

# ALMAによる惑星大気の観測

佐川 英夫(京都産業大学)

+ 飯野孝浩(東京農工大学), 前澤裕之(大阪府立大学),

青木祥平(ベルギー宇宙航空研究所), Raphael Moreno(フランス・パリ天文台) ほか

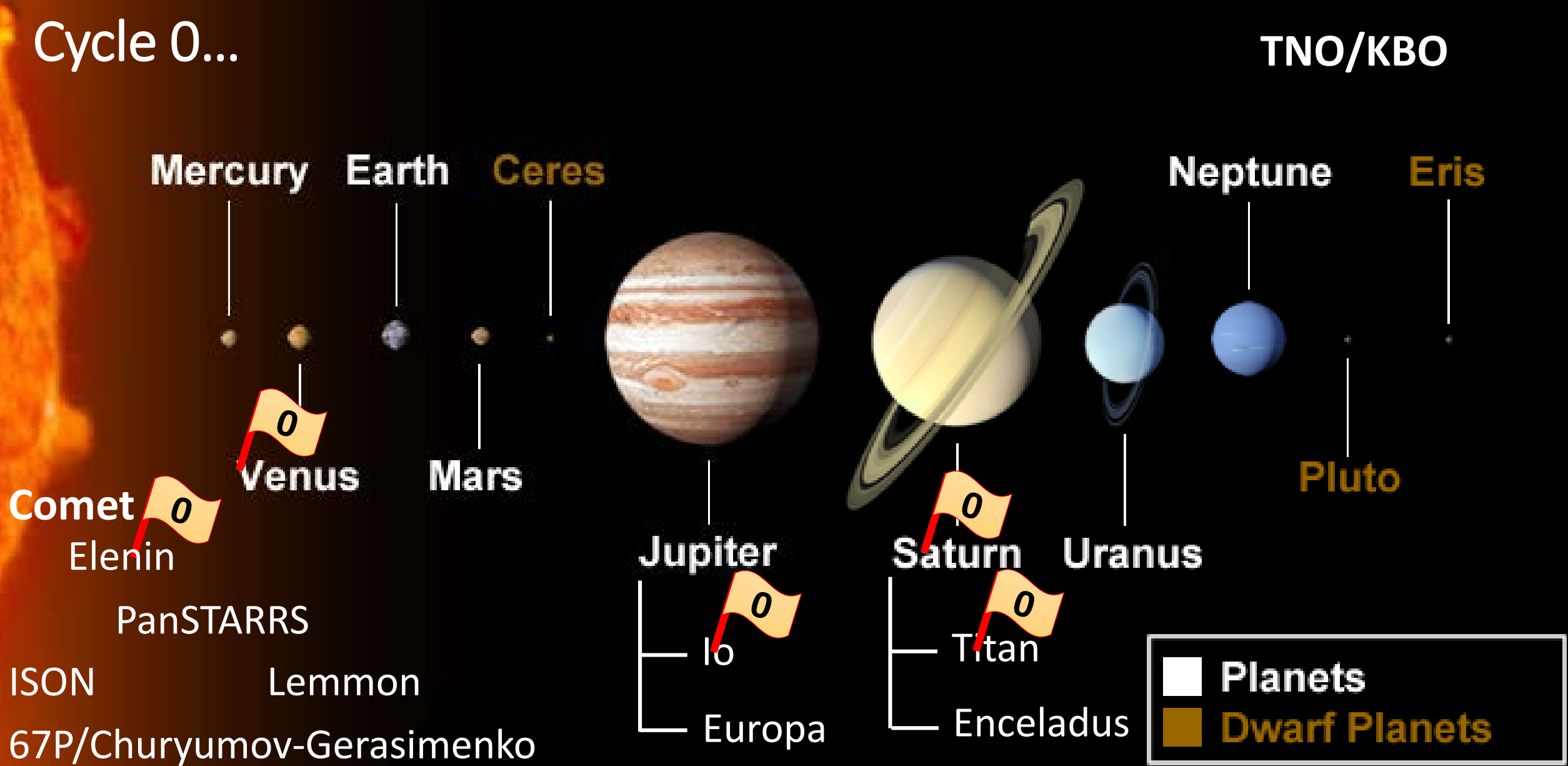
# (これまでの)ALMAによる太陽系天体観測

- 木星のような大きな天体から、太陽系最遠方の小惑星まで、様々な観測対象が観測されている (観測されていないメジャーな対象は水星と月くらい).
- サイエンスも、惑星大気 (← これは従来の「サブミリ波観測による太陽系サイエンス」の筆頭テーマ)にとどまらず、小惑星の熱特性の制約(空間分布も)や、氷衛星のプルームのリモセンなど、「高い空間分解能」「高い感度」を活かした観測が多い (むしろ そうした「ALMAならではの」の観測の方が採択されやすい).
- (以下、佐川の個人的な見解ですが) 一方で、観測の立ち位置としては、太陽系内の個々の天体を(個別に)より精密に理解しようとする観測になりがち (もともとそういう研究分野でもあるのですが).

# Solar system exploration with ALMA

(This slide is based on the accepted proposals. Some of them have not been observed.)

## Cycle 0...



Comet Elenin  
PanSTARRS  
ISON  
67P/Churyumov-Gerasimenko

Lemmon

TNO/KBO

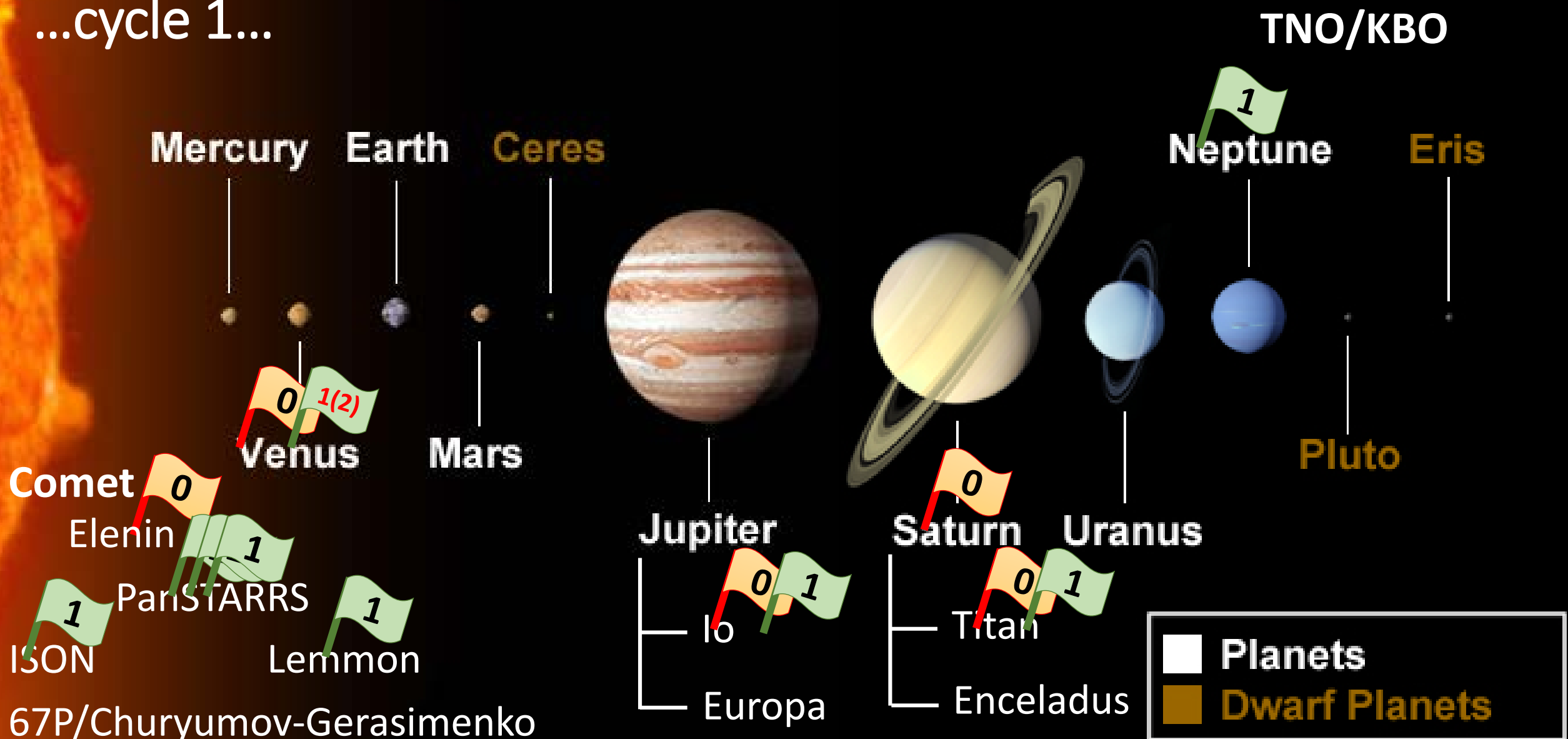
Legend:

- White square: Planets
- Brown square: Dwarf Planets

# Solar system exploration with ALMA

(This slide is based on the accepted proposals. Some of them have not been observed.)

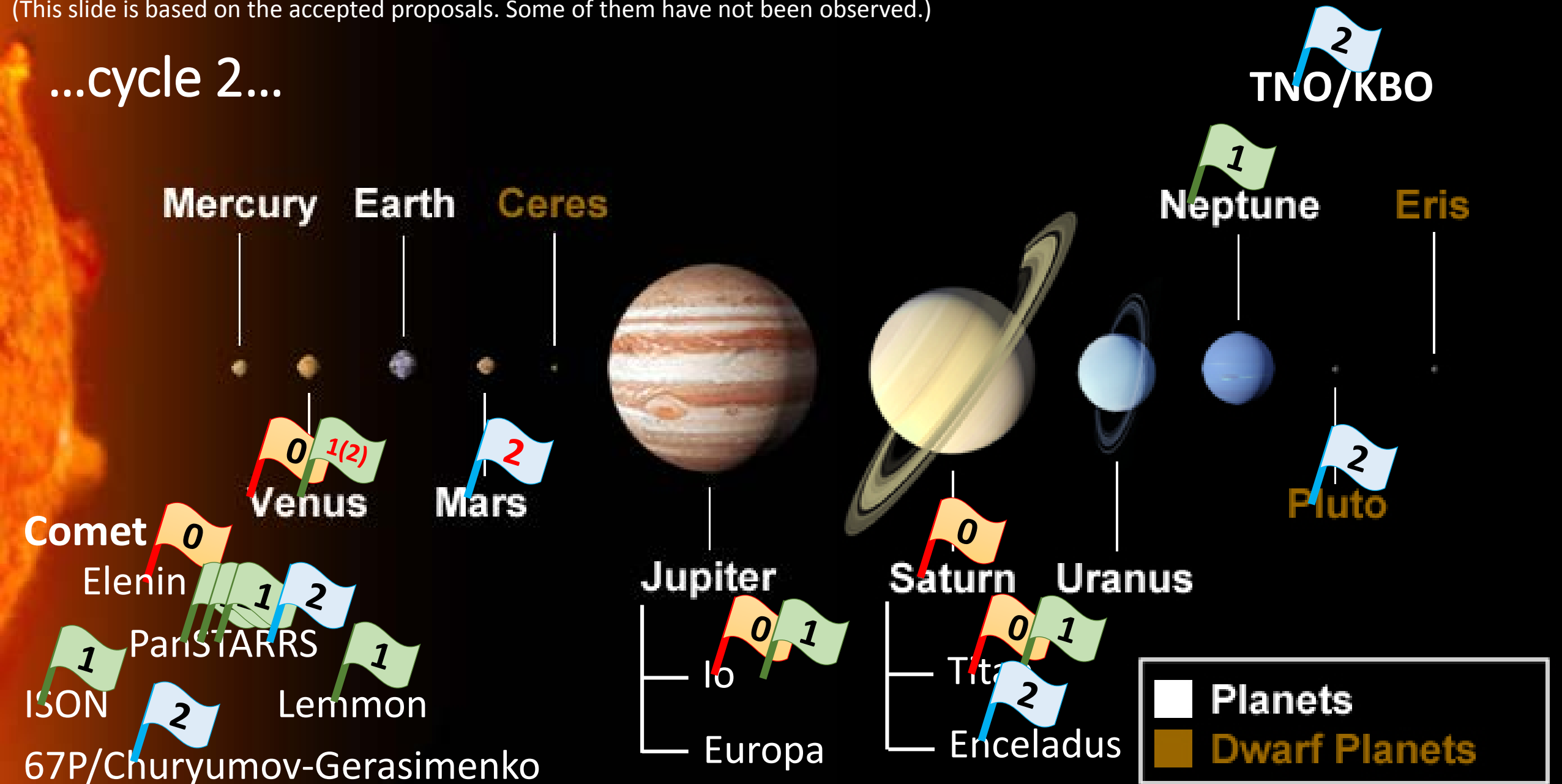
...cycle 1...



# Solar system exploration with ALMA

(This slide is based on the accepted proposals. Some of them have not been observed.)

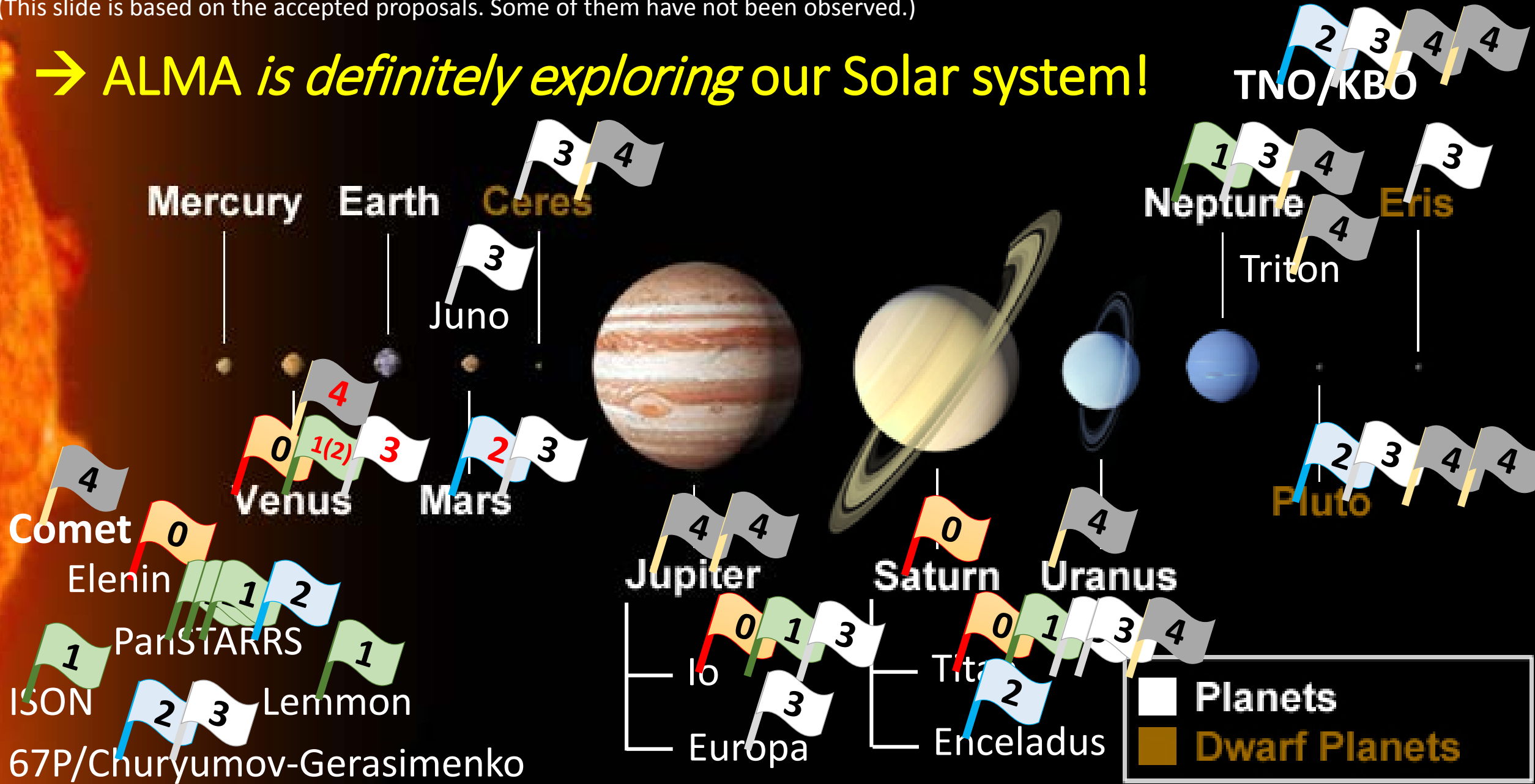
...cycle 2...



# Solar system exploration with ALMA

(This slide is based on the accepted proposals. Some of them have not been observed.)

→ *ALMA is definitely exploring our Solar system!*



# 「太陽系の天体は大きくて明るい」・・・それなのに何故 ALMA が必要なのか？

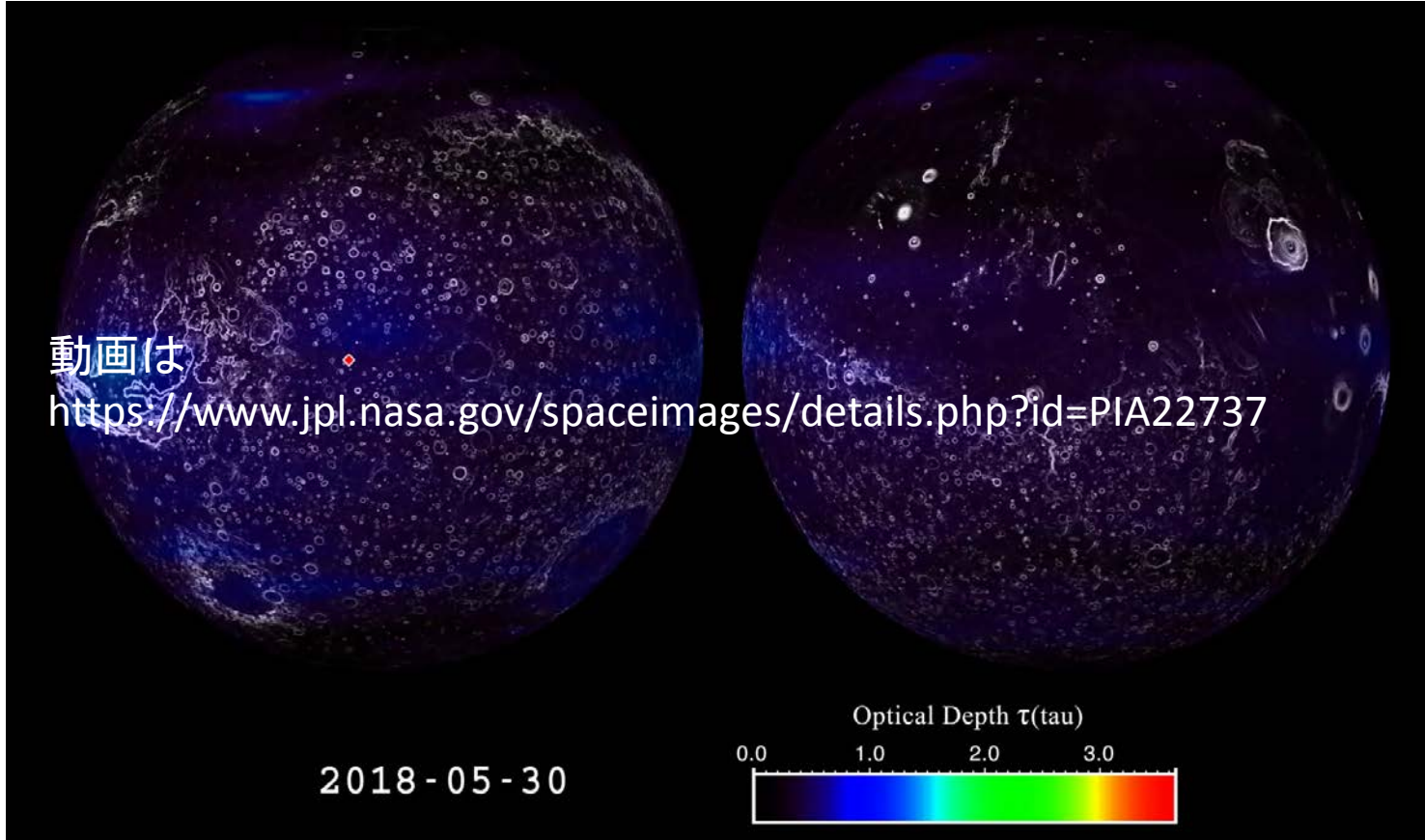
## ① 時間変動が重要なカギとなるテーマが多い

惑星大気の季節変化, 日変化(太陽放射に対する影響, 光化学による大気組成の変化), 彗星の太陽距離に対するガス量の変化など. → スナップショット観測の重要性. ALMAの感度が重要.

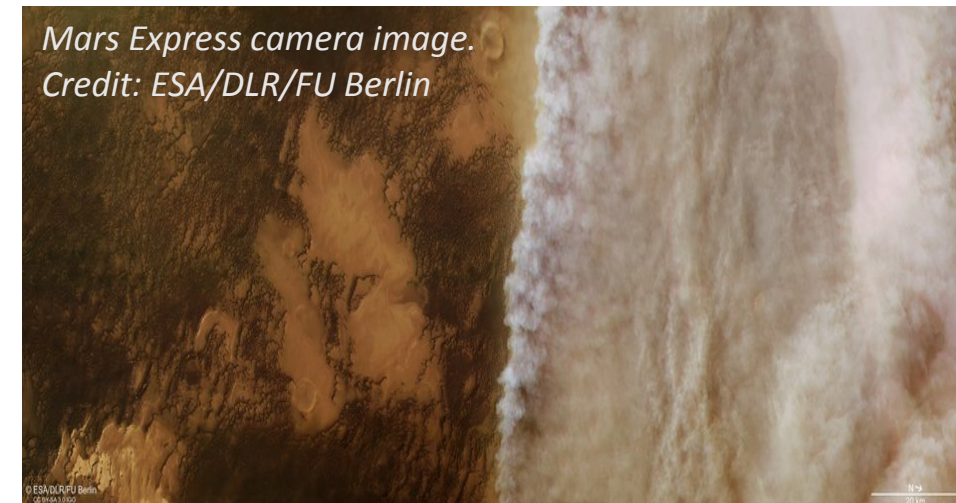
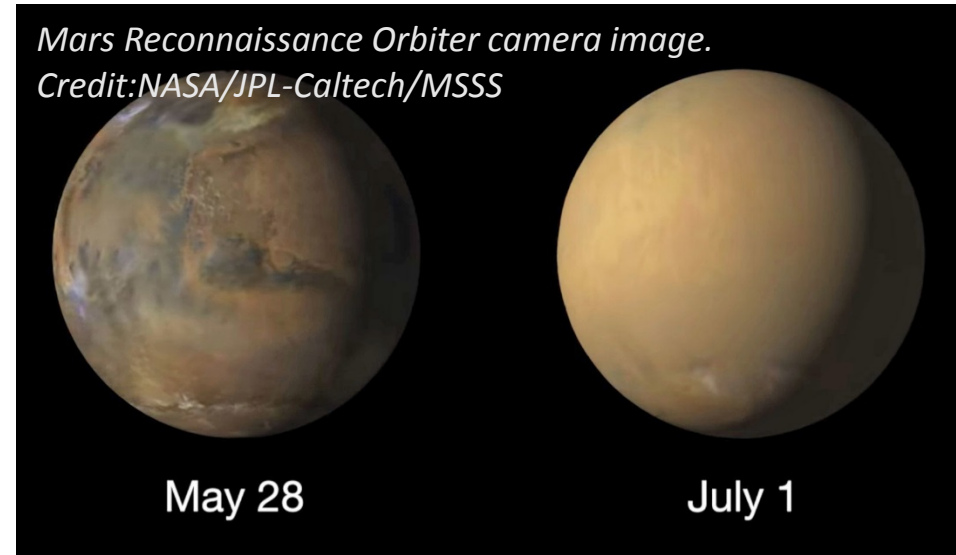


# 「太陽系の天体は大きくて明るい」・・・それなのに何故 ALMA が必要なのか？

## ① 時間変動が重要なカギとなるテーマが多い



Mars Reconnaissance Orbiter, MCS  
Credit: NASA/JPL-Caltech





# 「太陽系の天体は大きくて明るい」・・・それなのに何故 ALMA が必要なのか？

## ① 時間変動が重要なカギとなるテーマが多い

惑星大気の季節変化, 日変化 (太陽放射に対する影響, 光化学による大気組成の変化), 彗星の太陽距離に対するガス量の変化など. → **スナップショット観測の重要性. ALMAの感度が重要.**

## ② 太陽系にも小さくて暗い天体がある (今まではそれらが観測出来ていなかっただけ).

	Diameter [km]	Diameter [arcsec]
Moon	3,470	1800
Venus	12,100	10 – 60
Juno	250	~0.2
Jovian moons	~4,000	< ~1.5
Pluto	~2,400	< ~0.1

従来のサブミリ波での地上観測は空間分解能が 2 – 5 arcsec (干渉計) ~ 10 – 30 arcsec (大型単一鏡). → **ALMAの高空間分解能が重要.**

## ① サブミリ波帯という観測波長の特徴.

- 連続波帯の観測: 固体表面の数mmの深さからの熱放射を観測. 異なるローカルタイムの観測で熱慣性を制約. 他波長(赤外など)のデータと併せることで空隙率などの制約も可能.
- サブミリ波帯には様々な分子のラインが存在. 赤外よりもサブミリ波の方が観測しやすい分子も存在.

## ② ヘテロダインによる高い周波数分解能.

- 高い周波数分解能で観測することで, 微弱なシグナルが検出可能に(特に惑星大気の微量成分).
- ドップラーシフトによる大気の流れ(風速)の観測.

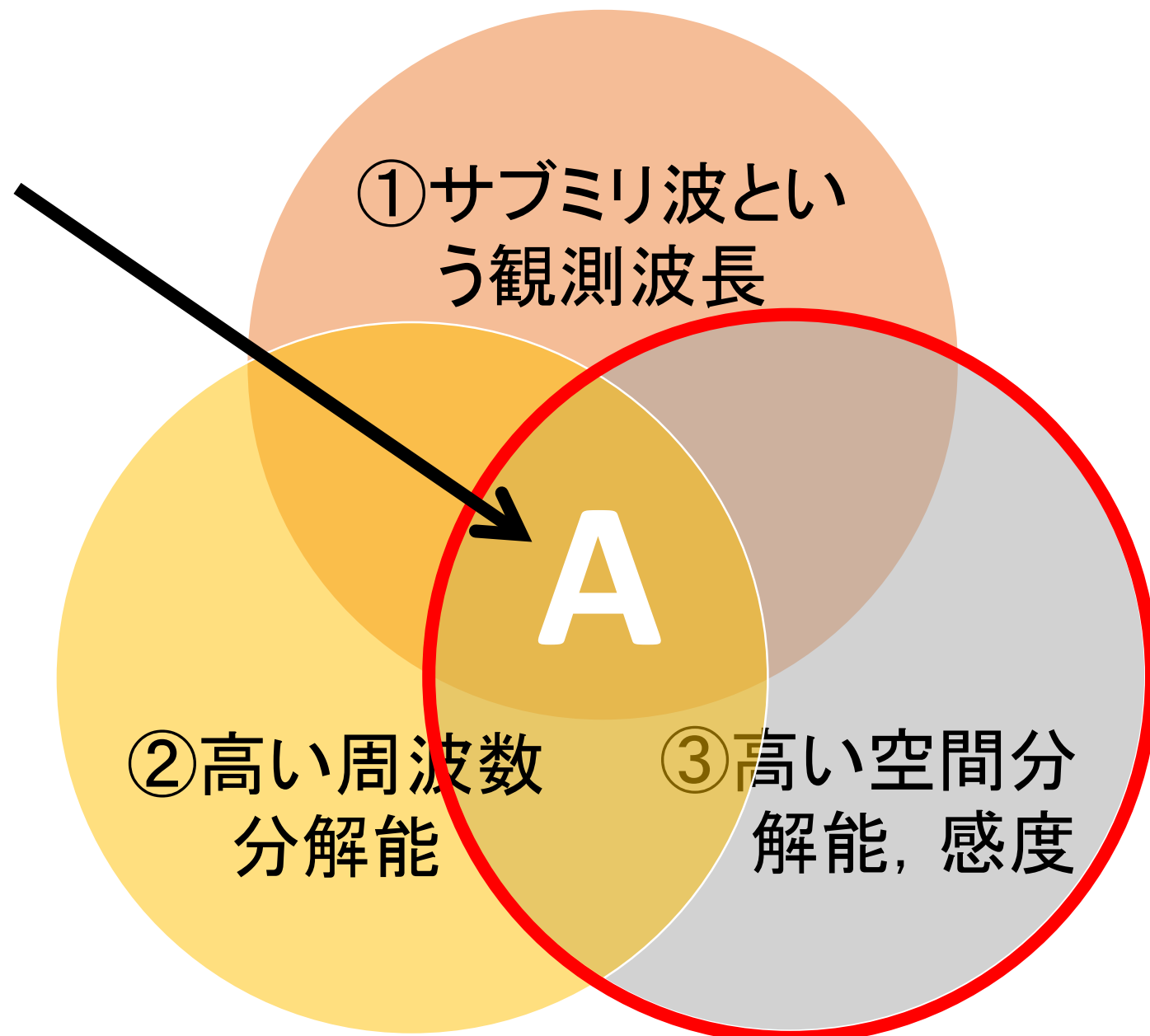
## ③ ALMAの高い空間分解能, 高い感度(=時間分解能の改善に直結).

- 太陽系の遠方天体(KBOなど)や小惑星の空間分解観測が可能に.
- 惑星大気のリム観測で(大気中の観測視線長を増やすことで)感度を増やすことも可能に.

注:あくまでも佐川の主観的な割り振りです.

**A (=ALMAでしか出来ない観測). 例えば。。。**

- Titan大気中の超微量成分(C, H, Nを含む分子)の空間分布(極域での偏在)の観測 → 大気化学, 力学による輸送を議論.
- Pluto大気中のCOおよびHCN検出 → 太陽系遠方における惑星大気の進化を制約.
- 視直径が比較的にかさい金星昼面(外合付近)・火星でのドップラー風速のマッピング → 惑星気象の議論.
- 木星や土星のリム部分を抽出した微量成分の観測 → 大気組成, Oの外部からの供給を議論.
- 彗星大気の空間分布の観測. 彗星ごとのD/H → 太陽系の起源・形成論.

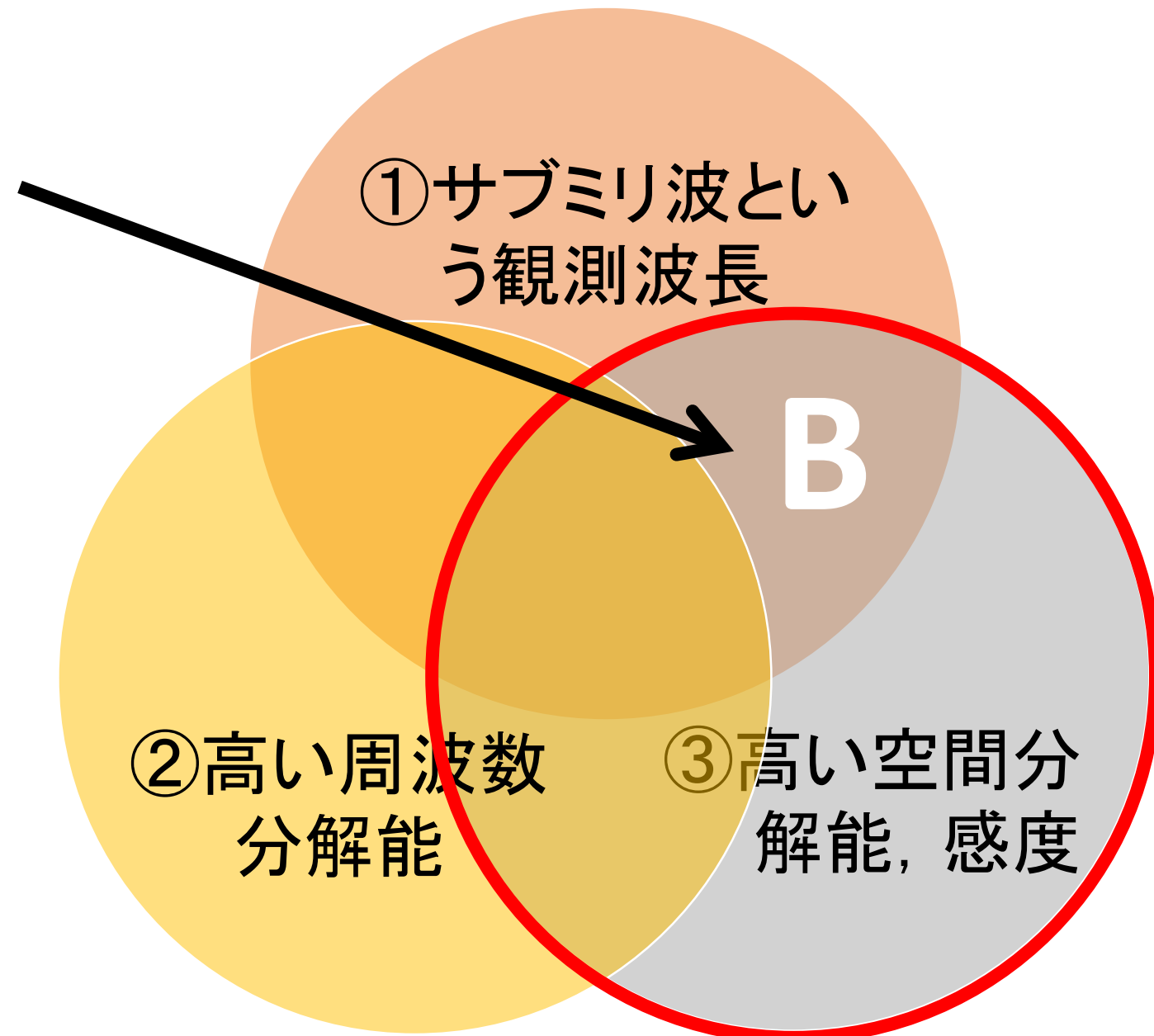


ALMAのユニークな部分

注:あくまでも佐川の主観的な割り振りです.

## B (連続波を使った観測). 例えば。。。

- 小惑星Junoの超高空間分解能観測. 自転の様子をモニタリング → 形状モデルと比較し, 熱特性などの小惑星天体のより精密な情報を取得.
- CentaursやTNOの小惑星の熱放射を観測 → サブミリ波帯によるemissivityを制約.

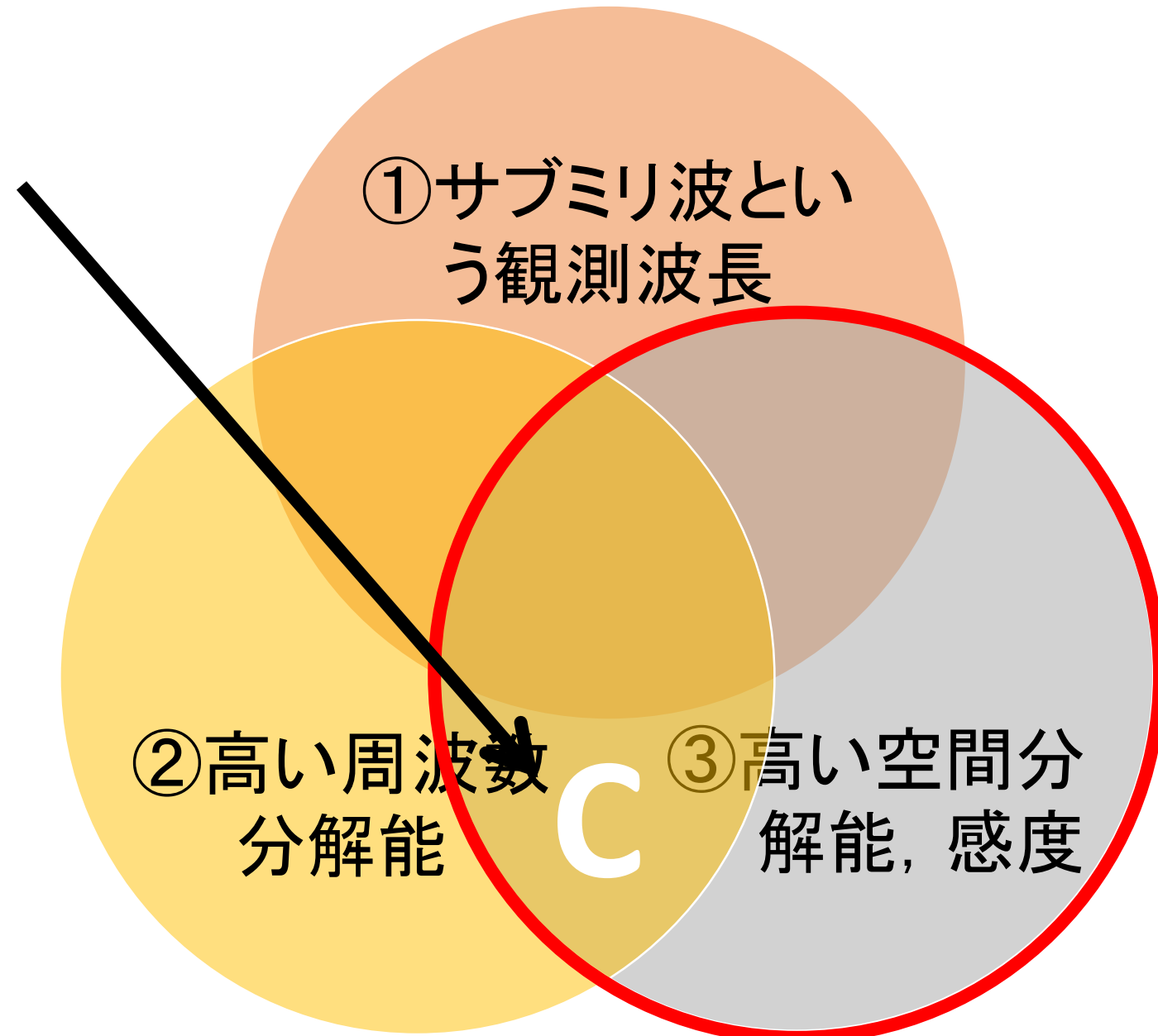


ALMAのユニークな部分

注:あくまでも佐川の主観的な割り振りです.

c (サブミリ波という波長にそこまでこだわらない)。。。実例はあまり無い?

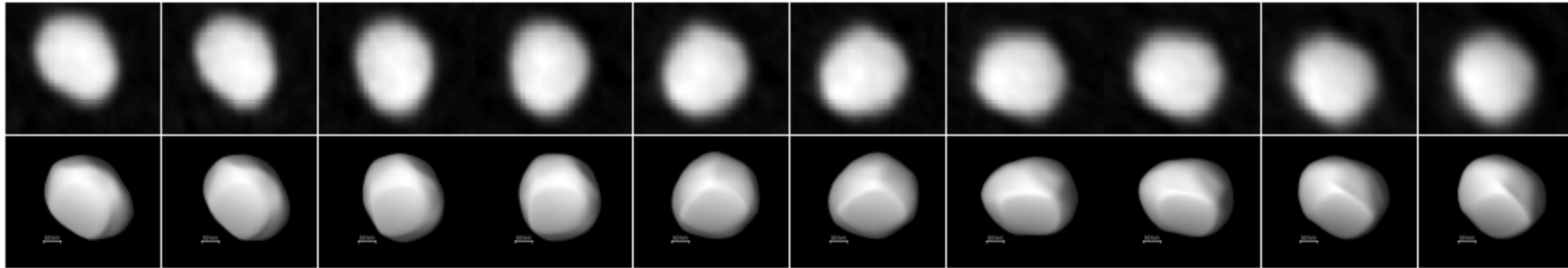
- エンケラダスのプルーム中の物質のラインを観測(サブミリ波でしか測れない分子というよりも, ともかく高い周波数分解能 & 空間分解能が欲しい)  
(→ 観測は上手く行っていない?)



ALMAのユニークな部分

# Highlights of ALMA Solar system observations: **Thermal maps**

Determination of the shape of asteroid 3-Juno [Viikinkoski et al., 2015]



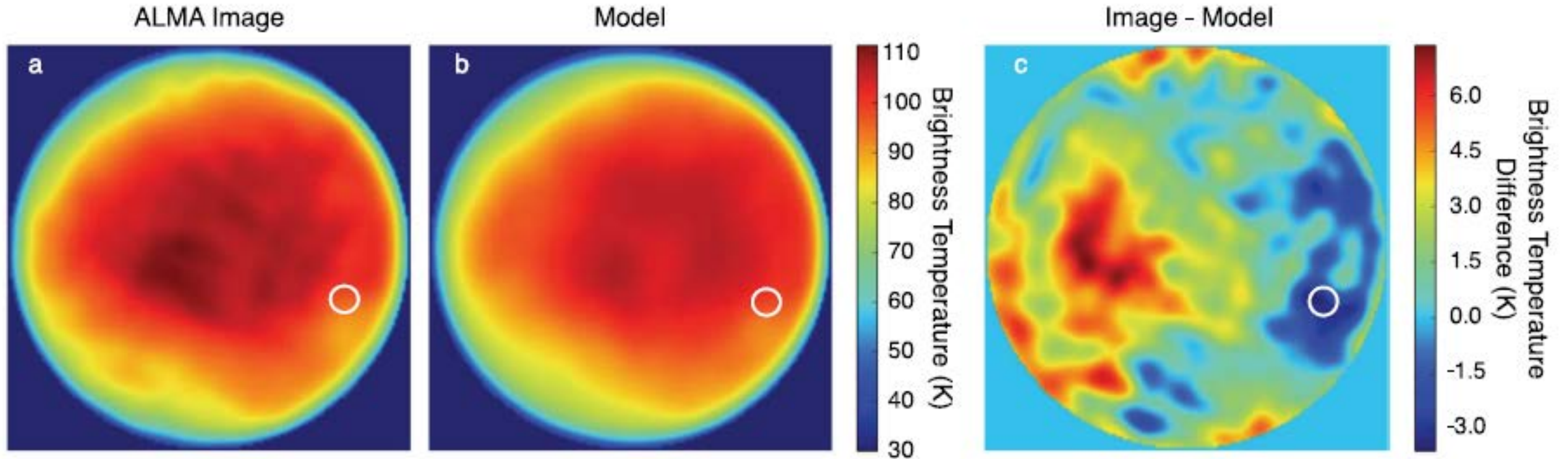
**Fig. 3.** Comparison of the ALMA deconvolved images (*top*) to the ALMA+lightcurve model (*bottom*). The scalebar corresponds to 50 km.

- ALMA Long-Baseline campaign provided a rotational mapping of Juno with the spatial resolution of **0.042'' (60 km!!)** [Hunter et al. (ALMA partnership), 2015].
- Using the constraints from ALMA thermal map + VLT light curve, it is proposed that Juno's global shape is moulded by impacts rather than gravitational effects.



# Highlights of ALMA Solar system observations: Thermal maps

Surface brightness temperature anomaly on Europa: Plumes? [Trumbo et al., 2017]



**Figure 1.** Model fit to the ALMA data. (a) The ALMA image in brightness temperature at  $\lambda = 1.3$  mm. (b) Our model image using the best-fit parameters to both the ALMA and PPR data. (c) The residuals between the model and the data, where positive values indicate locations where the data are warmer than the model. The location of the potential plume source region and *Galileo* thermal anomaly is circled in white, where the size of the circle corresponds to the size of our ALMA resolution element.

- Investigated the locations which had been proposed as plume source regions by past space mission.

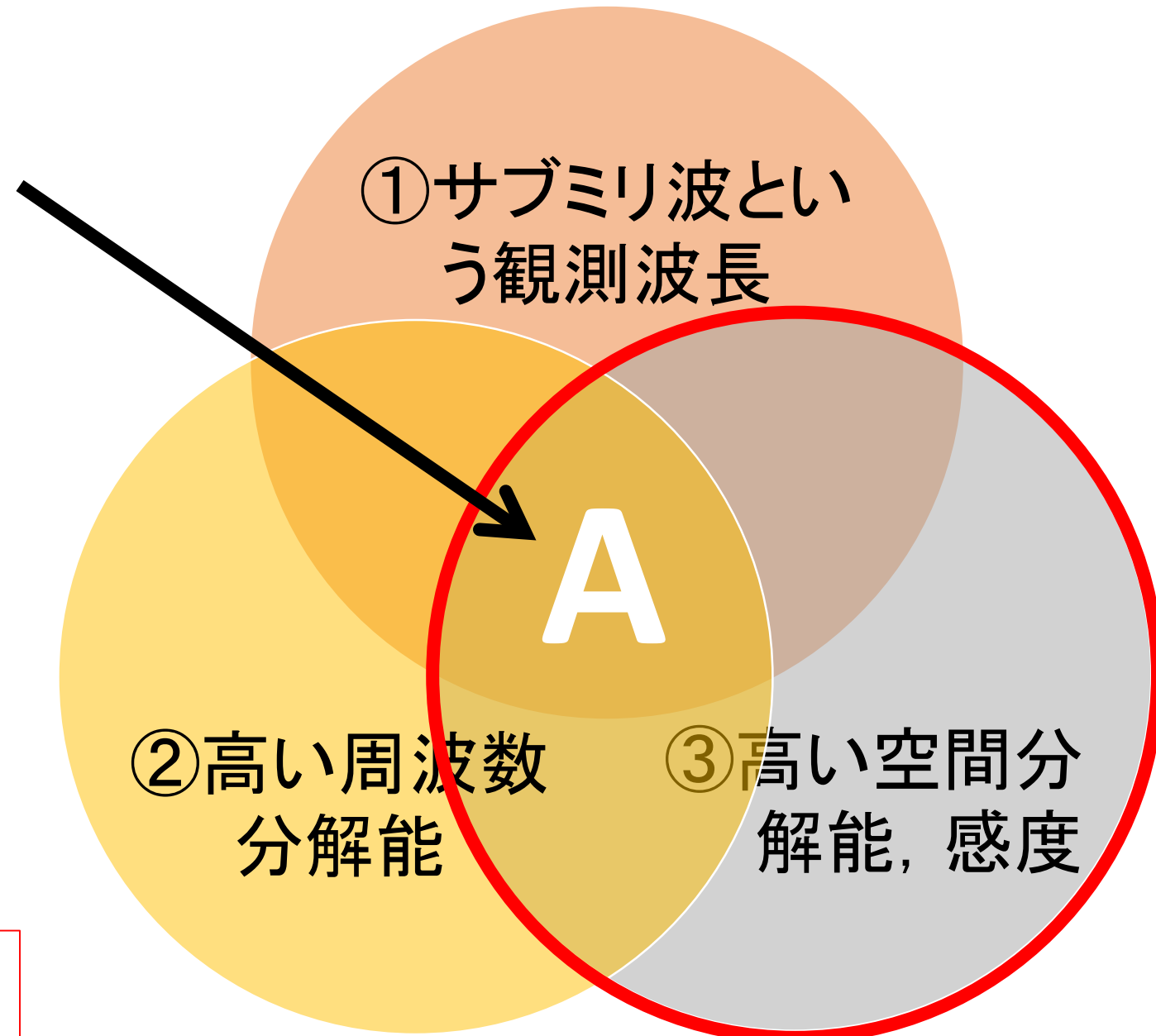


注:あくまでも佐川の主観的な割り振りです.

A (=ALMAでしか出来ない観測). 例えば。。。

- Titan大気中の超微量成分(C, H, Nを含む分子)の空間分布(極域での偏在)の観測 → 大気化学, 力学による輸送を議論.
- Pluto大気中のCOおよびHCN検出 → 太陽系遠方における惑星大気の進化を制約.
- 視直径が比較的に小さい金星昼面(外合付近)・火星でのドップラー風速のマッピング → 惑星気象の議論.
- 木星や土星のリム部分を抽出した微量成分の観測 → 大気組成, 0の外部からの供給を議論.
- 彗星大気の空間分布の観測. 彗星ごとのD/H → 太陽系の起源・形成論.

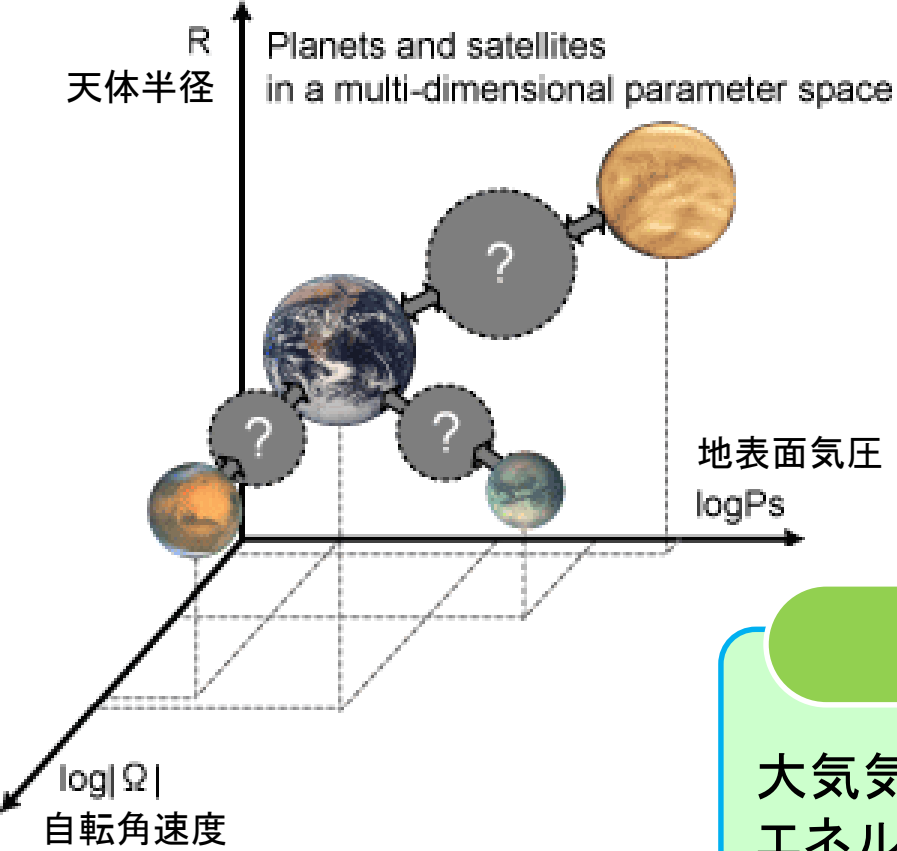
→ こうして見ると, 惑星大気の研究にはALMAが非常に効果的



ALMAのユニークな部分

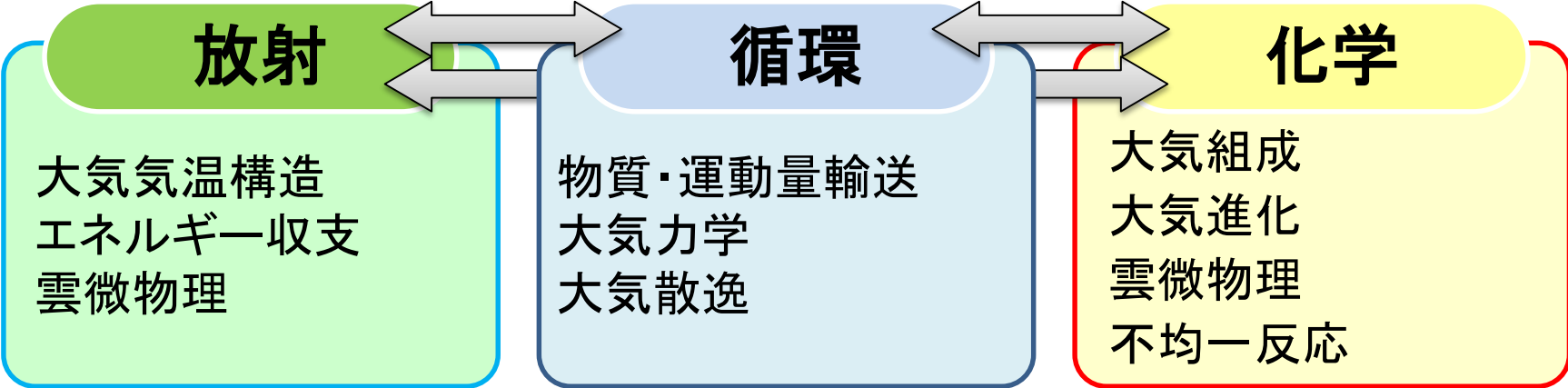
# 惑星大気観測のモチベーション

① 現在の惑星大気を支配する物理・化学プロセスを明らかにしたい (大気科学, 気象学)



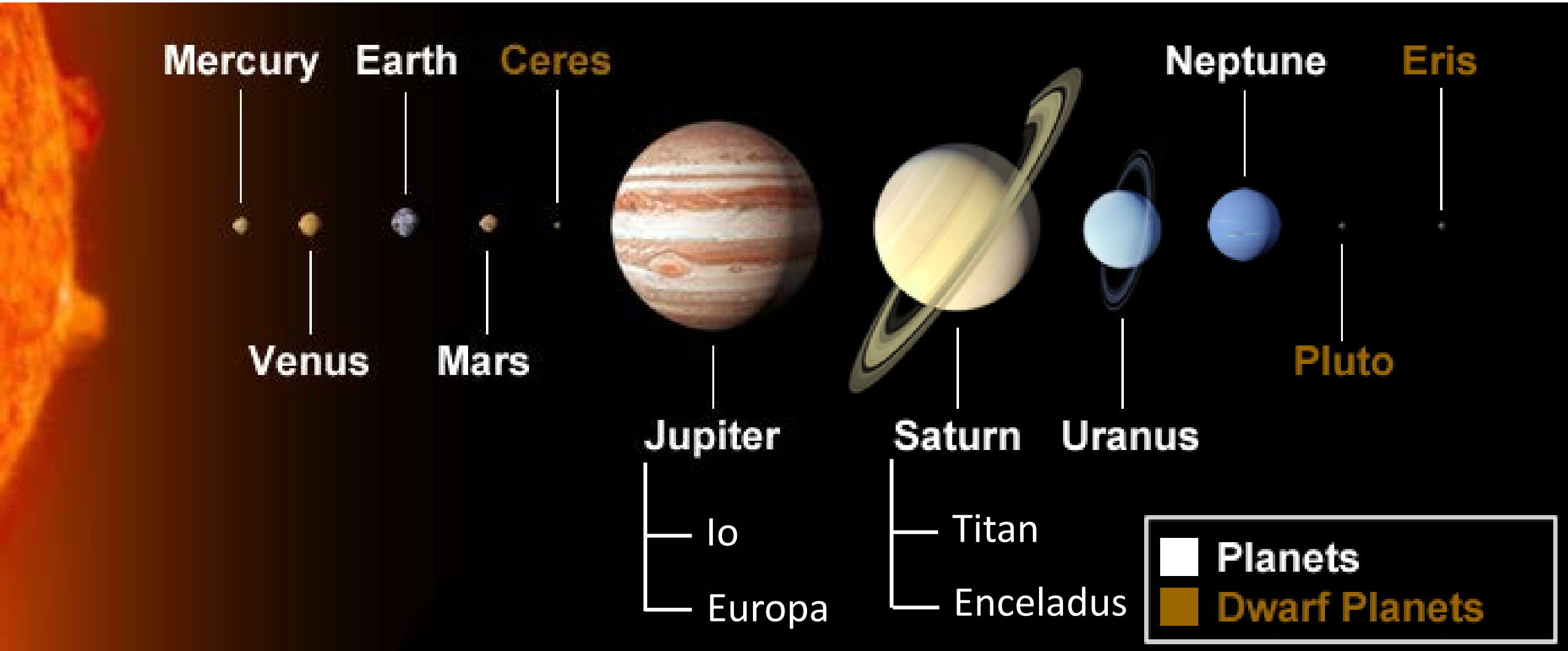
- 放射 (大気の温度構造を決定)
- 循環 (物質やエネルギーを輸送)
- 化学 (大気組成と進化)

異なる境界条件 (惑星の大きさ, 太陽からの距離, 自転速度, 等々) における上記プロセスの応答・相互作用を知りたい。



# 惑星大気観測のモチベーション

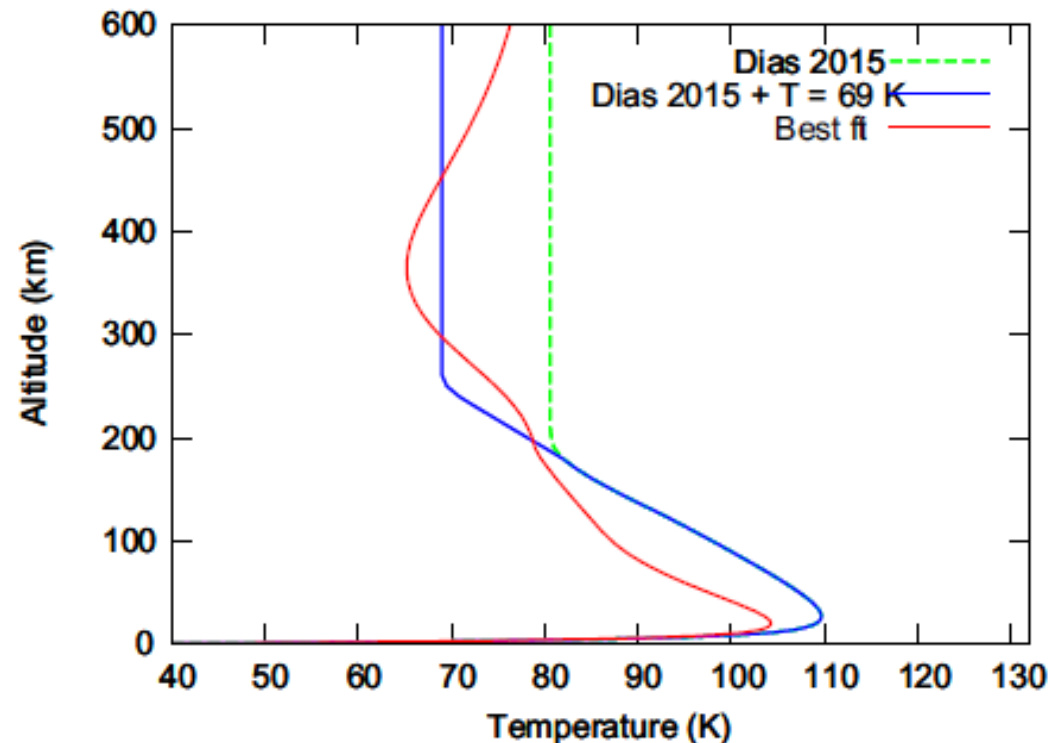
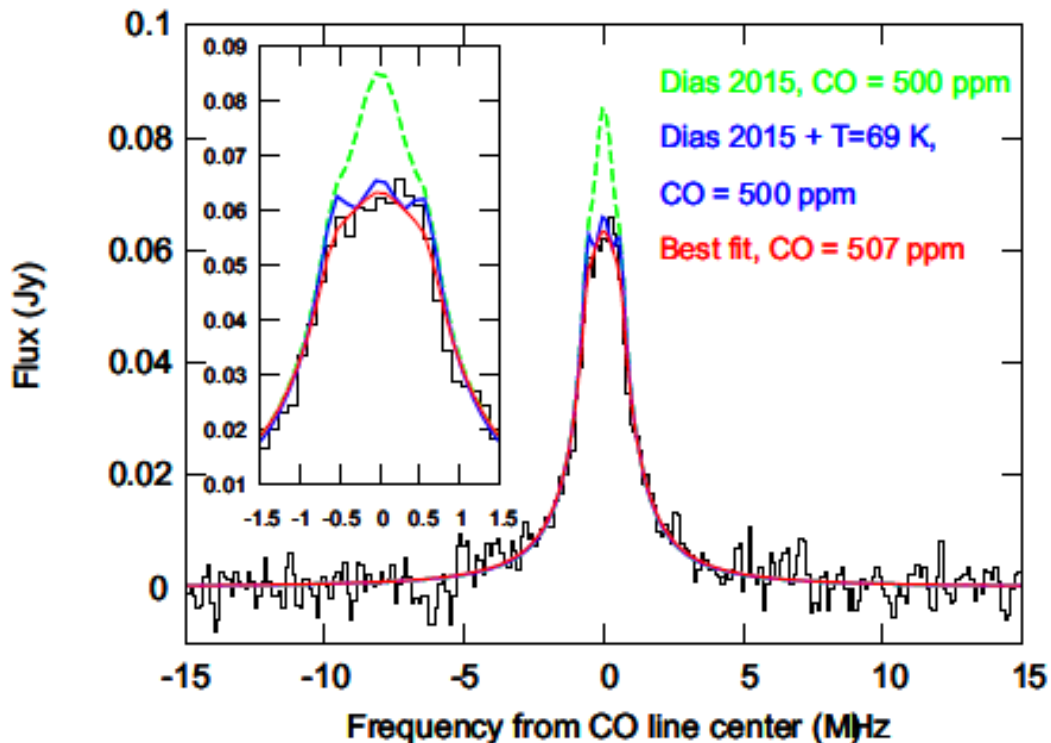
② そもそも惑星(の大気表層環境)がどのようにして形成され, 進化したのか



# Detection of CO and HCN on Pluto's thin (20 $\mu$ bar) atmosphere

[Lellouch et al., 2017]

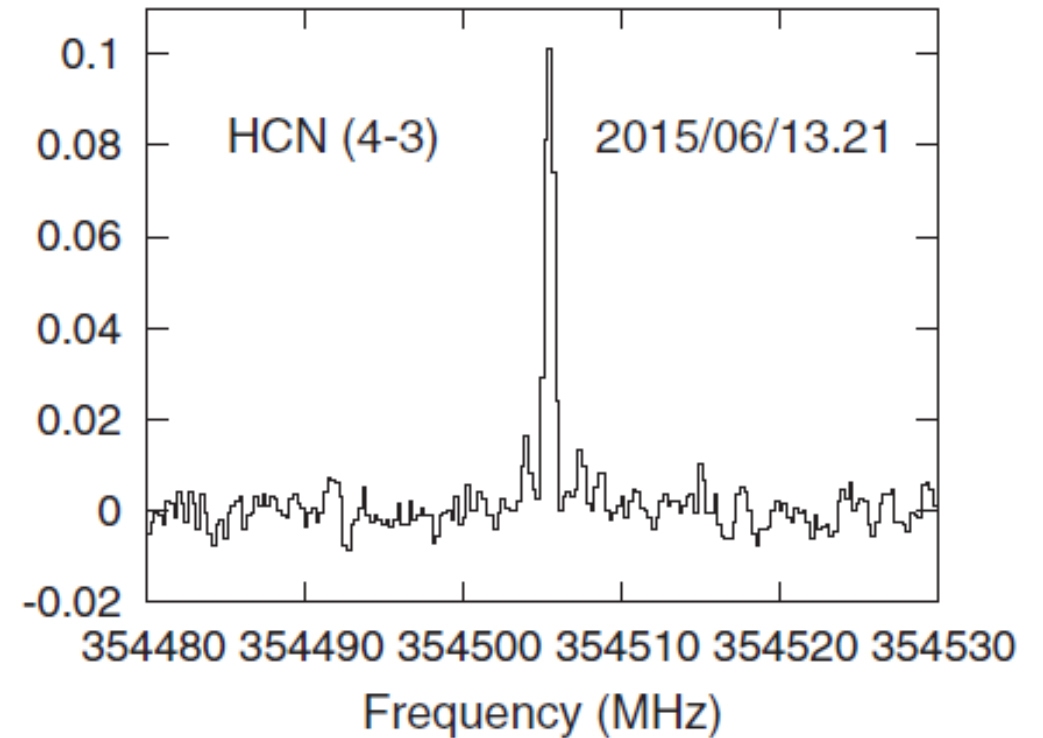
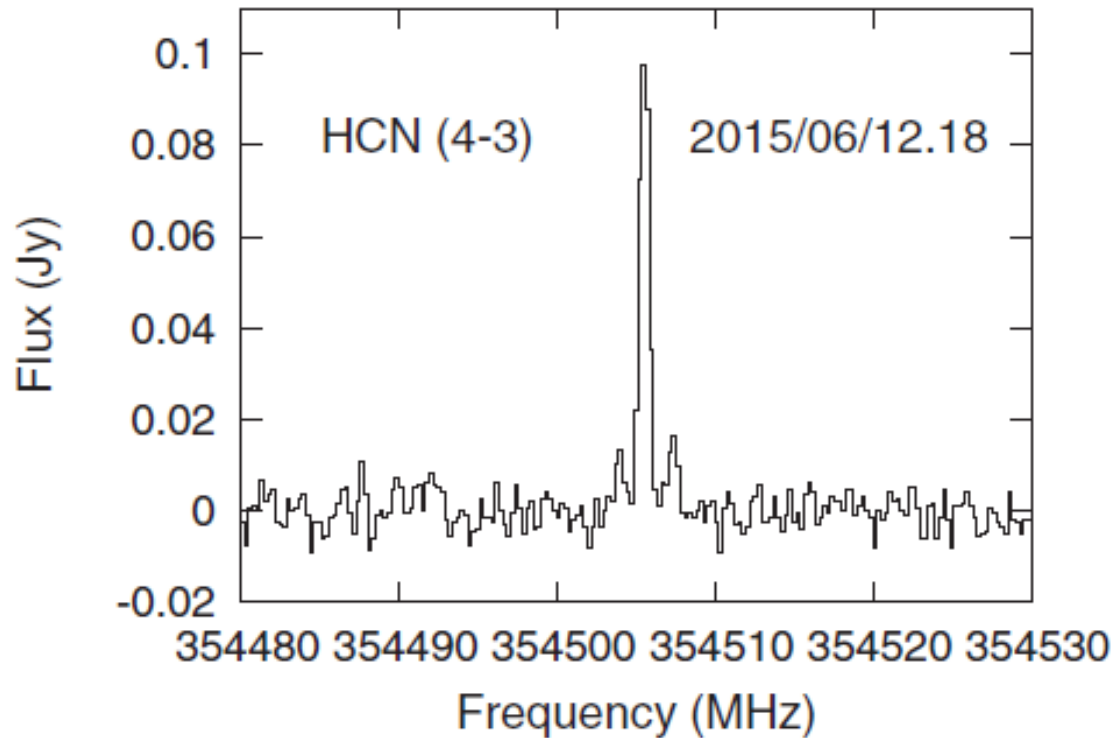
- Pluto disk size = 0.1" vs ALMA beam = 0.35".
- Better confirmation of CO mole fraction.
- Also, retrieve  $T(z)$  from CO line.



# Detection of CO and HCN on Pluto's thin (20 $\mu$ bar) atmosphere

[Lellouch et al., 2017]

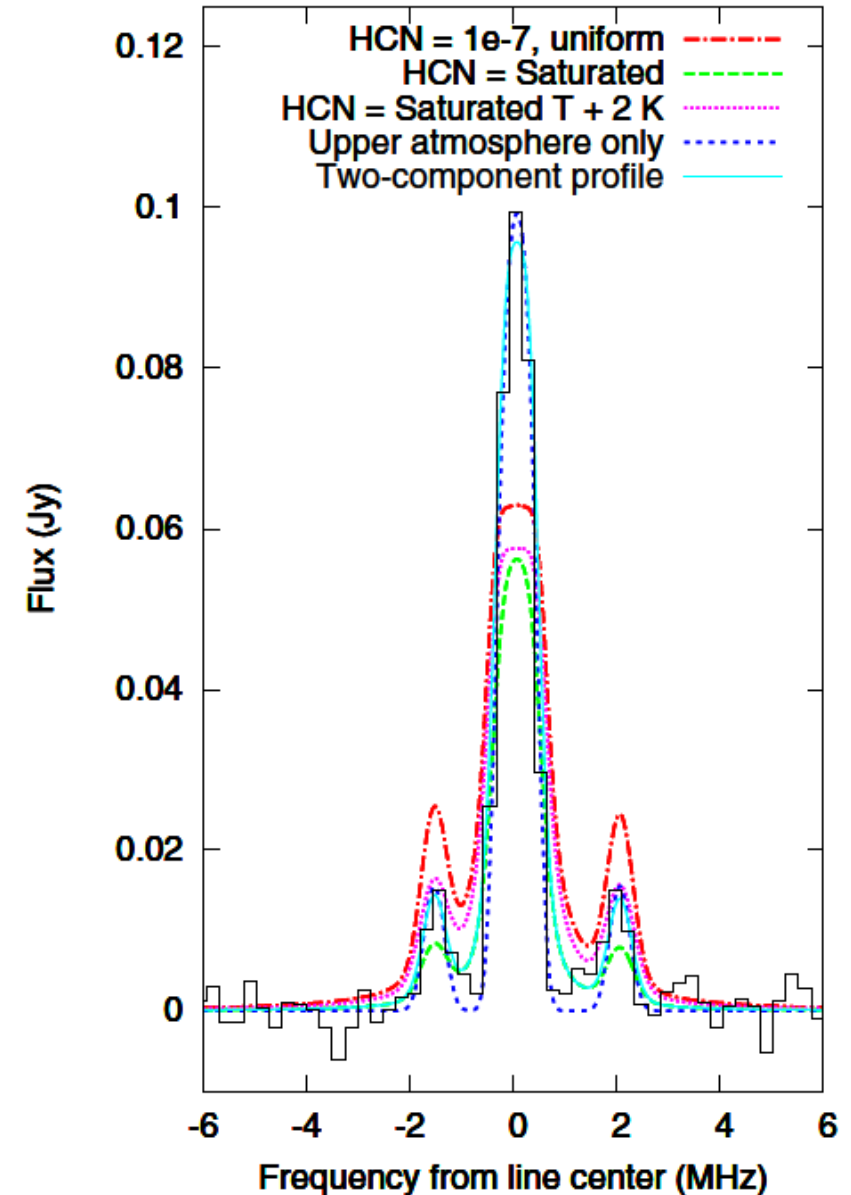
- HCNの初検出.
- COを使って  $T(z)$  を割ともっともらしく制約.  
→ HCN存在量の高度分布を推定.



# Detection of CO and HCN on Pluto's thin (20 $\mu$ bar) atmosphere

[Lellouch et al., 2017]

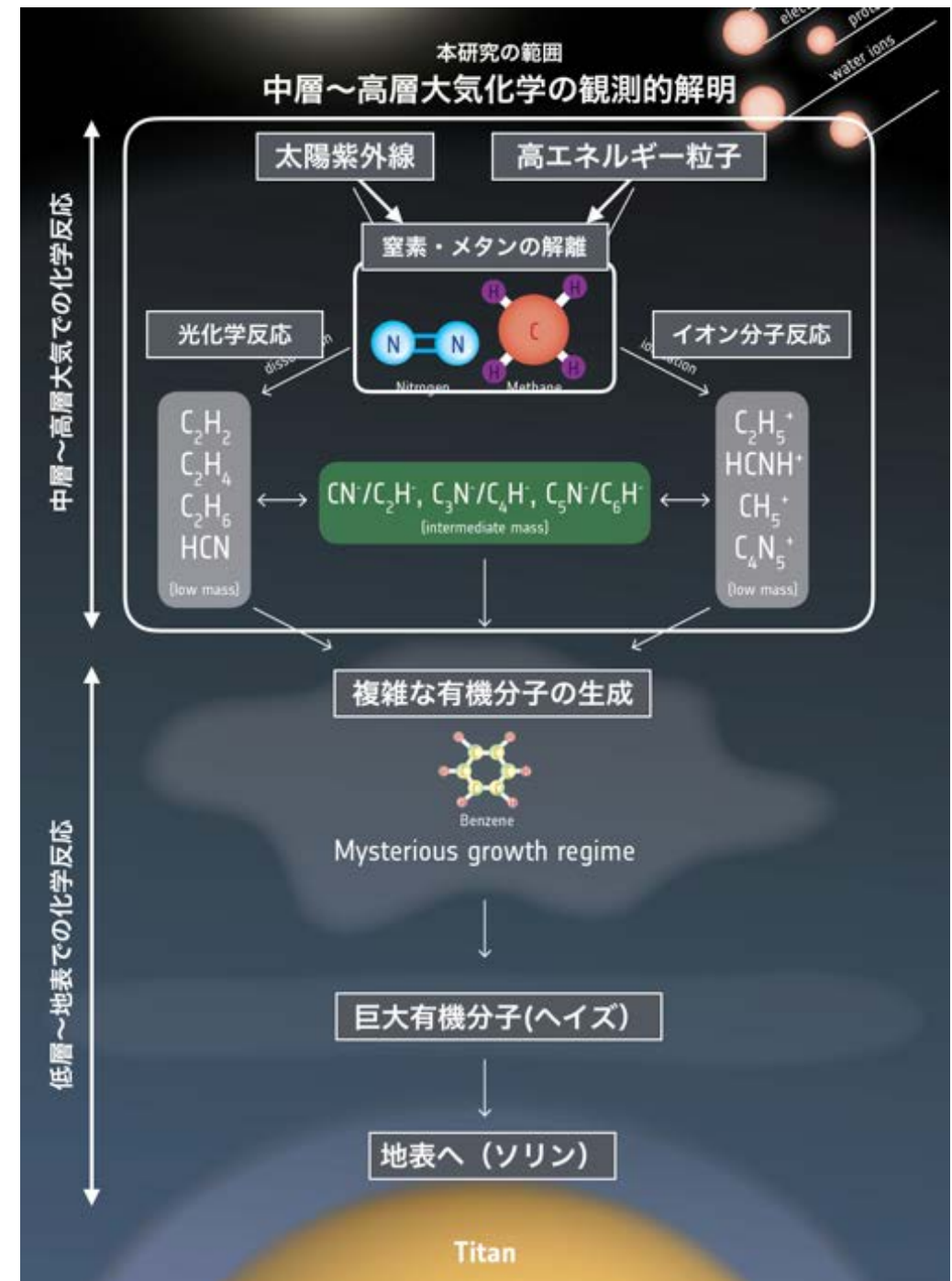
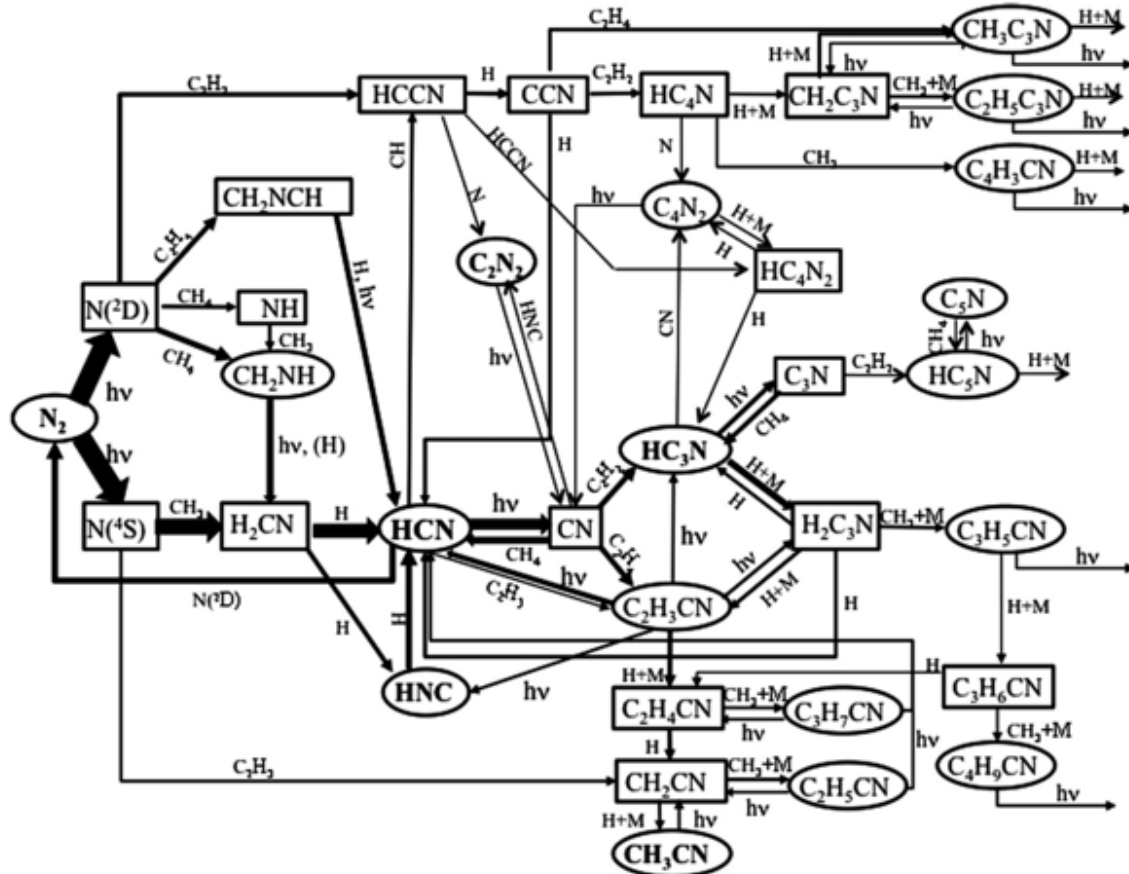
- HCNの初検出.
- COを使って  $T(z)$  を割ともっともらしく制約.  
→ HCN存在量の高度分布を推定.
- ラインの線幅が細い部分 = 大気上層(低圧)の HCNが寄与.
- 観測スペクトルを説明するには, 高高度(> ~300 km)で, かなり大量のHCNが必要.
- 気温分布から得られる飽和度の7-8桁倍の過飽和度(惑星大気の常識では考えられない).
- 凝結核が無いから?





# タイタン大気の光化学

- 「大気中」での有機分子生成工場.





# タイタンは他観測の較正用データとしても多数観測

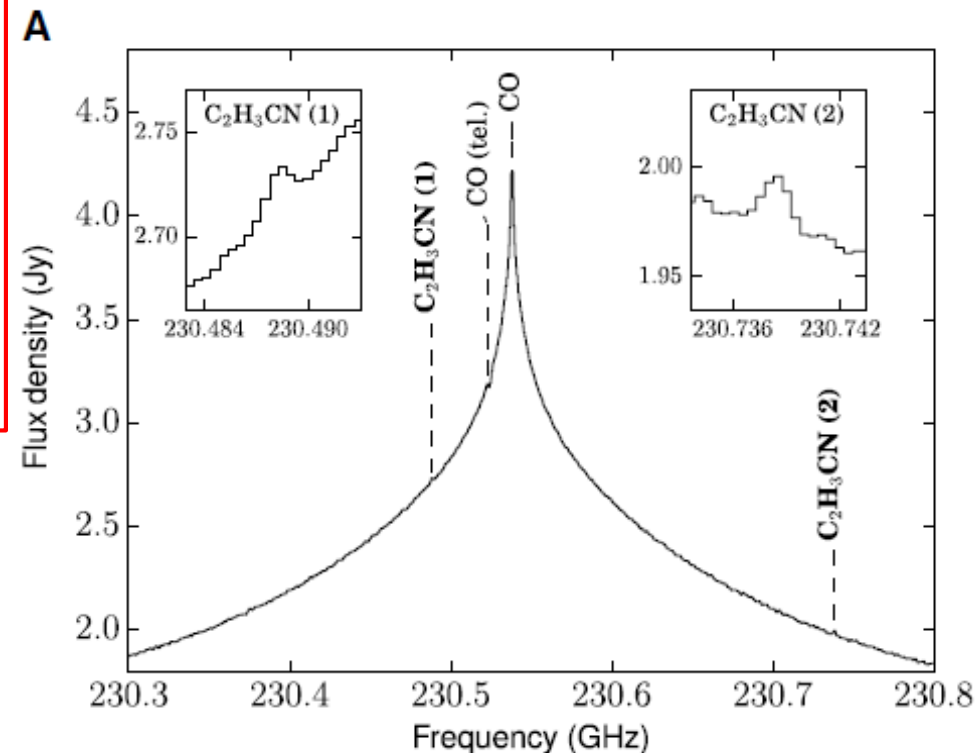
Detection of new species in Titan atmosphere. Understanding the atmospheric chemistry and the habitability [e.g., Cordiner et al., 2014; 2015; Palmer et al., 2017]

## ASTROBIOLOGY

### ALMA detection and astrobiological potential of vinyl cyanide on Titan

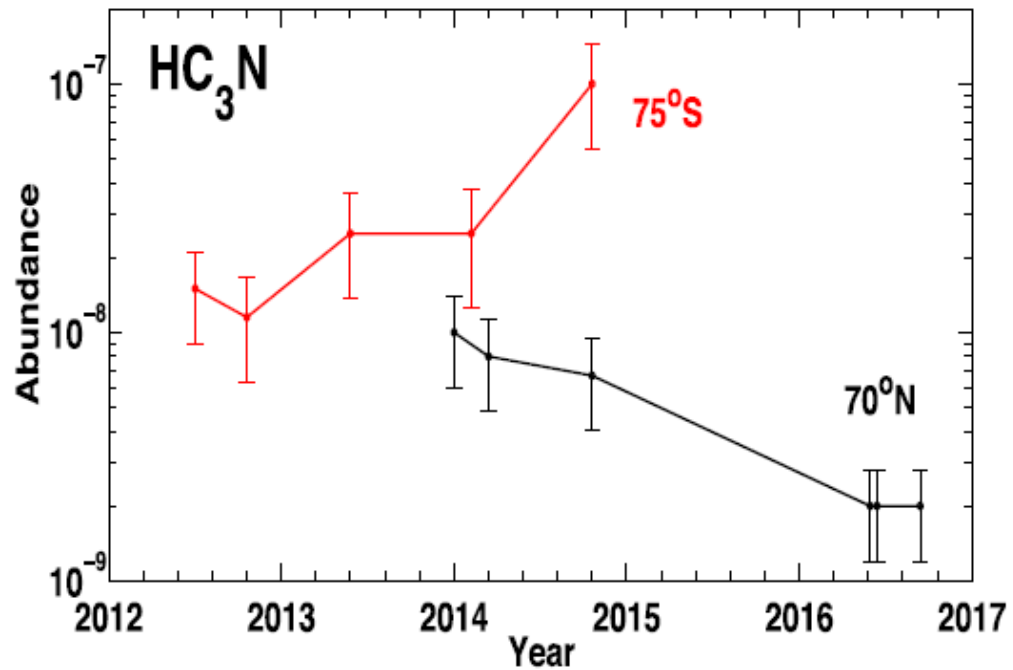
Maureen Y. Palmer,<sup>1,2,3\*</sup> Martin A. Cordiner,<sup>1,3</sup> Conor A. Nixon,<sup>1</sup> Steven B. Charnley,<sup>1</sup> Nicholas A. Teanby,<sup>4</sup> Zbigniew Kisiel,<sup>5</sup> Patrick G. J. Irwin,<sup>6</sup> Michael J. Mumma<sup>1</sup>

Recent simulations have indicated that vinyl cyanide is the best candidate molecule for the formation of cell membranes/vesicle structures in Titan's hydrocarbon-rich lakes and seas. Although the existence of vinyl cyanide ( $C_2H_3CN$ ) on Titan was previously inferred using Cassini mass spectrometry, a definitive detection has been lacking until now. We report the first spectroscopic detection of vinyl cyanide in Titan's atmosphere, obtained



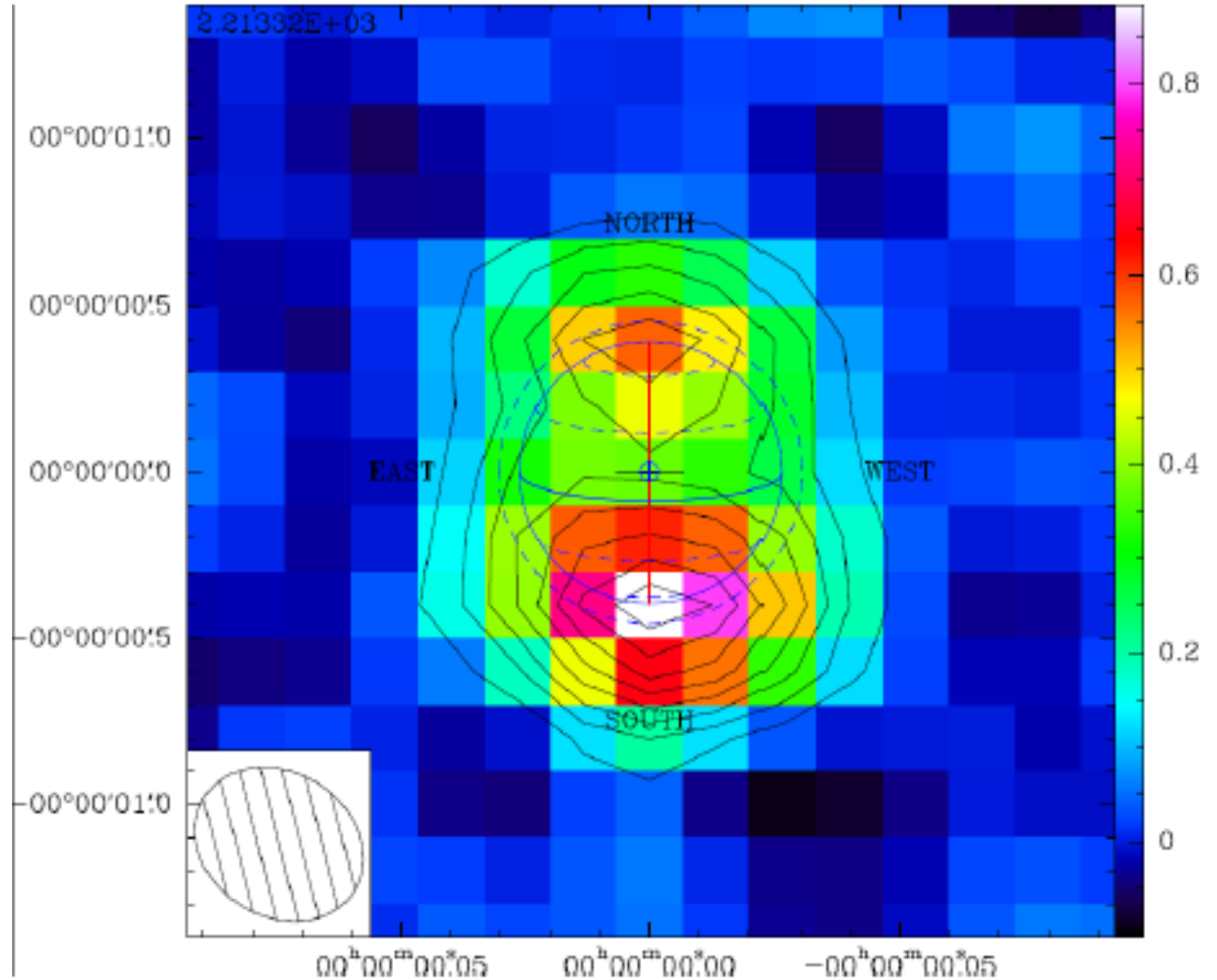
# 大気循環＋光化学のカップリング

- 南極上空に濃集.
- 半球間の循環と太陽UV入射との兼ね合い.



Cassini探査機/赤外分光器CIRSの結果  
[Coustenis et al., 2018]

$\text{HC}_3\text{N}$  (J=39-38) [Moreno, in prep.]

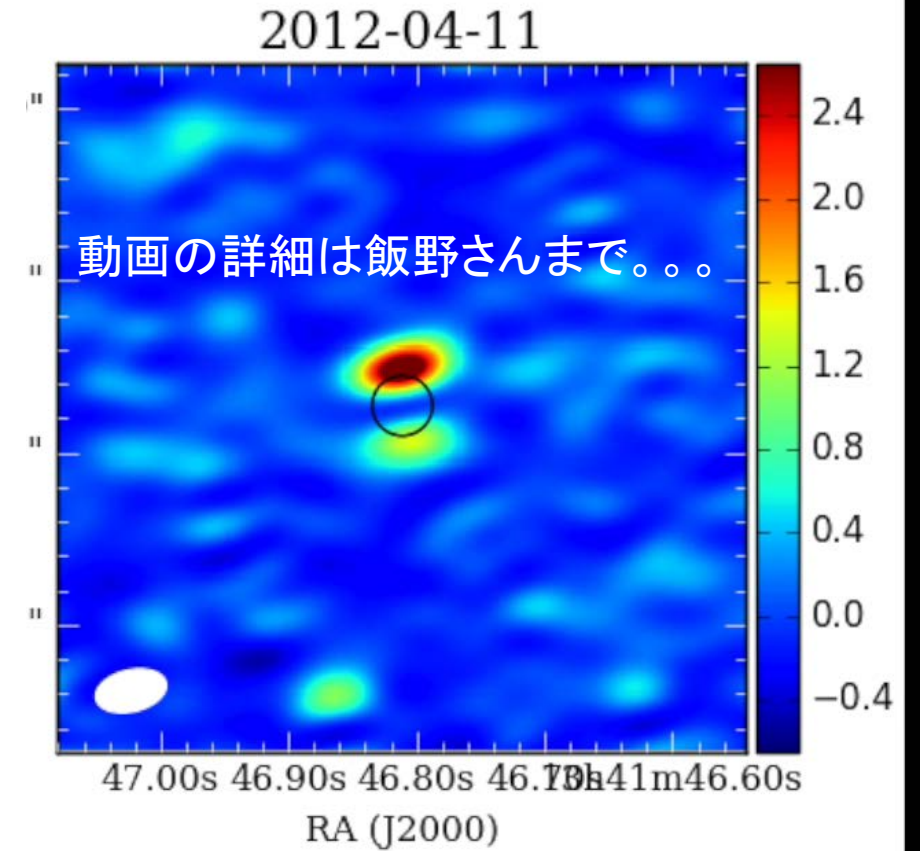
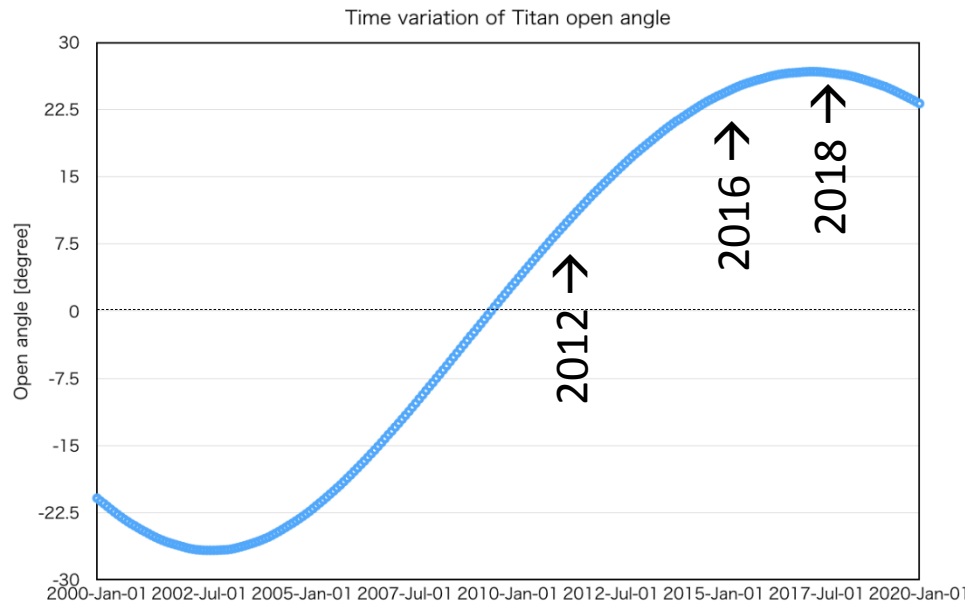


# 大気循環 + 光化学のカップリング

← これからの観測では。。。  
様々な分子, 異なる時期での  
データを.

- タイタンの1年 = 30年. Cassini探査機は終了しており, この先しばらく 探査ミッションは無し.
- ALMAの短時間観測を multi-epoch で行なうことで, タイタン-likeな濃N<sub>2</sub>大気 の理解が大きく進むはず.

地球直下点のタイタン緯度

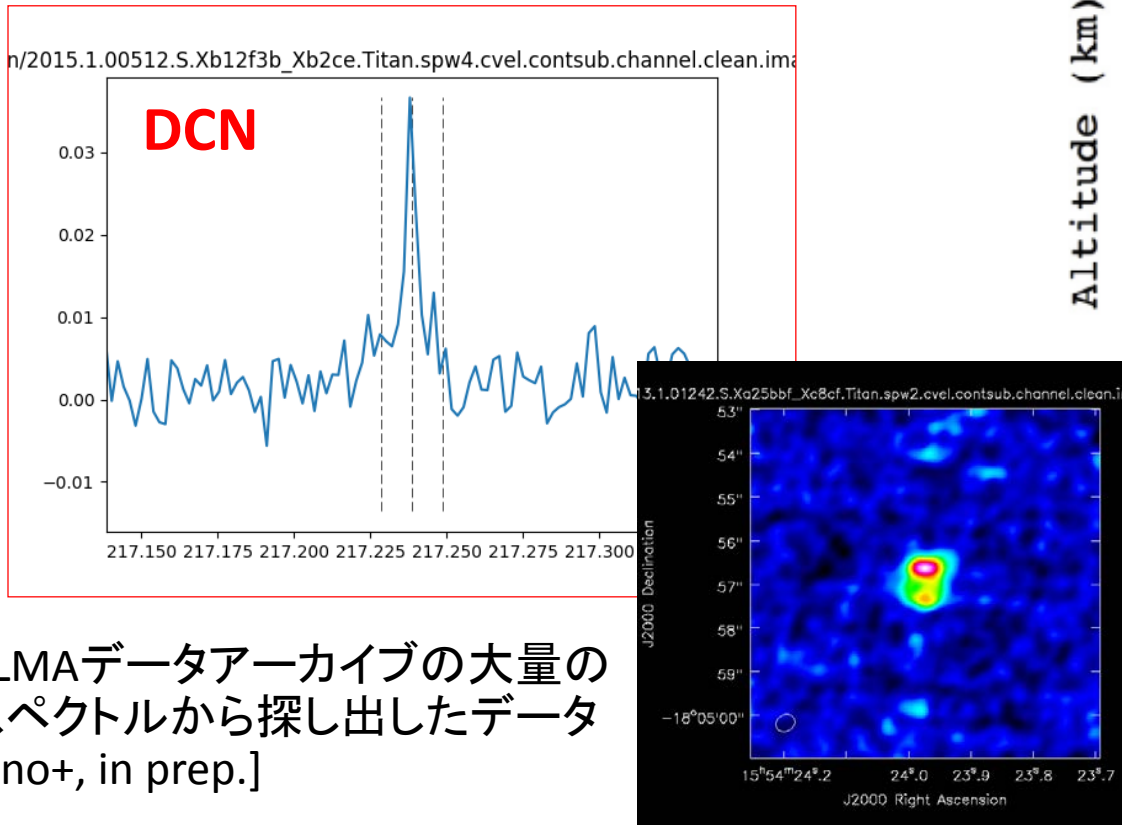


アーカイブ中のHC<sub>3</sub>NのMoment-0マップ  
[飯野さんの解析結果]

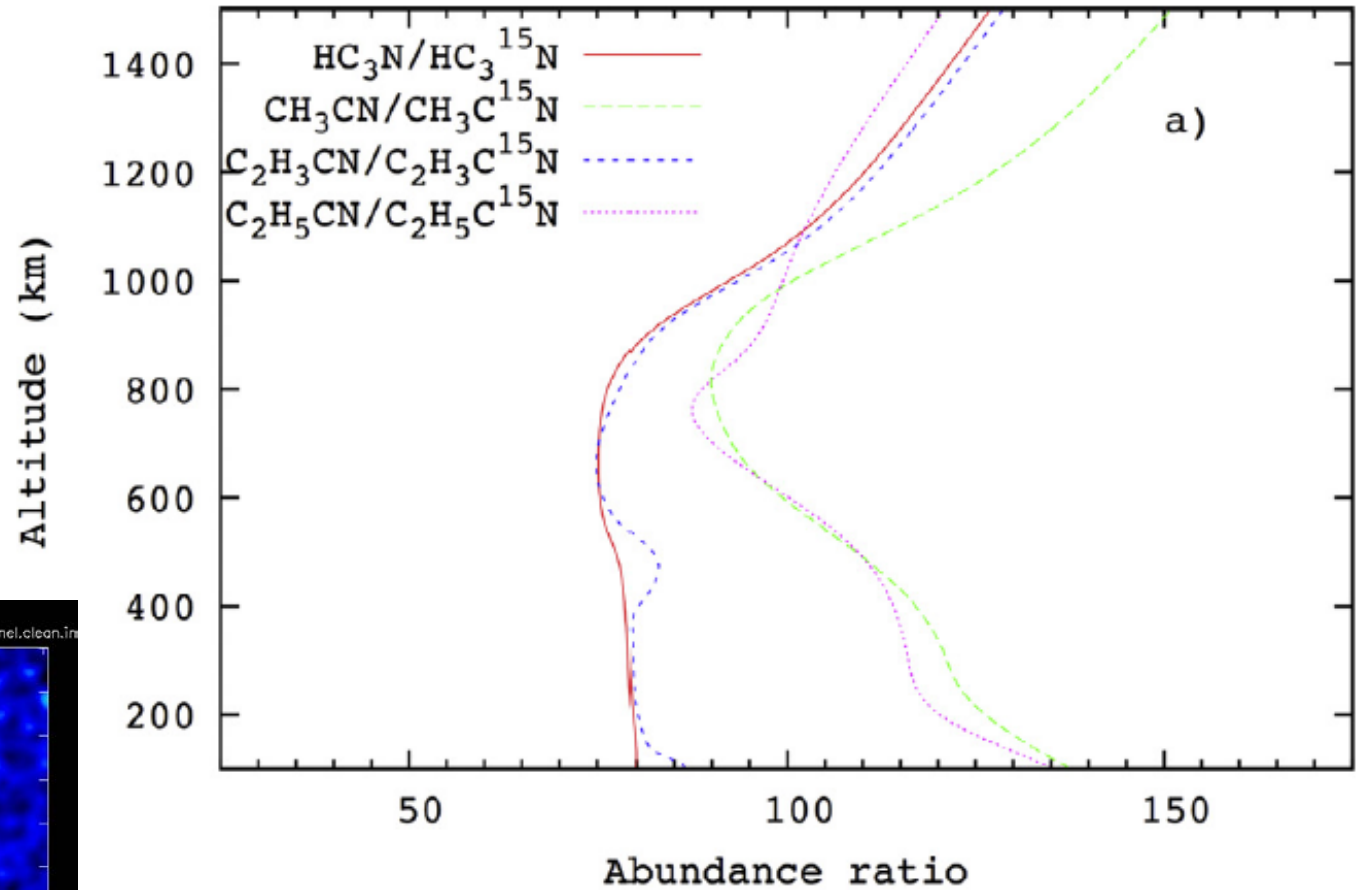
# 大気循環 + 光化学のカップリング

← これからの観測では。。。  
様々な分子, 異なる時期での  
データを.

- 同位体比 (D/H や  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ) の情報も併せて取得すると, 化学モデルへの制約も.



ALMAデータアーカイブの大量のスペクトルから探し出したデータ [lino+, in prep.]



光化学モデルによる様々な分子の $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 計算値.

[Dobrijevic & Loisson, 2018]

# ここまでをまとめると

- ALMAのおかげで太陽系外側の小天体の大気も観測が可能に.
- 微量成分の高分散観測から, 大気組成や温度構造の推定が可能.  
→ 太陽系(の外側の方)の天体の表層環境を(割と初めて)観測的に理解.
- 原始惑星系円盤の研究から得られる惑星形成の知見の「実証」の場に出ないか？