



金星探査機「あかつき」の 金星周回軌道投入及び観測計画について

平成27(2015)年11月9日

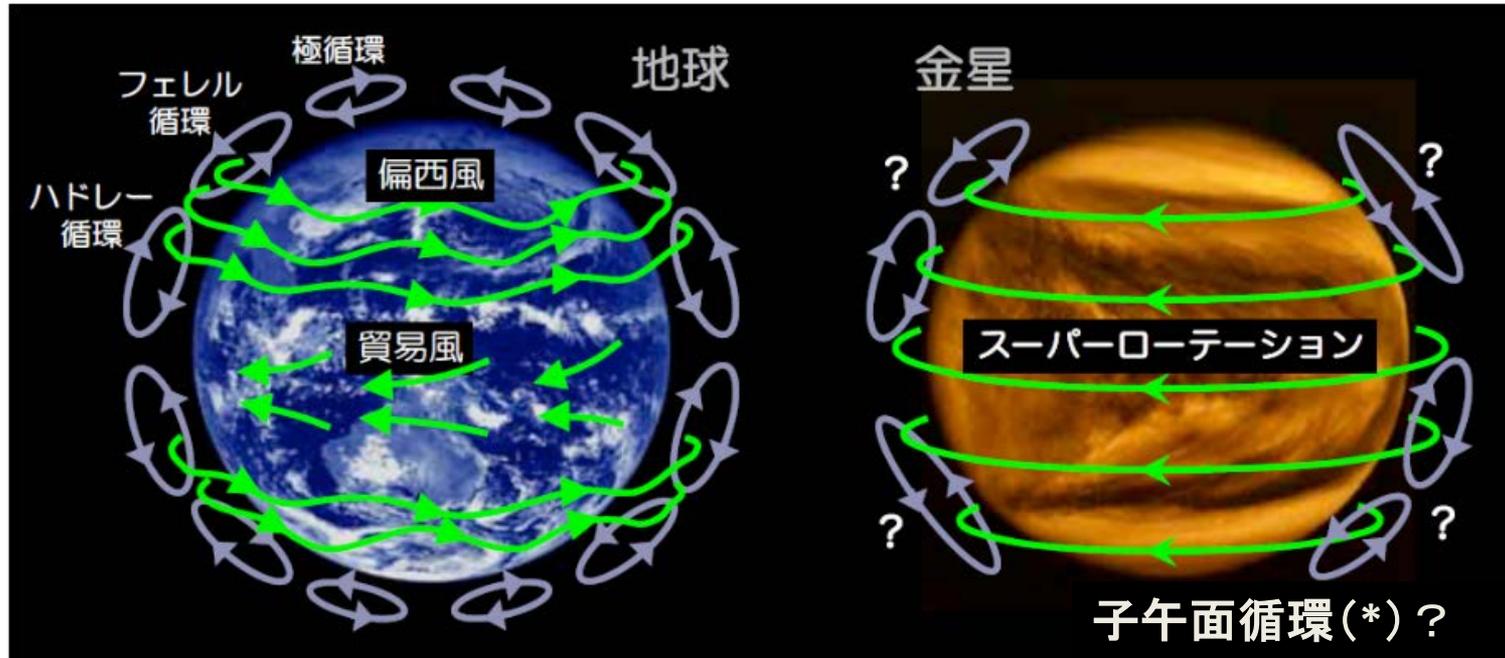
宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所 「あかつき」プロジェクトチーム

説明概要

- 金星探査機「あかつき」は、2015年12月7日(日本標準時)に、金星周回軌道への投入を試みる。
- 「あかつき」は、2010年12月7日に金星周回軌道投入を試みたが、主エンジンの不具合により失敗した。現在は、太陽を周回する軌道を飛行している。
- 今回の投入時は、不具合のある主エンジンは使用せず、姿勢制御用エンジン4基を使用して、打上げ当初の計画より遠金点高度の高い楕円軌道に投入する。
- ミッションの目的は、金星の大気の運動をグローバルに観測し、大気循環メカニズムを解明することである。

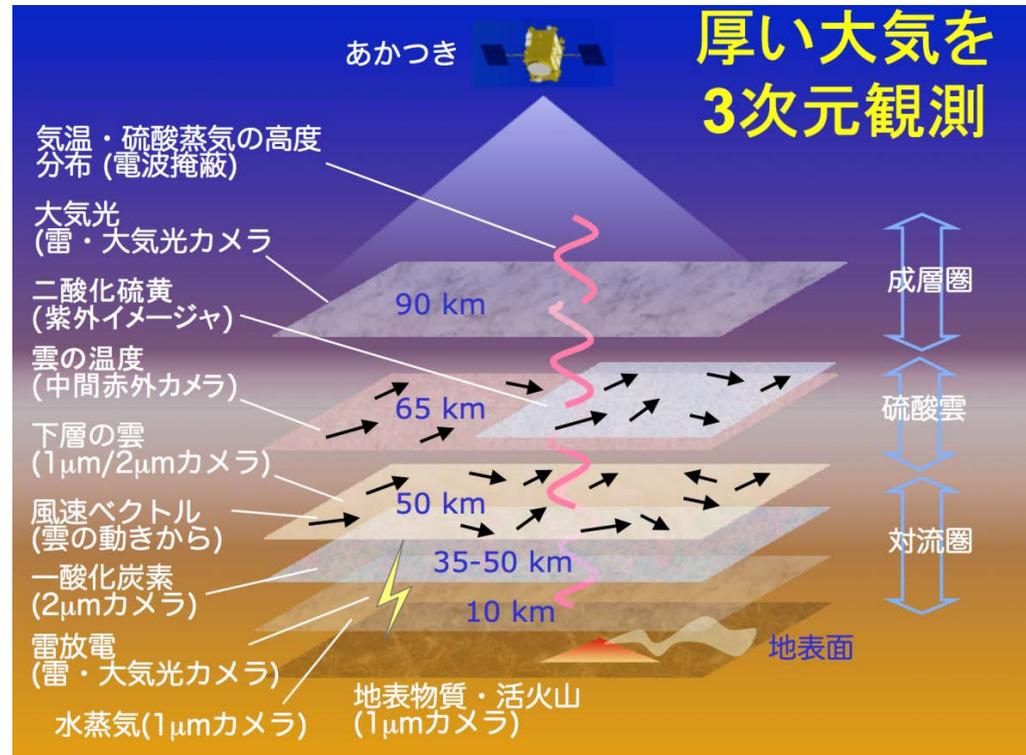
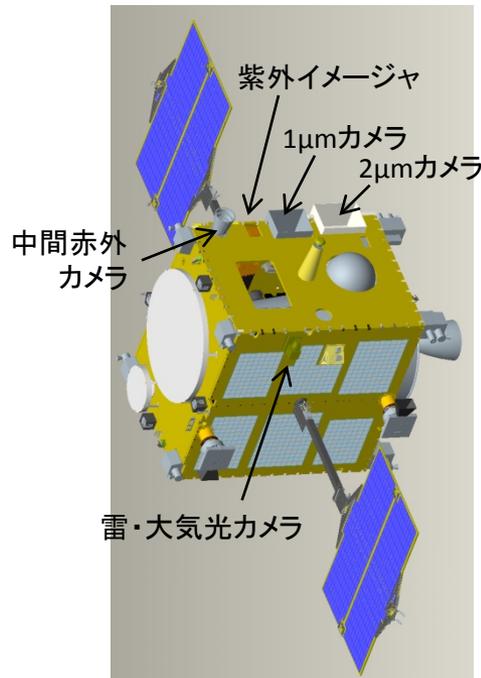
ミッションの目的



- 大きさがほぼ等しく、太陽からの熱入力も大差ない地球と金星。
- しかし、気象は大きく異なる。例えば、「スーパーローテーション」と呼ばれる金星大気上層の高速風(秒速約100m)。自転周期約243日の金星を4地球日で一周する強風(自転速度の60倍速)が吹いている。
- 2つの惑星での気象の違いが何故生じるのか？これを解明したい。
(*) 子午面循環: 南北方向の大きな大気の循環

ミッションの目的

厚い金星大気の運動を3次元的に調べることで、金星気候を支配するメカニズムを明らかにし、地球の気候と比較する。



- 高速大気大循環「スーパーローテーション」はなぜ起こるのか？
- 子午面循環は、金星気候にどのような影響を与えているか？
- 全球を隙間無く覆う雲は、どのようなメカニズムで作られるのか？
- 氷晶の生じない大気にも雷は起こるか？
- 活火山はあるか？

これまでの主要イベント

年	月	日	イベント
2010年	5月	21日	打上げ(H-IIAロケット17号機)
2010年	12月	7日	金星周回軌道投入 VOI-1
2011年	11月	1日	軌道制御 DV1
		10日	軌道制御 DV2
		21日	軌道制御 DV3
2015年	7月	17日	軌道制御 DV4-1
		24日	軌道制御 DV4-2
		31日	軌道制御 DV4-3
	8月	30日	第9回(最後)近日点
	9月～12月		必要に応じ、軌道を修正
	12月	6日	姿勢変更
		7日	金星周回軌道投入 VOI-R1

あかつきの主要イベント

※ VOI: Venus Orbit Insertion ※DV:Delta Velocity

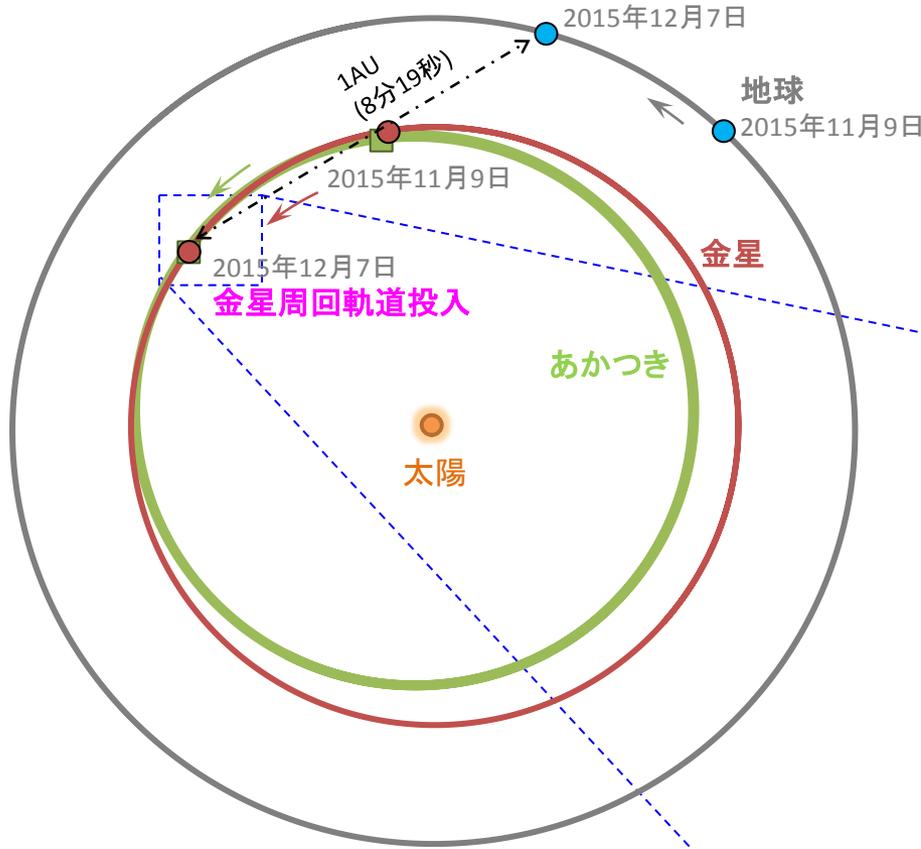
- 「あかつき」は、2010年5月21日に打ち上げられた。
- 2010年12月7日に金星周回軌道投入を試みたが、主エンジンの不具合により噴射開始2分38秒後に噴射停止(計画は12分)。太陽を周回する軌道を飛行している。
- 金星との会合を2015年冬とするため、2011年11月に軌道制御を3回実施した(DV1、DV2、DV3)。
- 金星周回軌道投入後の観測軌道を有利にするため、2015年7月に3回の軌道制御を実施した(DV4-1、DV4-2、DV4-3)。
- 2015年8月に最後(第9回目)の近日点を通過し、現在、探査機の状態は健全である(主エンジンを除く)。
- 2015年12月7日に金星周回軌道投入(VOI-R1)を予定している。

12月7日の予定

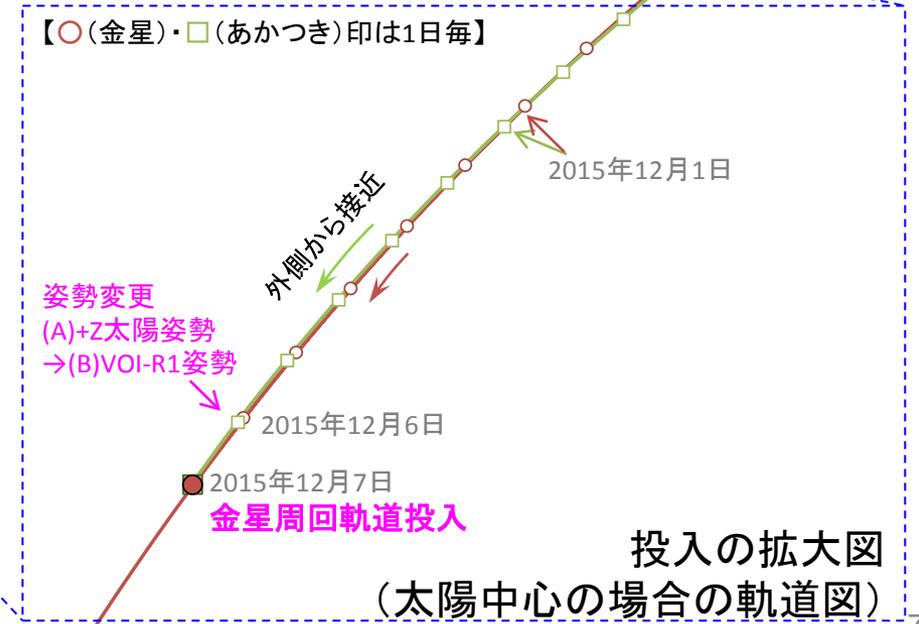
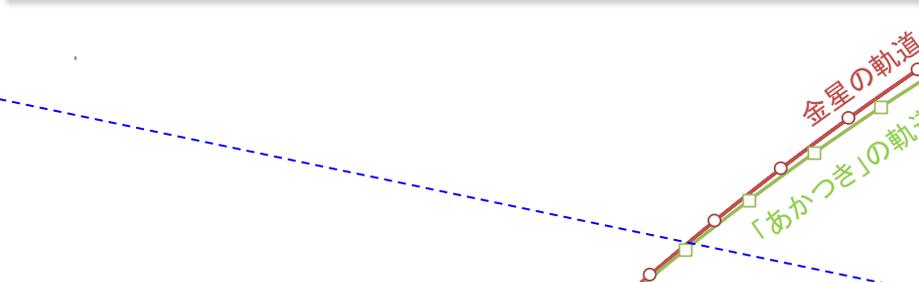
日付	時刻目安 (JST)	イベント
12月6日	日中	姿勢変更
7日	04:30	臼田局可視開始
	08:22	日陰通過開始(金星の影に入る)
	08:51	
	～	金星周回軌道投入のため姿勢制御用エンジン噴射、データ受信と確認作業など
	11:30	
	12:00	姿勢制御用エンジン噴射結果について記者説明会実施※
	午後	キャンベラ局移行
	午後	姿勢変更

※説明会メイン会場はJAXA相模原キャンパス研究・管理棟2F会議場を予定。
 この時点では姿勢制御用エンジンの噴射結果しか分からない。
 金星周回軌道投入に成功したかは12月7日～9日にかけて確認を実施。
 確認結果は12月9日18時に改めて記者説明会を実施して説明予定。

金星周回軌道投入時の軌道図(太陽中心)



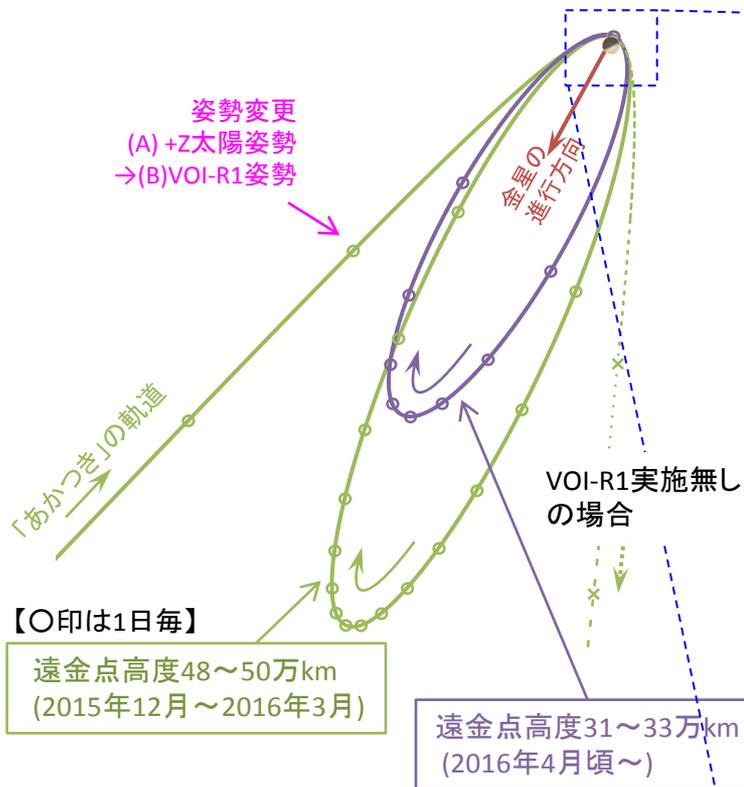
1. 現在、あかつきは金星の前方を飛行している。
2. 2015年12月1日頃から、あかつきは金星軌道より外側を飛行する。このため、この間にはあかつきの飛行速度が金星より遅くなり、金星は少しずつあかつきに追いつく(近付く)。
3. 2015年12月7日に、金星があかつきに追いつき、追い越された瞬間に減速制御を行い、金星周回軌道に投入する。



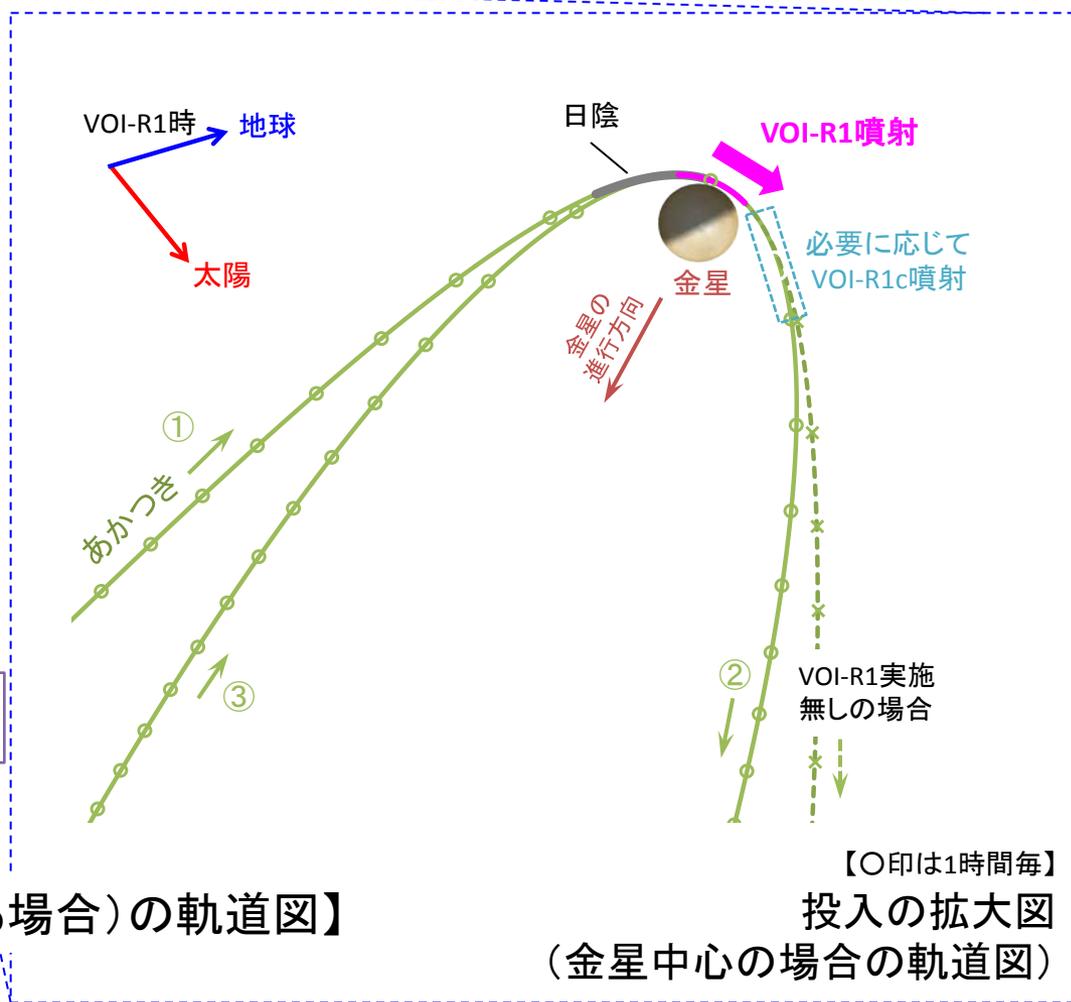
【太陽中心の軌道図】

金星周回軌道投入時の軌道図(金星中心)

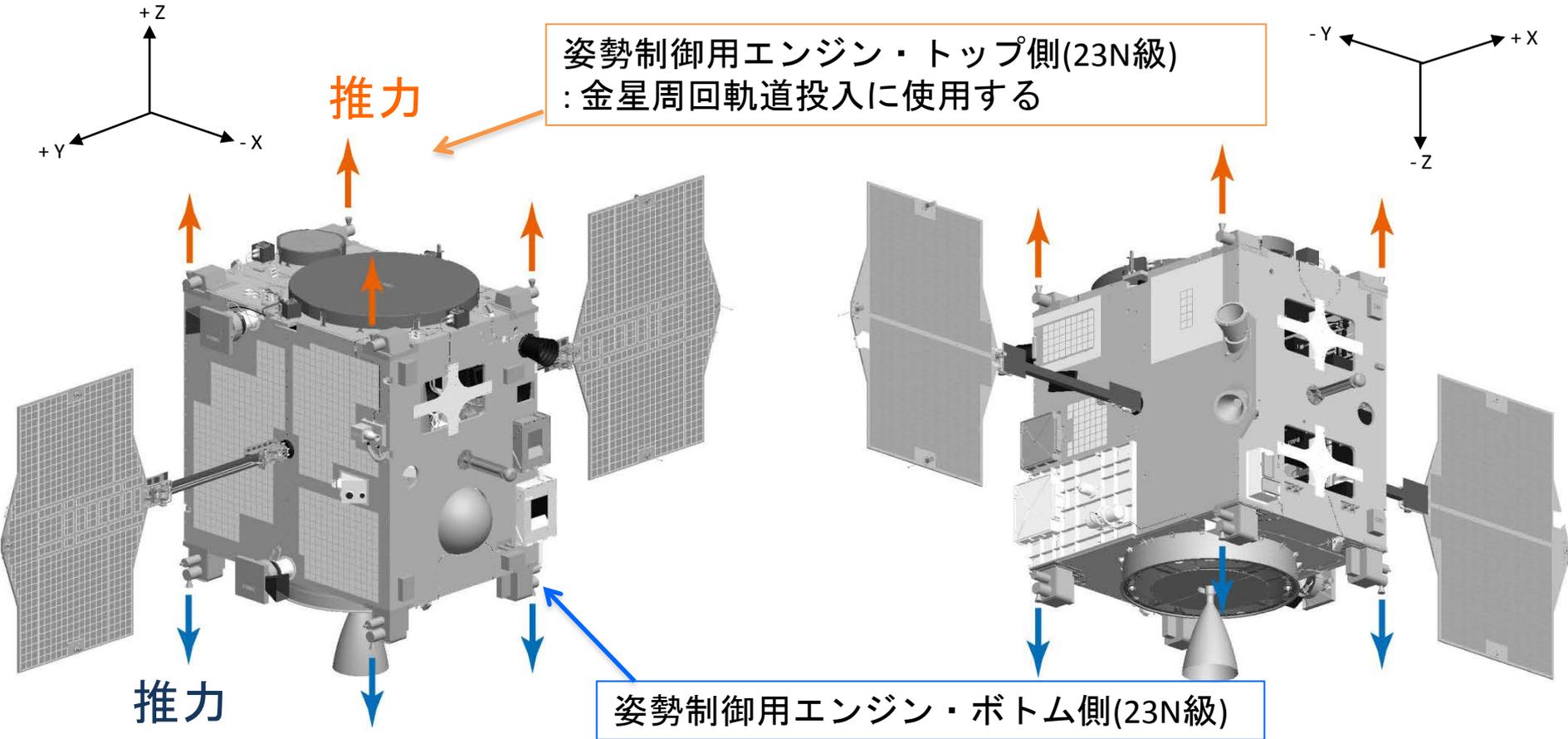
1. 現在、あかつきは、金星の前方を飛行している。
2. 2015年12月1日頃から、あかつきは、金星軌道より外側を飛行する。このため、この間はあかつきの飛行速度が金星より遅くなり、金星から見ると、あかつきは、金星の前方右側から少しずつ金星に近づく。
3. 2015年12月7日に、金星があかつきに追いつき、追い越された瞬間は、あかつきは金星の進行方向後ろ側を通過している。後ろ側を通過する約20分間に減速制御を行い、あかつきを金星周回軌道に投入する。



【金星中心(金星からあかつきを見る場合)の軌道図】

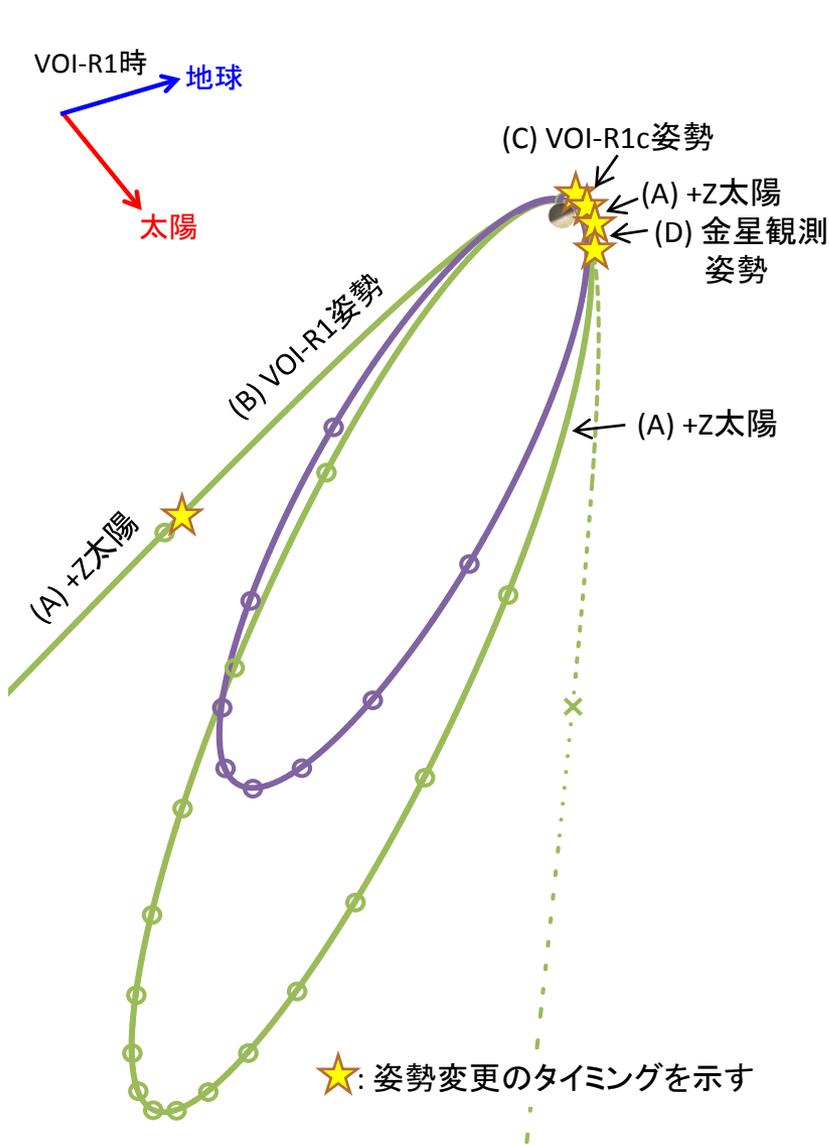


使用するエンジン

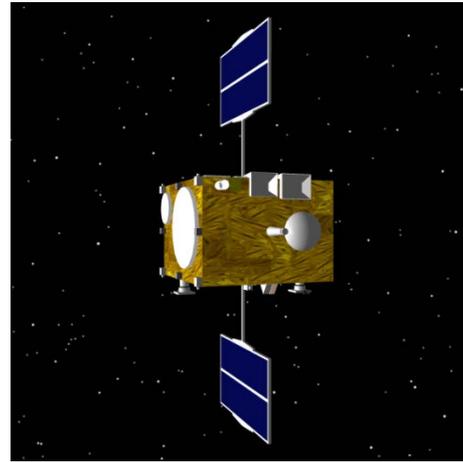


- VOI-R1の前日(2015年12月6日)にVOI-R1姿勢（噴射方向に太陽がある）にするため、太陽光入射を最も許容出来るトップ側（+Z側）の姿勢制御用エンジンを用いて、VOI-R1噴射を行う。

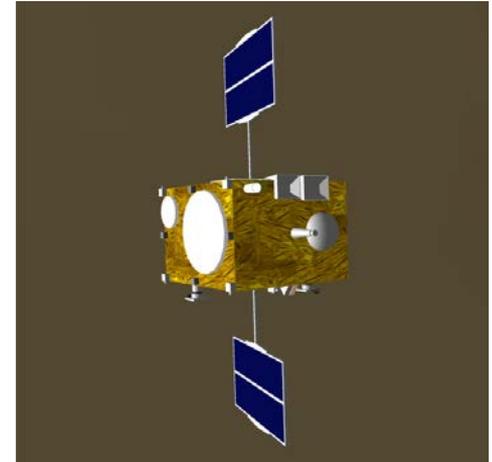
VOI-R1前後の姿勢変更



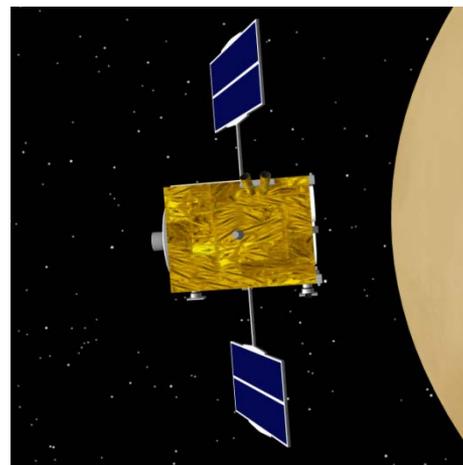
地球から見た場合の
探査機姿勢



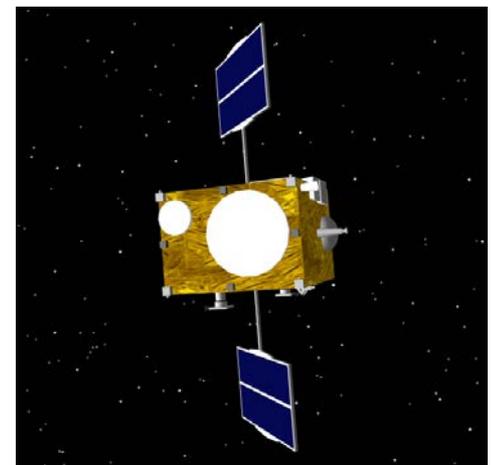
(A) +Z太陽姿勢



(B) VOI-R1姿勢



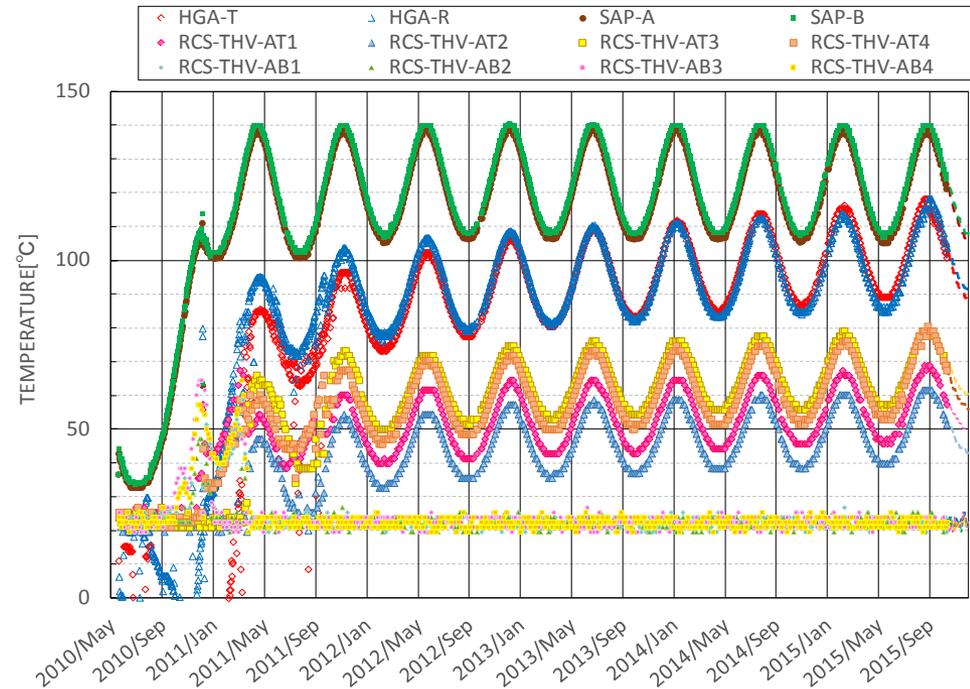
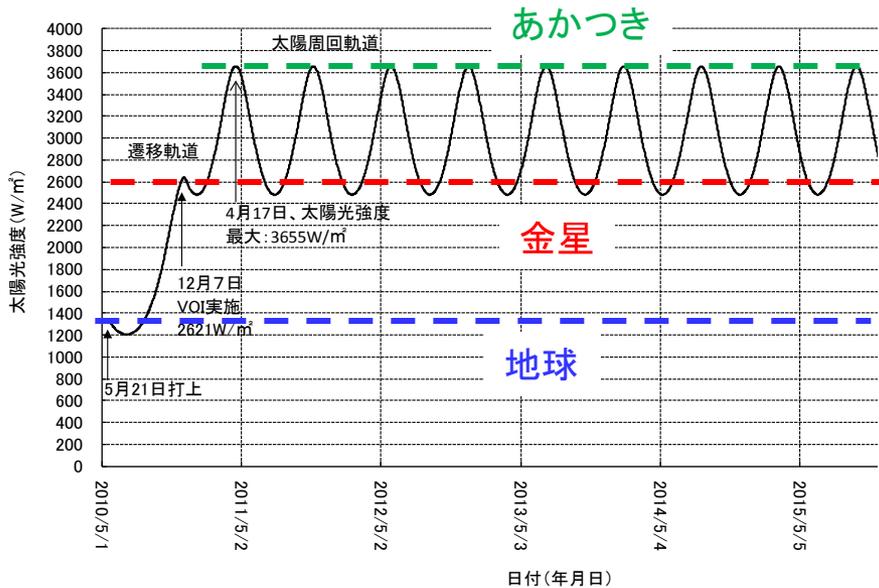
(C) VOI-R1c姿勢



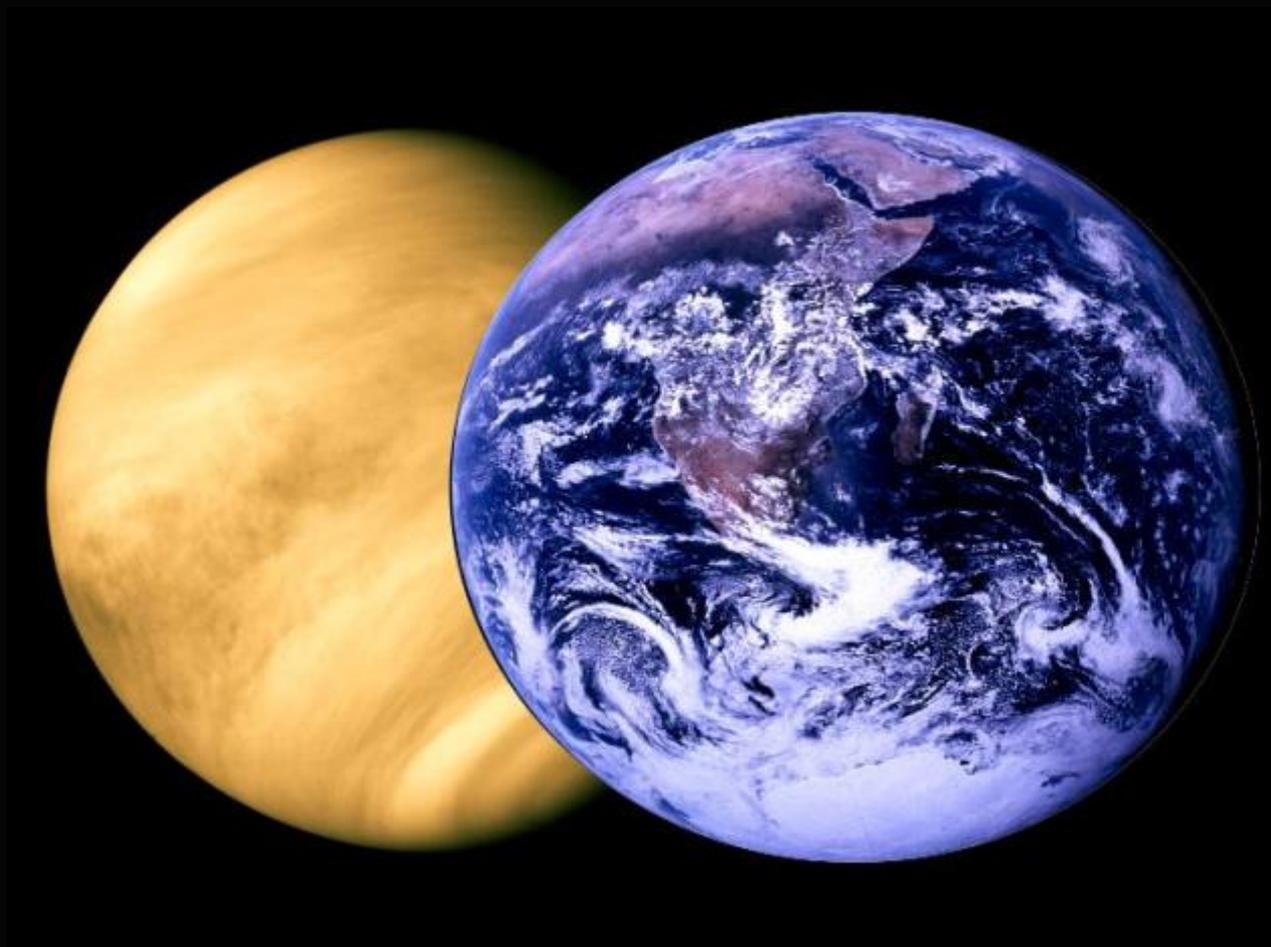
(D) 金星観測姿勢

「あかつき」の健全性

- あかつきは、金星軌道より太陽に近い軌道を飛行しており、当初予定より熱環境が厳しい。熱に最も耐えられる+z面を常に太陽に向けることで、厳しい熱環境に対処した。
- 2015年8月30日に第9回目(最後)の近日点を通過した。
- 探査機各部の温度は予測値に沿って下がっており、探査機は健全であることを確認している(主エンジンを除く)。

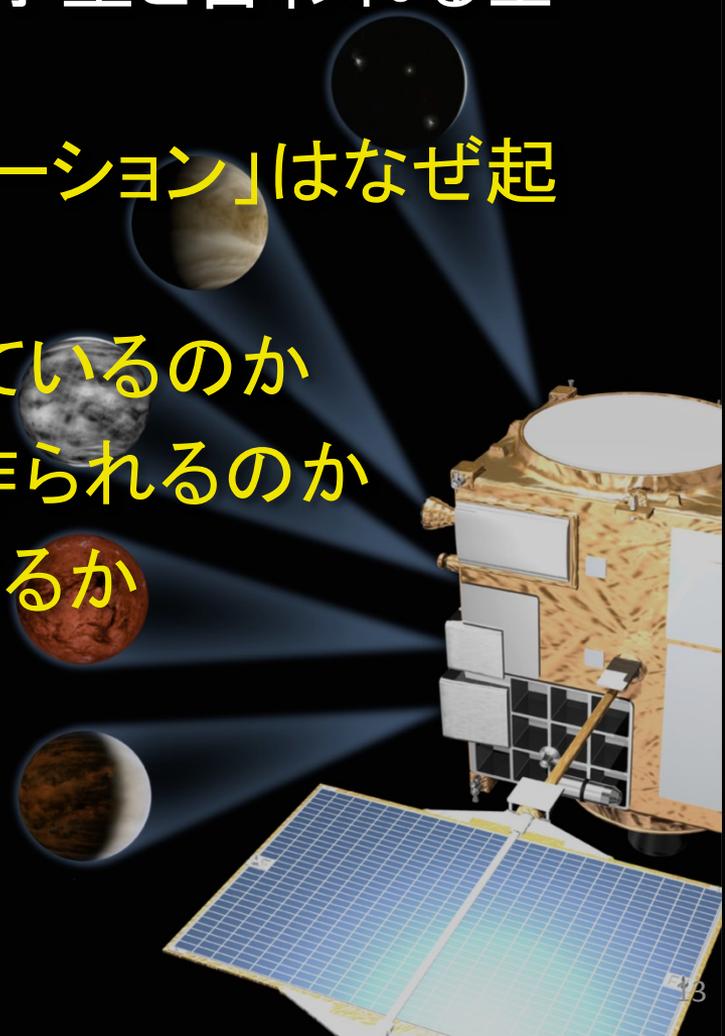


あかつきの観測計画



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、地球の双子星と言われる金星の気候のしくみに迫る。
 - 高速大気循環「スーパーローテーション」はなぜ起こるのか
 - 大気は上下・南北にどう循環しているのか
 - 全球を隙間無くおおおう雲はどう作られるのか
 - 氷晶の生じない大気に雷は起こるか
 - 活火山はあるか

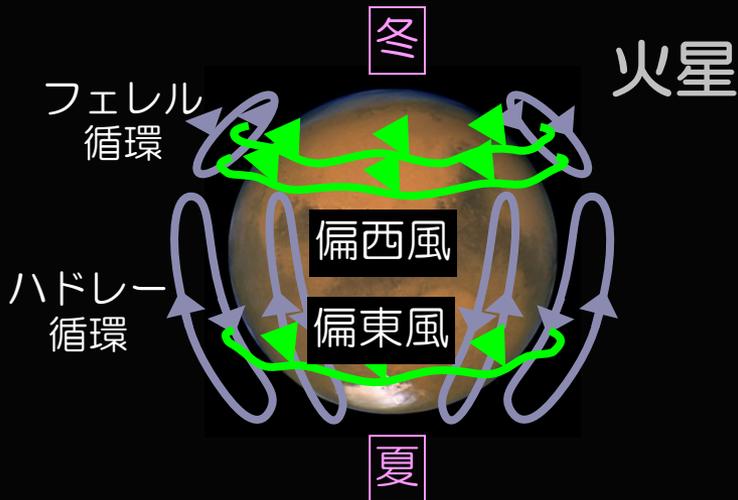
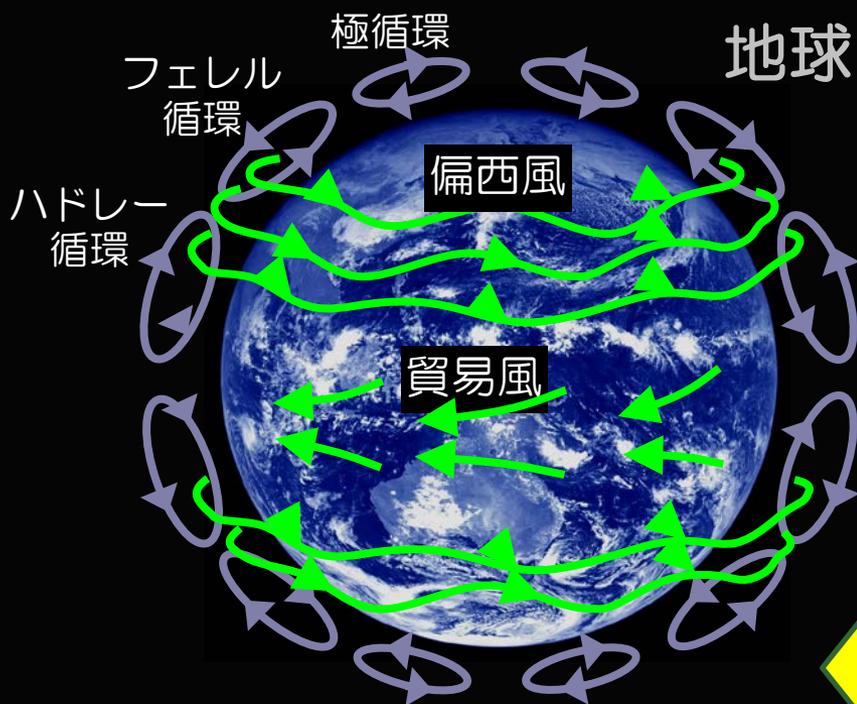


謎の風、スーパーローテーション

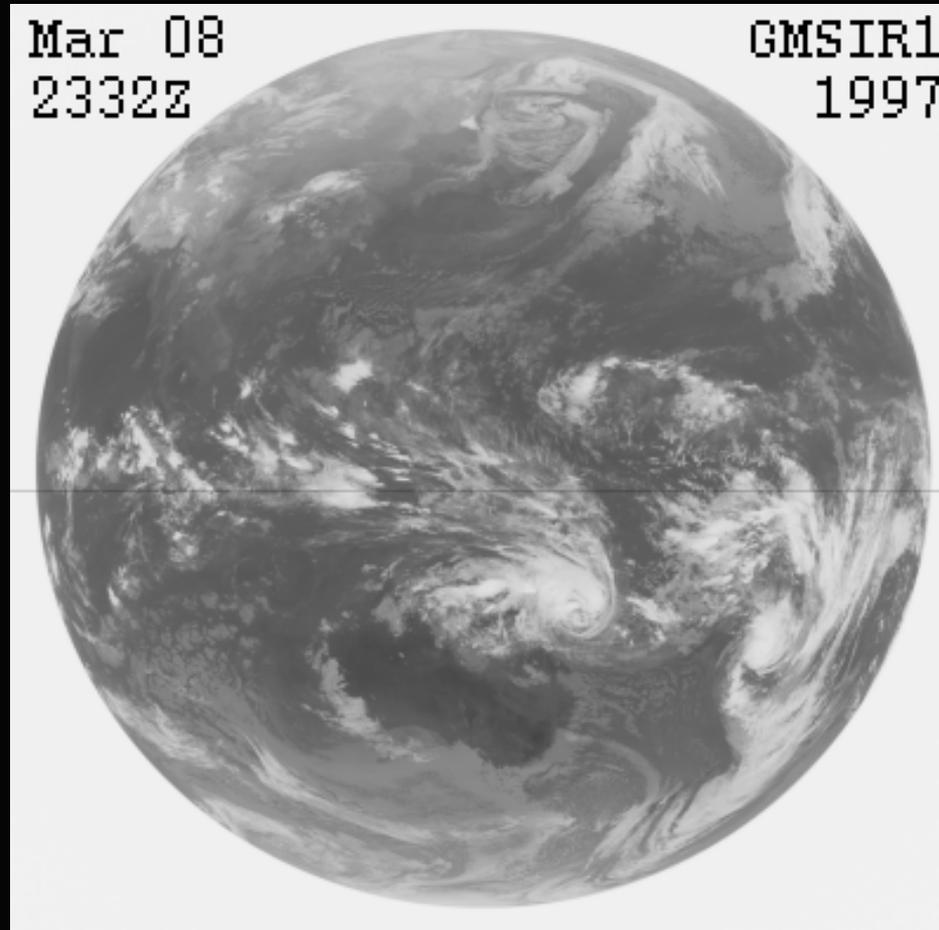


大気が自転をはるかに追い越して同じ方向に循環
毎秒100 m (時速360km)

地球型惑星の大気循環

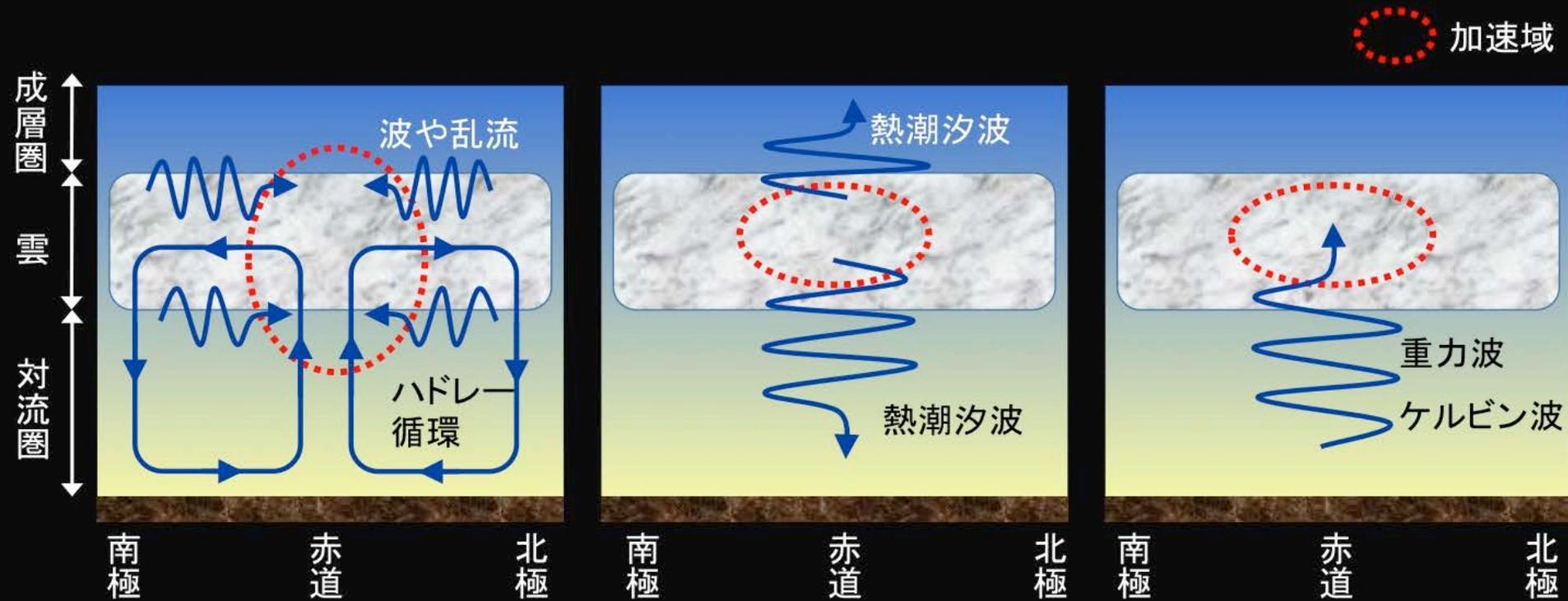


大気循環が雲を作る



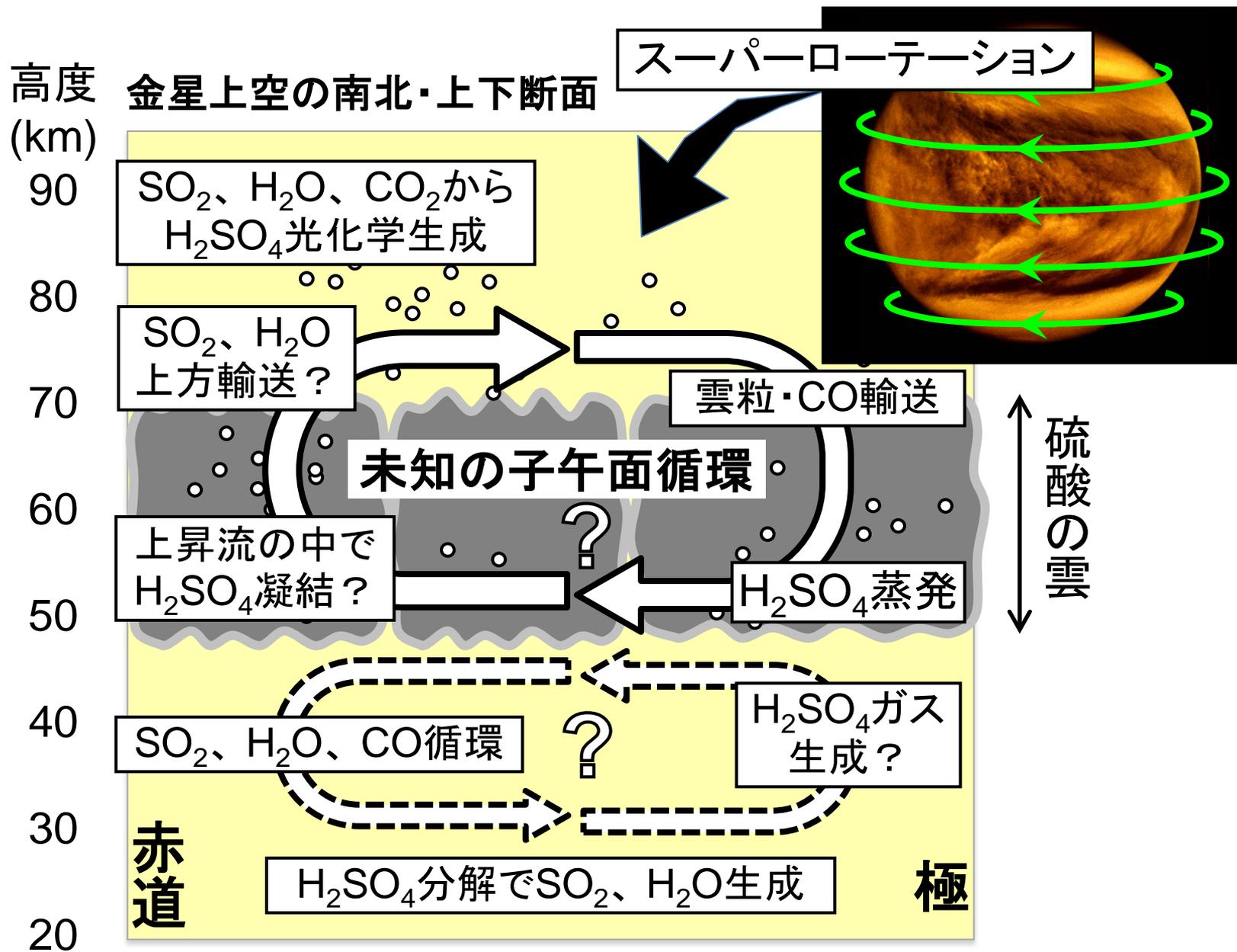
雲が惑星の反射率を変え、表面温度を変える

スーパーローテーションの色々な仮説



何らかの巨大な波のはたらきで大気が加速されるのに違いないと思われる。
「あかつき」はそれをつかまえる。

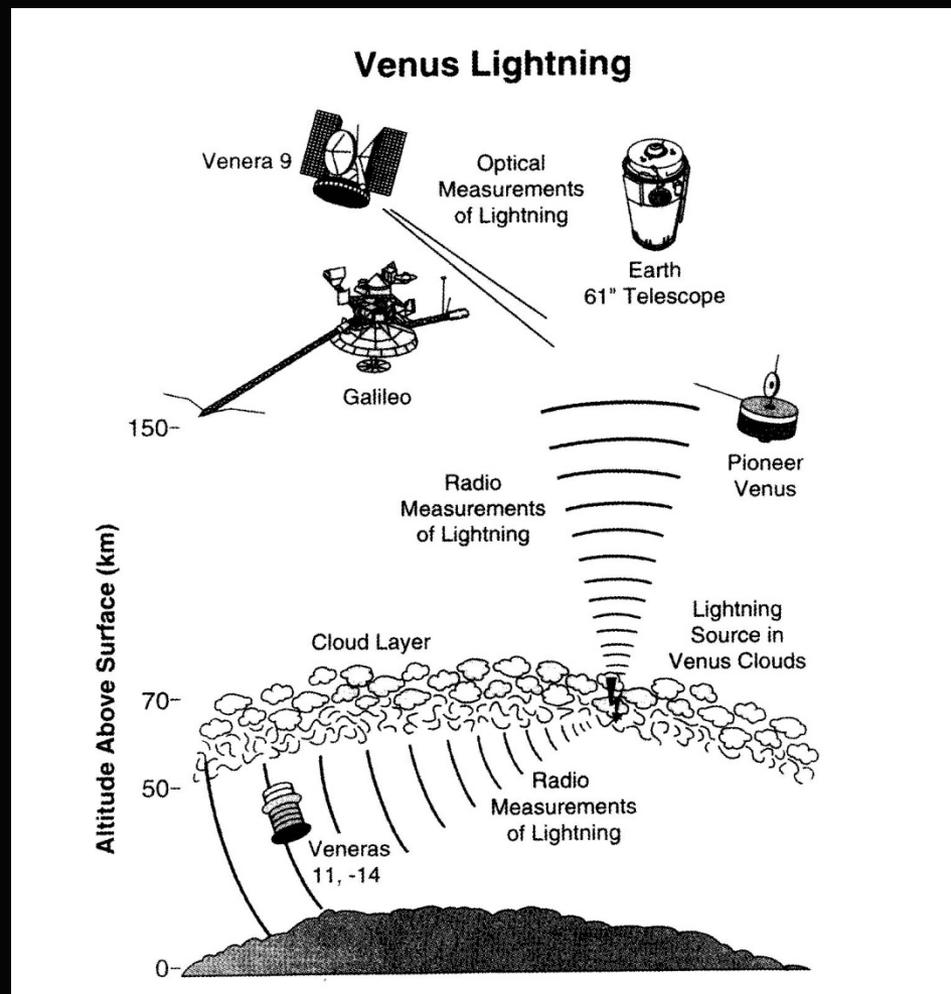
金星の硫酸の雲はどう作られるのか



金星活動と雷



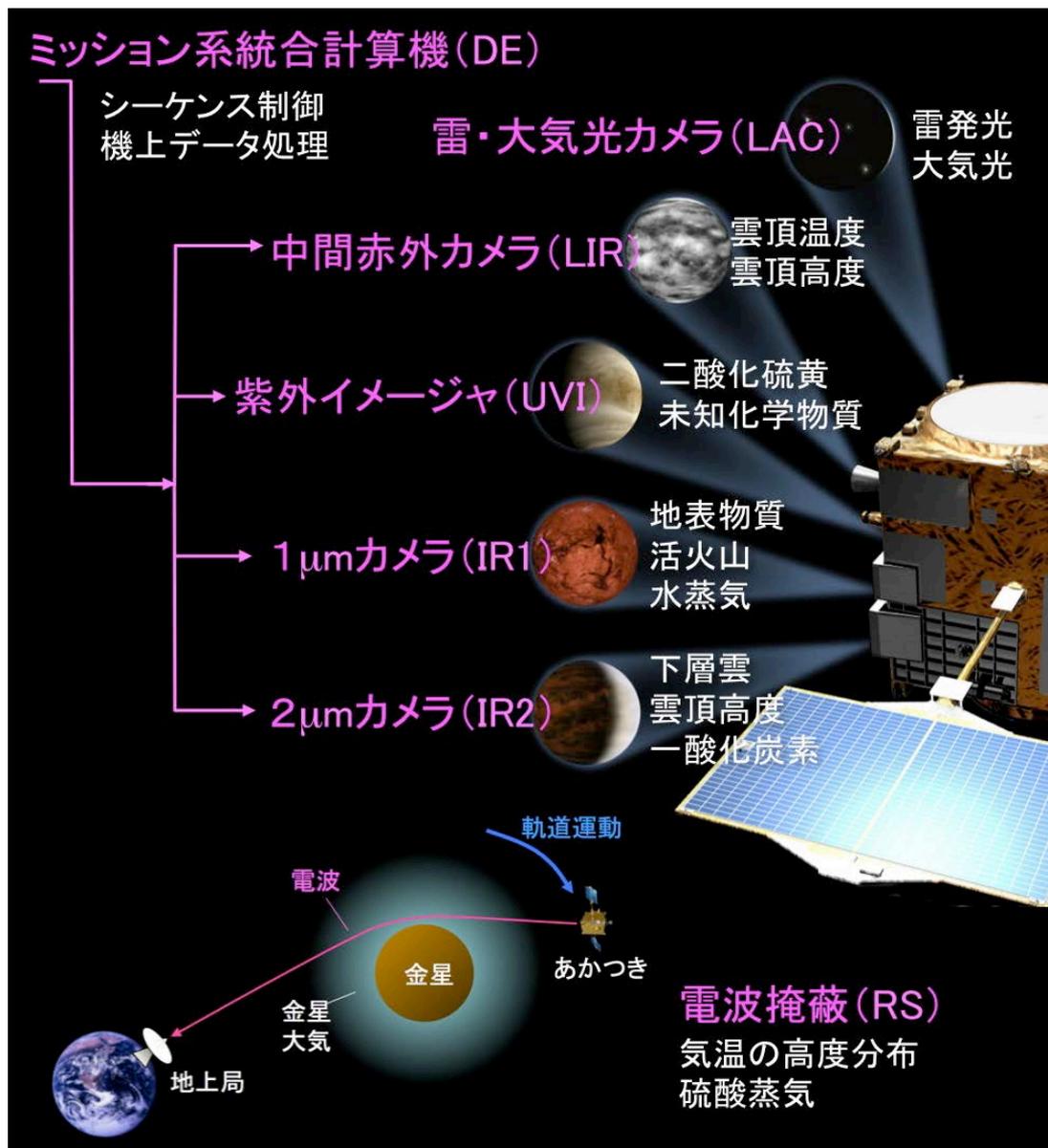
NASA Magellanによるレーダー探査で
得られた金星の地形



「あかつき」搭載観測機器



- ❖ 「あかつき」には6台の観測装置が搭載されている。
 - 紫外線～中間赤外線までの様々な波長の放射をとらえる5台の観測カメラ (IR1, IR2, LIR, UVI, LAC)
 - 電波掩蔽観測のための基準信号源 (USO)
- ❖ LAC以外の4カメラは全てミッション系統合計算機(DE)によって制御・処理・記録される。
- ❖ 探査機全体の質量約500kgに対し、6台の観測装置とDEを合わせた質量は約37kgである。



科学観測機器 (1)

1 μ mカメラ IR1 (東京大学・JAXA)

$\lambda = 0.9, 0.97, 1.01 \mu\text{m}$ (近赤外の窓)

視野 $12 \times 12^\circ$ 、 1024×1024 画素、検出器 SiCCD

→ 下層の雲、活火山、地表物質



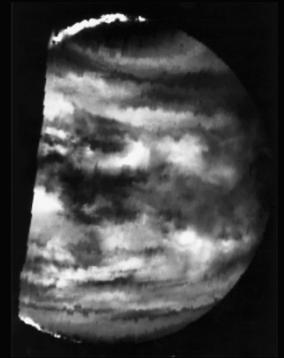
2 μ mカメラ IR2 (JAXA)

$\lambda = 1.73, 2.26, 2.32 \mu\text{m}$ (近赤外の窓)、

$2.02 \mu\text{m}$ (CO_2 吸収)、 $1.65 \mu\text{m}$ (黄道光)

視野 $12 \times 12^\circ$ 、 1024×1024 画素、検出器 PtSi

→ 下層の雲、粒径、雲頂高度、下層の一酸化炭素



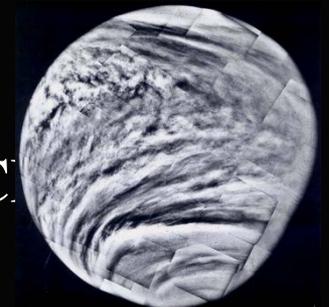
Galileo (2.3 μ m)

紫外イメージャ UVI (北海道大学・JAXA)

$\lambda = 283, 365 \text{ nm}$

視野 $12 \times 12^\circ$ 、 1024×1024 画素、検出器 SiCCD

→ SO_2 、未同定吸収物質



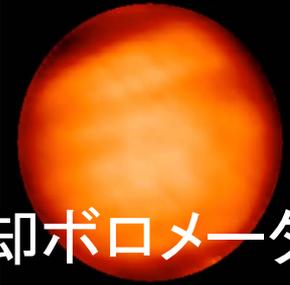
科学観測機器 (2)

中間赤外カメラ LIR (立教大学・JAXA)

$\lambda = 10 \mu\text{m}$ (幅 $4 \mu\text{m}$)

視野 $12.4 \times 16.4^\circ$ 、 248×328 画素、検出器 非冷却ボロメータ

→ 雲頂温度

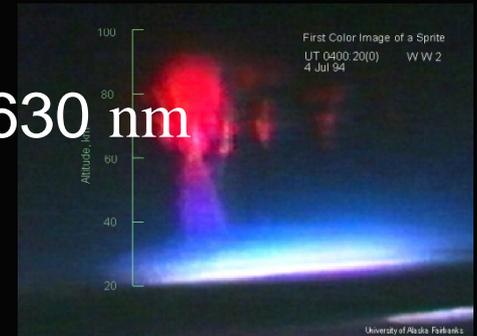


雷・大気光カメラ LAC (北海道大学)

視野 $16 \times 16^\circ$ 、 $\lambda = 777, 551, 553, 558, 630 \text{ nm}$

8×8 画素、検出器 APD (32kHz sampling)

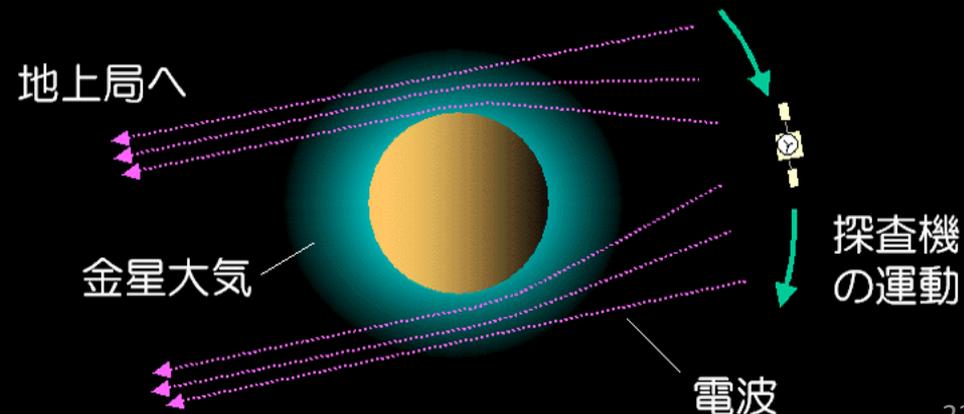
→ 雷放電、 O_2 / O 大気光

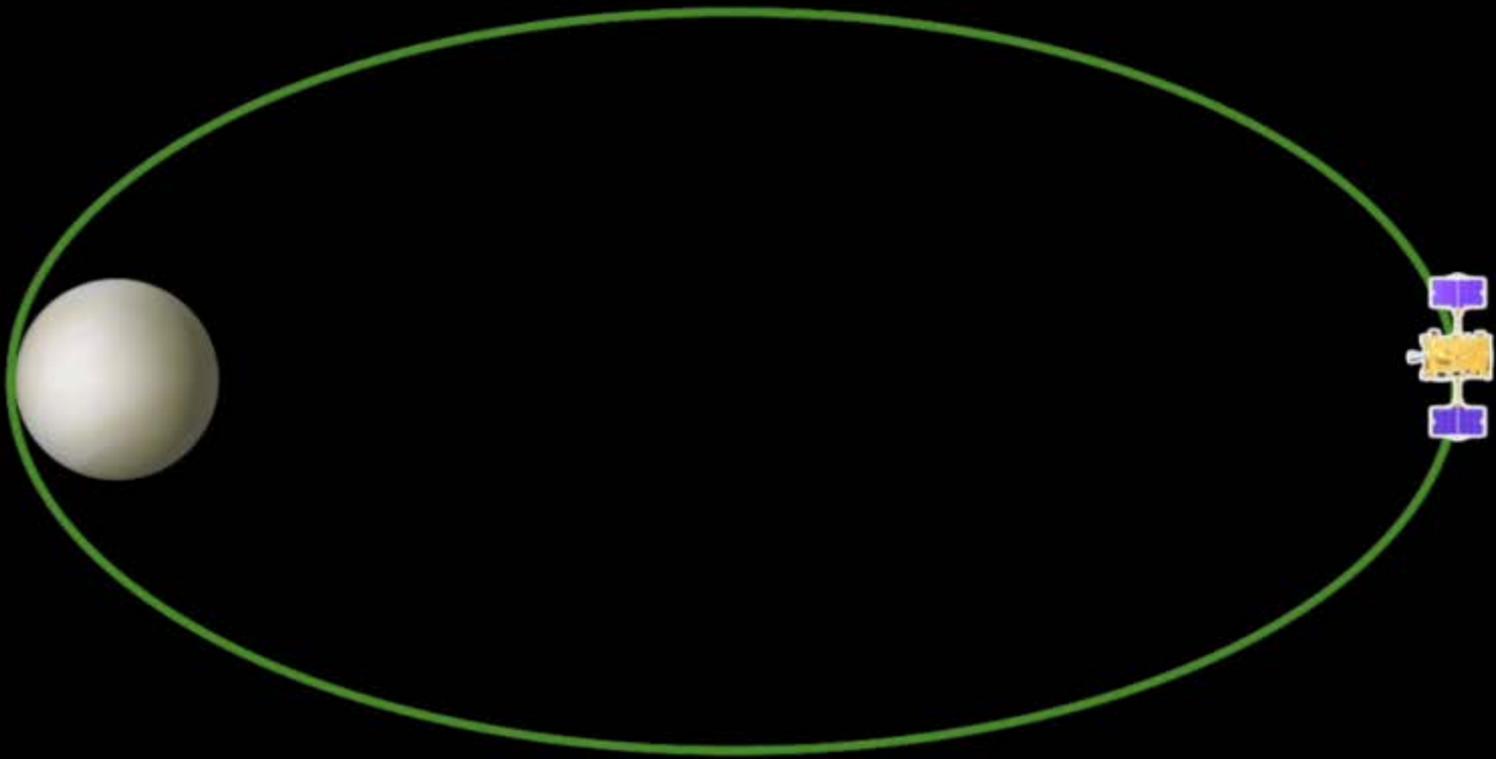


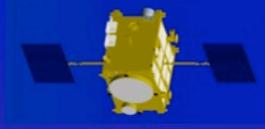
超高安定発振器 USO (JAXA)

電波掩蔽観測

→ 気温・硫酸蒸気高度分布







あかつき

大気循環の 3次元可視化

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)

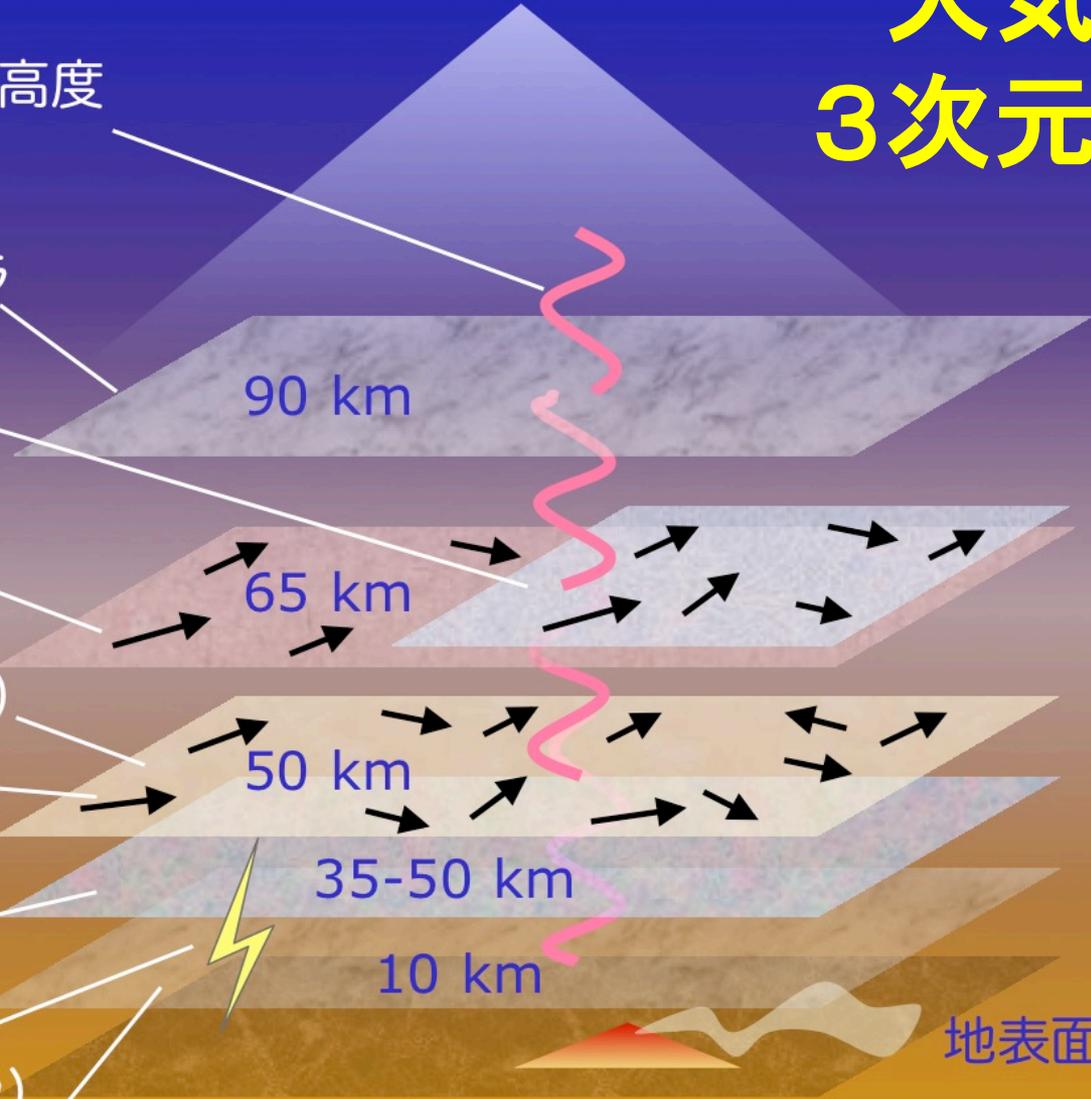
一酸化炭素
(2 μ mカメラ)

雷放電
(雷・大気光カメラ)

水蒸気(1 μ mカメラ)

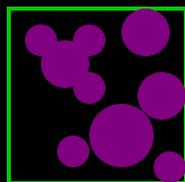
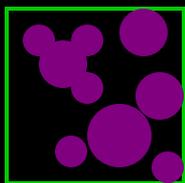
地表物質・活火山
(1 μ mカメラ)

地表面

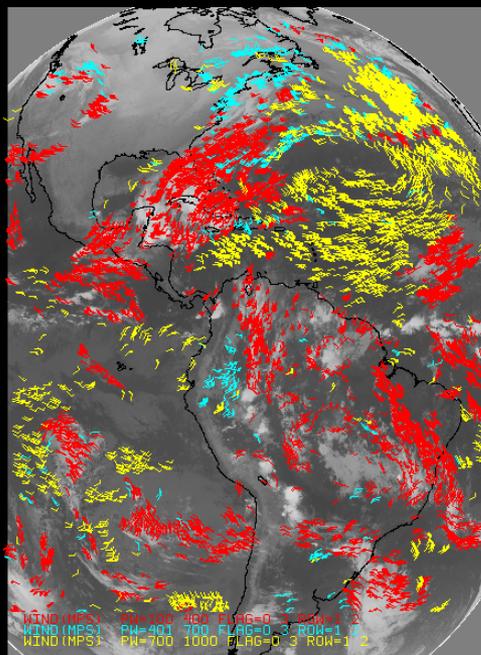


雲塊追跡による風速場導出

~500 km

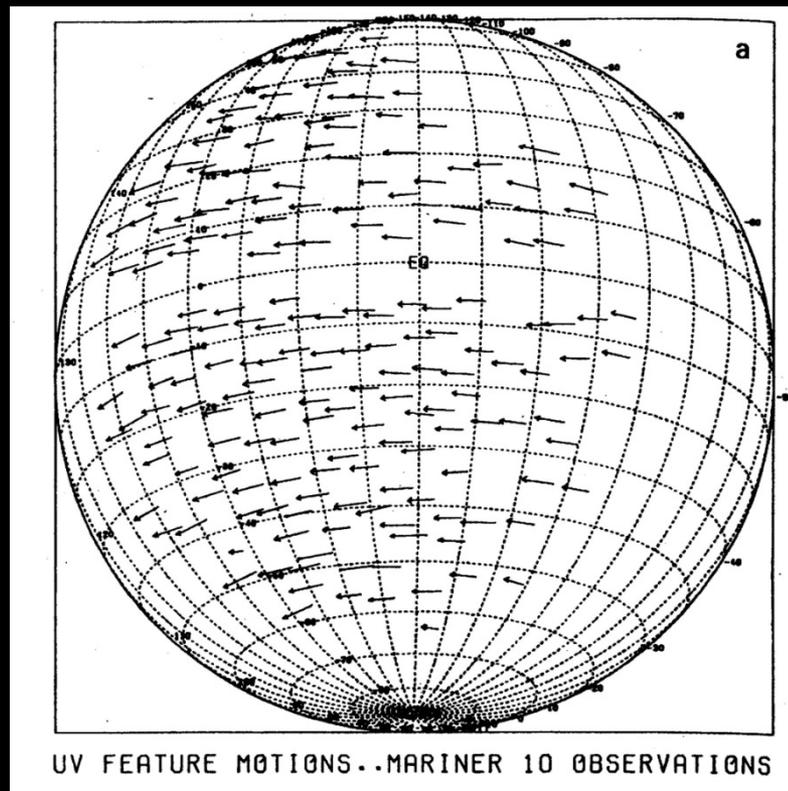


次の画像では
模様が移動



地球での雲追跡ベクトルの例

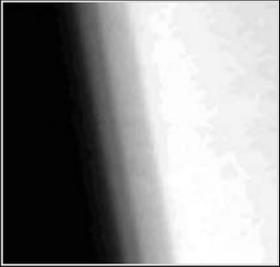
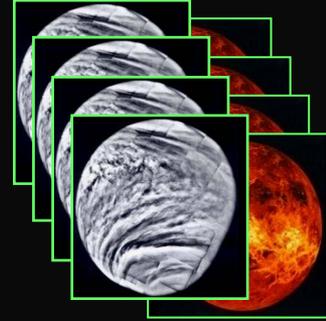
米国マリナー10探査機による
雲追跡ベクトル



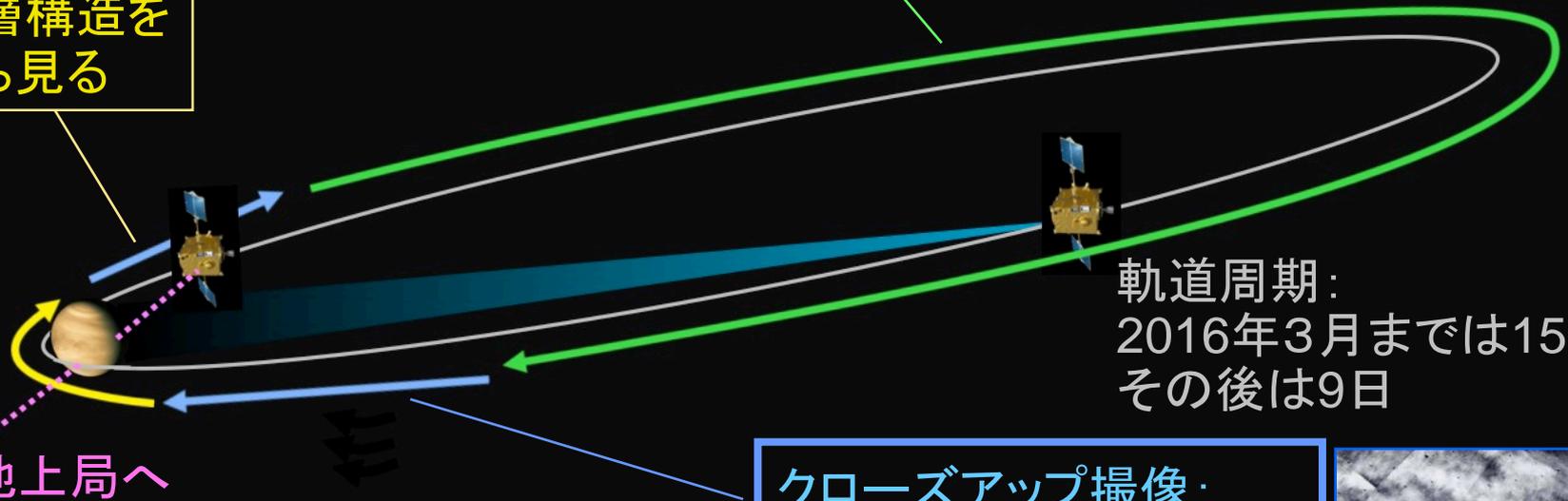
観測計画

グローバル撮像:

高速の気流に流される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する。また地表面のモニターを行う。



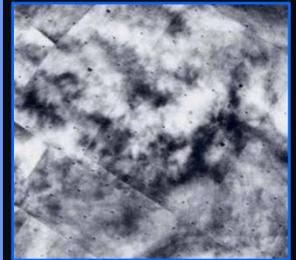
雲の層構造を横から見る



軌道周期:
2016年3月までは15日
その後は9日

クローズアップ撮像:

微細構造モニター
雲の凸凹を立体視
夜側で雷発光を検出

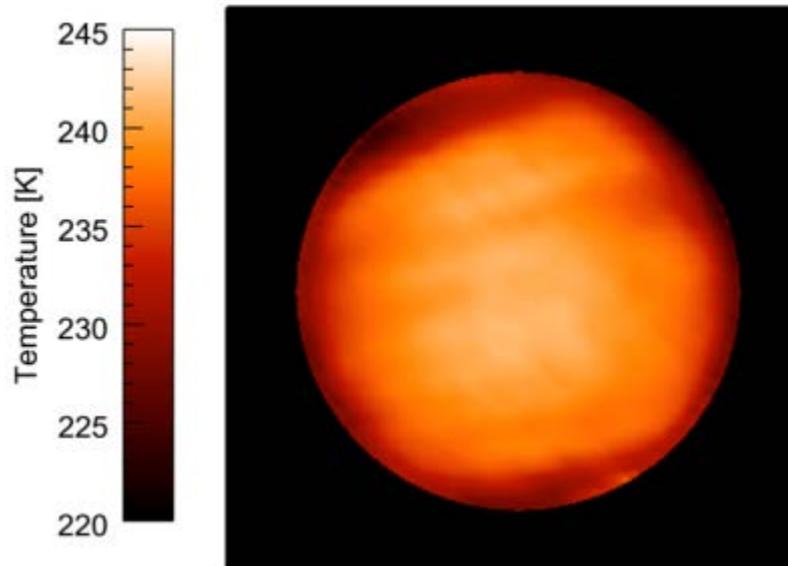


電波掩蔽:
大気を水平に貫く電波を地上で受信して大気
の層構造をとらえる



地上局へ

「あかつき」の観測装置の現状



LIR 10 μm : 雲頂からの熱放射

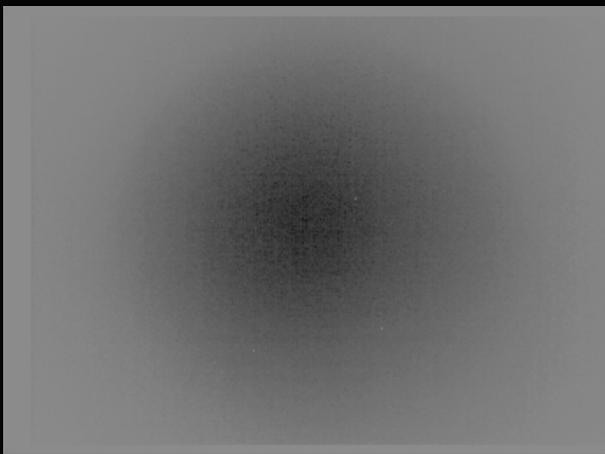
2010年12月の最接近後60万km
の距離から撮影した金星



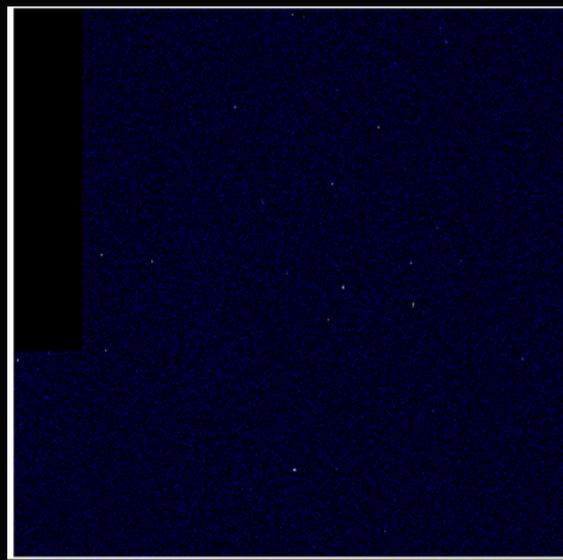
UVI 283nm IR1 0.9 μm

- LIR（中間赤外カメラ）、UVI（紫外イメージャ）、IR1（1 μm カメラ）は後述する立ち上げ試験を実施。
- IR2（2 μm カメラ）、LAC（雷・大気光カメラ）は未確認。
- 金星周回軌道再投入後3ヶ月間を観測機器のチェックアウトに費やす予定。

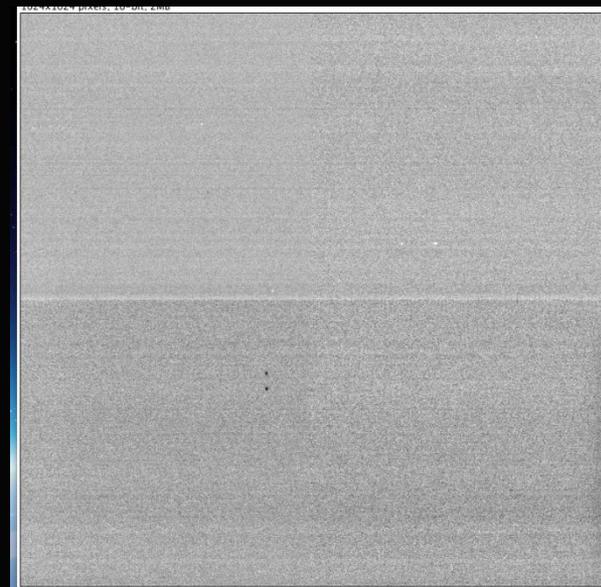
2015年10月 カメラ立ち上げ試験



LIR (中間赤外カメラ)
(10 μm)



UVI (紫外イメージャ)
(365 nm)



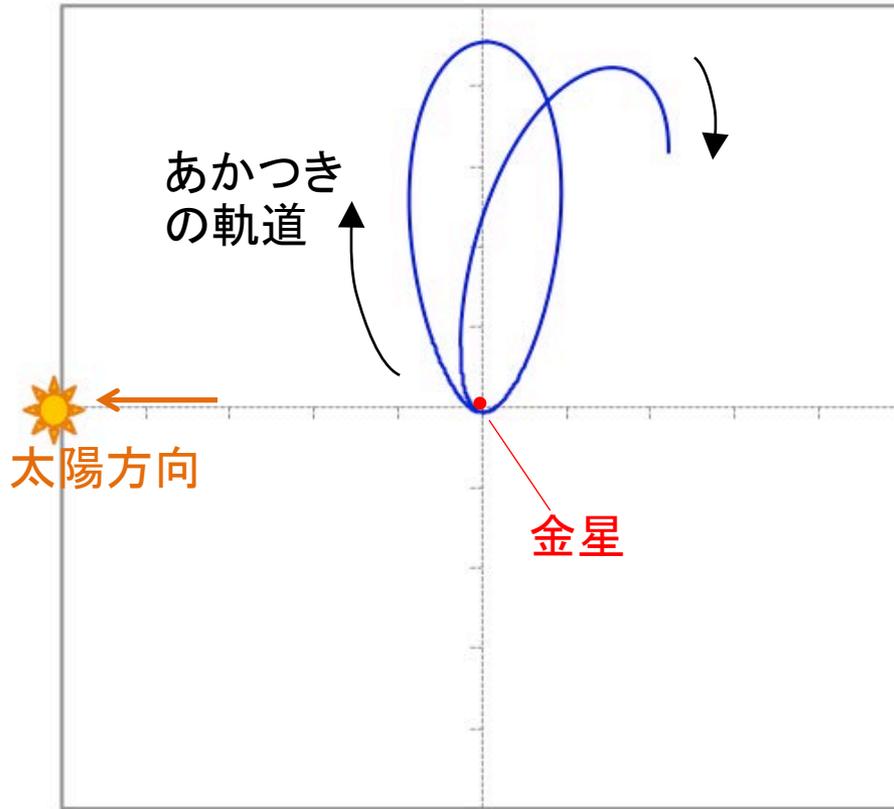
IR1 (1μmカメラ)
(0.9 μm)

視野内に明るい星がなかったために真っ暗の宇宙と検出器ノイズが見られるだけだが、機器の最低限の健全性を確認できた。

軌道投入後の観測予定

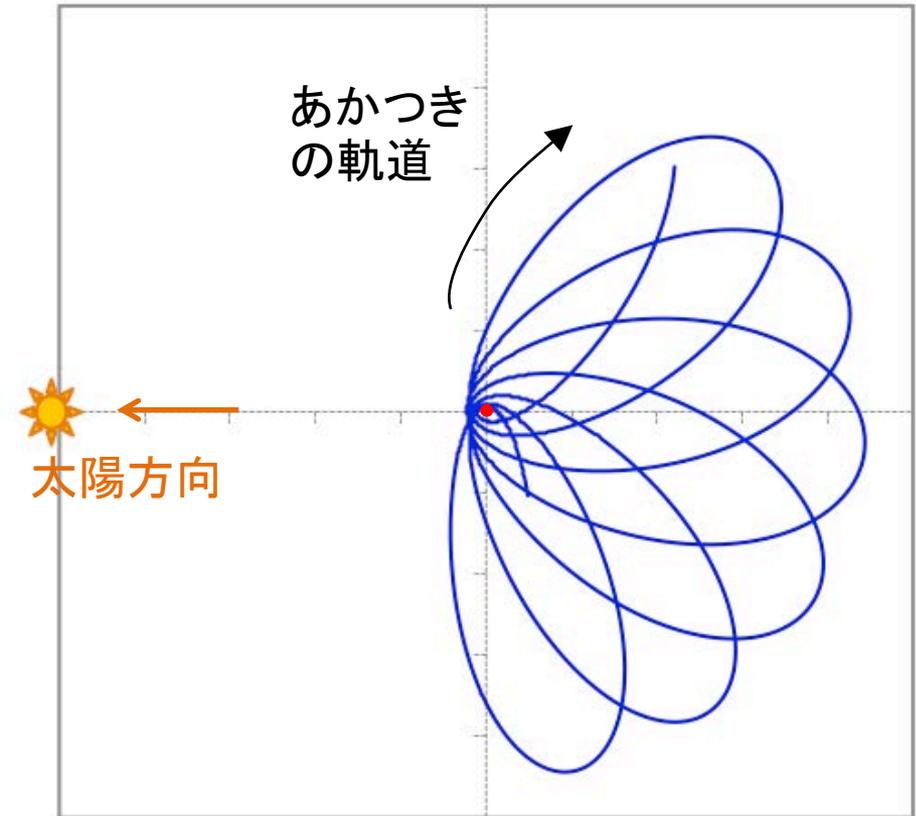


2015年12月末まで



LIR(中間赤外カメラ)、IR1(1 μ mカメラ)、IR2(2 μ mカメラ)、UVI(紫外イメージャ)について、撮像試験の結果をもとに露光時間などの調整を行う。各カメラによる試験的な金星画像を公表できると思われる。

2016年1月から3月まで



徐々に定常的な観測に移行する。適宜、画像・動画を公開する。
電波掩蔽観測は3月以降。
LAC(雷・大気光カメラ)による観測は4月以降。

軌道投入に成功した場合のサクセスクライテリア達成予測

		周回軌道投入成功	
		全機器正常	一部機器劣化**
ミニマムサクセス	雲が東西方向に1周する1週間にわたって、金星周回軌道上からいずれかのカメラによって画像を連続的(数時間毎)に取得し、全球的な雲の構造を捉える。	○	○
フルサクセス	雲領域の大気構造が変動する時間スケールである2年間にわたって右の全ての観測を行う	○ ただし空間分解能1/5*	△
	金星で雷放電が起きているか否かを把握するために雷・大気光カメラ(LAC)を用いた観測を行う	○ ただし観測頻度1/7	×
	電波科学により金星大気の温度構造を観測する	○ ただし観測頻度1/7	×
エクストラサクセス	右のいずれかを達成する	○	△
	太陽活動度の変化に伴う大気構造の変化を捉えるために、4地球年を超えて金星周回観測を行う	○	×
	1μmカメラ(IR1)により金星の地表面物性あるいは火山活動に関するデータを得る	○	×
	2μmカメラ(IR2)により地球軌道より内側での黄道光の分布を観測する	×	×

* 空間分解能の低下した画像に見られる雲の動きは実際の風速と必ずしも同じにならず、データの解釈が複雑になる可能性がある。

** 探査機姿勢の制約から一部機器の状態チェックは軌道投入後に行う予定。

打上げ前に実施した 「あかつき」メッセージキャンペーンについて

❖ キャンペーンの概要

「お届けします！あなたのメッセージ 暁の金星へ」

金星探査機「あかつき」(PLANET-C)やJAXAの事業について周知するとともに、太陽系探査への関心を高め、JAXAの国内外での認知度を高める機会とするため、「あかつき」に搭載するメッセージを募集した。

- 募集期間：
平成21年10月23日(金)ー平成22年1月10日(日)

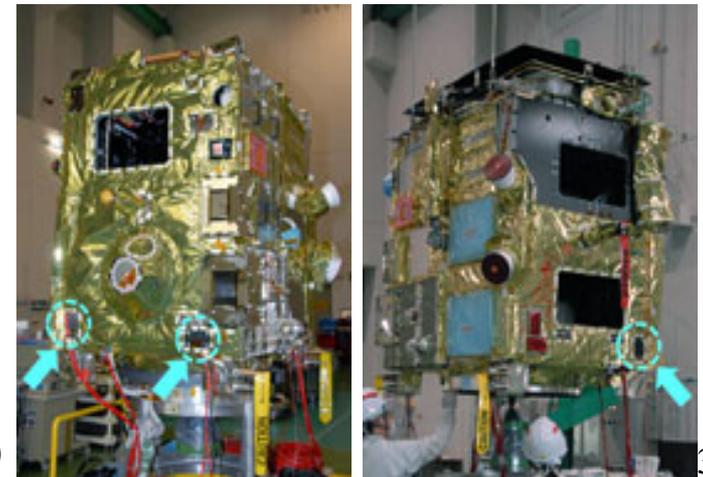
➔ 約**26万人**からの応募



応募いただいた名前とメッセージをアルミプレートに印刷したものを「あかつき」に搭載した。

名前とメッセージが印刷されたアルミプレート

アルミプレート搭載位置 (3か所)



応援メッセージの募集について

- JAXAのコンシェルジュ&コミュニティサイト「ファン！ファン！JAXA！」では、「あかつき」、プロジェクト関係者、ミッションへの応援メッセージを募っています。みなさまからのご投稿お待ちしております。

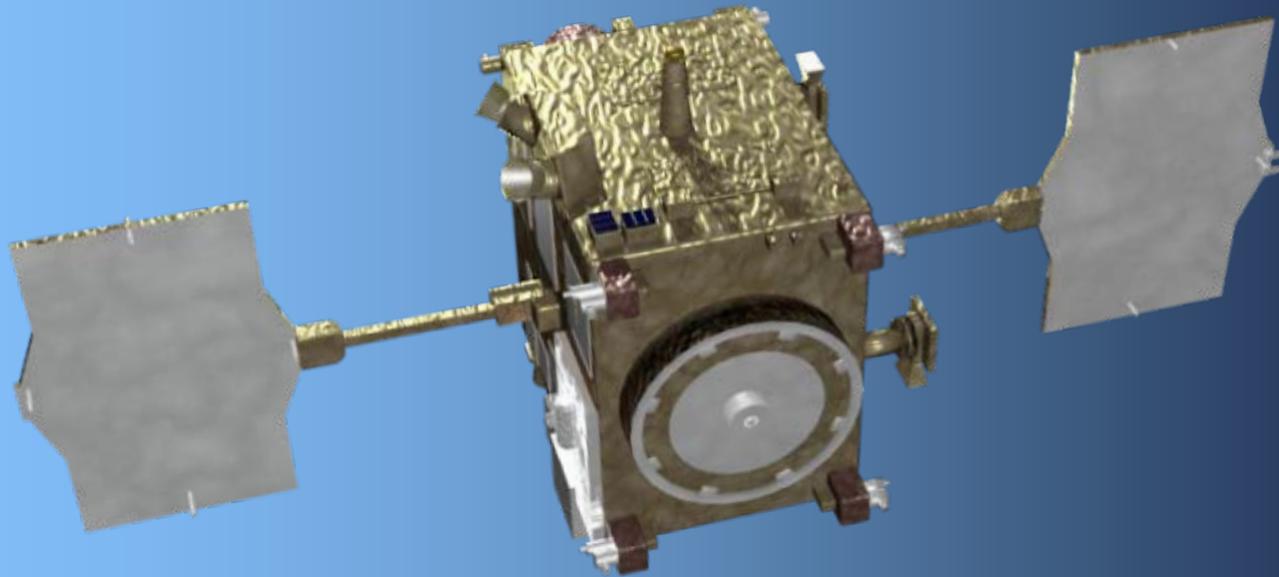
<http://fanfun.jaxa.jp/odai/detail/6100.html>

- Twitterからの応援メッセージも募っています。ハッシュタグ #あかつき応援、#akatsukiをつけてメッセージをつぶやいていただけますと幸いです。
- 英語でのご案内は次のURLとなります。

<http://global.jaxa.jp/messages/akatsuki.html>

※ご投稿いただいたメッセージは、内容によって掲載を見合わせる場合がございます。予めご了承ください。また、申し訳ありませんが記念品等の贈呈の予定はございません。

みなさまのご期待にこたえられるよう、
最善を尽くします。



金星周回軌道投入まであと28日

参考資料

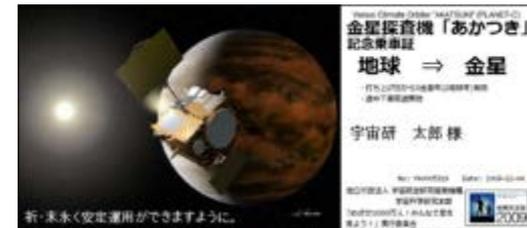
参考：キャンペーンの応募結果参考

応募総数

<u>260、214名</u>	〔内訳〕 インターネット :	54、632
	団体申込等 :	148、204
	米国惑星協会 :	57、378

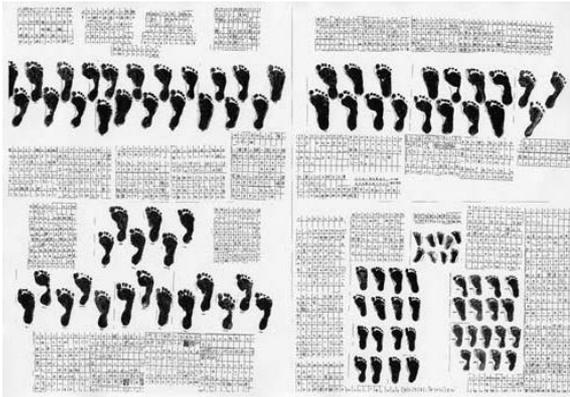
小・中学校を中心に、団体応募でイラストなど約15万人分。

名前だけでなく大半はメッセージも寄せられた。
受領確認とともに記念乗車証(参加証)を返信。
総数の差は主として外国(米国惑星協会)の分。



現在、記念乗車証の有効期限は記載上切れてしまっているように見える。
プロジェクトとして、有効であるものとする。

参考：団体応募の例



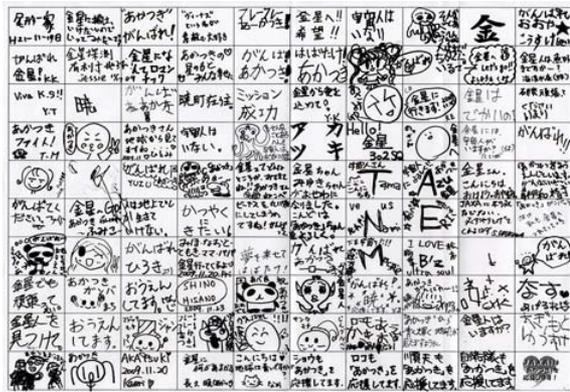
園児の足型と保護者のメッセージ



小学校での寄せ書き (搭載は白黒)



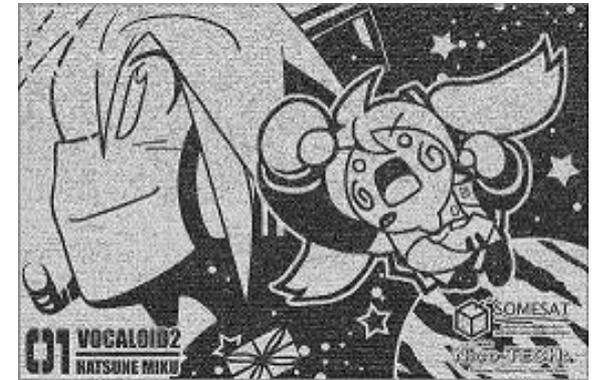
高校の記念行事としての参加



展示室での寄せ書き



レストランでの寄せ書きのようす



インターネット上での寄せ書き
(メッセージを微細な文字で表現)

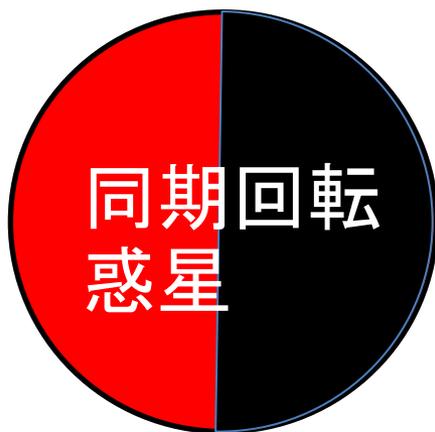
参考：系外惑星へのヒント



- 多くの系外惑星(太陽系外の惑星)が見つかっている。この中には中心星の近くを公転するものが多くあり、これらの惑星は常に同じ面を中心星に向けている(=同期回転惑星)
- 大気循環によってどの程度熱が均されるかが、これらの惑星が生命存在に適した環境になれるかどうかを左右する

遅い大気循環

中心星



昼側は灼熱地獄
夜側は凍結

速い大気循環

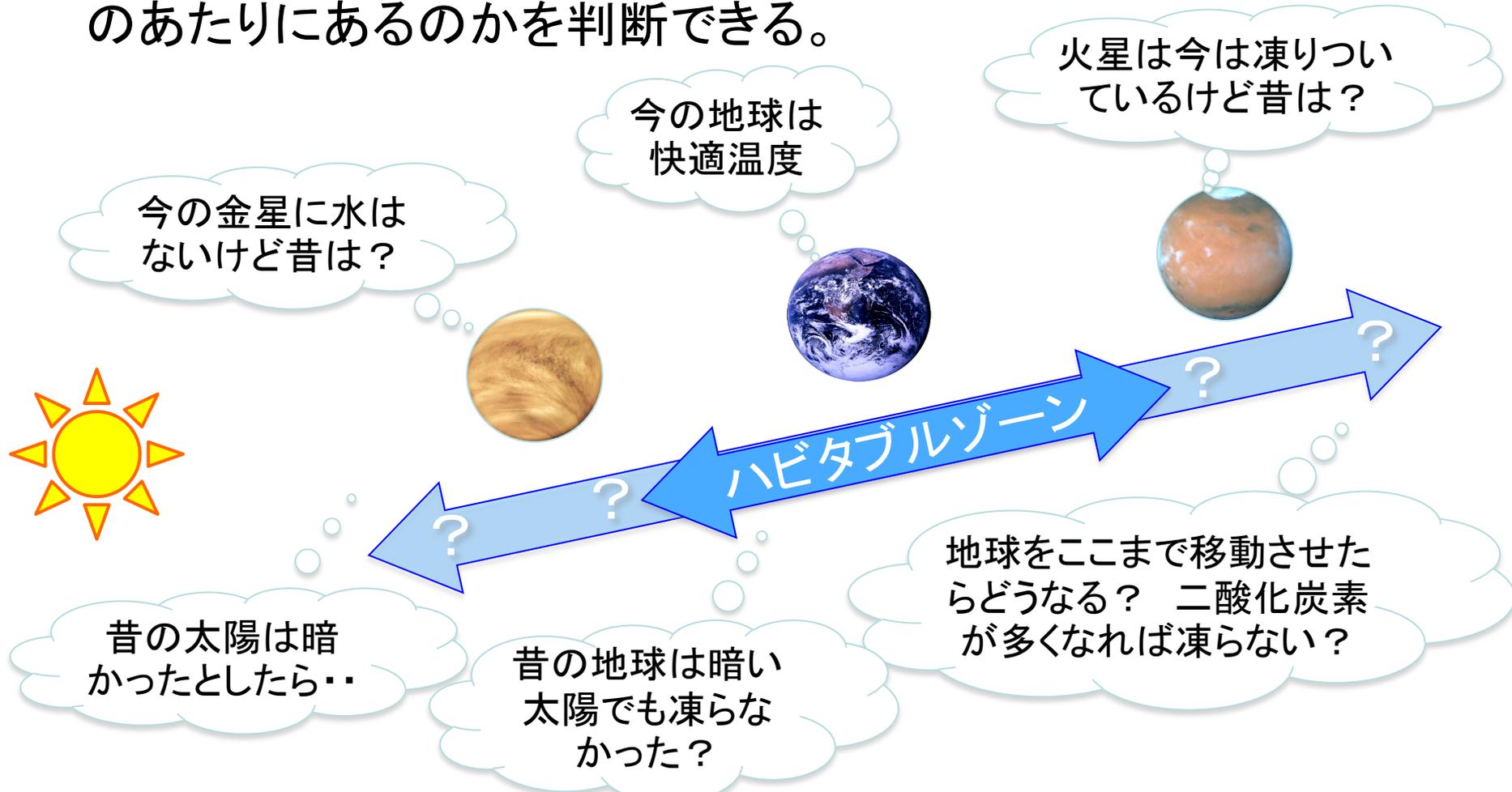
中心星



全球快適気温

参考：ハビタブルゾーンへのヒント

- この宇宙に地球のような環境はどれほどあるのか？
- 金星の気象・気候のメカニズムがわかれば、ハビタブルゾーン（生命居住可能領域）の内側の境界が様々な惑星系についてどのあたりにあるのかを判断できる。



参考: 1 μ mカメラ IR1



PI: 岩上直幹 (東京大学)

- ❖ 金星の雲の下や地表付近まで透視できる1 μ m付近の波長を利用し、下層大気中の雲の動き、水蒸気の分布、地表面の鉱物組成、活火山の有無などを調べる。



1 μ mカメラ IR1	
質量	約6.7kg ※
視野角	12°
検出器	Si-CSD/CCD (1024画素×1024画素)
観測波長 (観測対象)	1.01 μ m (夜: 地表面、雲)
	0.97 μ m (夜: 水蒸気)
	0.90 μ m (夜: 地表面、雲)
	0.90 μ m (昼: 雲)

※IR2と共通の回路部(約3.9kg)を含む

参考: 2 μ mカメラ IR2



PI: 佐藤毅彦 (ISAS/JAXA)

- ❖ 金星の雲の下まで透視できる2 μ m付近の波長を利用し、雲の濃さ、雲粒の大きさ、一酸化炭素の分布などから、下層大気の循環や雲物理の基礎データを得る。
- ❖ 金星到着までの間に黄道光観測し、惑星間空間ダストの振る舞いを明らかにする。



2 μ mカメラ IR2	
質量	約18kg ※
視野角	12°
検出器	PtSi-CSD/CCD (1024画素×1024画素)
観測波長 (観測対象)	1.735 μ m (夜: 雲、粒径分布)
	2.26 μ m (夜: 雲、粒径分布)
	2.32 μ m (夜: 一酸化炭素)
	2.02 μ m (昼: 雲頂高度)
	1.65 μ m (黄道光)

※冷凍機及びIR1と共通の回路部(約3.9kg)を含む

参考: 中間赤外カメラ LIR



PI: 田口真 (立教大学)

- ❖ 波長 $10\mu\text{m}$ の赤外線で雲の温度を映像化し、雲層上部の波動や対流活動、夜側の雲頂高度における風速分布を明らかにする。



中間赤外カメラ LIR

質量	約3.3kg
視野角	$12.4 \times 16.4^\circ$
検出器	非冷却ボロメータ (248画素 \times 328画素)
観測波長 (観測対象)	$10 \mu\text{m}$ (昼/夜: 雲頂温度)

参考：紫外線イメージャ UVI



PI: 渡部重十（北海道大学）

- ❖ 雲の形成に関わる二酸化硫黄や、紫外波長で吸収をもつ未知の化学物質の分布を紫外線でとらえるとともに、その変動から雲頂高度での風速分布を求める。



紫外線イメージャ UVI

質量	約4.1kg
視野角	12°
検出器	Si-CCD (1024画素 × 1024画素)
観測波長 (観測対象)	283 nm (昼：雲頂の二酸化硫黄)
	365 nm (昼：未同定吸収物質)

参考：雷・大気光カメラ LAC



PI: 高橋幸弘（北海道大学）

- ❖ 可視光で高度100km付近の高層大気の酸素が放つ大気光という淡い光をとらえ、昼夜間循環の変動や大気波動を映像化する。
- ❖ 毎秒3万回の高速露光（32 μ secの時間分解能）により、金星での雷放電発光の有無に決着をつける。



雷・大気光カメラ LAC

質量	約2.3kg
視野角	16°
検出器	8×8 APDマトリックスアレイ
観測波長 (観測対象)	777.4nm (夜: 雷放電発光)
	480-650nm (夜: 酸素分子大気光)
	557.7 nm (夜: 酸素原子大気光)
	545 nm (較正用)

参考: 超高安定発振器 USO



PI: 今村剛 (ISAS/JAXA)

- ❖ 電波掩蔽観測のために用いる。探査機から送信され金星大気を通過して地球に届く電波の周波数や強度の変化から、気温などの高度分布が分かり、大気の熱構造や鉛直伝搬波動の情報を得る。

超高安定発振器 USO

質量	約2kg
観測波長 (観測対象)	USO周波数38MHz 送信周波数 8.4GHz (気温、硫酸蒸気、電子密度)



USOは衛星内部に取り付けられている

[電波掩蔽観測のイメージ図]

