

金星大気の観測

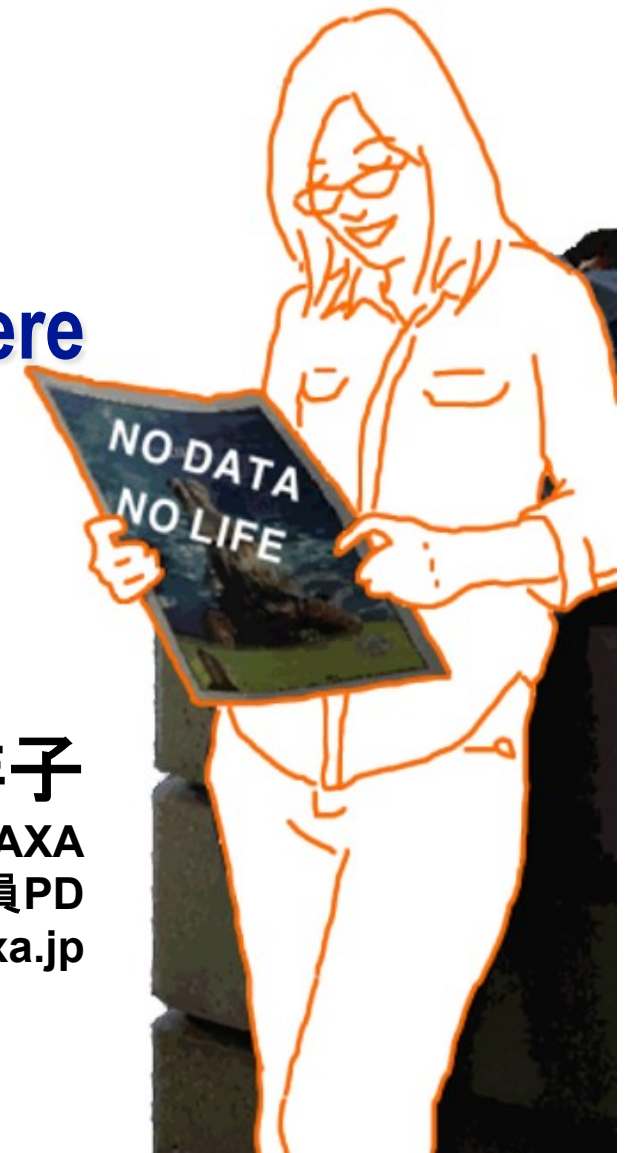
Observations of the Venus atmosphere

大月祥子

ISAS/JAXA

日本学術振興会特別研究員PD

ohtsuki.shoko@jaxa.jp



今日の話

◆ 金星ってどんな星？

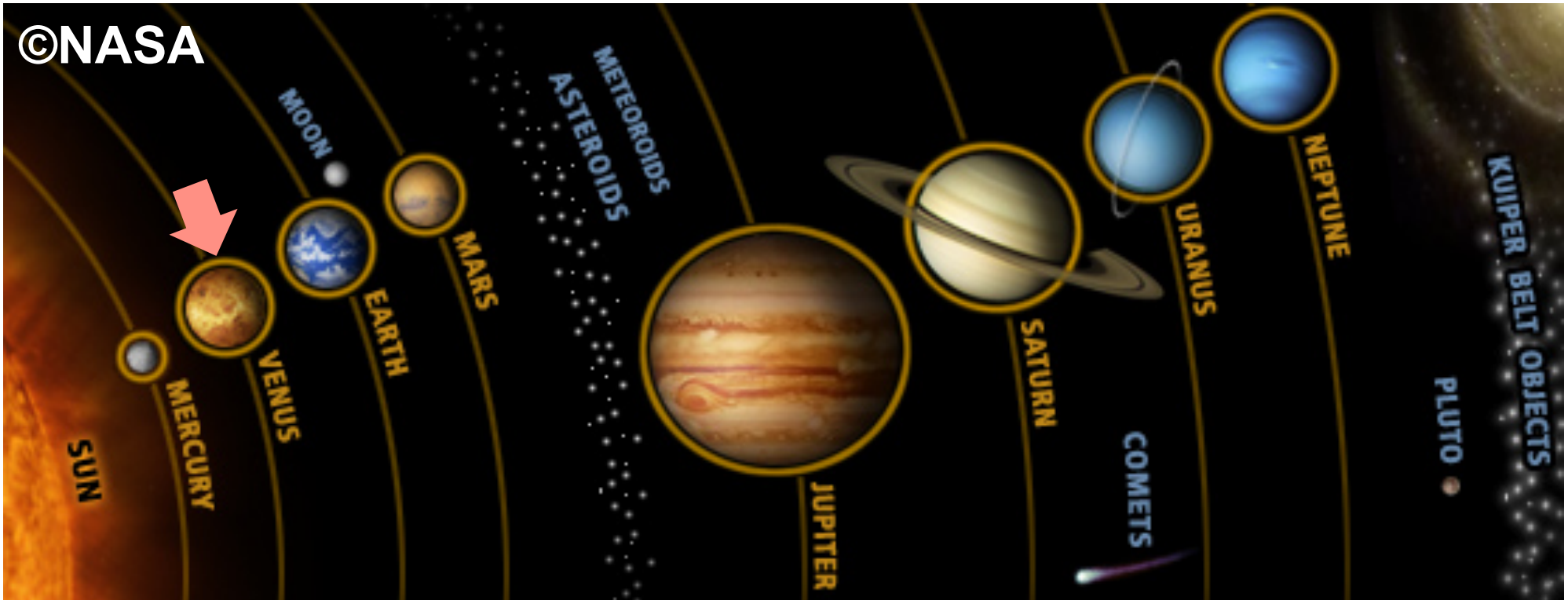
- そもそもどうやってわかったのか —初期の金星観測—

◆ 金星探査の歴史

◆ 赤外線による金星観測

- 探査機からの観測
- 地上望遠鏡でのさまざまな観測
- (時間があれば) 金星 $1.27\mu\text{m}$ O_2 大気光の地上観測

金星ってどんな星？

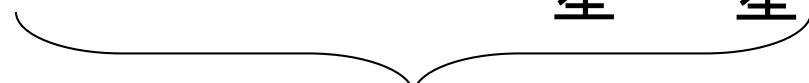


水星 金星 地球 火星



地球型惑星

木星 土星 天王星 海王星



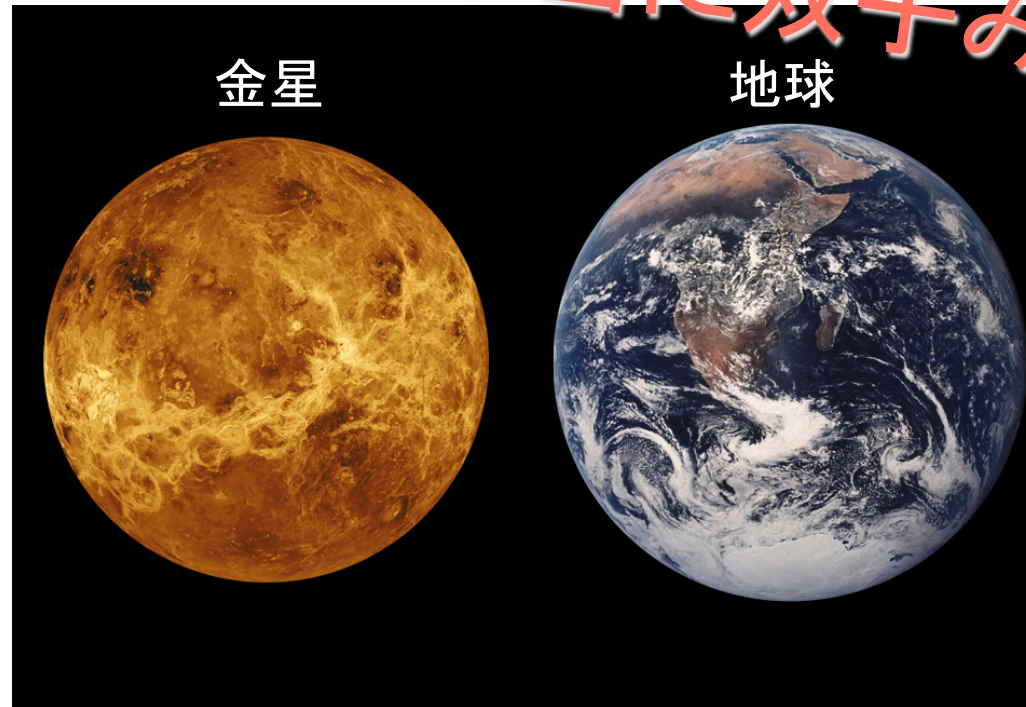
木星型惑星

(めい王星)

金星ってどんな星？



本当に双子みたい??



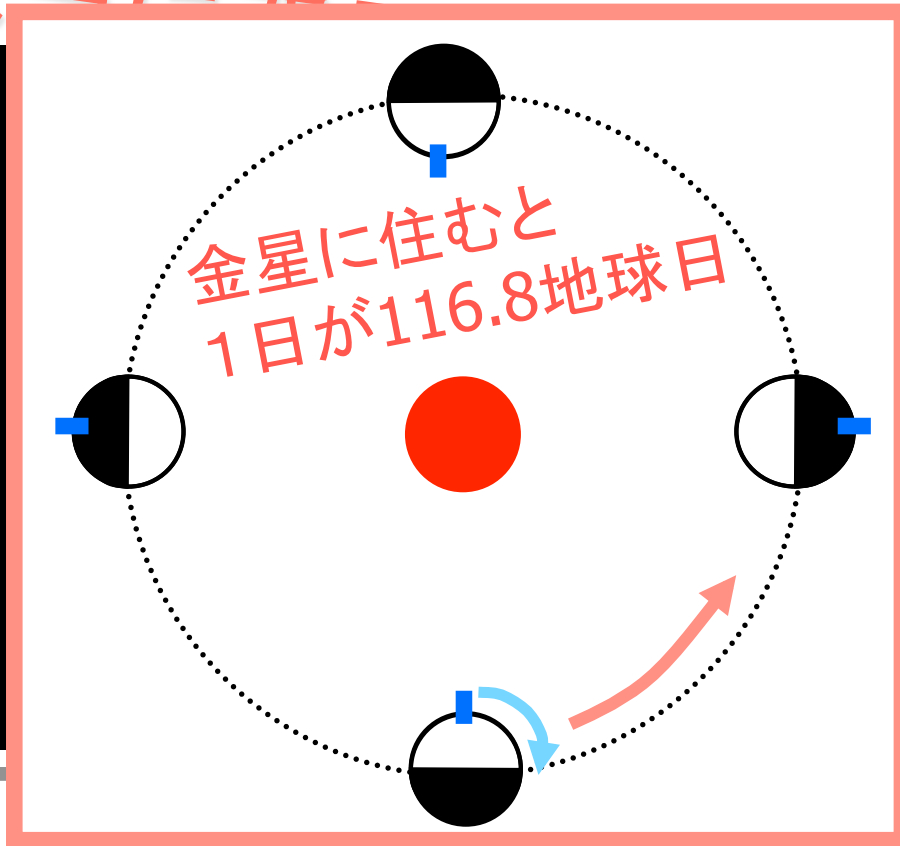
金星の自転周期は、
5832時間(243日)で自転の向きが**逆**！
公転周期は 224.7日



金星ってどんな星？



本当に...



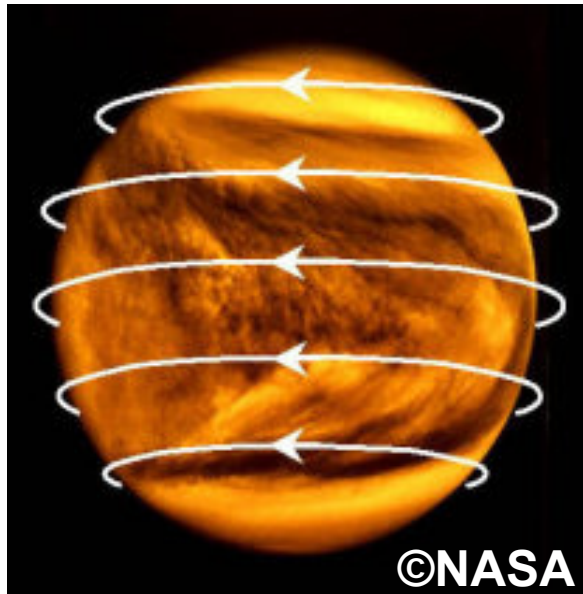
金星の自転周期は、
5832時間(243日)で自転の向きが**逆**！
公転周期は 224.7日



金星ってどんな星？



人工衛星が撮影した金星



- ・星が丸ごと雲に包まれている
(地面が見えない)
- ・雲が水と濃硫酸できている
- ・時速360km風が吹いている
“スーパーローテーション”

新幹線よりも速い
もうれつな風が
吹いているの



金星ってどんな星？

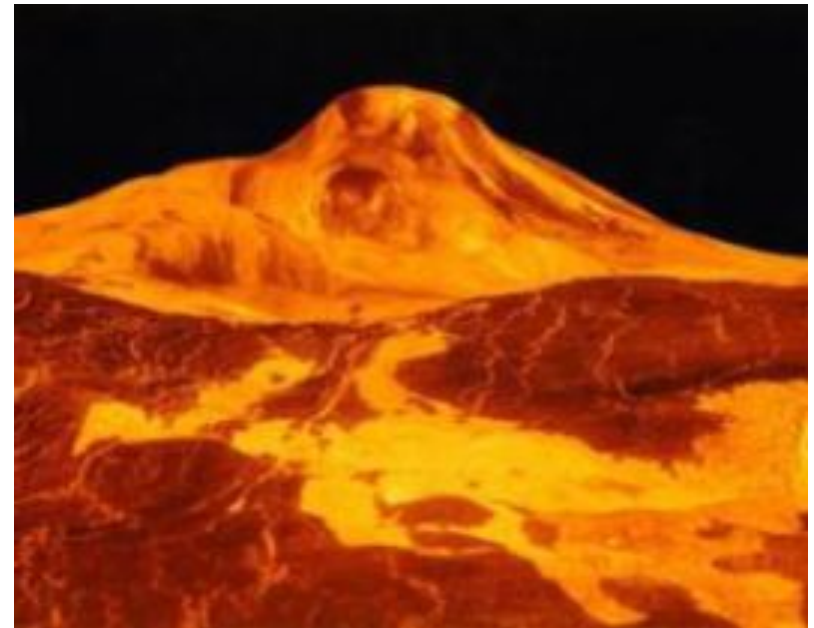


金星の地面 (CG図)

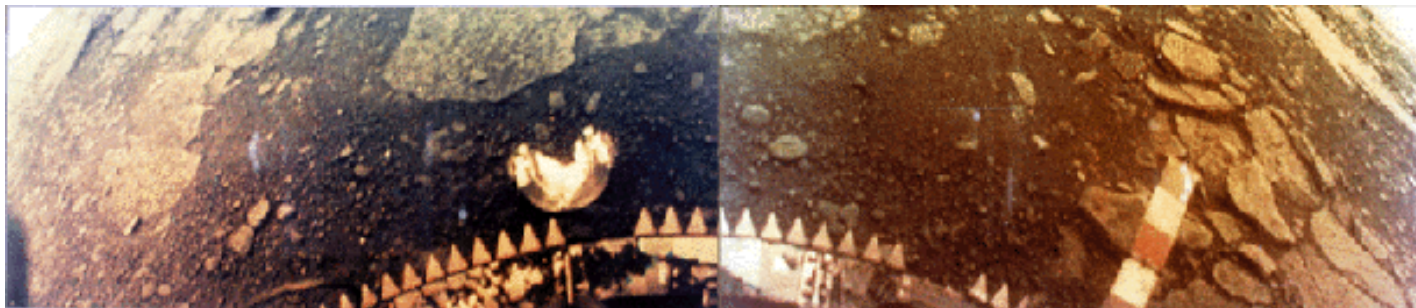
地面での気温： **460°C** (地球は15°C)
地面での気圧： **90 気圧** (地球の90倍)
空気の**96%**が**二酸化炭素** (地球は **0.037%**)



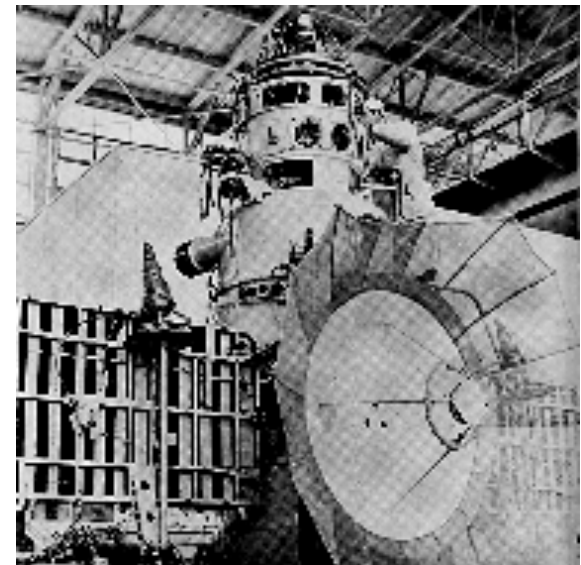
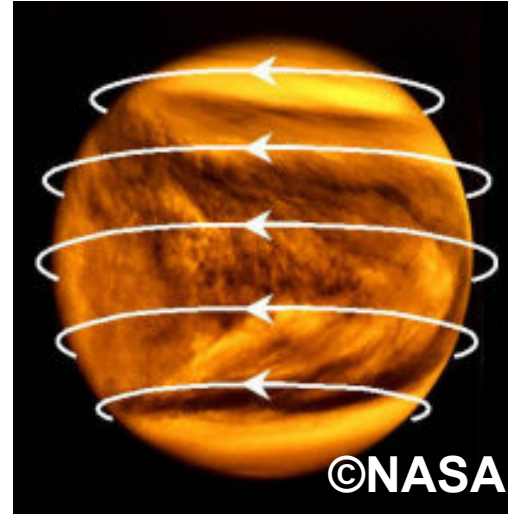
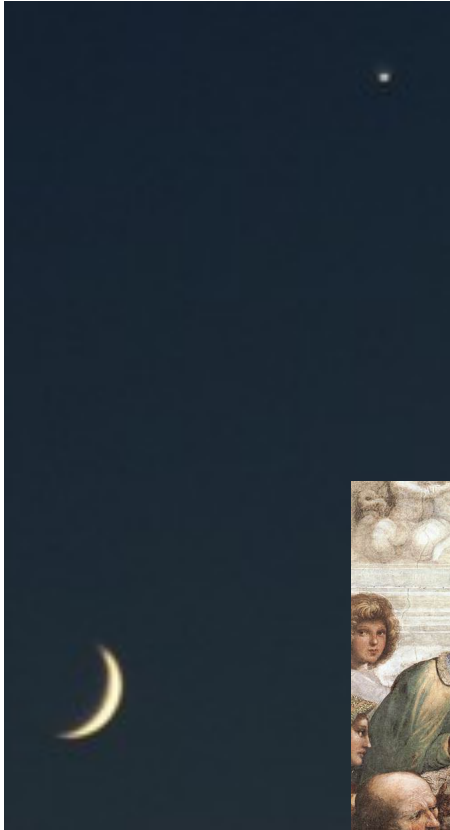
金星はもう**れつな温暖化**が進みきった世界



金星の地面 (着陸機の写真)



そもそもどうやってわかった？



金星の「発見」

内惑星である金星は日没後・夜明け前にしか見えない

古代において「明けの明星」と「宵の明星」は別の星と考えられていた



紀元前500年頃、ピタゴラスがこの2つの星が同じ惑星であると「発見」

金星に「アフロディーテ」と名付けた

(らしい)

ピタゴラス
[紀元前582-紀元前496]

金星の日面通過

金星が地球と太陽のちょうど間に入る現象

- 軌道傾斜角3.4度 (→地球から見て太陽離角9.6度)
- 軌道平面の交線 6月7日頃と12月9日頃
- 243年周期 (8年差の2回が対)

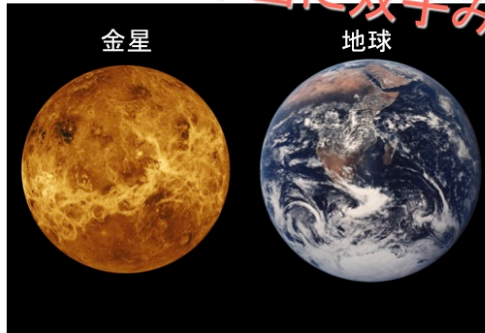
1639年12月4日

イギリスの天文学者・ホロックス(1618頃-1641)が初めて観測

- ◆太陽までの距離を測定 →1億km (当時としては精度よい)
 - 複数地点での日面通過開始時間・終了時間の僅かな差を測定
- ◆金星の「視直径」を測定 → 1'12" (現在の測定 : 9.7"-1'06")

次回は **2012年6月6日** →なにをしよう？

金星ってどんな星？



本当に双子みたい??

金星の自転周期は、
5832時間(243日)で自転の向きが逆！
公転周期は 224.7日



3

金星の自転周期・向き：

1962年

地球からのレーダー観測

スーパーローテーション：

1957年

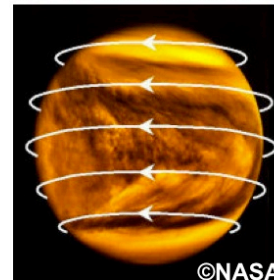
フランスのアマチュア天文家
による観測で発見

→1974年マリナー10で裏付け

金星ってどんな星？



人工衛星が撮影した金星



- ・星が丸ごと雲に包まれている
(地面が見えない)
- ・雲が水と濃硫酸できている
- ・時速360km風が吹いている
“スーパーローテーション”

新幹線よりも速い
もうれつな風が
吹いているの



5

金星ってどんな星？

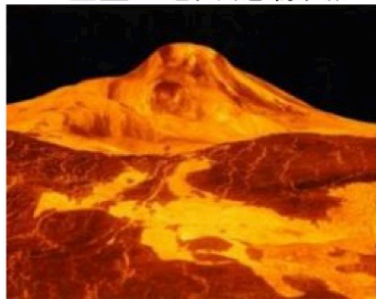


地面での気温： **460°C** (地球は15°C)
地面での気圧： **90 気圧** (地球の90倍)
空気の96%が**二酸化炭素** (地球は 0.037%)



金星はもうれつな温暖化が進みきった世界

金星の地面(想像図)



金星の地面(着陸機の写真)



1930年代～

近赤外域の観測始まる

→1964年の気球観測により
CO₂による強い吸収を確認

1956年

電波観測により300°C相当
の放射

→赤外観測では27°C程度

1976年

アレシボ天文台での観測か
ら地形を調べる試み

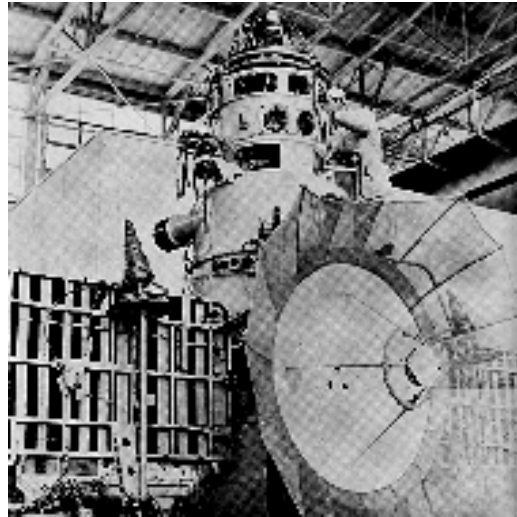
[Campbell et al., 1976]

金星探査の歴史

打上げ日	到着日前名	到達点	通過	科学成果
1961/02/12	05/19ベネラ1号	10万km以内[推定]	通過	
1962/08/27	12/14マリナー2号	3万5000km	通過	
1965/11/12	翌02/27ベネラ2号	2万4000km[推定]	通過	
1965/11/16	翌03/01ベネラ3号	衝突[推定]		
1967/06/12	10/18ベネラ4号	高度25km	通信途絶	温度・気圧・大気組成
1967/06/14	10/19マリナー5号	4000km	通過	温度・気圧・紫外線・太陽粒子・磁気
1969/01/05	05/16ベネラ5号	高度18km	着陸機通信途絶	
1969/01/10	05/17ベネラ6号	高度22km	着陸機通信途絶	
1970/08/17	12/15ベネラ7号	地表	着陸機:23分後通信途絶	地表温度・地表気圧
1972/03/27	07/22ベネラ8号	地表	着陸機:63分後通信途絶	地表温度・地表気圧・視界1km・雲・表土
1973/11/03	翌02/05マリナー10号	5768km	通過→水星	紫外撮像
1975/06/08	10/22ベネラ9号	地表・周回軌道	着陸機	地表撮影[初]
1975/06/14	10/25ベネラ10号	地表・周回軌道	着陸機	地表撮影
1978/05/20	12/04パイオニア・ ヴィーナス1号	周回軌道	(~1992/08)	雲・地形・赤外線・紫外線・ 大気組成・プラズマ・磁気・電離圏
1978/08/08	12/09パイオニア・ ヴィーナス2号	地表	本体・4機のプローブ:最長68分 後通信途絶	大気組成・太陽放射・赤外線・ 雲粒子・温度・気圧・加速度
1978/09/09	12/25ベネラ11号	地表・双曲線軌道	着陸機	地表撮影[失敗]
1978/09/12	12/21ベネラ12号	地表・双曲線軌道	着陸機	地表撮影[失敗]
1981/10/31	翌03/01ベネラ13号	地表・双曲線軌道	着陸機	地表のカラー撮影・表土の分析
1981/11/04	翌03/05ベネラ14号	地表・双曲線軌道	着陸機	地表のカラー撮影・表土[キャップ]の分析
1983/06/02	10/10ベネラ15号	周回軌道	(~1984/07)	レーダーマッピング
1983/06/07	10/14ベネラ16号	周回軌道	(~1984/07)	レーダーマッピング
1984/12/15	翌06/11ベガ1号	高度20km・通過	着陸機:通信途絶 母船:ハレー彗星 気球:46時間以上稼働	温度・気圧・風速・密度
1984/12/21	翌06/15ベガ2号	地表・通過	着陸機:56分後通信途絶 母船:ハレー彗星 気球:46時間以上稼働	温度・気圧・風速・密度
1989/10/18	翌02/10ガリレオ	1万6130km	通過→木星	近赤外撮像
1990/05/04	08/10マゼラン	周回軌道	(~1992/09)	レーダーマッピング(98%)
1997/10/15	翌04/26カッシーニ	287.2km	通過	
2004/08/03	-メッセンジャー-	-	通過→水星 - 2006/10/12: 2992km - 2007/6/5: 338km	可視赤外撮像・紫外X線分光
2005/11/09	翌05/07ヴィーナス・ エクスプレス	周回軌道	稼働中	紫外可視赤外分光撮像・磁力計・電波科学
2010/05/21	12/07あかつき	550km	軌道投入失敗	

ベネラ1~16号

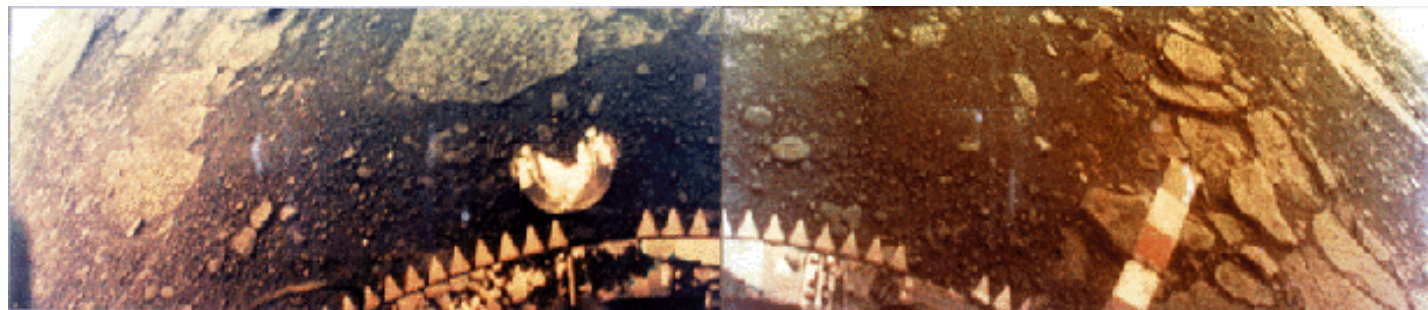
打上げ日	名前
1961/02/12	ベネラ1号
1962/08/27	マリナー2号
1965/11/12	ベネラ2号
1965/11/16	ベネラ3号
1967/06/12	ベネラ4号
1967/06/14	マリナー5号
1969/01/05	ベネラ5号
1969/01/10	ベネラ6号
1970/08/17	ベネラ7号
1972/03/27	ベネラ8号
1973/11/03	マリナー10号
1975/06/08	ベネラ9号
1975/06/14	ベネラ10号
1978/05/20	パイオニア・ ヴィーナス1号
1978/08/08	パイオニア・ ヴィーナス2号
1978/09/09	ベネラ11号
1978/09/12	ベネラ12号
1981/10/31	ベネラ13号
1981/11/04	ベネラ14号
1983/06/02	ベネラ15号
1983/06/07	ベネラ16号
1984/12/15	ベガ1号
1984/12/21	ベガ2号
1989/10/18	ガリレオ
1990/05/04	マゼラン
1997/10/15	カッシーニ
2004/08/03	メッセンジャー
2005/11/09	ヴィーナス・ エクスプレス
2010/05/21	あかつき



Venera8号

打上げ国：旧ソビエト連邦
 打上げ年：1961~1983年

- 4 燃え尽きる前にプローブ放出しデータ取得
大気主成分CO2を確認
- 7 地表面到達 23分で高温高圧を確認
- 8 1時間生き残り、岩石・太陽光・風を調査
- 9,10
初の地表写真、風・雲高度・大気組成・雷？
「地球中緯度での曇った冬の日くらい」
- 13,14
カラー写真、表土の分析（キャップ！）
- 15,16
周回軌道からレーダーマッピング
8ヶ月で25%カバー（分解能: 1-2km）



Venera13号が撮った地表面の様子

マリナー2, 5, 10号

打上げ国：アメリカ

打上げ年：1962～1973年

打上げ日	名前
1961/02/12	ベネラ1号
1962/08/27	マリナー2号
1965/11/12	ベネラ2号
1965/11/16	ベネラ3号
1967/06/12	ベネラ4号
1967/06/14	マリナー5号
1969/01/05	ベネラ5号
1969/01/10	ベネラ6号
1970/08/17	ベネラ7号
1972/03/27	ベネラ8号
1973/11/03	マリナー10号
1975/06/08	ベネラ9号
1975/06/14	ベネラ10号
1978/05/20	パイオニア・ ヴィーナス1号
1978/08/08	パイオニア・ ヴィーナス2号
1978/09/09	ベネラ11号
1978/09/12	ベネラ12号
1981/10/31	ベネラ13号
1981/11/04	ベネラ14号
1983/06/02	ベネラ15号
1983/06/07	ベネラ16号
1984/12/15	ベガ1号
1984/12/21	ベガ2号
1989/10/18	ガリレオ
1990/05/04	マゼラン
1997/10/15	カッシーニ
2004/08/03	メッセンジャー
2005/11/09	ヴィーナス・ エクスプレス
2010/05/21	あかつき



2

金星距離3万5000kmを通過

初の惑星フライバイ

磁場計測より自転が遅いことを示唆

5

金星距離4000kmをフライバイ

大気主成分がCO₂であることを確認

電波掩蔽により金星の高温高圧環境を確認

10

金星距離5750kmをフライバイ

二つの惑星に接近した初の探査機

紫外線撮像

スーパーローテーションの確認

パイオニア・ヴィーナス1, 2号

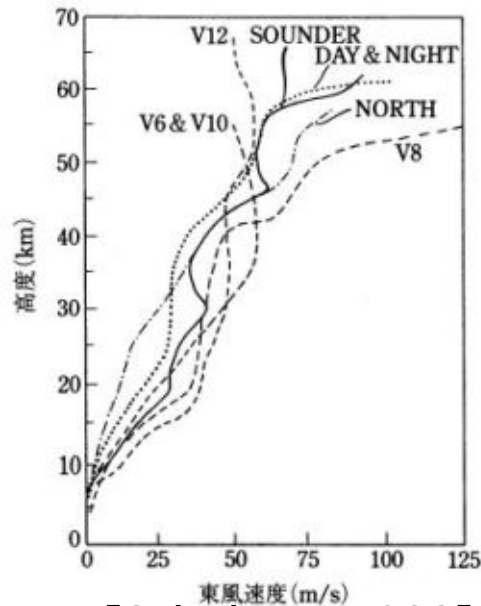
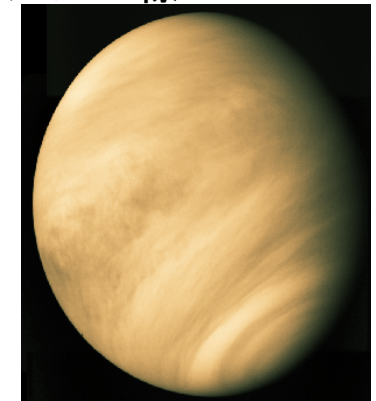
打上げ日	名前
1961/02/12	ベネラ1号
1962/08/27	マリナー2号
1965/11/12	ベネラ2号
1965/11/16	ベネラ3号
1967/06/12	ベネラ4号
1967/06/14	マリナー5号
1969/01/05	ベネラ5号
1969/01/10	ベネラ6号
1970/08/17	ベネラ7号
1972/03/27	ベネラ8号
1973/11/03	マリナー10号
1975/06/08	ベネラ9号
1975/06/14	ベネラ10号
1978/05/20	パイオニア・ヴィーナス1号
1978/08/08	パイオニア・ヴィーナス2号
1978/09/09	ベネラ11号
1978/09/12	ベネラ12号
1981/10/31	ベネラ13号
1981/11/04	ベネラ14号
1983/06/02	ベネラ15号
1983/06/07	ベネラ16号
1984/12/15	ベガ1号
1984/12/21	ベガ2号
1989/10/18	ガリレオ
1990/05/04	マゼラン
1997/10/15	カッシーニ
2004/08/03	メッセンジャー
2005/11/09	ヴィーナス・エクスプレス
2010/05/21	あかつき



打上げ国：アメリカ
 打上げ年：1978年

1
 Orbiterとして14年間周回軌道に
 雲分布、赤外放射、紫外撮像
 地表（レーダー）

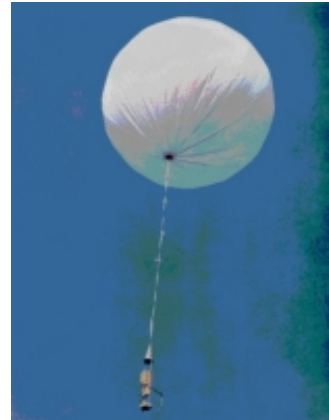
→イシュタル大陸・アフロディテ大陸発見
 プラズマ、磁場、電子温度、ガンマ線
 質量分析



[Schubert, 1983]

2
 Busと4つの投下Probeを投下
 雲粒子、大気組成、温度、圧力、風速
 赤外放射、太陽風

ベガ1, 2号



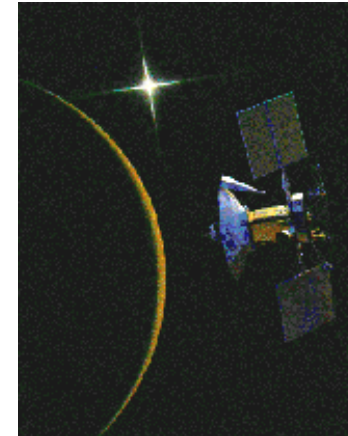
打上げ国：旧ソビエト連邦
打上げ年：1984年

着陸機・気球・母船で構成
母船はハレー彗星観測

気球は2地球日稼動
気温・気圧・風速・密度観測

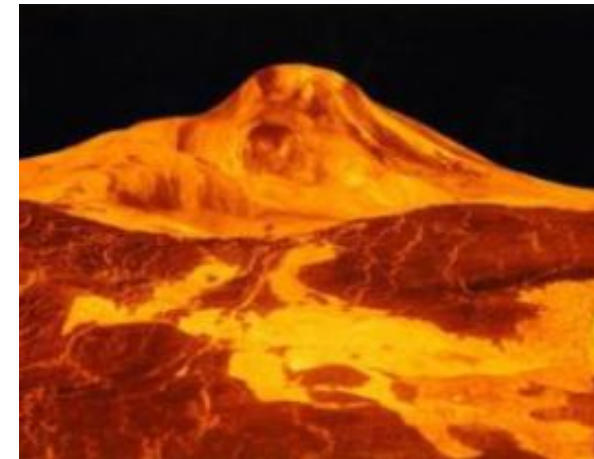
着陸機
アフロディテ大陸東部に着陸し
大気と表層を調査

マゼラン



打上げ国：アメリカ
打上げ年：1990年

全地表の98%を観測



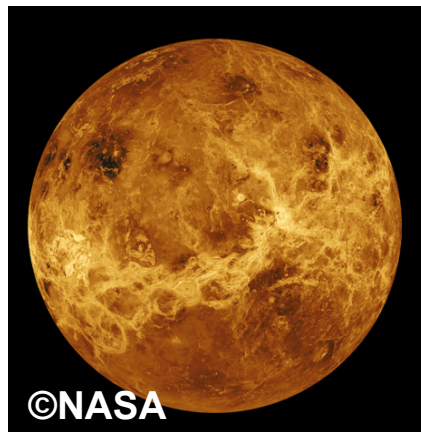
(金星地形CG画像)

打上げ日	名前
1961/02/12	ベネラ1号
1962/08/27	マリナー2号
1965/11/12	ベネラ2号
1965/11/16	ベネラ3号
1967/06/12	ベネラ4号
1967/06/14	マリナー5号
1969/01/05	ベネラ5号
1969/01/10	ベネラ6号
1970/08/17	ベネラ7号
1972/03/27	ベネラ8号
1973/11/03	マリナー10号
1975/06/08	ベネラ9号
1975/06/14	ベネラ10号
1978/05/20	パイオニア・ ヴィーナス1号
1978/08/08	パイオニア・ ヴィーナス2号
1978/09/09	ベネラ11号
1978/09/12	ベネラ12号
1981/10/31	ベネラ13号
1981/11/04	ベネラ14号
1983/06/02	ベネラ15号
1983/06/07	ベネラ16号
1984/12/15	ベガ1号
1984/12/21	ベガ2号
1989/10/18	ガリレオ
1990/05/04	マゼラン
1997/10/15	カッシーニ
2004/08/03	メッセンジャー
2005/11/09	ヴィーナス・ エクスプレス
2010/05/21	あかつき

1983年の Break through !

- ◆ 赤外線技術の発達により、雲の下の大気の様子を見る方法が発見された。

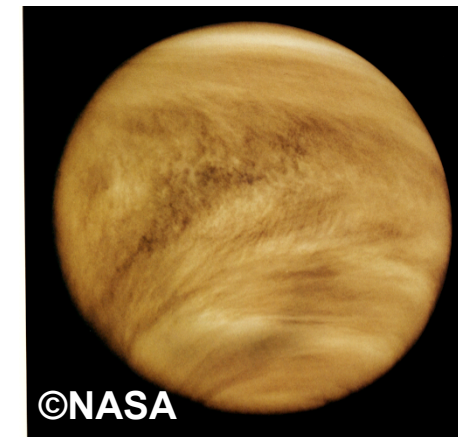
[Allen and Crawford, 1983]



レーダーで見た
地形図



近赤外線で見た
雲の下の大気

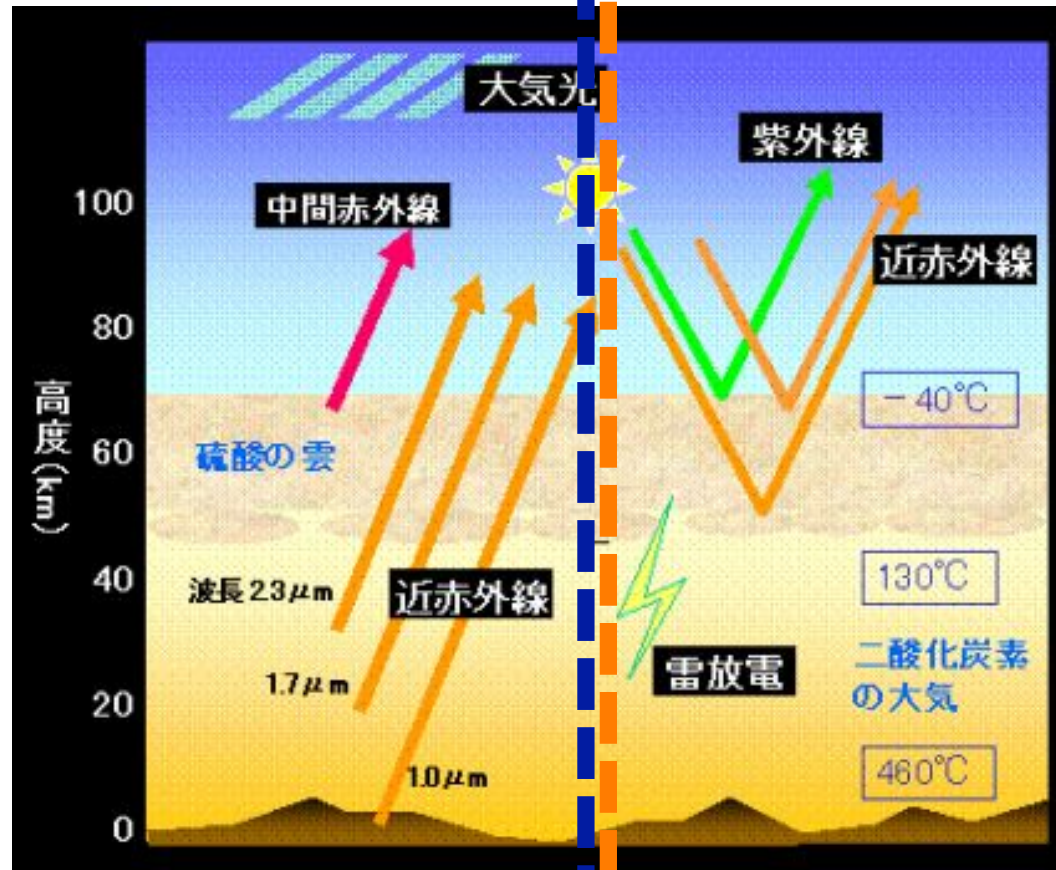


紫外線で見た
硫酸の雲

近赤外での金星観測

夜面

昼面



ガリレオ

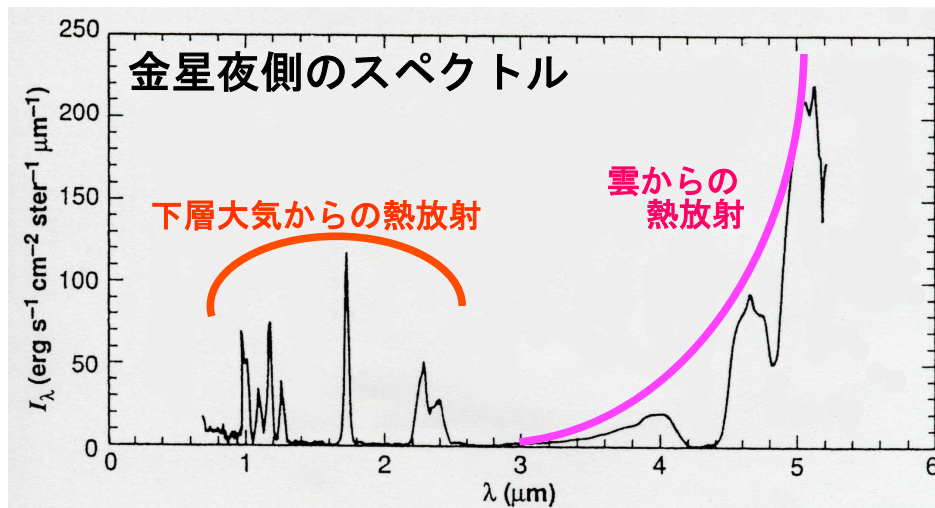
打上げ日	名前
1961/02/12	ベネラ1号
1962/08/27	マリナー2号
1965/11/12	ベネラ2号
1965/11/16	ベネラ3号
1967/06/12	ベネラ4号
1967/06/14	マリナー5号
1969/01/05	ベネラ5号
1969/01/10	ベネラ6号
1970/08/17	ベネラ7号
1972/03/27	ベネラ8号
1973/11/03	マリナー10号
1975/06/08	ベネラ9号
1975/06/14	ベネラ10号
1978/05/20	パイオニア・ ヴィーナス1号
1978/08/08	パイオニア・ ヴィーナス2号
1978/09/09	ベネラ11号
1978/09/12	ベネラ12号
1981/10/31	ベネラ13号
1981/11/04	ベネラ14号
1983/06/02	ベネラ15号
1983/06/07	ベネラ16号
1984/12/15	ベガ1号
1984/12/21	ベガ2号
1989/10/18	ガリレオ
1990/05/04	マゼラン
1997/10/15	カッシーニ
2004/08/03	メッセンジャー
2005/11/09	ヴィーナス・ エクスプレス
2010/05/21	あかつき



打上げ国：アメリカ

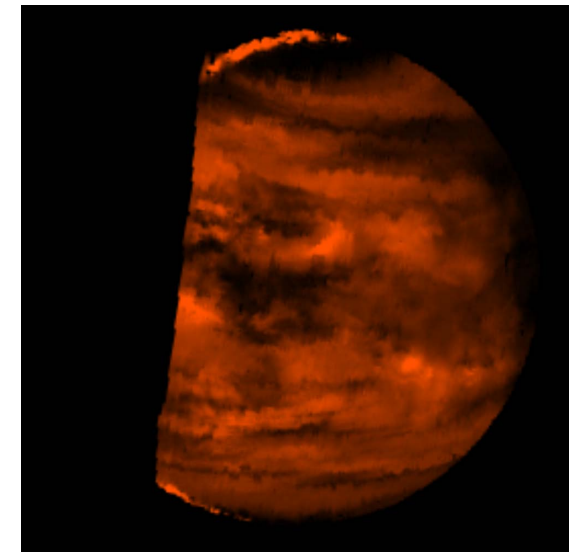
打上げ年：1989年

木星に向かうためのフライバイ時に金星観測
紫外フィルタで硫酸雲撮像 → 風速100m/s
赤外線2.3 μ mで低高度の雲画像



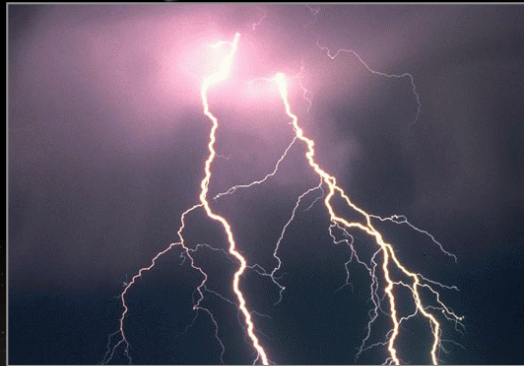
[Carlson et al., 1991]

赤外2.3 μ mでの夜側



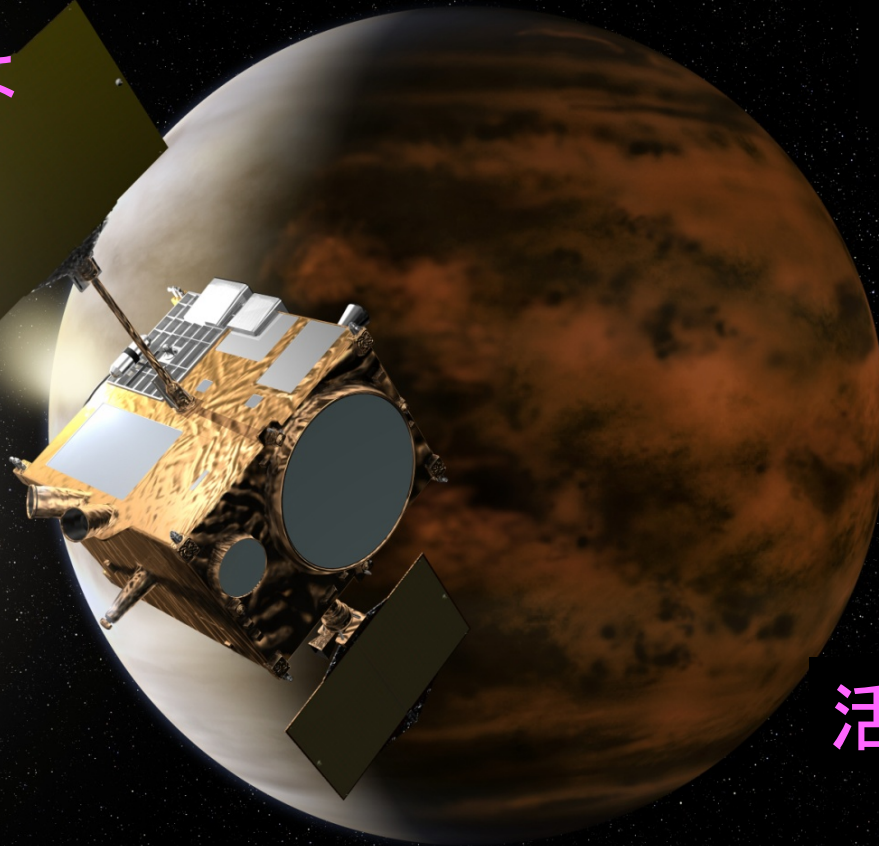
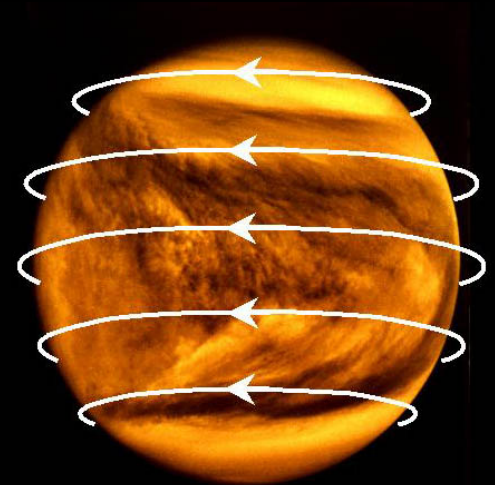
- 赤外線観測器を搭載した金星探査機の開発
- Venus Express, あかつき

あかつき(PLANET-C)



硫酸の雲はどのように作られるのか
雷はあるか

大気の超回転はなぜ起こるのか



活火山はあるか

金星を見る 6つの目

異なる波長(色)で見れば異なる高度の気象が見える

雷・大気光カメラ(LAC)

雷発光
大気光

中間赤外カメラ(LIR)

雲頂温度
雲頂高度
成層圏の循環

紫外イメージャ(UVI)

二酸化硫黄
未知化学物質
成層圏の循環

1 μ mカメラ(IR1)

地表物質
活火山
水蒸気

2 μ mカメラ(IR2)

下層雲
一酸化炭素
対流圏の循環

地上局へ

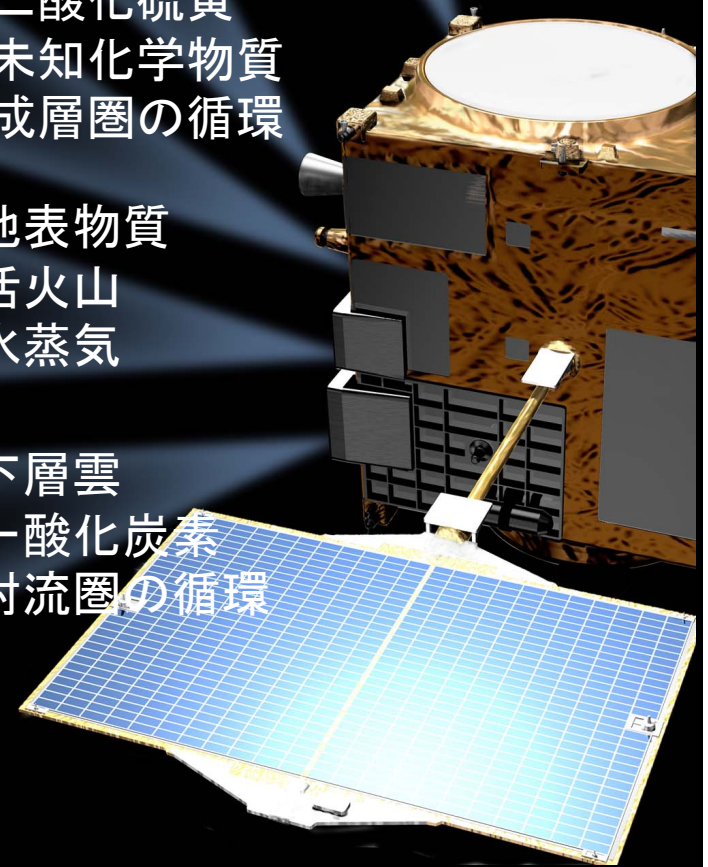
金星大気

電波

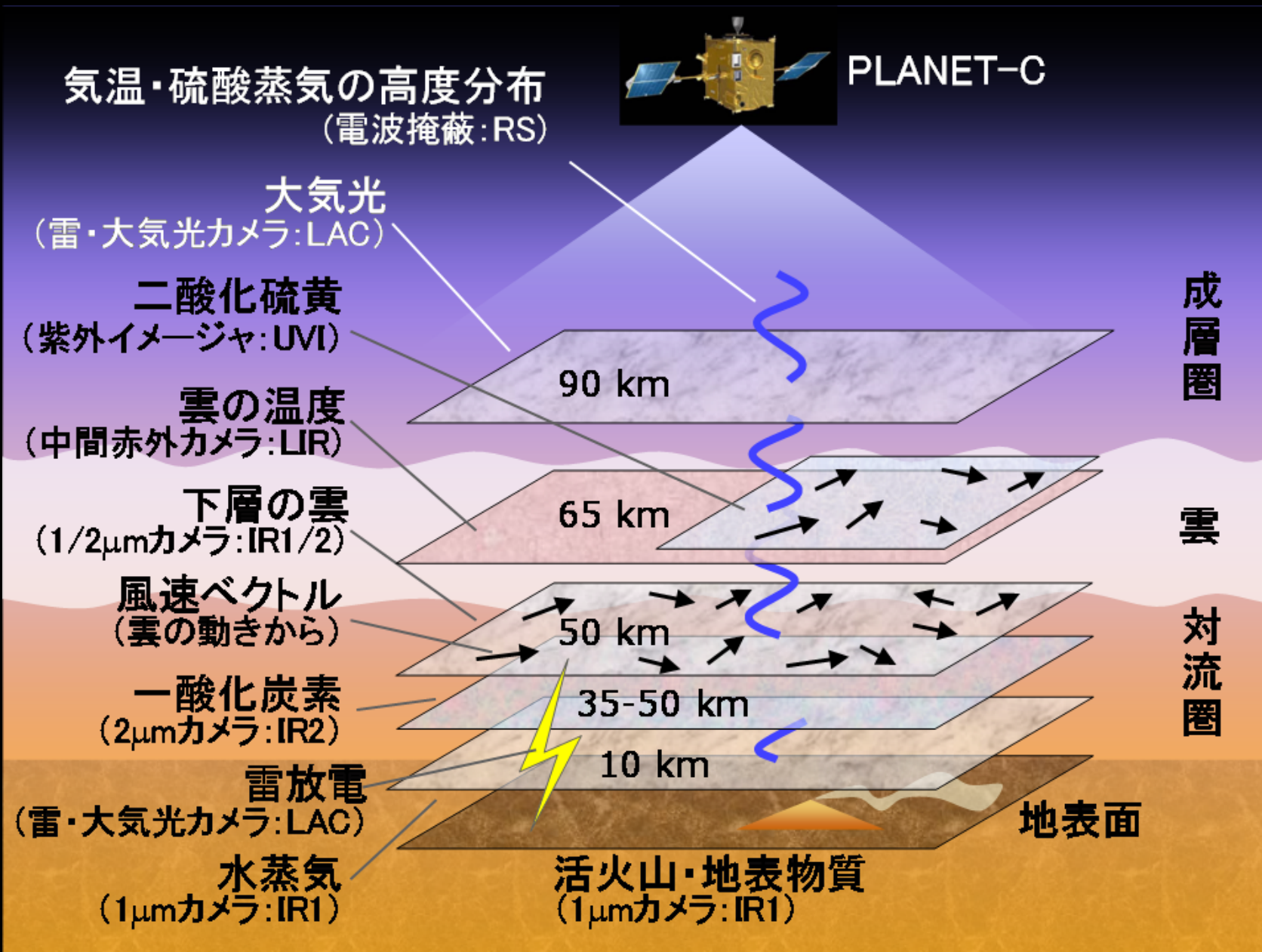
探査機
の運動

大気の鉛直構造

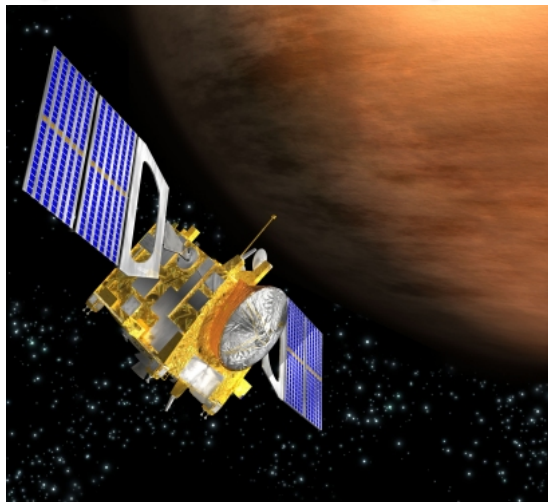
電波科学(RS)



3次元の映像化



ヴィーナス・エクスプレス(VEX)



打上げ国：ヨーロッパ

打上げ年：2005年

2001年計画開始 →Mars Express と Rosetta
の観測装置を金星用に調整して使用

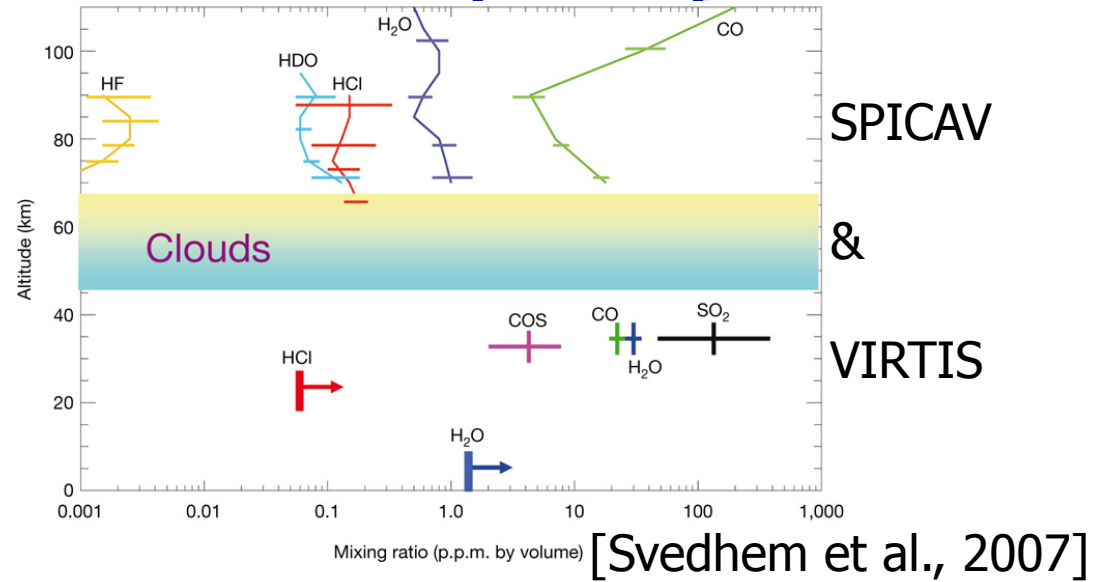
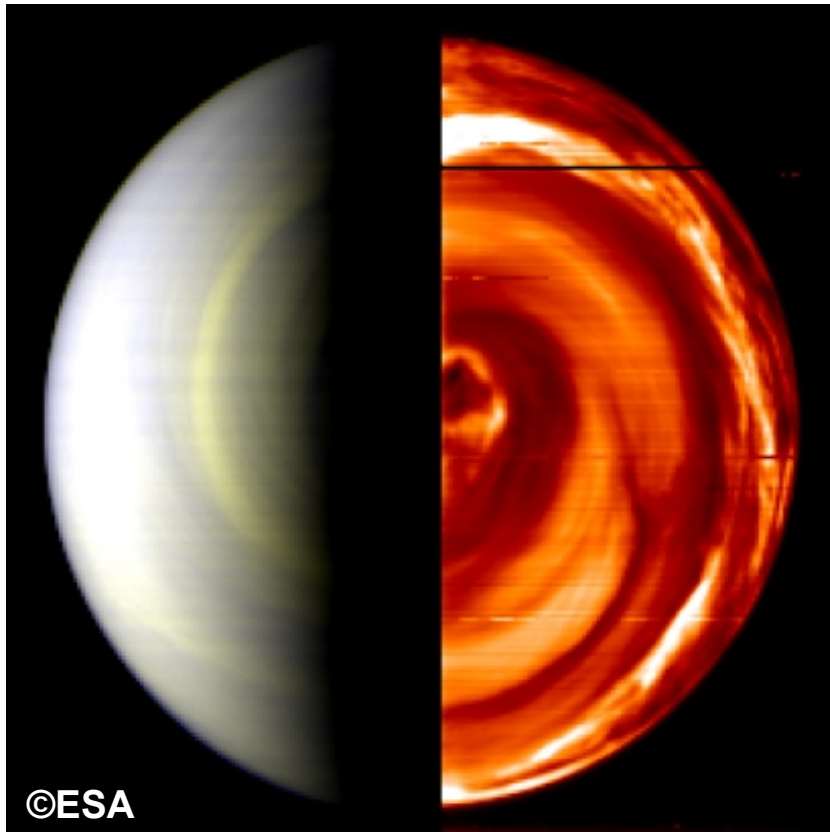
24時間の極軌道（金近点は北極側）

搭載観測装置

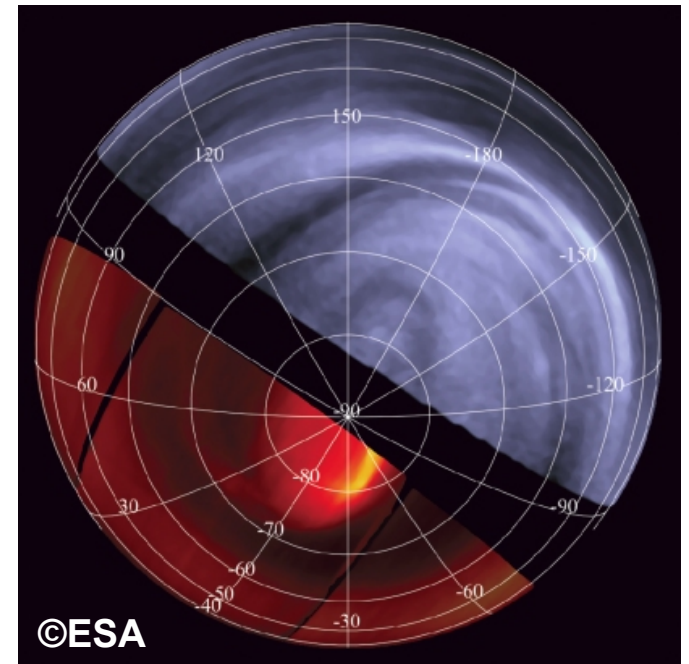
- ・ 高波長分解能赤外フーリエ分光計（PFS）
- ・ 可視-赤外分光撮像装置（VIRTIS）
- ・ 直下視/掩蔽観測用紫外-赤外分光（SPICAV）
- ・ 紫外/可視カメラ（VMC）
- ・ プラズマ/高速中性粒子分析（ASPERA-4）
- ・ 磁力計（MAG）
- ・ 電波科学観測（VeRa）

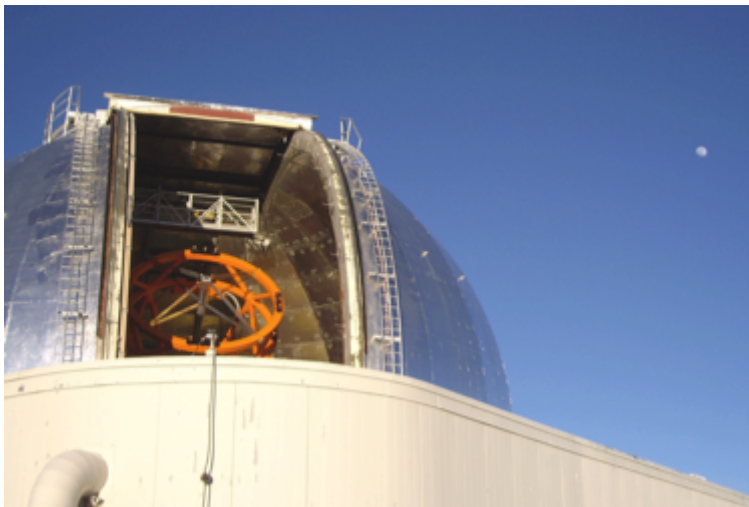
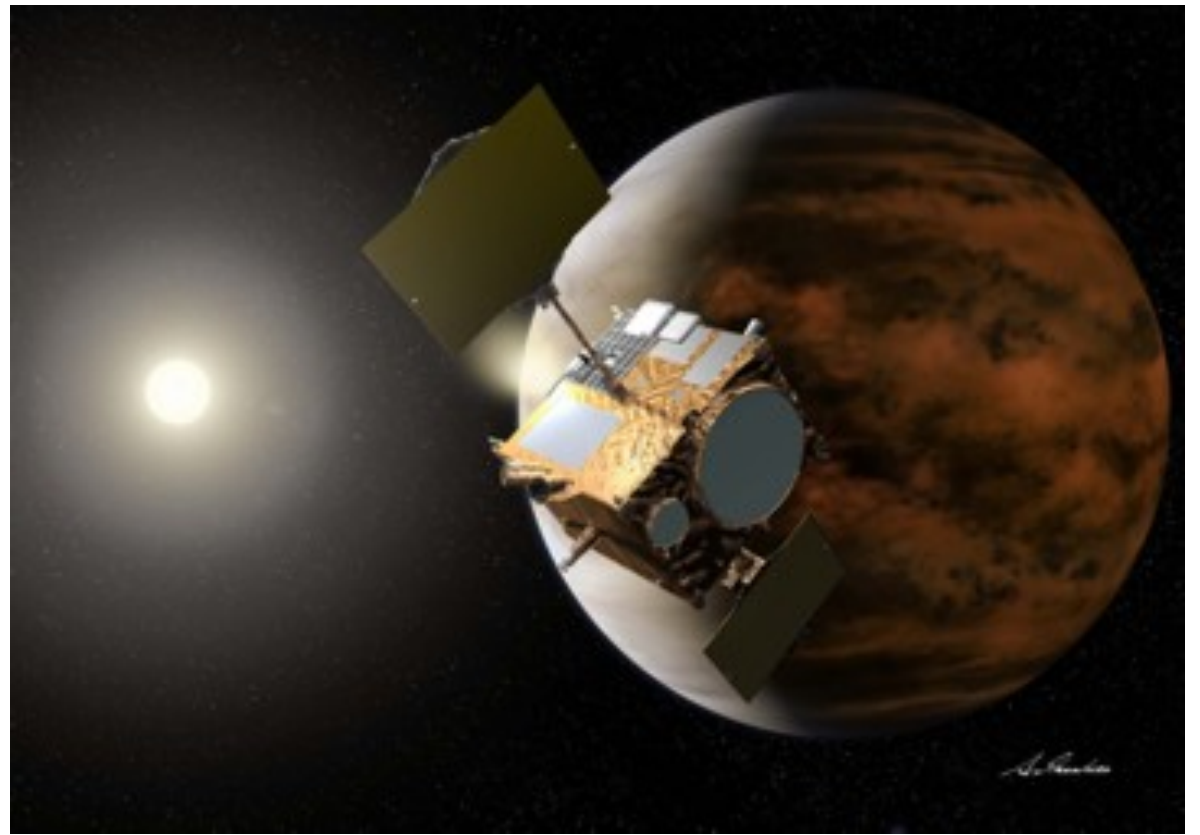
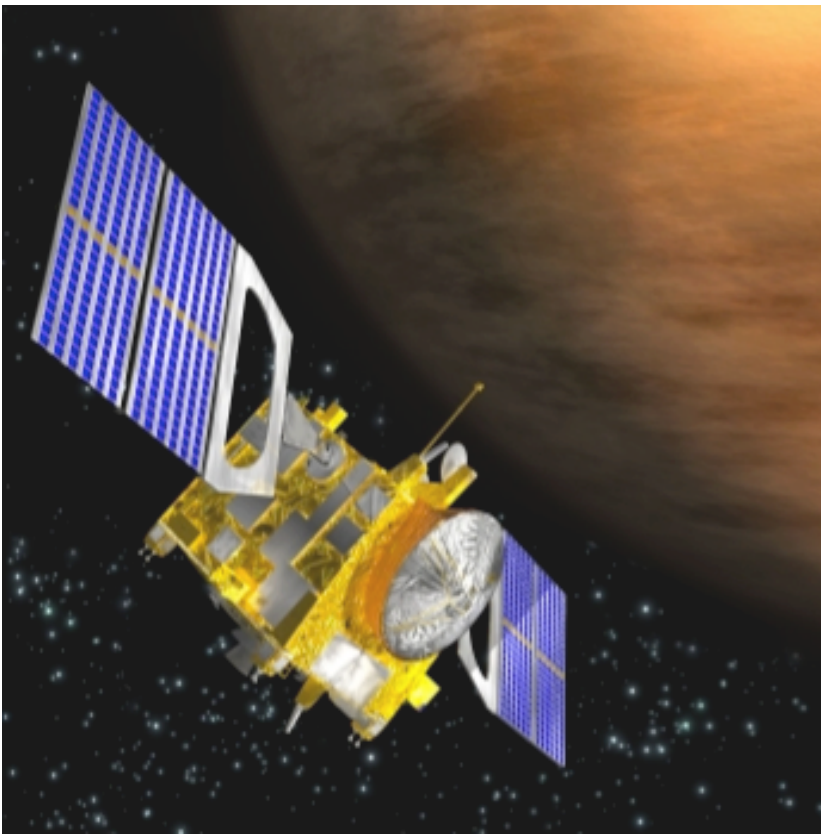
打上げ日	名前
1961/02/12	ベネラ1号
1962/08/27	マリナー2号
1965/11/12	ベネラ2号
1965/11/16	ベネラ3号
1967/06/12	ベネラ4号
1967/06/14	マリナー5号
1969/01/05	ベネラ5号
1969/01/10	ベネラ6号
1970/08/17	ベネラ7号
1972/03/27	ベネラ8号
1973/11/03	マリナー10号
1975/06/08	ベネラ9号
1975/06/14	ベネラ10号
1978/05/20	パイオニア・ ヴィーナス1号
1978/08/08	パイオニア・ ヴィーナス2号
1978/09/09	ベネラ11号
1978/09/12	ベネラ12号
1981/10/31	ベネラ13号
1981/11/04	ベネラ14号
1983/06/02	ベネラ15号
1983/06/07	ベネラ16号
1984/12/15	ベガ1号
1984/12/21	ベガ2号
1989/10/18	ガリレオ
1990/05/04	マゼラン
1997/10/15	カッシーニ
2004/08/03	メッセンジャー
2005/11/09	ヴィーナス・ エクスプレス
2010/05/21	あかつき

ヴィーナス・エクスプレス(VEX)



金星雲模様
VMC紫外
(365nm)画像
&
VIRTIS赤外
(5mm)画像





地上観測と探査機 の連携

VEXでのキャンペーン観測

Project Scientistからの
呼びかけ



Support Investigatorによる
地上観測の組織化



共同観測の実施



解析1



地上観測特集号の出版



解析2

地上観測キャンペーン: 2007/5/23-6/9

◆ 2007/4~8: 軌道投入後1年

- 4ヶ月で約20チームが観測
- 欧:米:日:豪 = 12:4:4:1
- 可視、近赤外、中間赤外、サブミリ



VEXでのキャンペーン観測

●紫外 ●可視 ●近赤外 ●中間赤外 ●電波

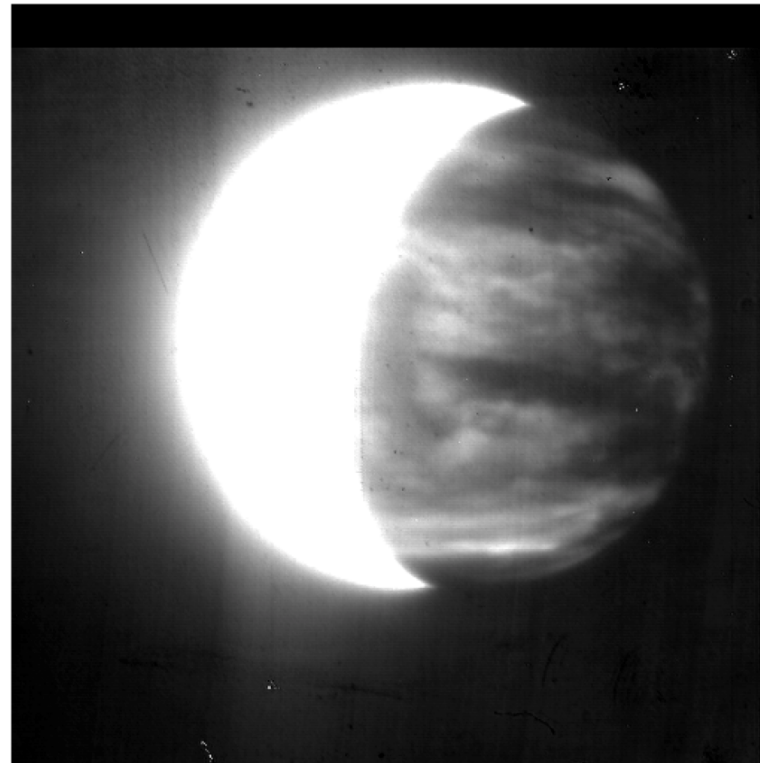
	VEX	地上望遠鏡	あかつき
地面	● VIRTIS:地形	● 地形	● IR1
下層大気	● VIRTIS:雲・微量成分	● 雲・微量成分	● IR2:雲・CO ● USO:温度
雲層	● VMC	● 風 ● 微量成分 ● 温度	● UVI:SO ₂ ● IR1/IR2 ● LIR:温度 ● USO:温度
上層大気	● VIRTIS:大気光 ● SPICAV:温度	● ● 大気光 ● ● ● 風 ● ● 微量成分 ● 温度	● LAC:雷・大気光 ● USO:温度

近赤外撮像観測

E. Young
SpeX/IRTF

Cloud Tracking at 2.25 μm

Basic Idea: look for displacements in cloud fields & estimate wind velocities over timescales of 40 min to 3.5 hrs



Young & Bullock • Aussois • June 2010

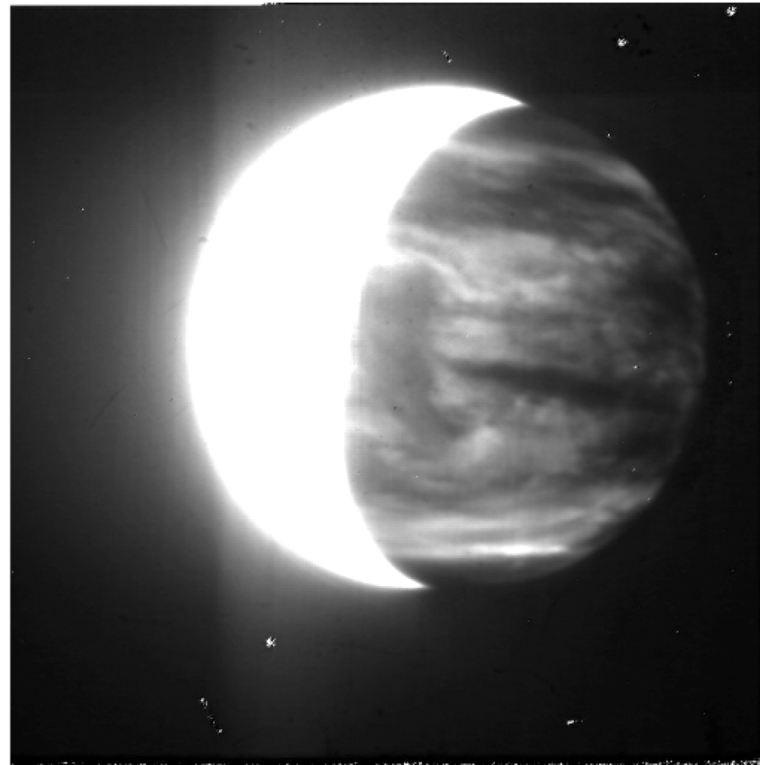


近赤外撮像観測

E. Young
SpeX/IRTF

Cloud Tracking at 2.25 μm

Basic Idea: look for displacements in cloud fields & estimate wind velocities over timescales of 40 min to 3.5 hrs

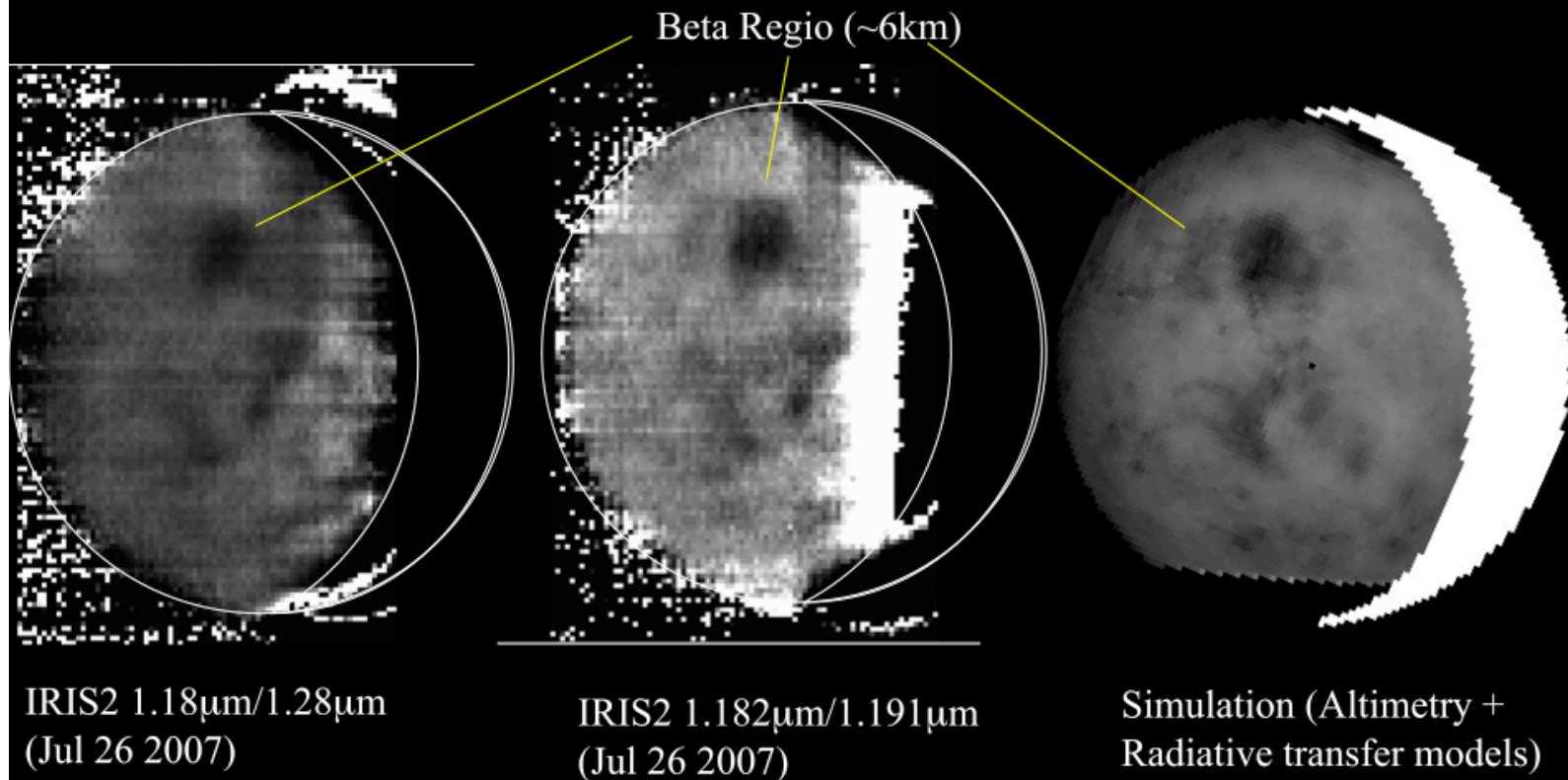


ディスク中心決定時の誤差:
 $\pm 6.5 \sim 15 \text{ m/s}$
相関から風速導出時の誤差:
朝 $\pm 2 \text{ m/s}$ 程度
夕 $\pm 7 \text{ m/s}$ 程度
高緯度に行くほど誤差増

近赤外分光観測の解析

J. Bailey
IRIS2/AAT

Surface Imaging ($1.18\mu\text{m}$)



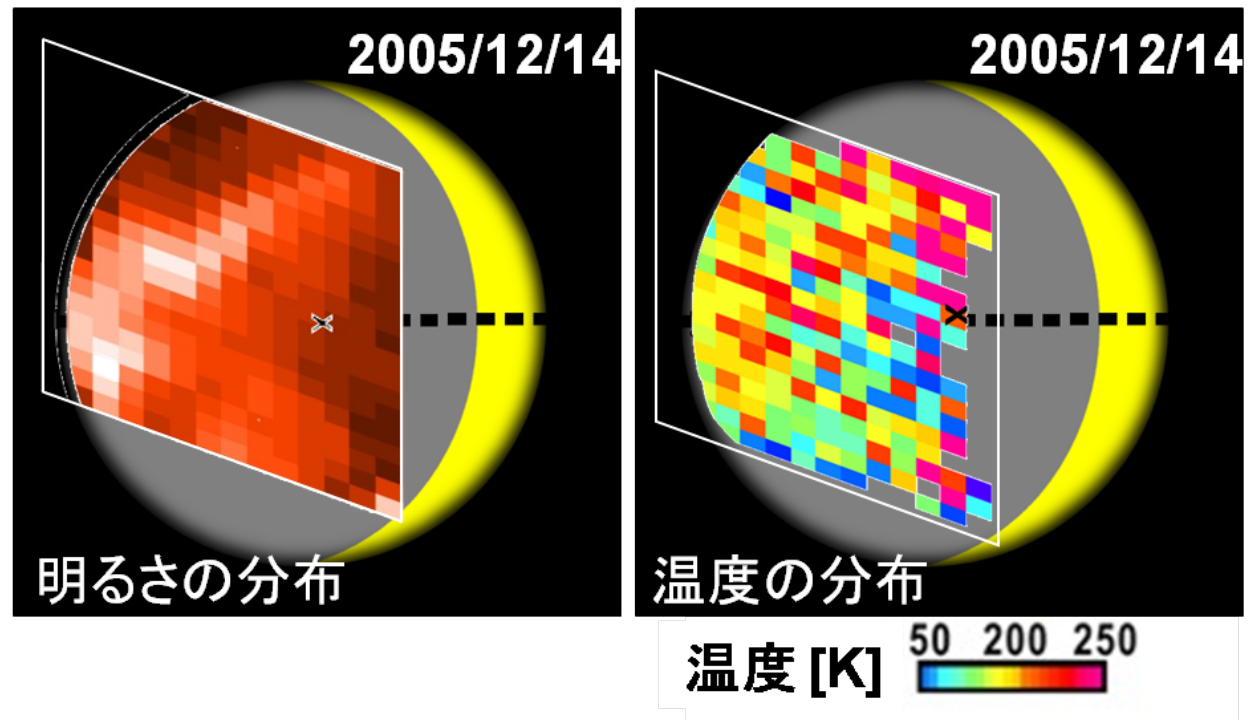
Bailey et al., 2008, *Plan. Space Sci.*, **56**, 1385.

酸素分子の 光の観測

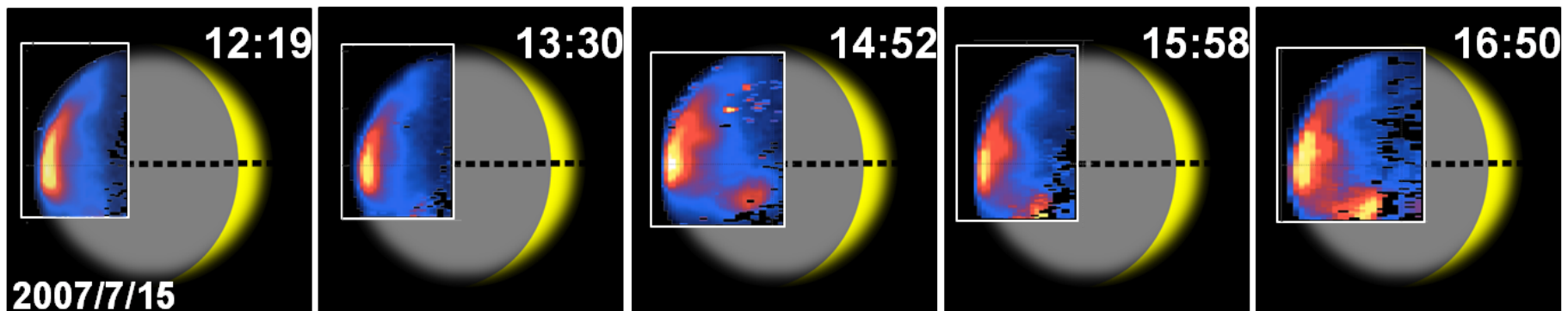
(右)1.27 μm 大気光スペクトルの解析から、光っている酸素分子の温度を求めた

- 明るい領域では、暗い領域よりも平均的に温度が高い
- 沈み込み帯で酸素が光っていることの**観測的な証拠**

高度100kmでの温度の地図を求めた



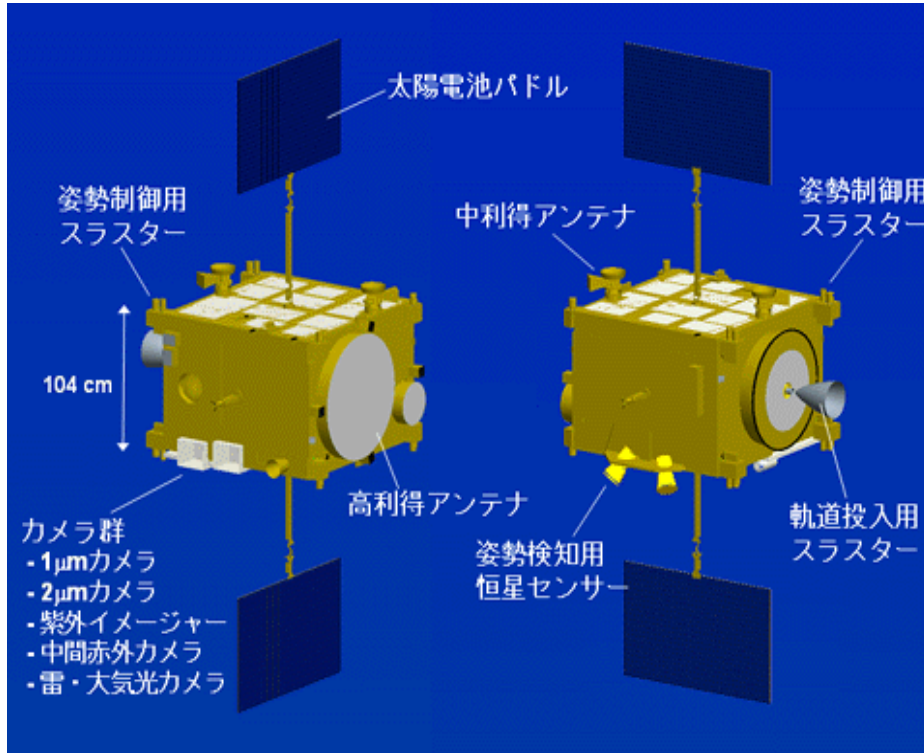
モニタリング観測で大気光の明るさの変化を捕えた



最後に「あかつき」の観測



「あかつき」の衛星諸元



「あかつき」主要諸元

形状・寸法	2翼式太陽電池パドルを有する箱形 (1.04m × 1.45m × 1.40m)
予定軌道	金星周回楕円軌道 近金点高度: 300km 遠金点高度: 約8万km 軌道周期: 30時間 軌道傾斜角: 172度
ミッション期間	金星到着後 約2地球年
質量	約500kg (打ち上げ時)
発生電力	金星軌道にて約500W (ミッション終了時)

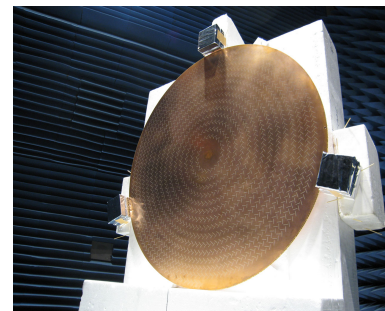
「あかつき」に採用された新技術の例



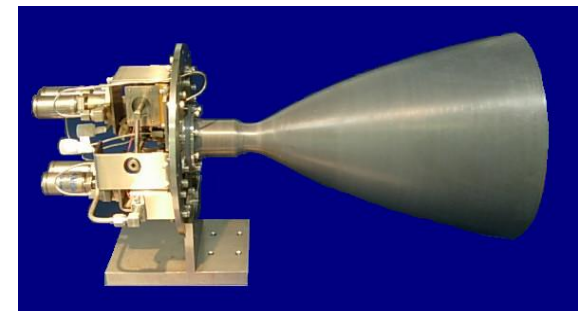
再生測距式トランスポンダ



リチウムイオン電池



高利得平面型RLSAアンテナ



セラミックスラスタ

あかつき(PLANET-C)

