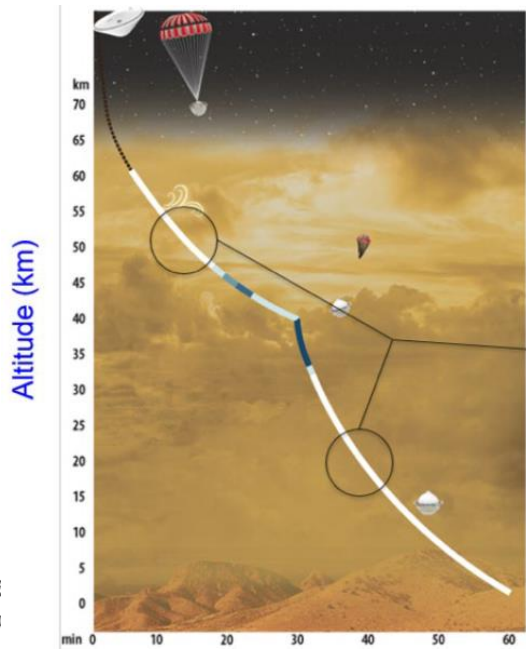


金星探査の歴史を引き継ぐVExとあかつき



米国の新計画 DAVINCI

- 2028/29打ち上げ
 - 降下プローブ搭載機器により下層大気を調査
 - キャリアモジュールからの観測



朝日
世紀



DAVINCI の祖先 Pioneer Venus

- Pioneer Venusは米国で唯一、金星大気へプローブを突入させたミッション(1978年打ち上げ)
- 四機のプローブと探査機バスが大気へ
- 周回機(PVO)は長期間大気観測

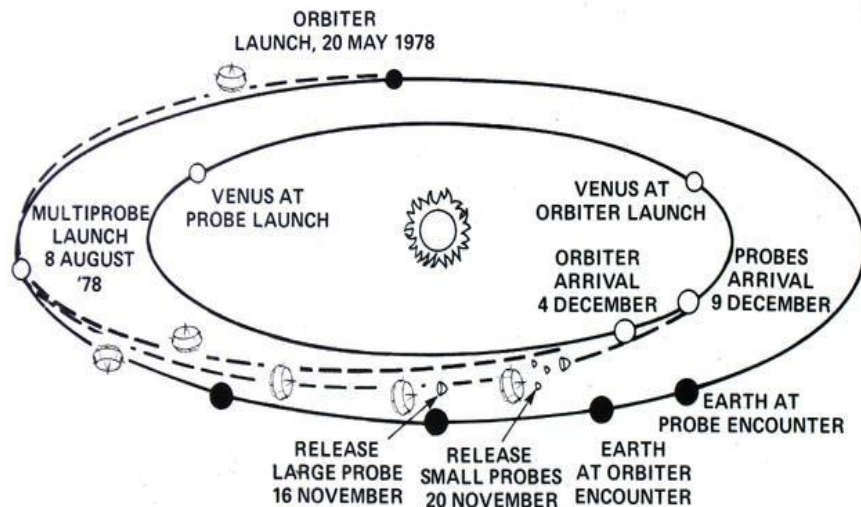
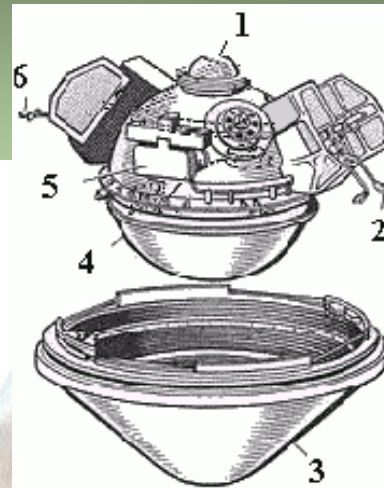
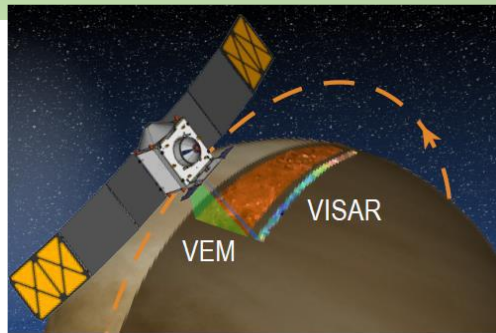


Fig. 7. Pioneer Venus interplanetary phase.

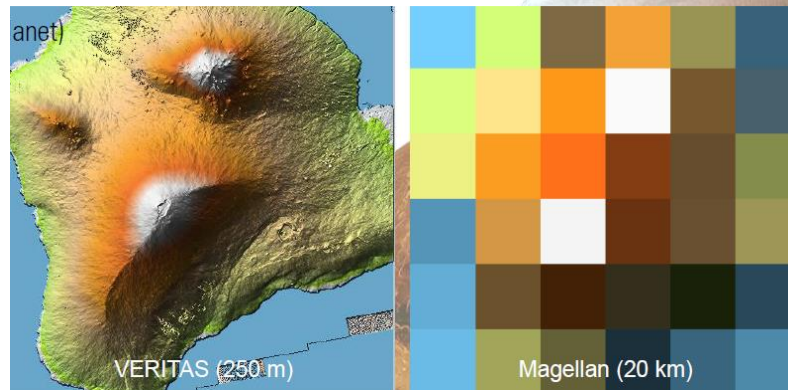


米国の新計画 VERITAS

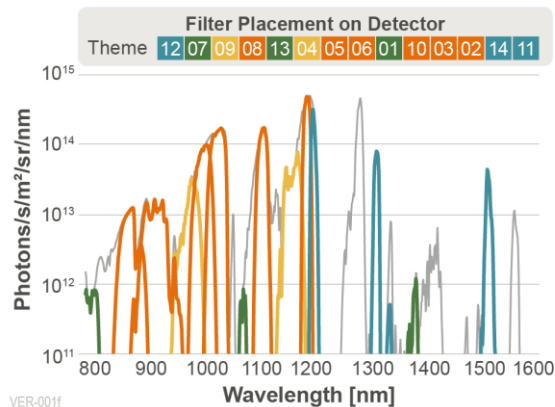
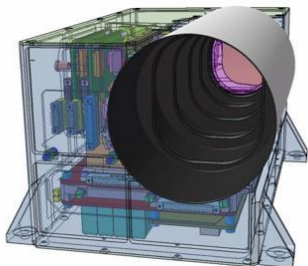


低高度からVISARとVEMで
地表をマッピング

Magellanより100倍高い分解能で
地表の起伏をマッピング



- 2028年打ち上げ
 - MAVENのバスを継承
 - 合成開口レーダー VISAR
 - 赤外線マッパー VEM



Surface Bands

- 02: 860 +/- 20 nm
- 03: 910 +/- 30 nm
- 05: 990 +/- 15 nm
- 06: 1020 +/- 7.5 nm
- 08: 1110 +/- 20 nm
- 10: 1180 +/- 6 nm

Water Vapor Bands

- 04: 960 +/- 20 nm
- 09: 1150 +/- 15 nm

Cloud Bands

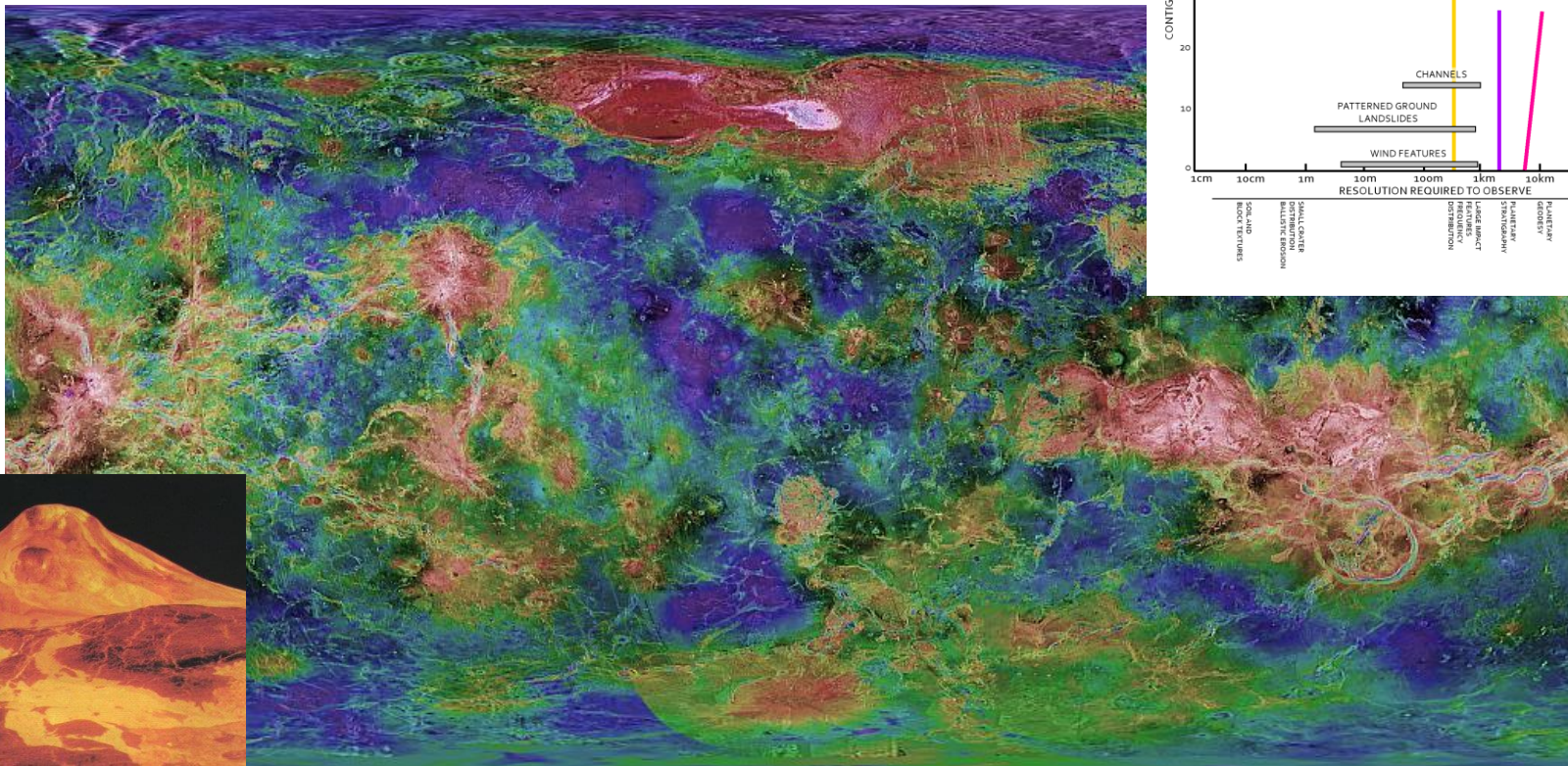
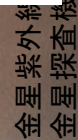
- 11: 1195 +/- 6 nm
- 12: 1310 +/- 15 nm
- 14: 1510 +/- 15 nm

Background Bands

- 01: 790 +/- 10 nm
- 07: 1060 +/- 7.5 nm
- 13: 1370 +/- 10 nm

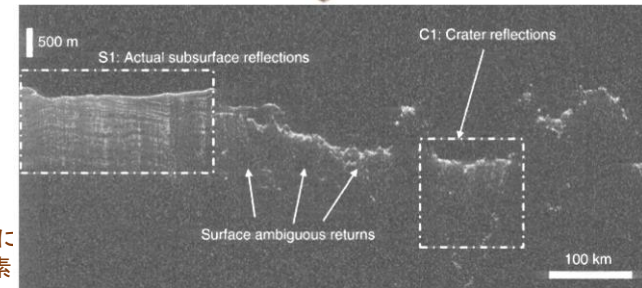
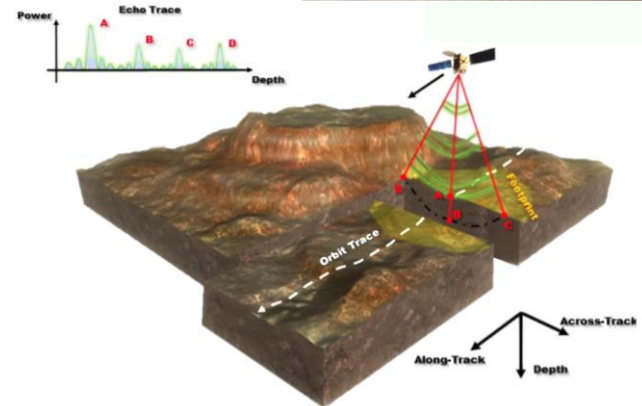
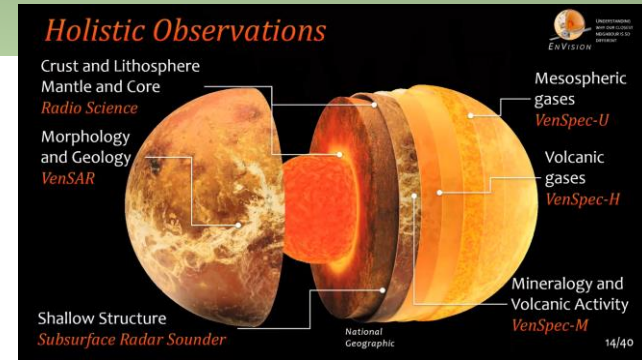
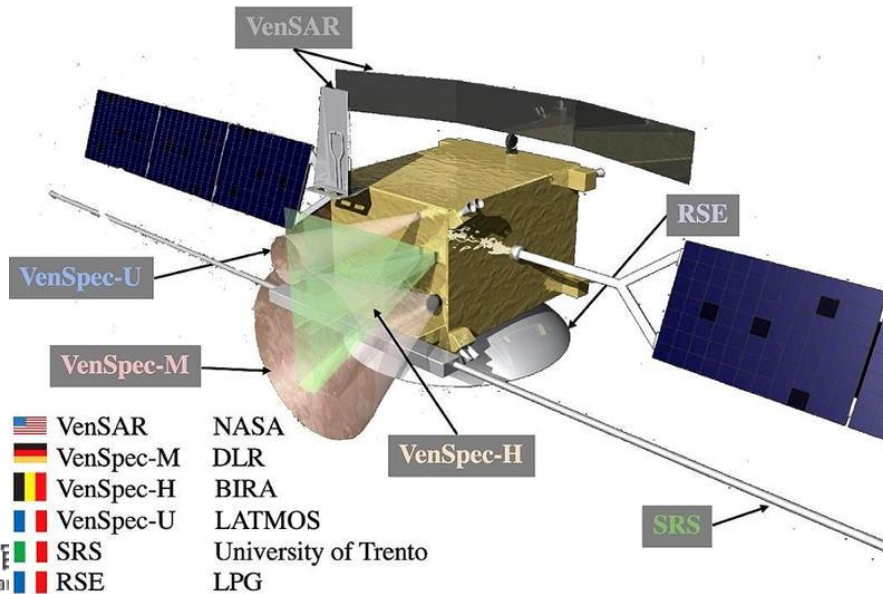


- レーダーにより、金星ほぼ全球の地表起伏をマップしたミッション(1989年打ち上げ)



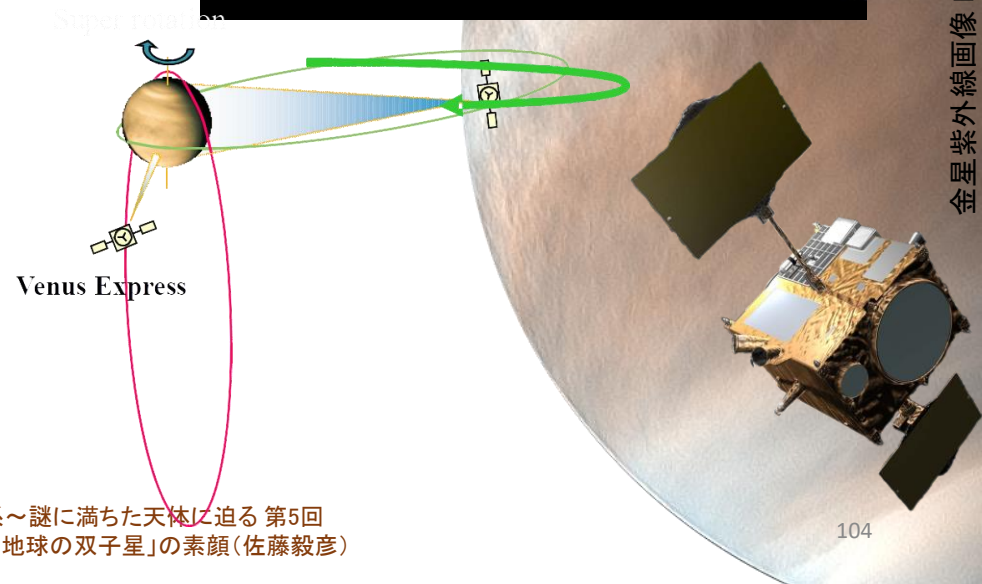
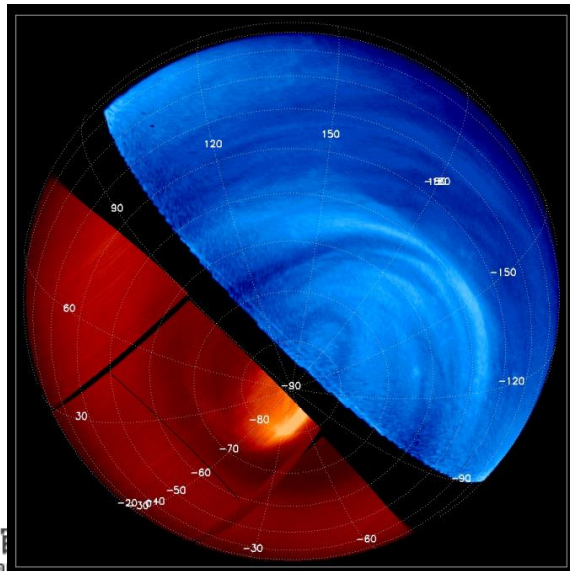
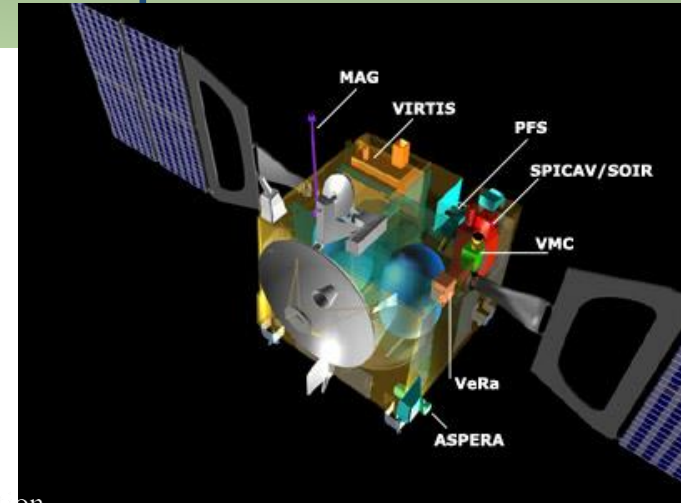
欧州の新計画 EnVision

- 2031年打ち上げ
 - 合成開口レーダー VenSAR
 - 地下探査レーダー SRS
 - 分光撮像装置 VenSpec
 - VenSpec-M, -H, -U の三つ
 - 電波科学



EnVision の祖先は Venus Express ?

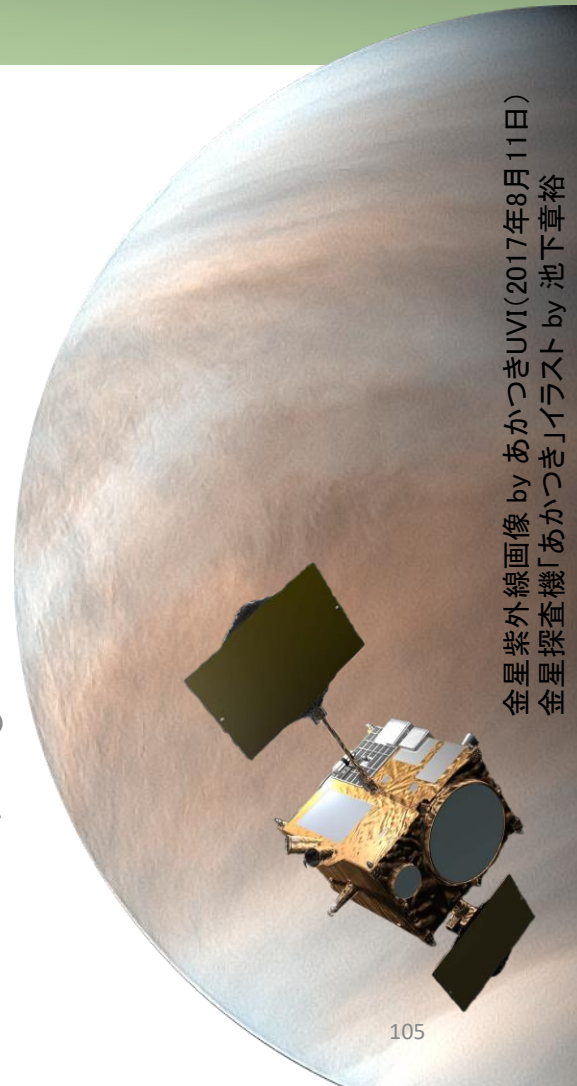
- Venus Expressは、紫外線～赤外線で金星大気を、そして磁場やプラズマ環境を調べたミッション(2005年打ち上げ)
- 必ずしも、EnVision の「直系」に当たる祖先でもなさそう。





あかつき始まる

2001年春に金星探査計画が認められ、正式に開発が始められました。PLANET計画の三番目を意味するPLANET-Cをコードネームに、のちに打ち上げ前にミッションメンバーから「あかつき」と命名されます。

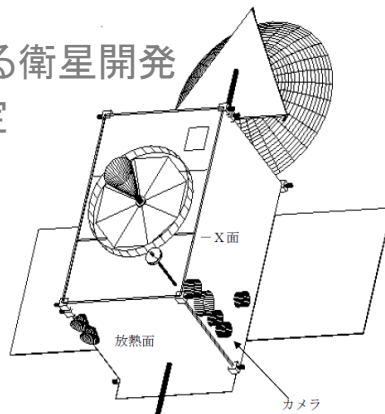


日本の金星探査計画

金星気象衛星という明確なコンセプト

世界的にも「惑星気象」に特化したミッションはそれまで存在しなかった

- 5台の撮像カメラ(紫外線、近赤外線、中間赤外線、可視光)により大気運動を三次元的に可視化
- 電波掩蔽観測により大気鉛直構造を測定
- 雷発光を時間分解して捉える専用高速カメラ
- 金星大気スーパーローテーションと同期する軌道を周回し、疑似的に「静止気象衛星」のように観測するユニークな戦略
- 「はやぶさ」のヘリテージを用いる衛星開発
- M-Vロケットでの打ち上げを想定
- プラズマ環境(大気散逸)観測はオプション



金星探査計画提案書



金星探査計画ワーキンググループ

2001年 1月

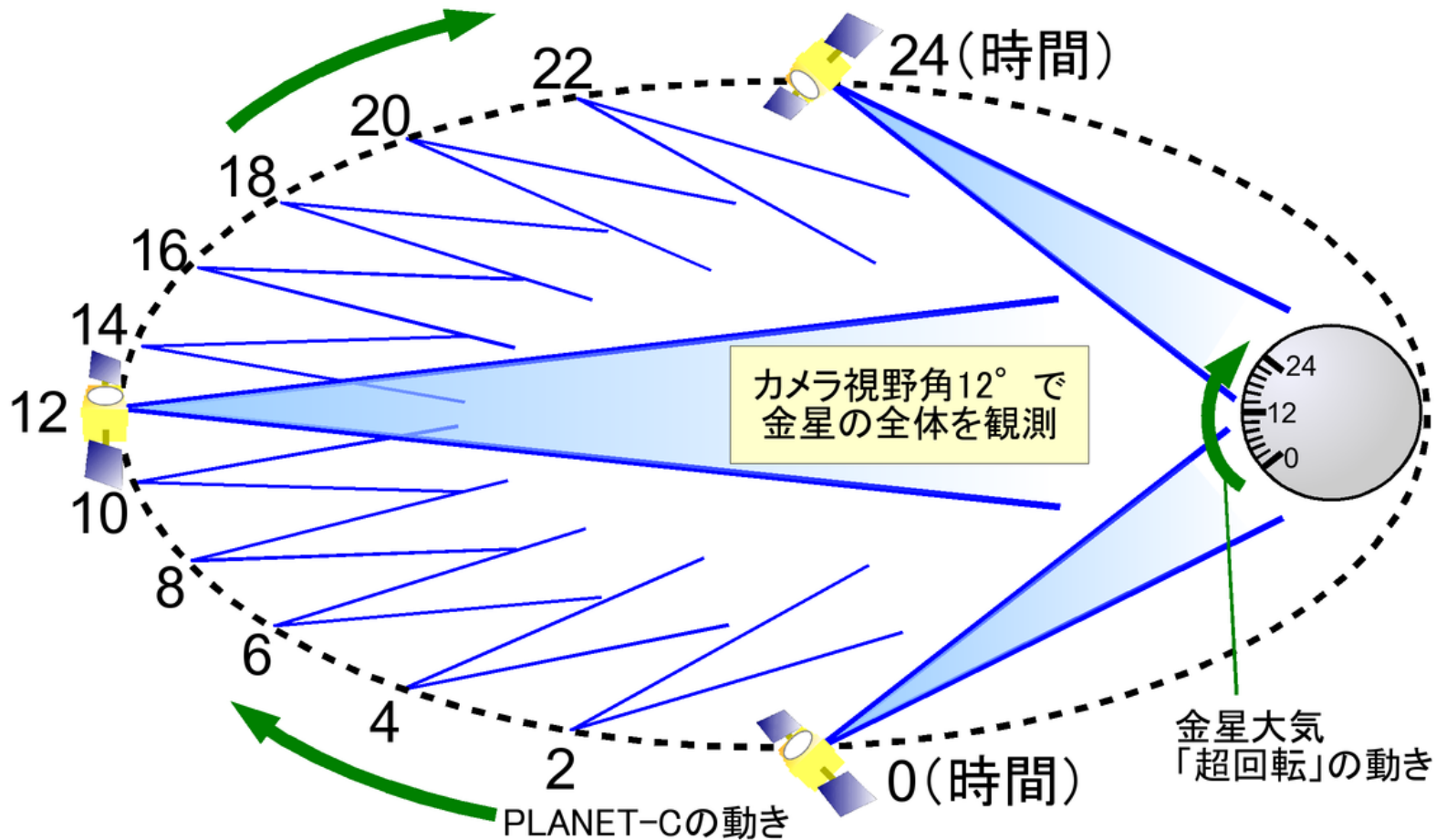
検証を目指すSR維持機構

- 「金星探査計画提案書」にまとめられているもの

	過去の観測	必要とされる情報	ミッションで得る情報
子午面循環 + 水平粘性	紫外観測による雲頂の平均南北風は熱潮汐との分離に信頼性がない 雲頂以下では CO 分布が高緯度での下降流を示唆 水平粘性の情報はない	子午面循環 擾乱による水平方向の角運動量再分配 $\langle u' v' \rangle$ 擾乱の盛衰と帯状流の変動の関係	子午面循環 ← 雲/SO ₂ /CO 追跡、H ₂ SO ₄ 蒸気の子午面分布 擾乱の性質、 $\langle u' v' \rangle$ ← 雲/SO ₂ /CO 追跡
熱潮汐波	雲頂で波の存在は確認されているが鉛直伝播の情報がない	立体構造 振幅	鉛直構造 ← 鉛直気温分布 振幅 ← 雲/SO ₂ /CO 追跡、気温/H ₂ SO ₄ 蒸気の鉛直分布
ケルビン波	雲頂で波の存在は確認されているが鉛直伝播の情報がない	立体構造 雲層下部以下での振幅	鉛直構造 ← 鉛直気温分布 振幅 ← 雲/SO ₂ /CO 追跡、気温/H ₂ SO ₄ 蒸気の鉛直分布



金星の準静止気象衛星(30時間周期)

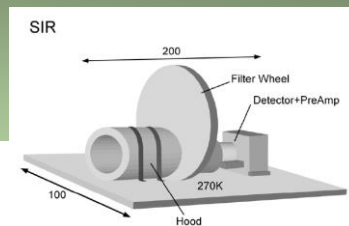


金星紫外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

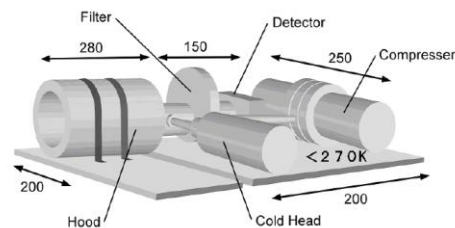
搭載科学機器(当初案)

表 4. 1. 1 各機器の観測対象

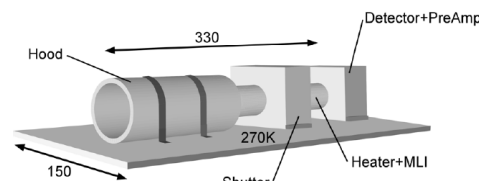
観測モード			観測対象	得られる主な物理量
機器名	波長	昼夜		
S I R	1 μm	□	雲層による太陽散乱光	下層雲構造、風速場
M I R	1.7 μm	■	地面からの熱放射	地面温度・放射率、下層雲構造
	2.3 μm	■	下層大気からの熱放射	下層雲構造、1 μm ・2.3 μm 輝度と合わせて雲粒サイズ
	2.4 μm	■	同上	下層雲構造、風速場
L I R	7-11 μm	□■	雲頂からの熱放射	雲頂温度(高度)分布
	290 nm	□	雲頂による太陽散乱光	SO ₂ 分布、風速場
L A C	380 nm	□	同上	未知吸収物質、風速場
	777 nm	■	雷放電発光	雷活動の頻度、分布
	551 nm	■	O ₂ 大気光	発光強度分布
電波オカルテーション	558 nm	■	O大気光(オーロラ)	同上
			屈折率・減衰率プロファイル、シンチレーション	気温・気圧・硫酸蒸気・渦拡散係数・電子密度プロファイル



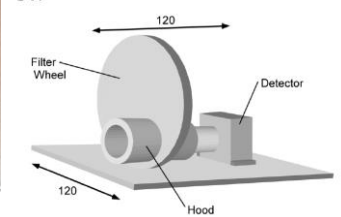
MIR



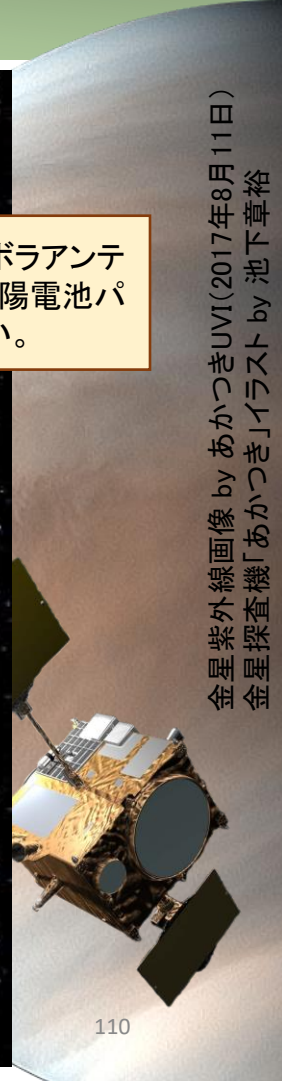
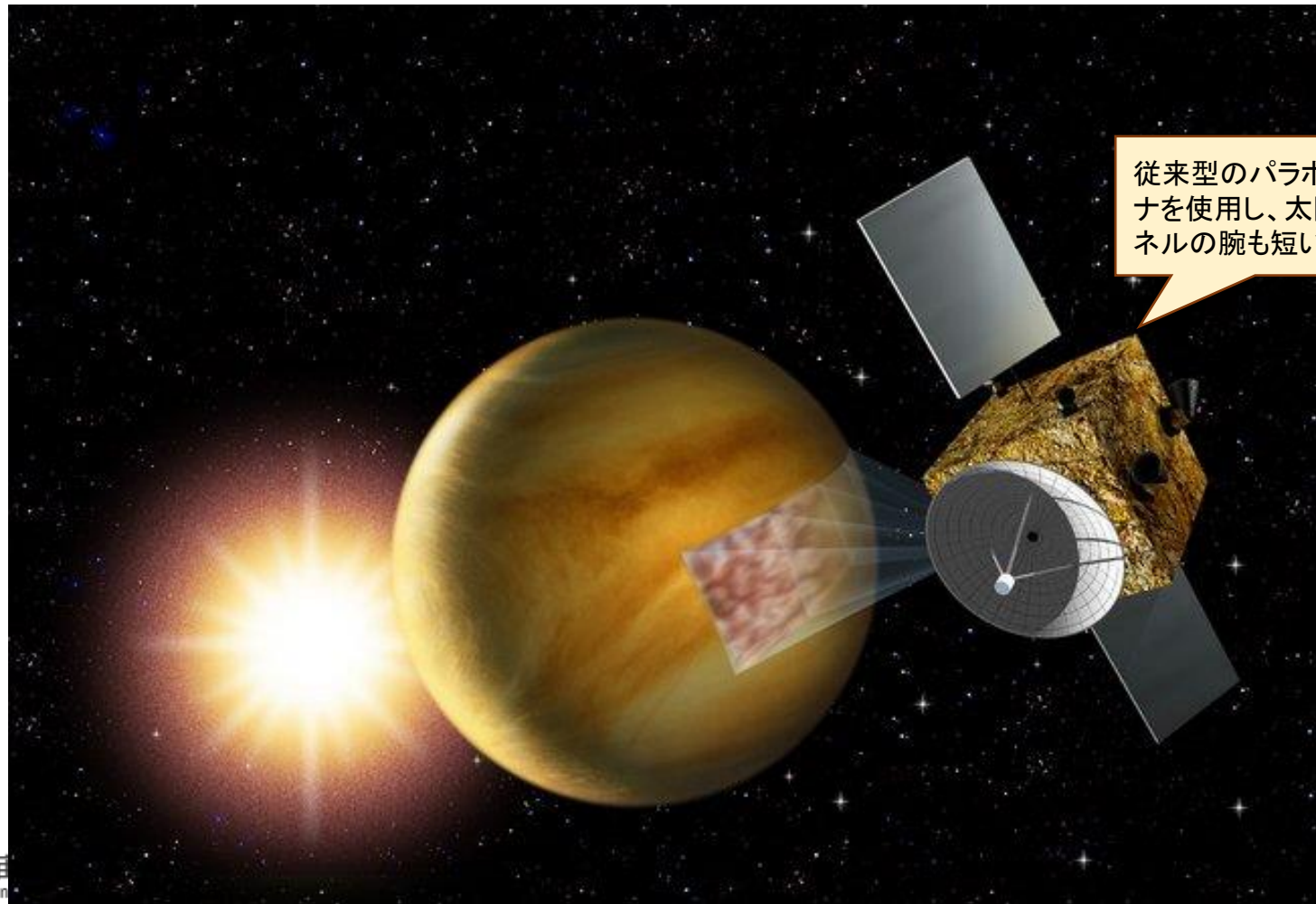
LIR



UVI



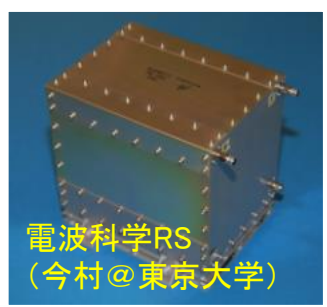
初期モデルPLANET-Cイラスト



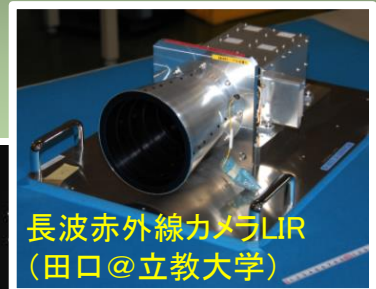
金星紫外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕



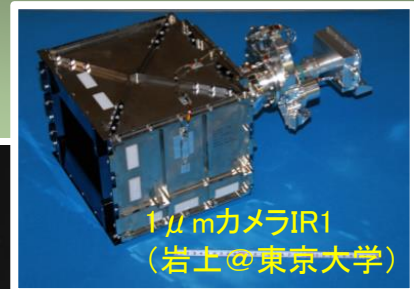
PLANET-C最終形



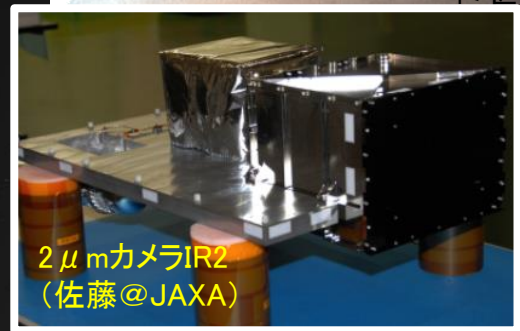
電波科学RS
(今村@東京大学)



長波赤外線カメラLIR
(田口@立教大学)



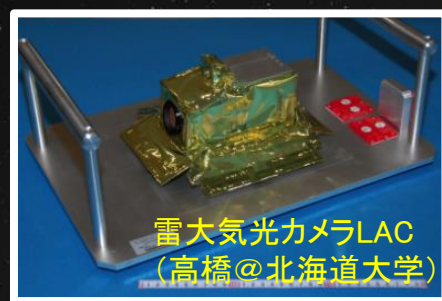
1 μ mカメラIR1
(岩士@東京大学)



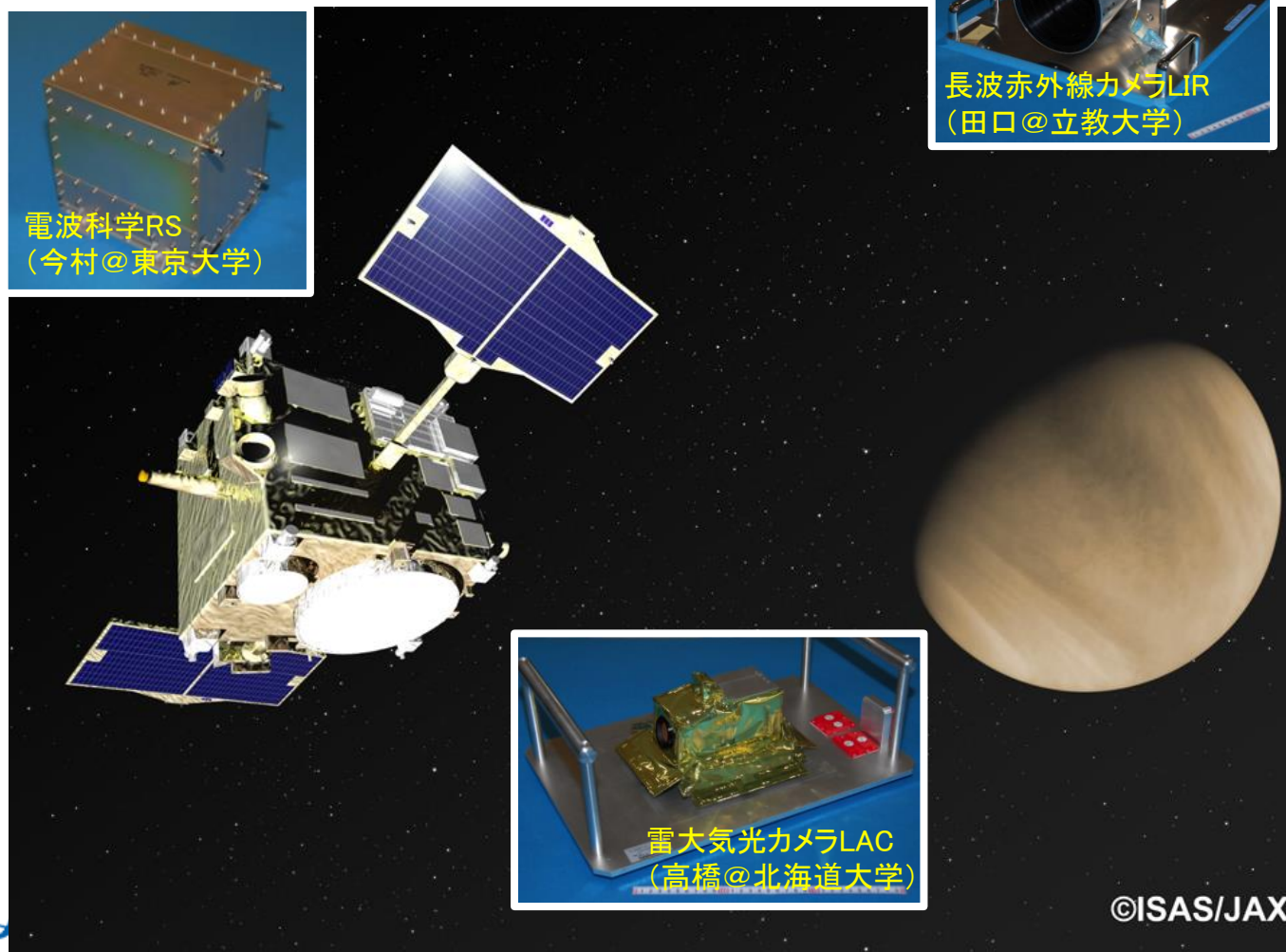
2 μ mカメラIR2
(佐藤@JAXA)



紫外イメージャUVI
(渡部@北海道情報大学
山崎@JAXA)



雷大気光カメラLAC
(高橋@北海道大学)

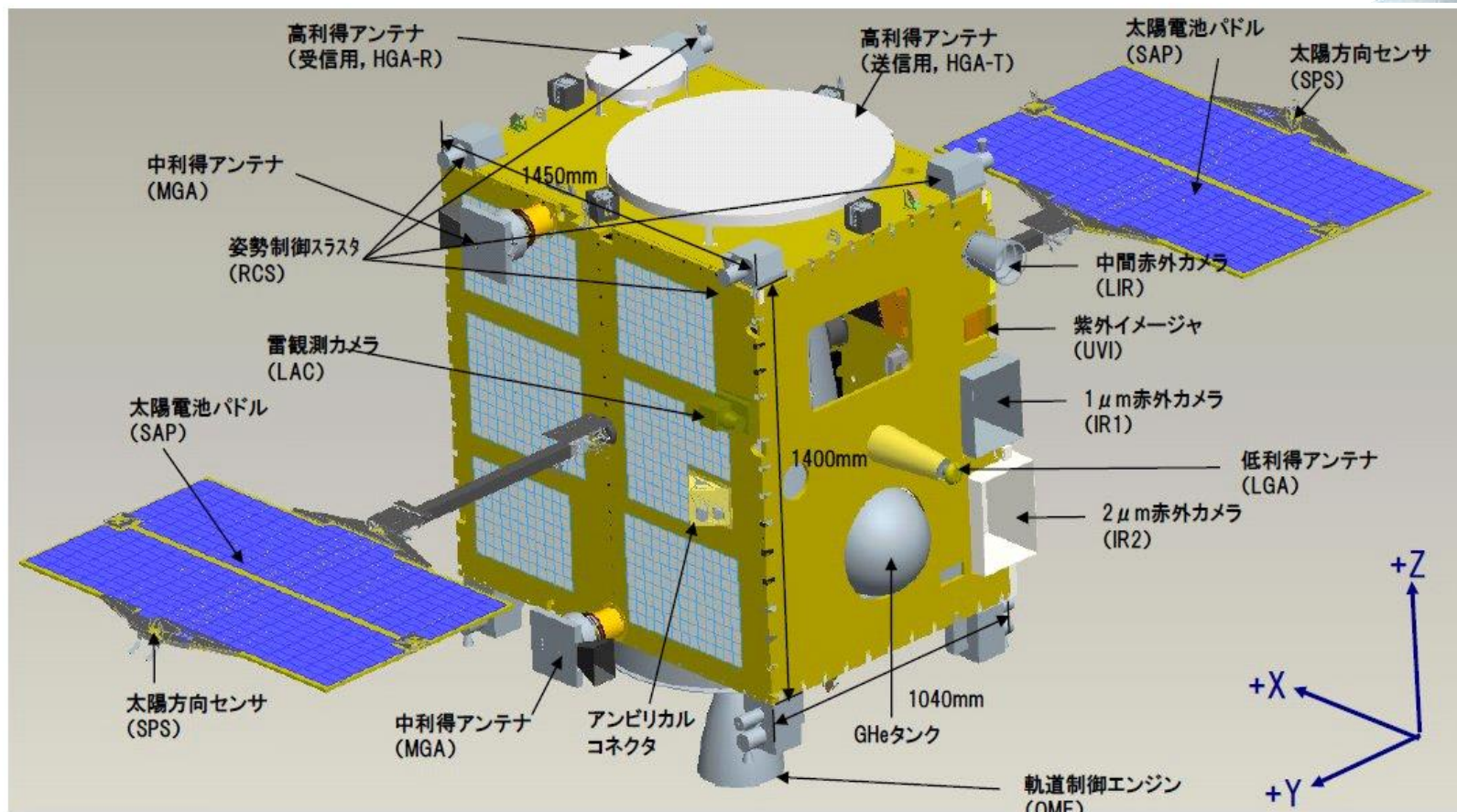


©ISAS/JAXA

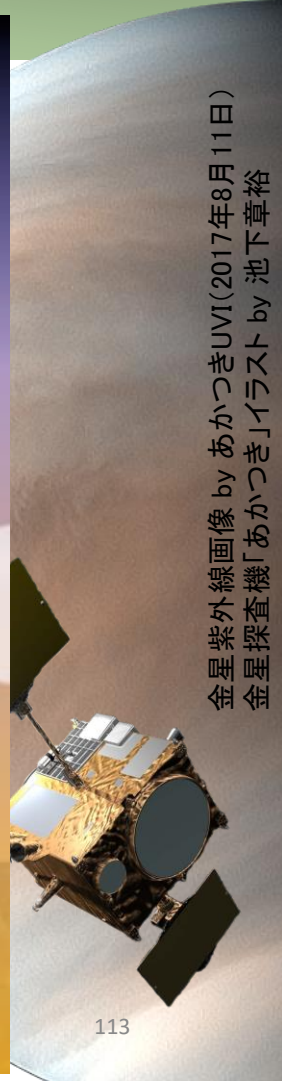
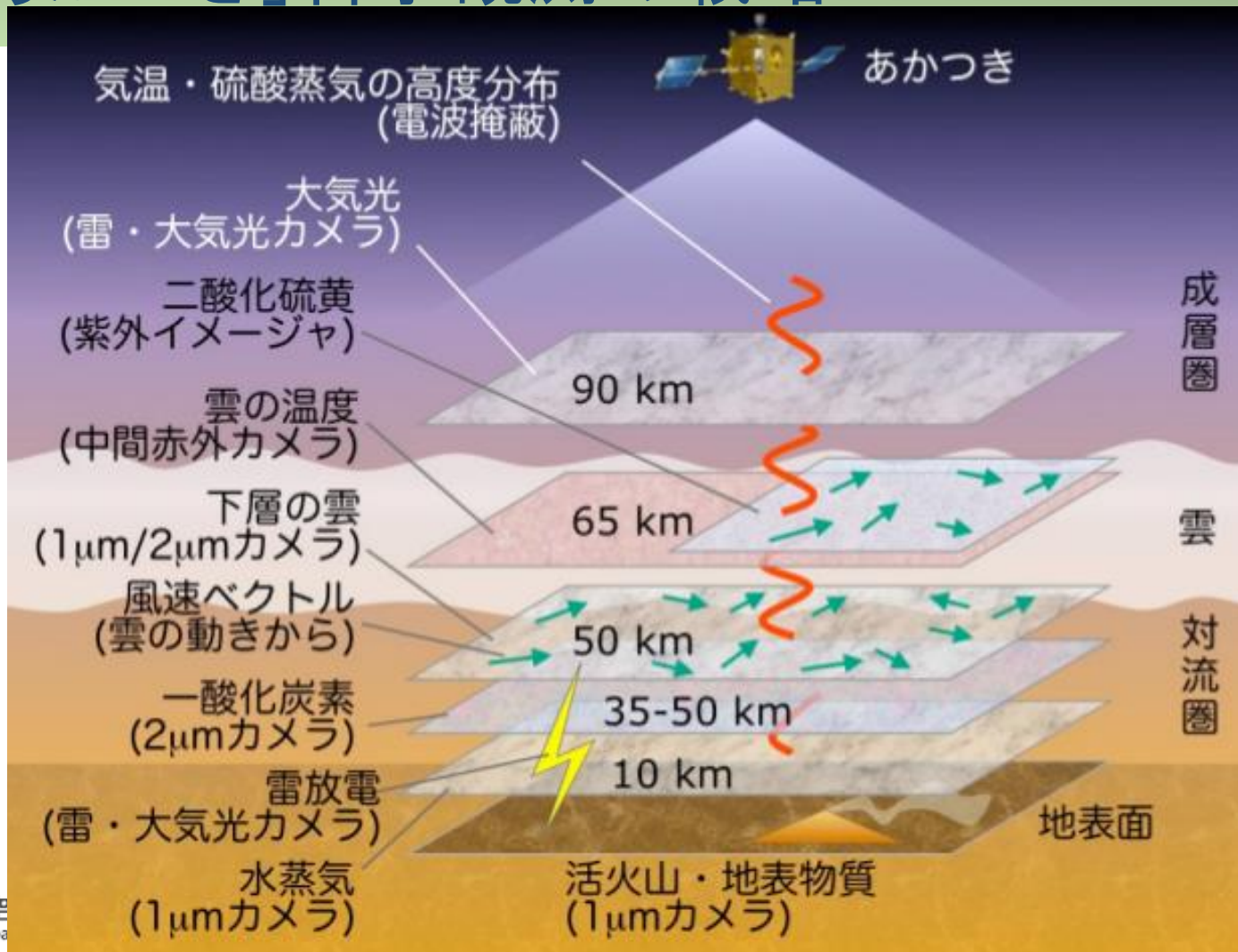
7年8月11日)
下章裕

金星探査機
金星外縁

探査機のさまざまなコンポーネント



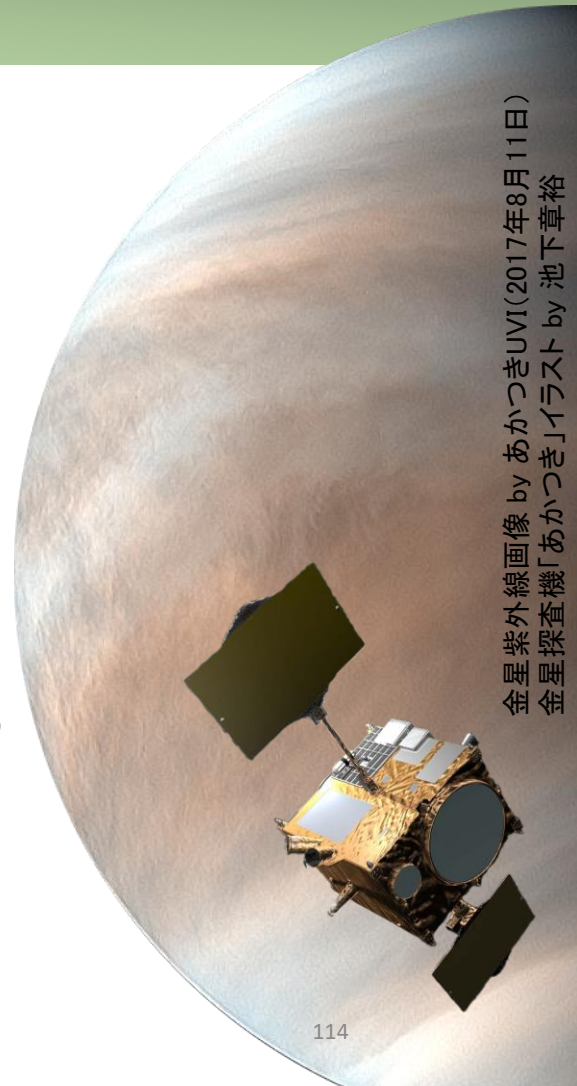
「あかつき」科学観測の戦略



金星紫外線画像 by あかつき UVI (2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

VOIの失敗と、それを乗り越えての成功

2010年12月7日の金星周回軌道投入（VOI）は残念ながら失敗し、「あかつき」は人工惑星として太陽を5年間周回します。





2010年5月21日、いざ金星へ！

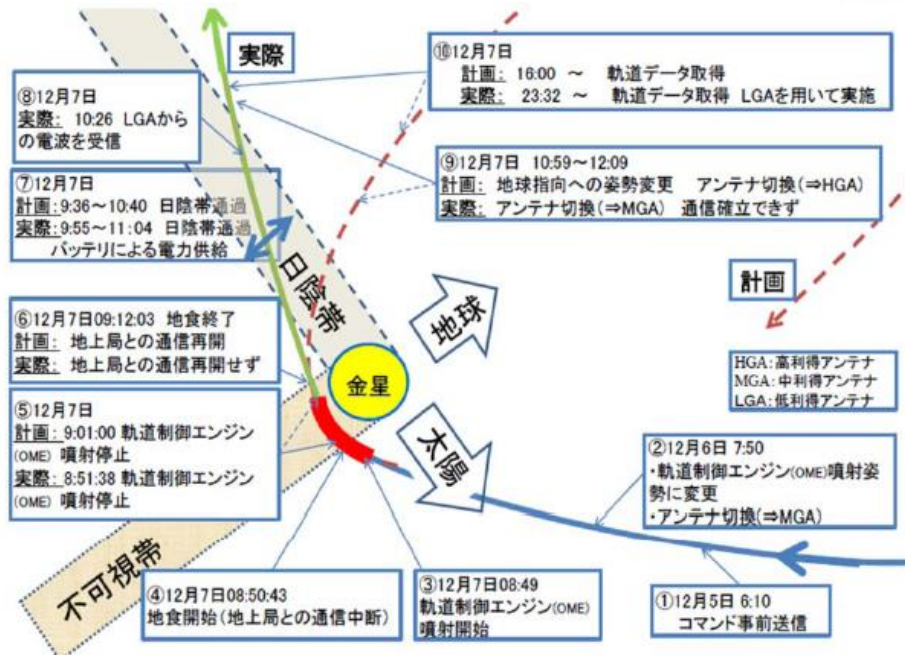
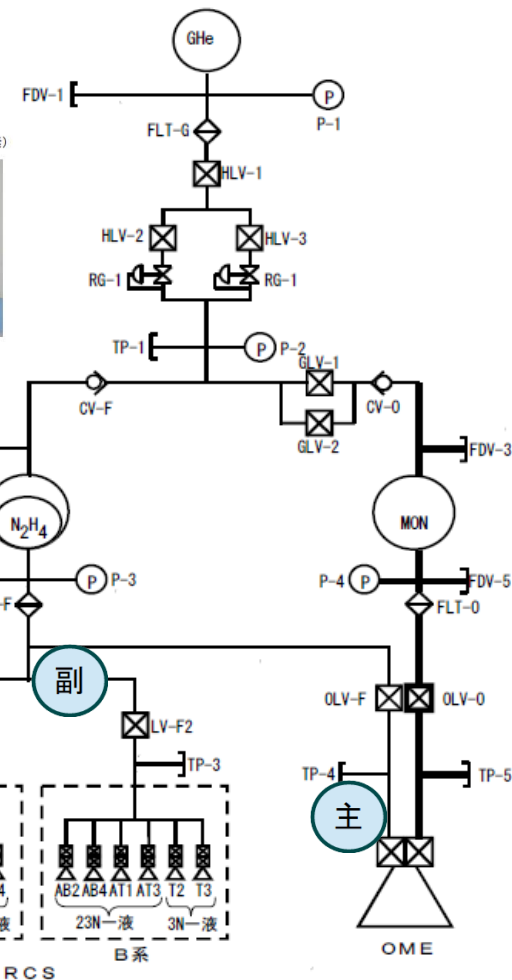
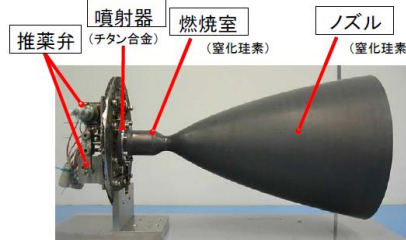
- 2010年5月21日
6時58分22秒
 - 種子島宇宙センターから
 - H-IIAロケット17号機
により打ち上げ
- 2010年12月7日
金星に到着
 - Venus Orbit
Insertion
(VOI)に挑戦



VOI失敗の原因は、バルブ詰まり

燃料と酸化剤の「スローな」化学反応

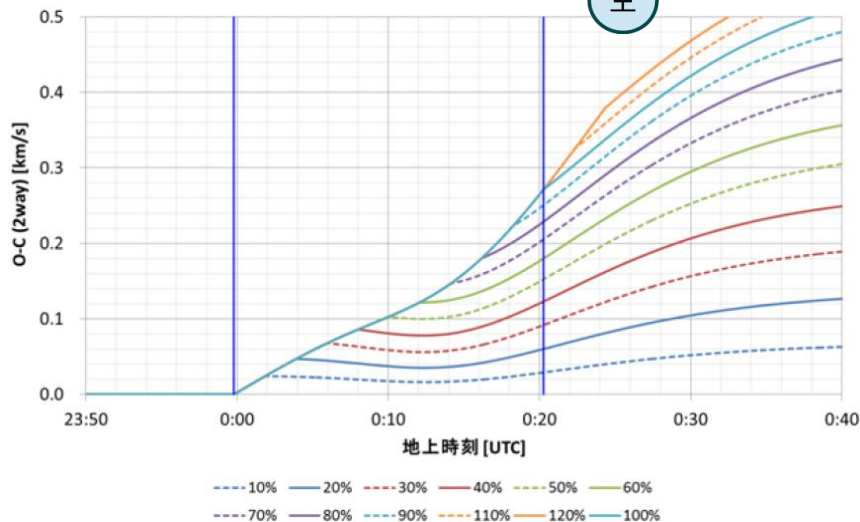
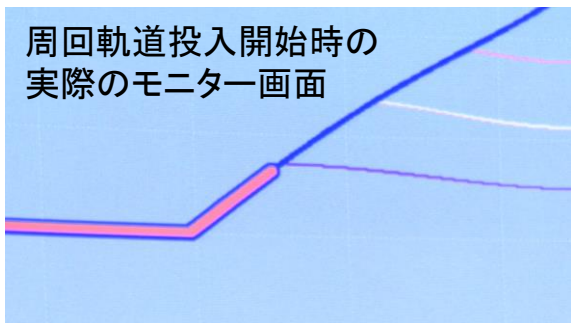
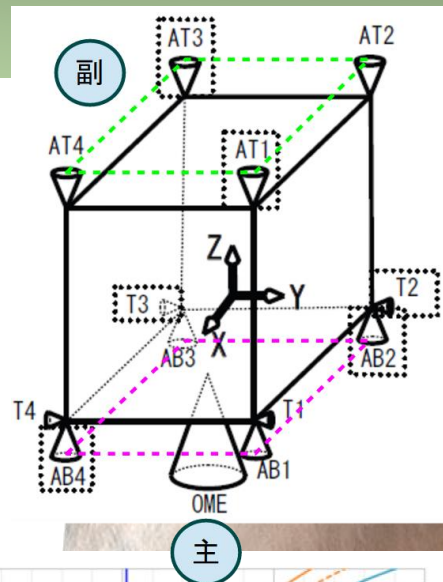
- 素早い反応では爆発的推力を発生
- スローな反応では固形物＝塩を生成
 - これが逆流防止バルブを詰まらせた
- 燃料 < 酸化剤 条件でエンジンを破損



本に迫
る素顔

20分間一本勝負のVOI-R

- 探査機トップ側の4隅にある姿勢制御エンジン (AT1~AT4) を使用
 - 20分間、固唾を呑み見守る「長い時間」
 - 管制室モニターのドップラーモニター画面に探査機の変速度変化グラフがリアルタイム表示され、進捗を見守った。
 - 噴射時間として、ノミナルの88%(17分40秒)以上が必要であった(それより短い時間で噴射中断してしまえば、金星周回を達成できない)。





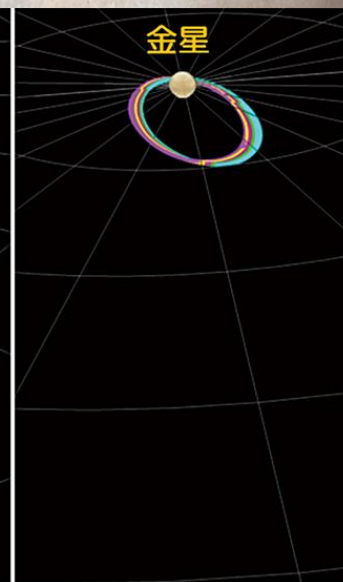
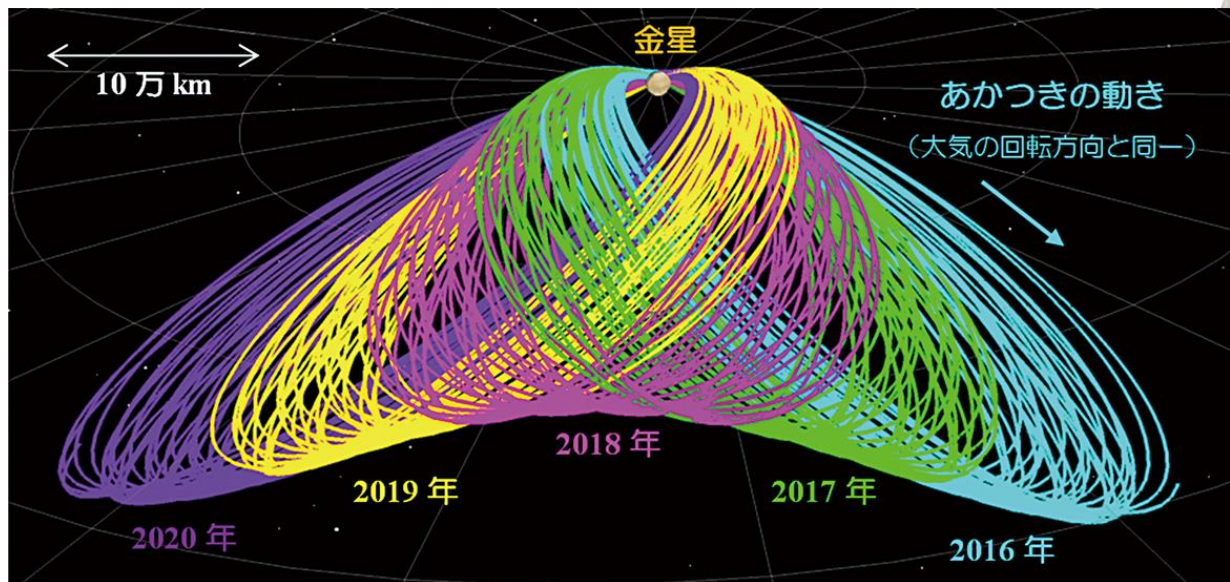
あかつき、金星周回を開始！



金星紫外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

「出来上がり」周回軌道は…

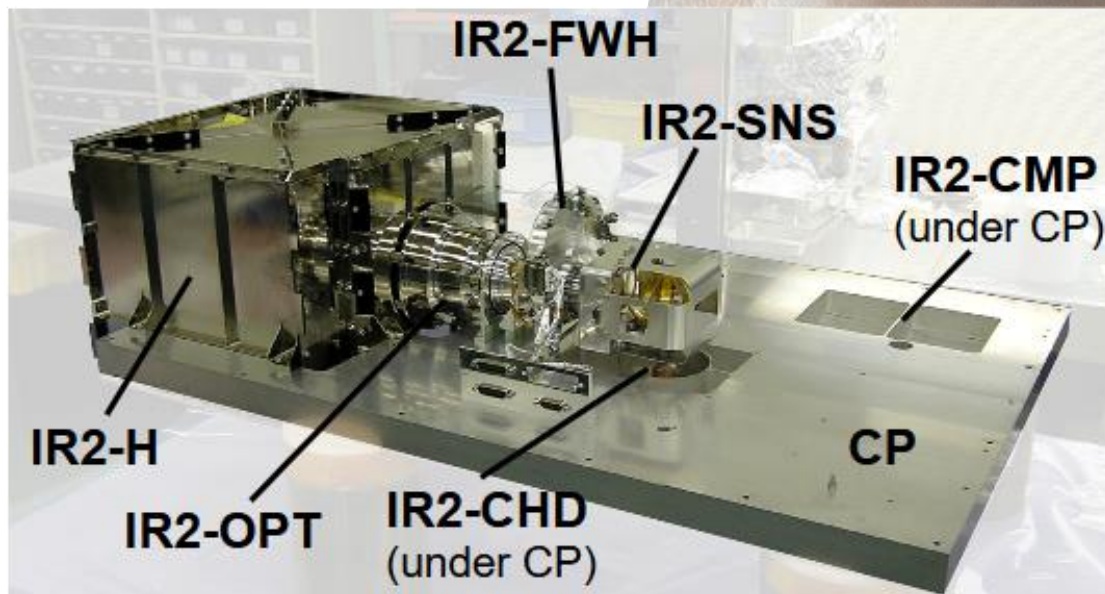
- 当初予定よりは、ずっと大きな軌道長半径
- 金星から遠方では、金星重力の「抑え」が弱く、太陽その他の影響で軌道が徐々に変化する。
 - 金星赤道面に近い軌道面で、大気スーパーローテーションと同方向＝逆行周回を達成



2 μ mカメラIR2の開発

• 担当メーカー

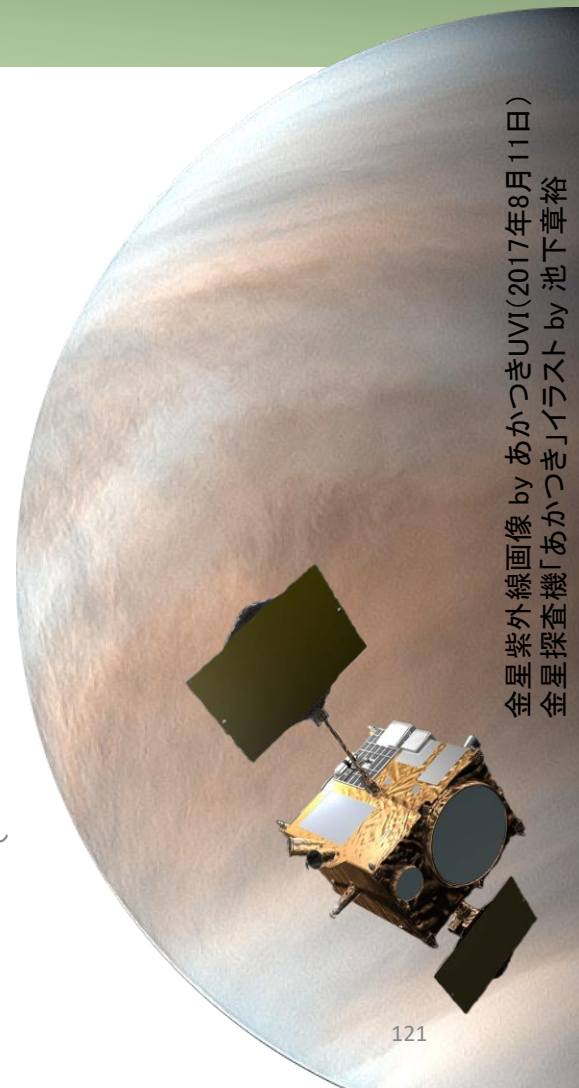
- 主担当：住友重機械工業SHI(冷却系を含む全体)
- 検出器担当：三菱電機
- 光学系担当：ニコン(ただし低温保持機構はSHI)
- フィルター担当：Barr Associates(日本代理店：フジトク)
- フード担当：馬越





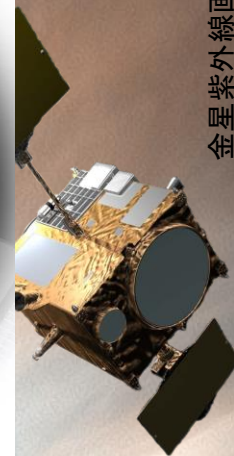
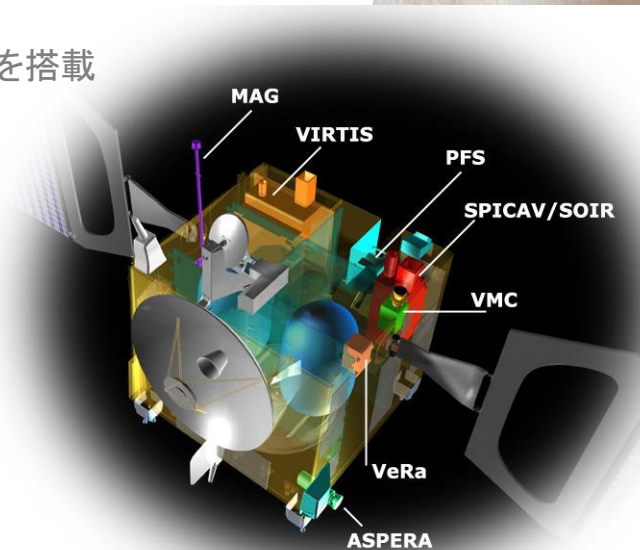
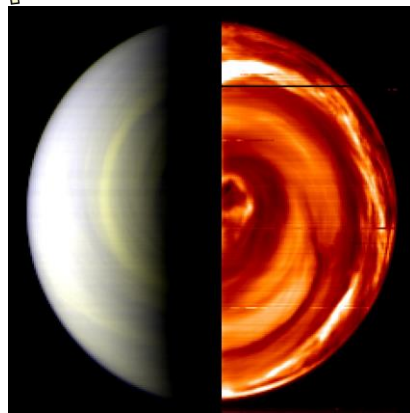
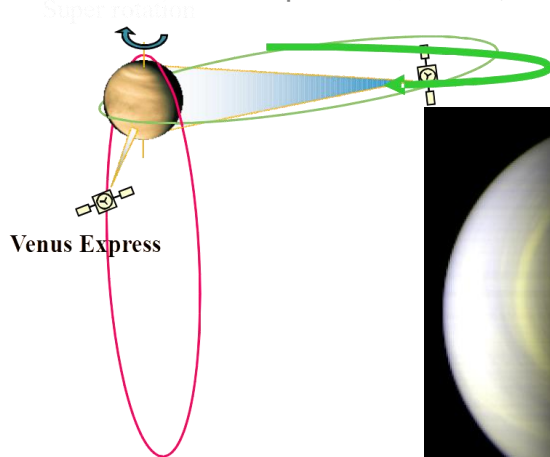
欧州Venus Expressの出現

PLANET-Cの2001年4月審査後に突如、欧州Venus Express計画が持ち上がります。Mars Expressスペアハードを活用した計画で、あかつきに先立ち2005年に打ち上げられることとなるまさにExpressミッションでした。



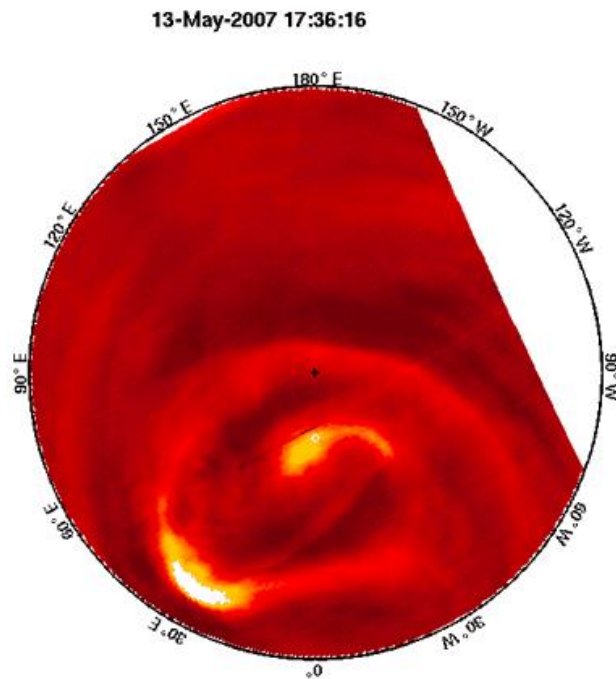
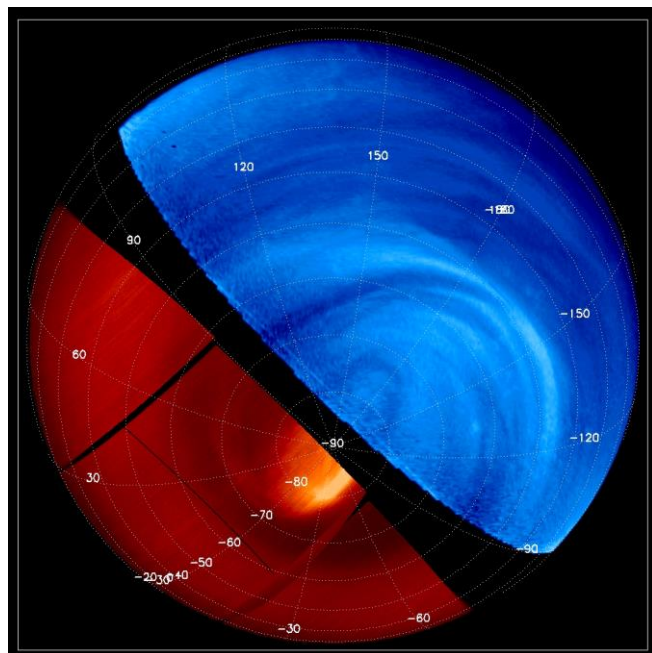
VExとあかつきの違い

- VExは極軌道(24時間周期)衛星
 - 太陽直下点(赤道)付近の力学観測には適さず、「化学」を重視
 - 分光機能を有する機器を搭載 (SPICAV/SOIR, VIRTIS, PFS)
 - VIRTISはスリットスキャンにより二次元画像取得が可能
 - プラズマ機器を搭載 (ASPERA-4, MAG)
 - コンパクトな4眼(紫外～可視～近赤外)撮像カメラ (VMC)
 - 電波科学VeRa
 - Mar Expressと異なり、超高安定発振器USOを搭載



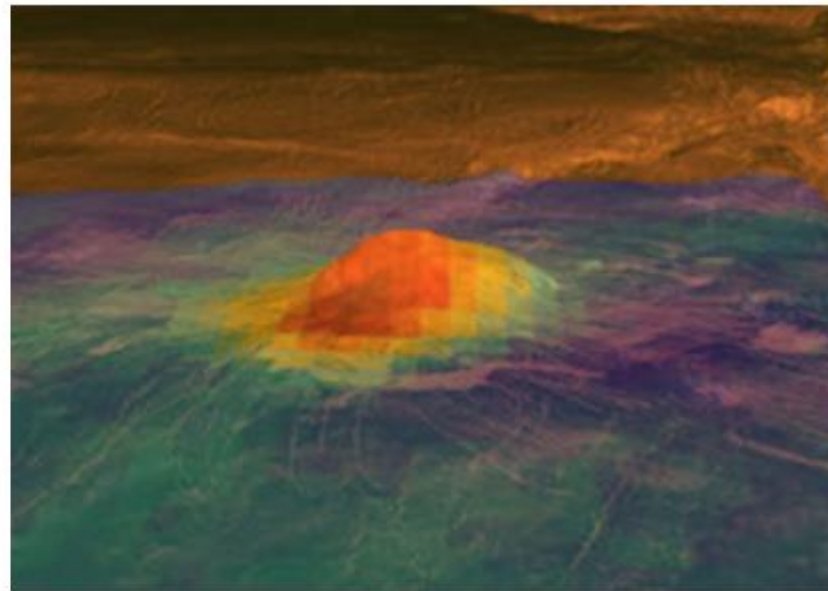
VExのトップサイエンス (1)

- Shape-shifting polar vortices – The existence of the polar vortices on Venus has been known for many years, but high-resolution infrared measurements obtained by the Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer (VIRTIS) instrument on Venus Express have revealed that the southern vortex is far more complex than previously believed.



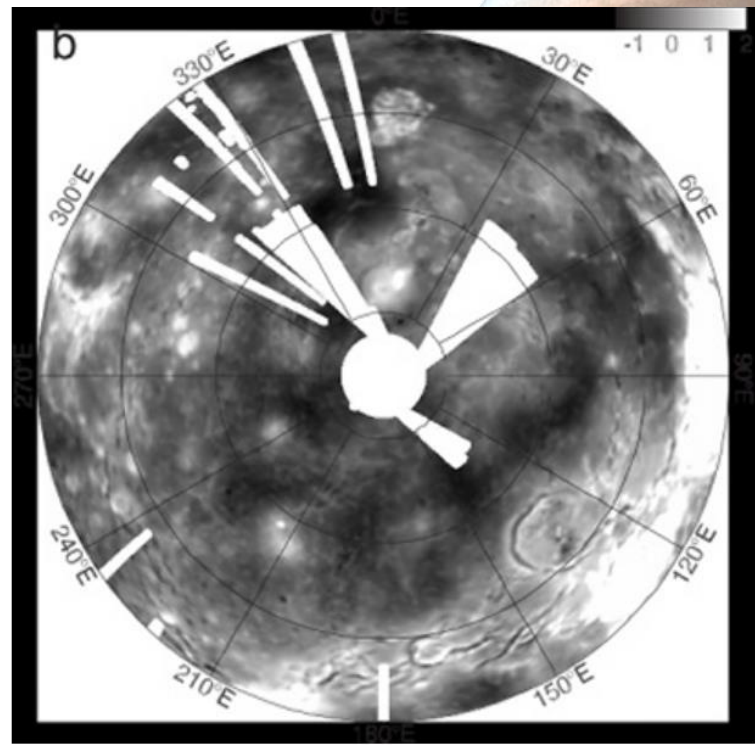
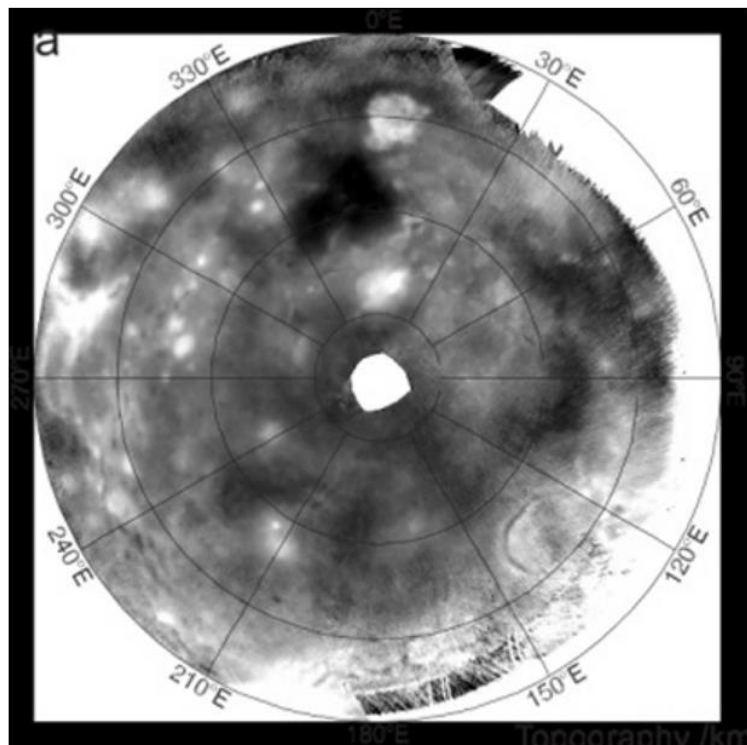
VExのトップサイエンス (2)

- Recent volcanism? – Immediately after arriving at Venus in 2006, the spacecraft recorded a significant increase in the average density of sulphur dioxide in the upper atmosphere, followed by a sharp decrease. One possibility is that the dramatic swing in atmospheric composition was caused by buoyant plumes of volcanic gases released by a large eruption and floating upward.



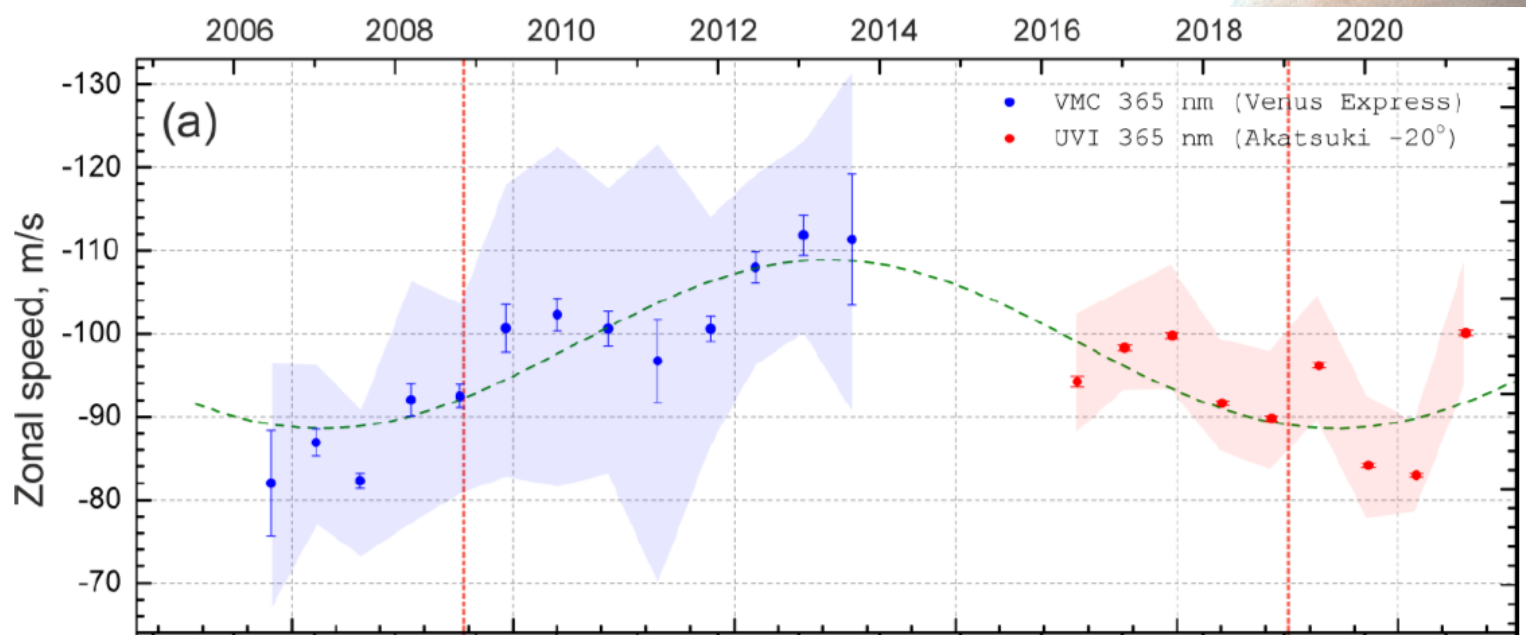
VExのトップサイエンス (3)

- Spinning Venus is slowing down – Venus Express discovered that surface features were not quite where they should be, evidence that Earth's cloud-covered neighbour spins a little slower than previously measured.



VExのトップサイエンス (4)

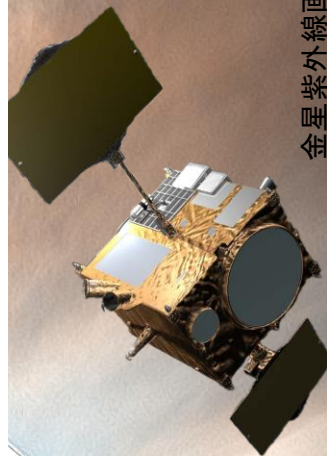
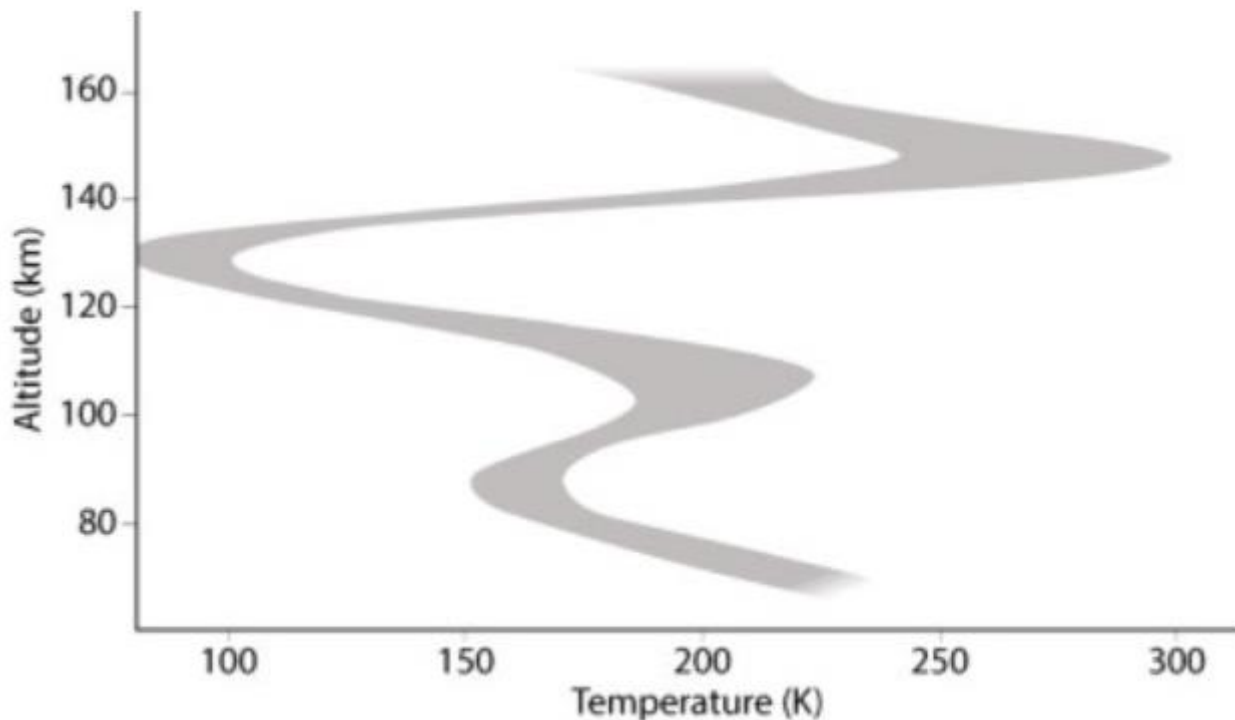
- Super-rotation is speeding up – After its arrival at the planet in 2006, Venus Express was able to conduct the most detailed survey of cloud motions in the atmosphere of Venus, with the surprising discovery that the planet's high level winds have become faster over time.



Khatuntsev et al. (2023)

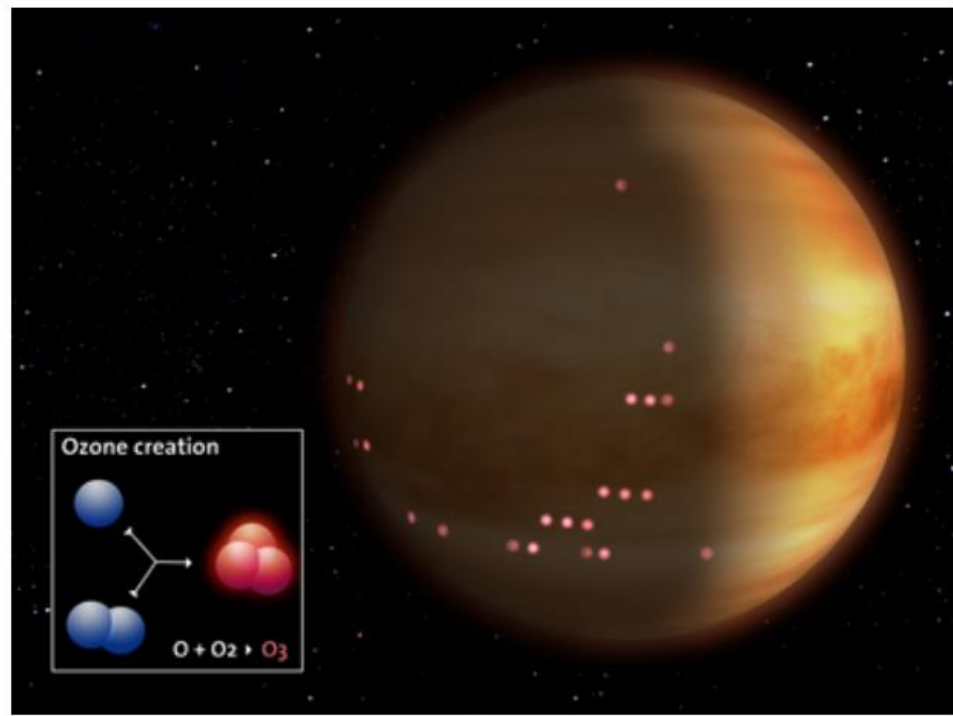
VExのトップサイエンス (5)

- Snow on Venus? – Venus Express discovered a surprisingly cold region high in the planet's atmosphere, where conditions may be frigid enough for carbon dioxide to freeze out as ice or snow.



VExのトップサイエンス (6)–(8)

- Ozone layer – Using observations made with the Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Venus (SPICAV) instrument, scientists were able to detect the presence of a tenuous layer of ozone gas in its atmosphere.
- Water loss – Venus Express has confirmed that a large quantity of water has been lost into space over billions of years.
- A magnetic surprise – Venus Express has discovered evidence for magnetic reconnection – the process responsible for the Northern Lights on Earth – in Venus' magnetotail.



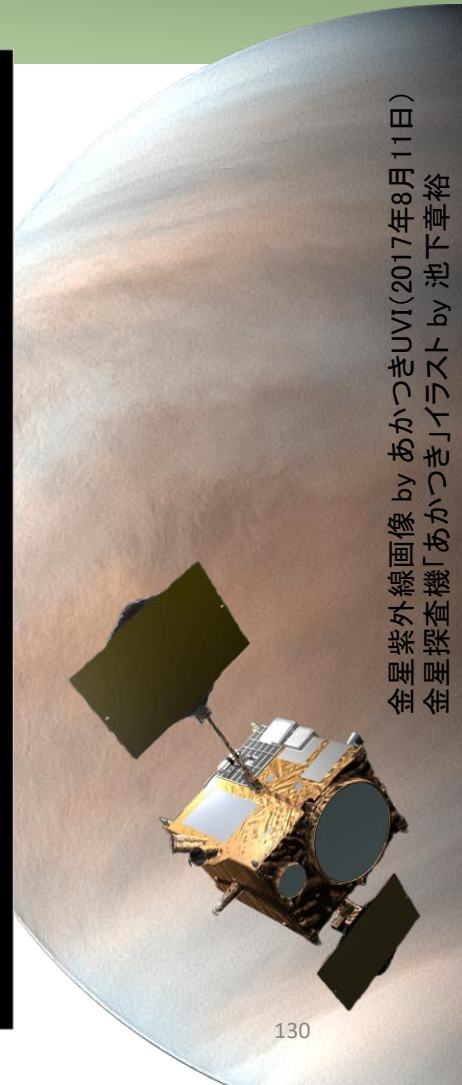
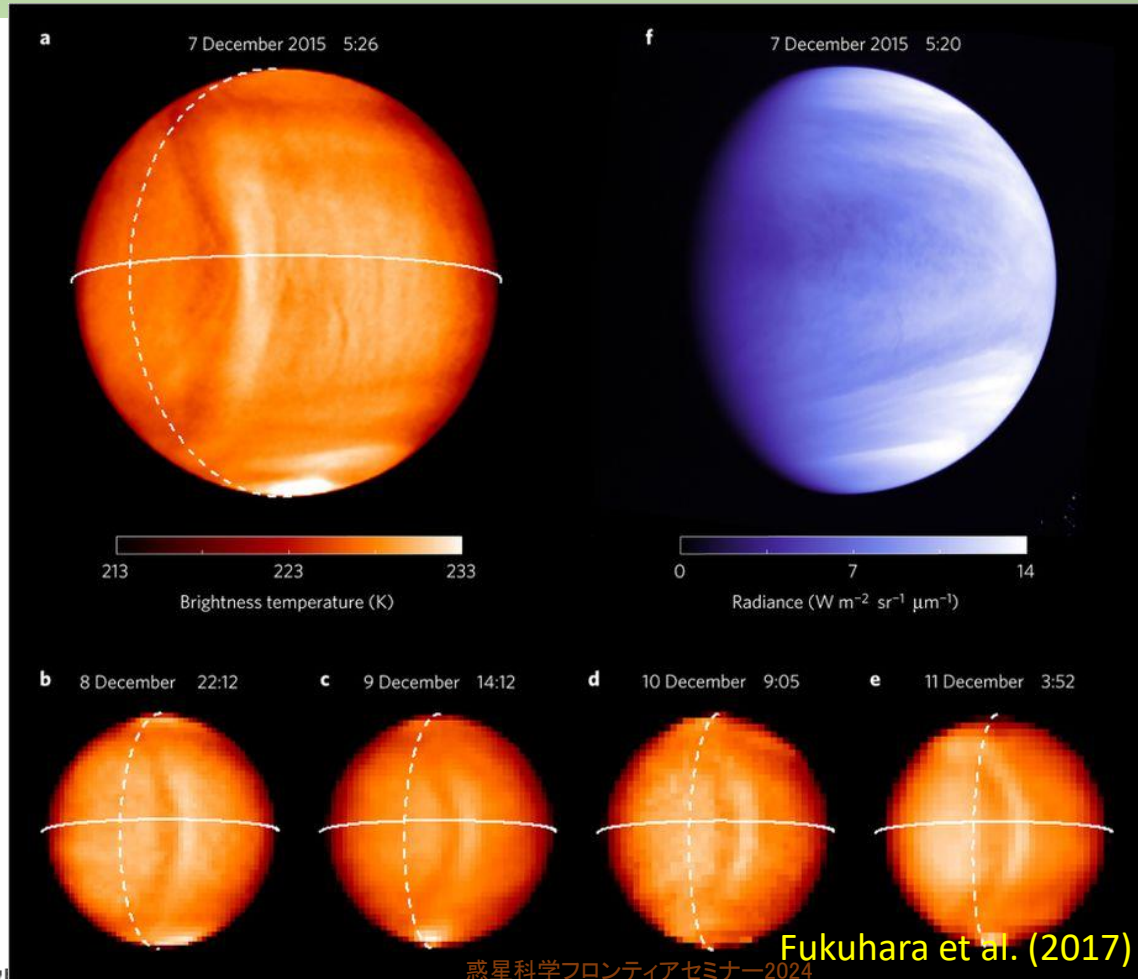
VExチームとあかつきチーム

- SWTの日本開催(2009年7月、ISASにて + 箱根エクスカーション)



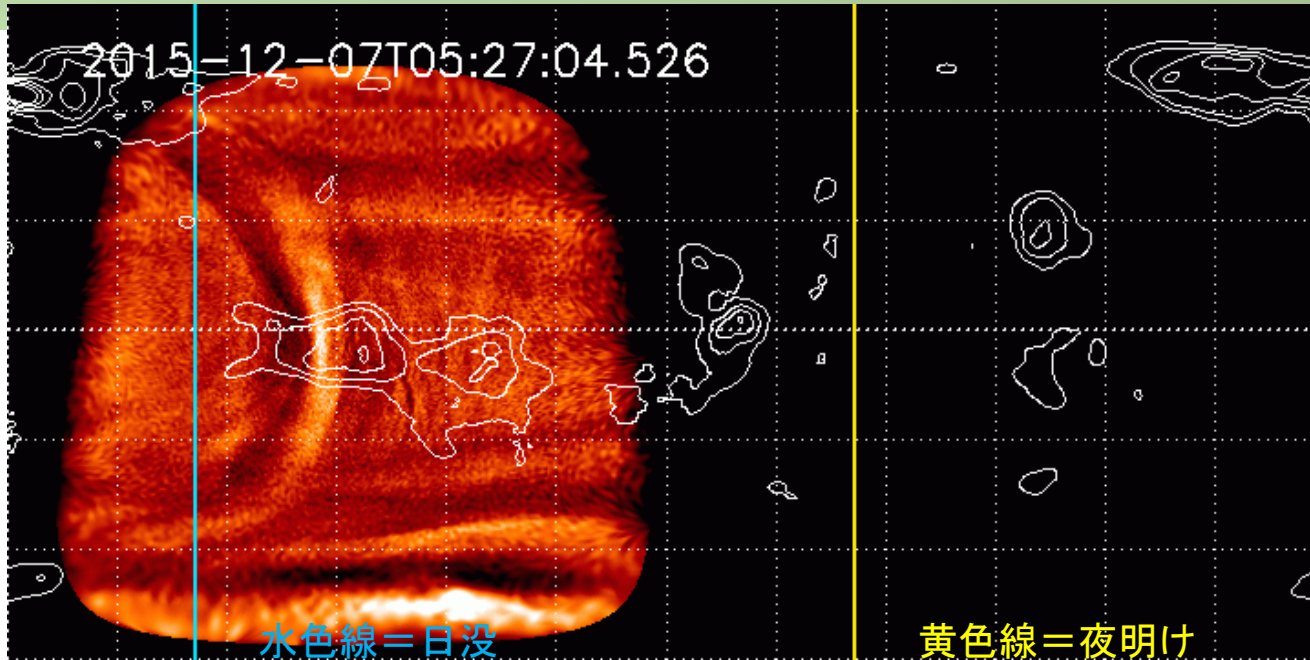
金星紫外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

VOI-R直後の「なんじゃこりゃ」



金星紫外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

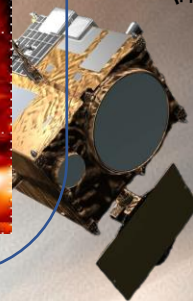
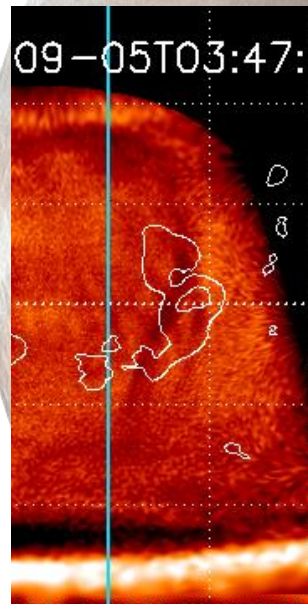
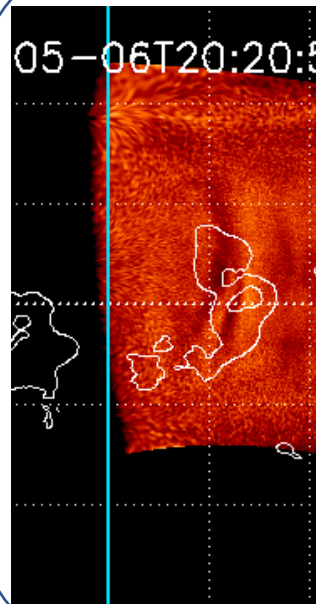
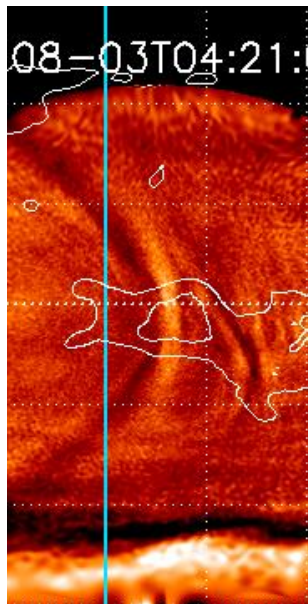
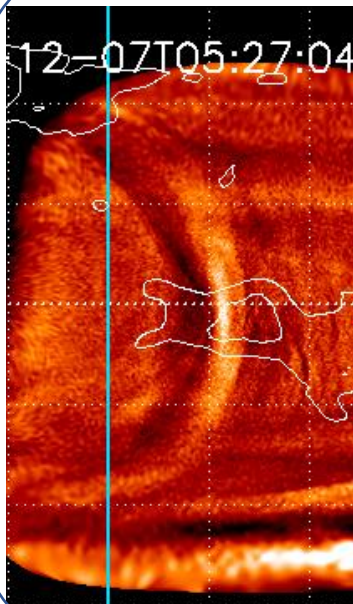
弓状構造の「根っこ」にあったもの



- 驚いたことに、弓状構造は地形（高地＝アフロディーテ）に固定されたものだった

日々の「再現性」

- 金星日(約115日)を周期に、繰り返し出現
 - 同じ場所、同じ地方時(おおむね午後から日没の時間帯)に、同じような形状で出現・発達

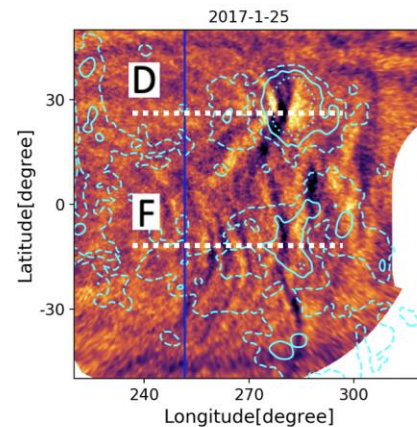
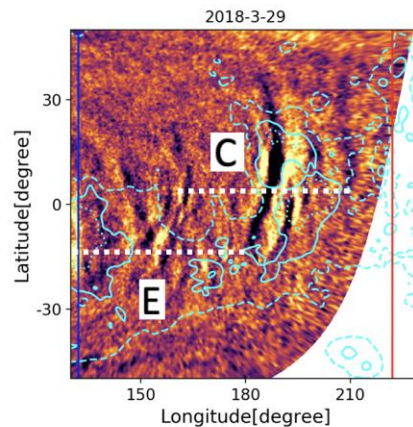
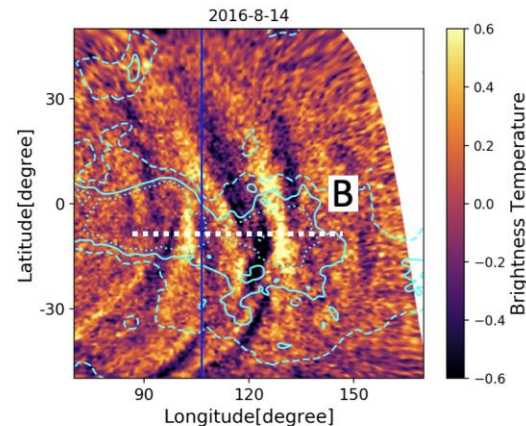
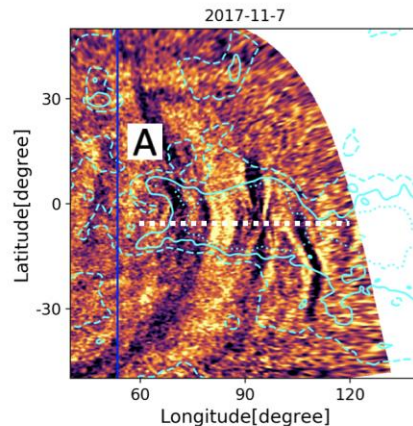
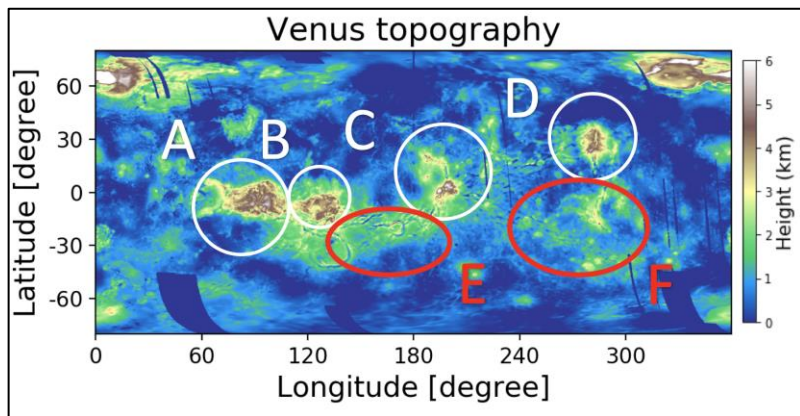


金星紫外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

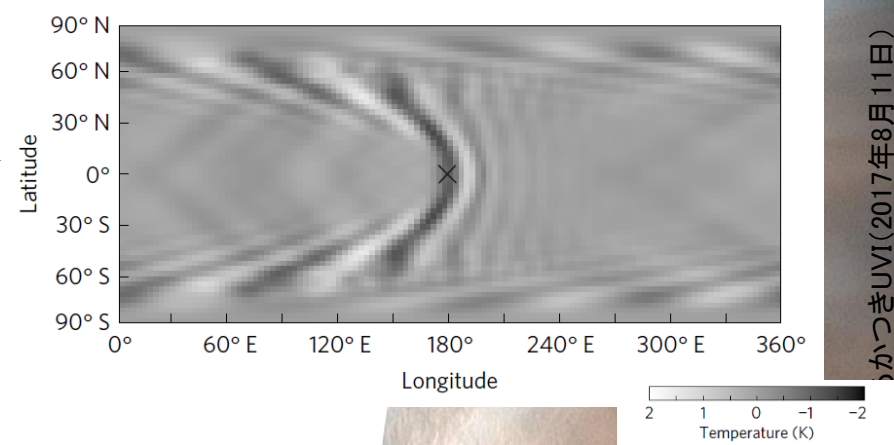
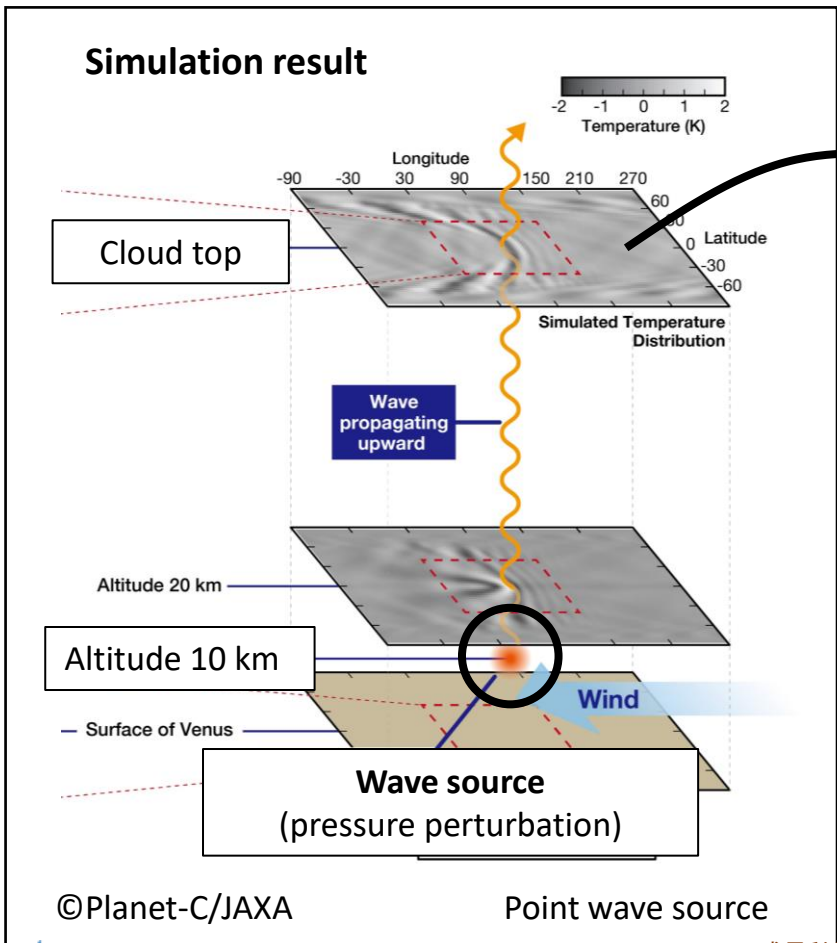
多くの高地の上で同じ現象が...

• 複数の画像を重ね合わせると

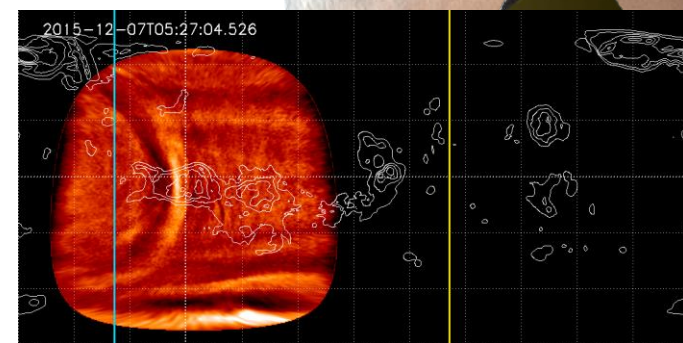
- ノイズが減って、微小な温度振幅の模様が見える
- 多くの高地の上に地形固定の模様が発生していると判明



「弓状構造」のシミュレーション



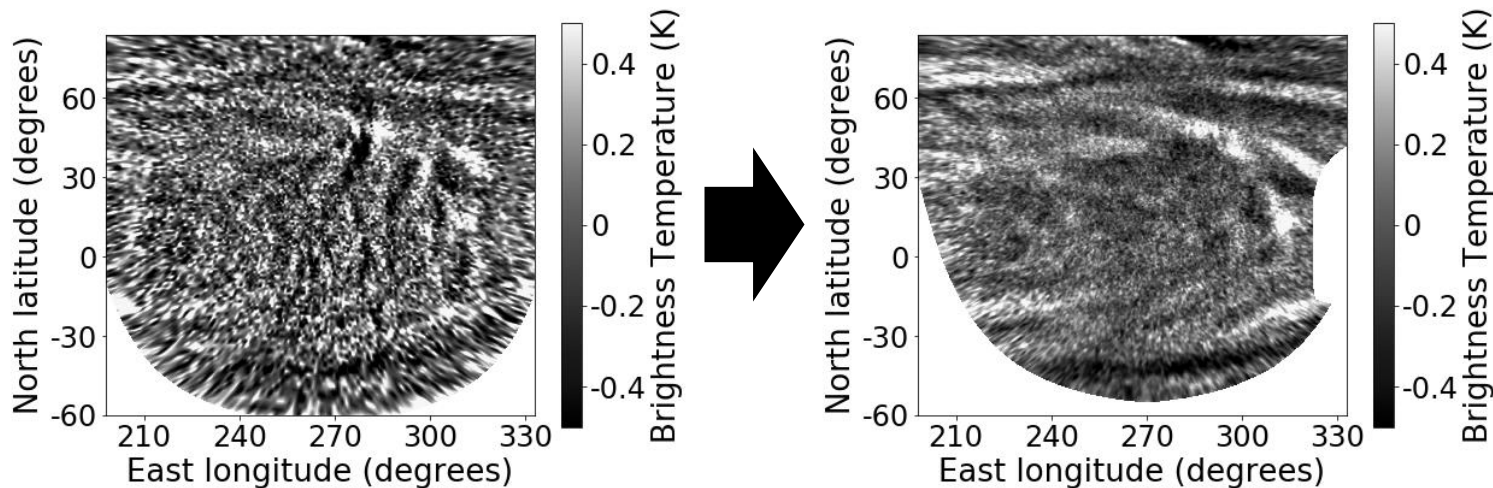
[Fukuhara et al., 2017]



金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕
金星外線画像
あかつきUVI(2017年8月11日)

地形に固定した模様だけでない

- 地面の起伏に固定した模様を「消し去る」
 - スーパーローテーションを仮定して、多数のLIR画像を重ねてゆくと…
 - たくさんの「微小な温度振幅の模様」がスーパーローテーションの速さで西向きに流れていることが浮き彫りに

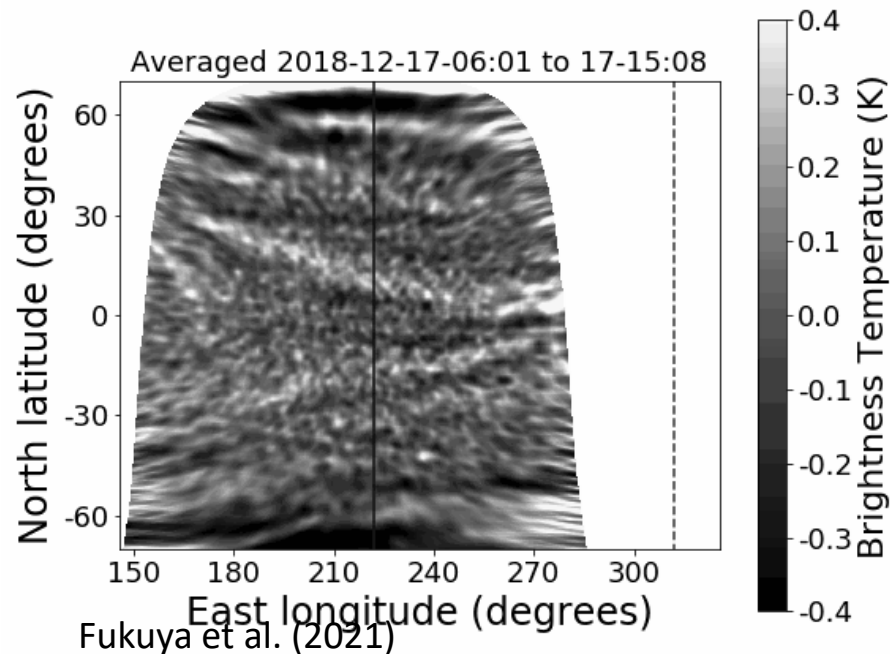
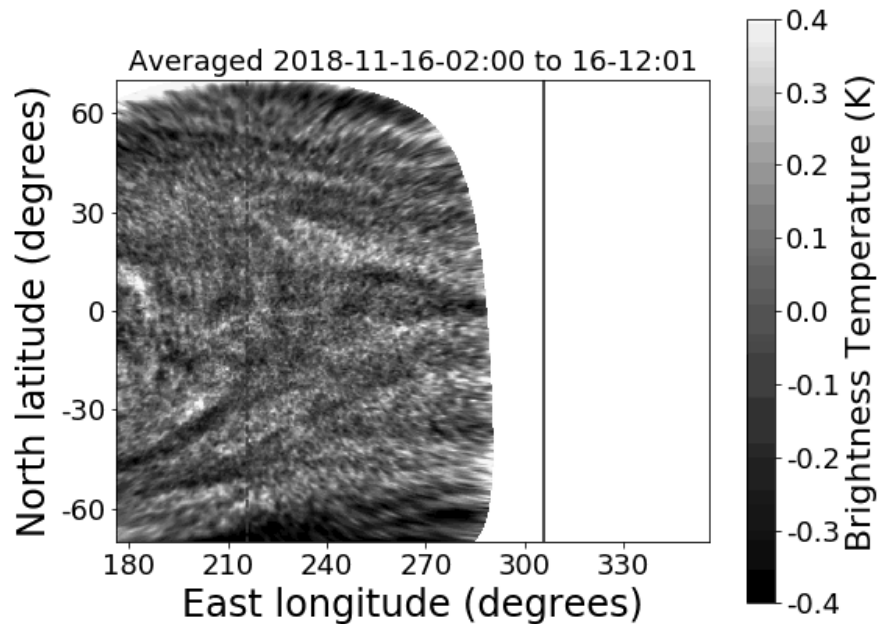


Fukuya et al. (2021)

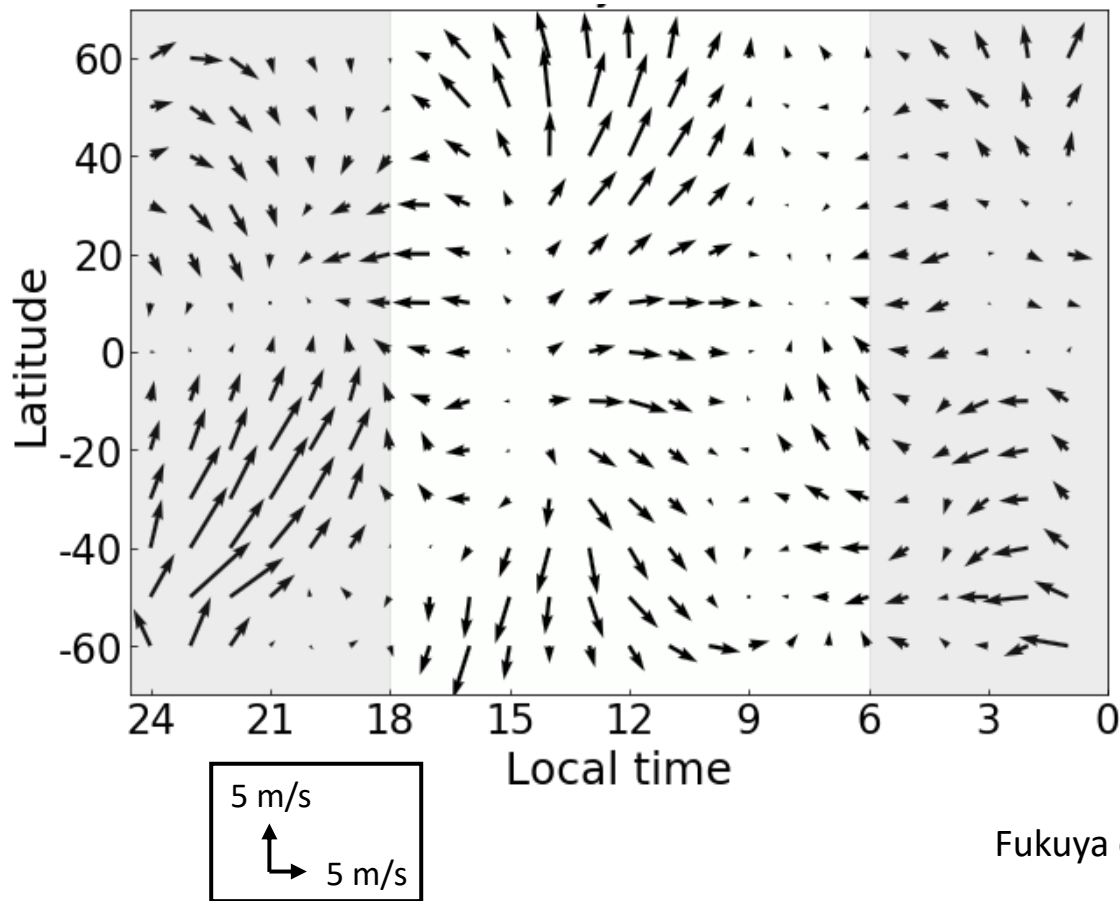
「発散」と「収束」が見えた

• 昼夜の違いを可視化

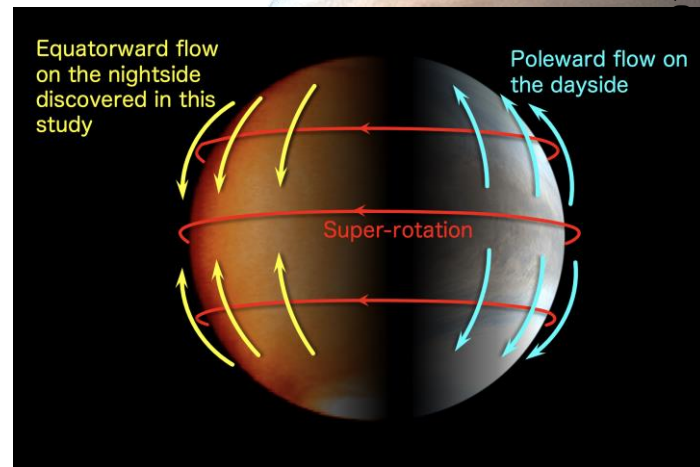
- 昼側：赤道から高緯度へ向かい「発散する」ような流れ
- 夜側：高緯度から赤道へ向かい「収束する」ような流れ



昼夜の違いを初めて明らかに

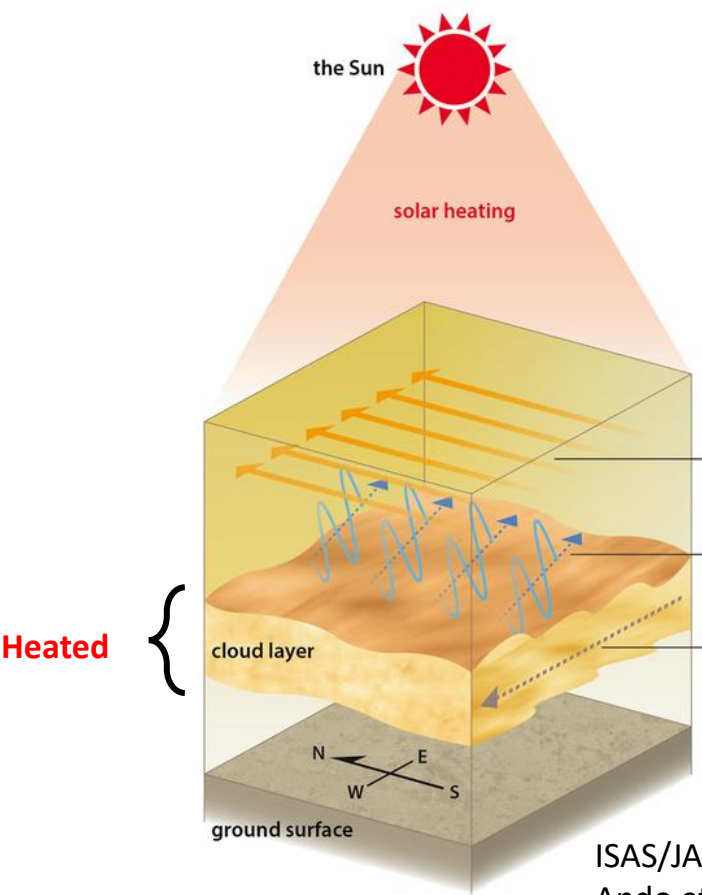


Fukuya et al. (2021)



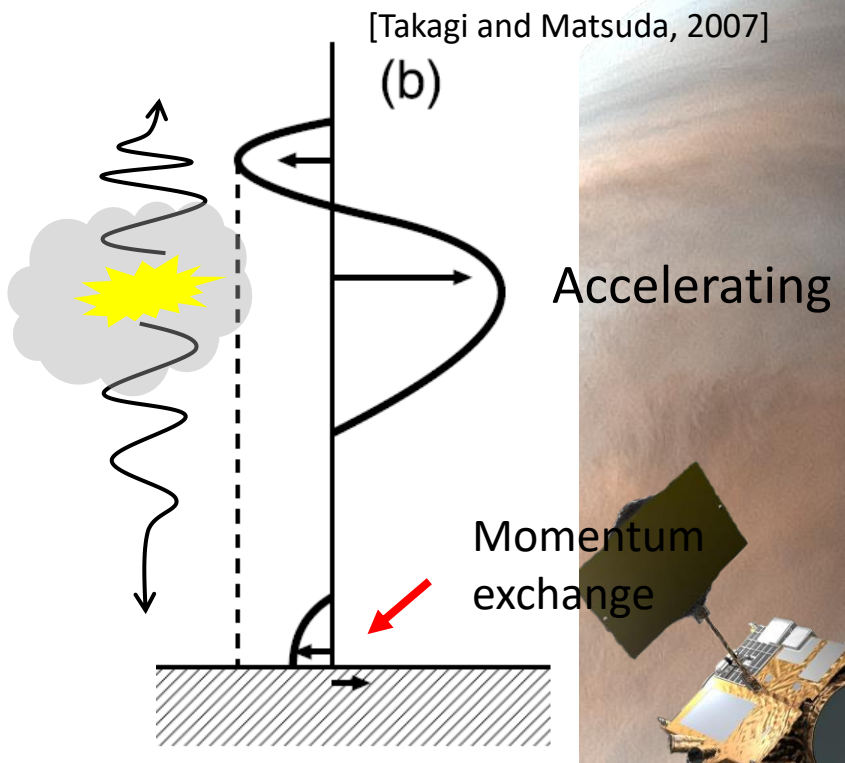


Planetary scale waves: Thermal tides



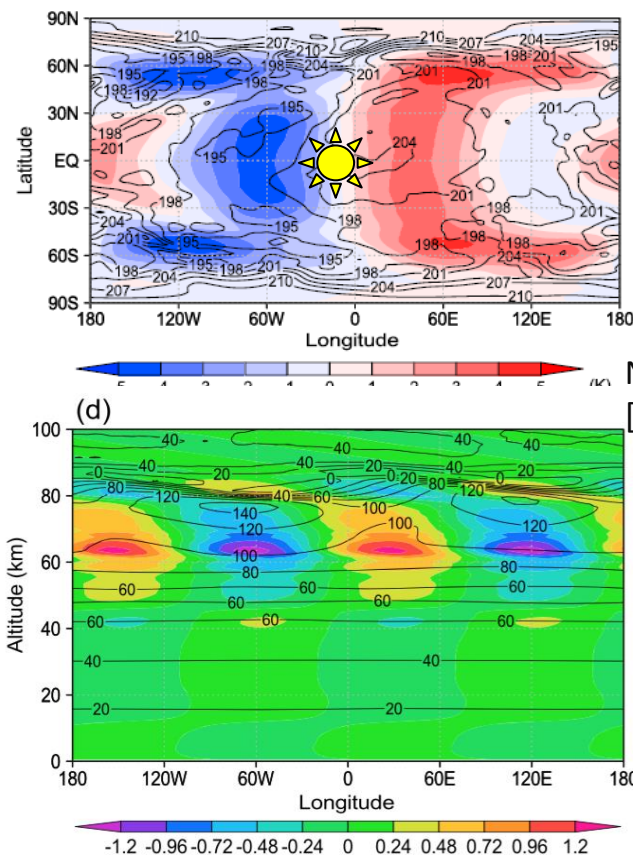
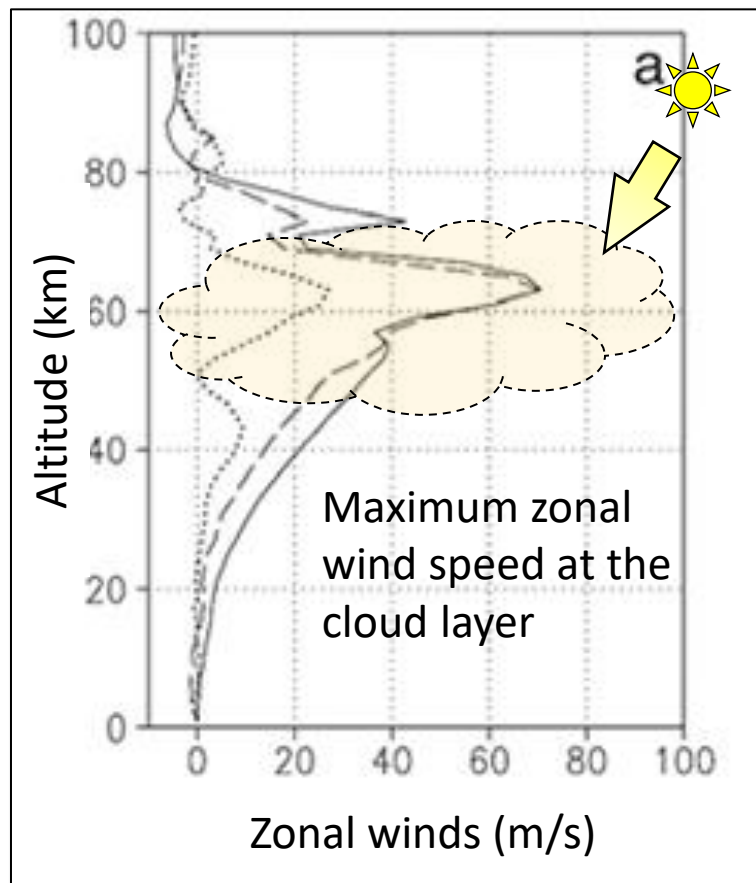
60-70 % of input solar energy absorbed

ISAS/JAXA
Ando et al., 2016

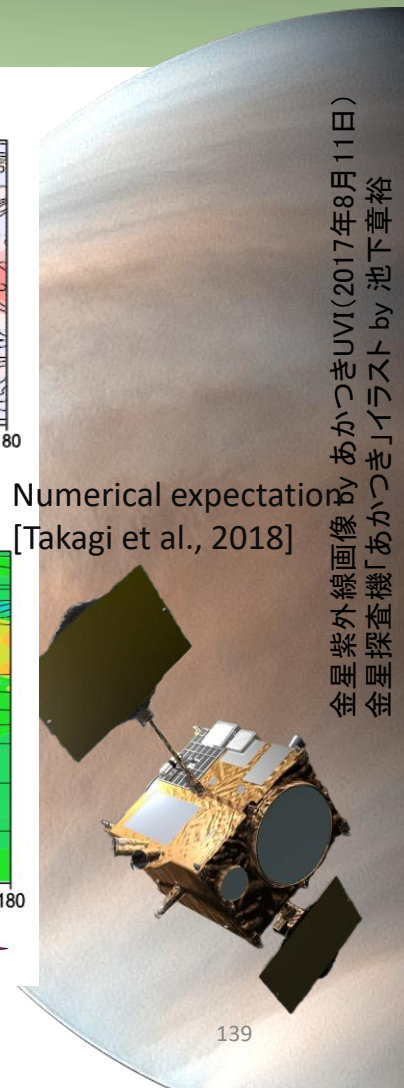


Thermal tides may maintain the super-rotation of Venus atmosphere

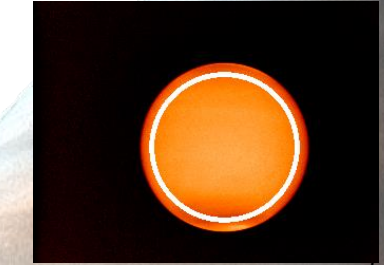
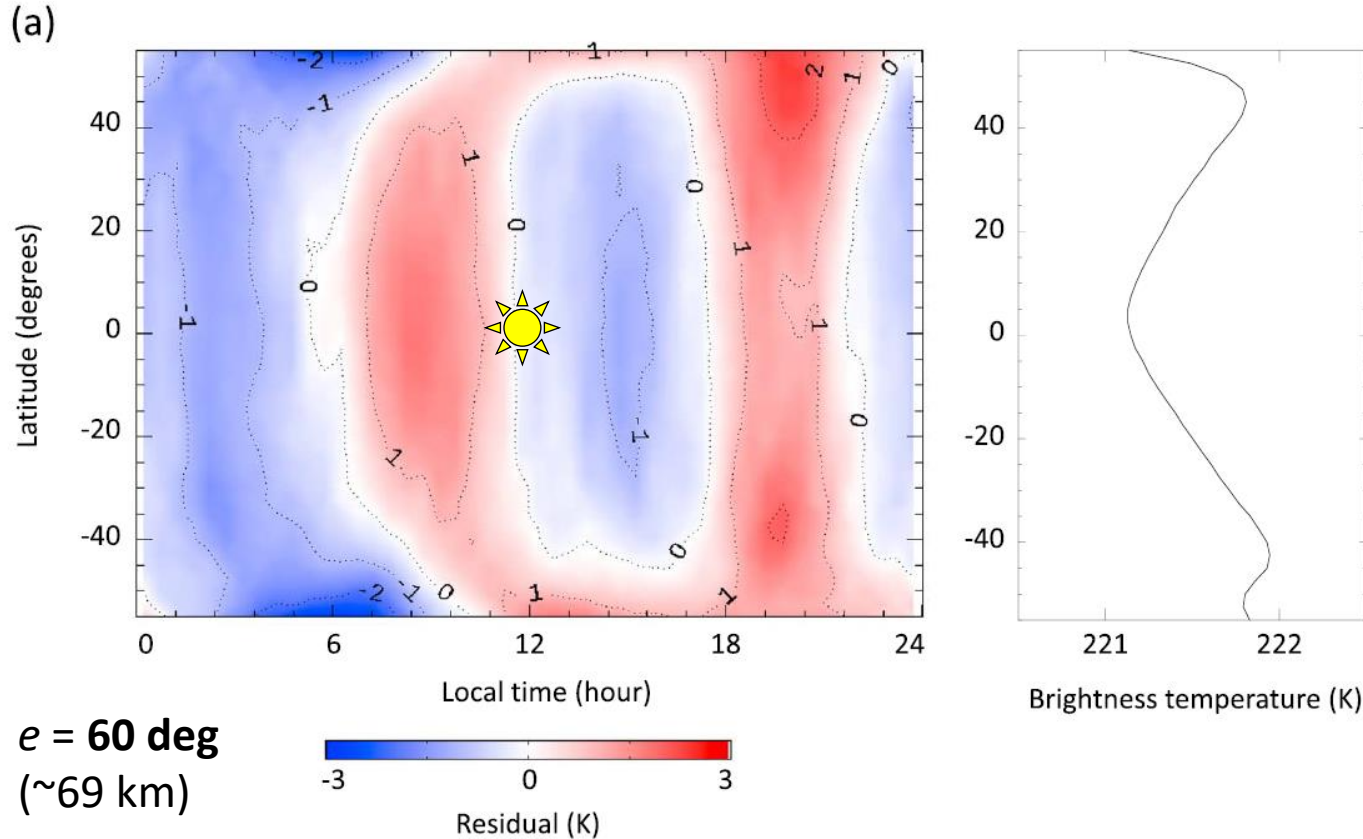
Planetary scale waves: Thermal tides



Numerical expectation
[Takagi et al., 2018]



Global Structure of Thermal Tides from Observations



Time-averaged thermal tide structure over three Venusian years by LIR

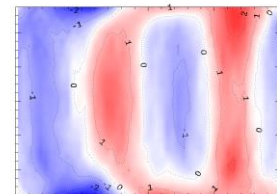
First observational result of revealing the global structure of thermal tides at the cloud top

[Kouyama et al., 2019]

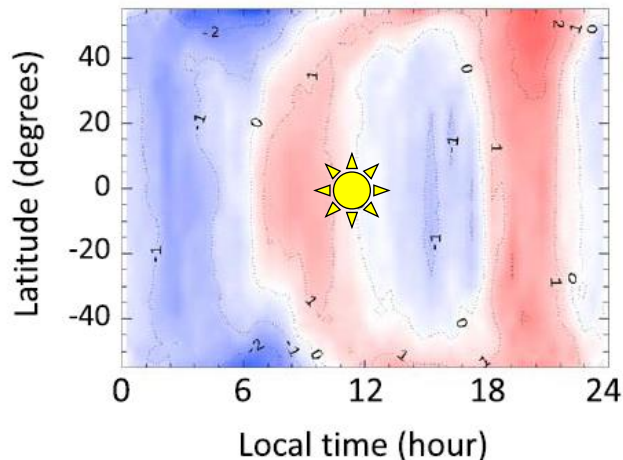
Global Structure of Thermal Tides from Observations

Time series of thermal tides (one Venus year)

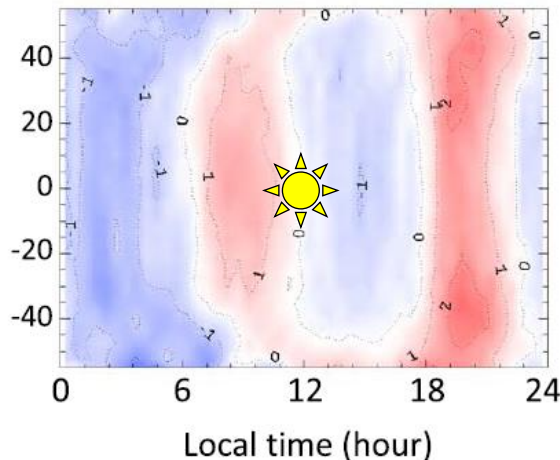
Whole period



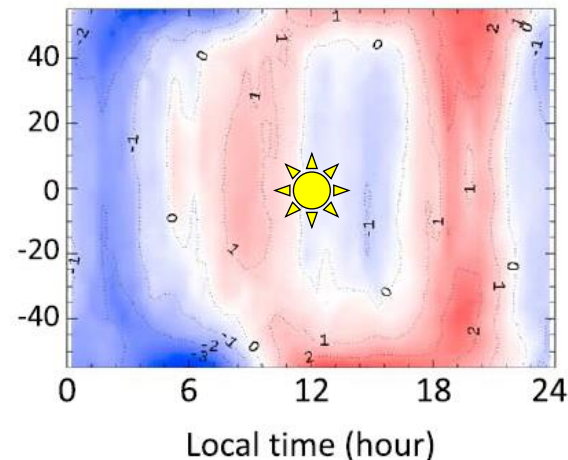
(b) 2016.10.02 – 2017.05.26



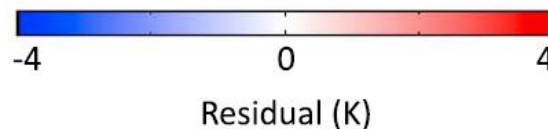
(c) 2017.05.27 – 2018.01.31



(d) 2018.02.03 – 2018.10.02



$e = 60 \text{ deg}$
(~69 km)

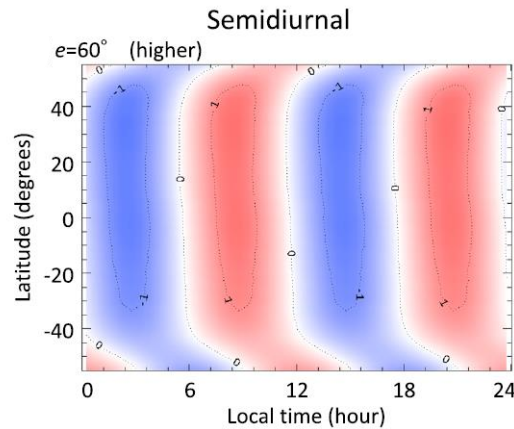


Similarity, and
variabilities?

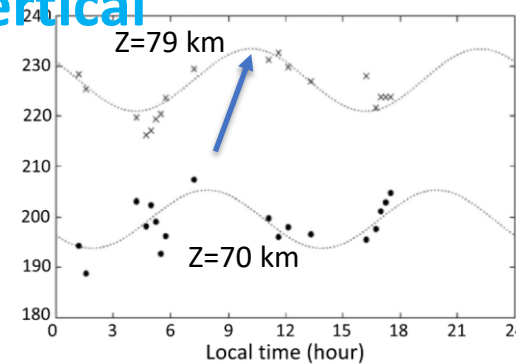
Thermal Tides seen by LIR & RS

Three-dimensional structure of each tidal component is now revealed

horizontal



vertical



Good example of achievement of Akatsuki's 3D observation strategy

- Phase variation with altitudes = evidence of vertical propagation
- Physical parameters (e.g. latitudinal extent, vertical wavelength, phase, etc..) of the tides were **quantitatively** determined.

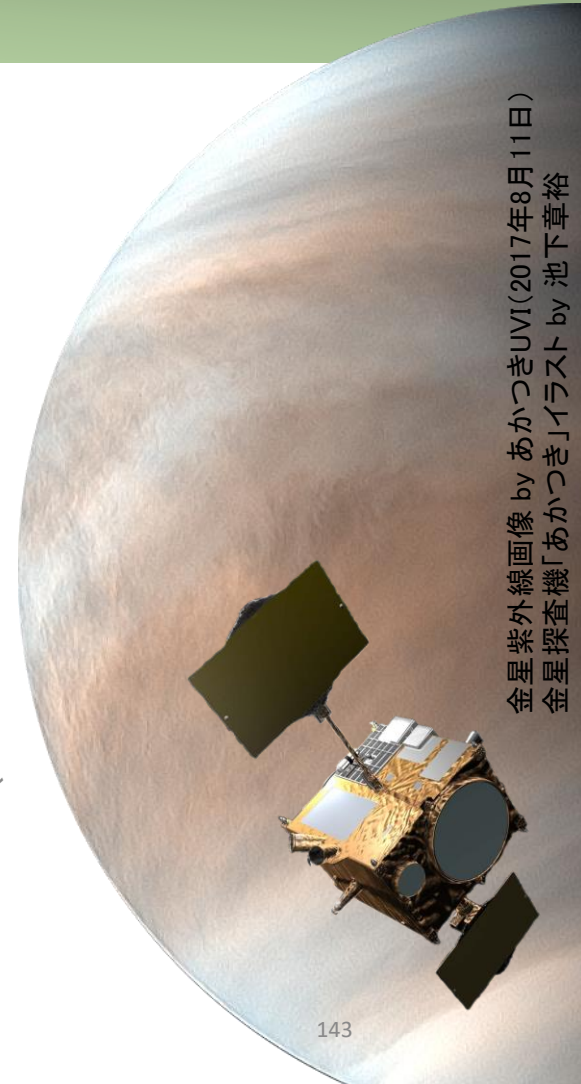
=> Important information for future numerical studies

惑星科学フロンティアセミナー2024

(2024年9月16~19日@新篠津温泉たつぷの湯)

スーパーローテーションの メカニズムを解明

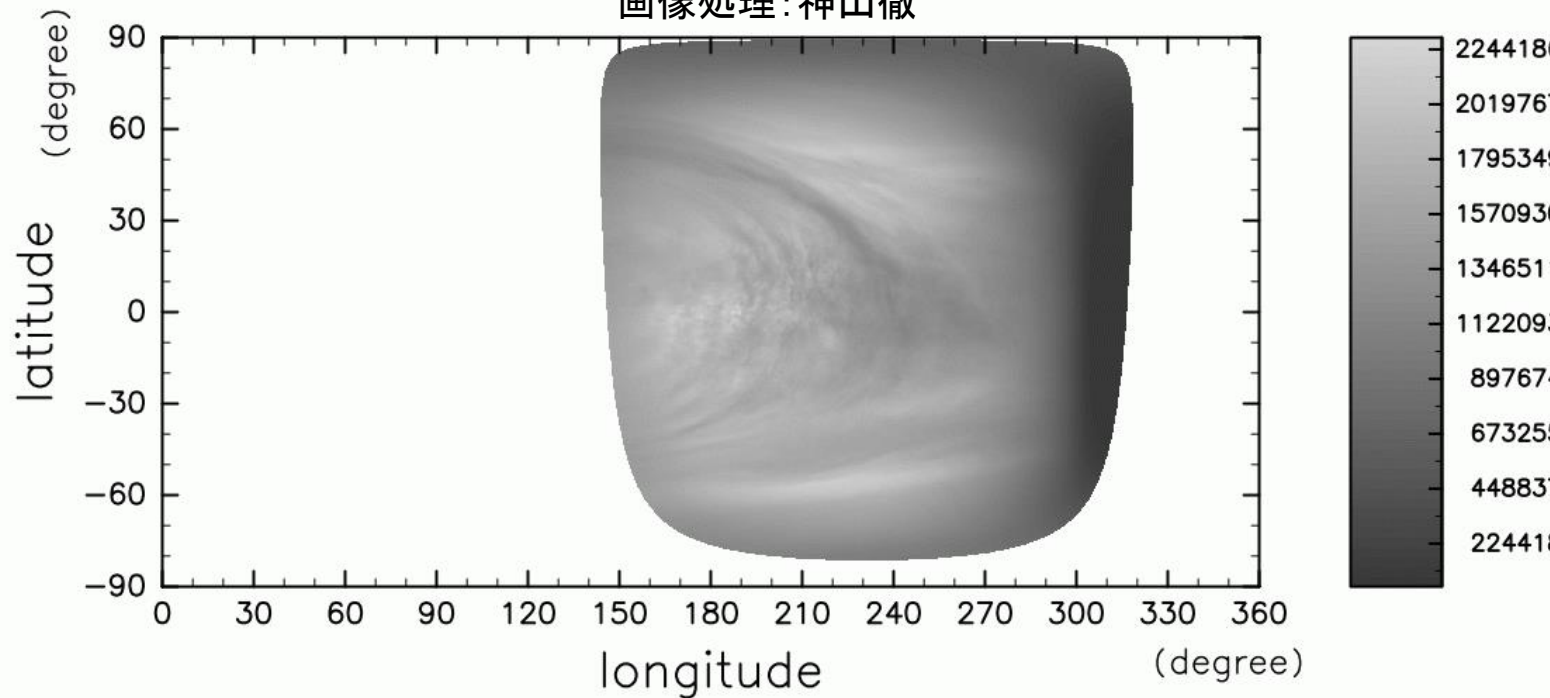
赤道から中緯度までの範囲では、スーパーローテーションは熱潮汐により維持されていることを明らかにしました。



2018年冬連続雲追跡キャンペーン

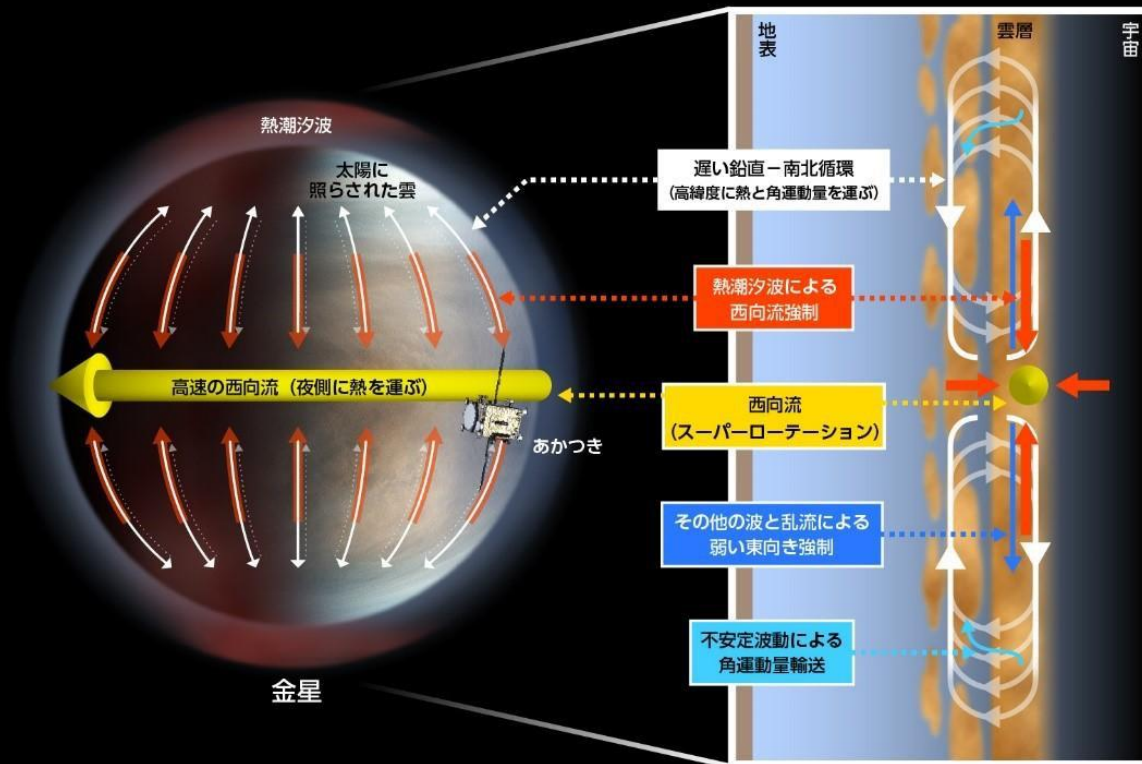
uvi_20181116_030446_365_13b_v00.nc

画像処理: 神山徹



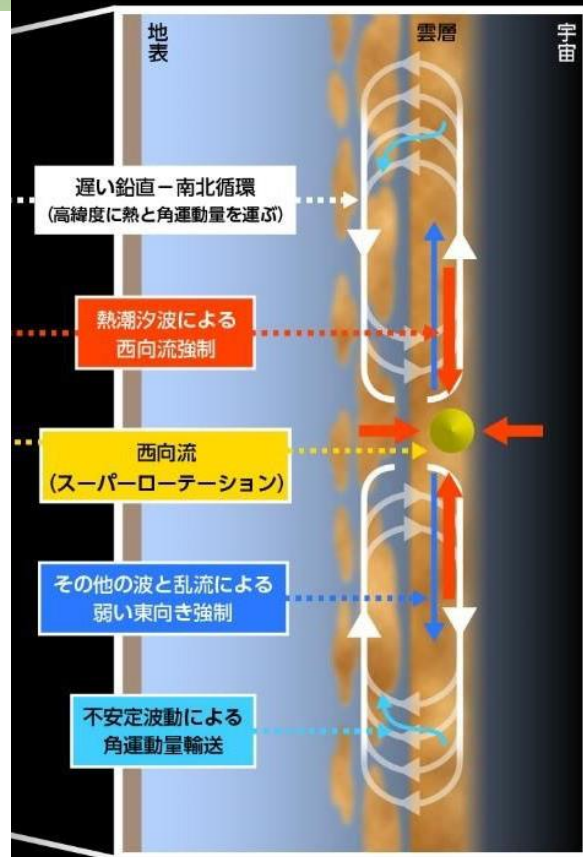
金星紫外線画像 by あかつきUVI(2017年8月11日)
金星探査機「あかつき」イラスト by 池下章裕

熱と角運動量の流れを追って



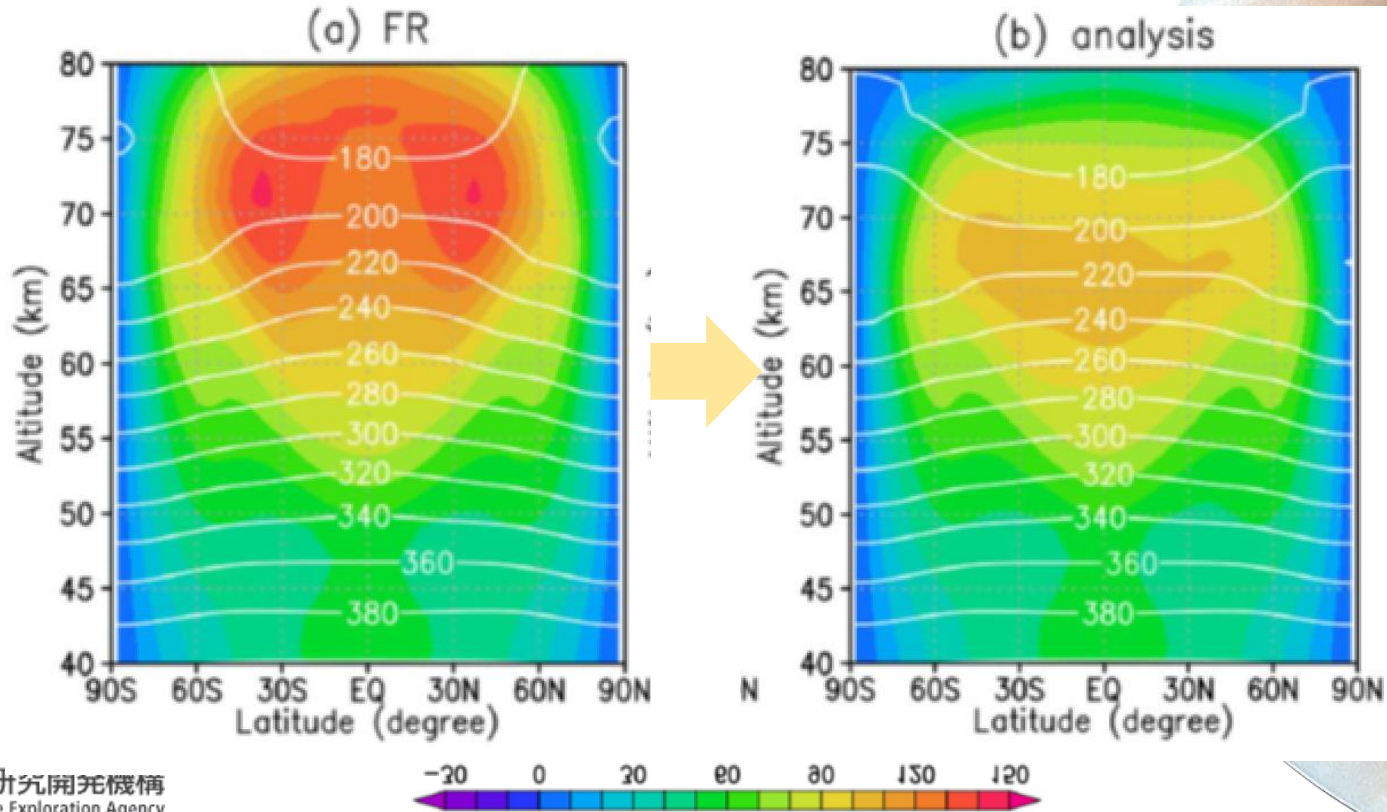
熱潮汐波が主役

- 白い矢印：大気の循環で熱が赤道から極へ運ばれます。このままだと、赤道は角運動量を失ってしまいます。
- 赤い矢印：熱潮汐波によって西向きの流れが強制され、スーパーローテーションを維持します。
- 黄色い矢印：スーパーローテーションは熱を夜側へ運んで、金星全体に熱を効率的に行き渡らせているのです。



データ同化で数値モデルが進化

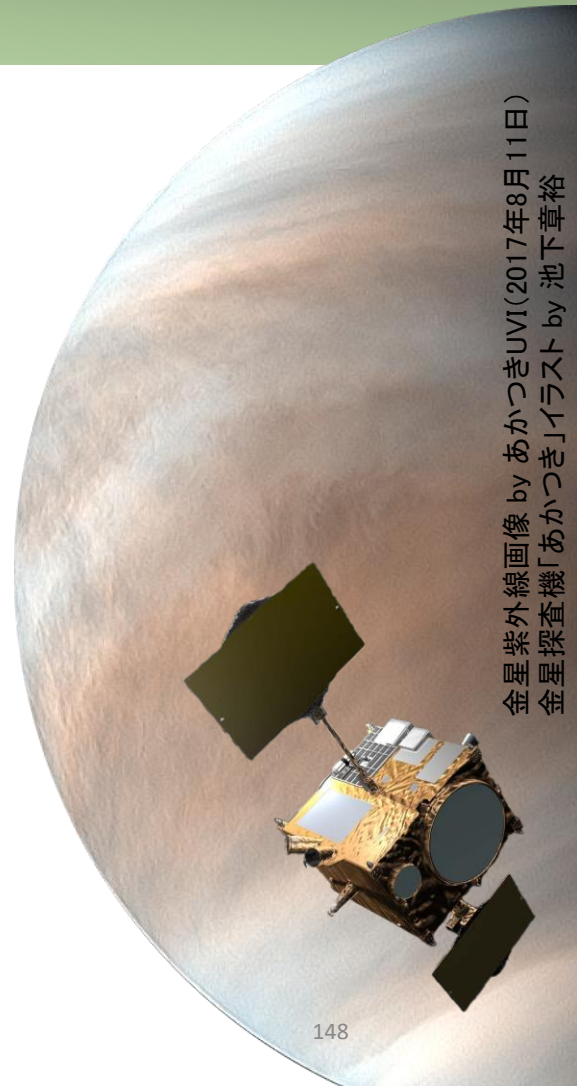
- UVIによる雲頂風速データを同化することで、東西風速構造が広い高度範囲にわたり大きく改善(左→右)。金星大気運動の詳細構造を議論できるように。





金星の長期気候変動

「あかつき」UVI観測と、Venus Express観測を時系列に並べると、長期の気候変動の可能性が見えてきました。



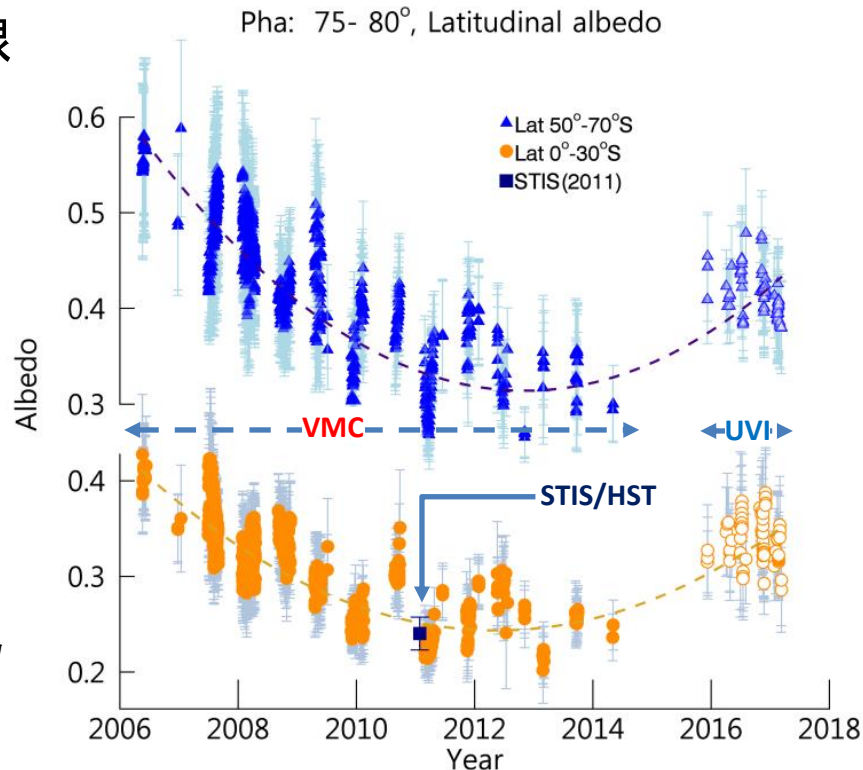
アルベド(反射率)のダウンとアップ

• 複数ミッションの紫外線観測を組合せ

- Venus Express VMCカメラ
- 「あかつき」 UVIカメラ
- ハッブル宇宙望遠鏡 STIS観測装置

• 2006年から2017年をカバー

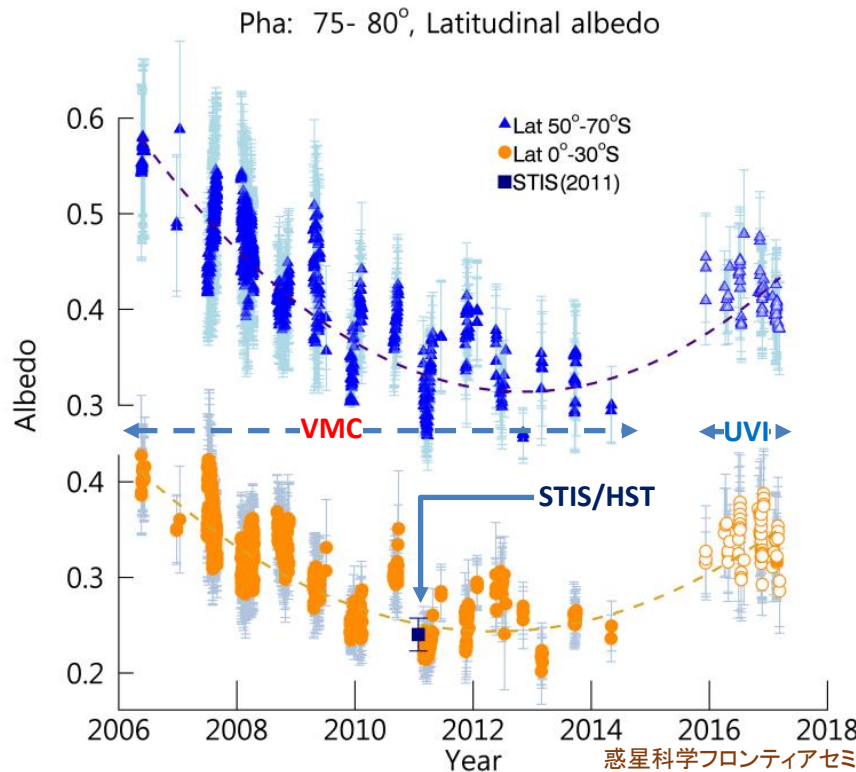
- アルベドのダウンとアップがはっきり見えます。



Lee et al. (2019)

スーパーローテーションも変動？

- アルベド変化が風速の変動を引き起こしているのでしょうか？



Lee et al. (2019)

