

原始惑星系円盤の高解像度観測と 系外惑星観測の最前線

2018年7月22日

2018年度天文若手の会夏の学校 豊橋

北海道大学 秋山永治

本日の講演内容

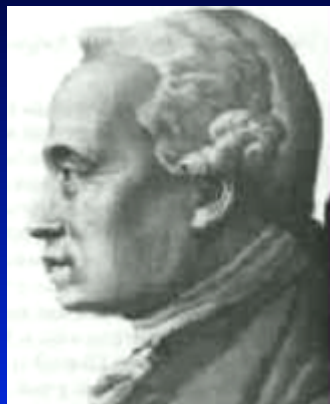
1. イントロダクション
 - 1) 星・惑星形成の概要
 - 2) 電波・赤外線観測の特徴
2. 原始惑星系円盤
 - 1) 惑星系形成の標準理論
 - 2) 最新の観測結果
円盤構造、ダスト成長、有機物質
3. 系外惑星
 - 1) 系外惑星の観測
 - 2) 太陽系と系外の惑星系との比較
4. 将来計画
5. まとめ

イントロダクション

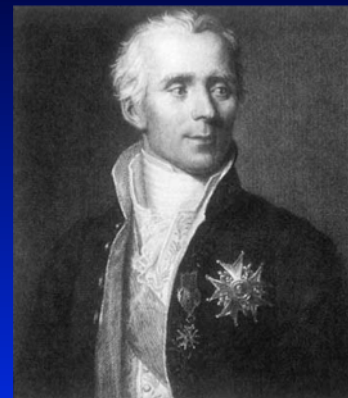
星雲仮説



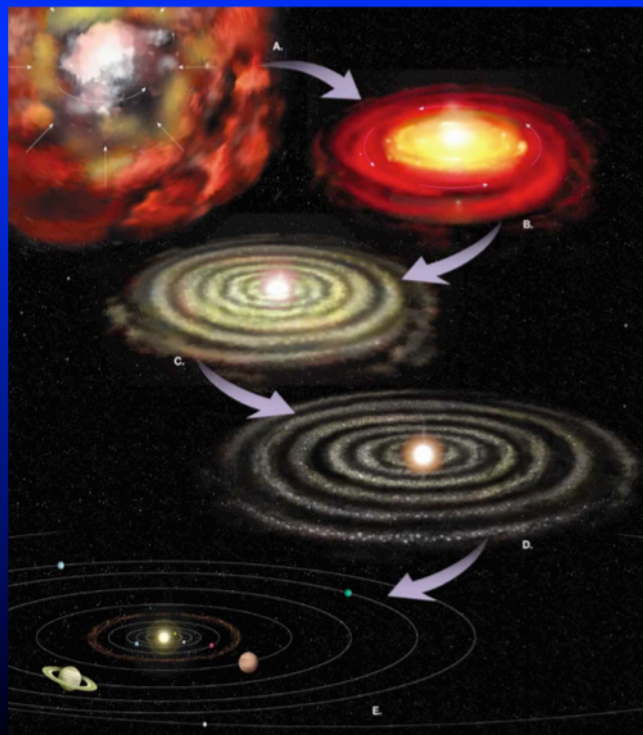
Swedenborg 1688-1772



Kant 1724-1801



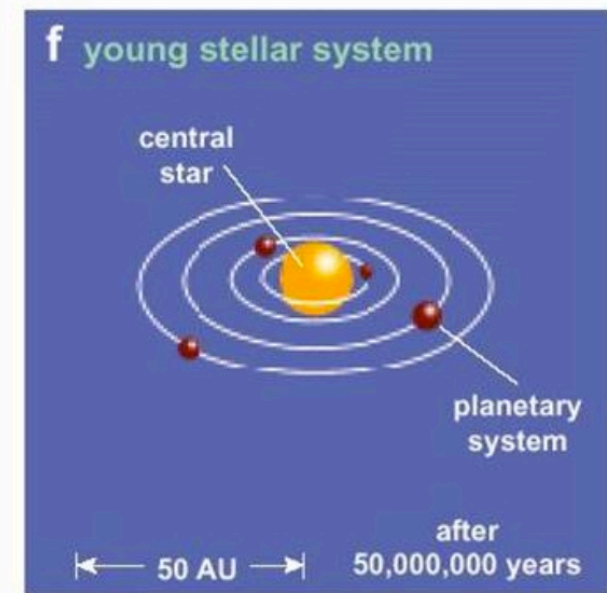
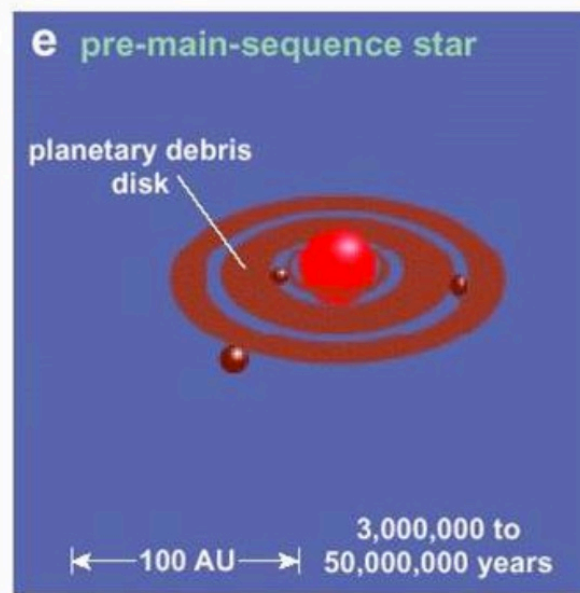
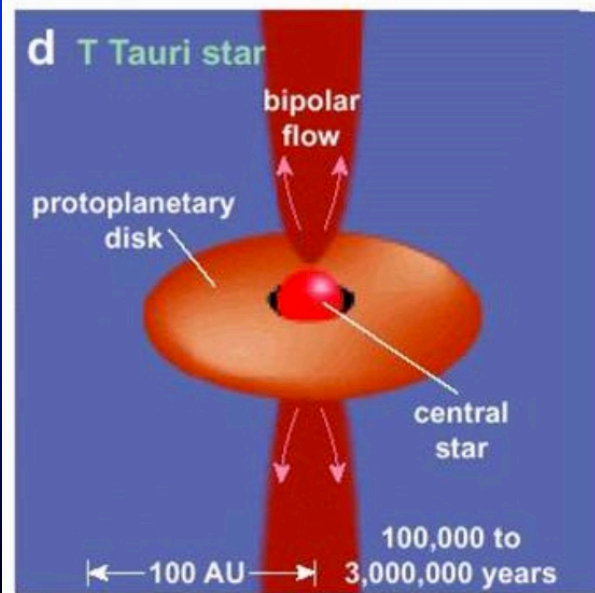
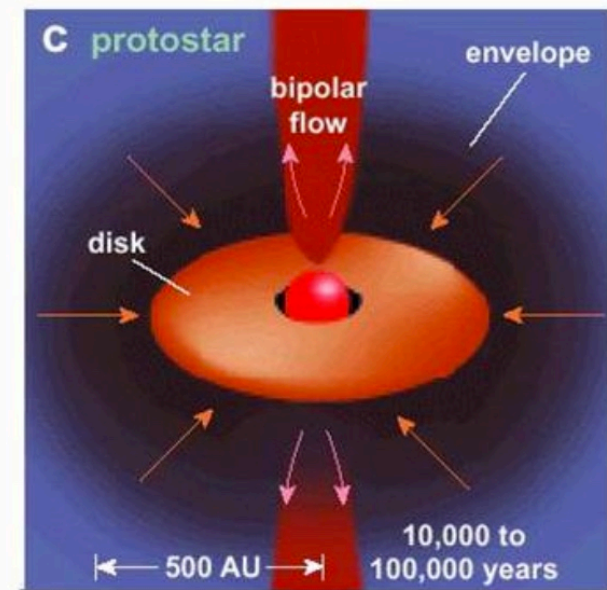
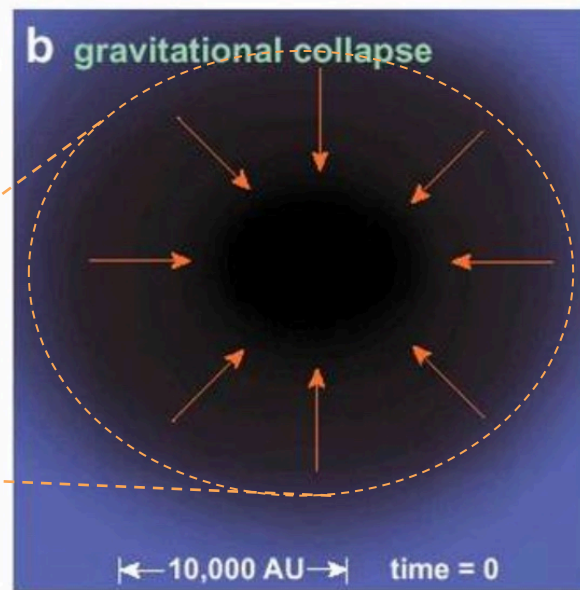
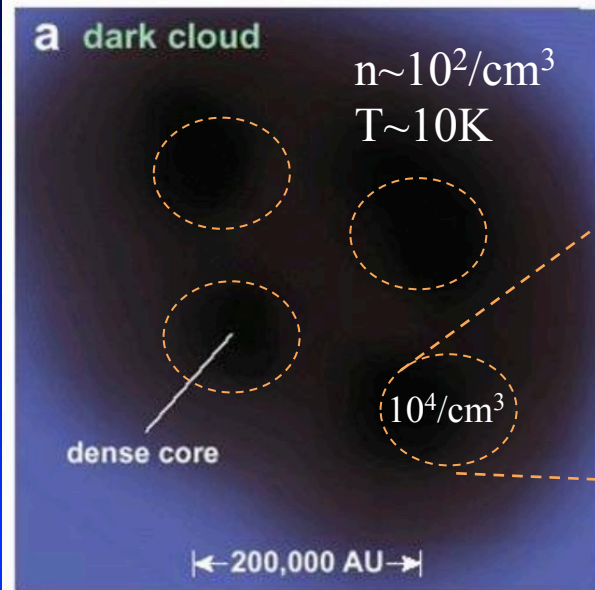
Laplace 1749-1827



1. ガス雲が重力収縮する。
2. 回転軸方向では収縮が進み、動径方向では収縮が進まず円盤構造が形成される。
3. 重力と円心力で釣り合う。
4. リング形状が生じ惑星が形成される。

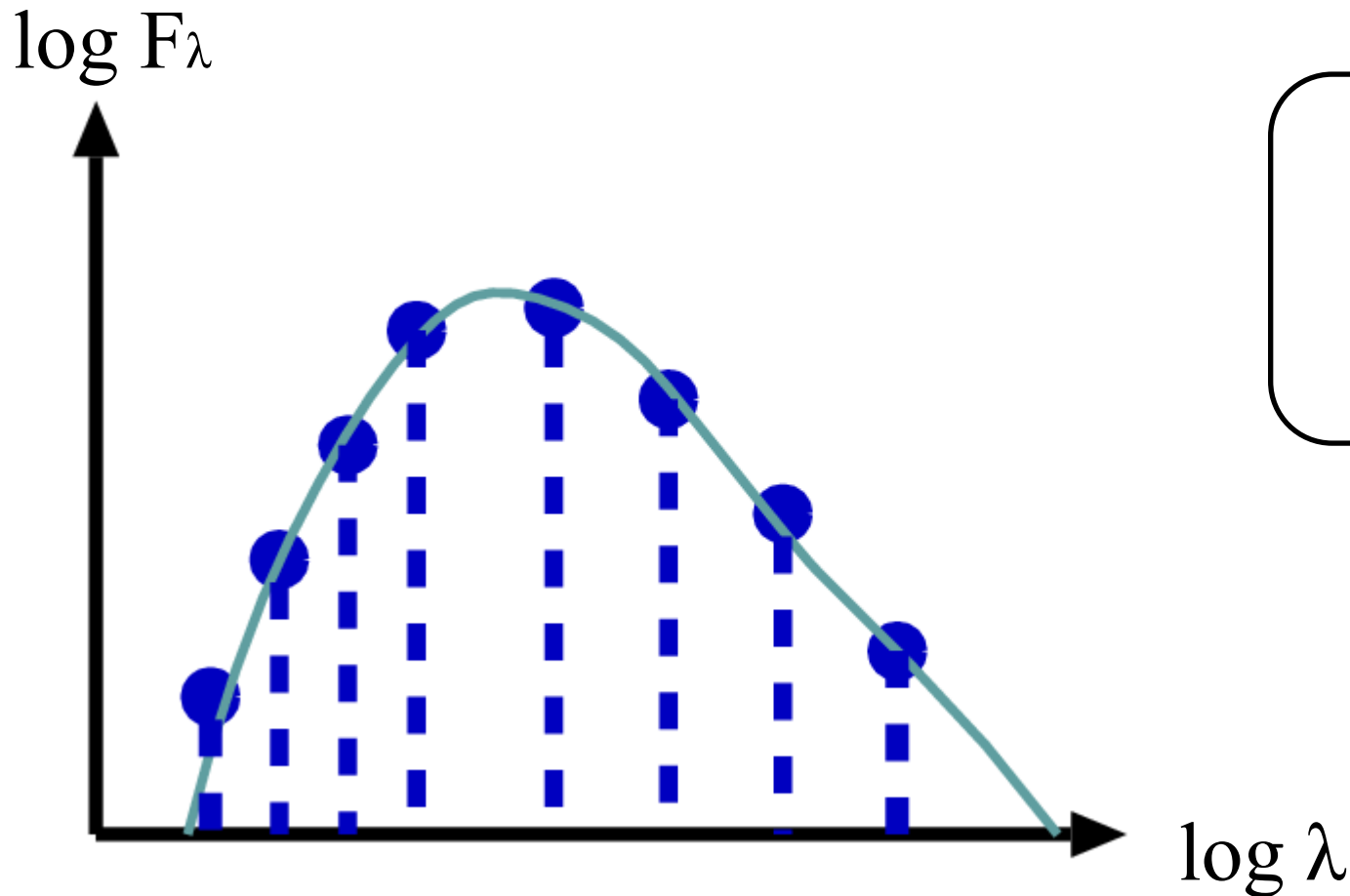
星・惑星系形成の概要

Greene 2001を改編



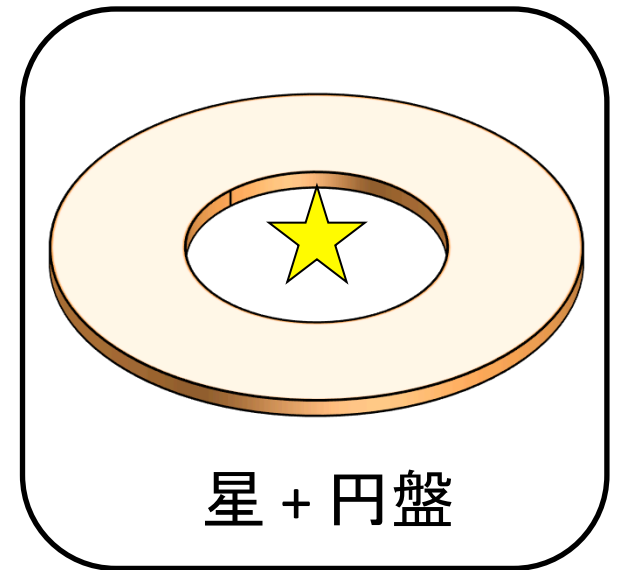
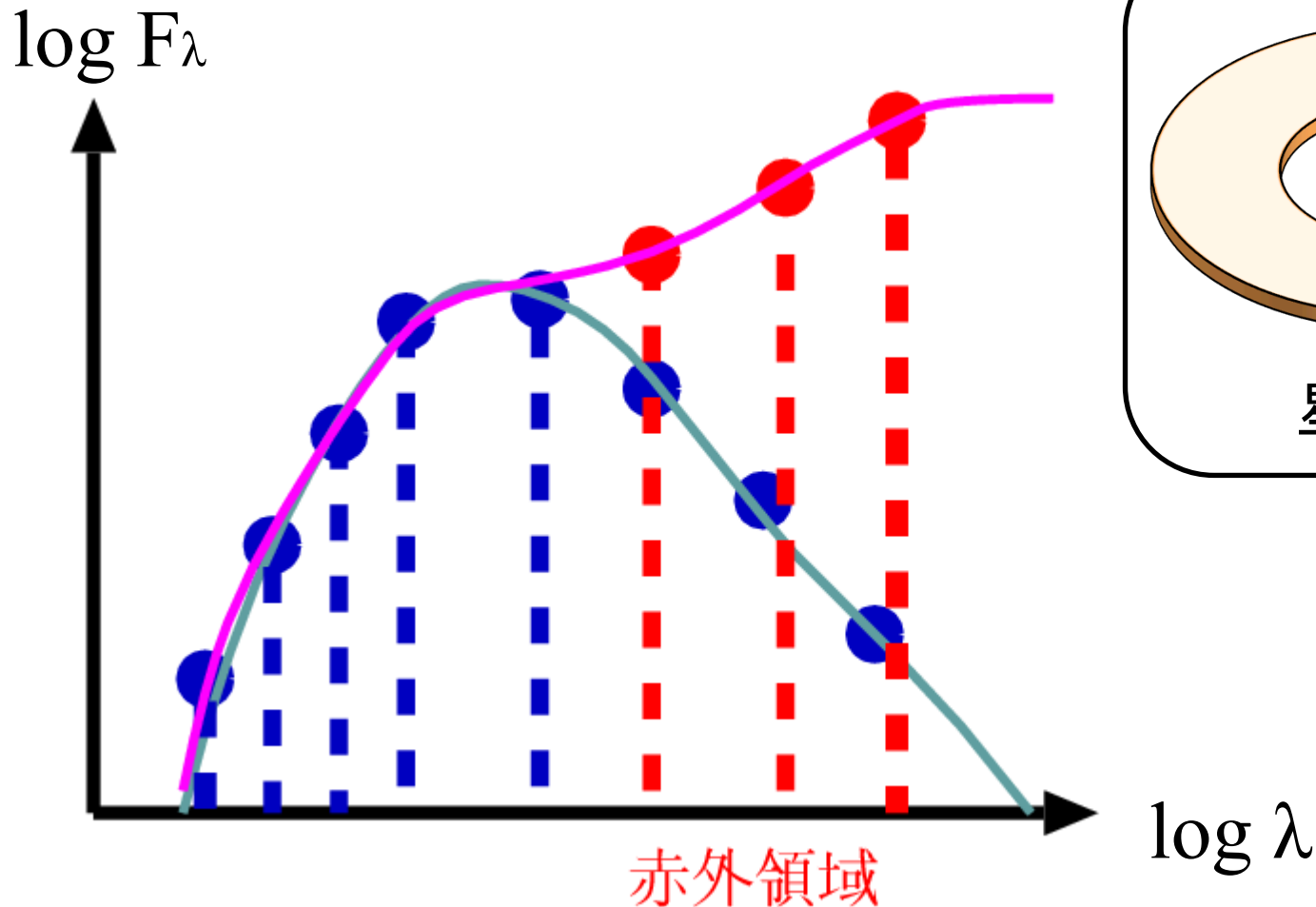
スペクトルエネルギー分布(SED)

SED:天体を波長ごとの強度分布で表したものの
星のみであればプランクの式で表されるカーブになる



スペクトルエネルギー分布(SED)

星の周囲に物質があると赤外線領域で強度が卓越する
(赤外超過)。



SEDによる形成進化の分類

SEDは星の進化の指標となる。

Classの定義

波長 $2.2\mu\text{m}$ から $24\mu\text{m}$ 間の傾きで分類する。

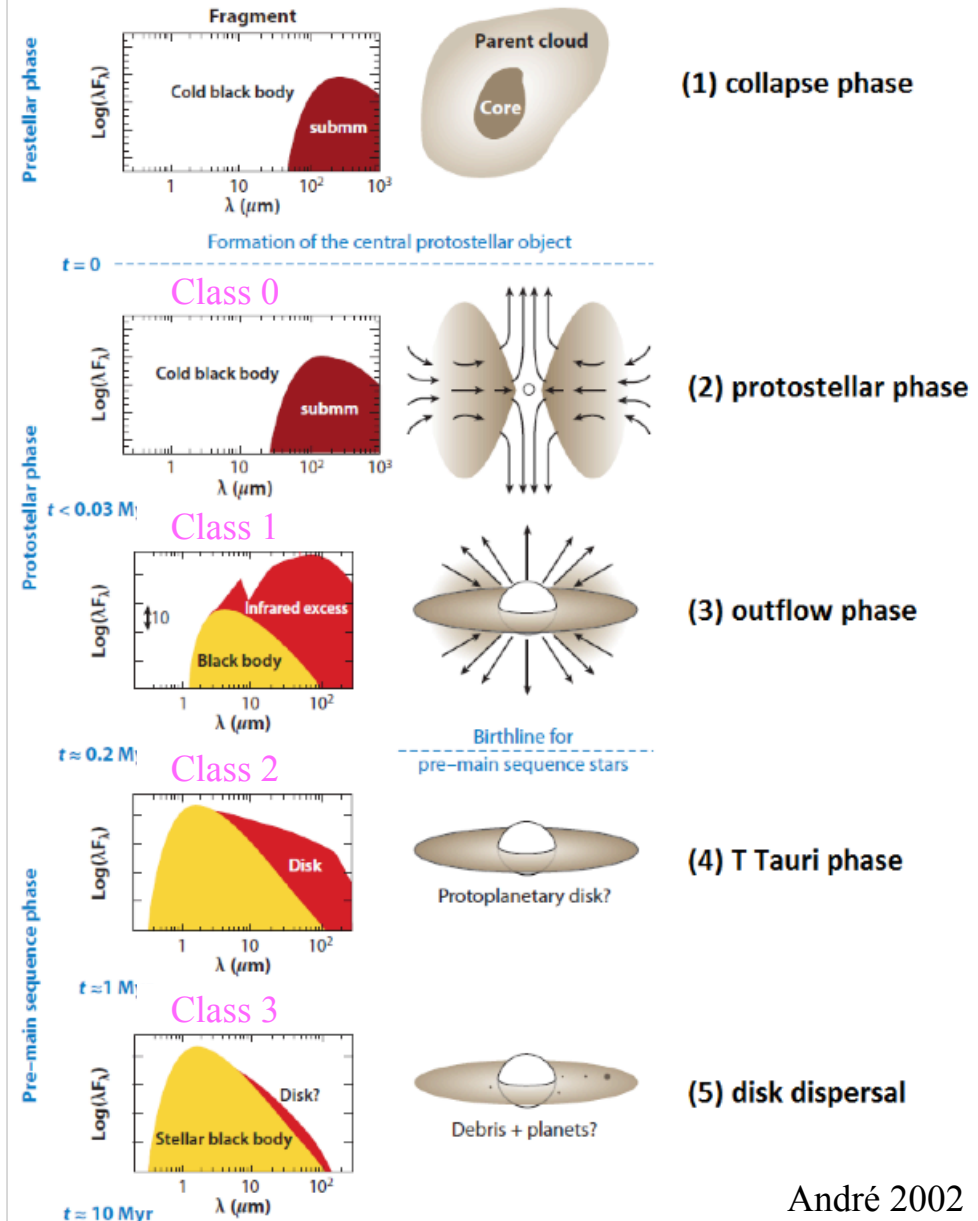
$$\alpha_{IR} = \frac{d \log \lambda F_{\lambda}}{d \log \lambda}$$

Class 0: α_{IR} が測定不可

Class 1: $\alpha_{IR} \geq 0$

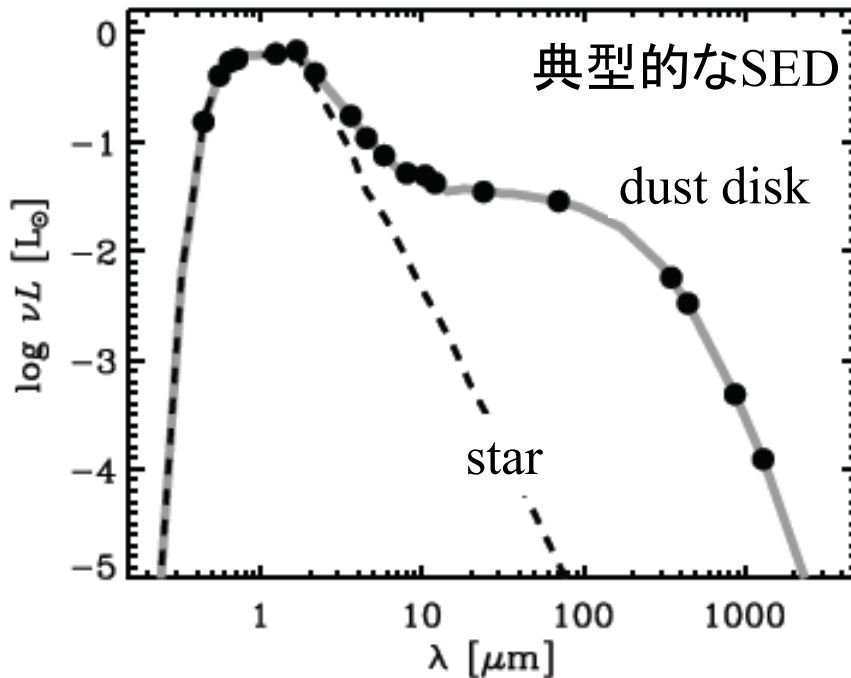
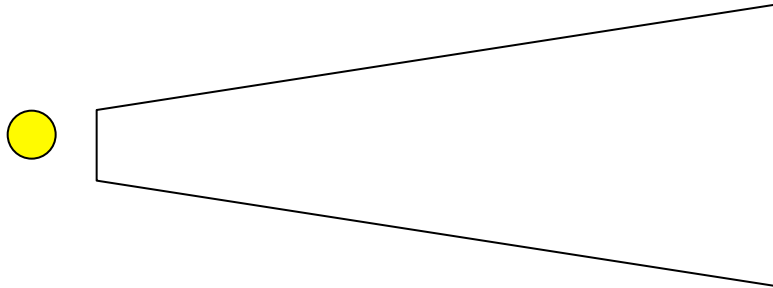
Class 2: $-1.5 \leq \alpha_{IR} \leq 0$

Class 3: $\alpha_{IR} \approx -1.5$



観測領域とSEDとの関係

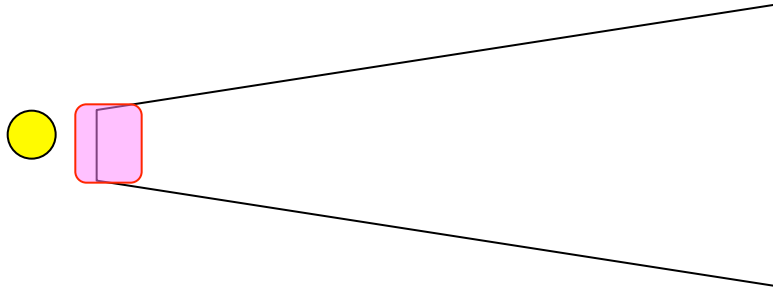
Spectral Energy Distribution (SED):
天体を波長ごとの強度分布で表したもの。



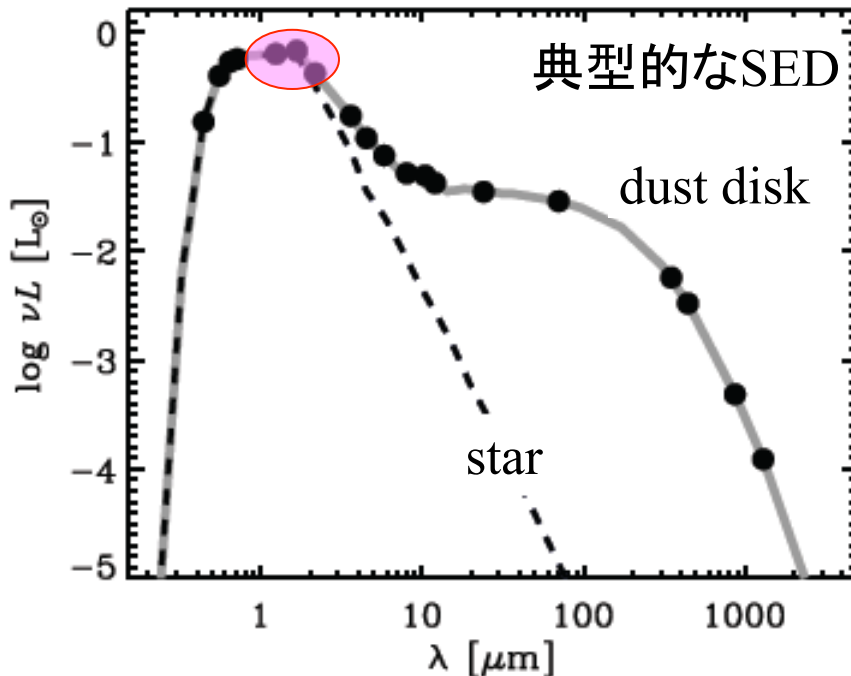
Dullemond et al. 2007参考

観測領域とSEDとの関係

SED:天体を波長ごとの強度分布で表したもの
黒体放射であればプランクの式で表されるカーブになる



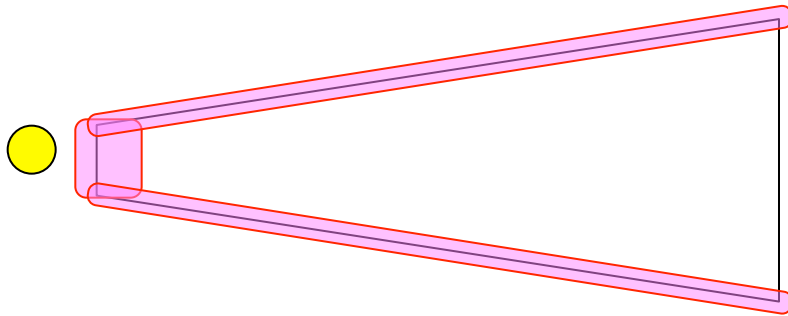
近赤外 : 星近傍からの熱放射
~数AU



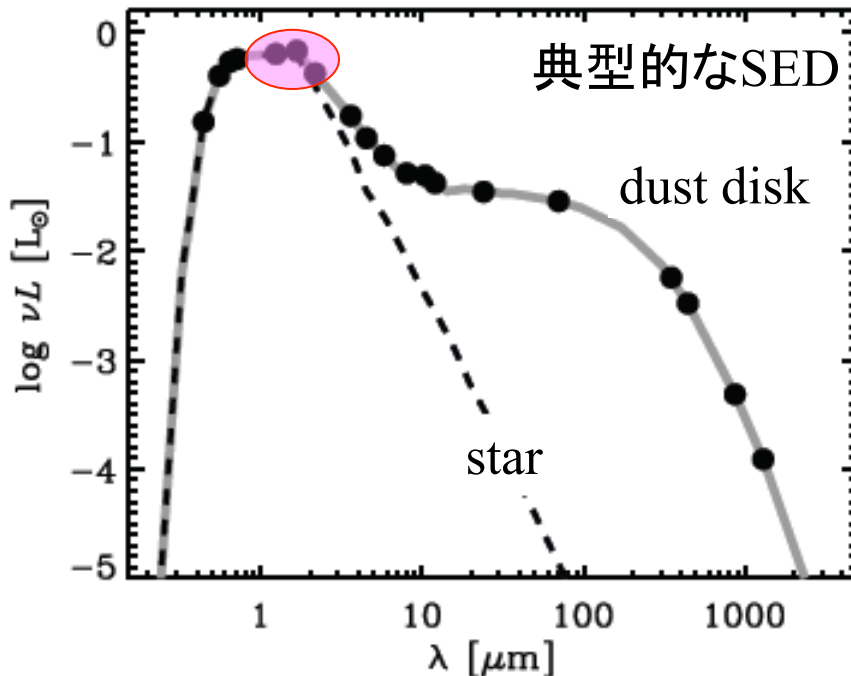
Dullemond et al. 2007参考

観測領域とSEDとの関係

SED:天体を波長ごとの強度分布で表したもの
黒体放射であればプランクの式で表されるカーブになる



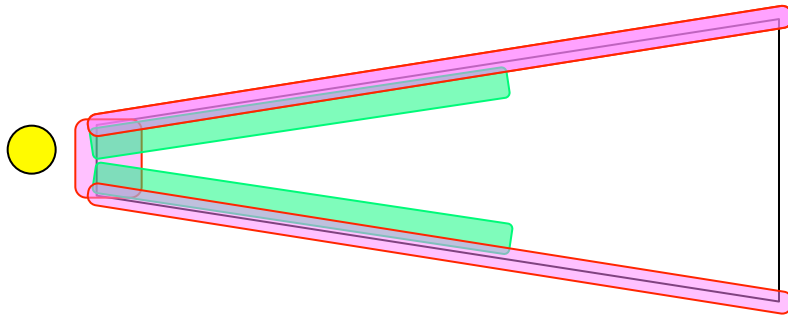
近赤外 : 星近傍からの熱放射
~数AU
: 円盤表面の散乱光



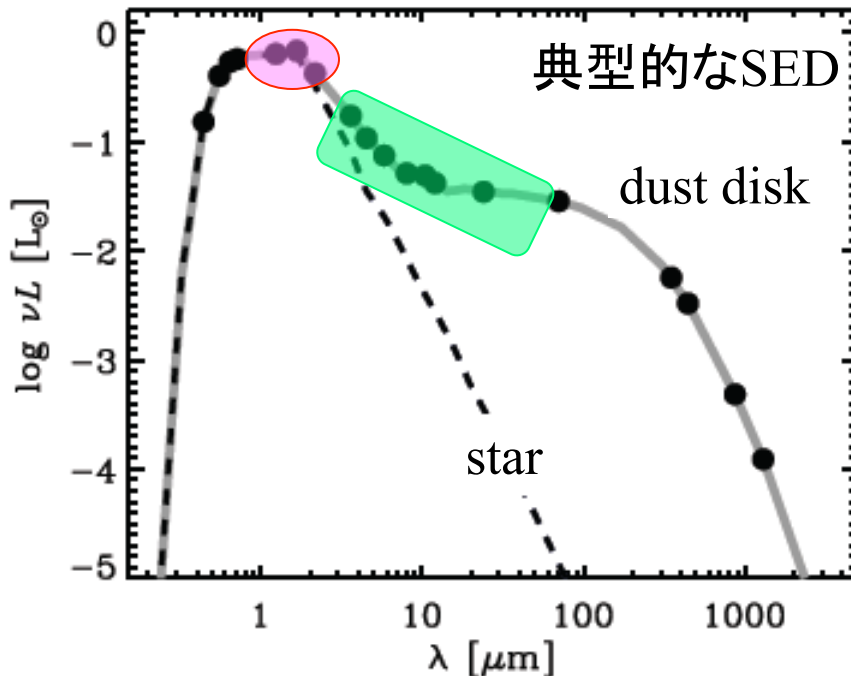
Dullemond et al. 2007参考

円盤の観測位置とSEDとの関係

SED:天体を波長ごとの強度分布で表したもの
黒体放射であればプランクの式で表されるカーブになる



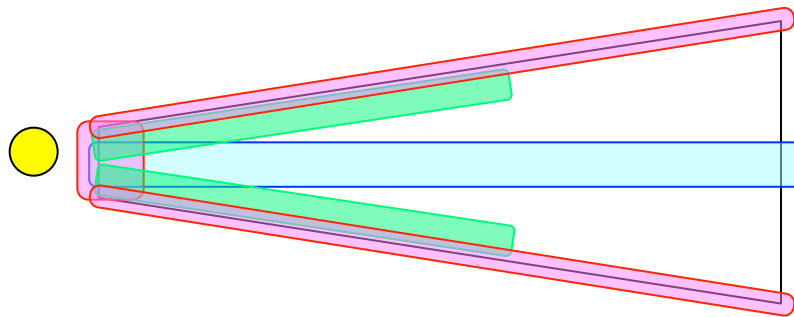
近赤外 : 星近傍からの熱放射
~数AU
: 円盤表面の散乱光
中間赤外 : ~数10からの熱放射



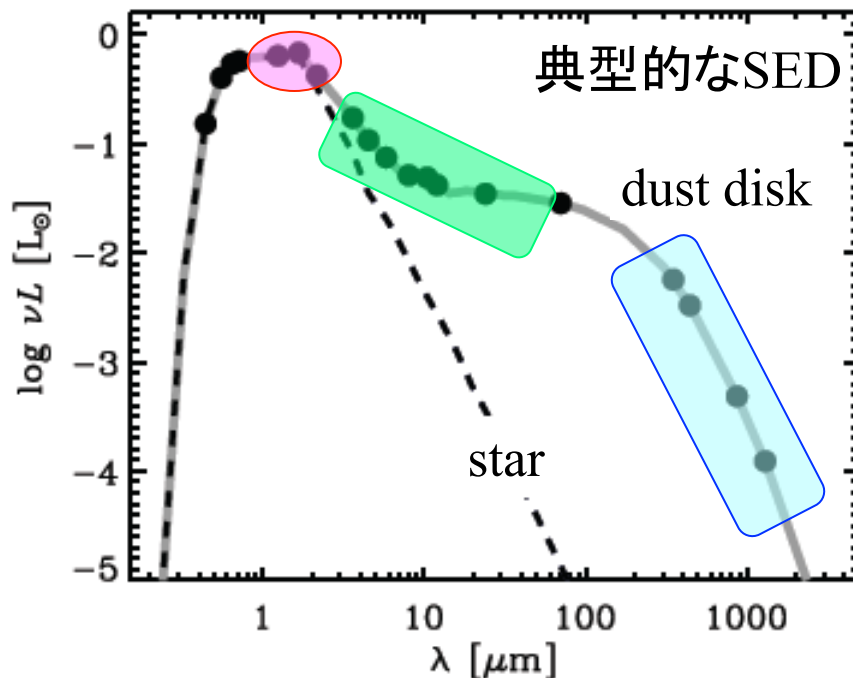
Dullemond et al. 2007参考

観測領域とSEDとの関係

SED:天体を波長ごとの強度分布で表したもの
黒体放射であればプランクの式で表されるカーブになる



近赤外 : 星近傍からの熱放射
~数AU
: 円盤表面の散乱光
中間赤外 : ~数10からの熱放射
電波 : 円盤赤道面からの熱放射

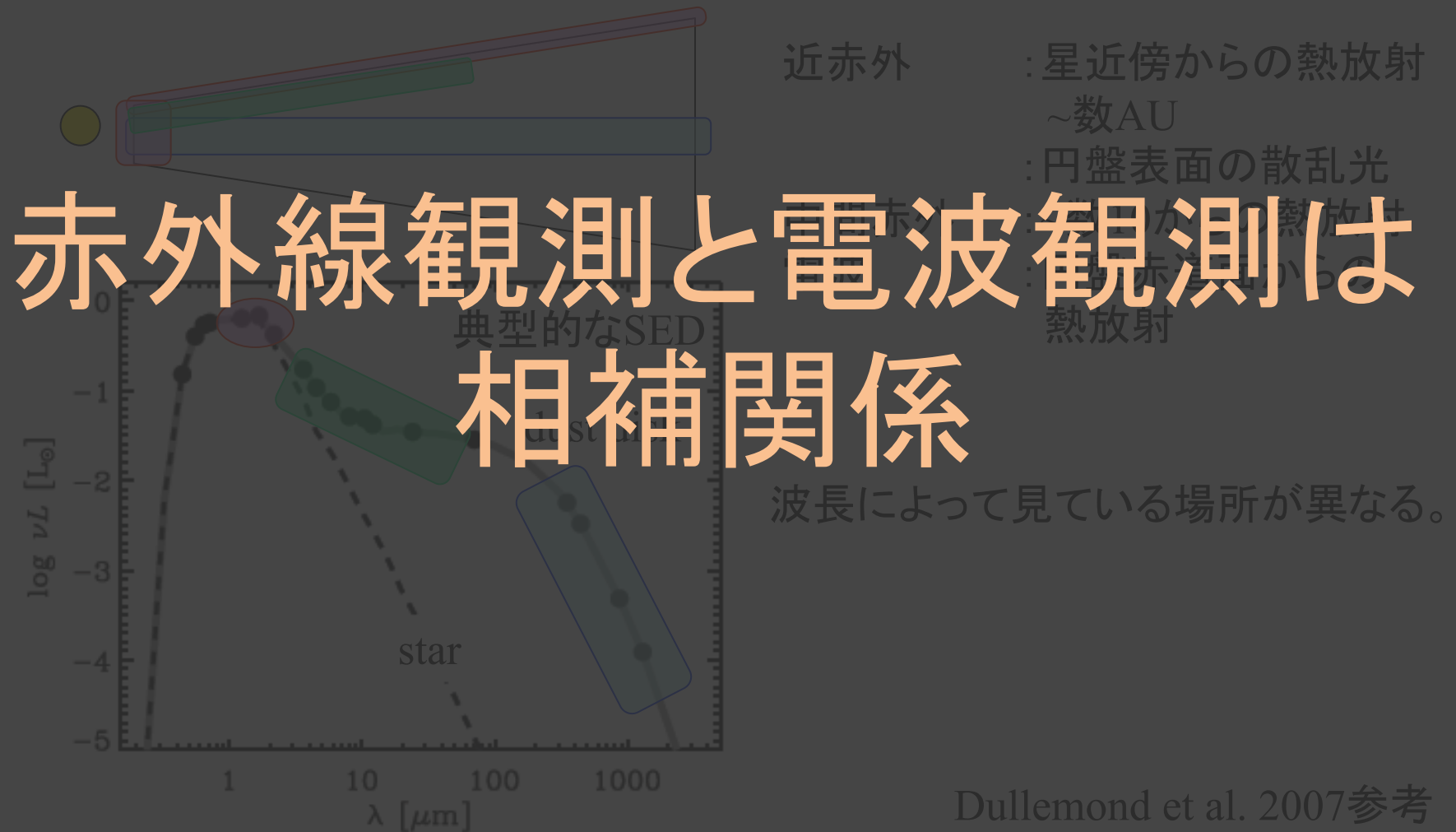


波長によって見ている場所が異なる。

Dullemond et al. 2007参考

観測領域とSEDとの関係

SED:天体を波長ごとの強度分布で表したもの
黒体放射であればプランクの式で表されるカーブになる



ALMAの3大テーマ

- 銀河の誕生を探る

原始銀河や宇宙の始まりに迫る

- 惑星の誕生を探る

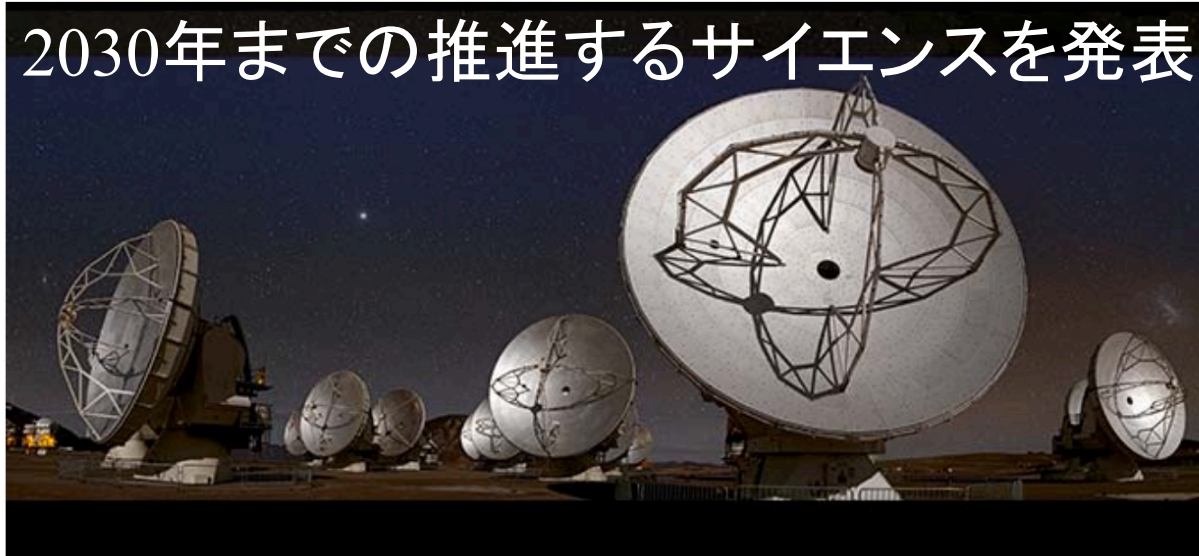
太陽系や地球の起源に迫る

- 宇宙物質の進化を探る

アミノ酸や生命起源の謎に迫る

2018年7月12日

2030年までの推進するサイエンスを発表



After half a decade of ALMA operations, the original science goals of the observatory have been essentially met. To maintain the leading-edge capabilities of the observatory, the ALMA Board designated a Working Group to prioritize recommendations from the ALMA Science Advisory Committee (ASAC) on new developments for the observatory between now and 2030.

The Working Group concluded, based on the ASAC recommendations, that the science drivers that will support further developments shall be:

- to trace the cosmic evolution of key elements from the first galaxies through the peak of star formation in the Universe;
- to trace the evolution from simple to complex organic molecules through the process of star and planet formation down to solar system scales;
- to image protoplanetary disks in nearby star formation regions to resolve their Earth-forming zones, enabling detection of the tidal gaps and inner holes created by forming planets.

- to trace the cosmic evolution of key elements from the first galaxies through the peak of star formation in the Universe;
- to trace the evolution from simple to complex organic molecules through the process of star and planet formation down to solar system scales;
- to image protoplanetary disks in nearby star formation regions to resolve their Earth-forming zones, enabling detection of the tidal gaps and inner holes created by forming planets.

- 星・惑星形成を通して簡単な有機分子から複雑な有機分子への進化を追う。
- 原始惑星系円盤の地球型惑星形成領域の空間分解し、形成中の惑星によるギャップや穴構造の検出する。

原始惑星系円盤

惑星系形成の標準理論

主な惑星形成理論

最小質量モデル(京都モデル)

- 太陽系の現在の天体から見積もられる最小質量の物質を初期質量とし、力学的に時間発展させた理論である。
- 円盤ガスが散逸した状態で惑星が成長するSafronovモデル(1969)と円盤ガスが残ったまま惑星が成長する林モデル(~1985)がある。

重力不安定モデル

- 太陽質量以上の大質量星雲を考え、重力不安定によりダイレクトに短時間で巨大惑星が誕生する理論である。Cameronモデル(1969)とも言う。

最小質量モデルの基礎概念

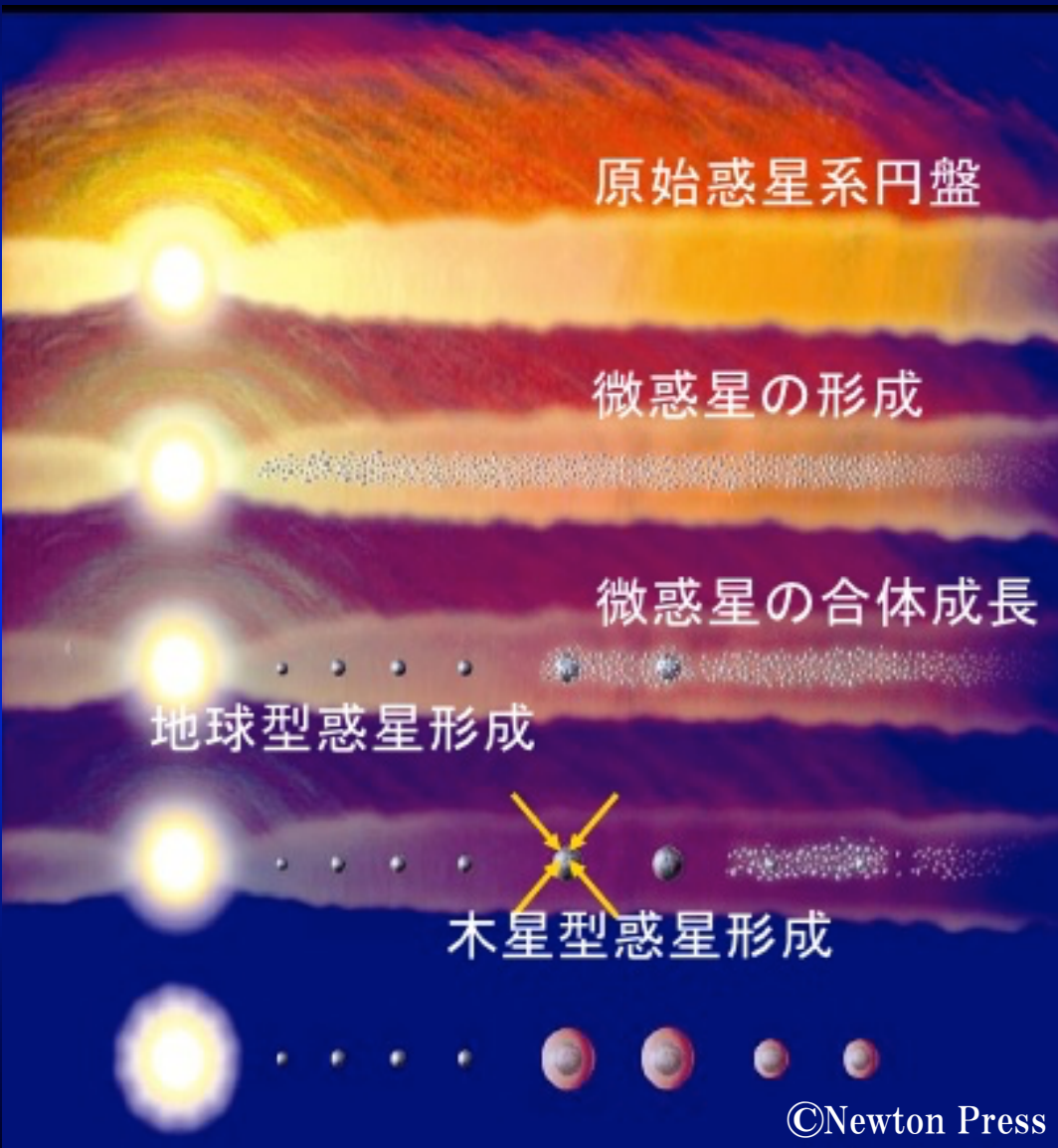
円盤仮説

- 惑星系は恒星周りの小質量の円盤(原始惑星系円盤)から形成される。
- 円盤はガスとダストで構成される。

微惑星仮説

- ダストの集積で微惑星が形成される。
- 微惑星の集積で惑星が形成される。
- 固体惑星が核となり、その周りにガスが集まることでガス惑星が形成される(コア集積モデル)。

太陽系形成標準理論



SED分類のClass 2 以降の進化理論

1980年代にロシア、日本で枠組み
確立(最小質量モデル、京都モデル)。

原始惑星系円盤から進化を考える。

ガス・ダスト比 = 100:1

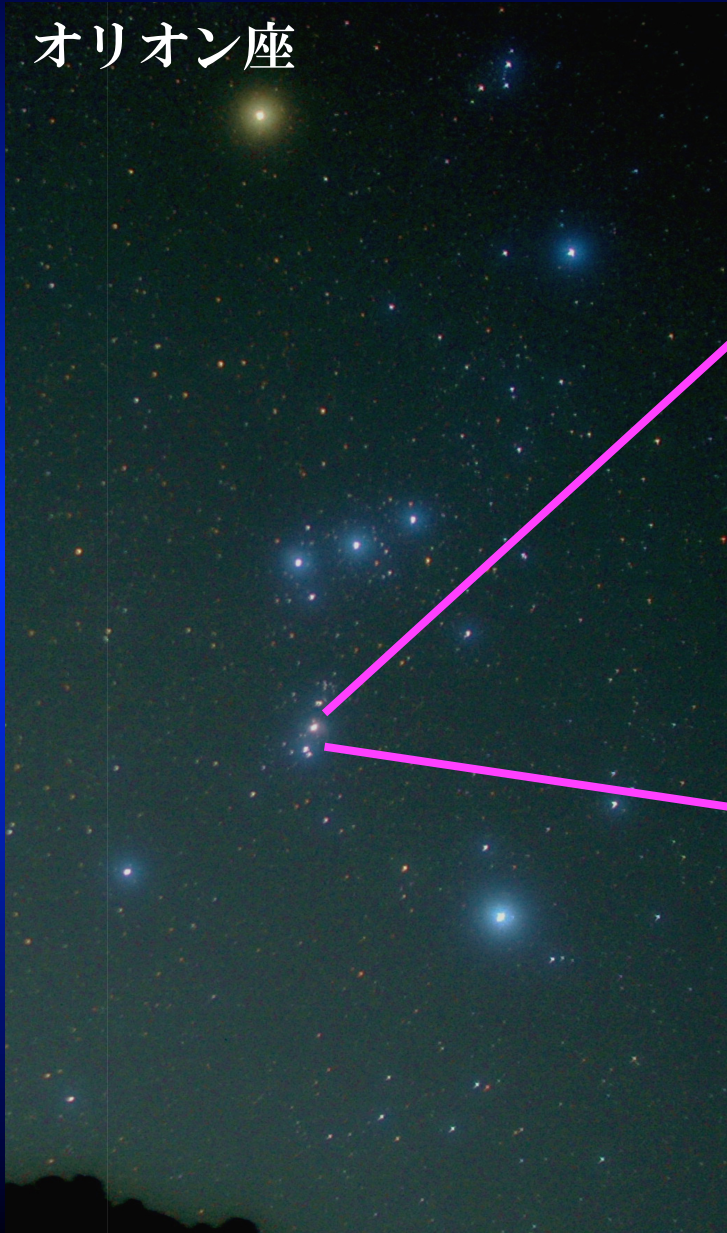
円盤の総質量 = $0.01 M_{\odot}$

地球型惑星、巨大ガス惑星、巨大
氷惑星の形成領域を再現でき、
惑星の円軌道と軌道間隔を説明で
きる。

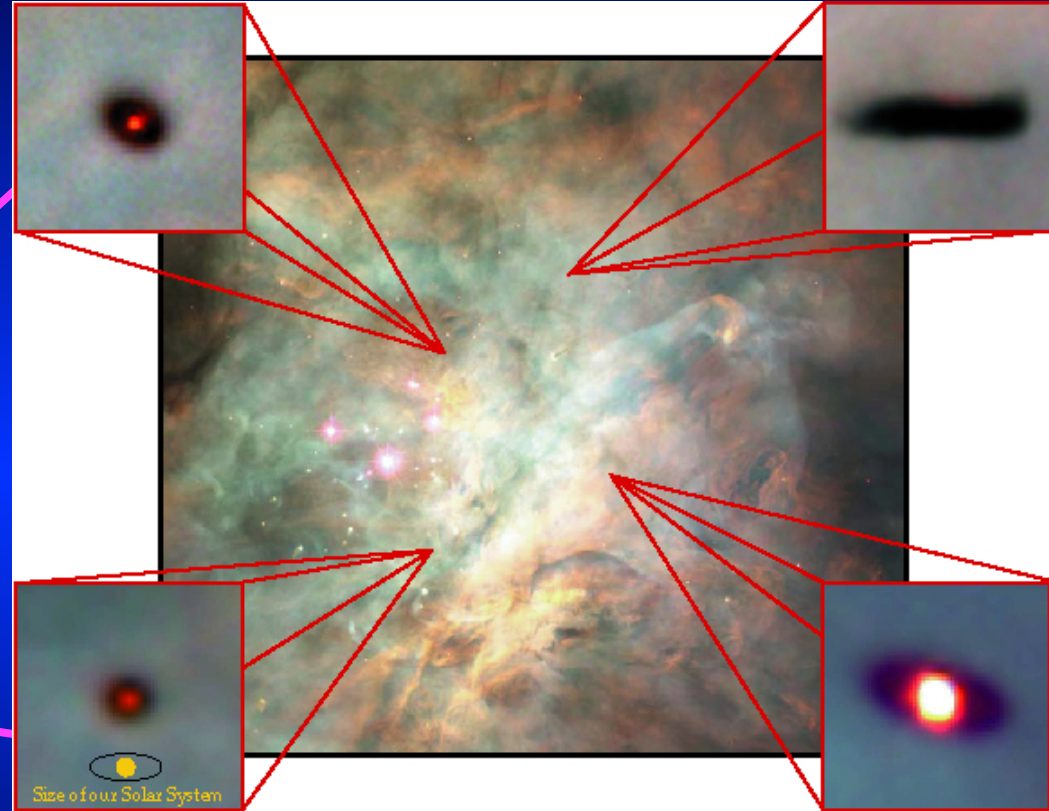
現在の太陽系の姿を説明できる。

原始惑星系円盤

オリオン座

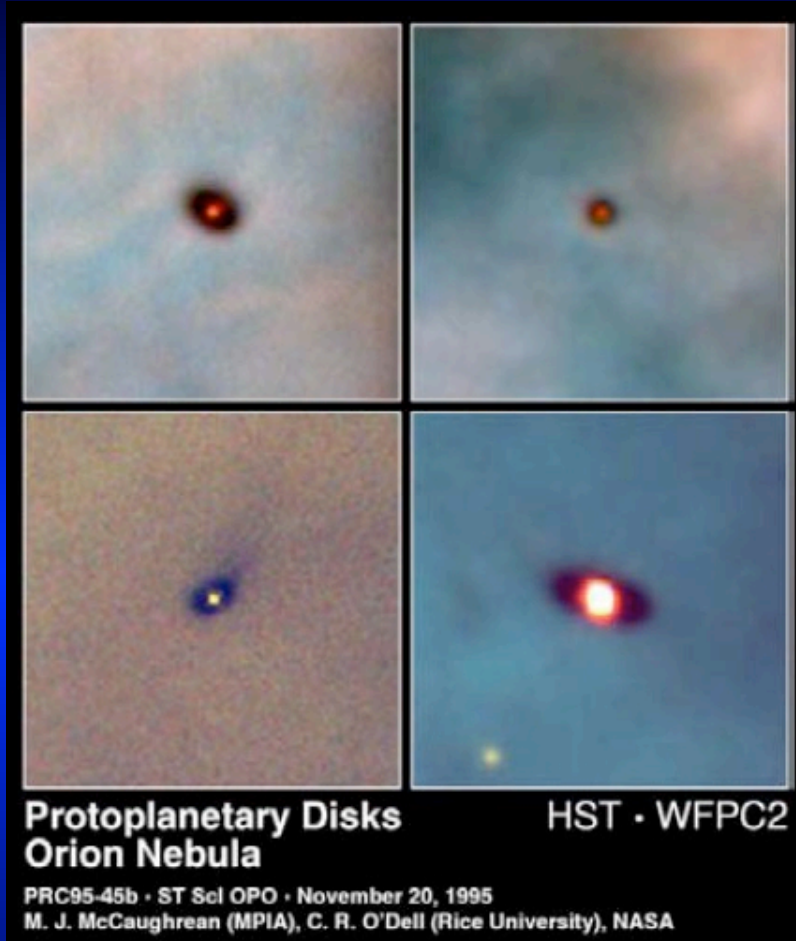


オリオン大星雲(M42)

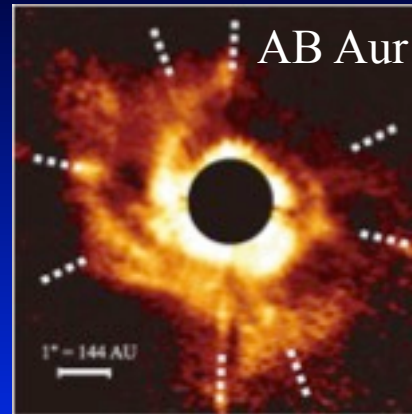


Credit: C. R. O'Dell and S. K. Wong

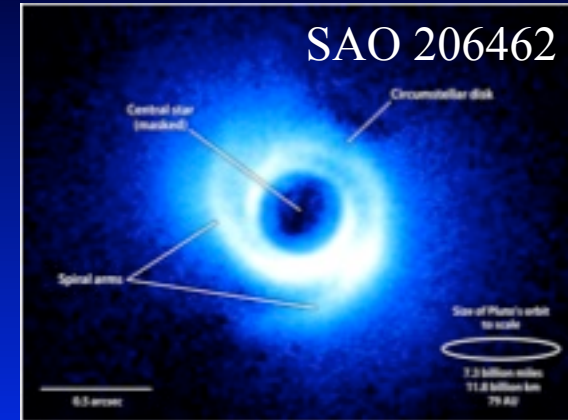
原始惑星系円盤



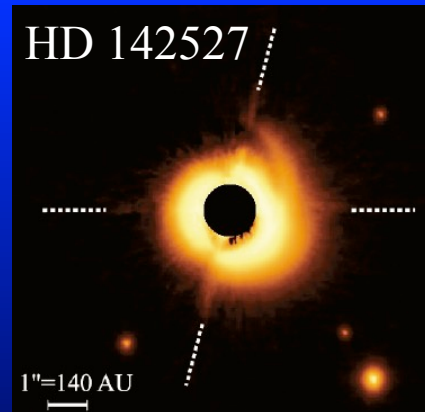
McCaughrean & O'Dell 1995



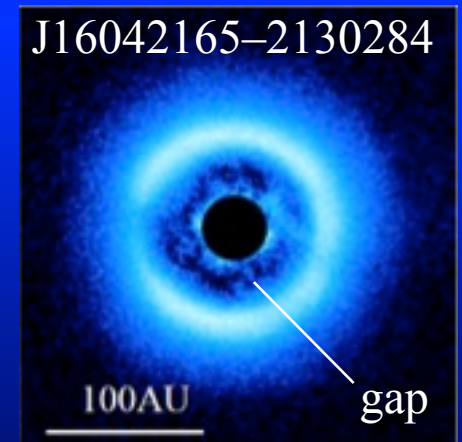
Fukagawa+2004



Muto+2012



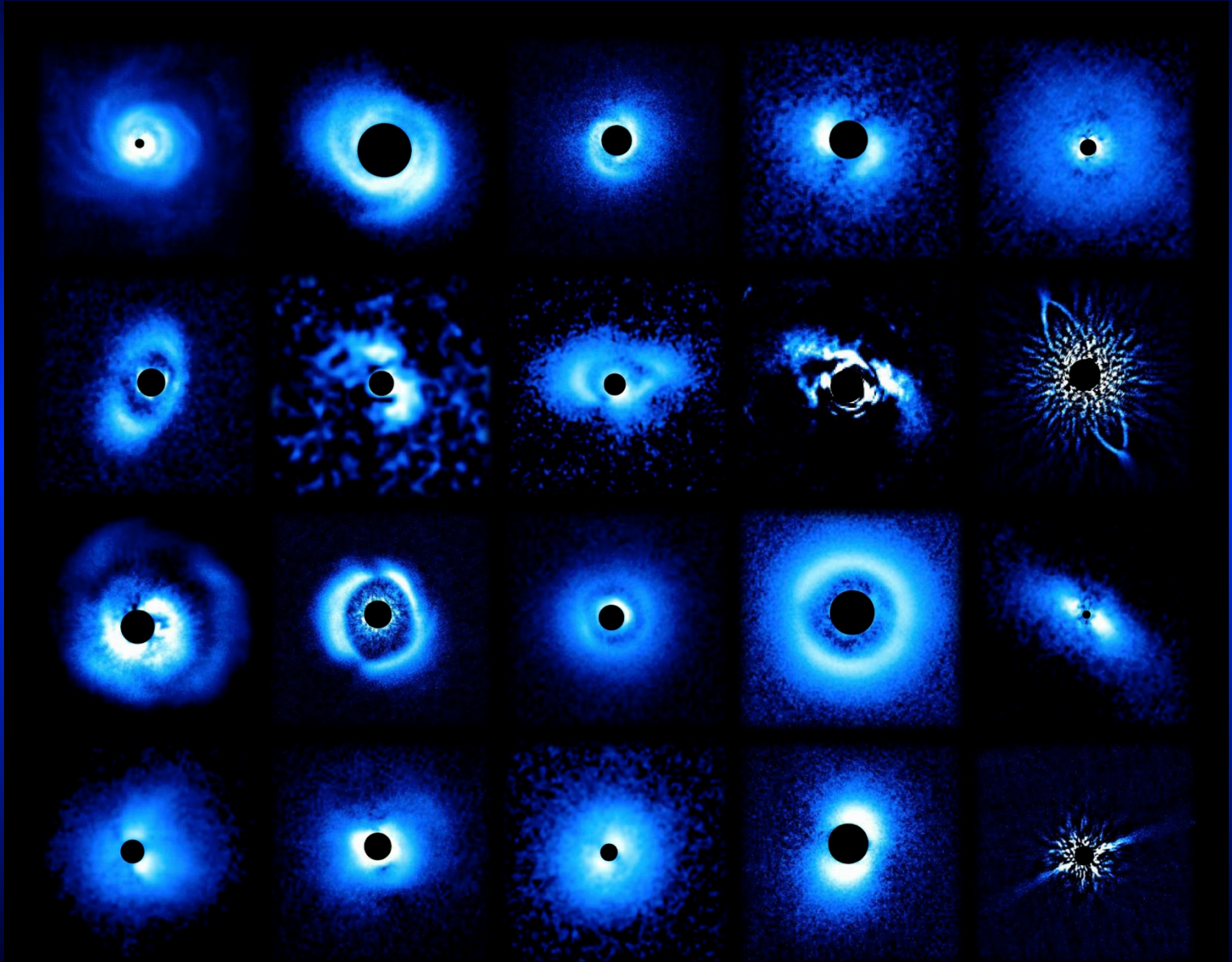
Fukagawa+2006



Mayama+2012

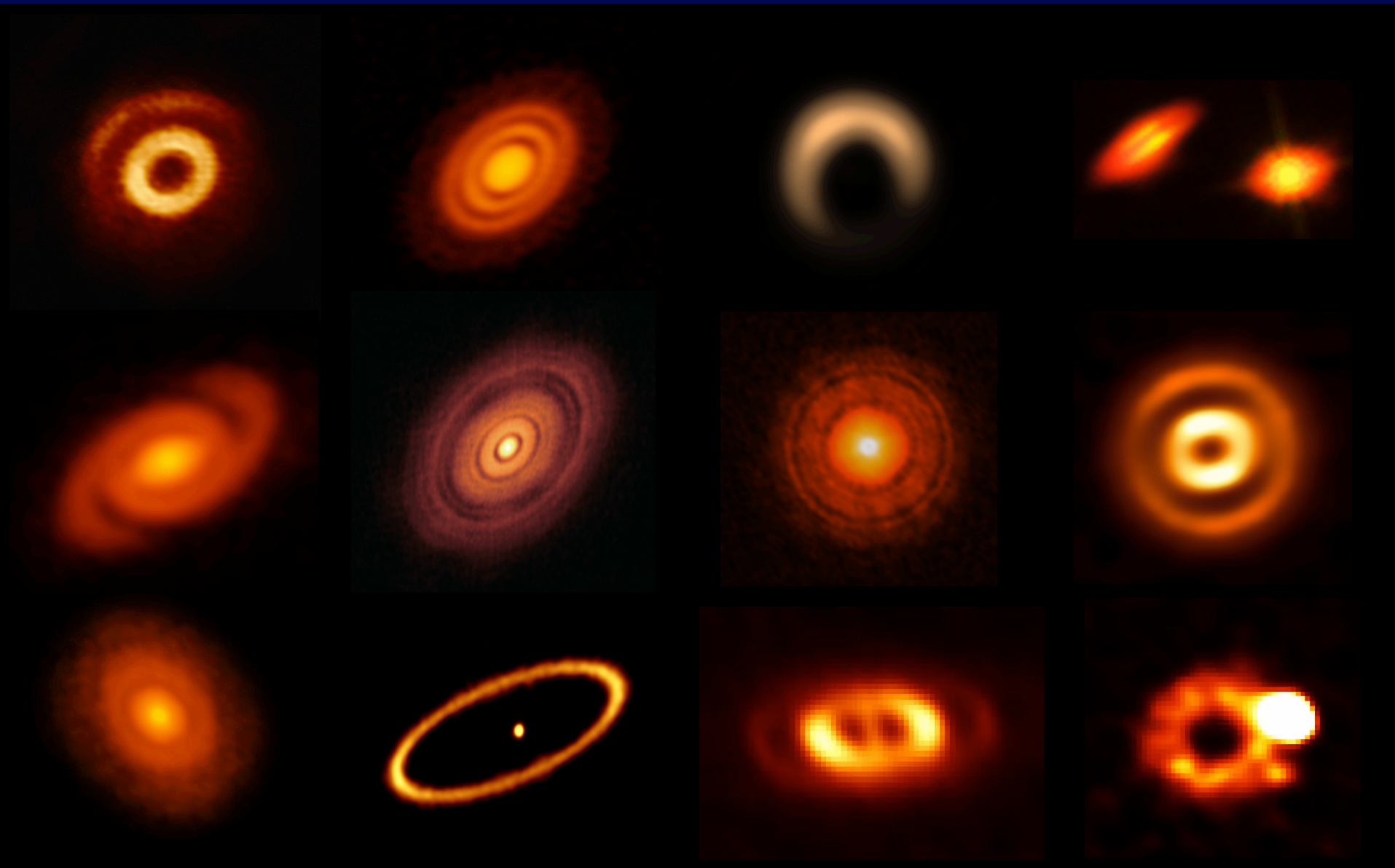
円盤は複雑な構造を持つ

原始惑星系円盤一覽(近赤外線)



<http://subarutelescope.org/Pressrelease/2013/08/04/fig3e.jpg>

原始惑星系円盤一覽(電波)



原始惑星系円盤の構造

穴構造

多重リング構造

渦状腕構造

非対称構造

穴構造の示唆(遷移円盤)

赤外線天文衛星(IRAS)サーベイの結果、少数のサンプルに中心に穴が開いている天体がある事が判明した。

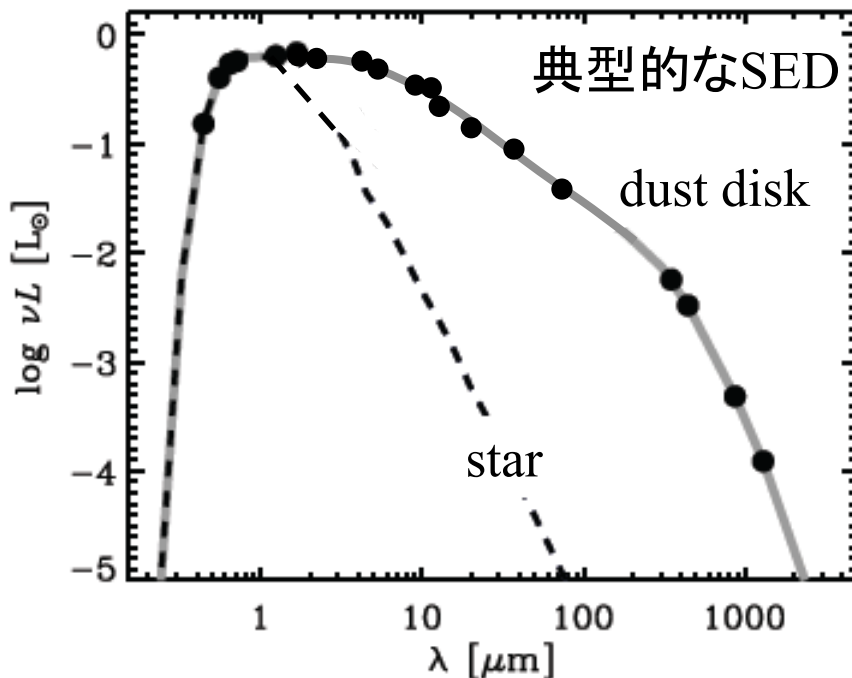
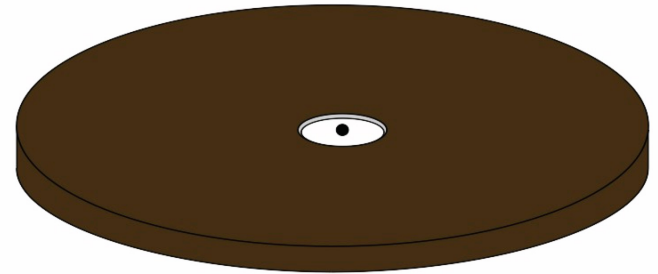
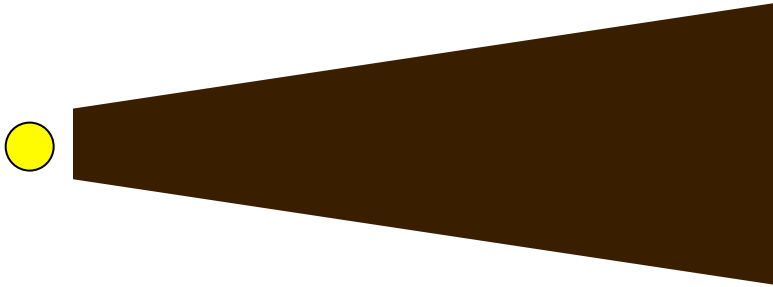
Strom et al. 1989

“The presence of IR excesses for $\lambda > 10 \mu\text{m}$... and the absence of excess emission at $\lambda < 10 \mu\text{m}$... may diagnose disk clearing in the inner regions of the disk. If so, these observations may represent the first astrophysical evidence of disks in transition from massive, optically thick structures... to low-mass, tenuous, perhaps postplanet-building structures.”

SEDから得られる円盤構造

Primordial Disk

穴やスパイラル構造のないスムーズな密度分布を持つ円盤。

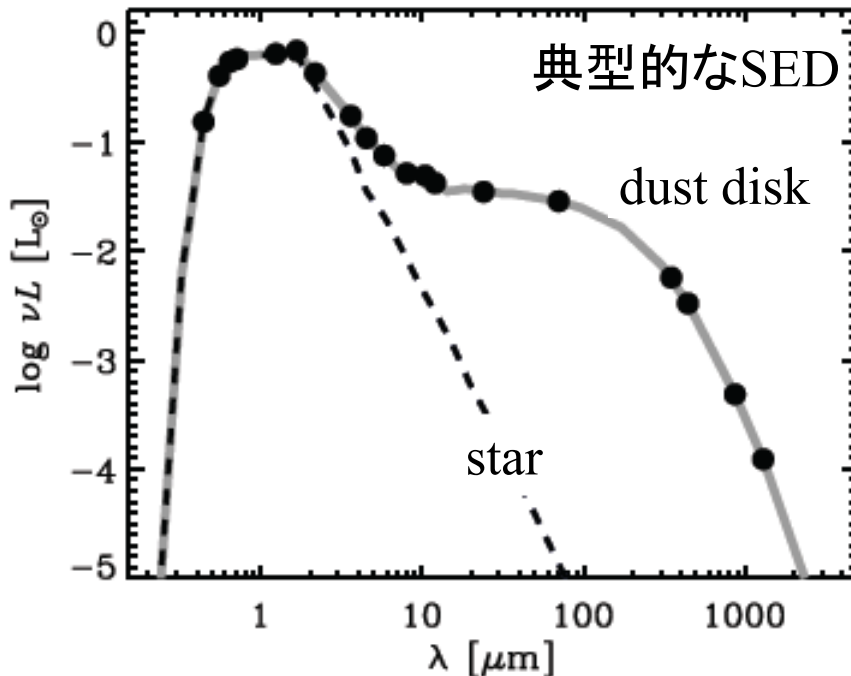
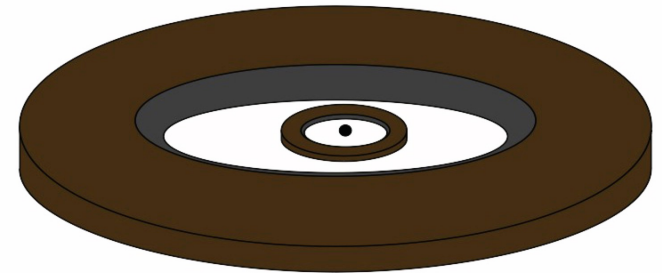
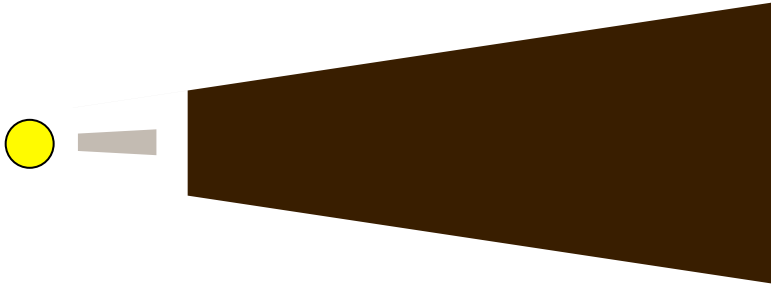


SEDでは近赤外領域で明るさの減少が見られないフラットな曲線を示す。

SEDから得られる円盤構造

Pre-transitional Disk

星の周囲で穴が開きつつある円盤。

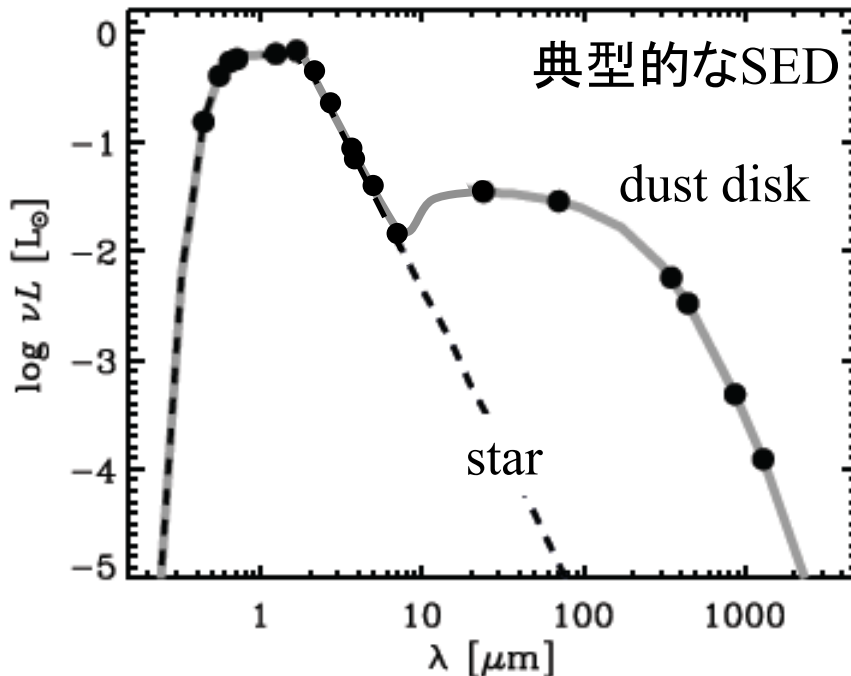
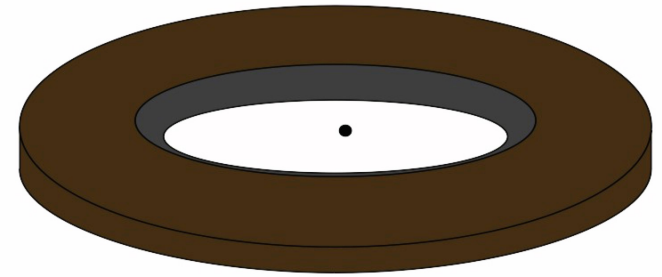
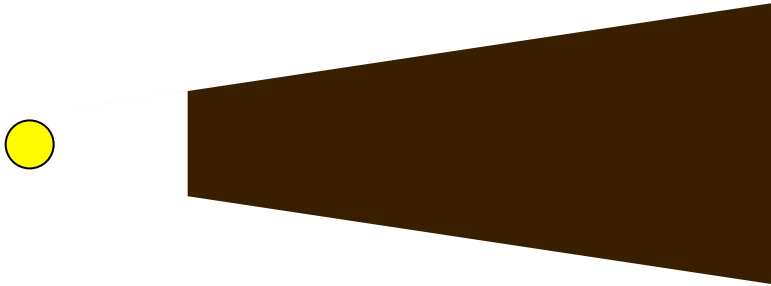


SEDでは近赤外領域で明るさの減少が見られるが、中心星の表面は見えない。

SEDから得られる円盤構造

Transitional Disk

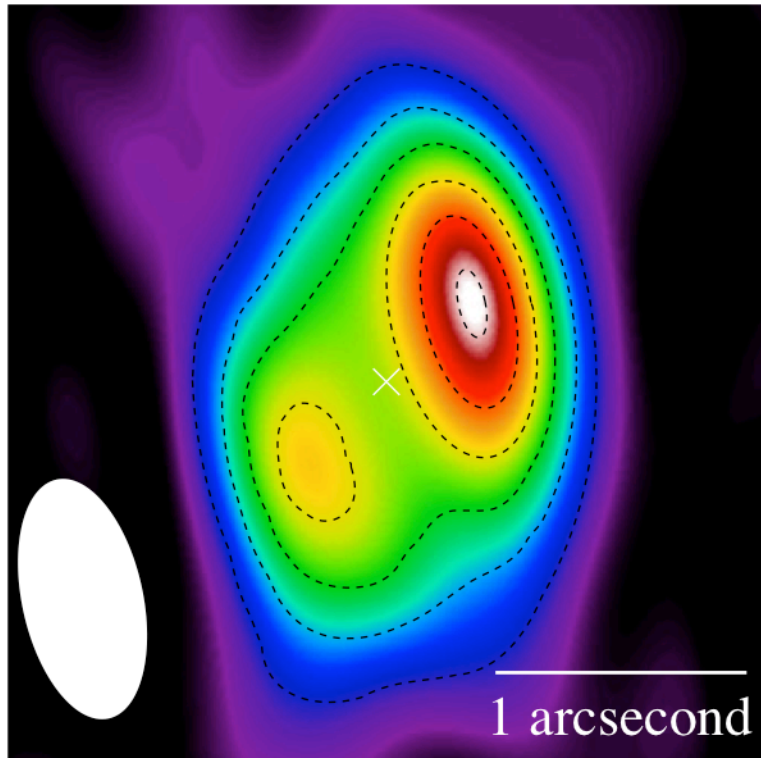
星の周囲に穴がある円盤。



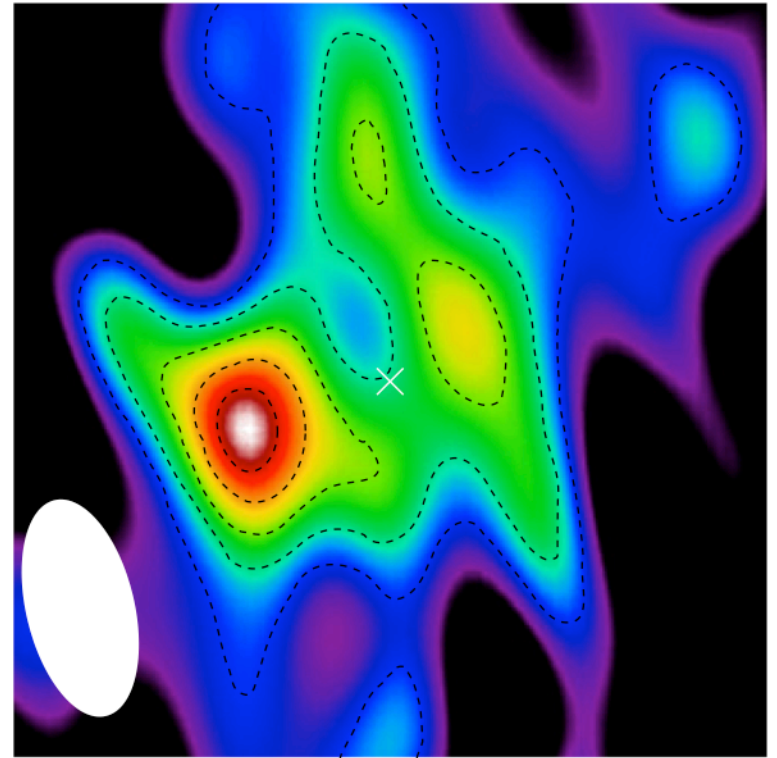
SEDでは近赤外領域で明るさの減少が見られ中心星の黒体放射が見られる。

従来の画像との比較

1.3 mm cont.

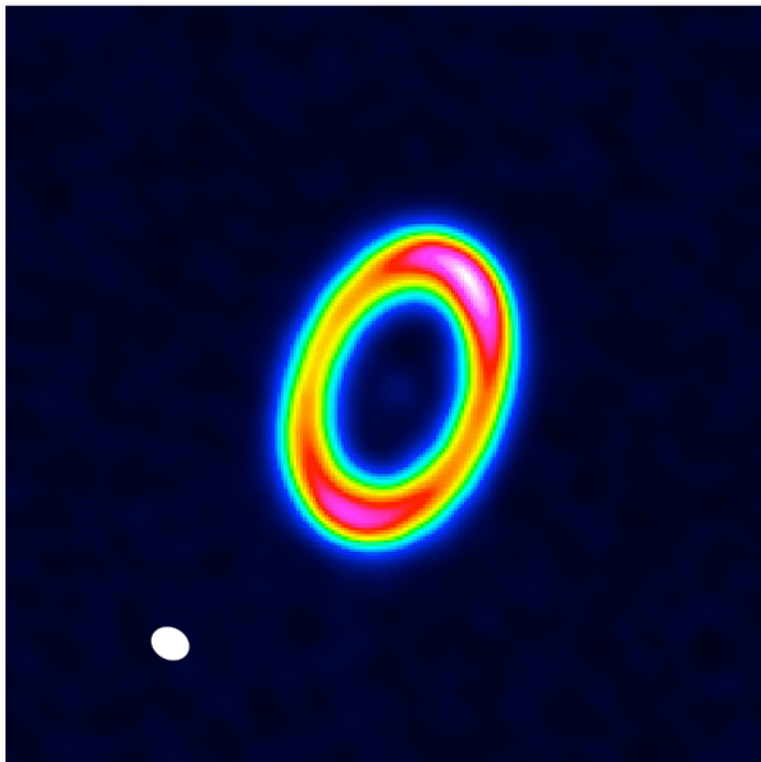


CO (2-1)

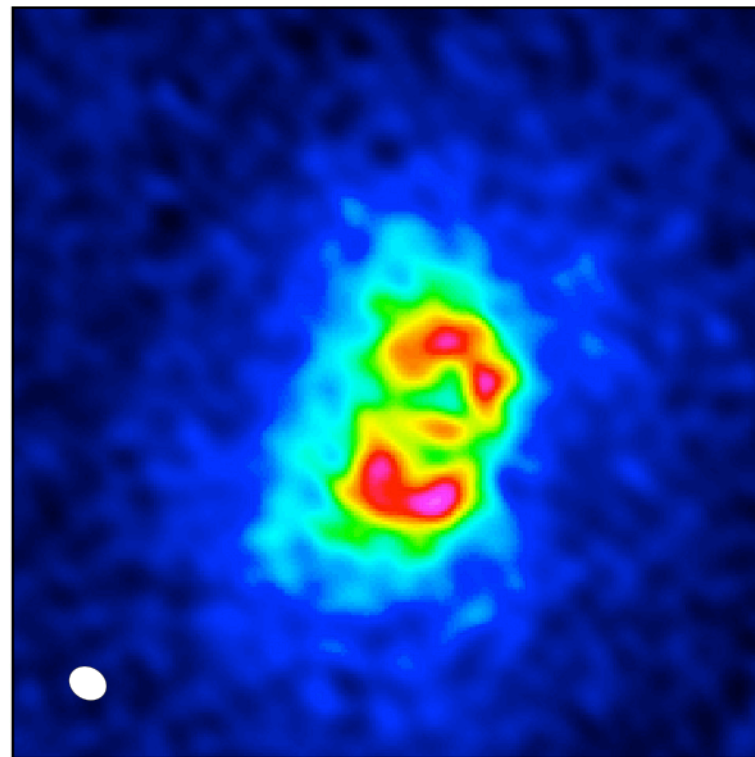


従来の画像との比較

0.87 mm cont.

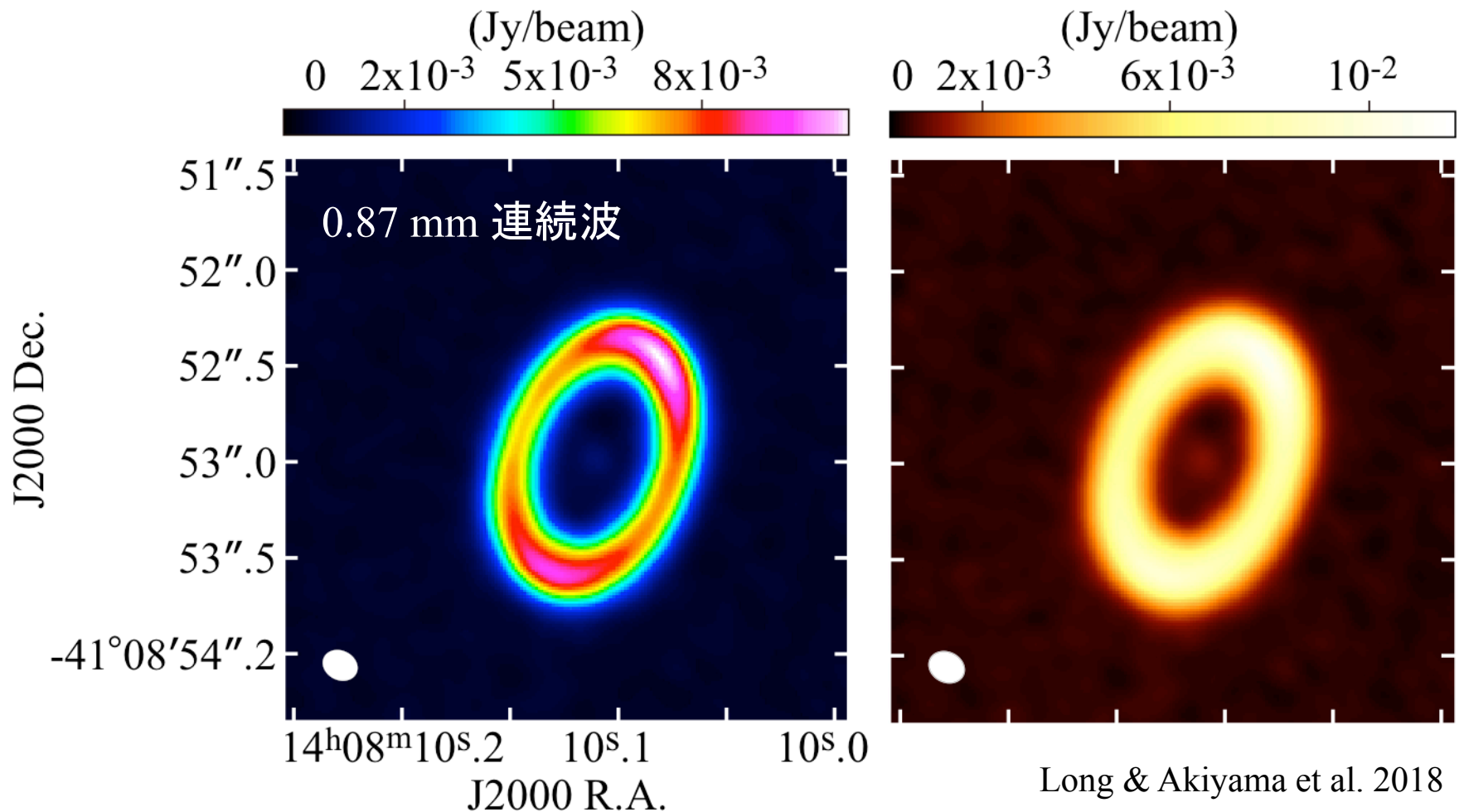


CO (3-2)



ALMAによって画像品質が劇的に向上した。

高解像度観測 PDS 70星 (1)



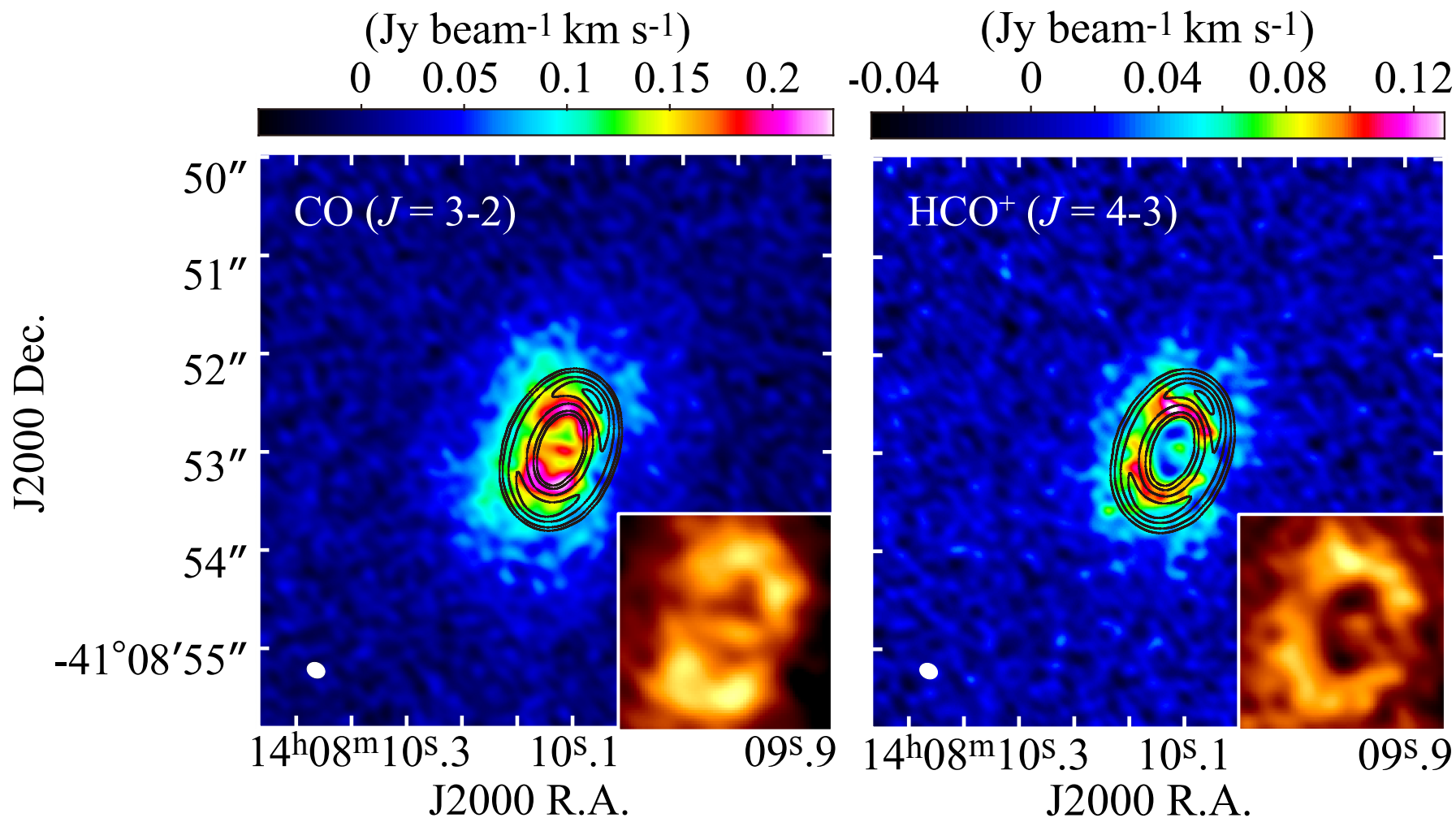
Long & Akiyama et al. 2018

ビームサイズ: $0.15'' \times 0.19''$

観測時間: 28 min

穴のサイズ: $r=48\text{AU}$, 中心から有意な 13σ の放射を検出。

高解像度観測 PDS 70 (2)



Long & Akiyama et al. 2018

ブリッジ構造

CO ($J=3-2$): 15 σ detection, HCO⁺ ($J=4-3$): 5 σ detection

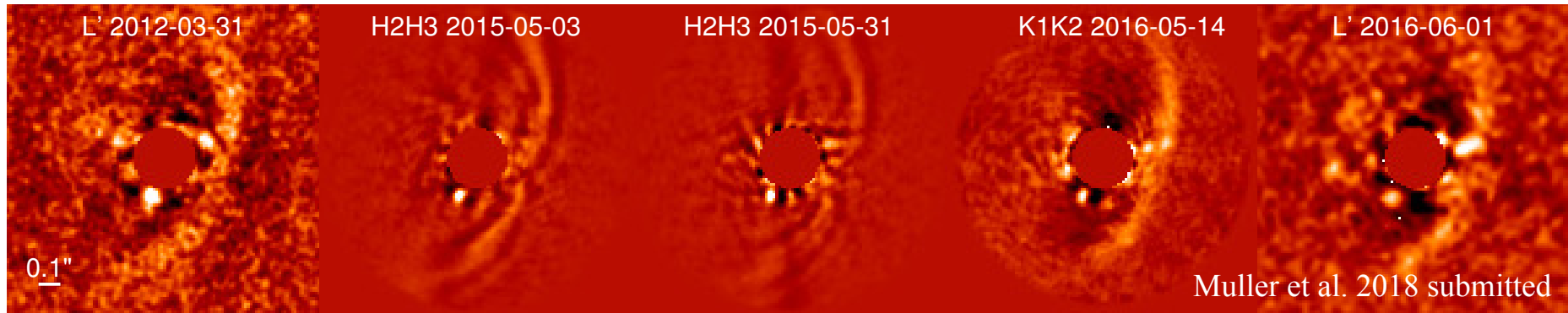
高解像度観測 PDS 70 (3)

NIR観測

Gemini/NICI, VLT/IRDIS, VLT/NaCo

穴の中に点源を検出

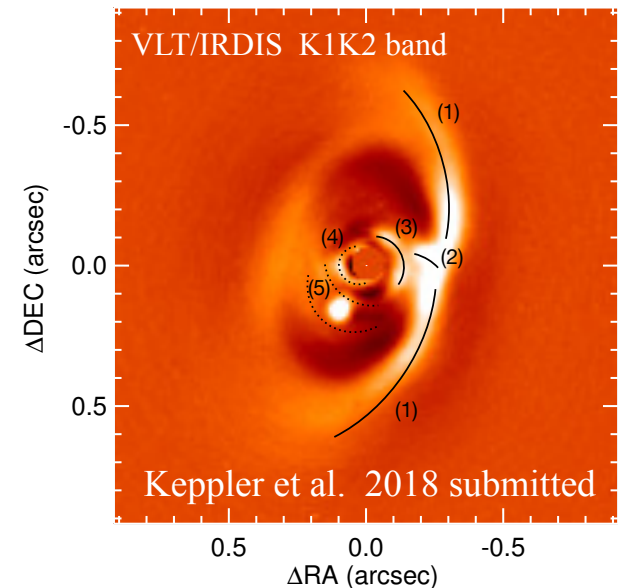
FWHM = 49 – 52 mas



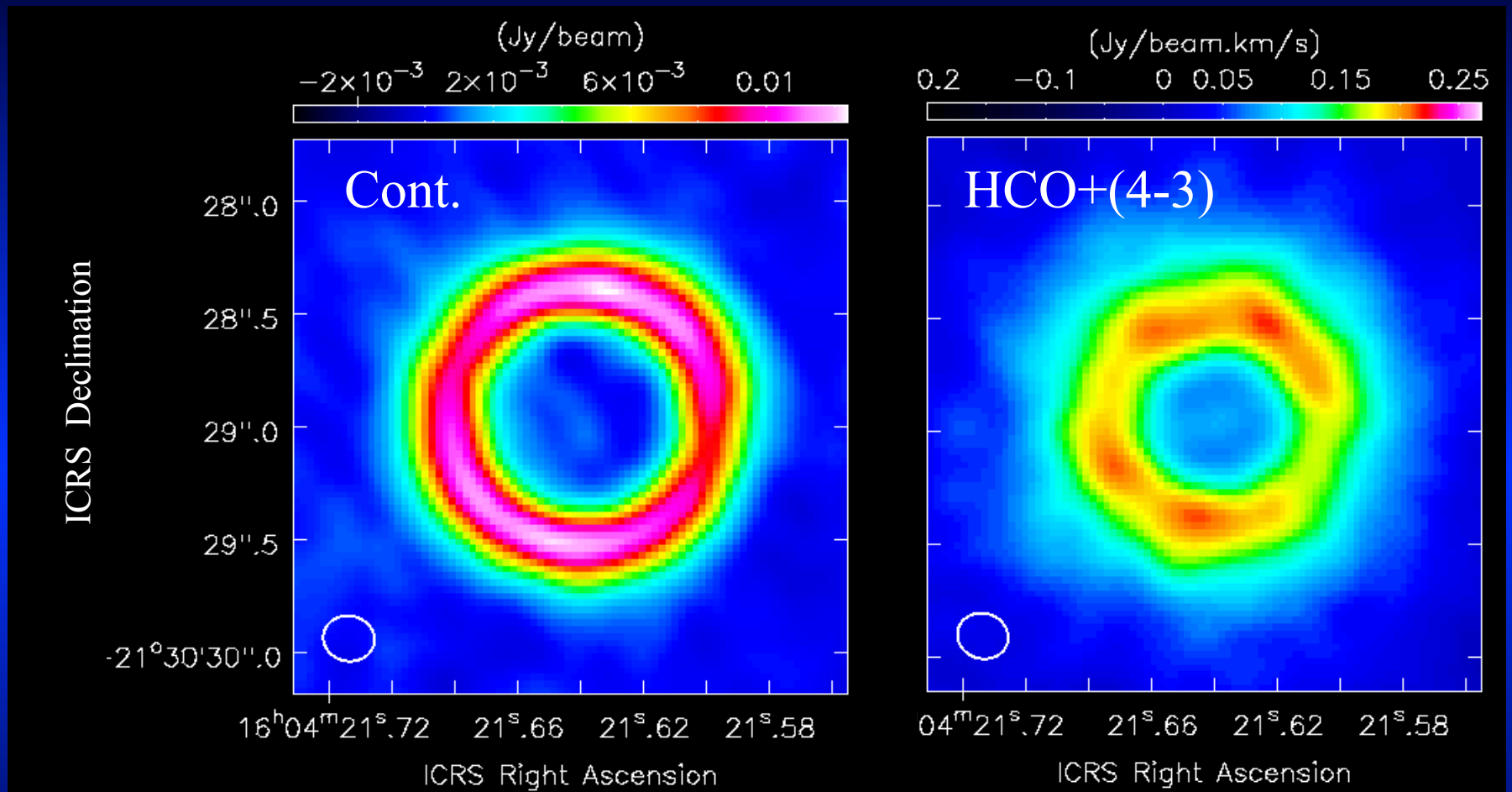
穴の中に点源以外のsub-structureを検出

- (1)(5) アーク構造
- (2) (ブリッジのような)コネクション
- (3)(4) スパイラル構造

中心星近傍領域で詳細な構造が検出可能
となってきた。



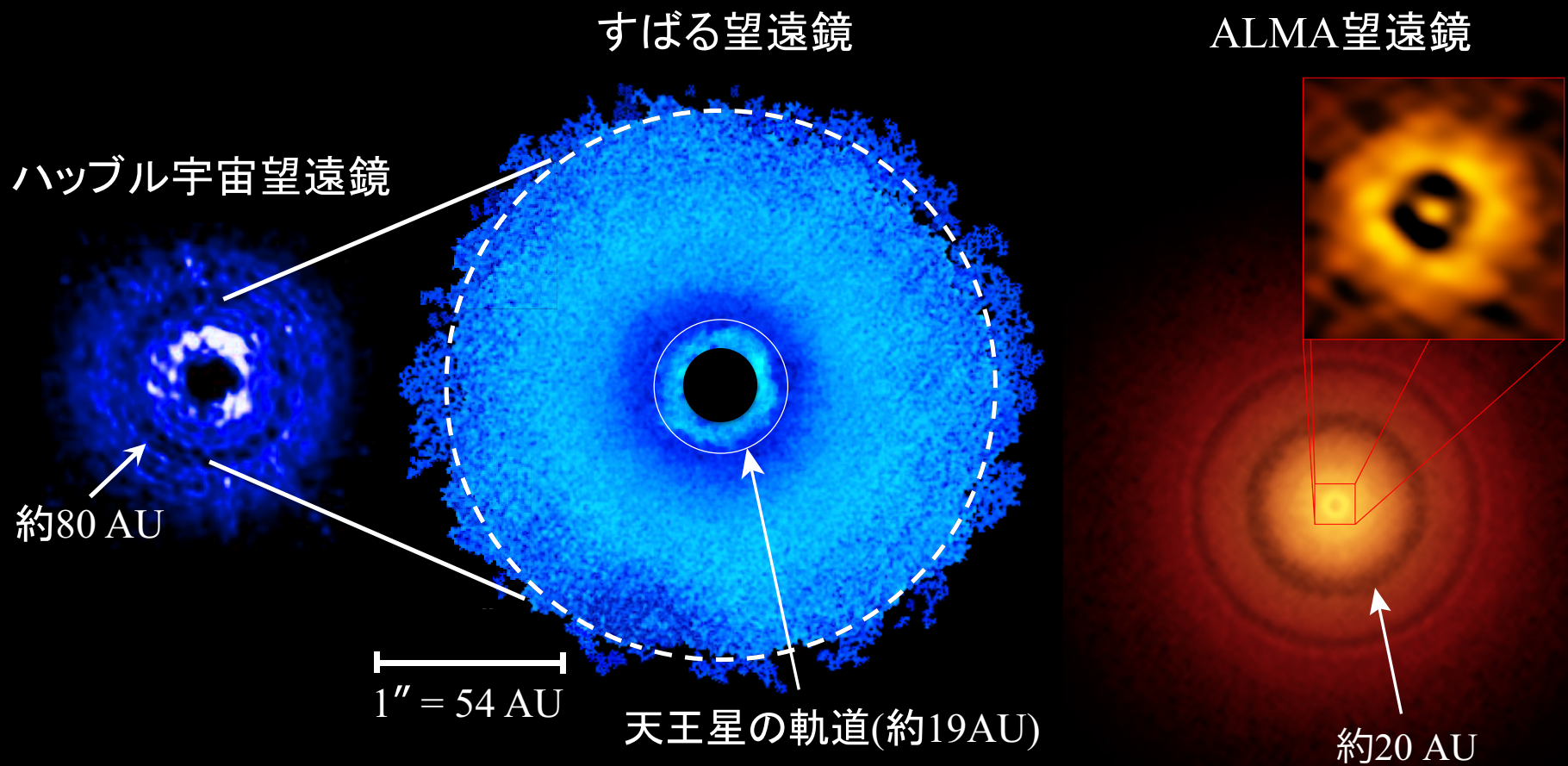
2MASS J16042165–2130284



Mayama & Akiyama et al. in prep.

穴構造内に何か別の構造があることを確認。
小さな円盤構造の可能性。

多重リング うみへび座TW星



Debes et al. 2013, Akiyama et al. 2015, Andrews et al. 2016

- 近赤外線とサブミリ波観測で多重リング構造が検出された。
- 地球の公転半径と同じ空間分解能で観測が可能となった。

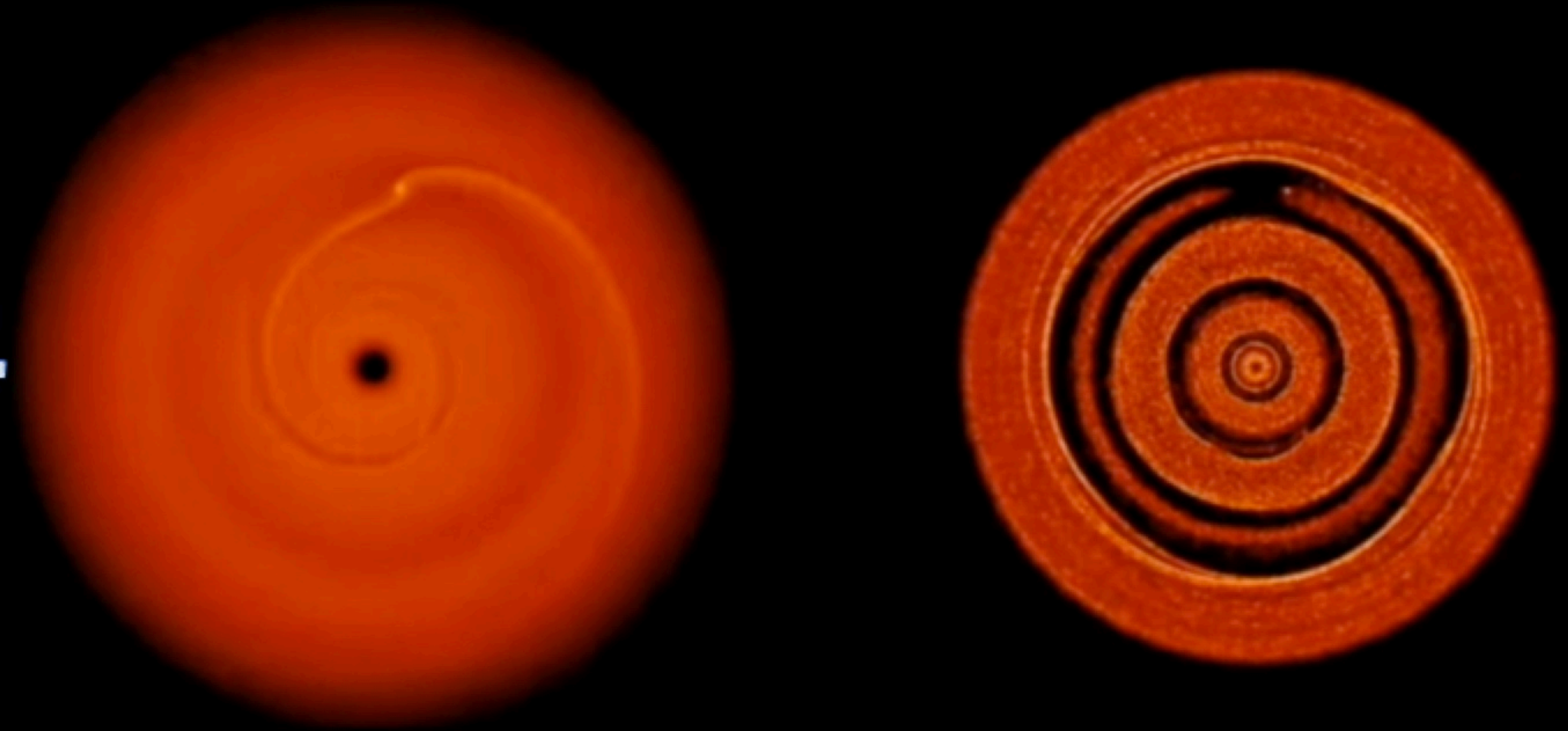
多重リング おうし座HL星 1



G. Dipierro, D. Price, G. Laibe, K. Hirsh, A. Cerioli, & G. Lodato
Credit: ESO

多重リング おうし座HL星 2

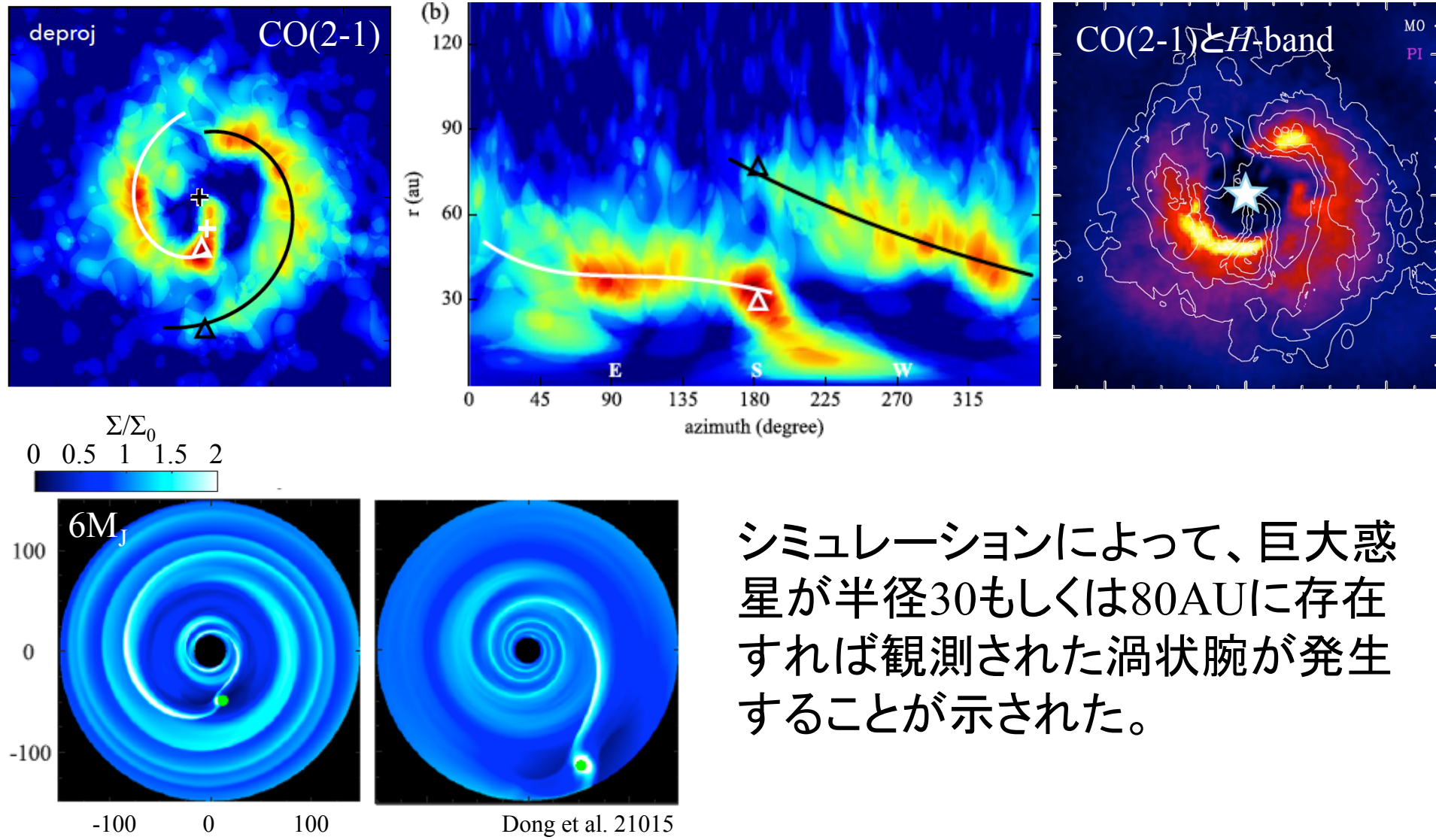
5610 yrs



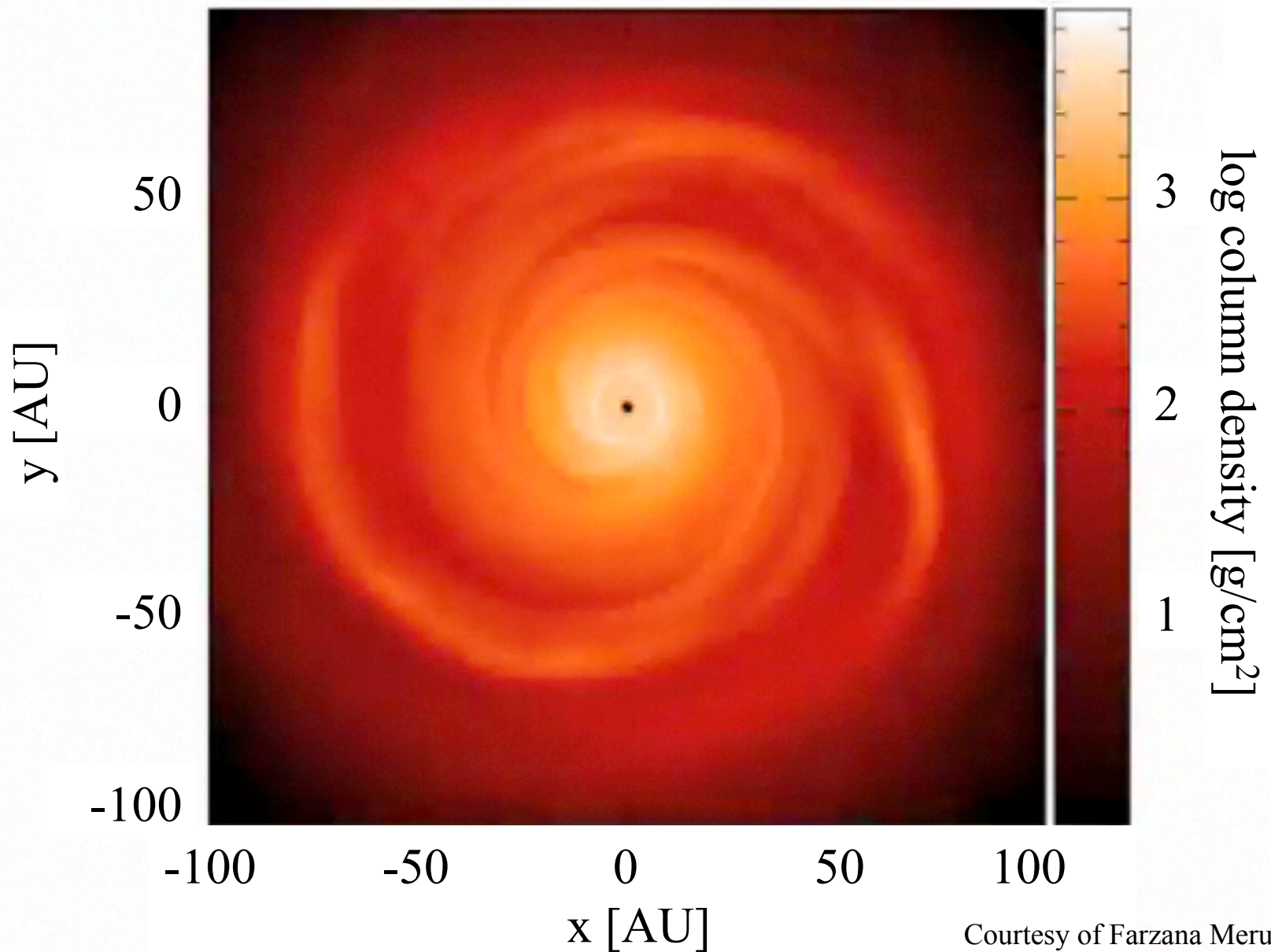
G. Dipierro, D. Price, G. Laibe, K. Hirsh, A. Cerioli, & G. Lodato
Credit: ESO

渦状腕構造(ぎょしゃ座AB星)

惑星によって誘起されたspiralを検出 (Tang et al. 2017)



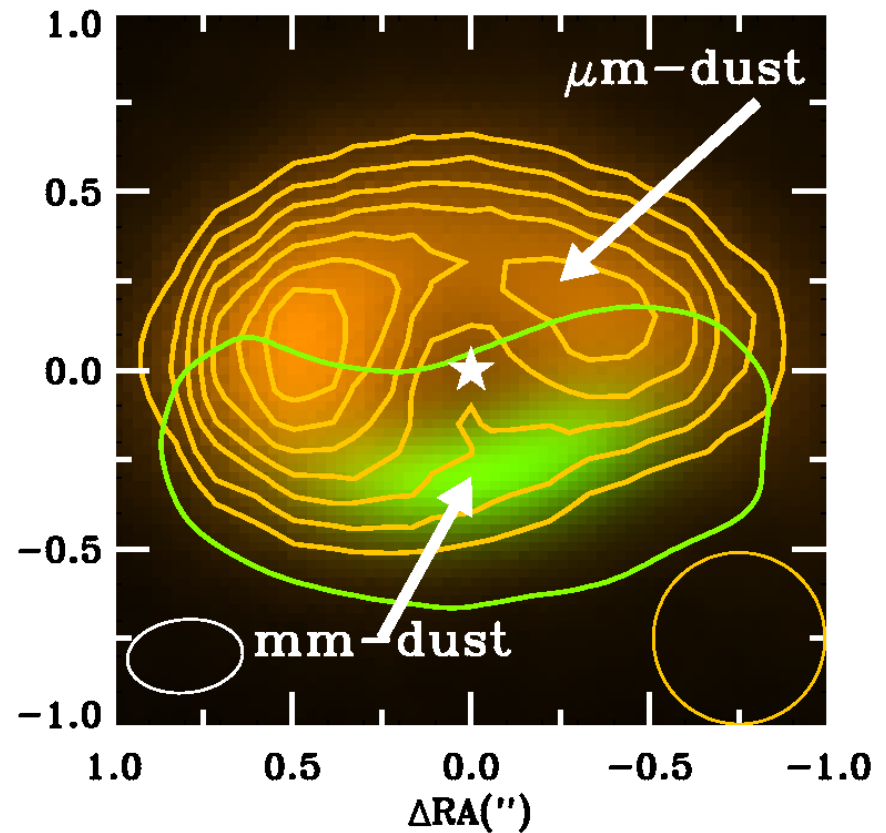
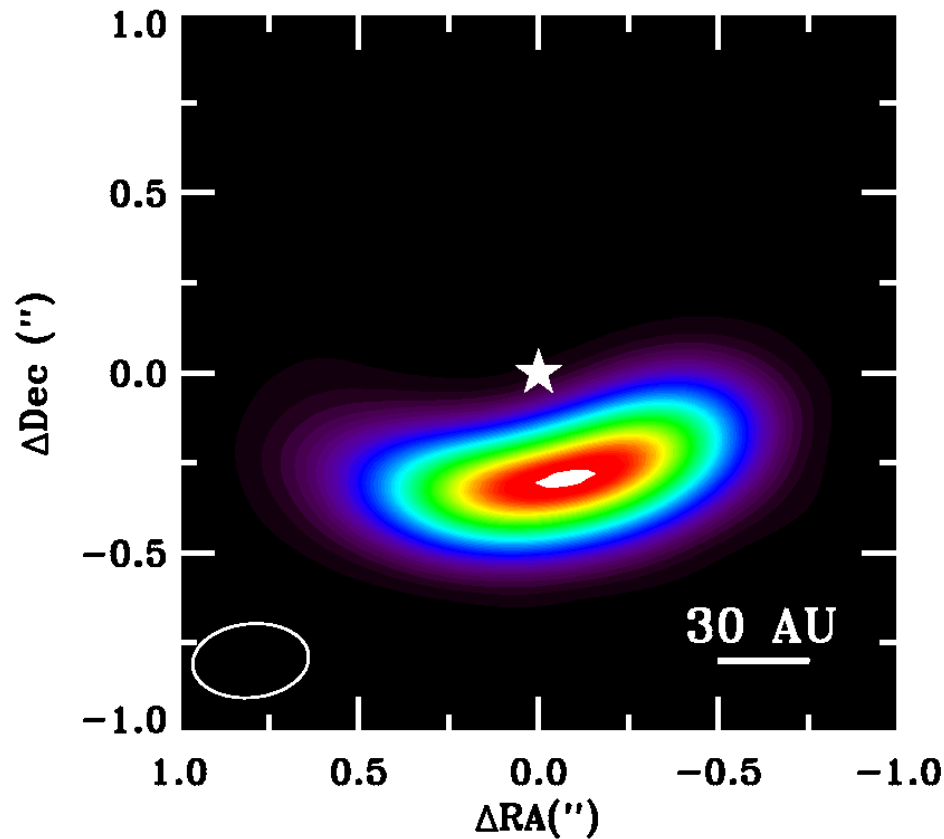
渦状腕構造



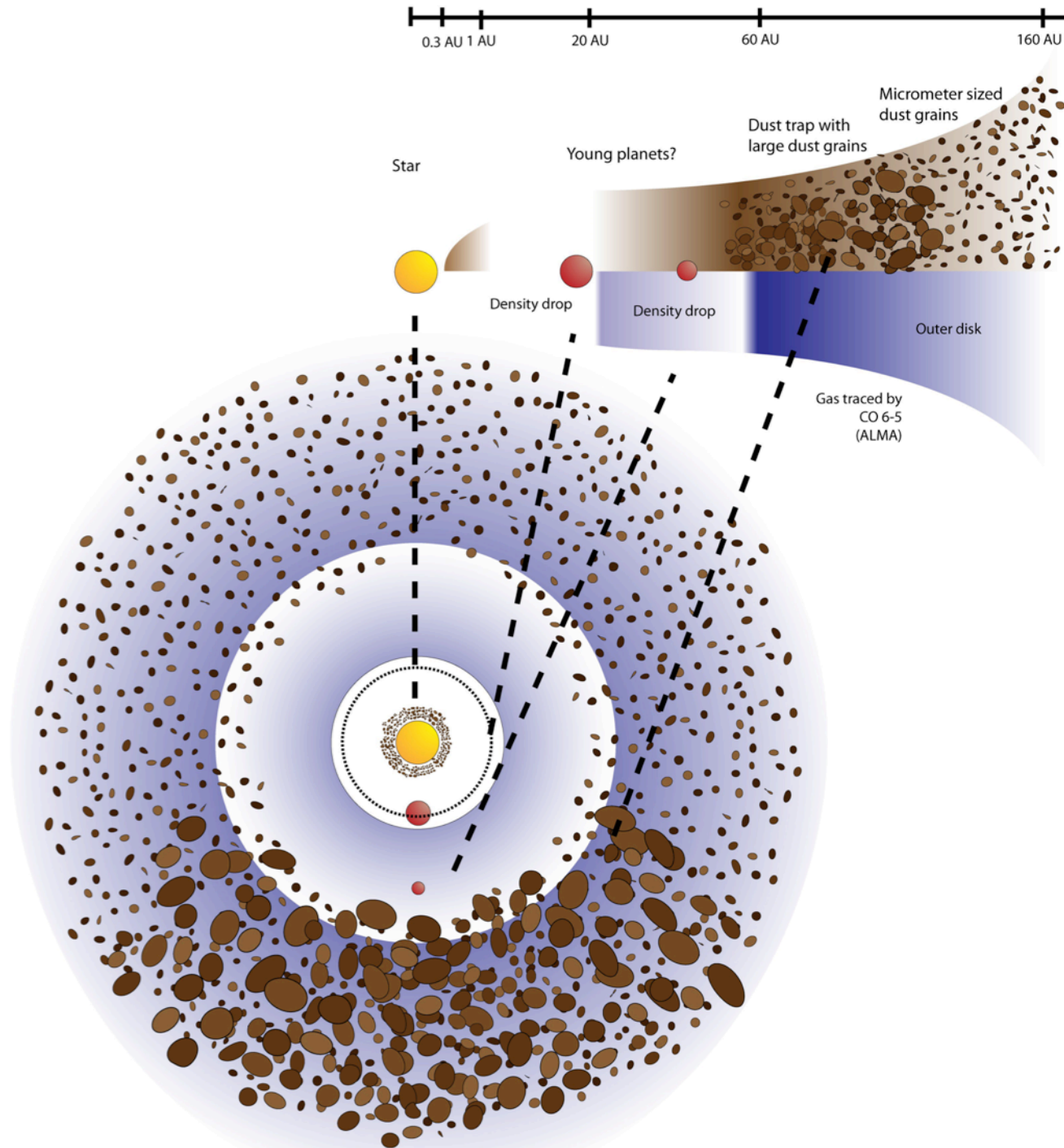
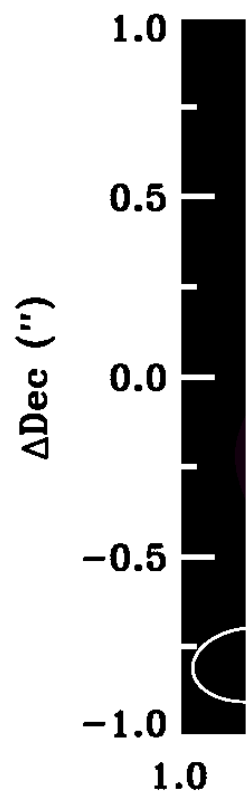
非对称構造

Oph IRS 48

van der Marel et al. 2013



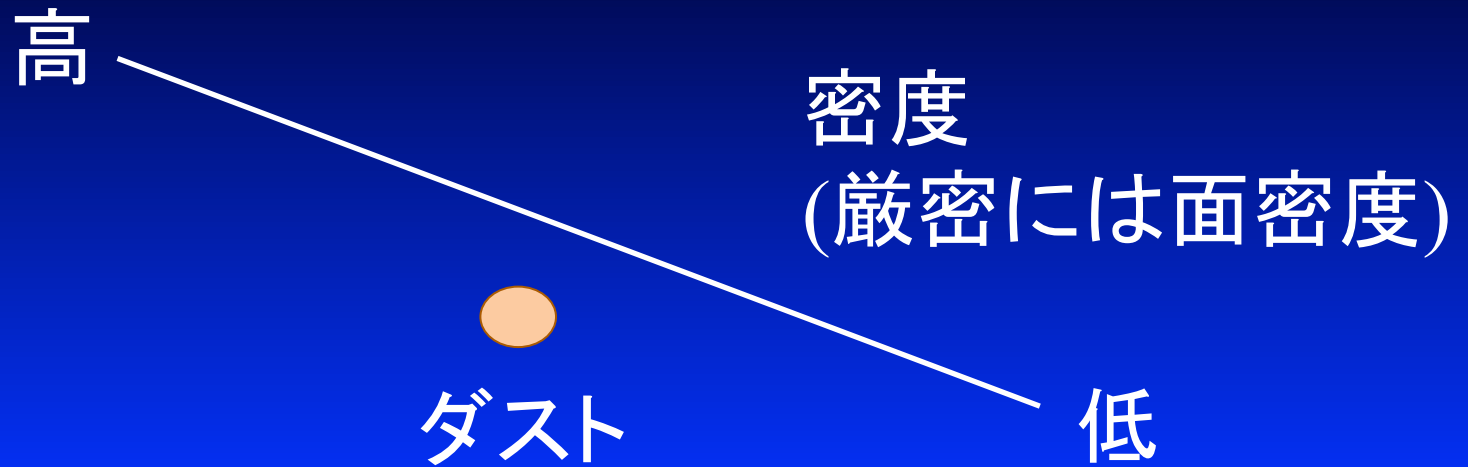
Oph IRS



et al. 2013



ダストトラップ その1

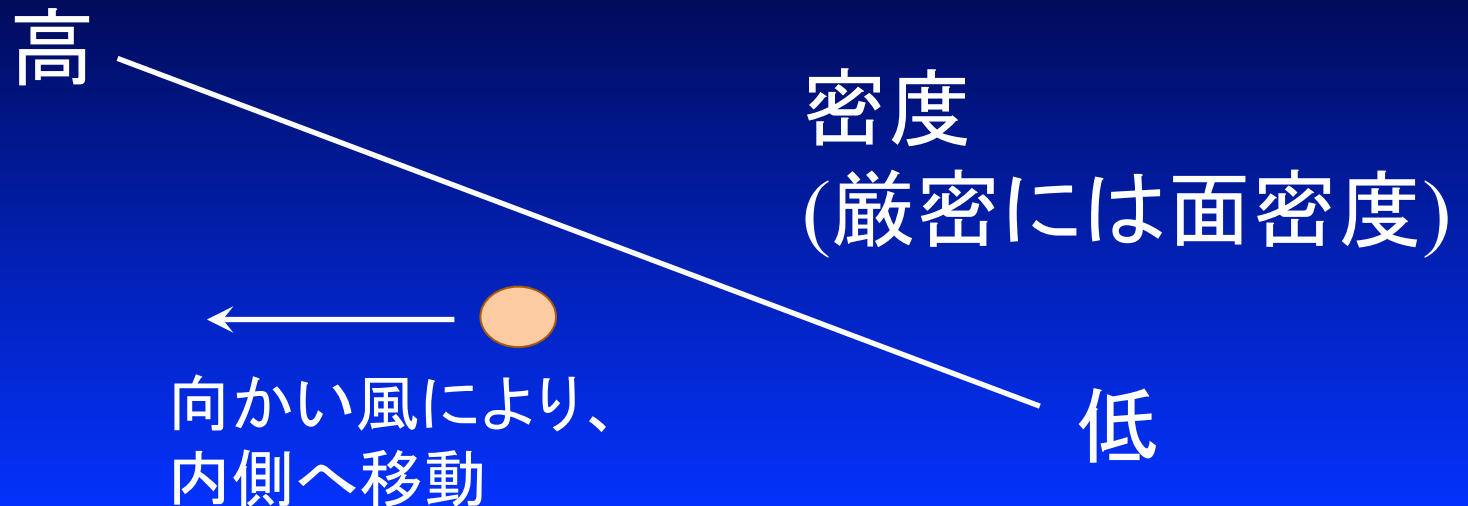


圧力



温度

ダストトラップ その2



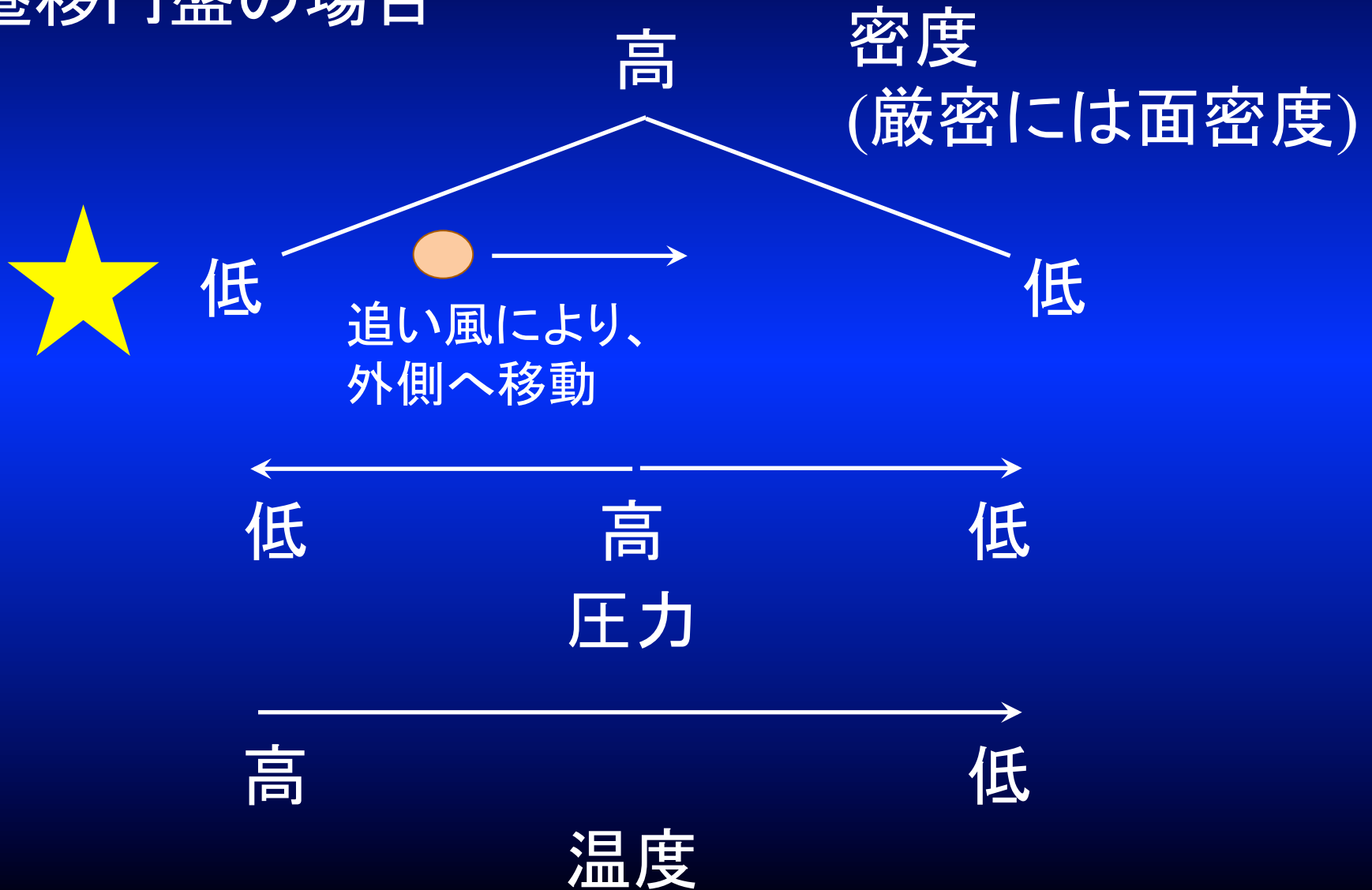
圧力



温度

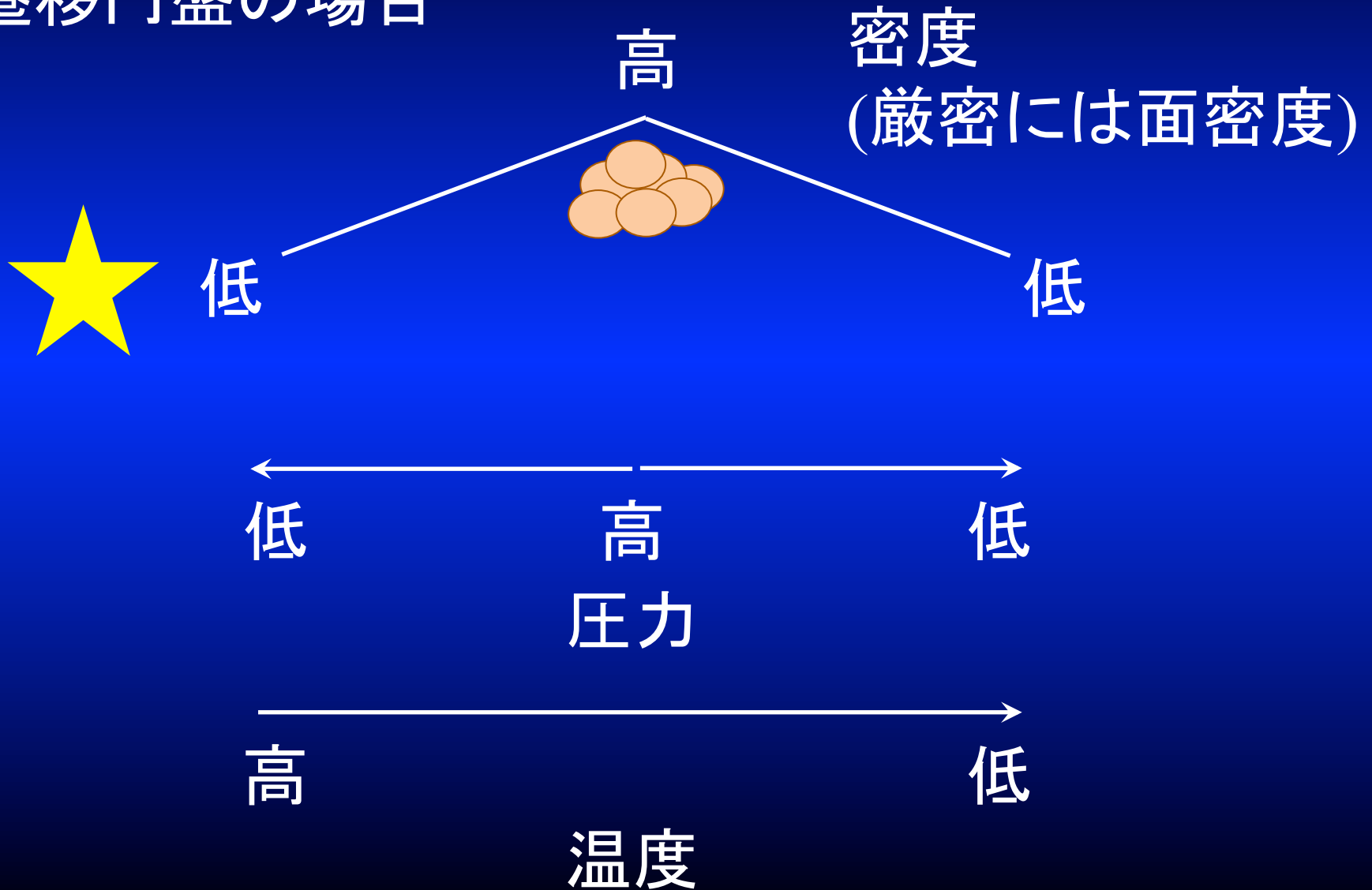
ダストトラップ その3

遷移円盤の場合

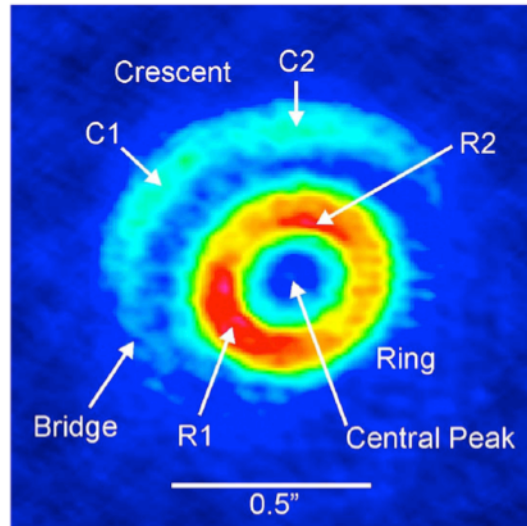


ダストトラップ その4

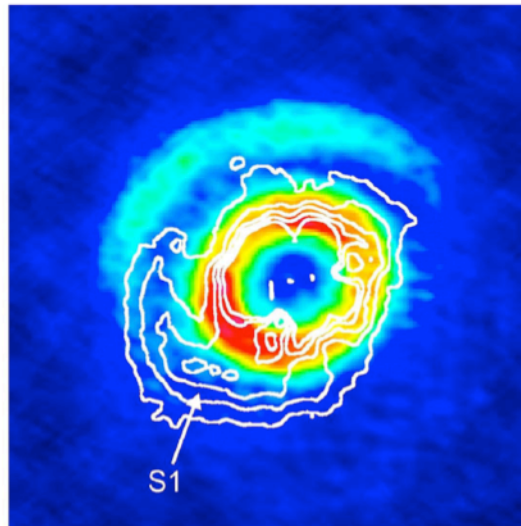
遷移円盤の場合



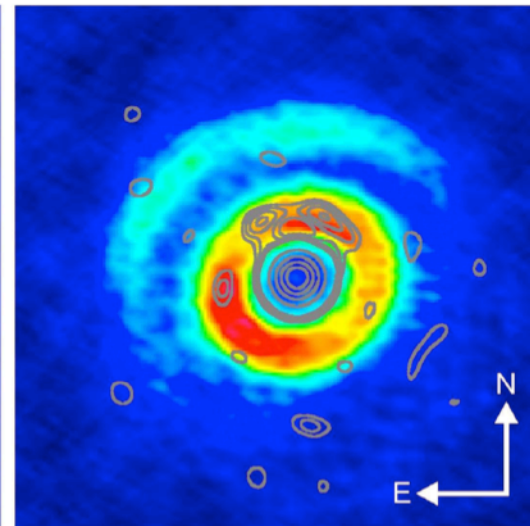
非対称構造



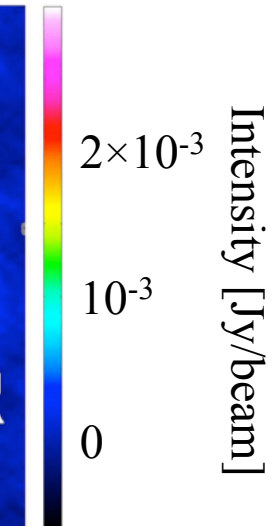
ALMA 870 μ m



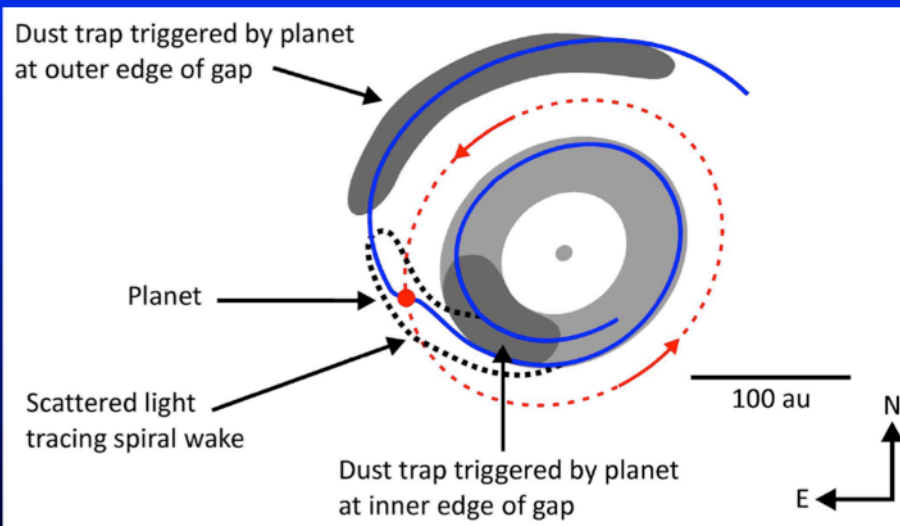
ALMA + H-band



ALMA + L'-band

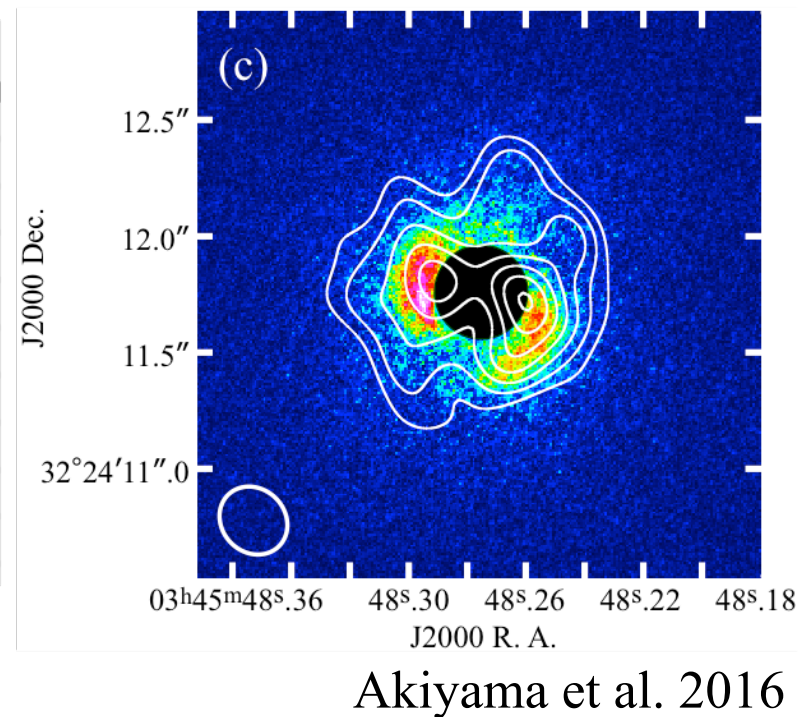
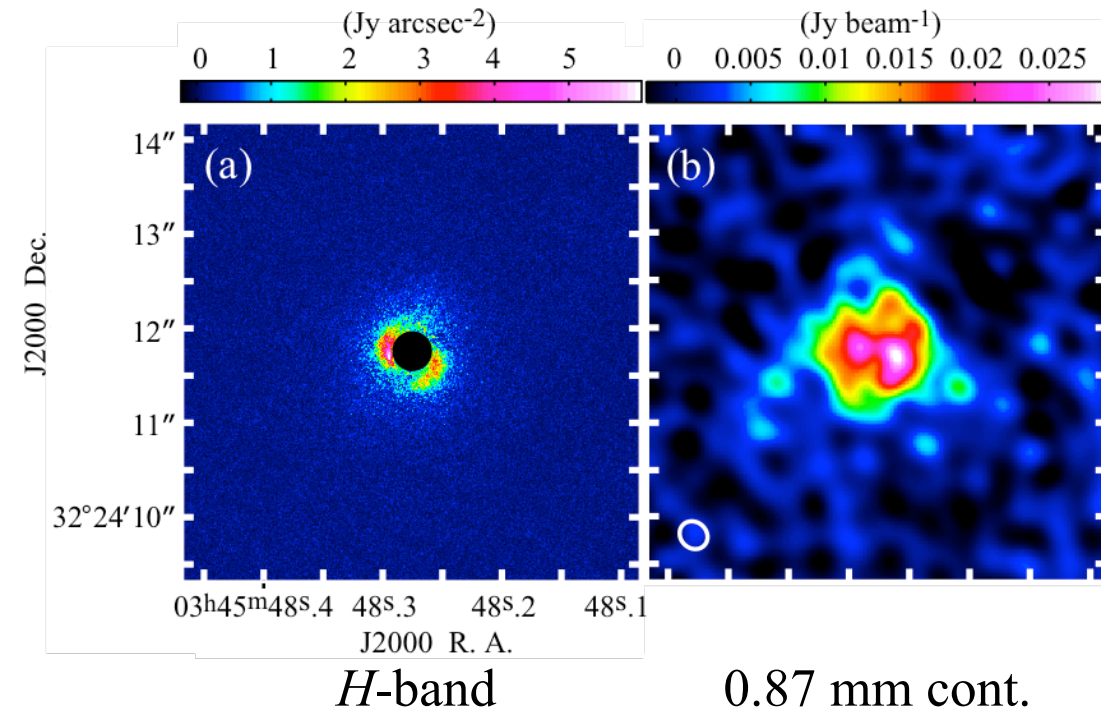


Kraus et al. 2017



- 三日月構造はダスト集積の可能性を示している。
- 公転している惑星によって圧力の高い領域が形成する。
- 渦状腕構造(赤外線観測)は惑星の存在を支持する。

非対称構造と渦状腕構造(LkH α 330)

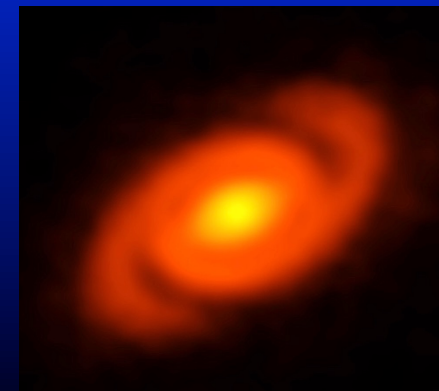


近赤外線(Hバンド)観測

- 一対の渦状腕構造が検出された。

電波(サブミリ波)観測

- 非対称構造が検出された。
- 渦状腕構造が検出された。



Perez et al. 2017

ダスト成長について

- ダスト成長はSEDの傾きから観測的に調査することが可能である。

$$F_{\nu} \propto \nu^{\alpha} \quad \alpha = \beta + 2$$

- ほとんどの円盤は $\beta < 2$ (Beckwith & Sargent 1991)。
- 星間空間(ISM)の β の値は約1.7 (Li & Draine 2001)。
- $\beta_{\text{disc}} < \beta_{\text{ISM}}$ の場合、ダスト成長が原因である(Draine 2006)。
- β が1よりも小さい場合、ダストはミクロンサイズからミリメートルサイズに成長している(Draine 2006)。

ダスト成長2

β の見積もり

SMA 0.87mm 連続波

West: 101 ± 14 mJy

East: 35 ± 4 mJy

CARMA 1.3 mm連続波(Isella et al. 2013)

West: 87 ± 12.7 mJy

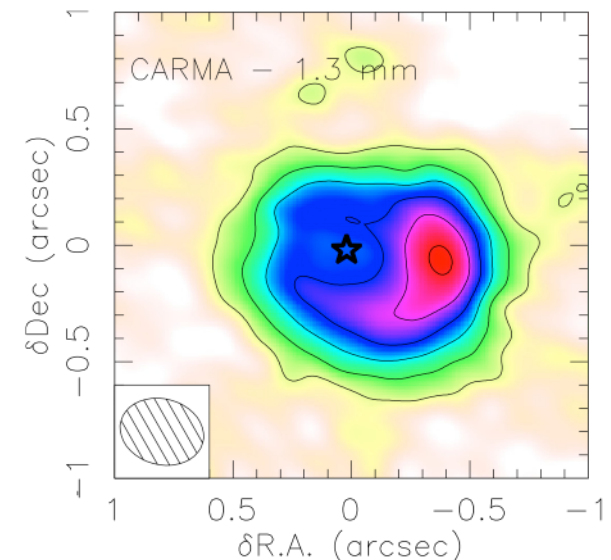
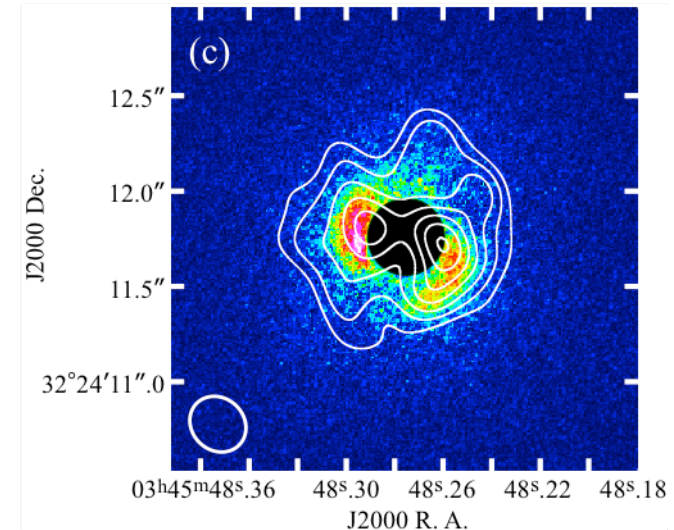
East: 18 ± 1 mJy

結果

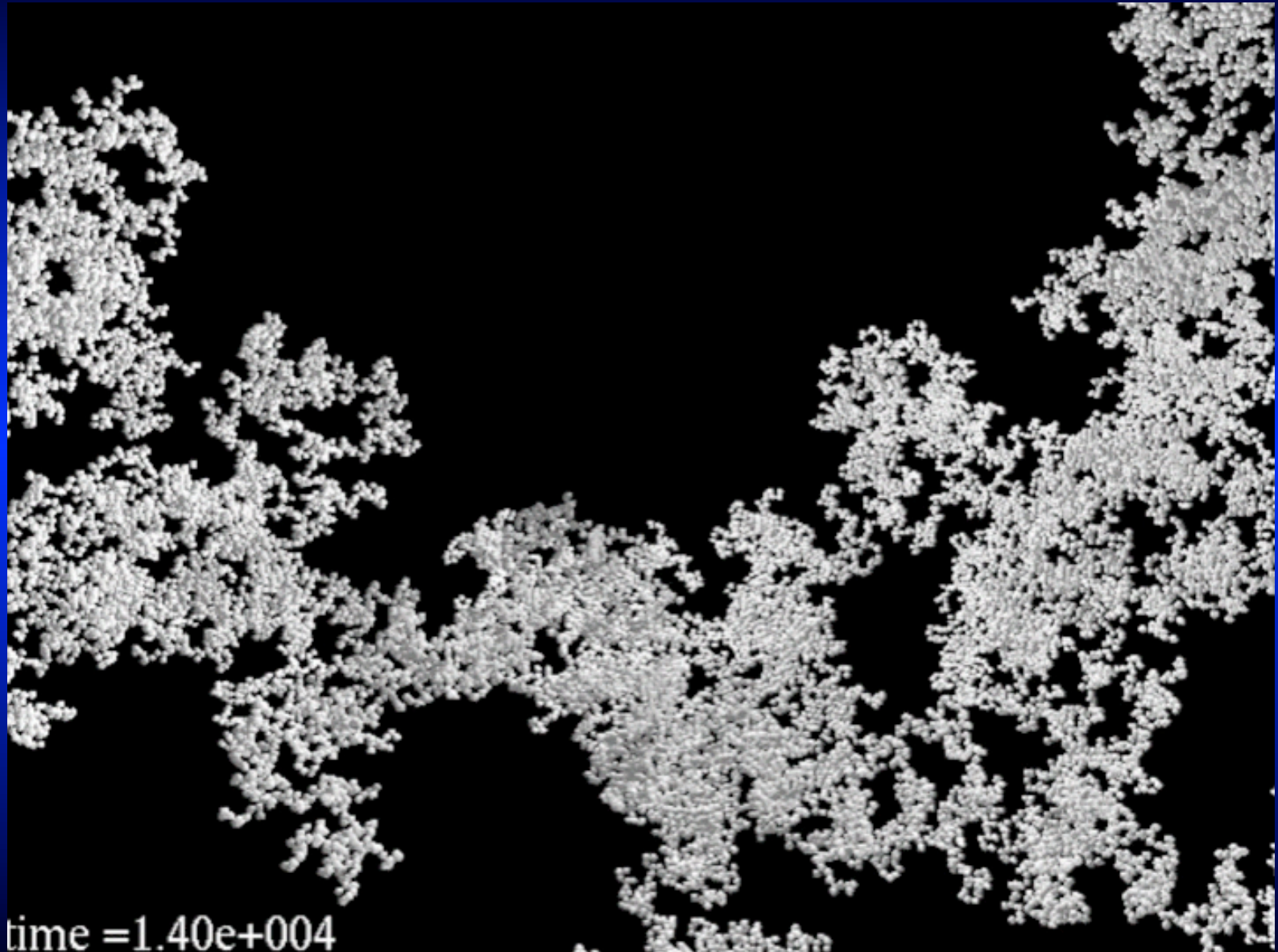
West: $\beta = 0.7^{+0.5}_{-0.4}$

East: $\beta = 2.0 \pm 0.5$

- 円盤内で異なるサイズのダストが分布する。
- ダスト成長は円盤の東側よりも西側で卓越していると考えられる。



ダスト成長 シミュレーション1

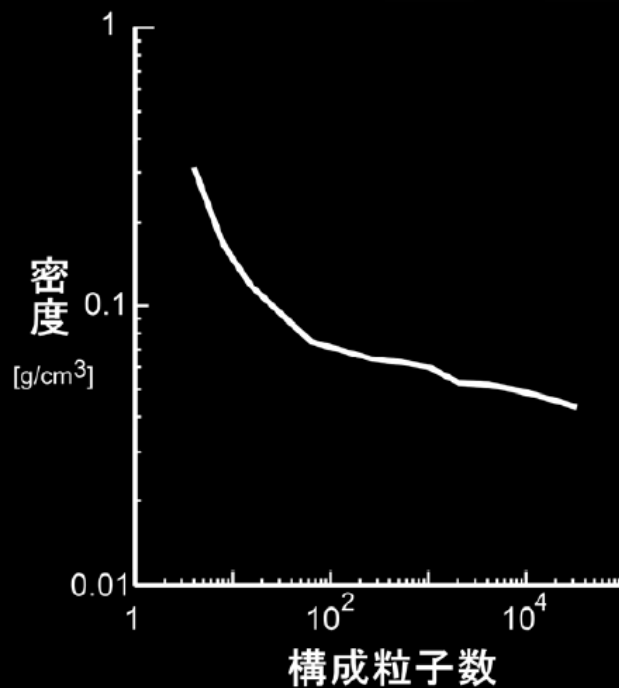
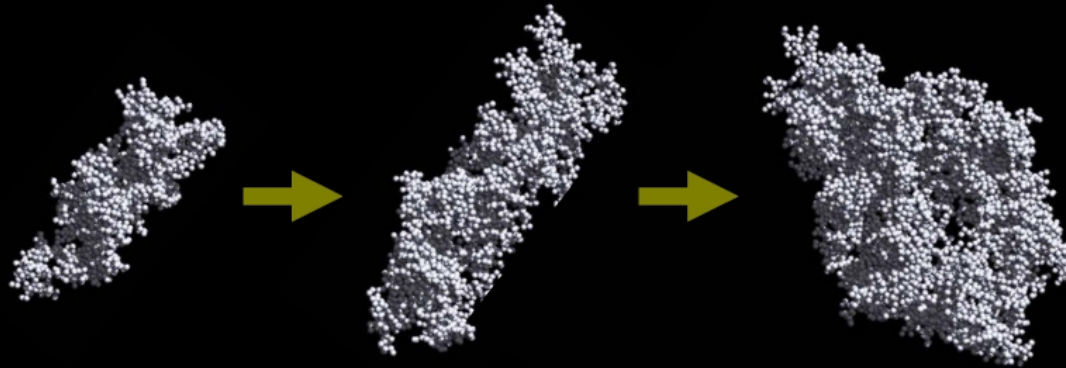


ダスト成長シミュレーション2

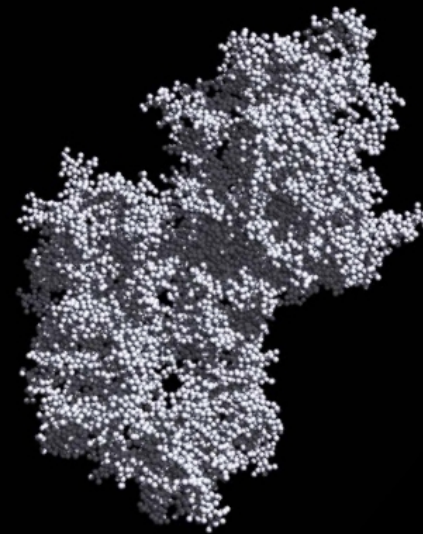
構成粒子数: 2048

4096

8192



16384



クレジット 北海道大学低温科学研究所

MWC758 穴＋渦状腕＋非対称

SMA (Andrews et al. 2011)

波長: 0.88 mm

空間分解能: $0.82'' \times 0.55''$

2つピーク(目玉構造)が検出された
→穴構造を示唆

VLT/SPHERE (Benisty et al. 2015)

波長: $1.04 \mu\text{m}$

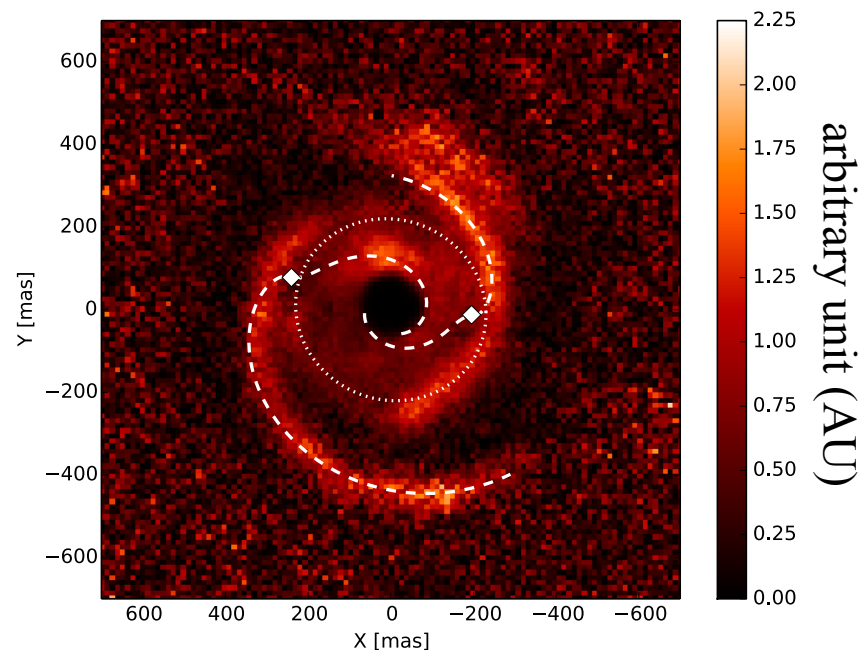
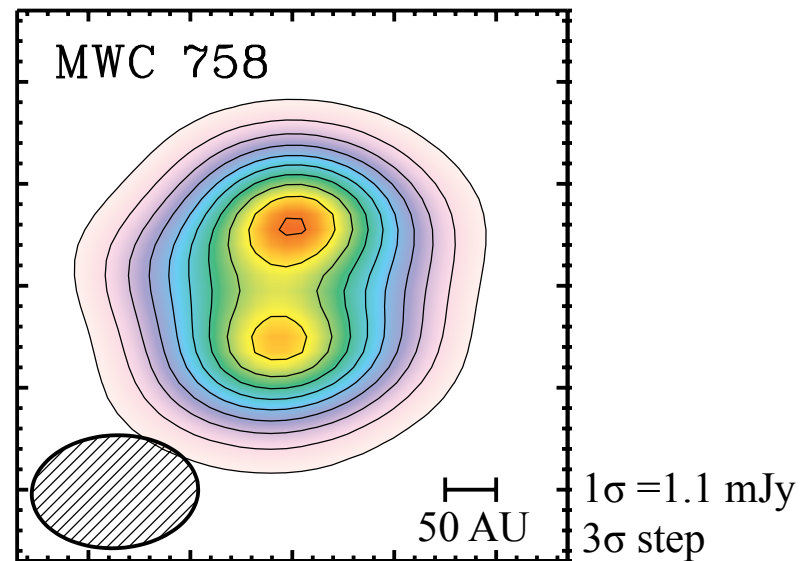
空間分解能: 27 mas

渦状腕構造 (2対)

非軸対称構造

穴、渦状腕、非軸対称構造を同時に持つ

ref. SAO206462



MWC758詳細構造

ALMA高空間高感度観測

波長: 0.87 mm cont.

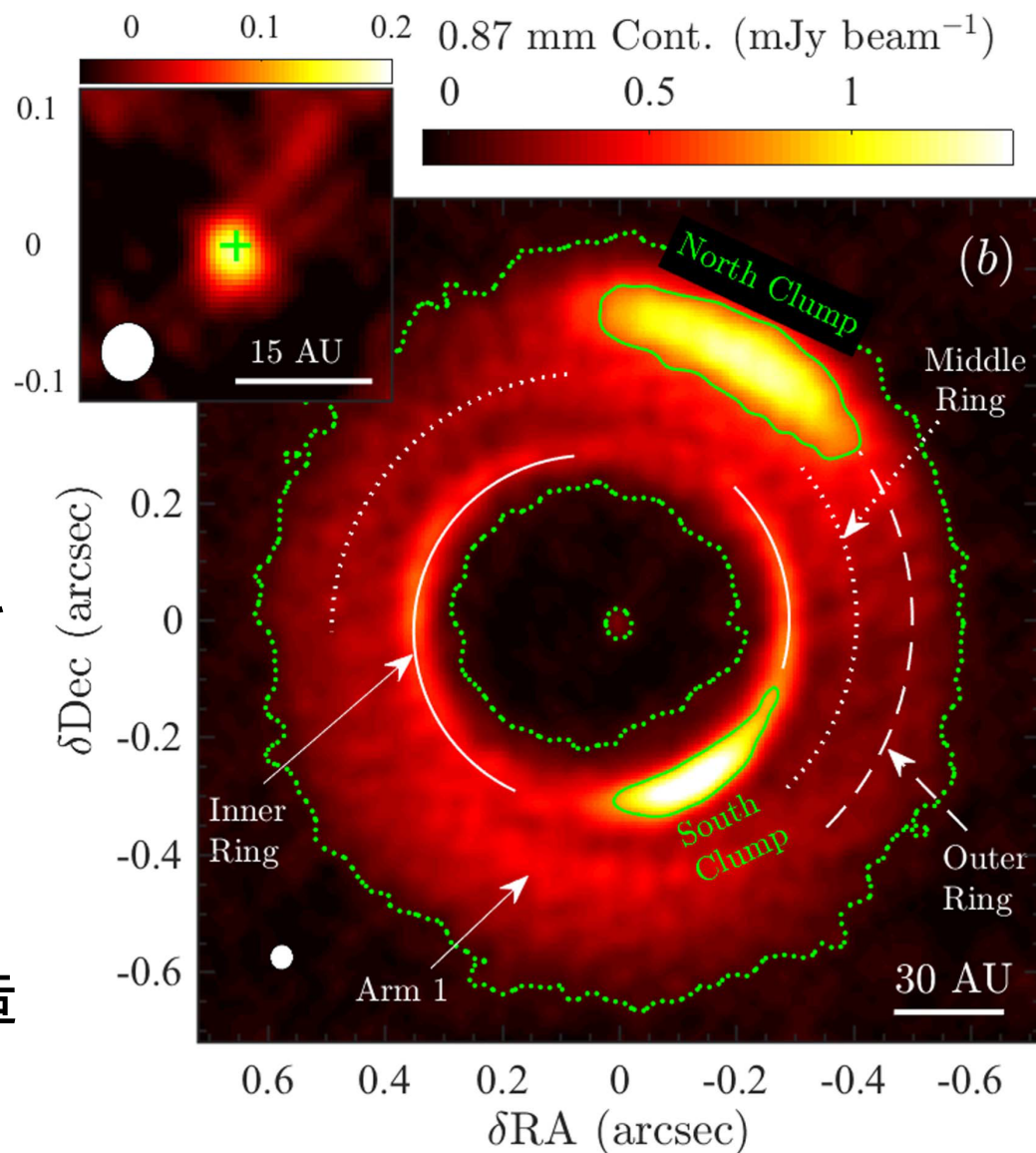
空間分解能: 43×39 mas
($\sim 6.9 \times 6.2$ AU)

rms: $20 \mu\text{Jy/beam}$

円盤赤道面を反映した構造
実際に塵が集積した構造
(赤外観測では円盤の表面を見ていることに注意)

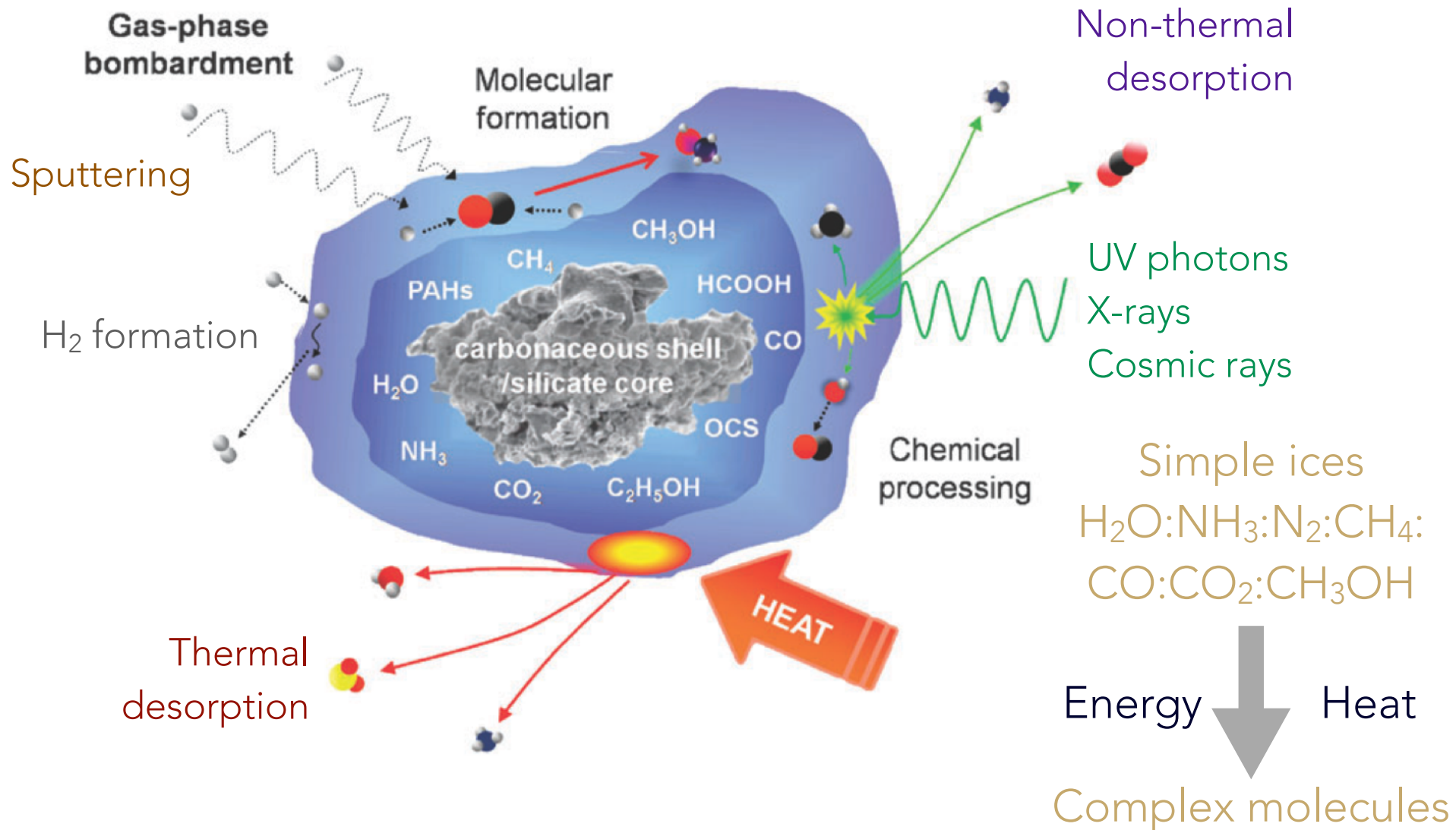
リングは楕円である
離心率 $e \sim 0.1$

ケプラーの法則に従った構造



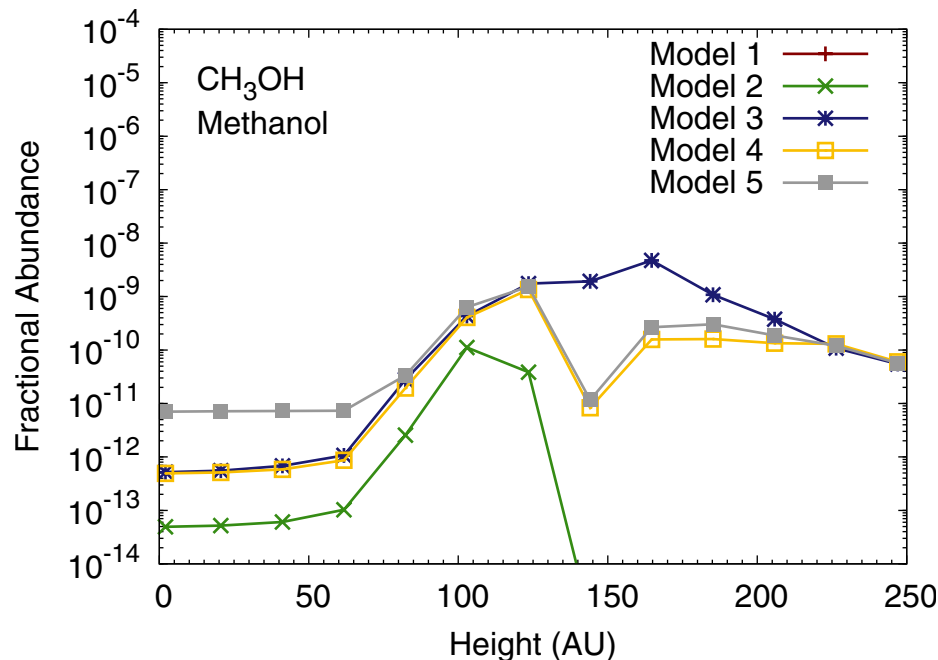
原始惑星系円盤の 有機物観測

有機物質の主な起源



メタノールの理論研究 1

水素(原子)に対するメタノールの存在比分布



Model 1: 凍結、熱脱離 (適用外)

Model 2: 非熱的脱離(UV、宇宙線など)

Model 3: Model 2 +
ダスト表面化学反応

Model 4: Model 3 +
固体(ice)からの破壊的脱離

Model 5: Model 4 +
化学反応脱離

各有機分子の柱密度(cm⁻²)

注) a(b) = a × 10^b

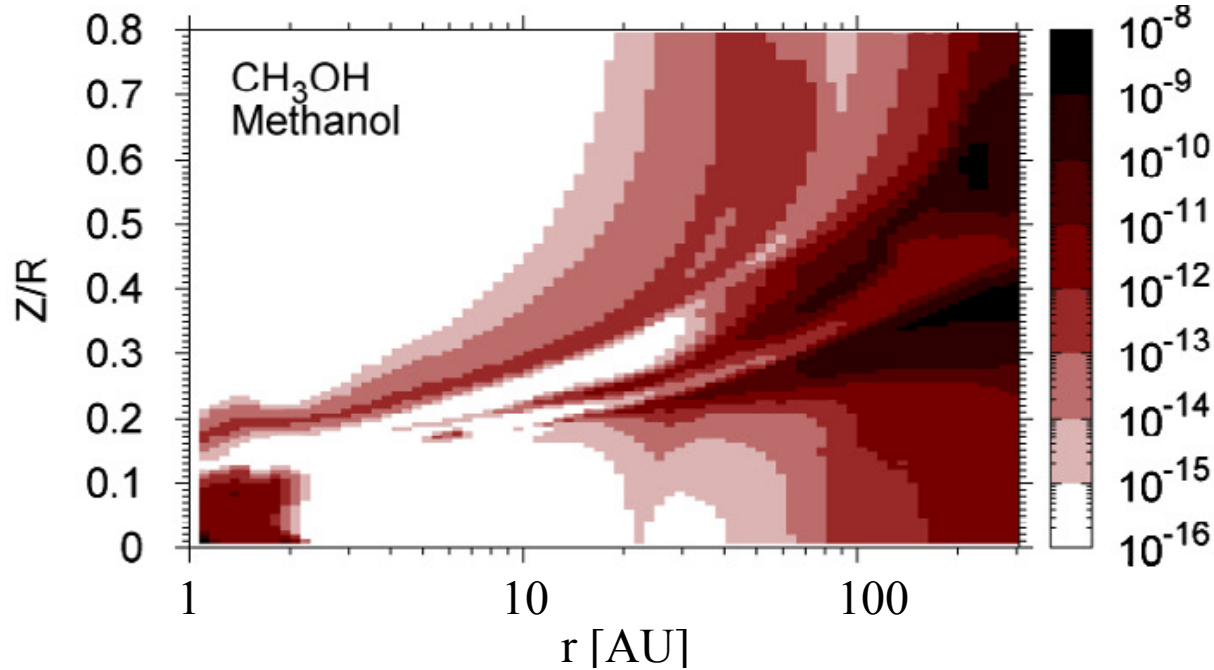
Species		Gas phase				Grain surface			
		10 AU	30 AU	100 AU	305 AU	10AU	30 AU	100 AU	305 AU
Formaldehyde	H ₂ CO	3.7(12)	5.1(13)	1.5(12)	8.3(12)	6.7(09)	6.4(18)	3.4(17)	6.0(17)
Methanol	CH ₃ OH	1.0(09)	2.2(11)	5.8(12)	1.7(13)	2.3(18)	8.4(17)	1.1(18)	8.8(17)
Formic acid	HCOOH	8.1(10)	7.5(11)	9.1(12)	8.2(12)	1.1(18)	2.4(17)	1.1(17)	3.3(16)
Cyanoacetylene	HC ₃ N	2.0(12)	6.9(11)	2.1(11)	9.8(10)	1.7(18)	1.3(15)	8.2(12)	5.5(12)
Acetonitrile	CH ₃ CN	5.5(12)	2.9(12)	6.9(11)	4.1(11)	1.2(17)	2.1(17)	2.7(16)	2.0(15)

⋮ 以下省略

Walsh et al. 2014b

メタノールの理論研究 2

水素(原子)に対するメタノールの存在比分布



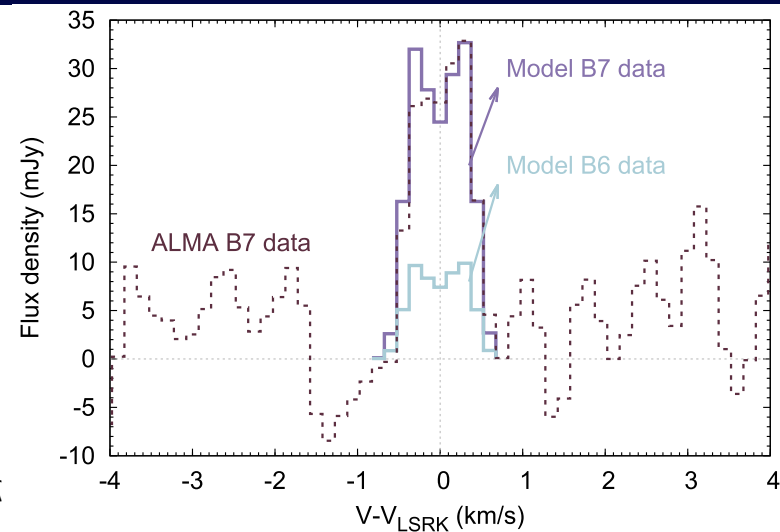
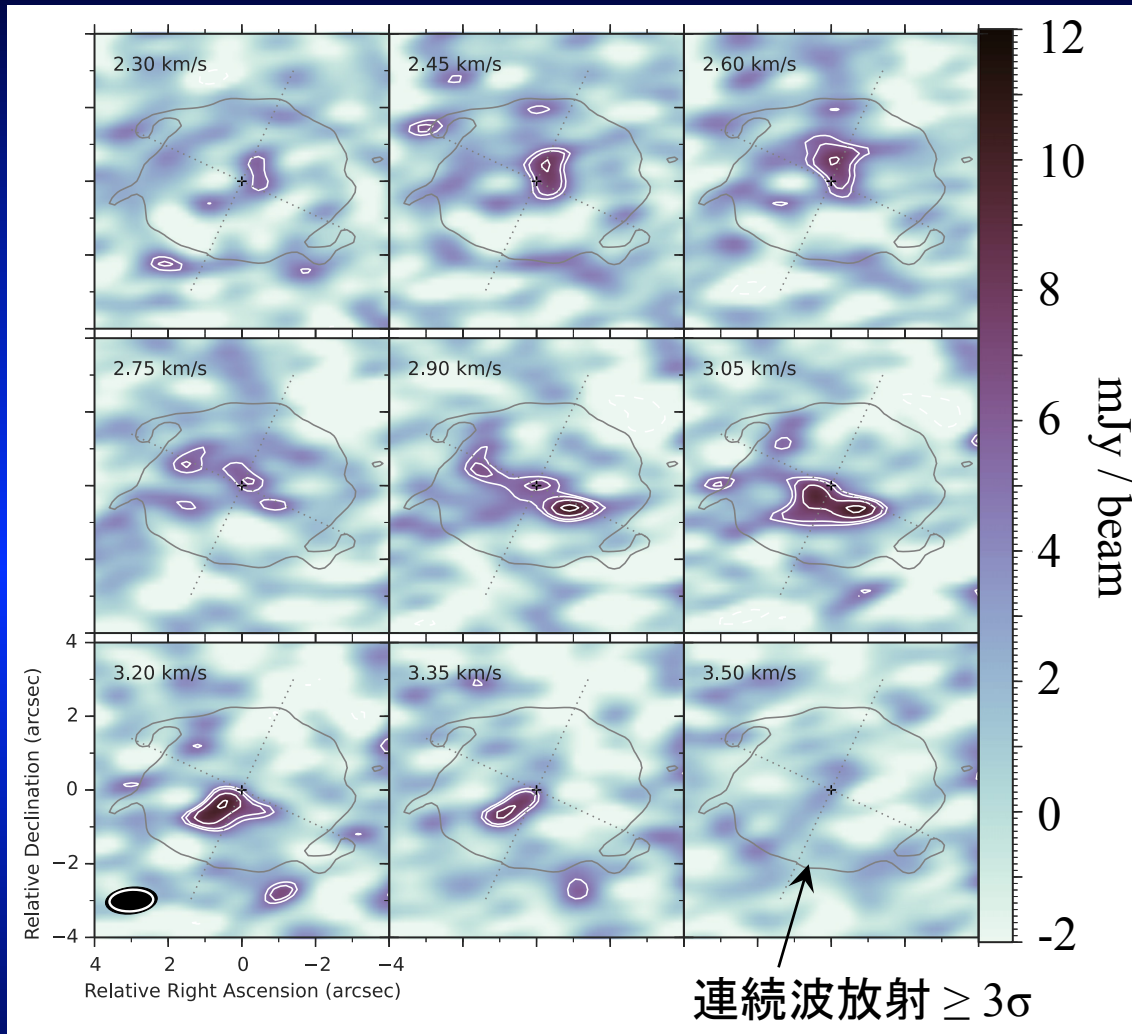
メタノールガスの存在が示された

Formaldehyde	H ₂ CO	3.7(12)	5.1(13)	1.5(12)	8.3(12)	6.7(09)	6.4(18)	3.4(17)	6.0(17)
Methanol	CH ₃ OH	1.0(09)	2.2(11)	5.8(12)	1.7(13)	2.3(18)	8.4(17)	1.1(18)	8.8(17)
Formic acid	HCOOH	8.1(10)	7.5(11)	9.1(12)	8.2(12)	1.1(18)	2.4(17)	1.1(17)	3.3(16)
Cyanoacetylene	HC ₃ N	2.0(12)	6.9(11)	2.1(11)	9.8(10)	1.7(18)	1.3(15)	8.2(12)	5.5(12)
Acetonitrile	CH ₃ CN	5.5(12)	2.9(12)	6.9(11)	4.1(11)	1.2(17)	2.1(17)	2.7(16)	2.0(15)

⋮ 以下省略

Walsh et al. 2014b

メタノールの観測結果 うみへび座TW星

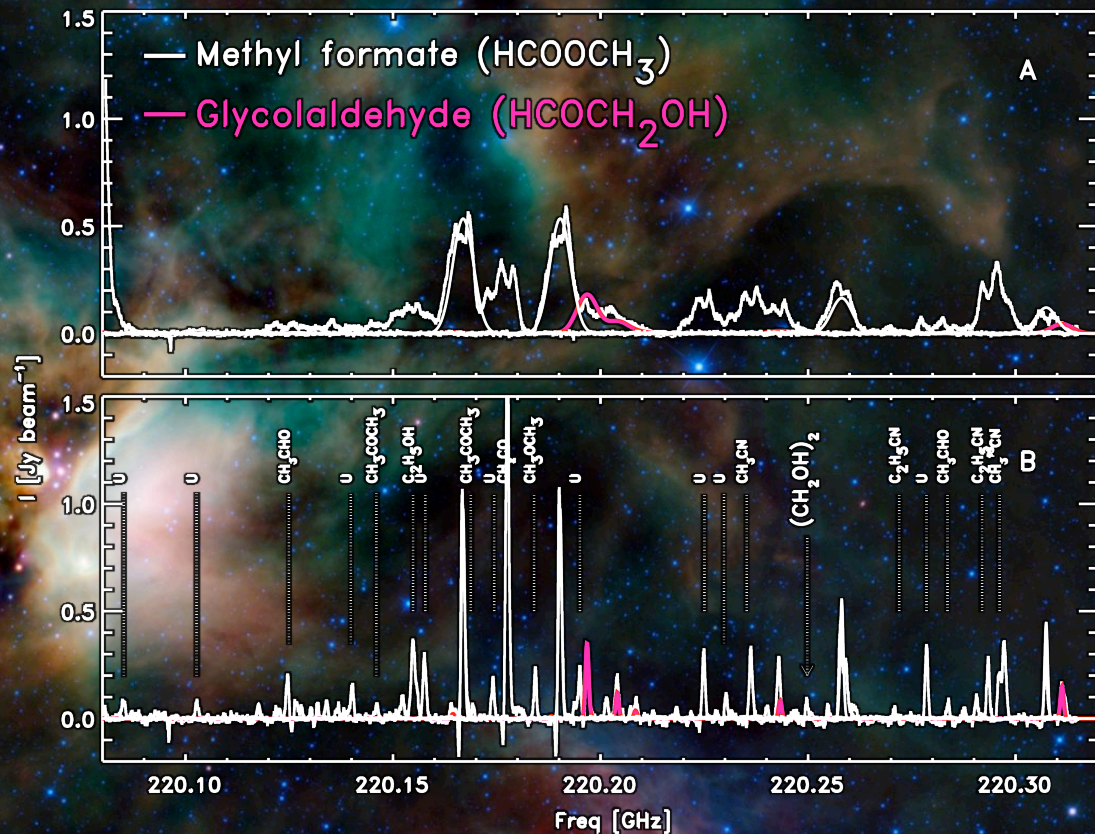
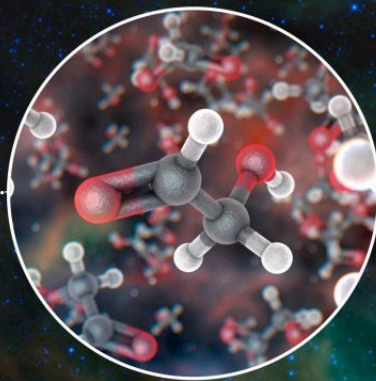


左: チャネルマップ
上: ラインプロファイル
 $F_v = 33 \text{ mJy}$
 $S/N = 5.1$
(rms noise = 6.5 mJy)
Integ. time = 43min

- メタノール放射のピークと星の位置がずれている(offset)ことから、メタノールガスがリング状に分布していると思われる。
- 3σ 以上の放射が星の位置にも検出されている。

大型有機分子 1

グリコールアルデヒド($C_2H_4O_2$)



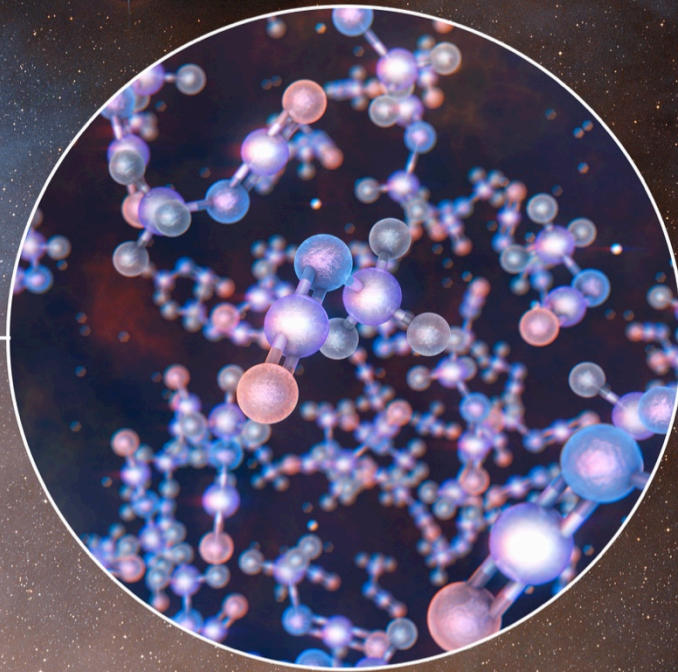
Jorgensen et al. 2012を改編

大型有機分子 2

Martín-Doménech et al. 2017

Ligterink et al. 2017

イソシアン酸メチル(CH_3NCO)



Credit: ESO/Digitized Sky Survey 2/L. Calçada

大型有機分子 3

Fayolle et al. 2017

クロロメタン
(CH₃Cl)

生命の起源につながる物質は
宇宙に多く存在している？

Credit: B. Saxton (NRAO/AUI/NSF); NASA/JPL-Caltech/UCLA

系外惑星

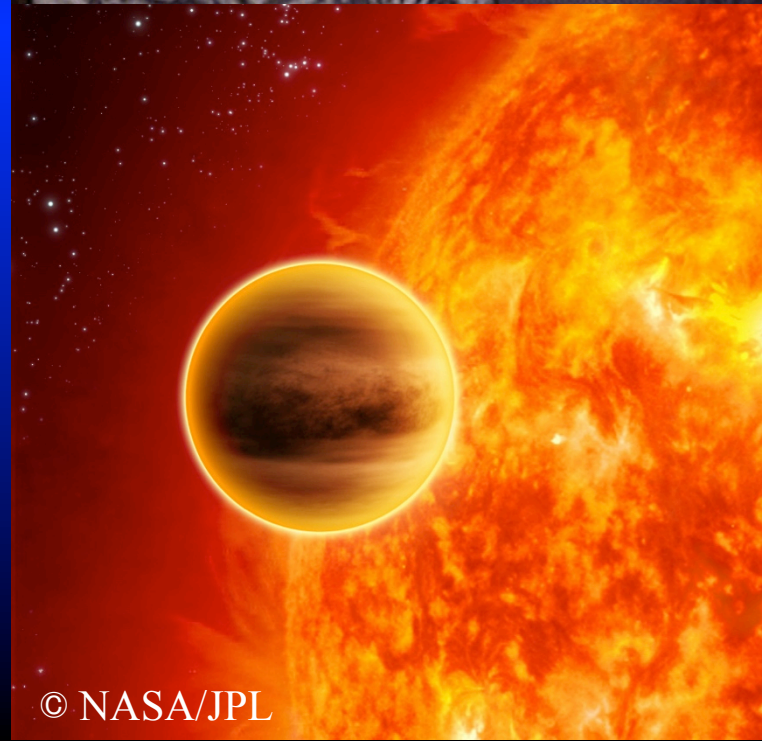
系外惑星の発見

ペガサス座51番星b
(別名: ベレロフォン)

M. Mayor & D. Queloz

1995年10月、太陽のような星
の周囲を公転する系外惑星
が初めて発見される。

- 主星質量: $1.06M_{\odot}$
- 軌道長半径: 0.052AU
水星の平均軌道半径: 0.39AU
- 公転周期: 4.23078日
- 太陽からの距離: 約51光年



視線速度法(ドップラー偏移法)

惑星によって主星もわずかに揺れる(近づいたり遠ざかったりする)。

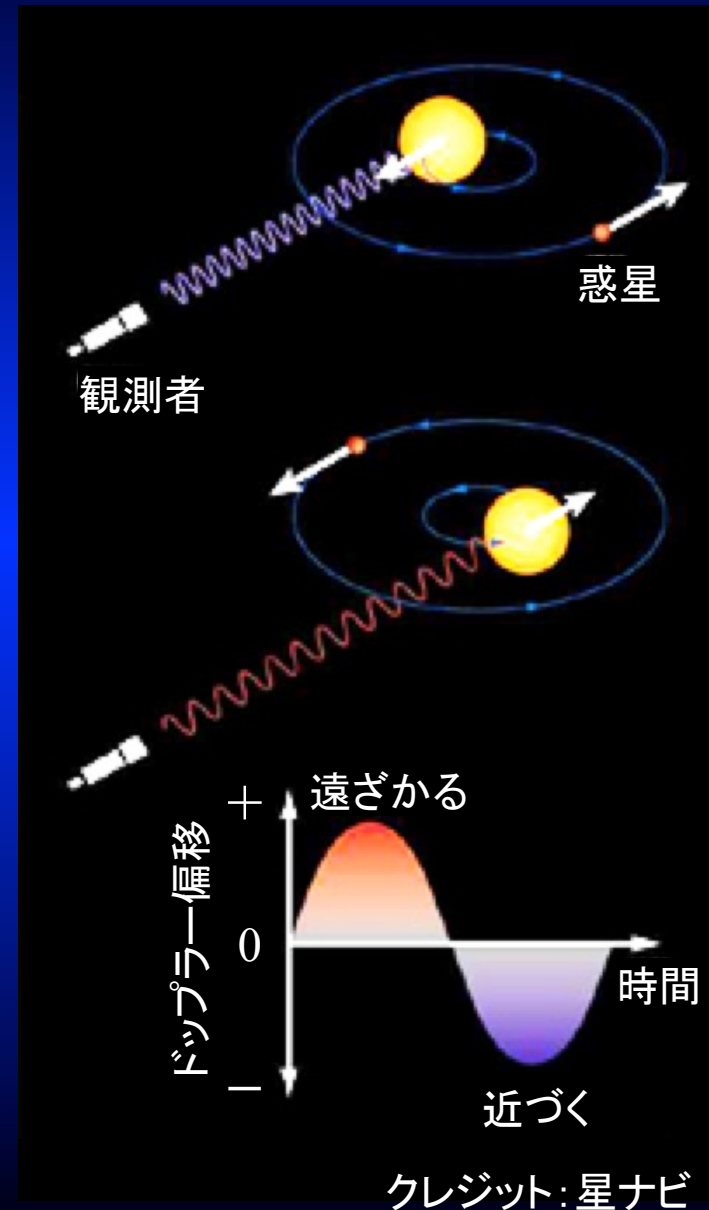
→ドップラー効果によって星の色が赤や青に変化する。

→主星の色が周期的に変化する。

ドップラー偏移量から惑星の質量(下限値)が見積もられる。

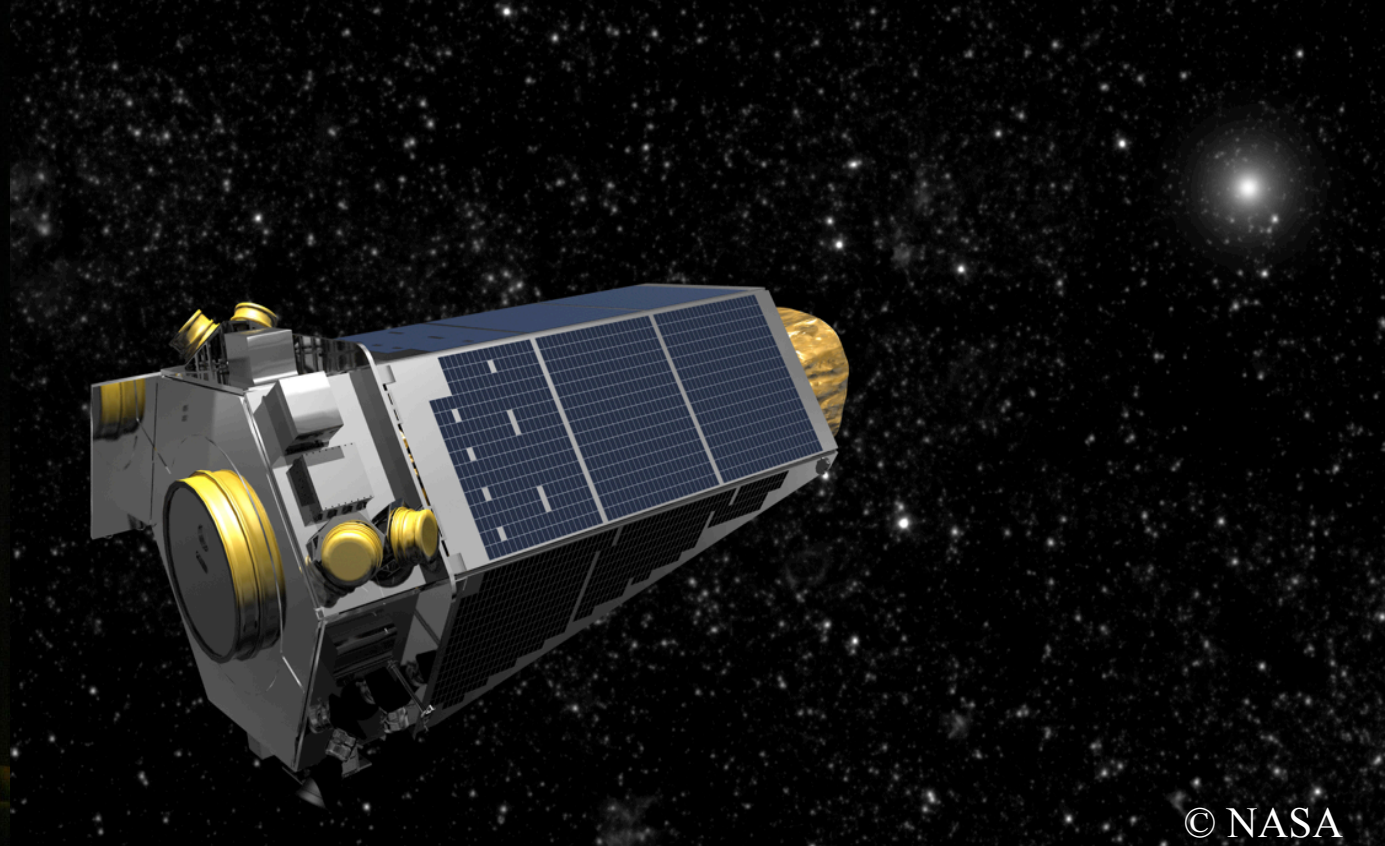
* アstrometry法

主星の揺れによる位置の変化を観測する方法。



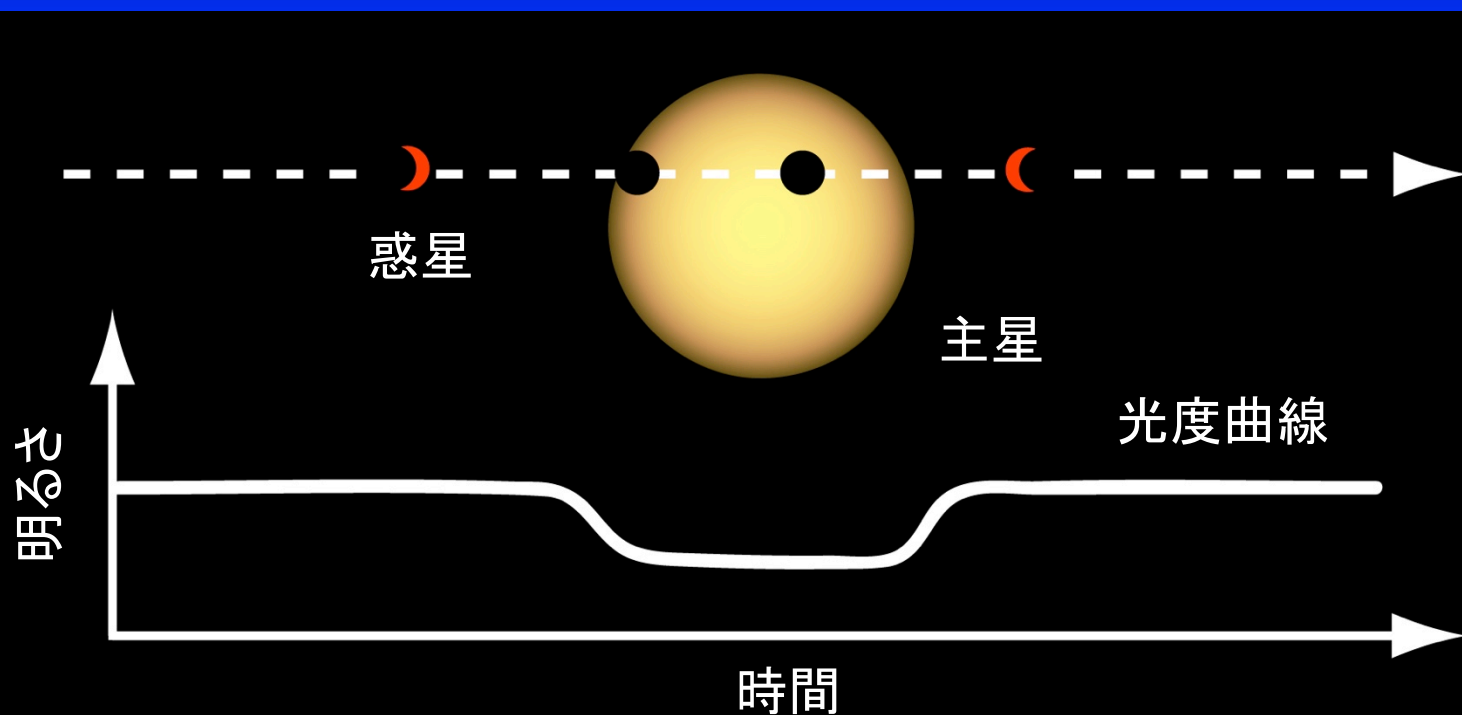
ケプラー宇宙望遠鏡

- 2009年3月に打ち上げ。
- 主に地球型系外惑星を探査。
- トランジット法で10万以上の星を4年に渡って観測。
- 2013年からK2ミッション開始。

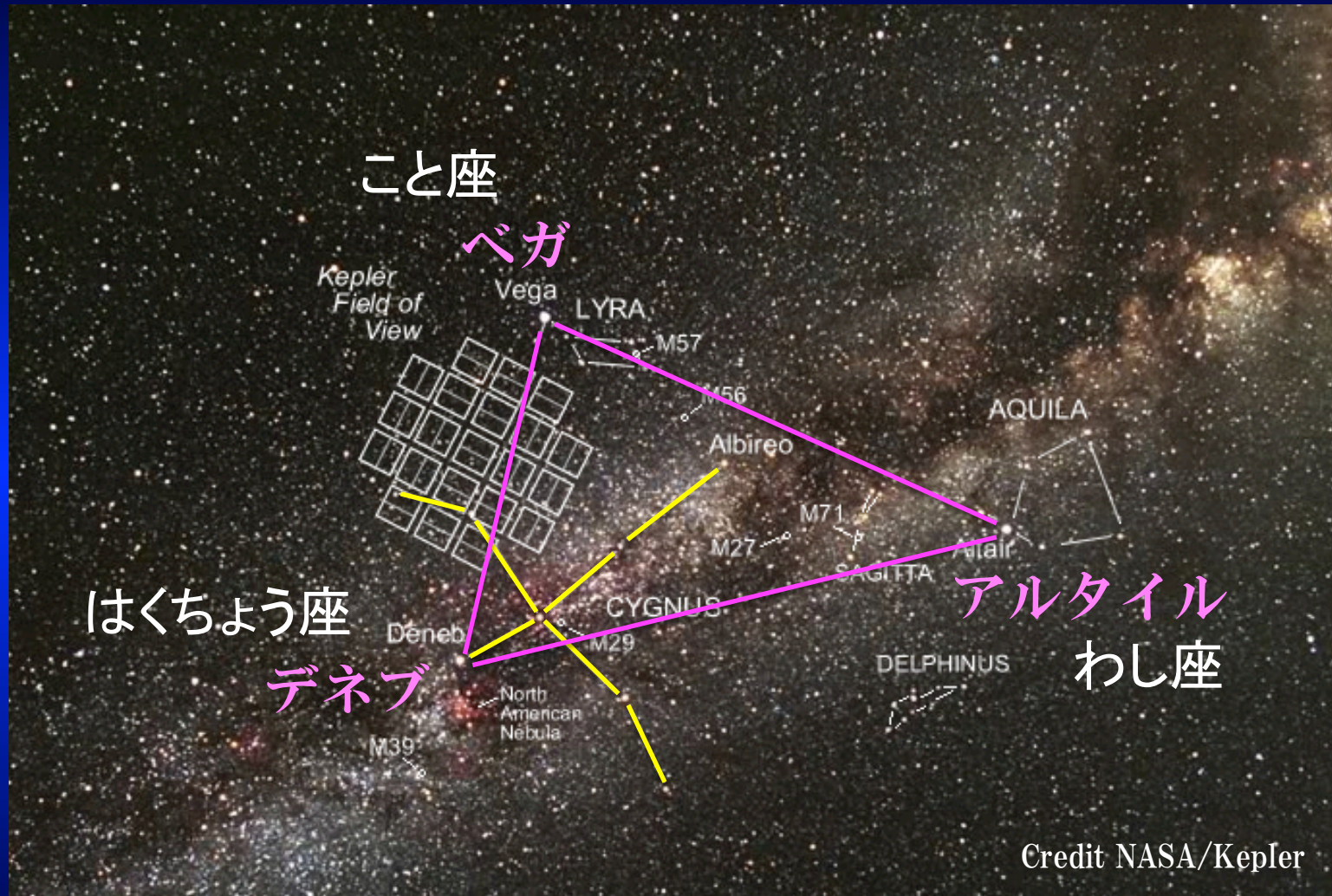


トランジット法

- 惑星が主星の前を通過する時、主星がわずかに暗くなる。
- 周期的な明るさの変化を観測する。
- 明るさの変化量から惑星のサイズが分かる。
- 視線速度法から惑星の質量が分かる。
→ 密度が見積もられる。 注) 地球の密度は約 5.5g/cm^3



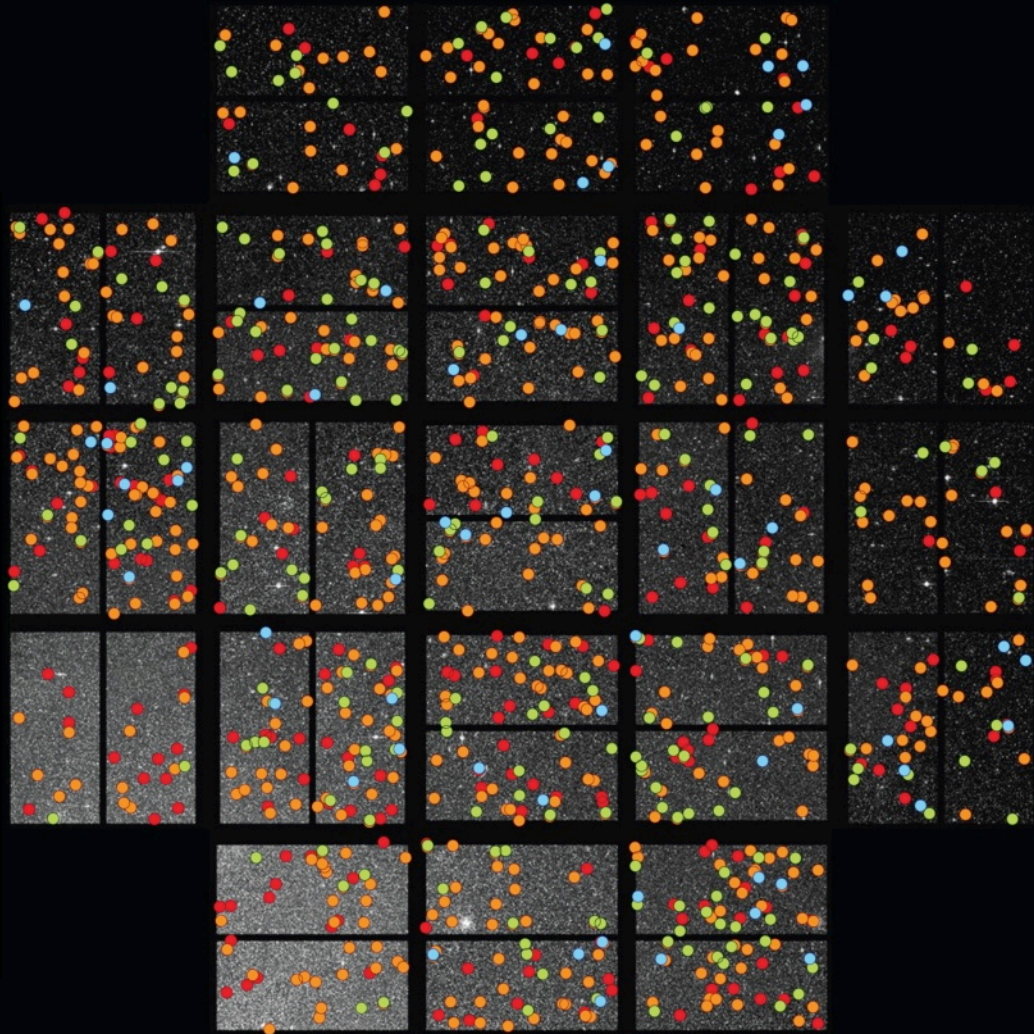
ケプラー宇宙望遠鏡の観測領域



ほどよく星が存在する天の川の少し離れた領域を観測

ケプラー宇宙望遠鏡による惑星の検出

- 地球サイズ
- スーパーアースサイズ
 $1.25 - 2R_{\text{earth}}$
- 海王星サイズ
 $2 - 6R_{\text{earth}}$
- 巨大惑星サイズ
 $6 - 22R_{\text{earth}}$



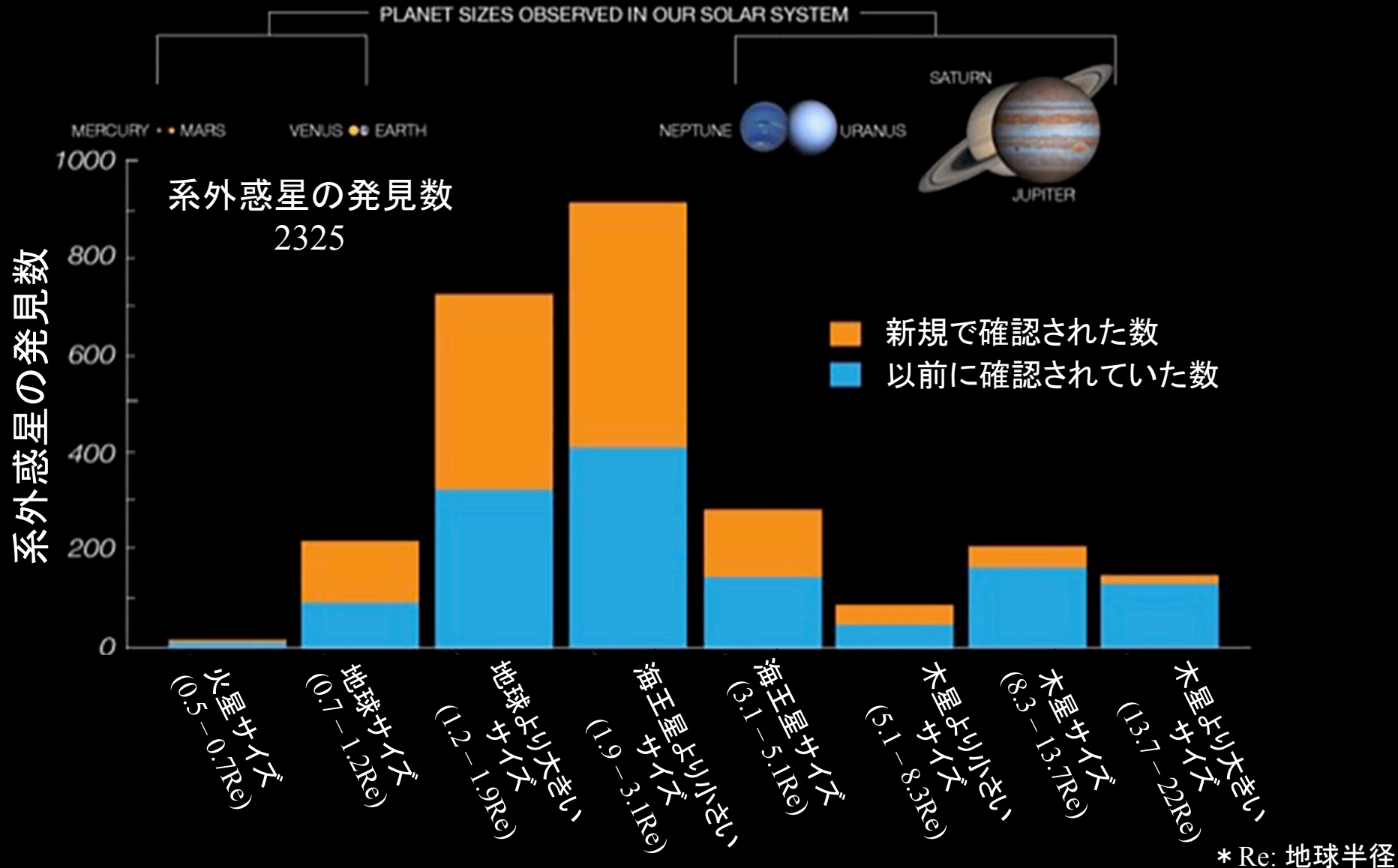
系外惑星の年別発見数

2016年5月現在

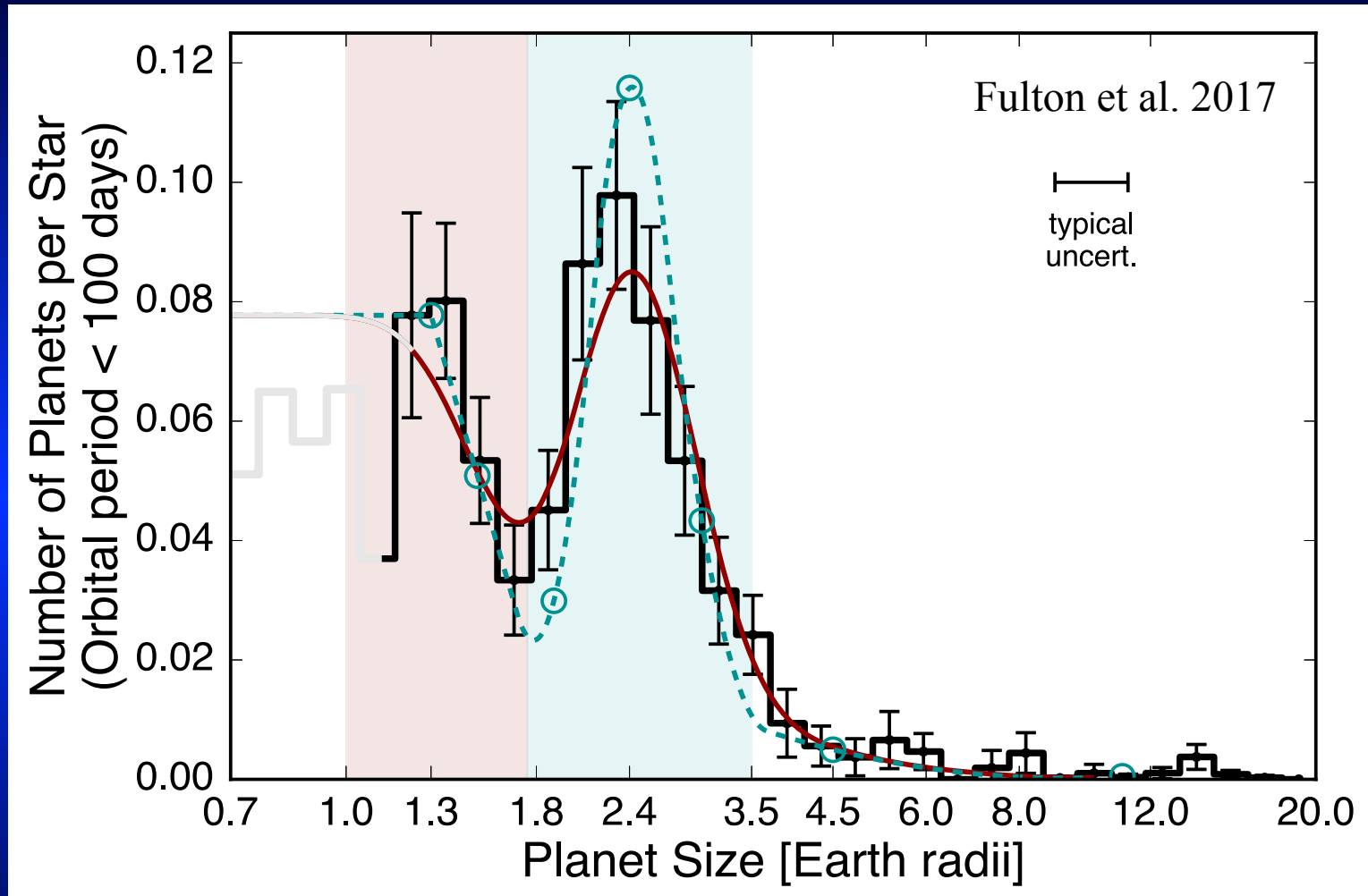


系外惑星のサイズ分布

2016年5月現在

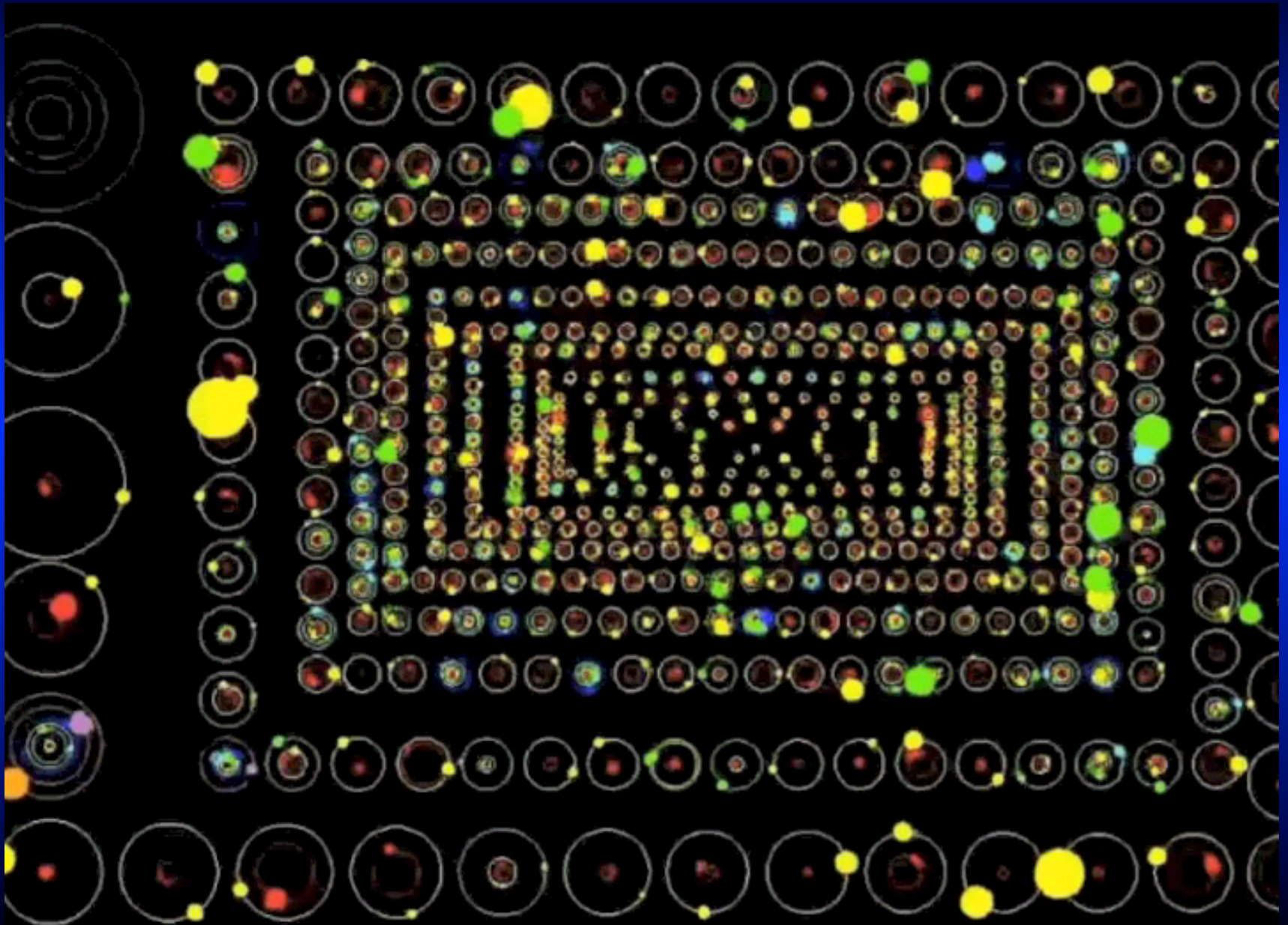


地球サイズの惑星のサイズ分布



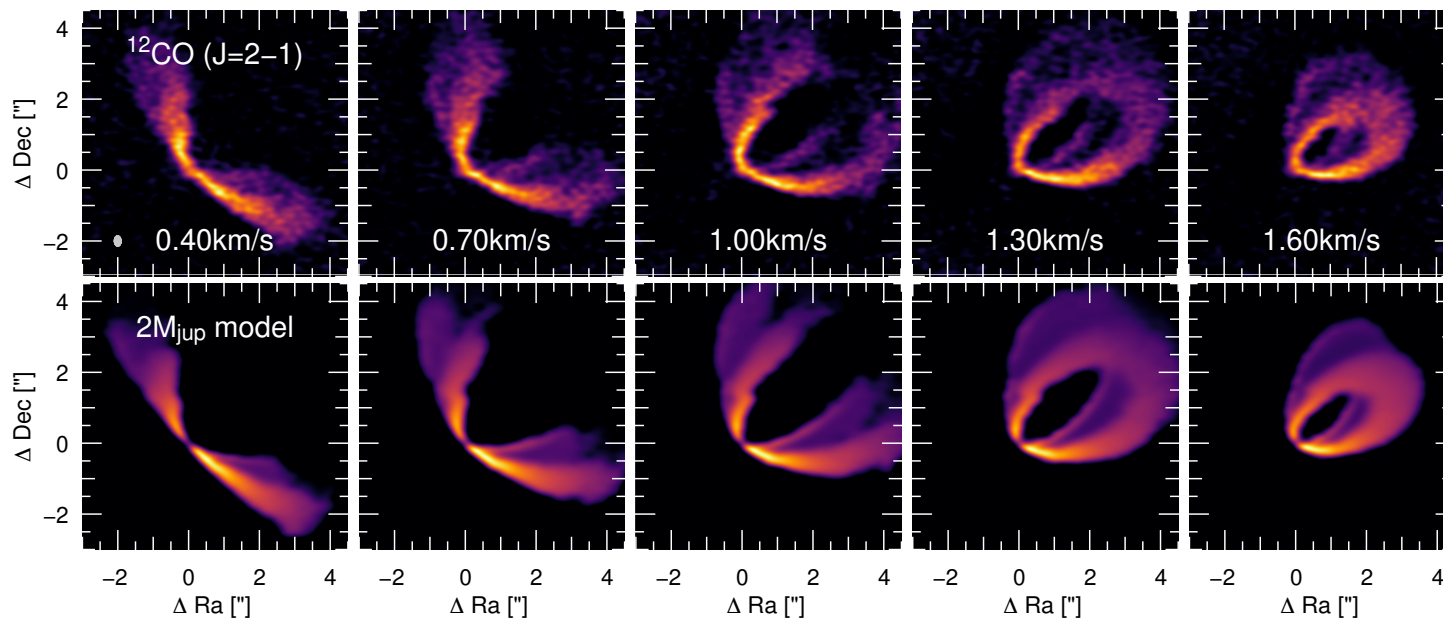
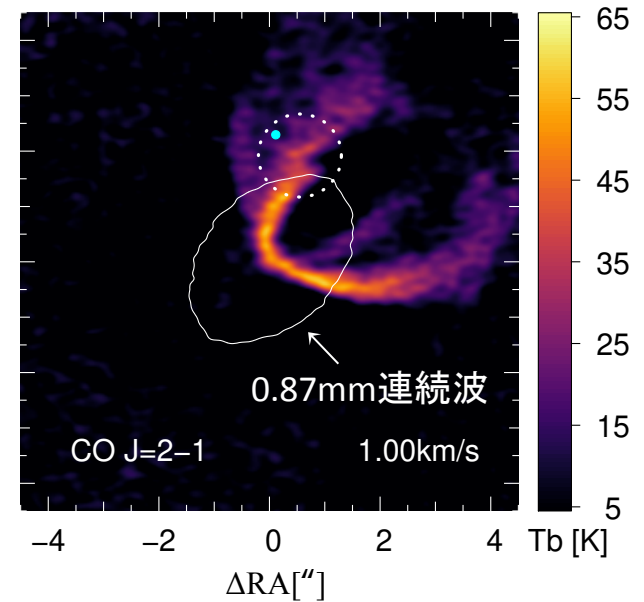
ケプラーで発見された惑星において、1.7地球半径サイズに個数分布の谷がある。

系外の惑星系



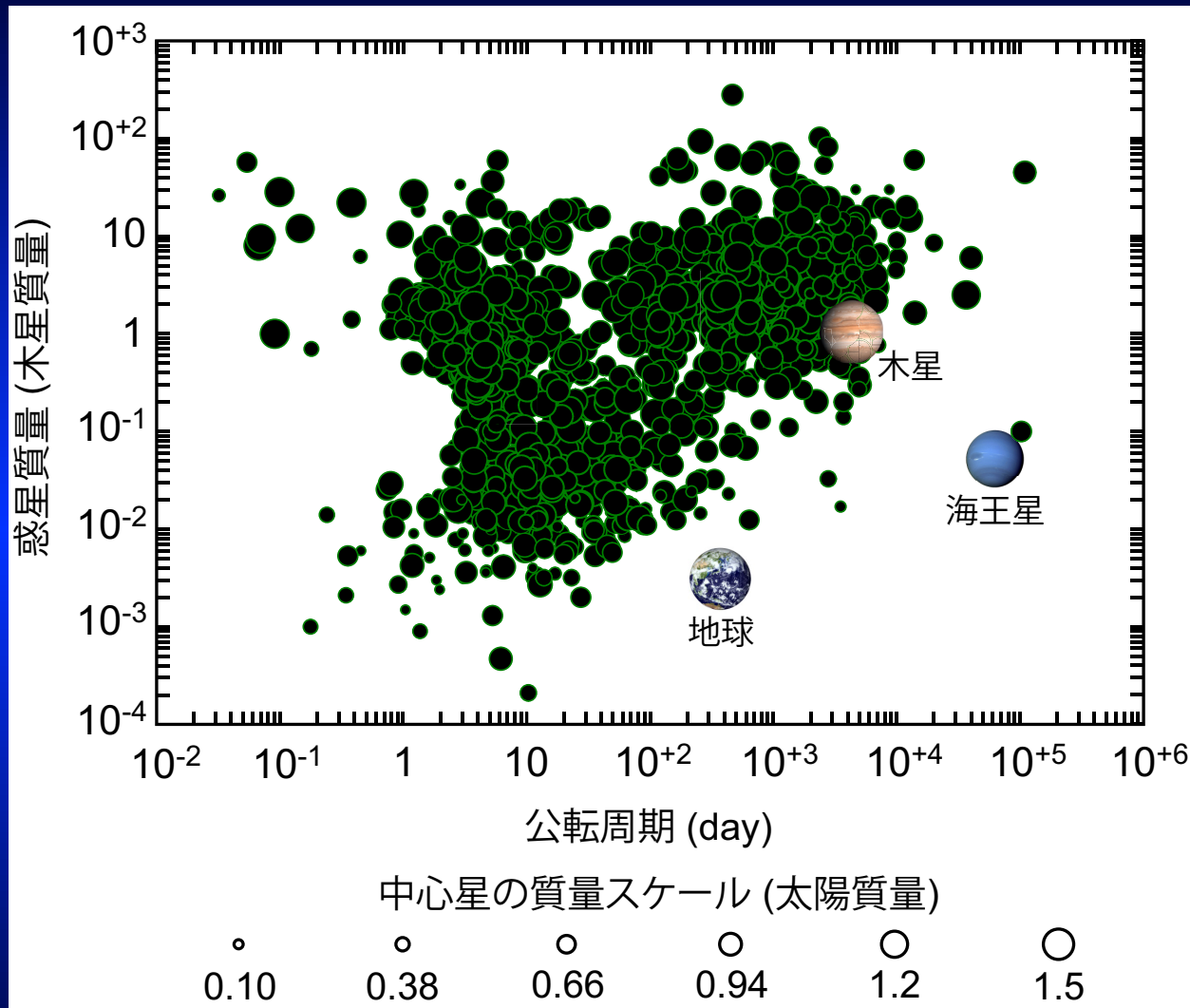
電波による惑星検出方法

- ・チャンネルマップの特定の速度成分に注目
- ・パターンにずれ(kink)がないか調査
 - 無ければスムーズな円盤
 - 有れば円盤の一部が乱されている
- ・ずれは重力相互作用によるものと仮定
 - モデル計算から惑星のパラメータが算出可能



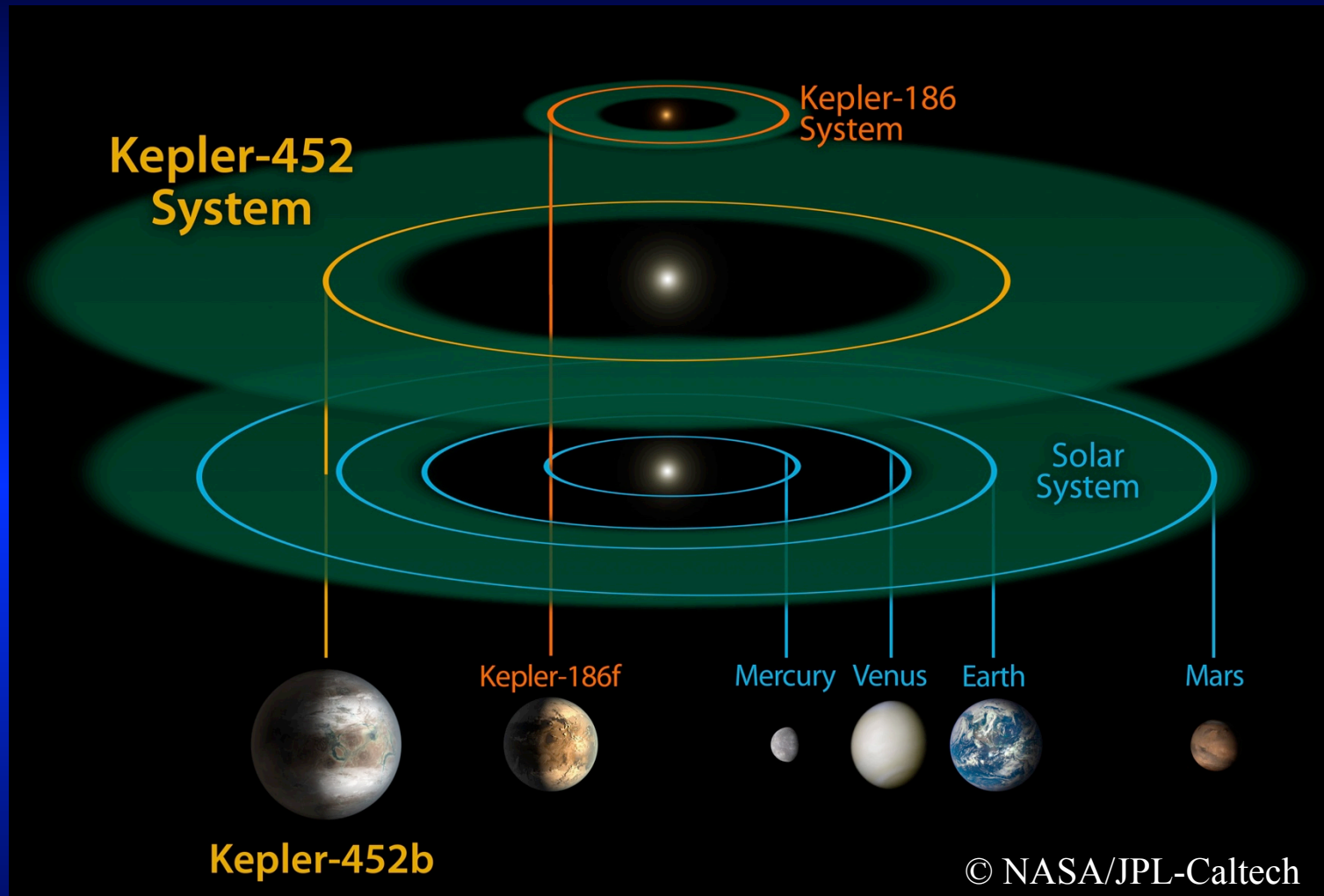
Pinte et al. 2018
ref. Teague et al. 2018

公転周期と惑星質量の関係

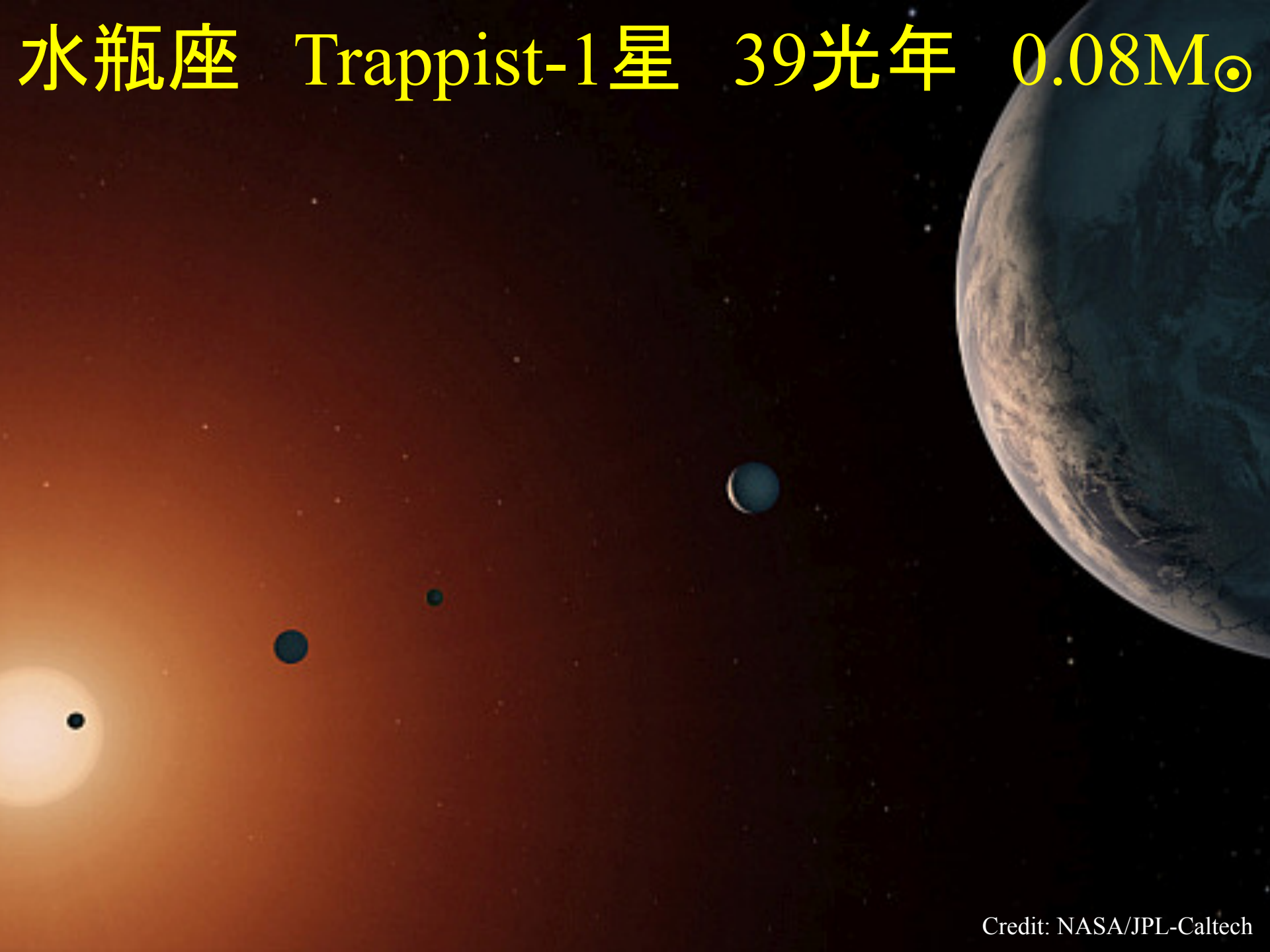


太陽系は必ずしも標準的な惑星系ではないことを示している。

系外惑星の例 Kepler-452惑星系

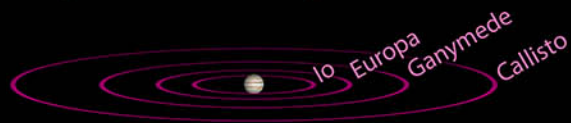


太陽に似た主星を持ちハビタブルゾーンにある地球型惑星
最も地球に似た惑星？ 半径は地球の1.6倍、公転周期385日

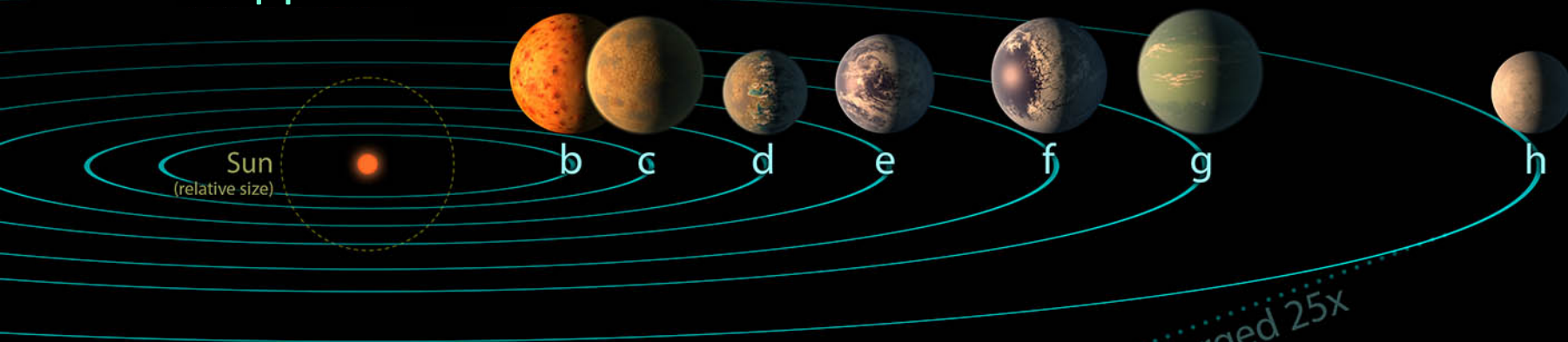


水瓶座 Trappist-1星 39光年 0.08M $\odot$

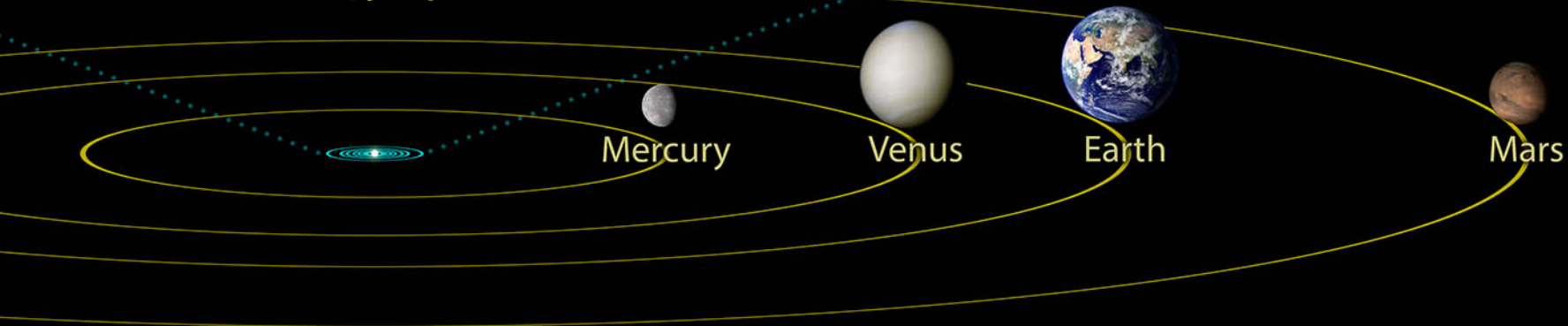
木星と主な衛星



Trappist-1惑星系

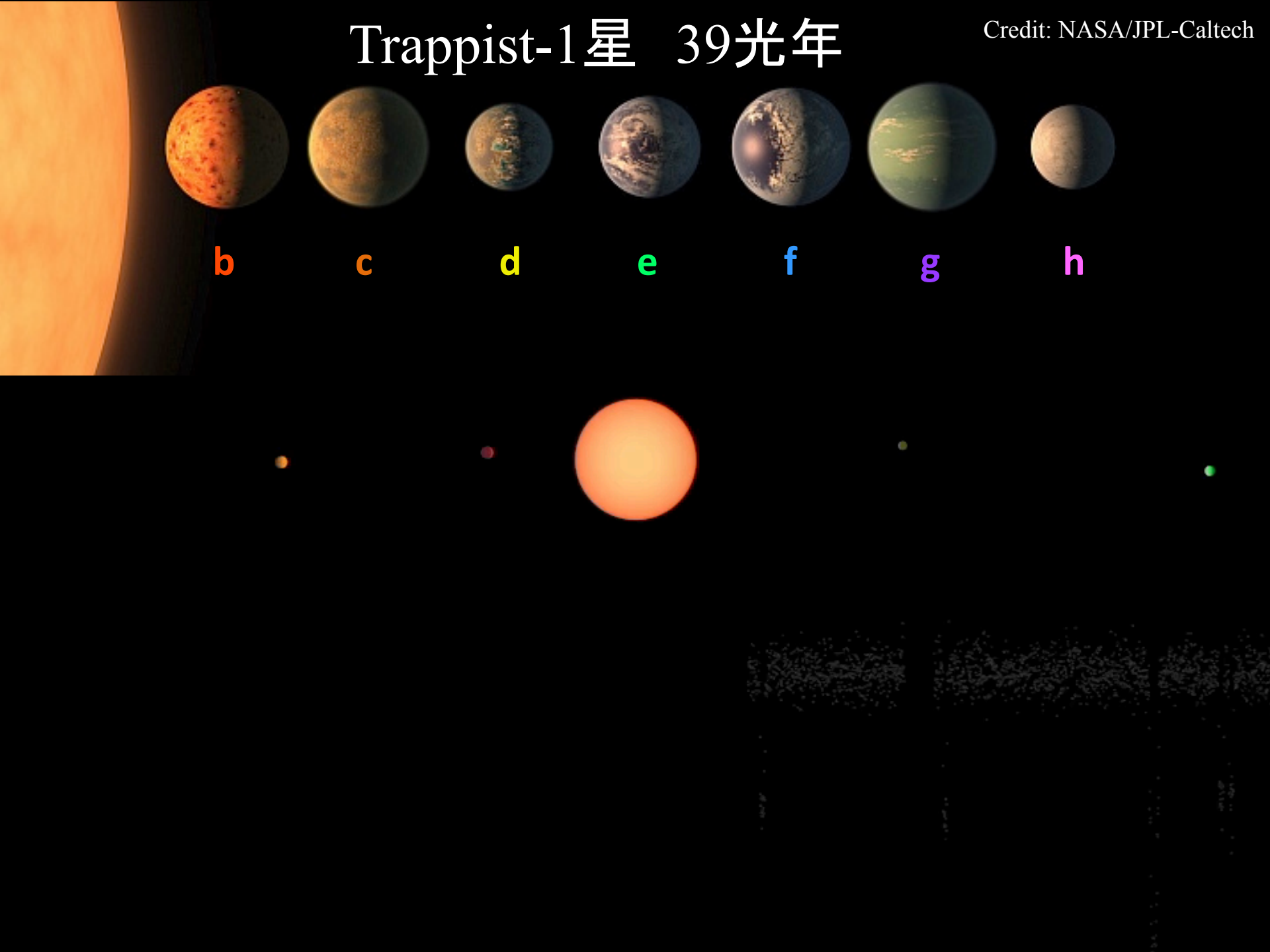


太陽系



Trappist-1 星 39光年

Credit: NASA/JPL-Caltech



惑星の統計的結果

恒星は平均して1つ以上の惑星を持つ(Cassan et al. 2012)。

ケプラーの観測から、我々の銀河の恒星の6分の1以上が地球型惑星を持つ(Fressin et al. 2013)。

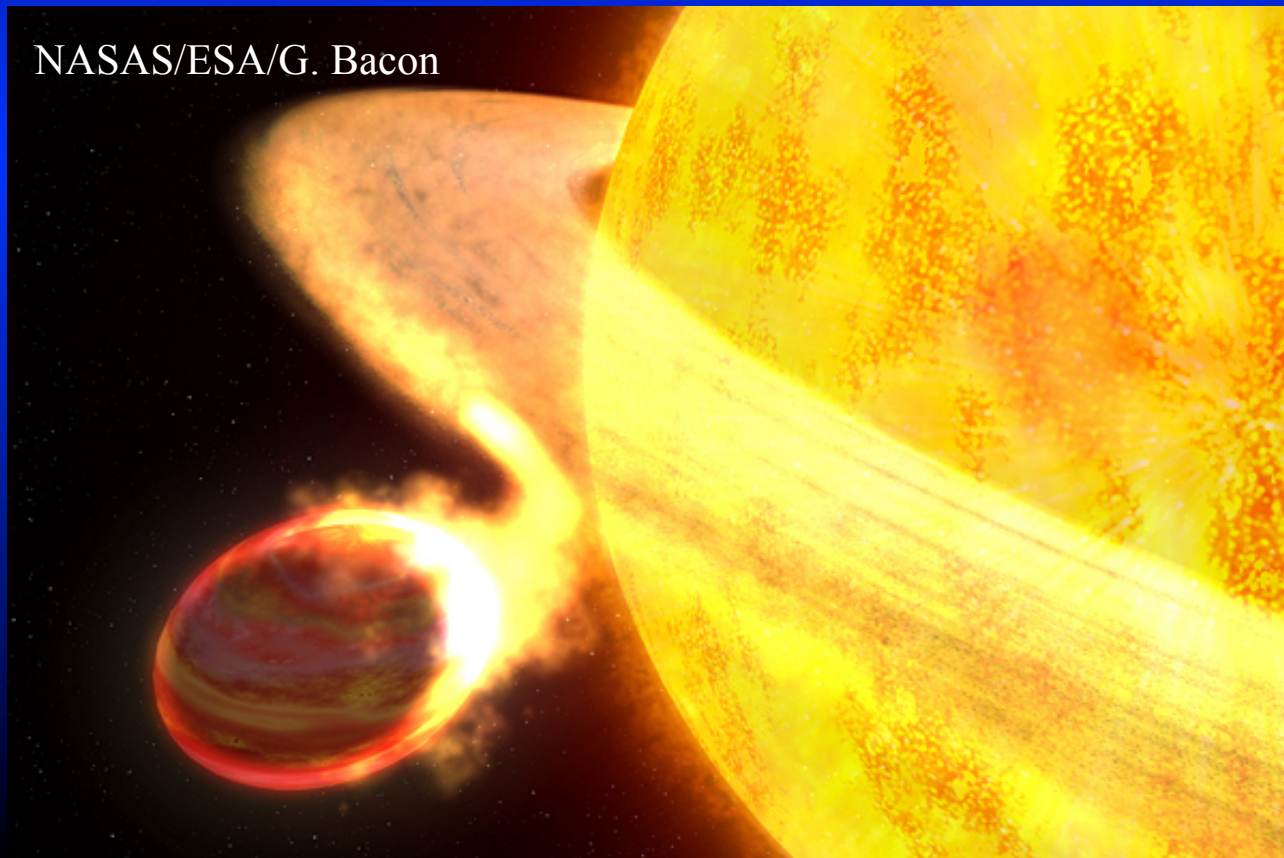
→ 天の川銀河の恒星は1000億以上あるので、地球型惑星は170億個以上存在する。

ハビタブルゾーン(HZ)にある地球型惑星は $22 \pm 8\%$ 存在する(Petigura et al. 2013)。

→ 天の川銀河には数十億個の「第2の地球」がある。

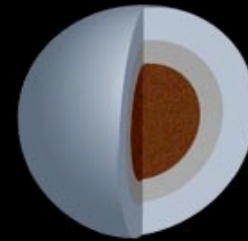
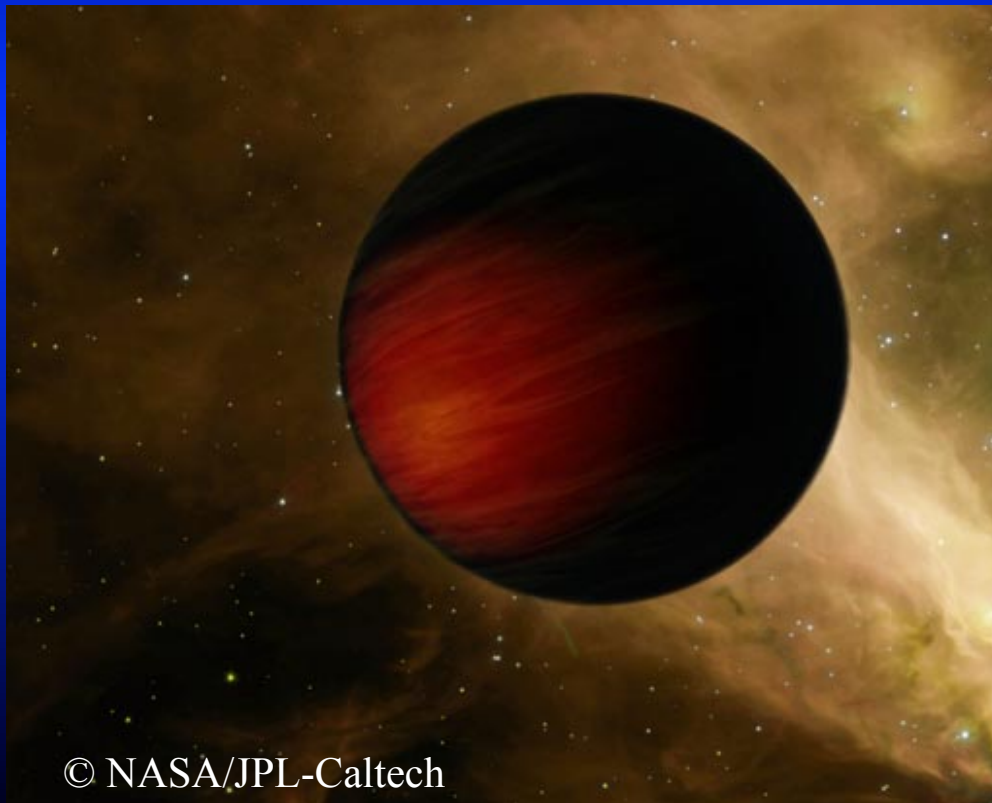
系外惑星の例 WASP-12b

- 主星からの距離がたったの0.0229AU(約345万km)で公転周期が1日のHot Jupiter。
- 潮汐力でフットボールのように膨らんでいる。
- ガスが主星に降着しており、1000万年でガスを失う。

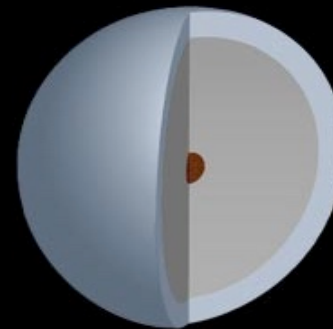


系外惑星の例 HD 149026b

- 巨大な中心核(地球質量の67倍)を持つ。
一般的な惑星形成論では地球の10倍以上の核を形成することは困難である。
- すばる望遠鏡で佐藤文衛らが発見した(Sato et al. 2005)。



HD 149026b

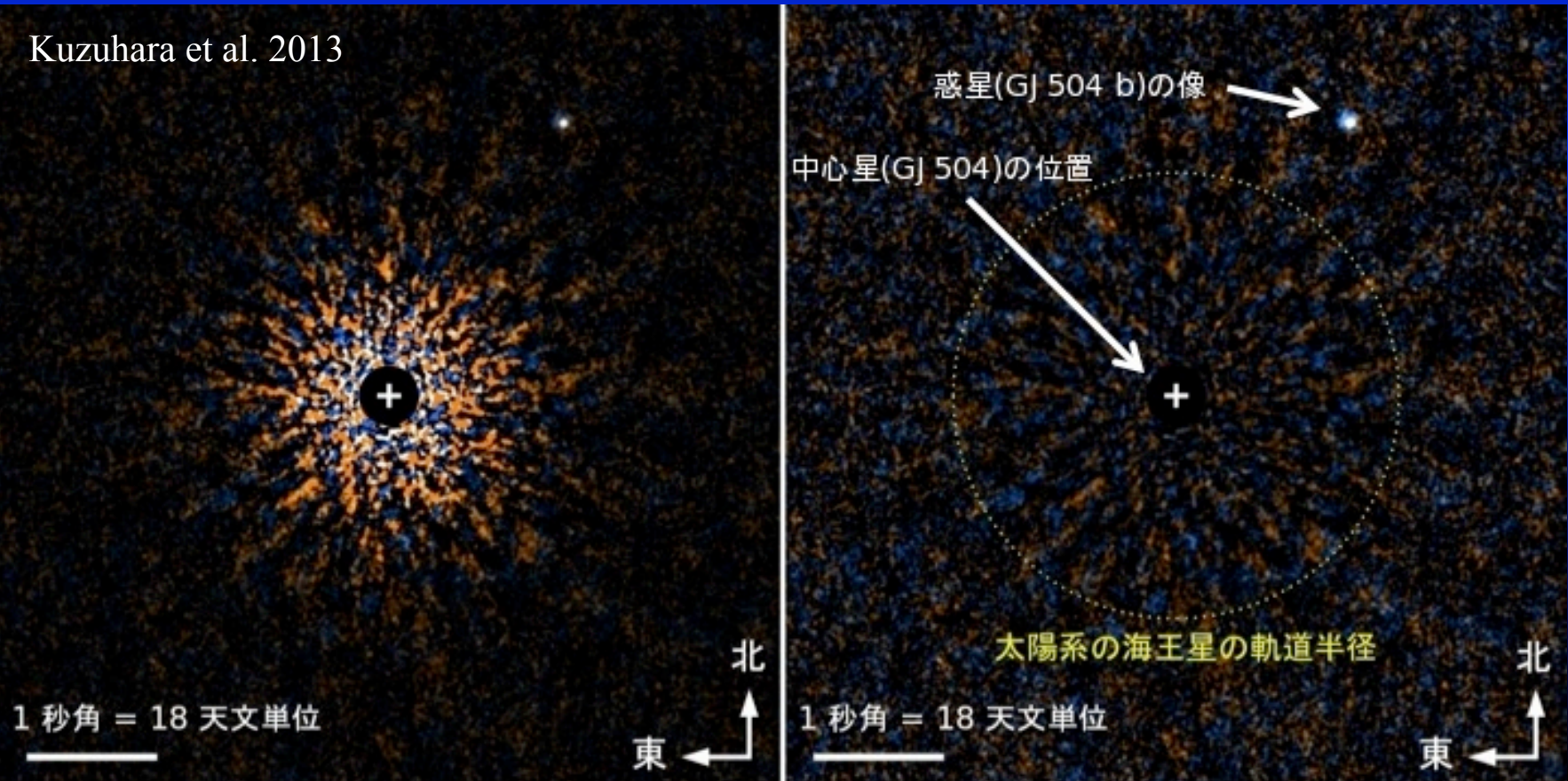


木星

系外惑星の例 GJ504b

- 世界で初めて「第二の木星」が直接撮像された。
日本のすばる望遠鏡SEEDSプロジェクト。
- 主星からの距離44AU、惑星質量は3 – 5.5木星質量。
標準理論では説明ができない。ガス惑星は30AUが限界。

Kuzuhara et al. 2013



惑星大気 例金星

2004年6月8日
金星食
TRACE衛星

**Cytherian
Atmospheric
Scattering**

**TRANSIT OF VENUS
08 JUNE 2004
050553 - 054751 UT
TRACE “White Light”
INGRESS**

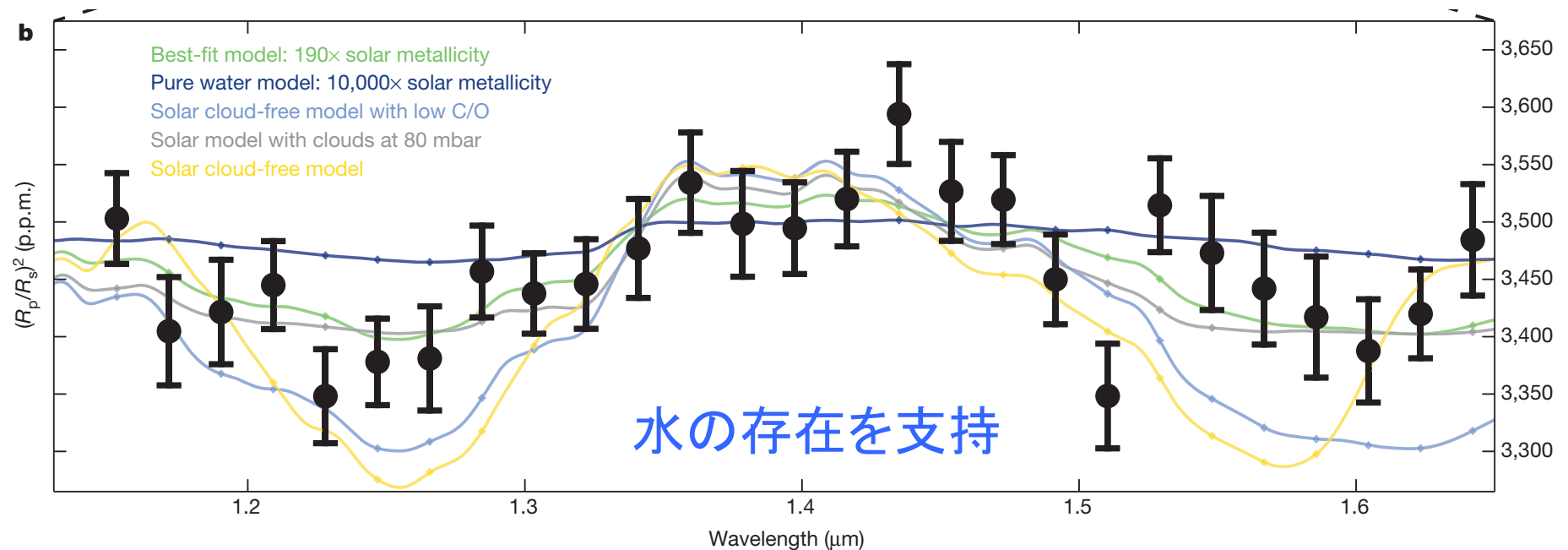
**Glenn Schneider*
Steward Observatory
University of Arizona
Tucson, Arizona 85721 USA
gschneider@as.arizona.edu
<http://nicmosis.as.arizona.edu:8000>**

* In collaboration with Jay Pasachoff (Williams College).

Special thanks to Karel Schrijver and the TRACE team for their assistance in planning and implementing these transit observations.

Water vapour absorption in the clear atmosphere of a Neptune-sized exoplanet

Jonathan Fraine^{1,2,3}, Drake Deming^{1,4}, Bjorn Benneke³, Heather Knutson³, Andrés Jordán², Néstor Espinoza², Nikku Madhusudhan⁵, Ashlee Wilkins¹ & Kamen Todorov⁶



系外惑星大気

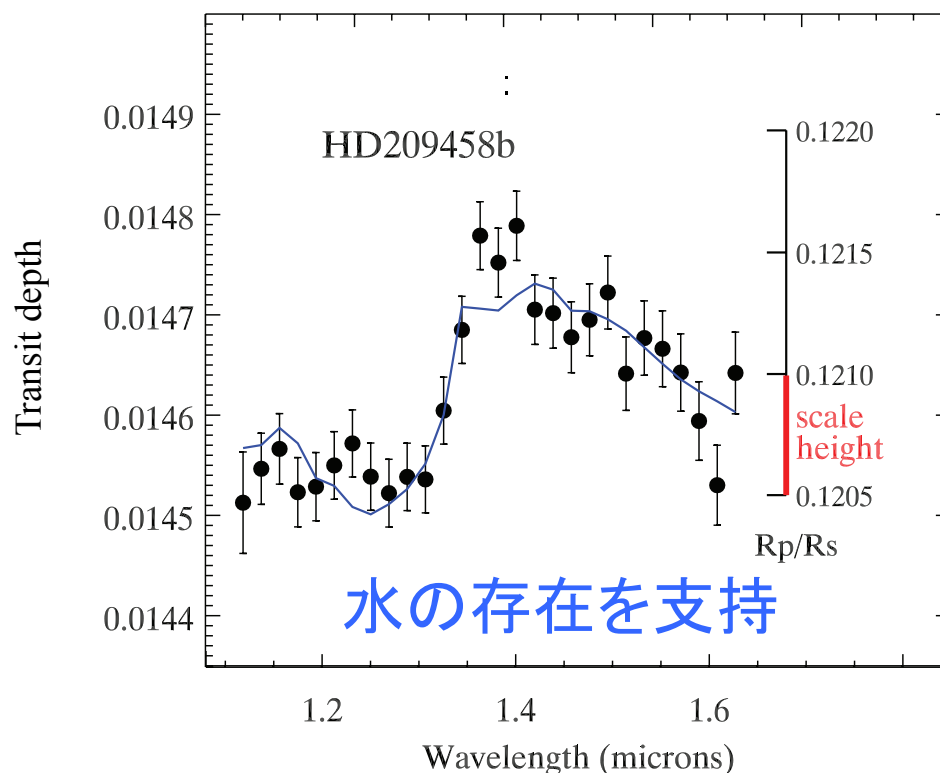
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 774:95 (17pp), 2013 September 10

doi:[10.1088/0004-637X/774/2/95](https://doi.org/10.1088/0004-637X/774/2/95)

© 2013. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

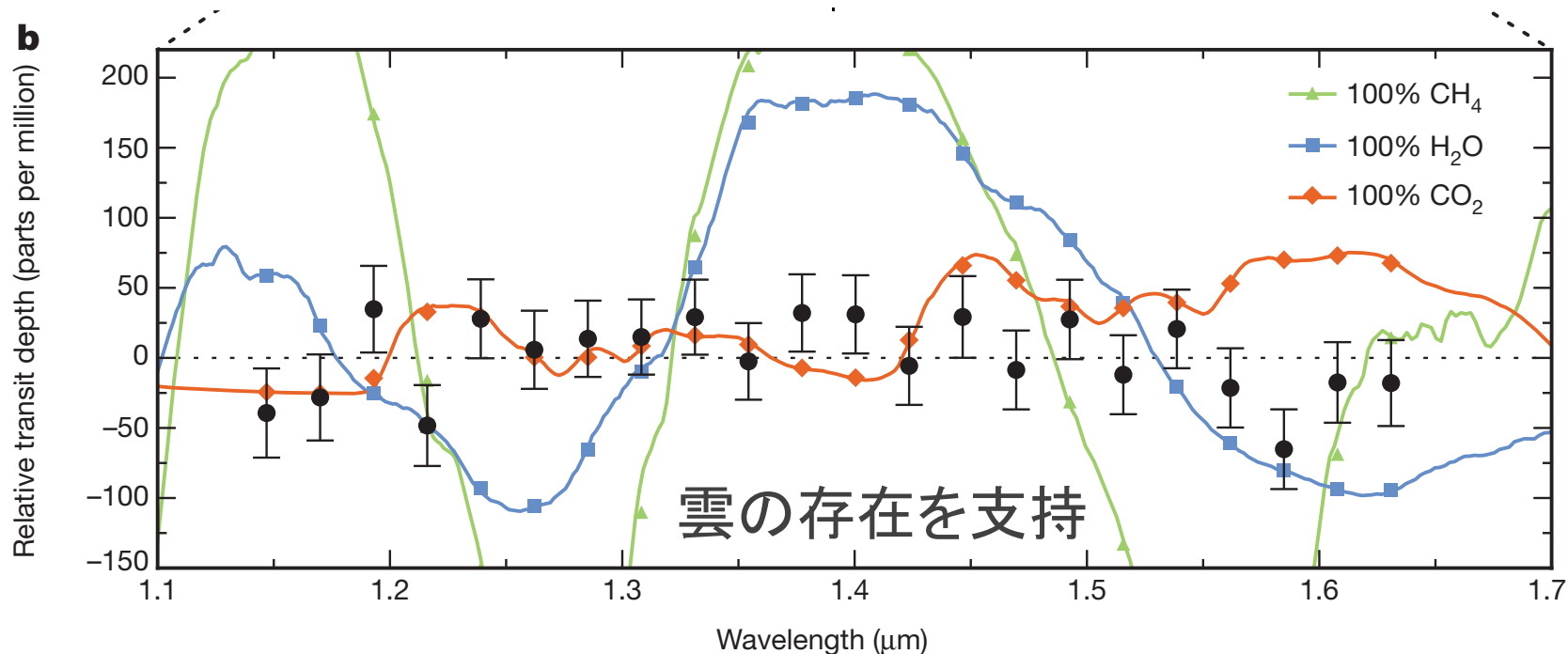
INFRARED TRANSMISSION SPECTROSCOPY OF THE EXOPLANETS HD 209458b AND XO-1b USING THE WIDE FIELD CAMERA-3 ON THE *HUBBLE SPACE TELESCOPE*

DRAKE DEMING^{1,2}, ASHLEE WILKINS¹, PETER MCCULLOUGH³, ADAM BURROWS⁴, JONATHAN J. FORTNEY⁵, ERIC AGOL^{2,6},
IAN DOBBS-DIXON^{2,6}, NIKKU MADHUSUDHAN⁷, NICOLAS CROUZET³, JEAN-MICHEL DESERT^{8,17}, RONALD L. GILLILAND⁹,
KOREY HAYNES^{10,11}, HEATHER A. KNUTSON⁸, MICHAEL LINE⁸, ZAZRALT MAGIC^{12,13}, AVI M. MANDELL¹¹, SUKRIT RANJAN¹⁴,
DAVID CHARBONNEAU¹⁴, MARK CLAMPIN¹¹, SARA SEAGER¹⁵, AND ADAM P. SHOWMAN¹⁶



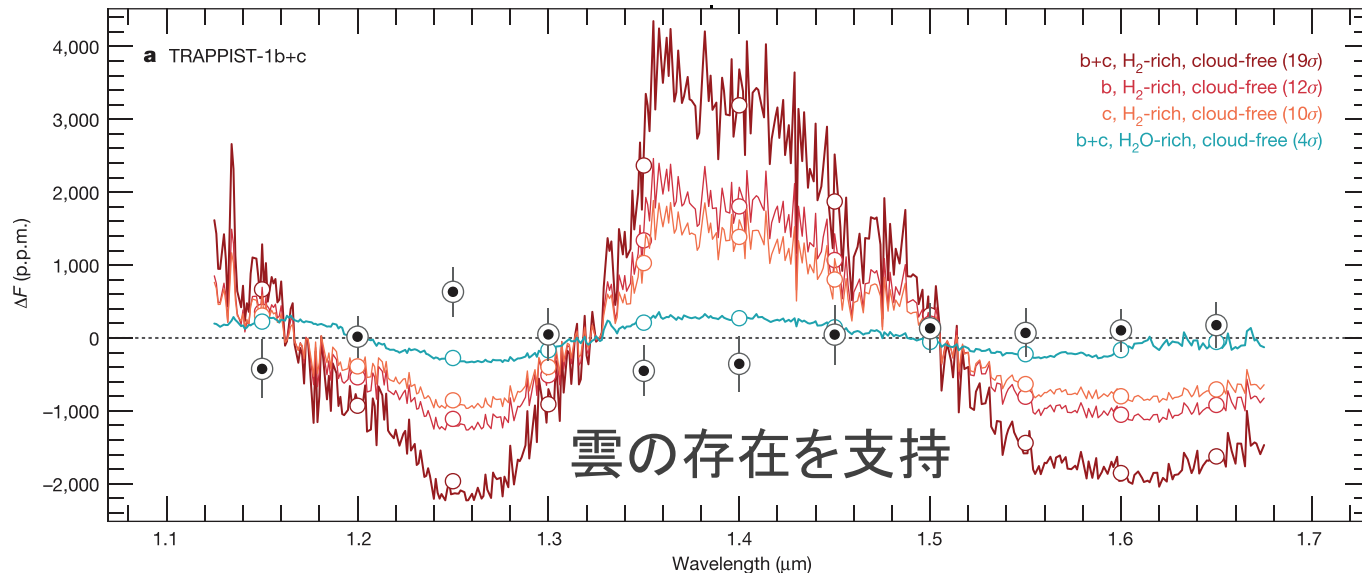
Clouds in the atmosphere of the super-Earth exoplanet GJ 1214b

Laura Kreidberg¹, Jacob L. Bean¹, Jean-Michel Désert^{2,3}, Björn Benneke⁴, Drake Deming⁵, Kevin B. Stevenson¹, Sara Seager⁴, Zachory Berta-Thompson^{6,7}, Andreas Seifahrt¹ & Derek Homeier⁸



A combined transmission spectrum of the Earth-sized exoplanets TRAPPIST-1 b and c

Julien de Wit¹, Hannah R. Wakeford², Michaël Gillon³, Nikole K. Lewis⁴, Jeff A. Valenti⁴, Brice-Olivier Demory⁵, Adam J. Burgasser⁶, Artem Burdanov³, Laetitia Delrez³, Emmanuël Jehin³, Susan M. Lederer⁷, Didier Queloz⁵, Amaury H. M. J. Triaud⁸ & Valérie Van Grootel³



ref. de Wit et al. 2018

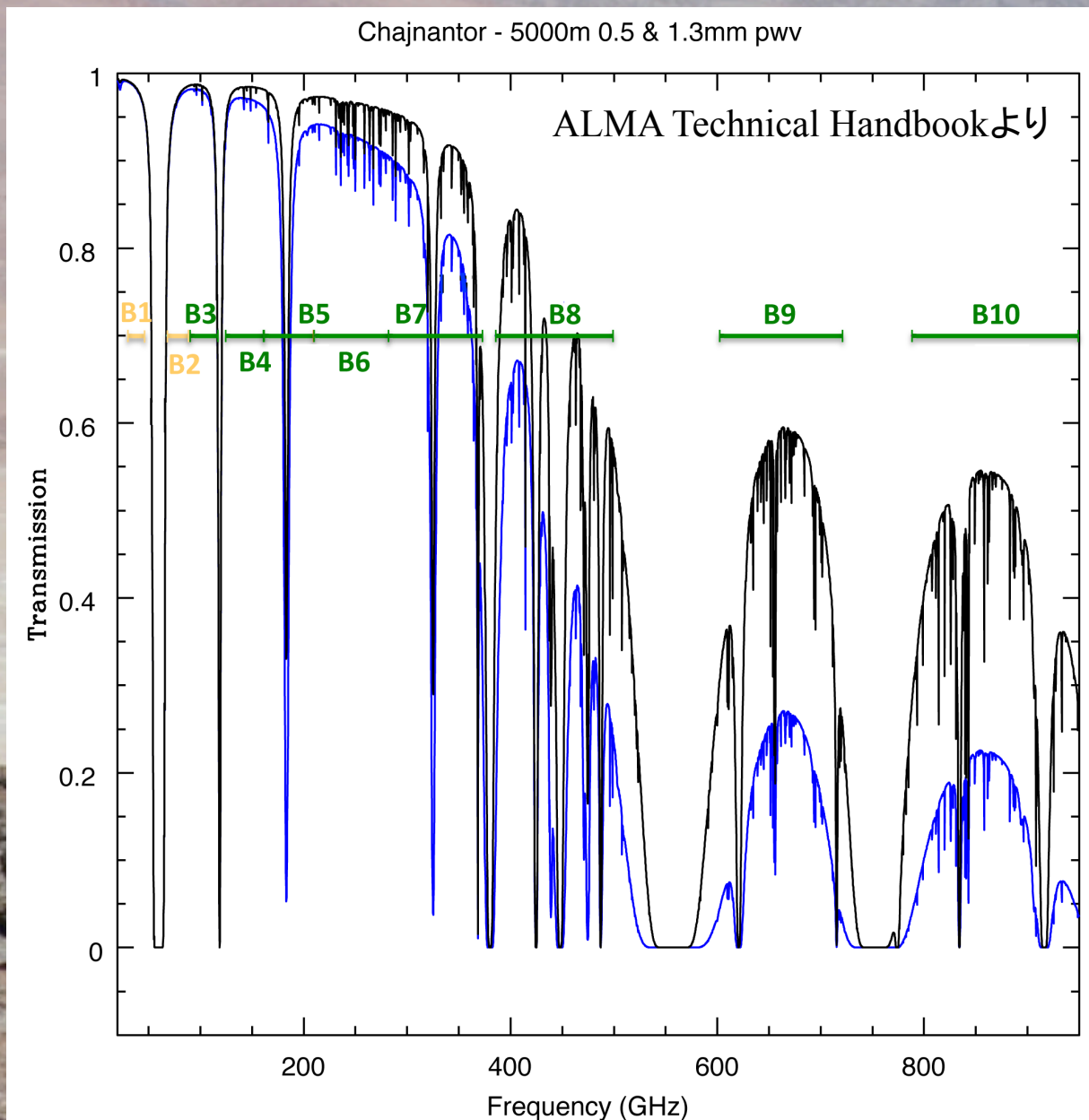
Atmospheric reconnaissance of the habitable-zone Earth-sized planets orbiting TRAPPIST-1

将来計画

アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)

- 標高5000mのアタカマ砂漠
- 世界最大の電波干渉系
アンテナ間の最大距離 16km
50kmまでの拡張を検討中
- ガスの詳細観測が可能

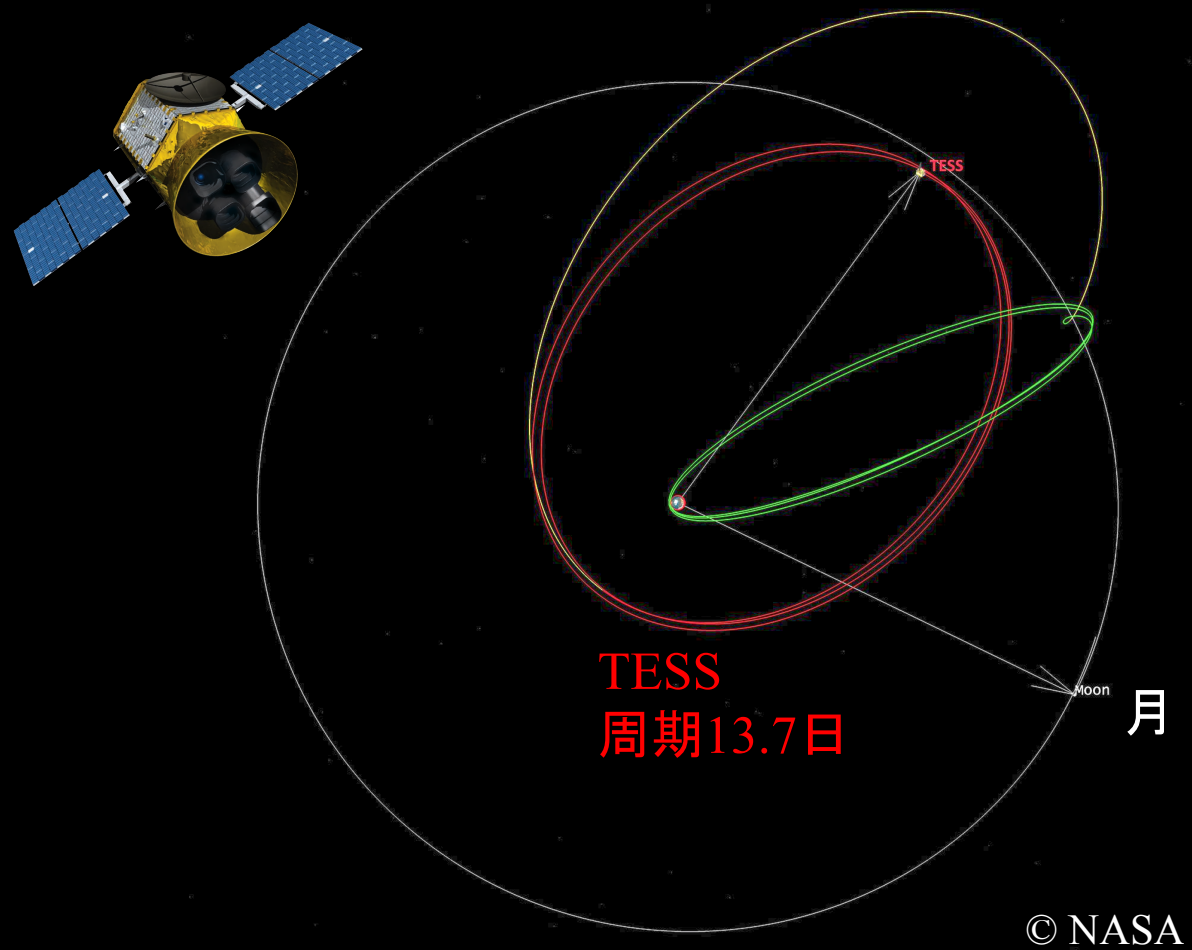
アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)



- 惑星形成現場において1AUスケールの詳細な観測。
原始惑星系円盤の詳細観測。
惑星の直接撮像。
- 宇宙物質の進化を探る。
生命の起源につながる物質探査。

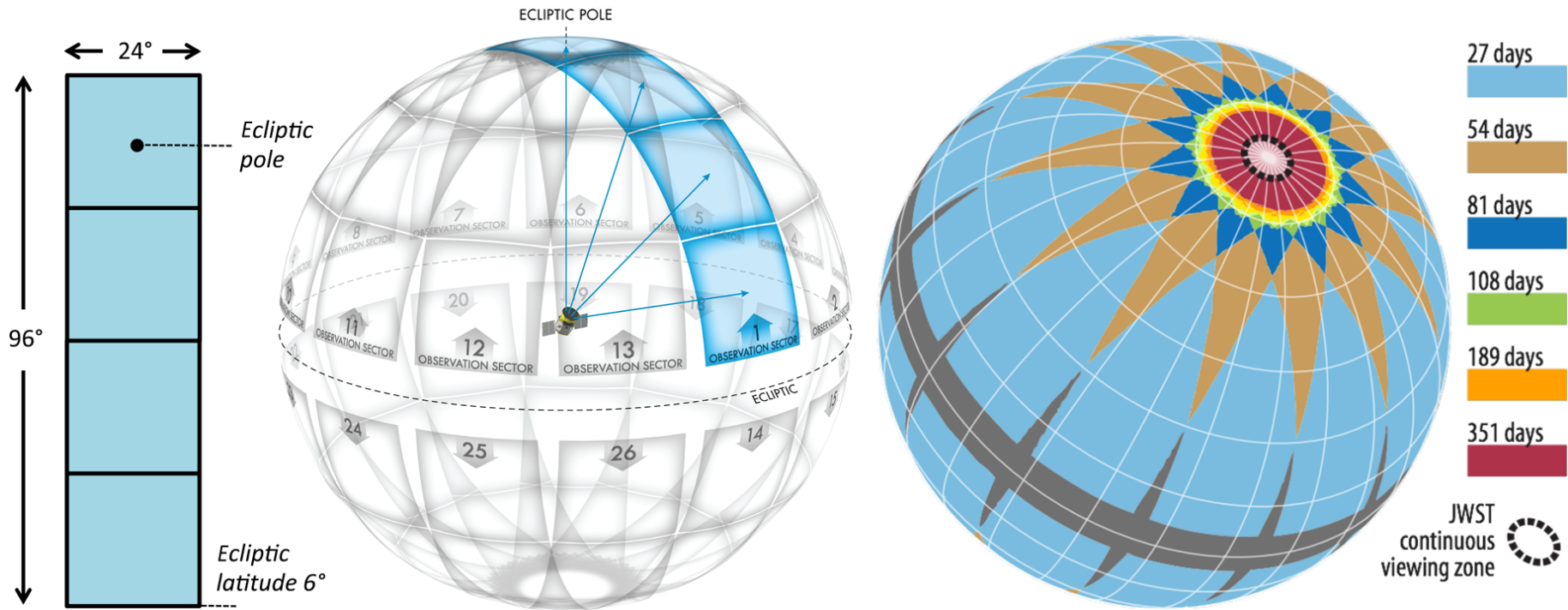


全天トランジットサーベイ計画 (TESS)



ケプラー宇宙望遠鏡の後継機。
2018年4月18日(日本時間4月19日)打ち上げ。
日本も計画の最初から参加している。

全天トランジットサーベイ計画 (TESS)



Ricker et al. 2017

- 太陽系近傍の約200,000個の恒星をターゲット。
 - 直径10cmの4台の高視野カメラ ($24^\circ \times 24^\circ$)
 - 2年間でほぼ全天のサーベイを行う。
- ケプラー探査では、はくちょう座領域の一部を観測

MuSCAT、MuSCAT2

Multi-color Simultaneous Camera for studying
Atmosphere of Transiting exoplanets (MuSCAT)

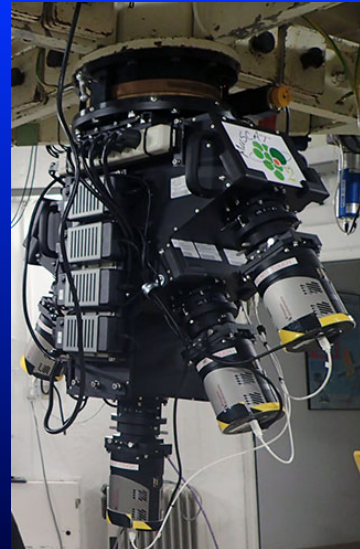
TESSのデータをもとに地上からのフォローアップ観測

- Keplerでは4年間同じ領域を観測していたので同じ恒星でトランジット観測が可能であった。
 - 高い精度で周期が決まる。
- TESSでは連続観測時間は約1ヶ月しかない。
 - 誤差が大きくなる。フォローアップが必要。



MuSCAT@岡山188

credit 岡山天体物理観測所



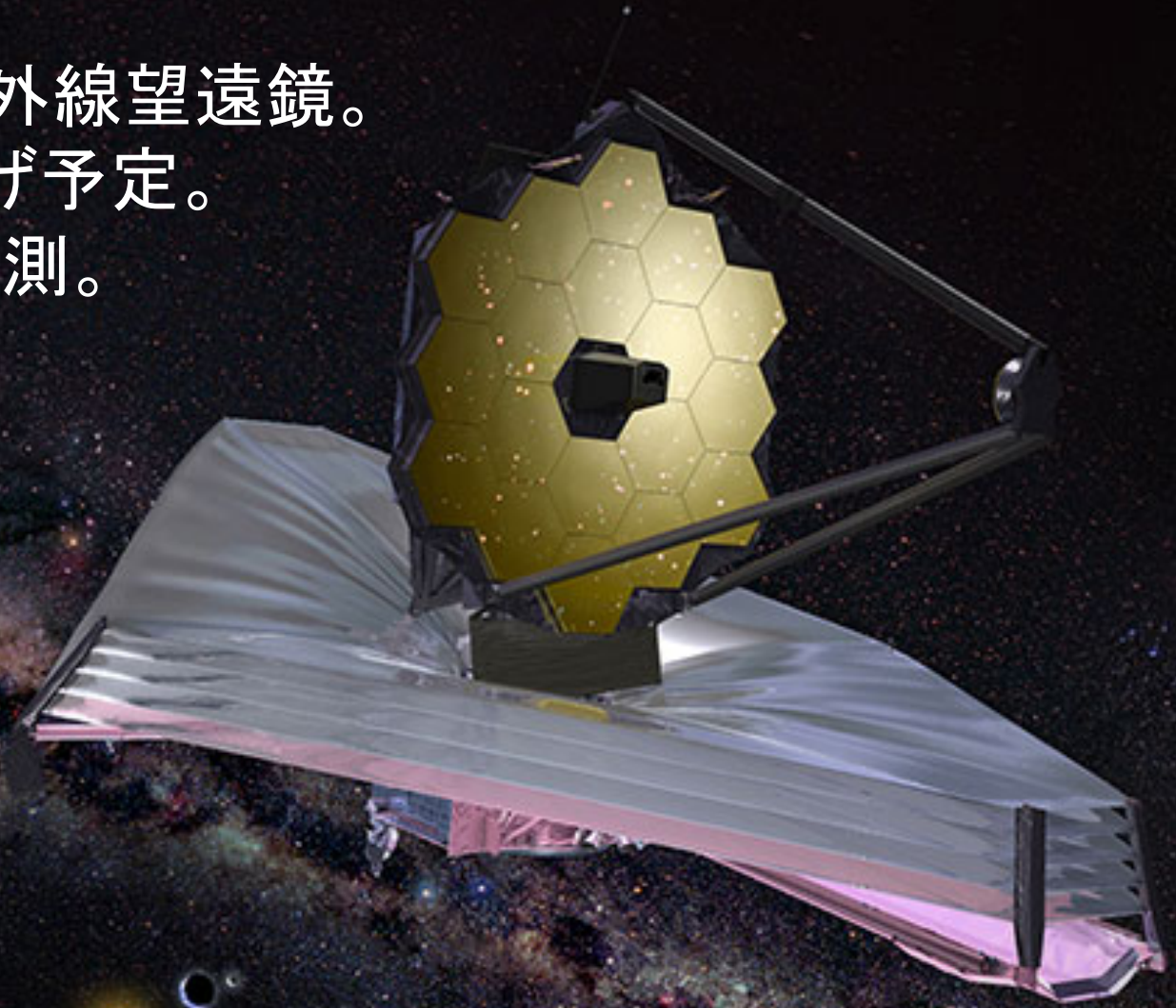
MuSCAT2@TCS1.52m

credit 岡山天体物理観測所 改編

次世代機 MuSCAT3の開発も検討されている。

ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)

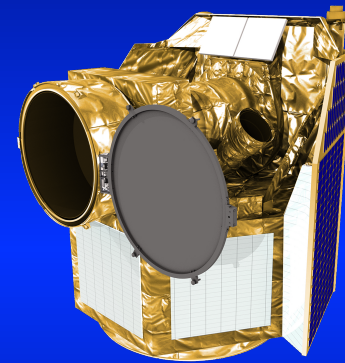
- 口径6.5mの赤外線望遠鏡。
- 2020年打ち上げ予定。
- L2ポイントで観測。



その他の宇宙観測衛星計画

ESA

CHEOPS (CHaracterising ExOPlanet Satellite)
スーパーアース、海王星質量天体の詳細観測
2019年打ち上げ予定



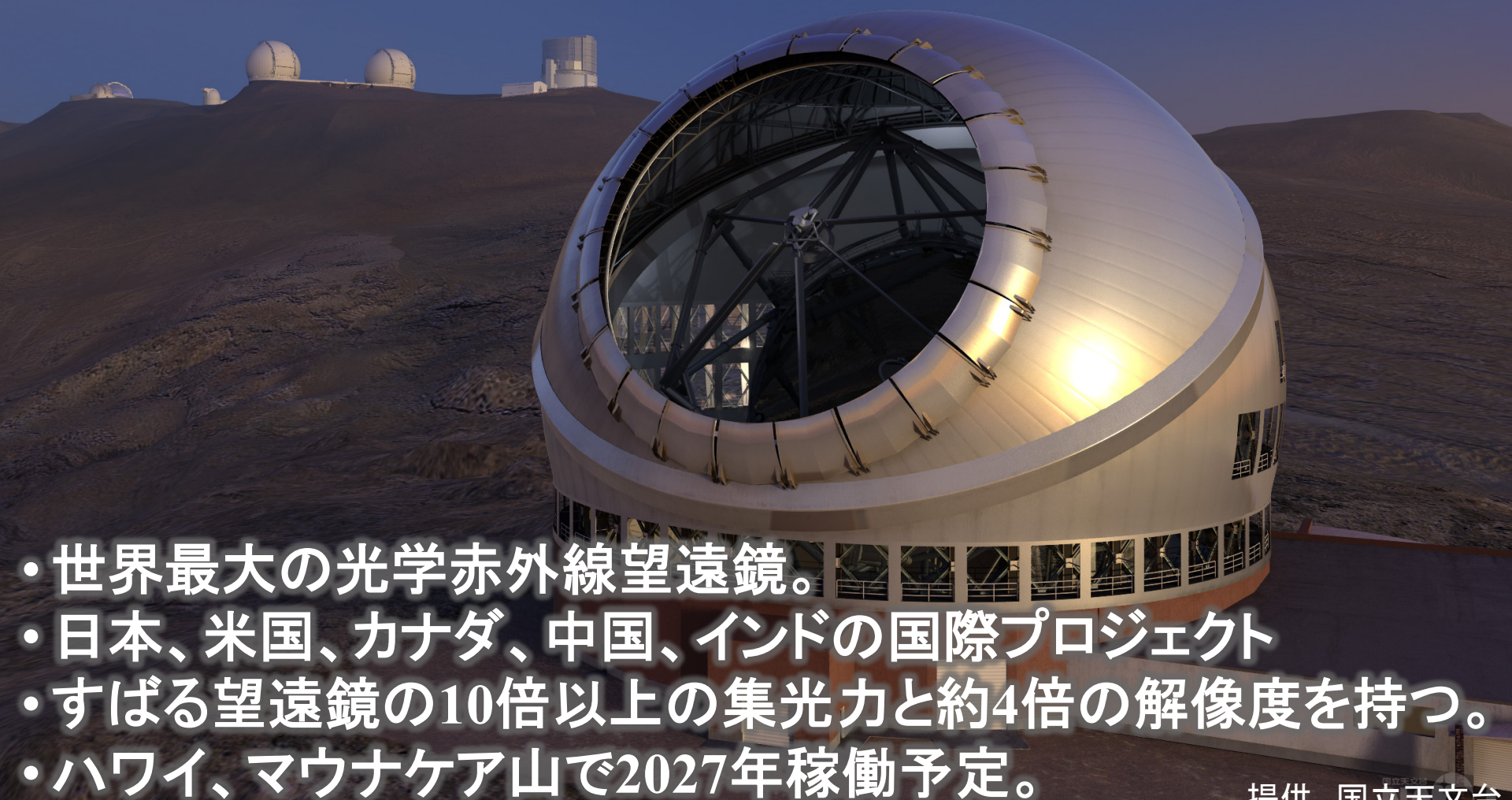
© ESA

PLATO (PLAnetary Transits and Oscillations of stars)
地球型惑星探査
2026年打ち上げ予定



© ESA

30メートル望遠鏡(TMT)



- 世界最大の光学赤外線望遠鏡。
- 日本、米国、カナダ、中国、インドの国際プロジェクト
- すばる望遠鏡の10倍以上の集光力と約4倍の解像度を持つ。
- ハワイ、マウナケア山で2027年稼働予定。

まとめと今後の展望

- 複雑な構造を持つ原始惑星系円盤が多く存在する。
穴、多重リング、渦状腕、非対称構造
- 多様な惑星系が存在する。
- 標準理論では原始惑星系円盤や系外惑星の観測結果を説明できない。
太陽系は標準な惑星系ではないかもしれない。
- 星・惑星形成領域には多くの有機分子が存在する。
宇宙から惑星に取り込まれる可能性が考えられる。
- 次世代の観測装置が計画されている。
太陽近傍の生命居住可能惑星の探査。
生命居住可能惑星の詳細探査、生命根拠の探索。