

CPSセミナー @ 2023.6.1, 神戸大学CPS

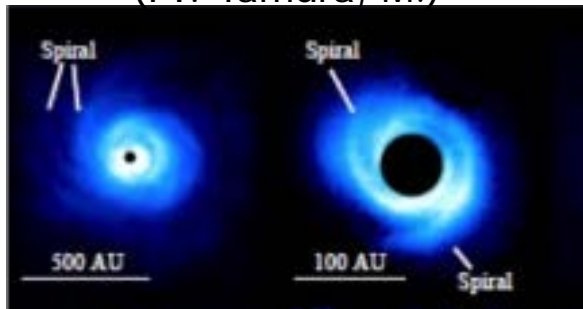
惑星形成の現場を アルマ電波望遠鏡で 探る

野村 英子
(国立天文台 科学研究部)

大型望遠鏡による惑星形成の現場の観測

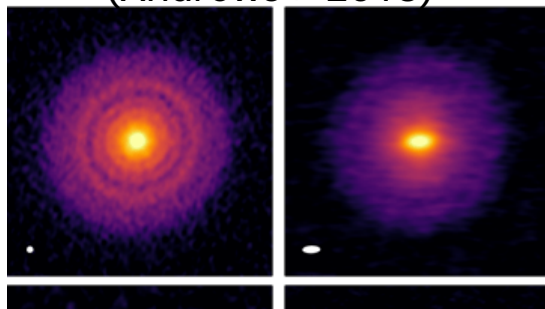
Subaru SSP/SEEDS

(PI: Tamura, M.)



ALMA LP/DSHARP

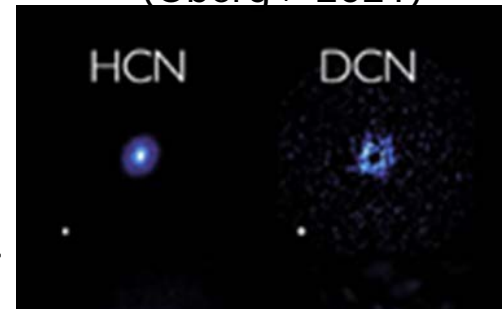
(Andrews+ 2018)



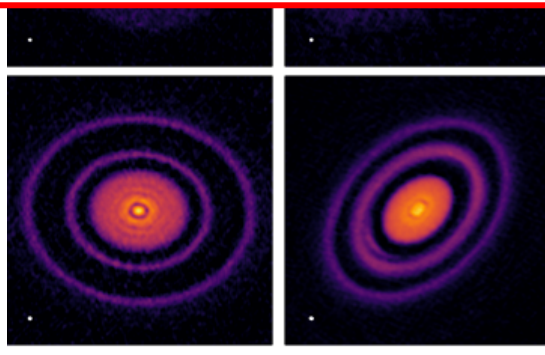
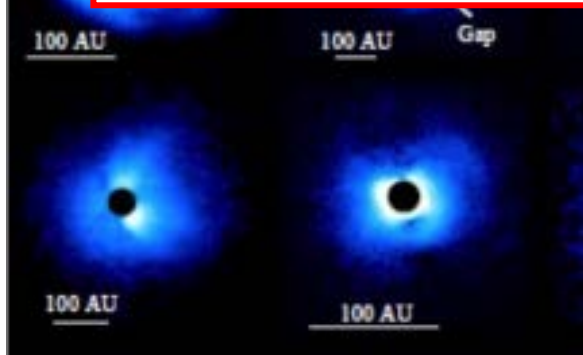
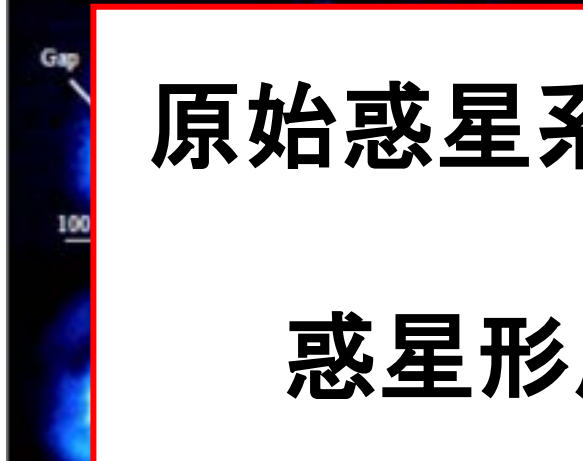
a/lp/DSHARP/

ALMA LP/MAPS

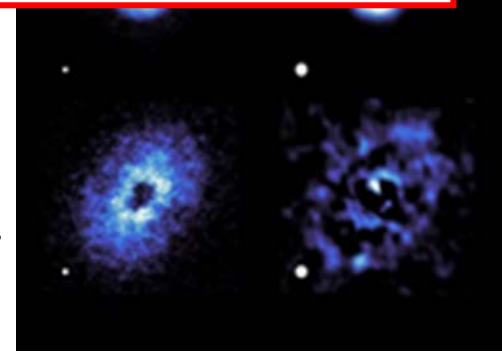
(Oberq+ 2021)



原始惑星系円盤内のダストやガスの
構造を解明！
惑星形成の兆候・物質の分布



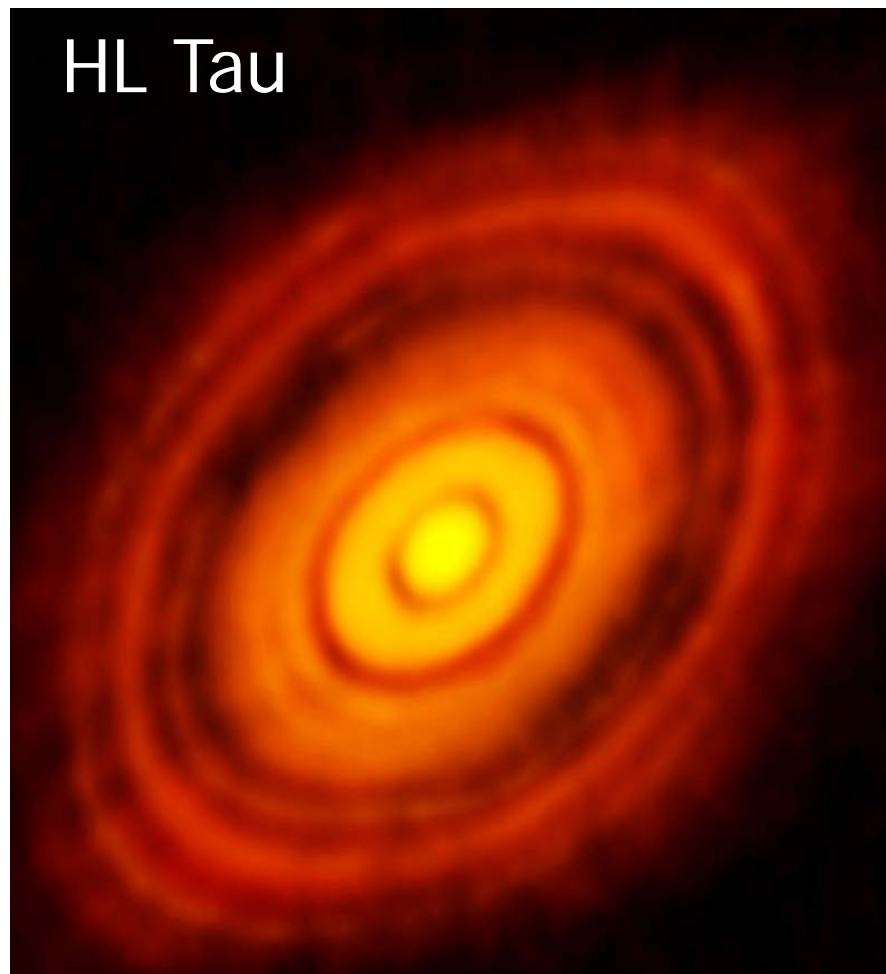
https://almasci



<https://almascience.eso.org/alma-data/lp/MAPS/>

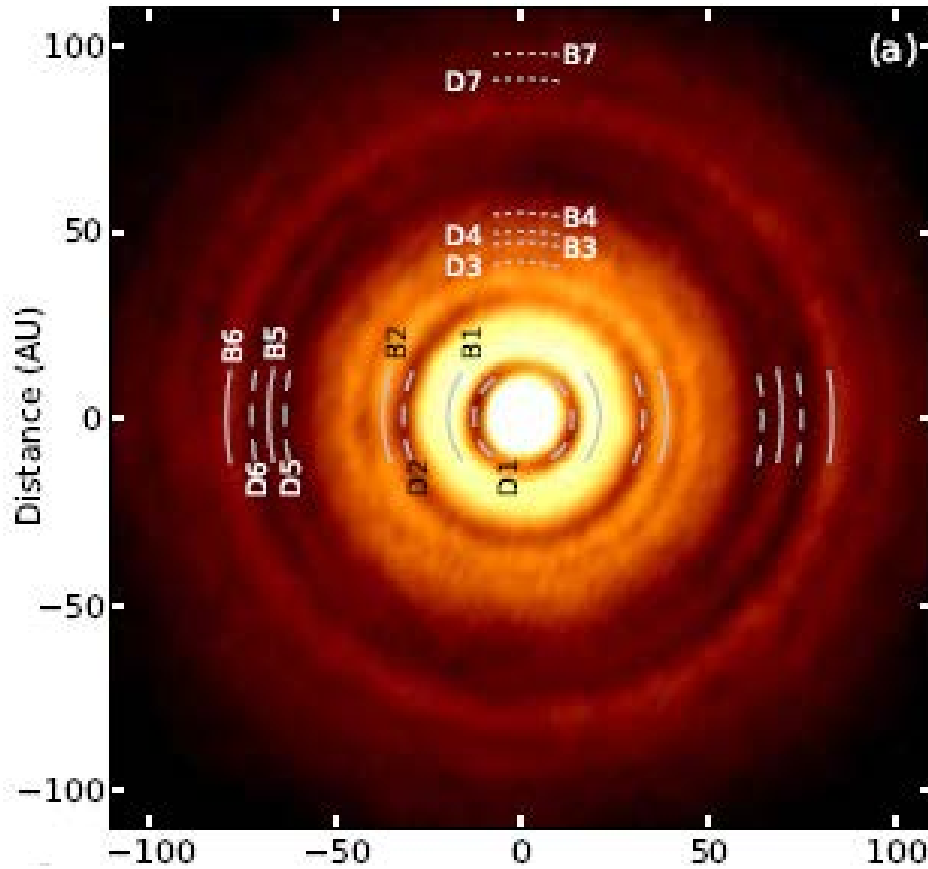
ギャップやリングなどの詳細構造が普遍的に存在する

ALMAにより惑星誕生の現場を探る

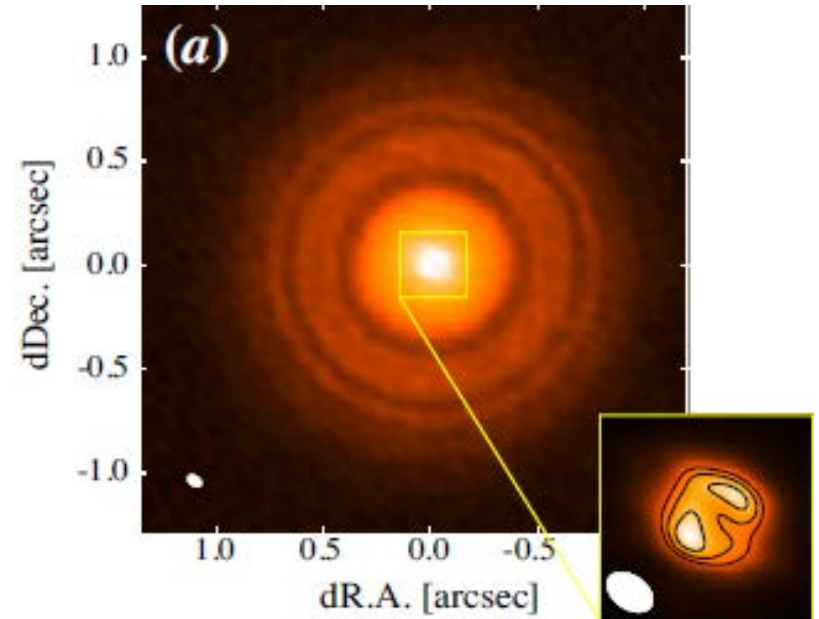


**5AUの空間分解能で原始惑星系円盤を観測！
惑星との重力相互作用の結果、円盤にギャップ形成？
非常に短いタイムスケールで惑星形成が起きた可能性**

HL Tau円盤 vs. TW Hya円盤



(ALMA partnership et al. 2015)



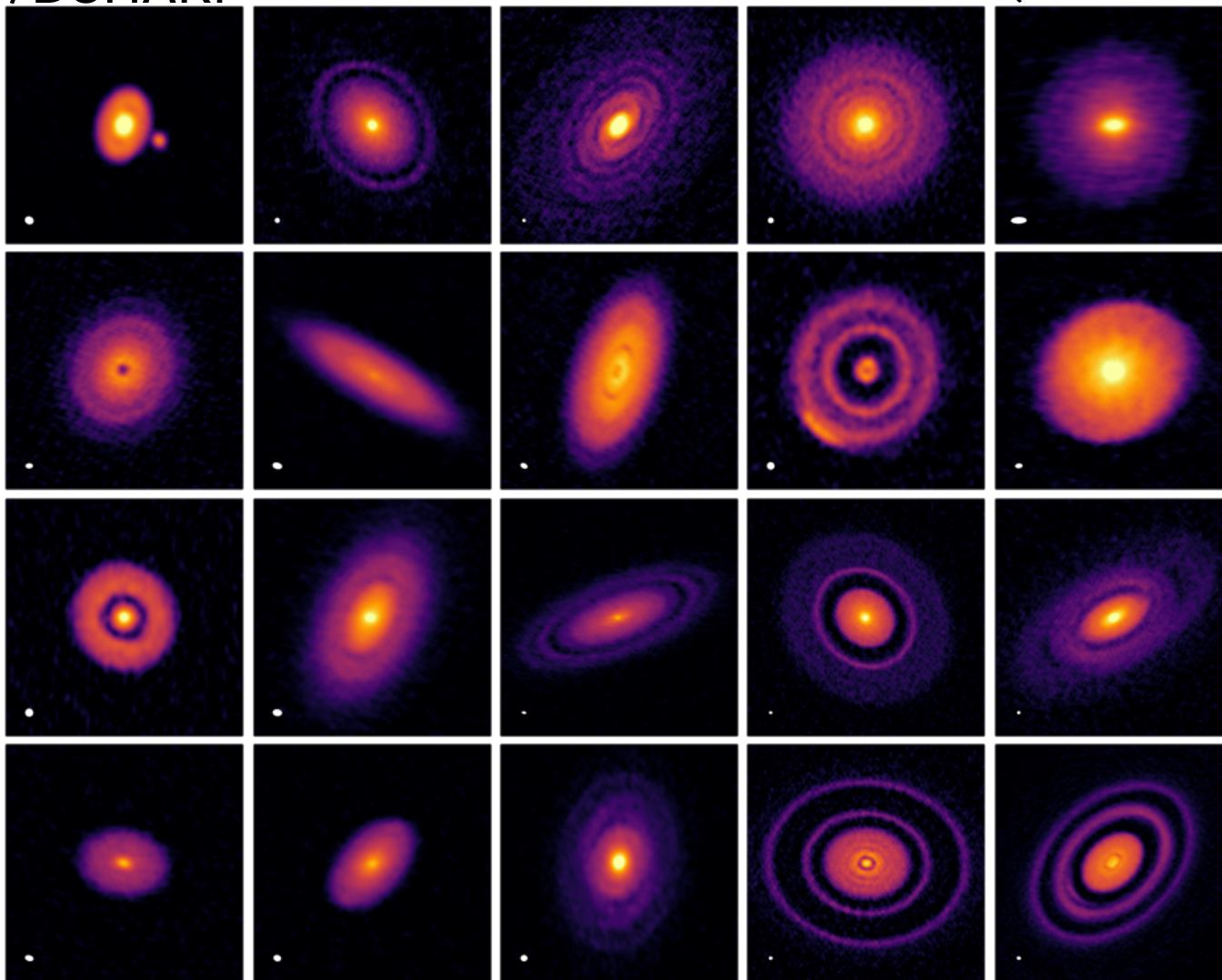
(Andrews et al. 2016,
Tsukagoshi et al. 2016)

年齢が十萬-百萬年のHL Tau円盤と三百萬-千萬年の
TW Hya円盤で類似のギャップ構造が見られた
→円盤内のギャップ構造は普遍的？

多数の円盤の高解像度アルマ観測

ALMA LP/DSHARP

(Andrews et al. 2018)

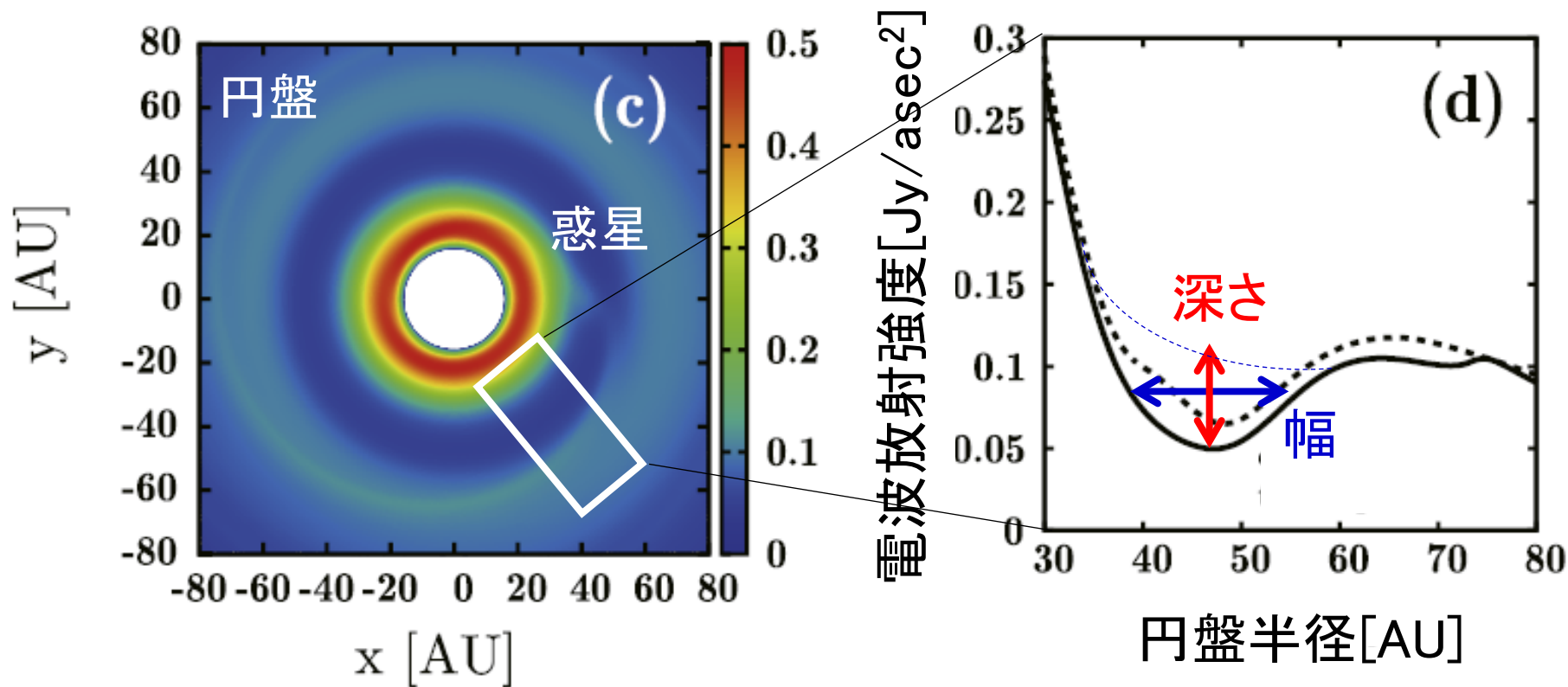


20天体中19天体で「構造」が検出：構造は普遍的
⇔ 惑星形成との関連

惑星による円盤内のギャップ形成

(Kanagawa et al. 2015)

数値流体シミュレーションをもとにギャップ付近の
放射強度分布を予測



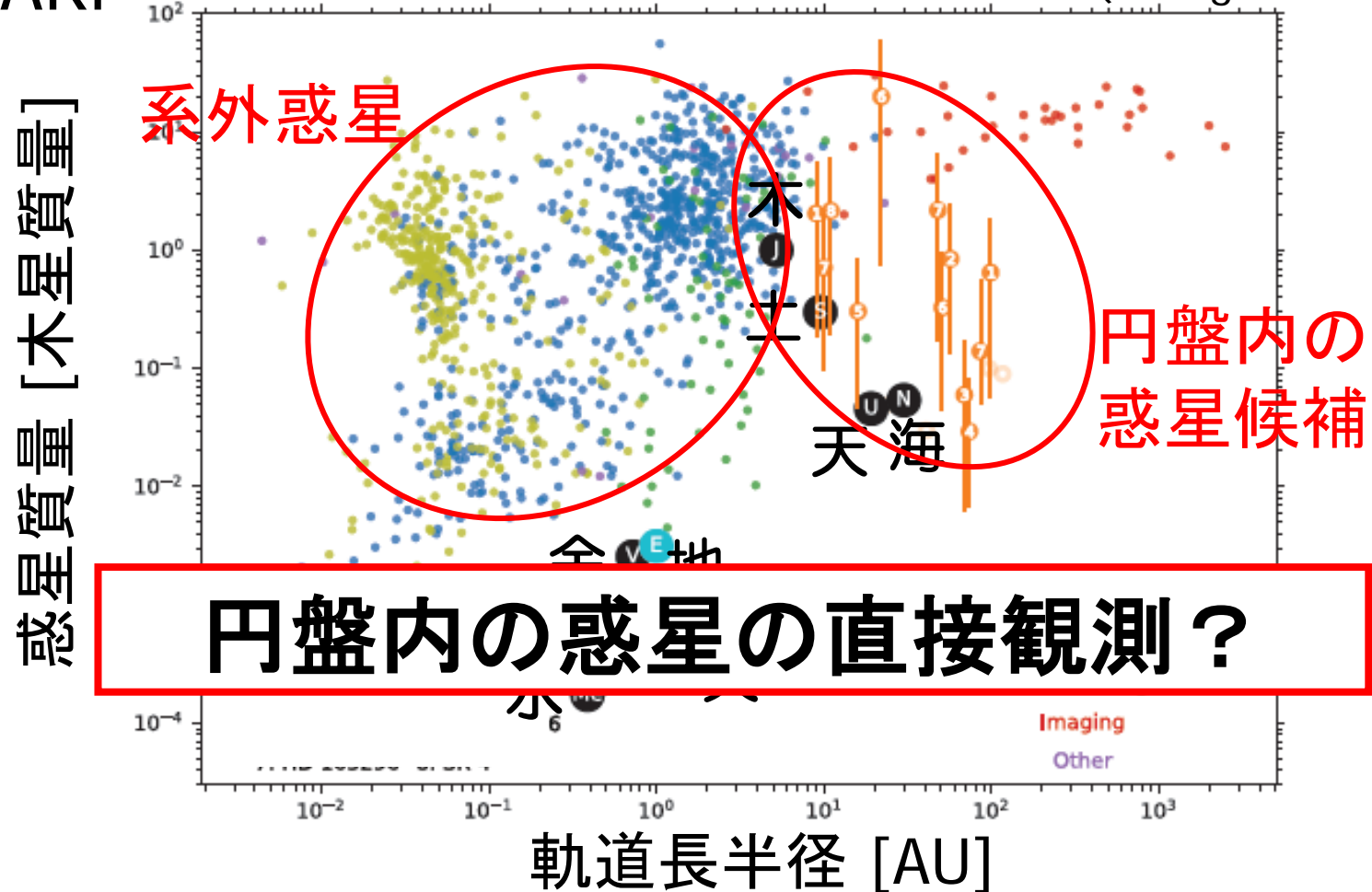
ギャップの幅と深さは惑星質量に依存する

→ ギャップの観測より、円盤内の惑星質量が予測できる

アルマ観測より導かれた惑星候補の分布

DSHARP

(Zhang et al. 2018)



円盤内の惑星の直接観測？

<https://almascience.nao.ac.jp/almadata/lp/DSHARP/>

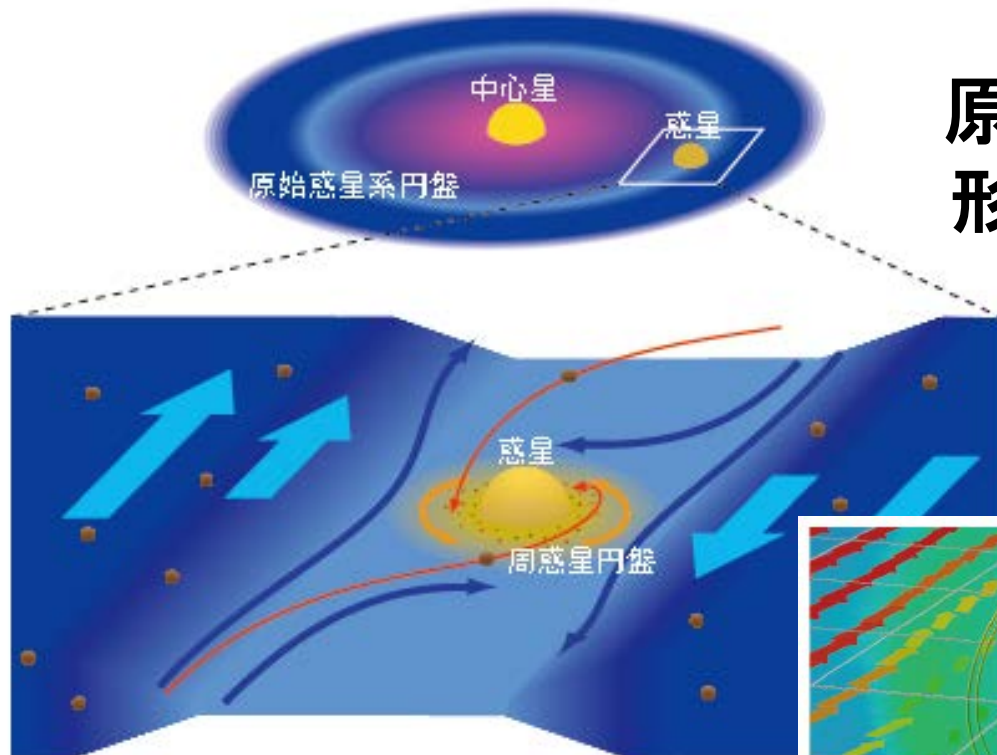
明るい8天体のギャップ構造より惑星質量を見積もる

→系外惑星の発生確率とよい一致

→今後より統計的な比較へ

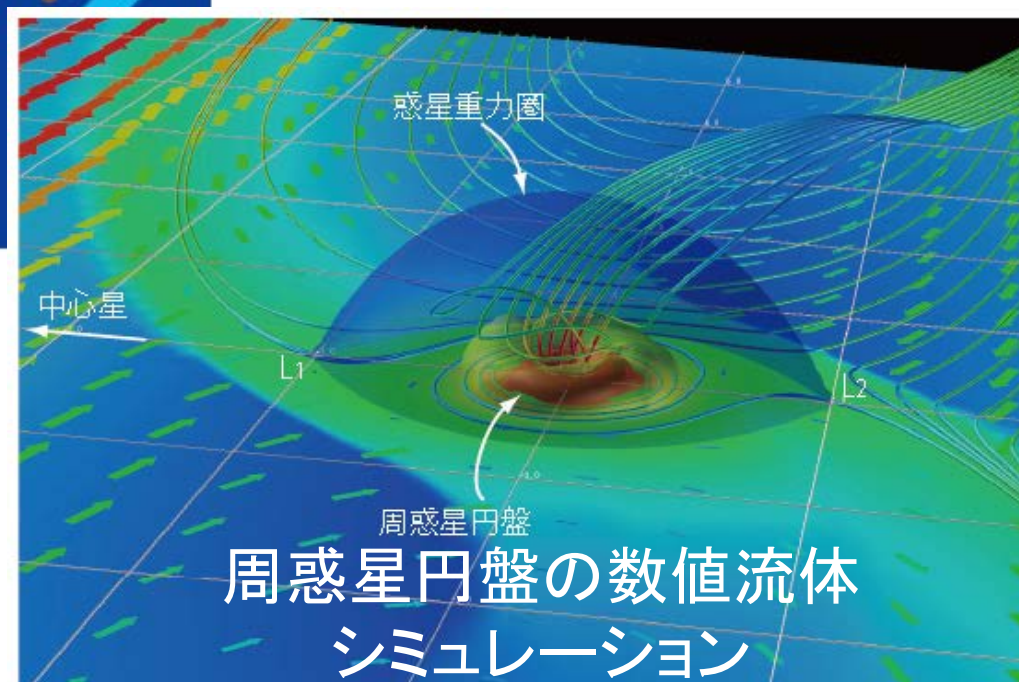
周惑星円盤の形成

谷川, 大槻, 町田 (2011)

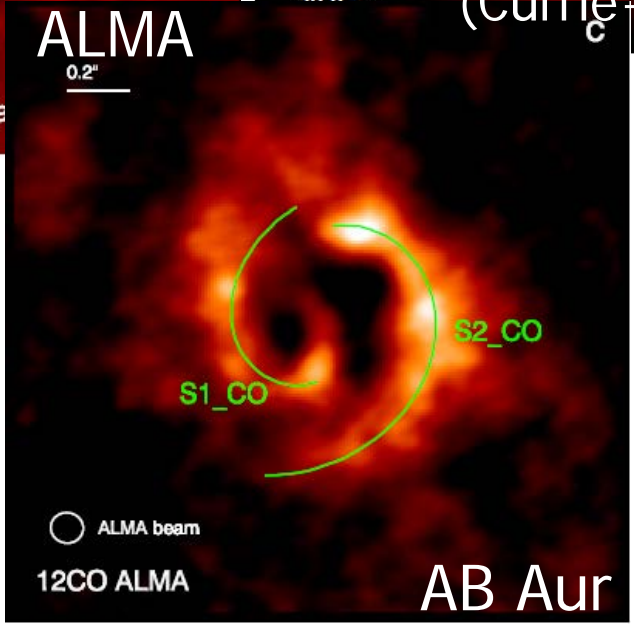
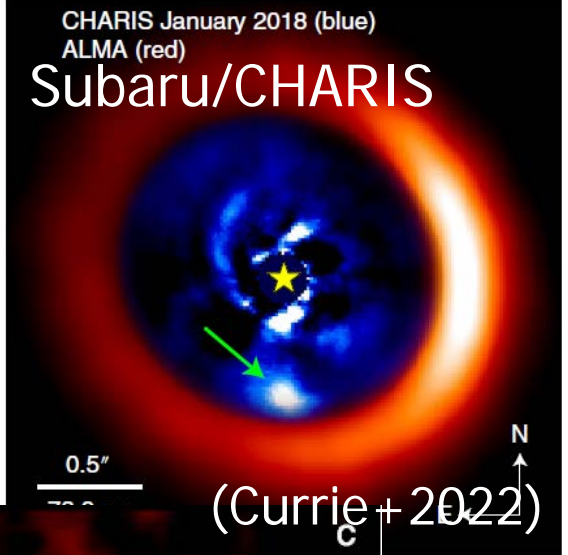
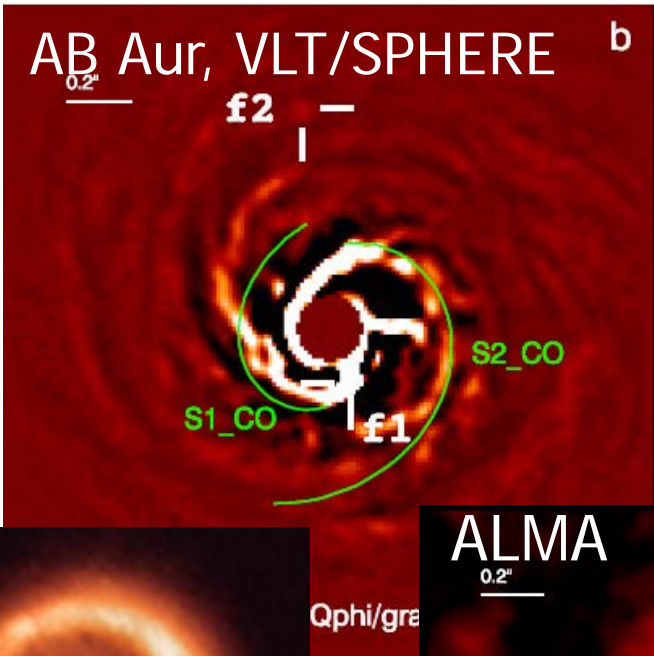
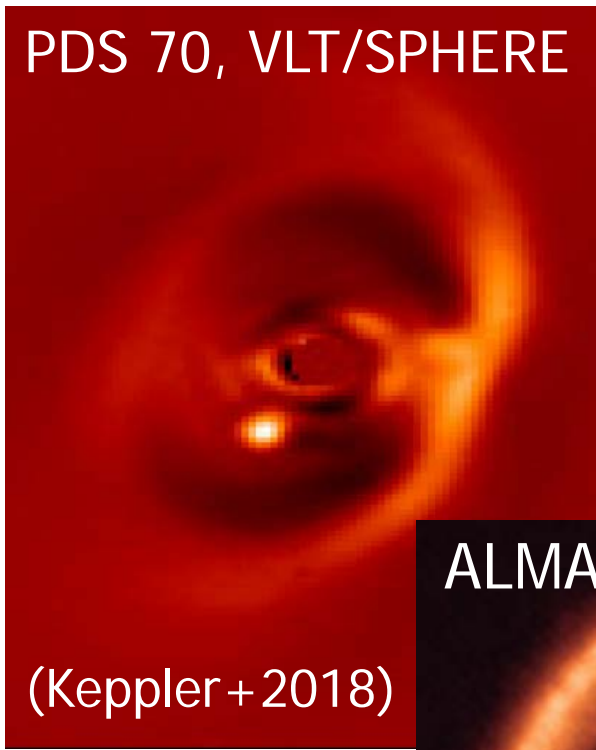


原始惑星系円盤内で惑星が
形成されると、惑星の周りに
円盤(周惑星円盤)が
形成される

周惑星円盤は衛星
形成の現場



原始惑星系円盤内の周惑星円盤の直接観測



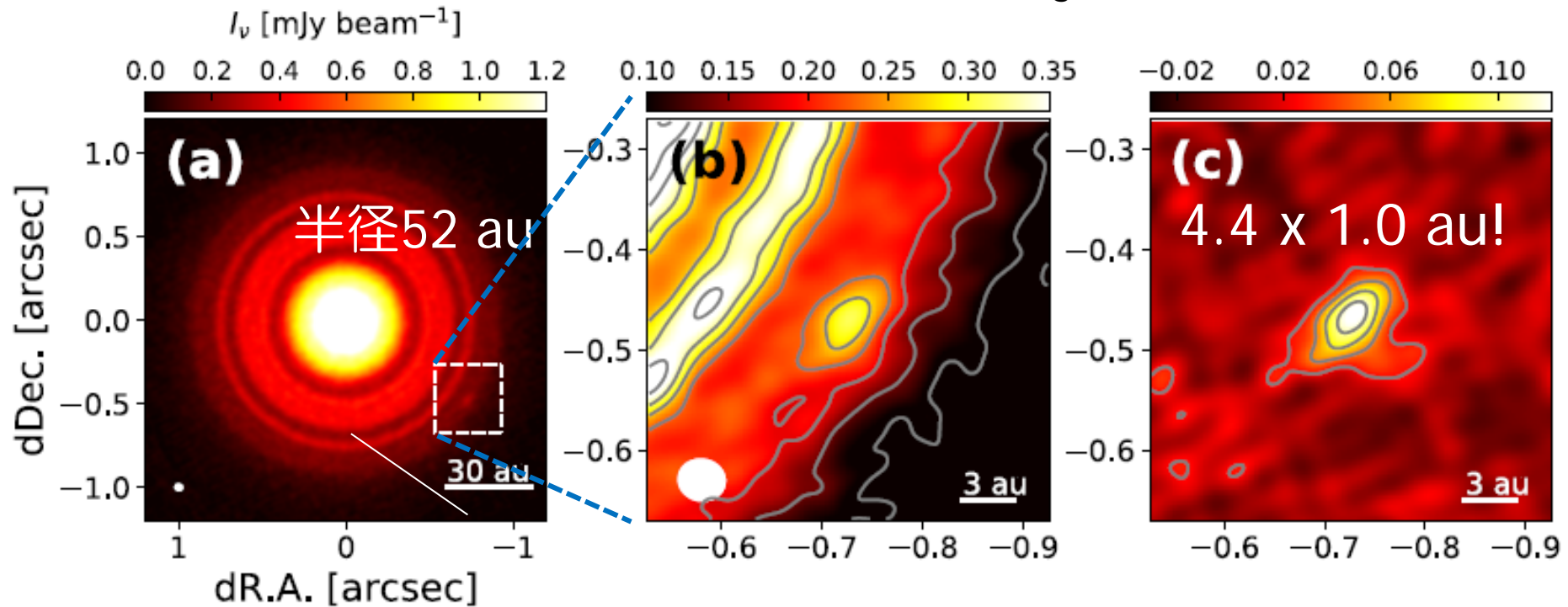
(Isella et al. 2019
Benisty et al. 2021)

(Boccaletti et al. 2020)

今後の観測により、より多くの天体の検出へ

原始惑星系円盤中の点源のアルマ観測

(Tsukagoshi, Muto, HN et al. 2019)



天文単位スケールの電波点源をTW Hya円盤内に検出

海王星質量の惑星の1/3ヒル半径相当 @ $R = 52$ au

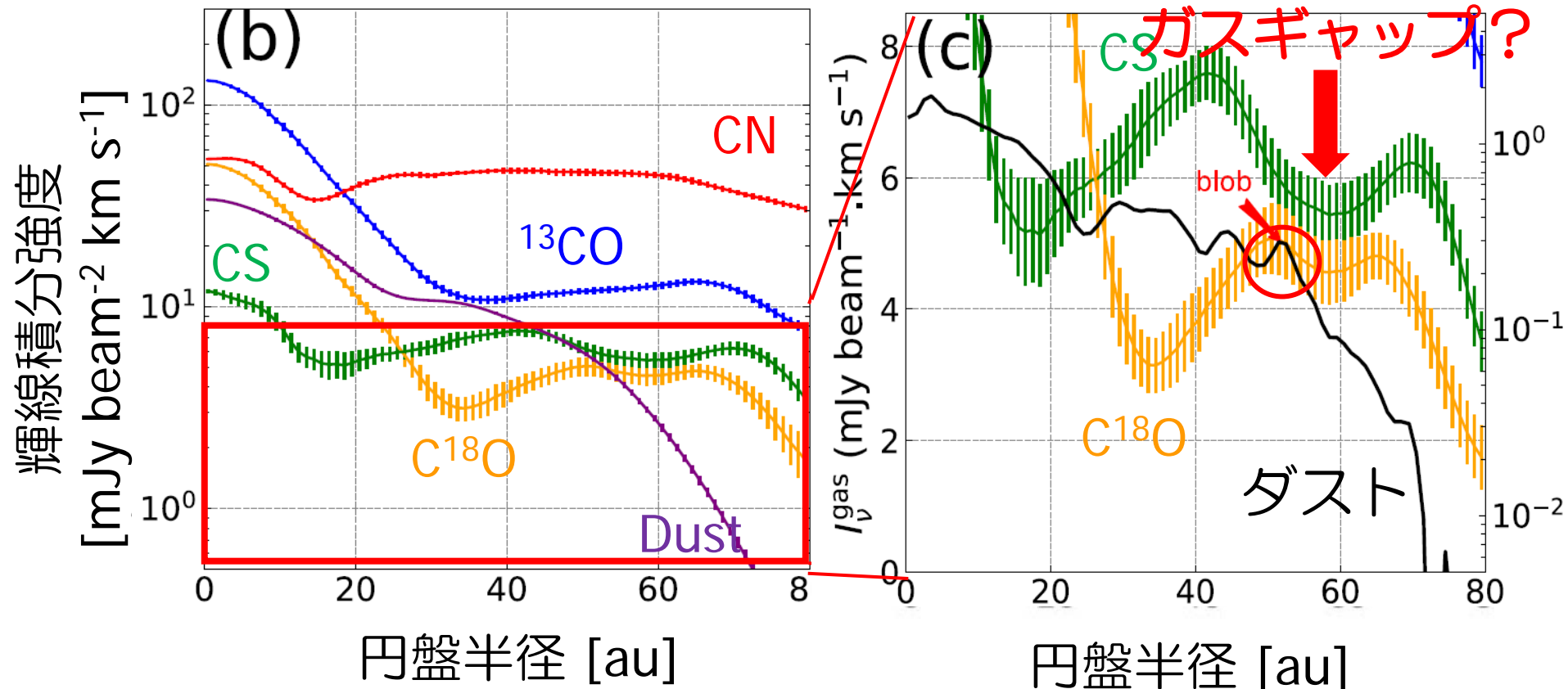
周惑星円盤 vs. 渦でのダスト集積？

→ 今後の光赤外線観測により解明

点源近くのガス・ギャップの検出

観測: 2016.10.6/12.6 & 2018.10.14 (ALMA cycle 4 & 6)

Band 7, 空間分解能: 0.15" ~ 9au



半径52 auで見つかった点源と半径60 au付近の
ガスギャップとの関連?

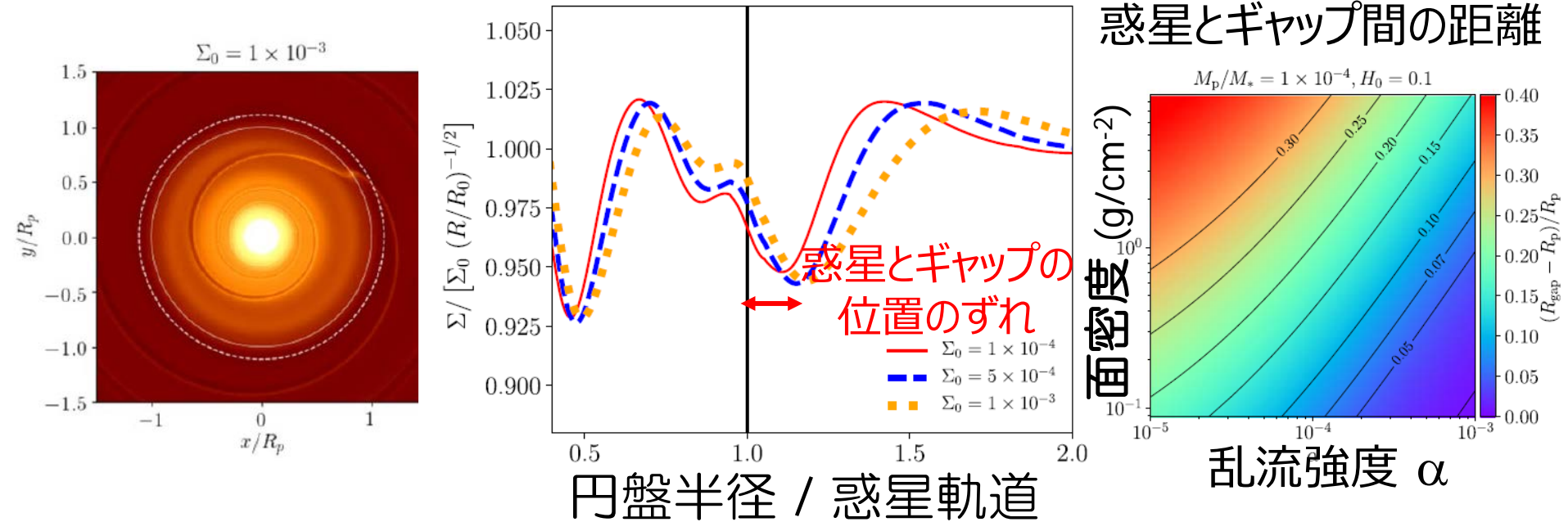
(HN, Tsukagoshi et al. 2021)

惑星起源のガス構造のシミュレーション

(Kanagawa, HN+ 2020)

面密度分布

$$H_0 = 0.07, \alpha = 1 \times 10^{-4}$$



惑星の位置とガス・ギャップの位置のずれは、惑星が中心星方向に移動していると説明できる
ずれの距離から乱流に制限がつく？ $\alpha \sim 10^{-4} - 10^{-3}$

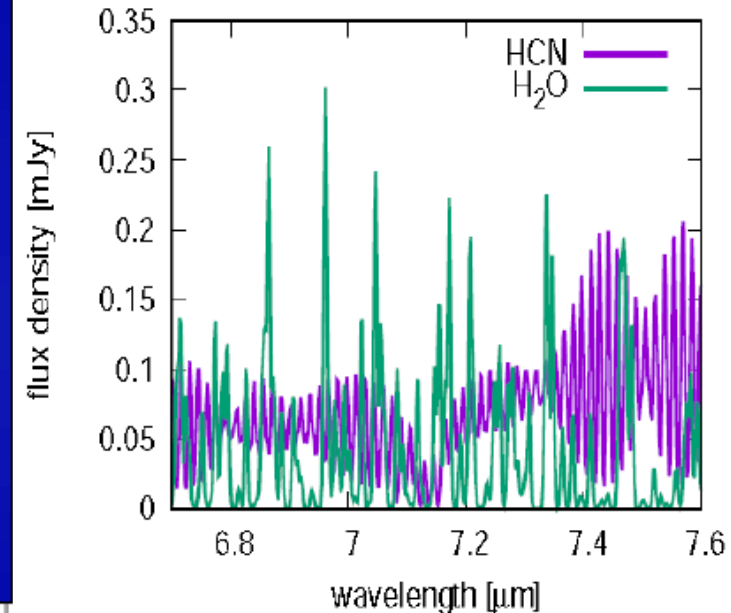
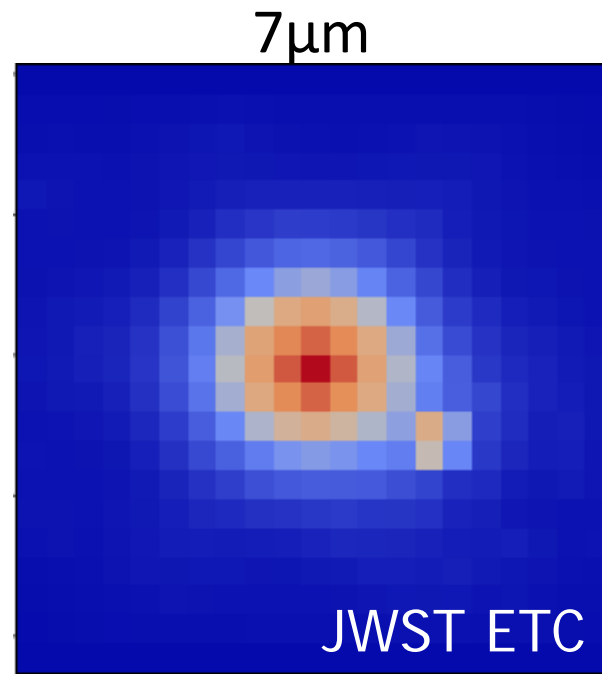
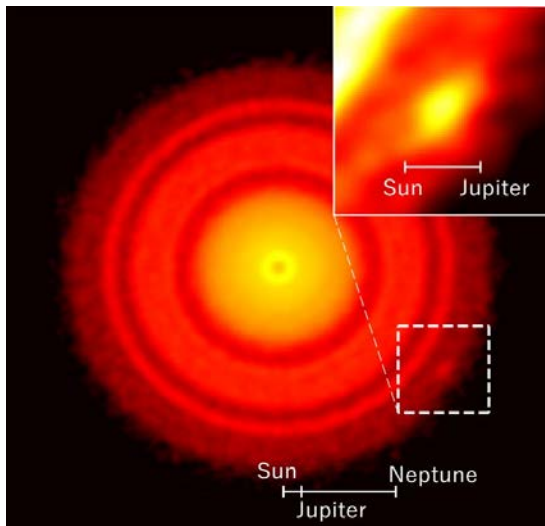
JWSTによる周惑星円盤の観測予測

物理モデル + 化学反応計算
+ 輝線放射輸送計算

(Hu, HN et al., in prep.)

HCN & H₂O @ 7 μ m

(Tsukagoshi et al. 2019)



赤外線観測により、「惑星」の兆候を発見する！
分子輝線で「惑星形成領域」の化学組成に迫る！
→ 系外惑星大気観測へ

ダスト成長: ガス・ダスト間の摩擦力

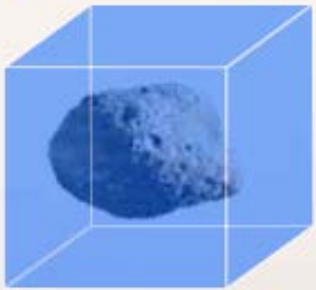
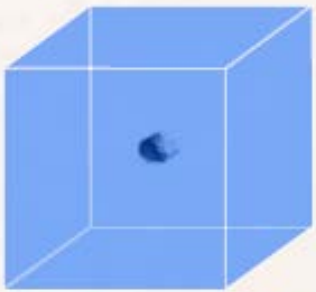
ダストの運動はガス摩擦により制御され、
強いダストサイズ依存性を持つ

a: 固体のサイズ

a: 小 → 摩擦力が強く、
ダストはガスと共に運動する

a: 中 → 固体とガスは異なる
運動をするが、固体の運動は
ガス摩擦力の影響を受ける

a: 大 → ガス摩擦力の影響を
あまり受けない



ダスト成長: ガス・ダスト間の摩擦力

ダストの運動はガス摩擦により制御され、
強いダストサイズ依存性を持つ



a: 固体のサイズ

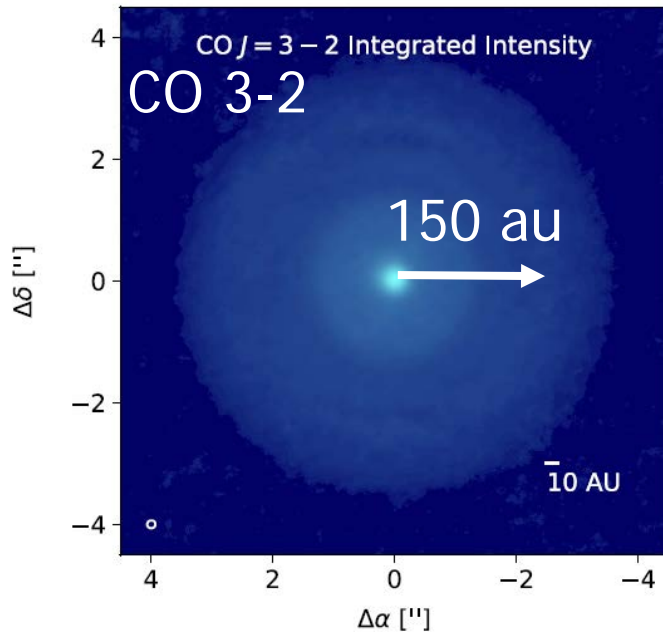
a: 小 → 摩擦力が強く、
ダストはガスと共に運動する

a: 中 → 固体とガスは異なる
運動をするが、固体の運動は
ガス摩擦力の影響を受ける

サイズの異なるダストが
衝突、合体成長する

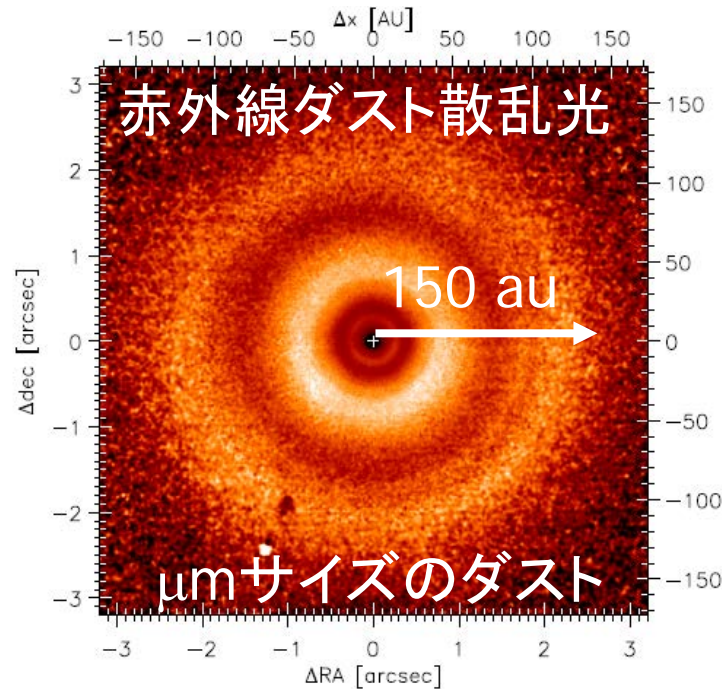
原始惑星系円盤中のダストとガスの分布

ガス



(Huang+ 2018)

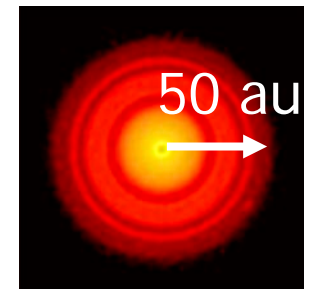
小さいダスト



(van Boeckle+ 2017)

大きいダスト

ミリ波の
ダスト放射



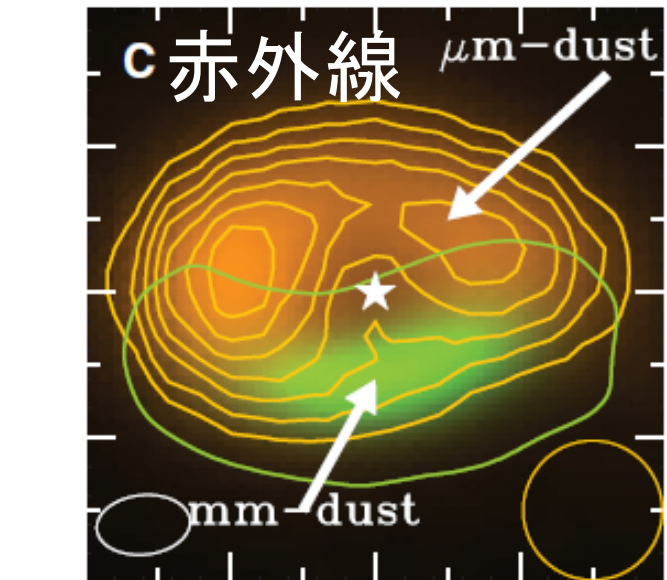
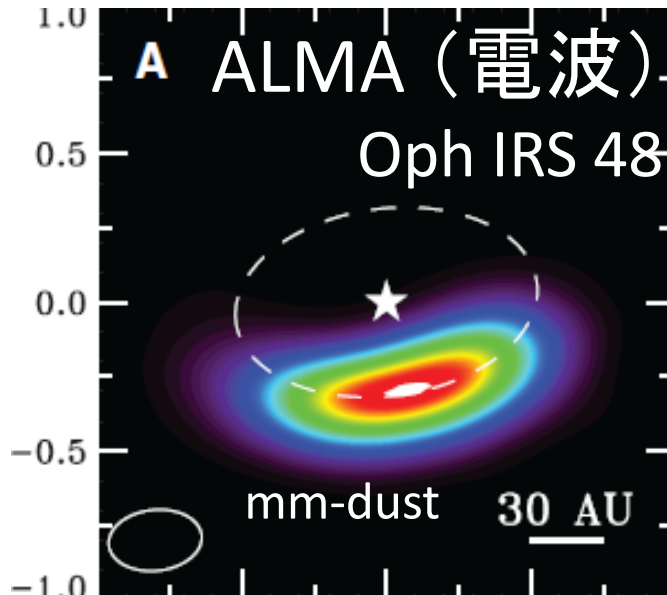
mmサイズの
ダスト

(Tsukagoshi+ 2019)

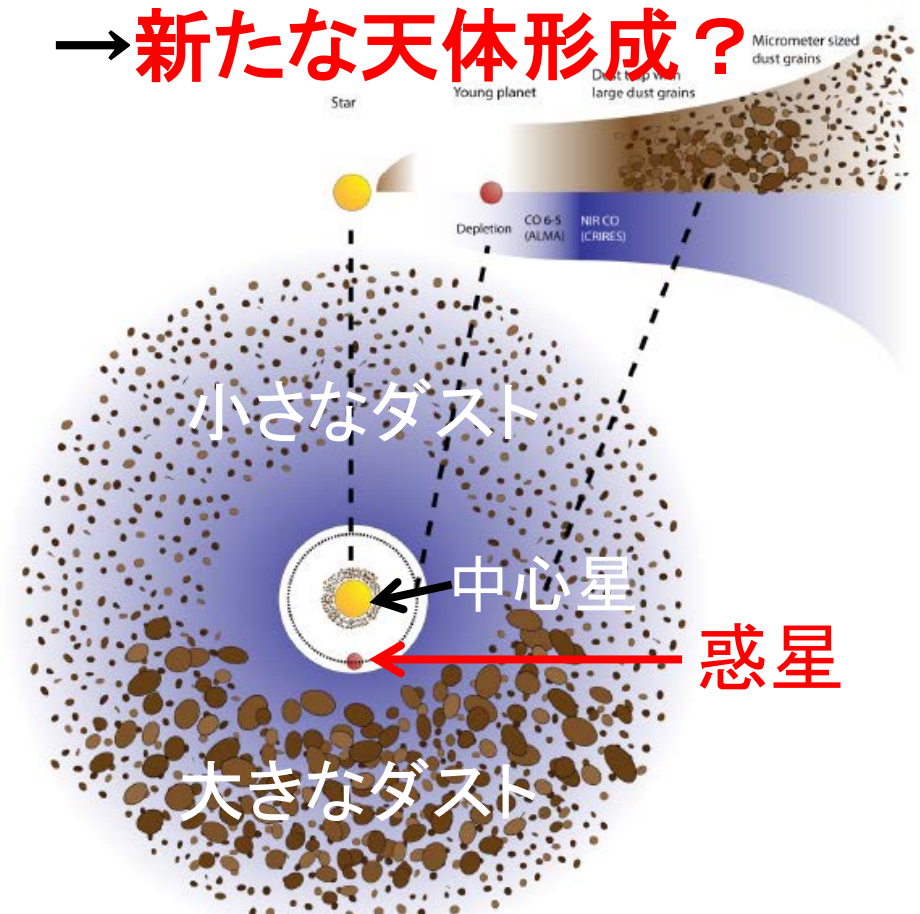
円盤中のガス、小さいダスト、大きいダストの分布が異なる→中心星方向へのドリフトの結果？

⇔ 惑星形成の第一段階

円盤中のダスト分布の大きな偏り

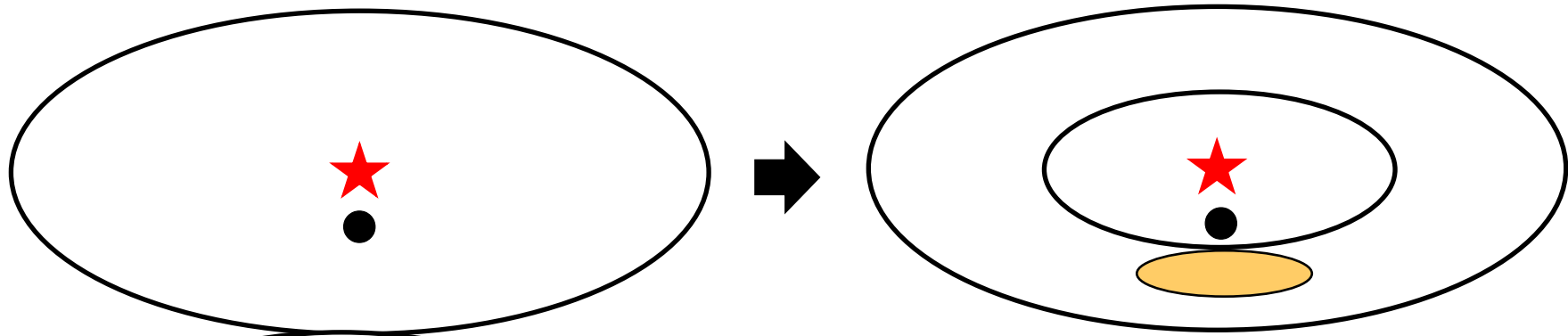


惑星との重力相互作用の結果、
大きなダストが円盤の片側に
偏って分布した
→ **新たな天体形成?**

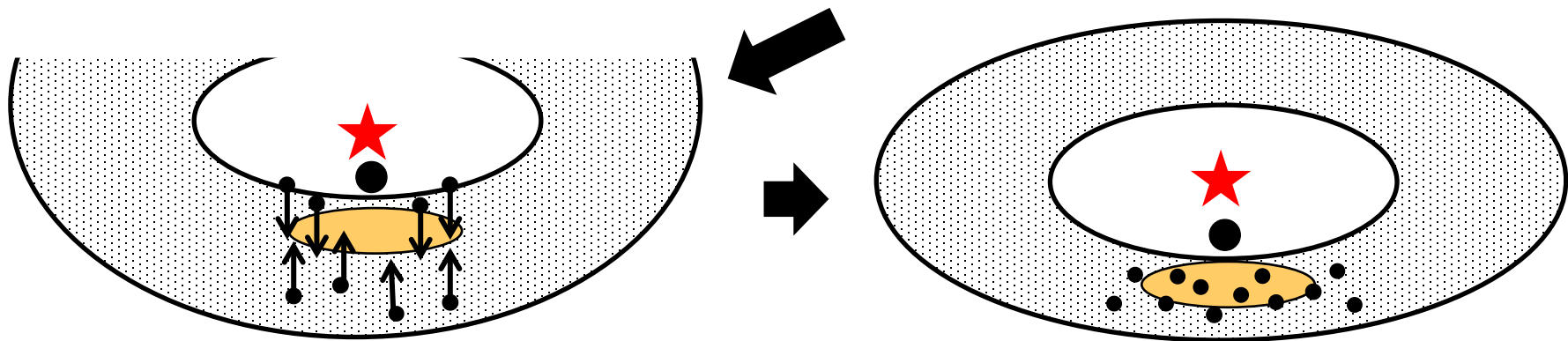


(van der Marel et al. 2013)

ダスト分布の偏りの生成過程



惑星形成に伴い円盤内にギャップと圧力バンプが生じる



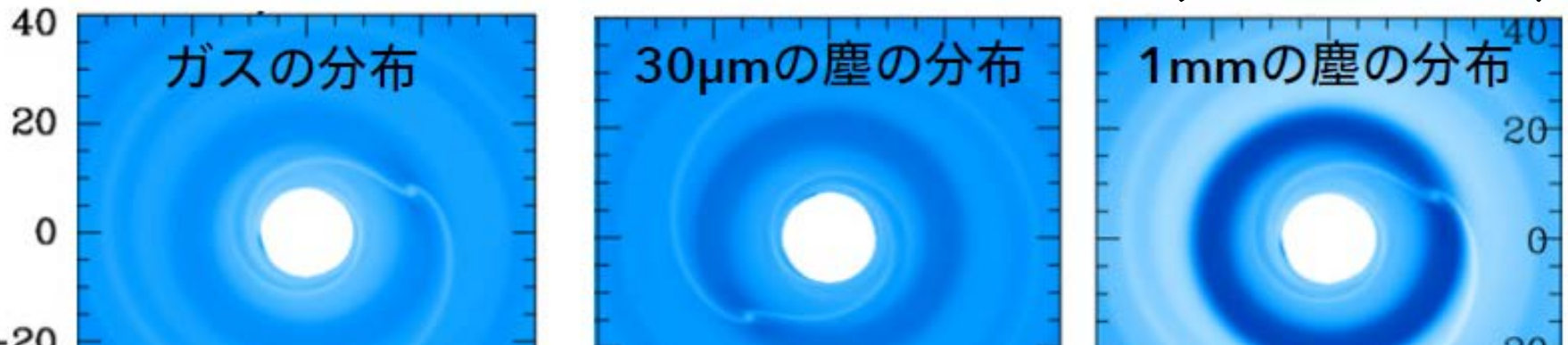
大きなダストは圧力バンプの中心方向に移動
(小さいダストは移動せず)

大きなダストがたまる

円盤内のダストの運動

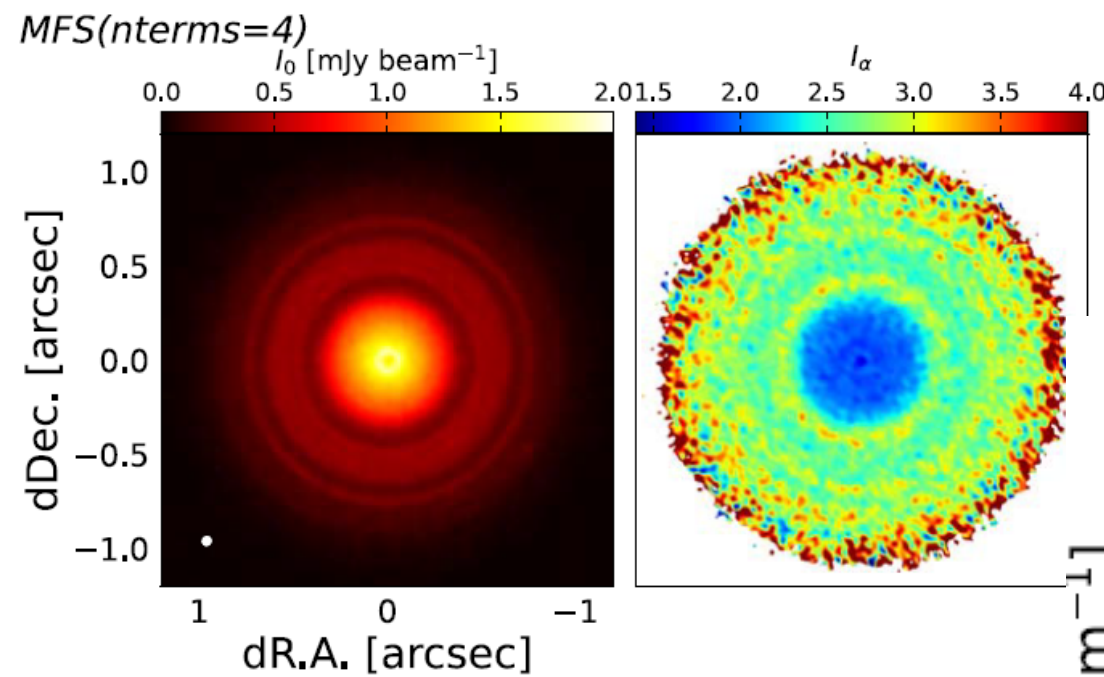
惑星によりガスギャップができると、
ダストはガスギャップの両側に移動
移動の度合いはダストのサイズに依存

(Zhu et al. 2012)



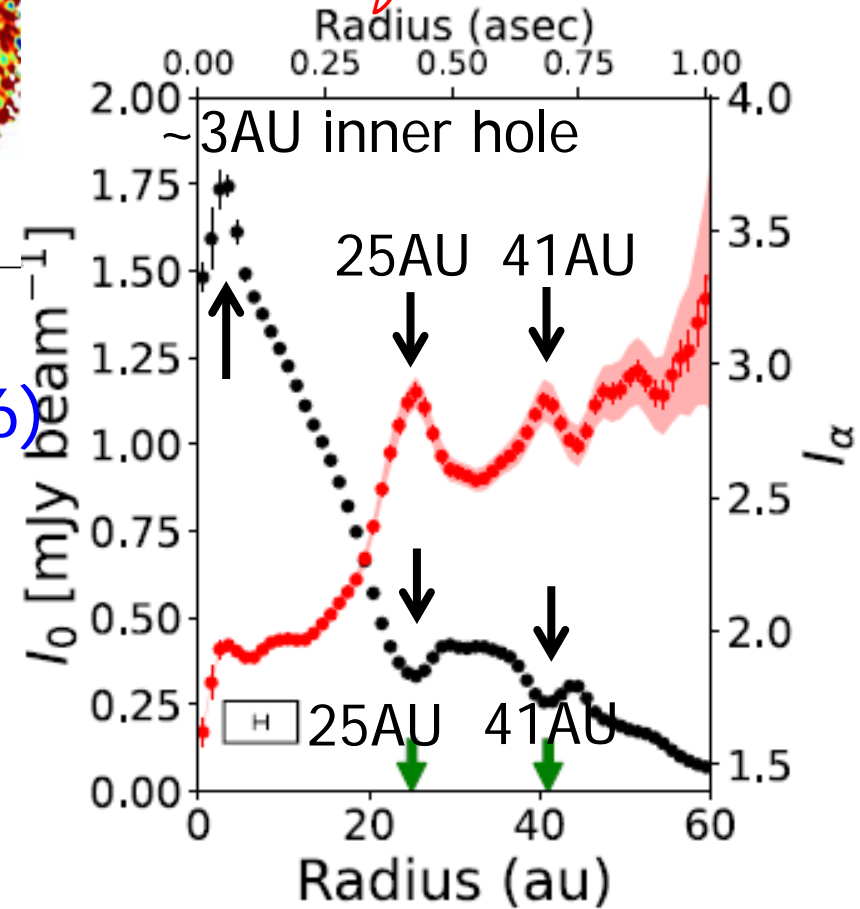
ギャップ付近のダストの大きさを測れば、
ダストの移動を観測的に検証できる？

TW Hya円盤ダストの高空間分解能観測



ダストの光学的厚さ
ダスト吸収係数の
振動数依存性の冪

$$\kappa_{\nu} \propto \nu^{\beta}$$



ALMA cycle 3 DDT B4 & B6 (2016)

ALMA Bands 3-7 (2022)

25AUギャップで β : 大
すなわち、大きなダストが減少
→ガスギャップの存在を示唆
→惑星起源を示唆

(海王星よりやや重い惑星で説明可) Tsukagoshi, HN et al. 2016, 2022)

原始惑星系円盤からのガス輝線の観測

紫外線 H₂ Lyman-Werner band transitions

ミリ波・サブミリ波
CO, ¹³CO, C¹⁸O, C¹⁷O, ¹³C¹⁸O, ¹³C¹⁷O, HCO⁺, H¹³CO⁺, DCO⁺, HC¹⁸O⁺, [CI], C₂H, C₂D, c-C₃H₂

可視光 [OI] 6300A

H₂CO, HCOOH, CH₃OH, CH₃OCH₃, CH₃OCHO, HCN, H¹³CN, DCN, HC¹⁵N, HNC, CN, C¹⁵N, N₂H⁺, N₂D⁺, NO, HC₃N, CH₃CN, CH₂CN, CS, C³⁴S, ¹³CS, H₂S, SO, SO₂, H₂CS, etc.

近赤外線

H₂ v=1-0 S(1), S(0), CO Δv=2, Δv=1,

H₂O, OH, HCN, C₂H₂, CH₄

中間赤外線

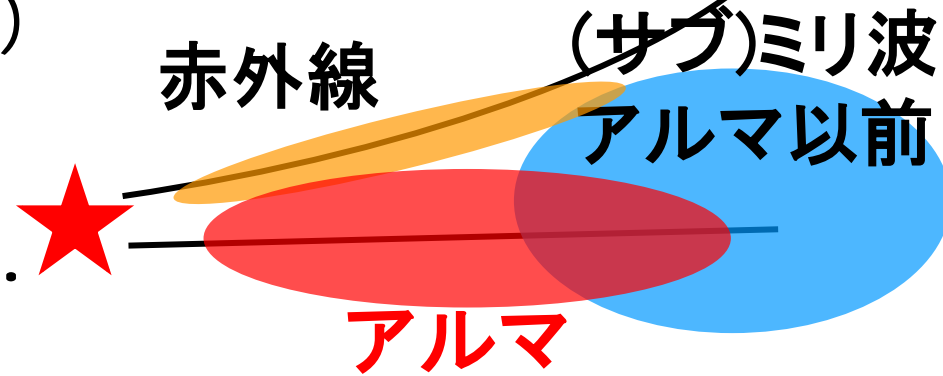
H₂ v=0-0 S(1), S(2), S(4)

H₂O, OH, HCN, C₂H₂, CO₂, ¹³CO₂, (Spitzer Space Telescope, JWST)

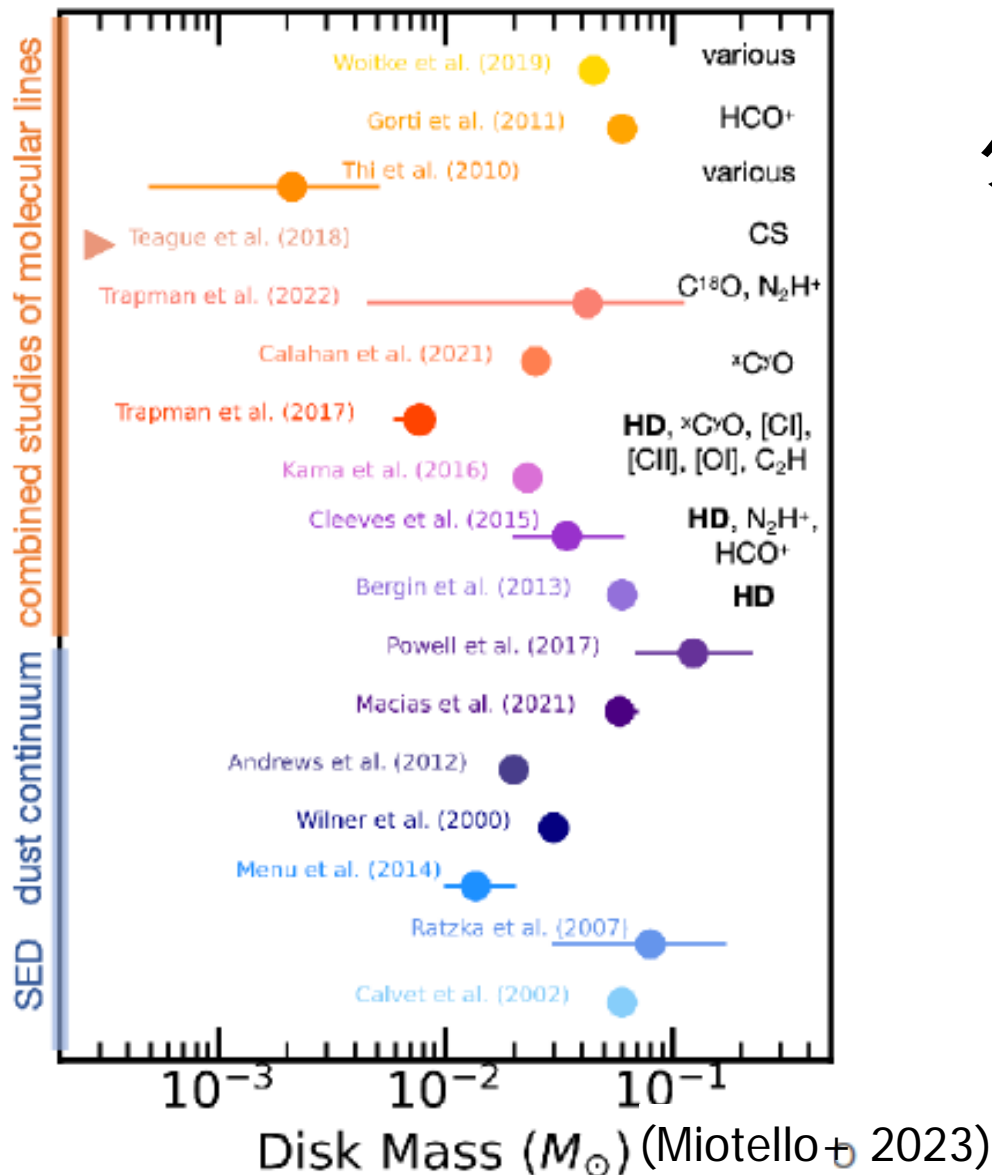
遠赤外線

[OI] 63um, 145um, CO, H₂O, CH⁺, HD, NH₃, etc.

(Herschel Space Observatory)



円盤ガス質量の測定は非常に難しい



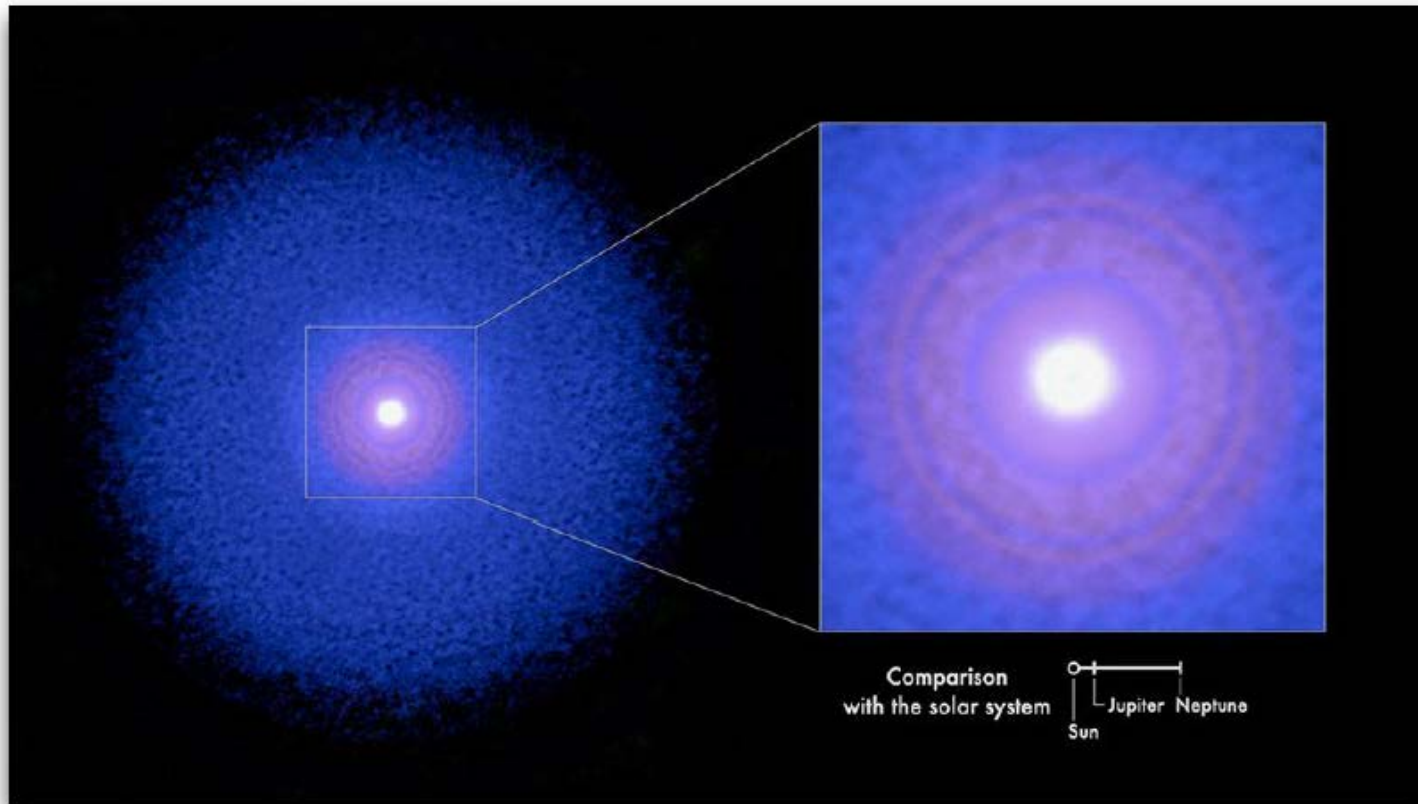
ダスト・ガス比 \neq 一様
→ ダスト放射: ×

CO/H₂比 \neq 一様
→ CO放射: ×

HD輝線
温度依存性: 大
(現在観測装置なし)

これまでのガス質量の観測値は、大きな不定性を伴う

円盤ガス質量の観測: TW Hya 円盤



Credit: T.Yoshida, T.Tsukagoshi et al. –ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)

- 太陽系に最も近い原始惑星系円盤 ($d \sim 60$ pc)
- 比較的年老いている (3–10 Myr)
- Face-on ($i \sim 5.8$ deg) (Teague+ 2019)

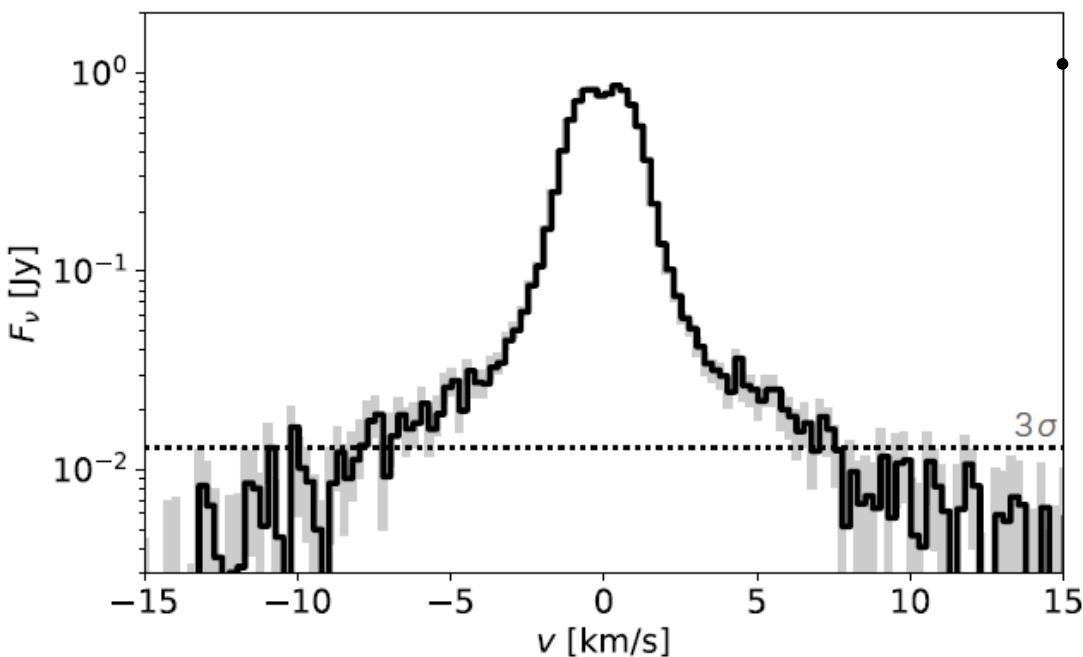
幅広いライン・ウイングの発見

ALMAアーカイブデータを合成:積分時間の合計:10.4 hrs

#2015.1.00686.S,2016.1.00629.S,2018.1.00980.S

12CO J=3-2

spectrum taken in 0".2 aperture from the star



• Broad line wings: ~ 10 km/s

(Yoshida, HN+ 2022b)

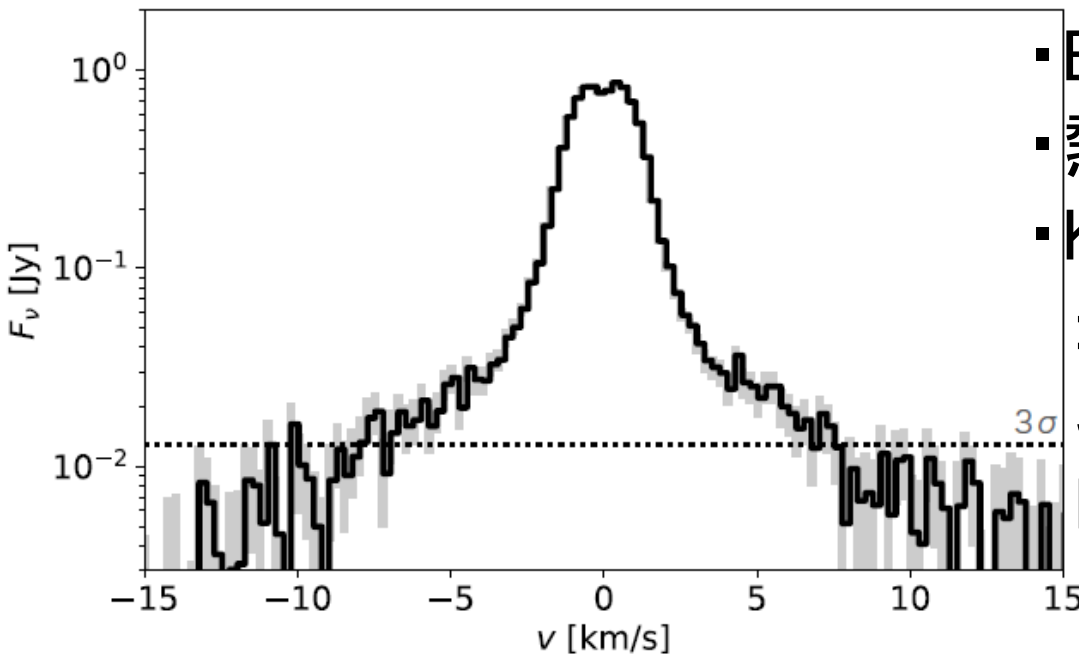
幅広いライン・ウイングの発見

ALMAアーカイブデータを合成:積分時間の合計:10.4 hrs

#2015.1.00686.S,2016.1.00629.S,2018.1.00980.S

12CO J=3-2

spectrum taken in 0".2 aperture from the star



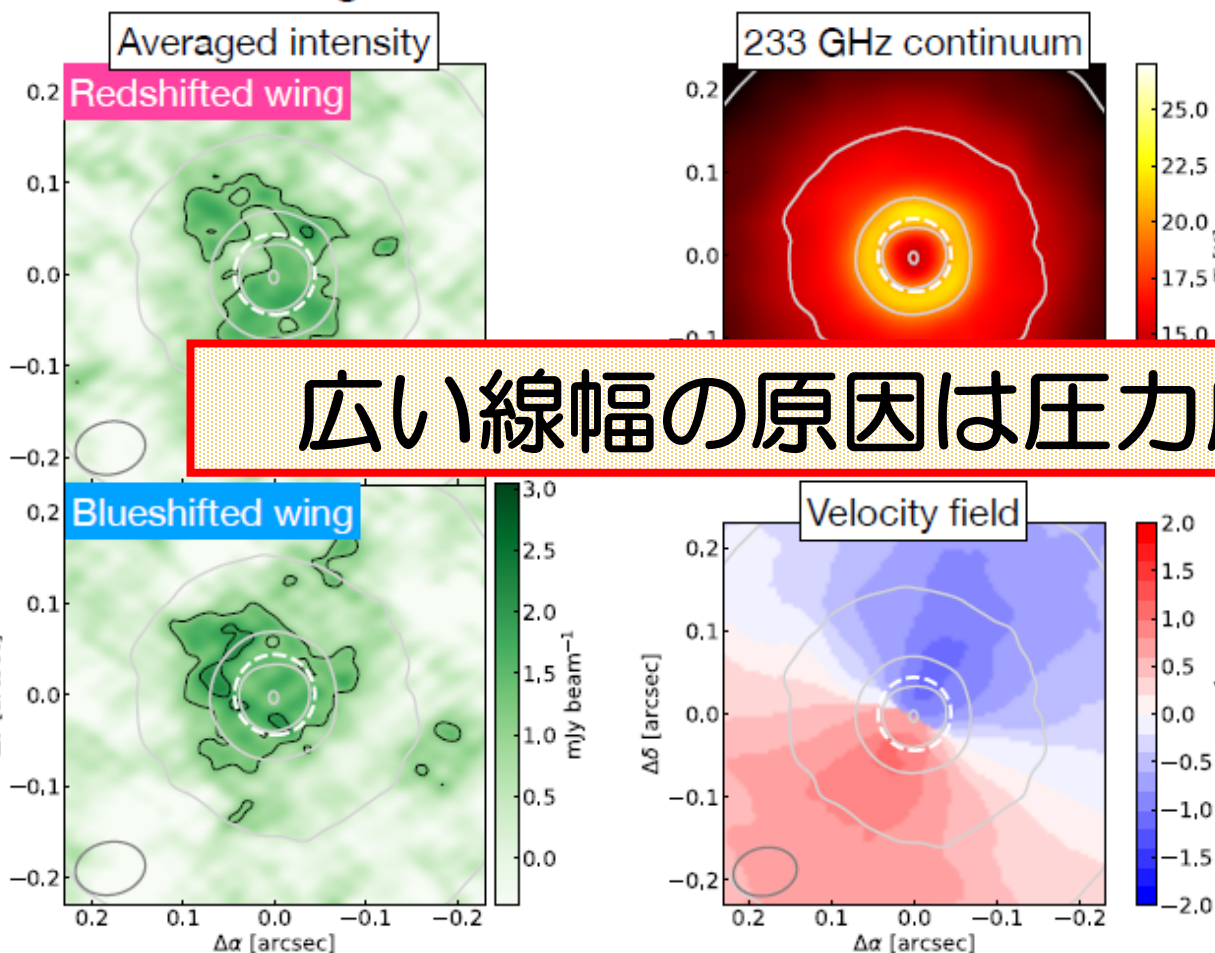
- Broad line wings: ~ 10 km/s
- 熱的線幅では説明不可
- Kepler回転で説明?
: TW Hya: $i=5.8$ deg
5 km/s の線幅は $r=0.3$ au の
Kepler回転に相当

輝線は $r=0.3$ au で
放射されているのか?

(Yoshida, HN+ 2022b)

ライン・ウィングの放射領域はR~5 au

- $4 < |v| < 9$ km/s を平均したビジビリティ → イメージング
- 放射は空間的に0".1程度（キャビティの外）まで広がっている



過去の研究で提案されたシナリオ (~ 2km/s)
1) 高温ガス? → 10^5 K?
2) ... 回転?

広い線幅の原因は圧力広がり!

→ 速度構造はケプラー
4) 円盤風?
→ ダスト連続波が光学的に厚いのと非整合

(Yoshida+ 2022a)

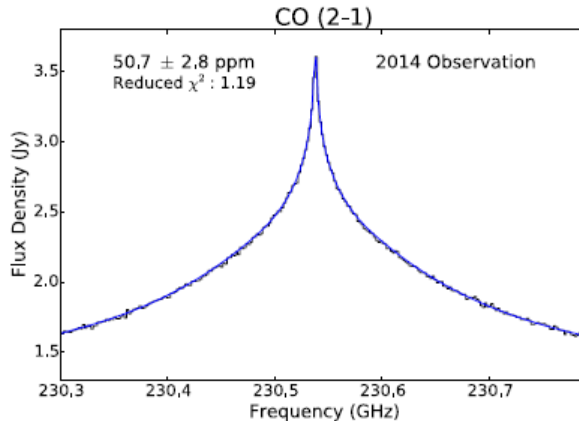
→ いずれも棄却された

太陽系内天体(タイタン)での観測例

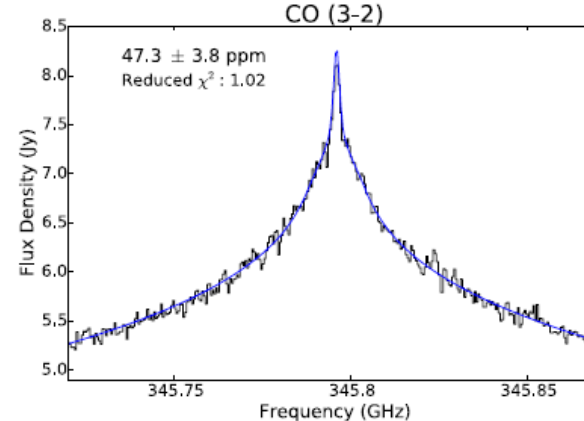
タイタン大気のALMA観測

(Serigano+ 2016, Molter+ 2016)

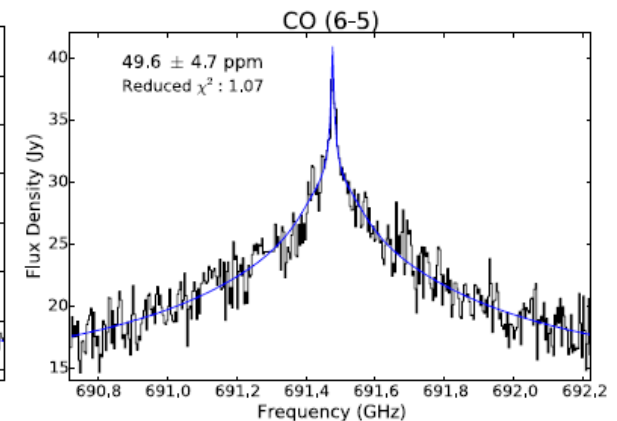
CO 2-1



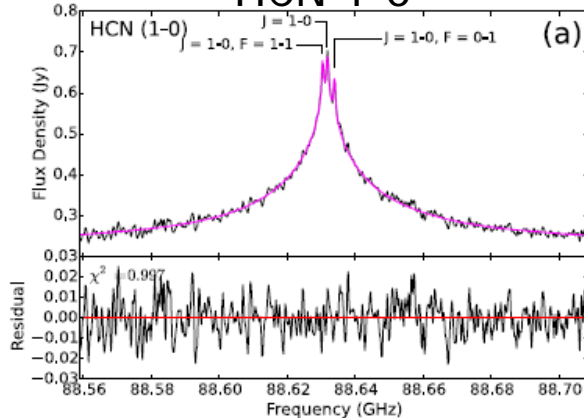
CO 3-2



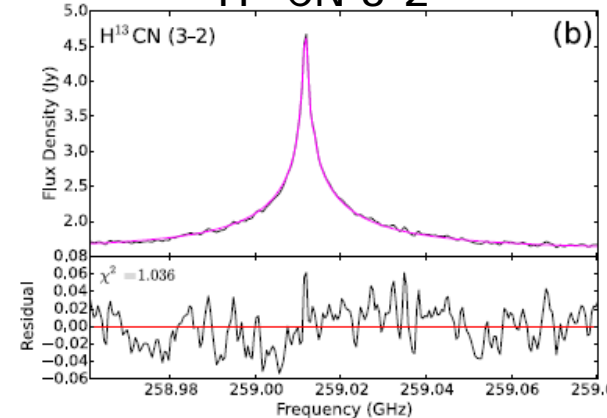
CO 6-5



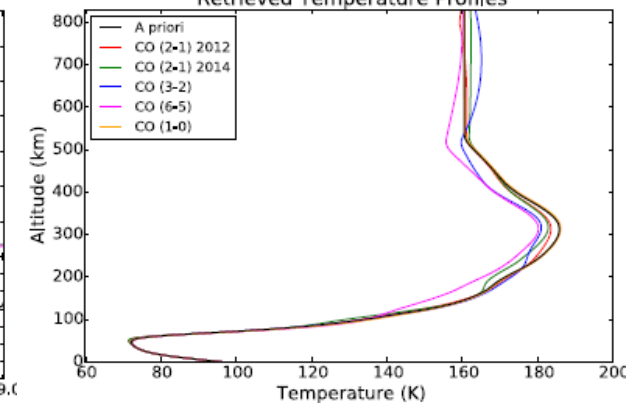
HCN 1-0



H¹³CN 3-2

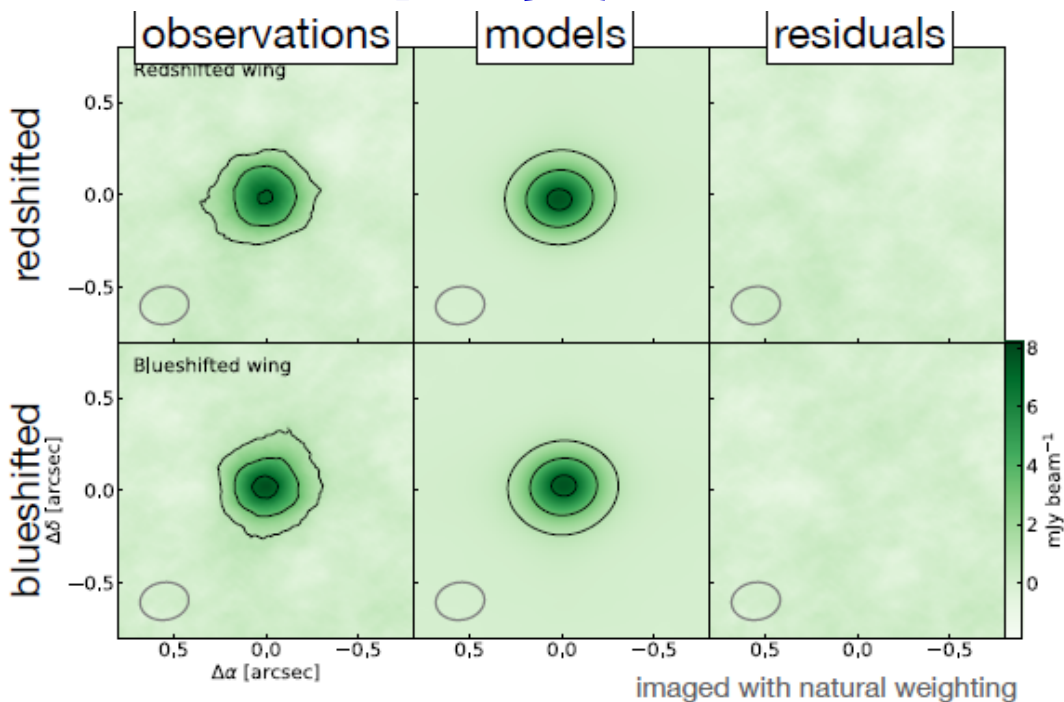


Retrieved Temperature Profiles

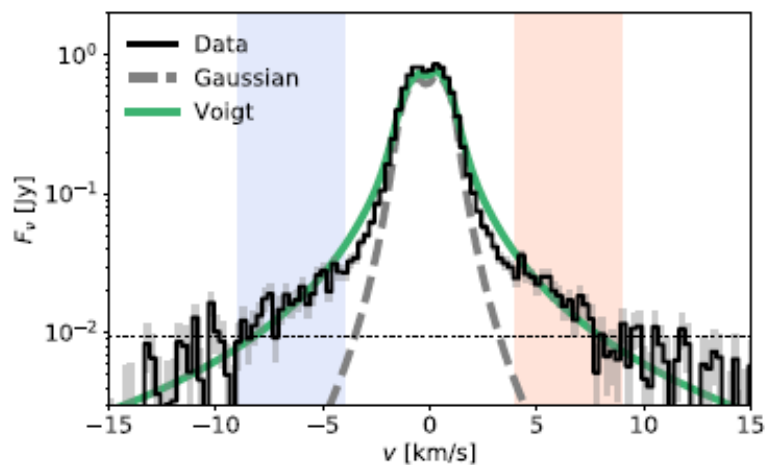
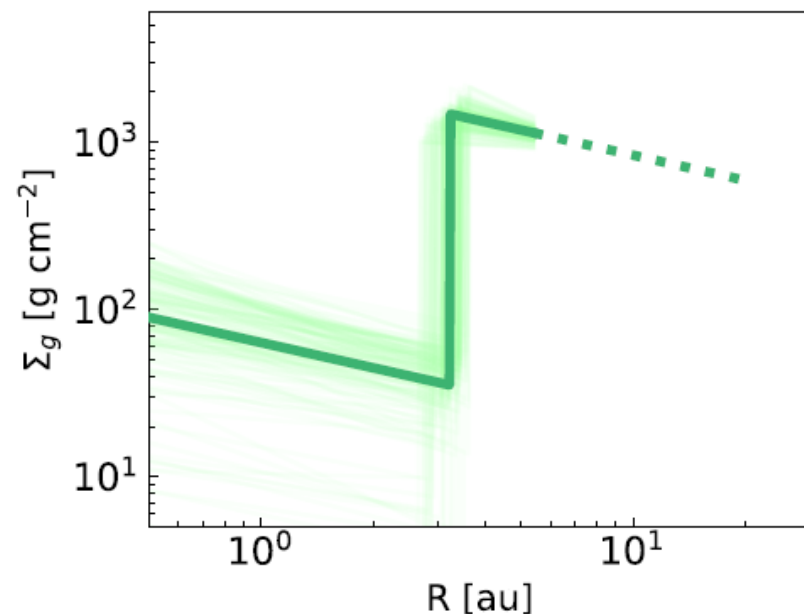


輝線の圧力広がり指標に、タイタン大気の鉛直方向の温度分布を調べる

ガス密度のMCMC フィッティング



ガス面密度分布

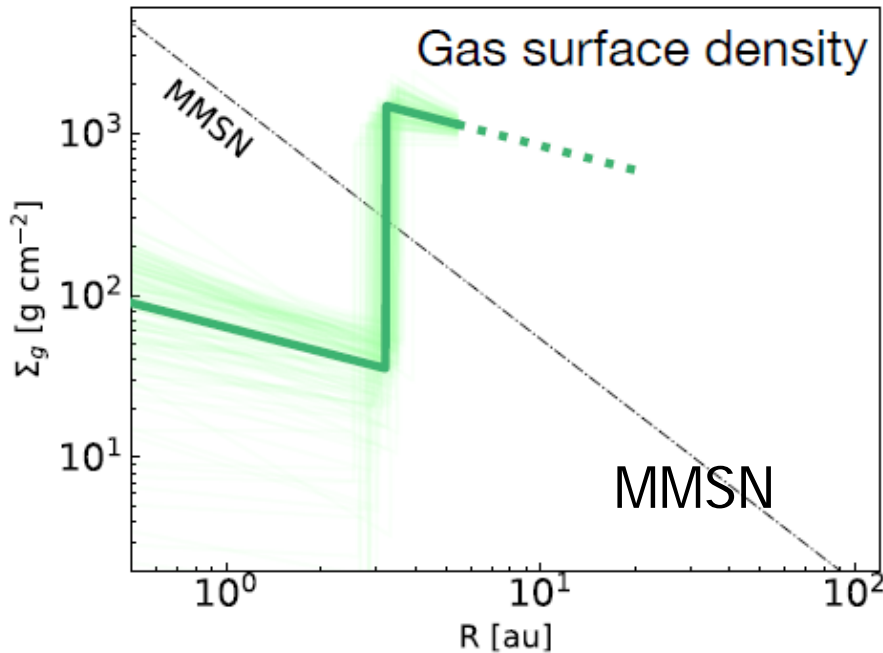


円盤赤道面付近の
ガス密度を初めて測定！

円盤内縁のガス質量

ガス面密度分布

(Yoshida, HN+ 2022b)

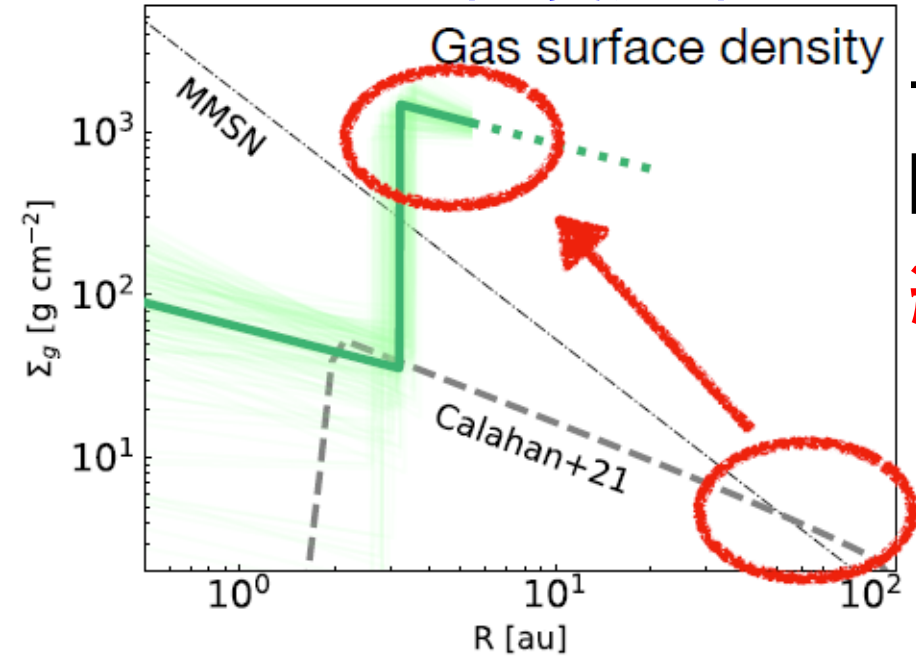


~7 木星質量 @ $r < 5$ au
年齢~10 Myr の円盤に
大量のガスが存在！

議論：円盤ガス面密度分布

ガス面密度分布

(Yoshida, HN+ 2022b)

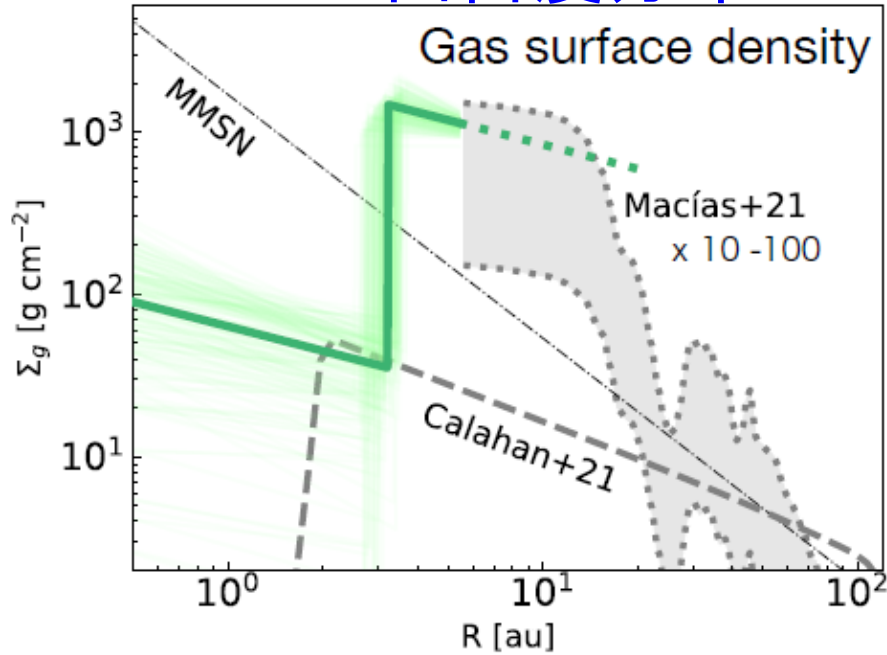


半径5auのガス面密度：
HD(&CO)輝線の観測量の
約 100倍

議論：円盤ガス面密度分布

ガス面密度分布

(Yoshida, HN+ 2022b)



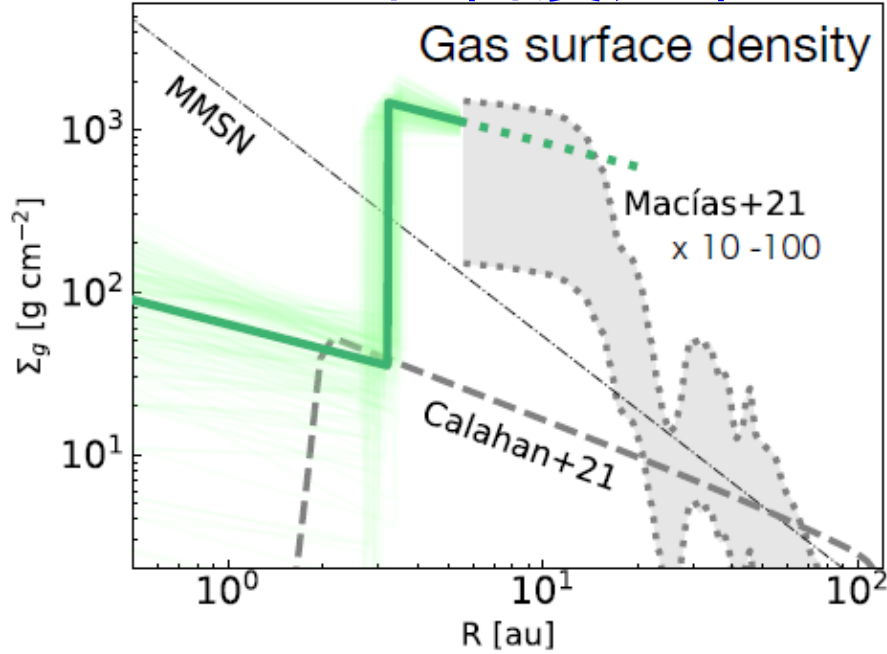
半径5auのガス面密度：
HD(&CO)輝線の観測量の
約 100倍

同様のジャンプはダスト
放射の観測でも検出され
ている

議論：円盤ガス面密度分布

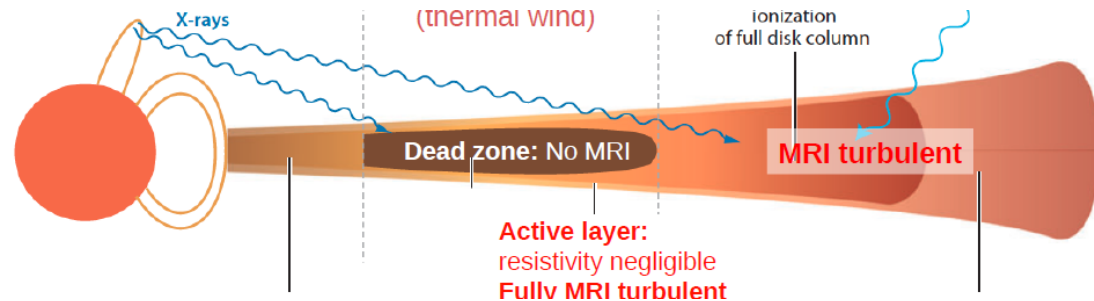
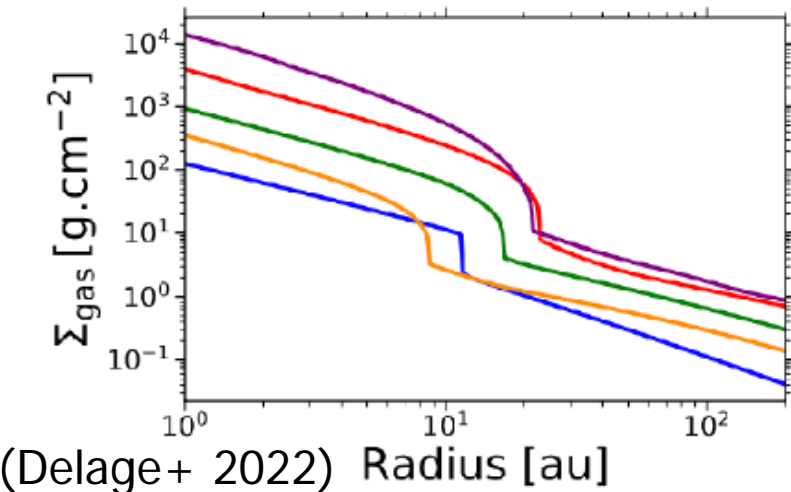
ガス面密度分布

(Yoshida, HN+ 2022b)



半径5auのガス面密度：
HD(&CO)輝線の観測量の
約 100倍

同様のジャンプはダスト放射
の観測でも検出されている
MRI dead zone境界に
おけるガスの集積？



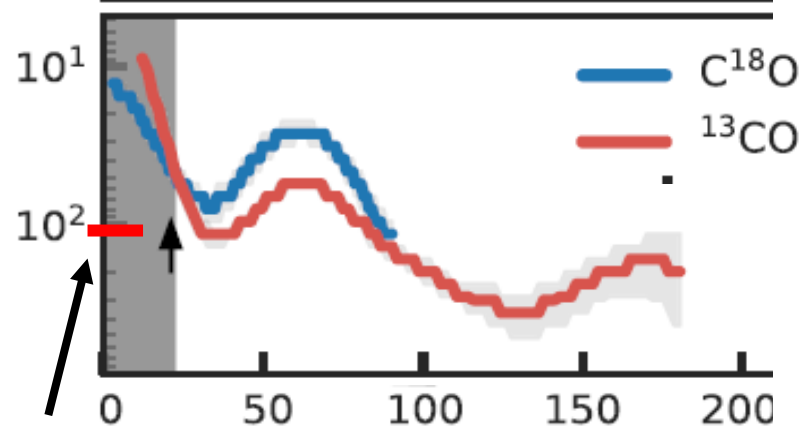
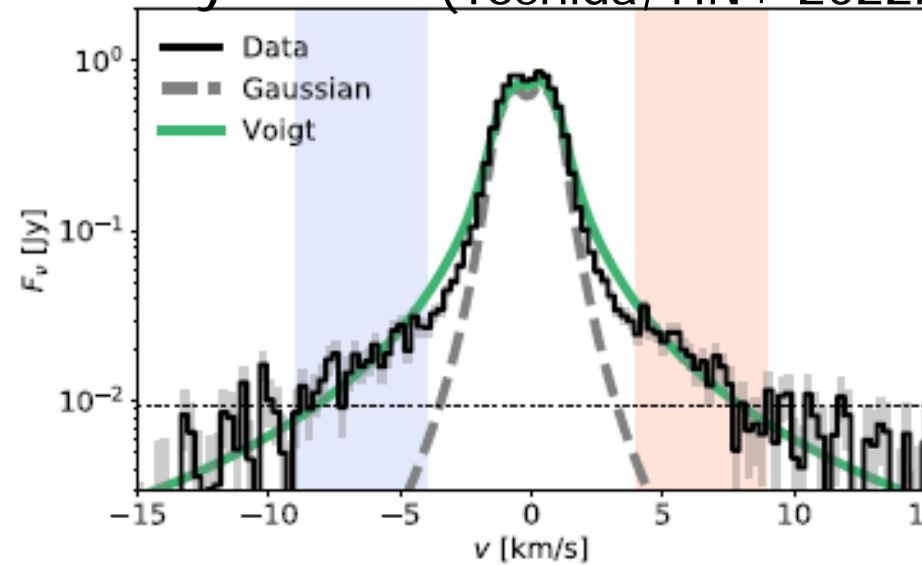
© X.-N. Bai

円盤内縁のCO/H2比

TW Hya

(Yoshida, HN+ 2022b)

CO depletion factor

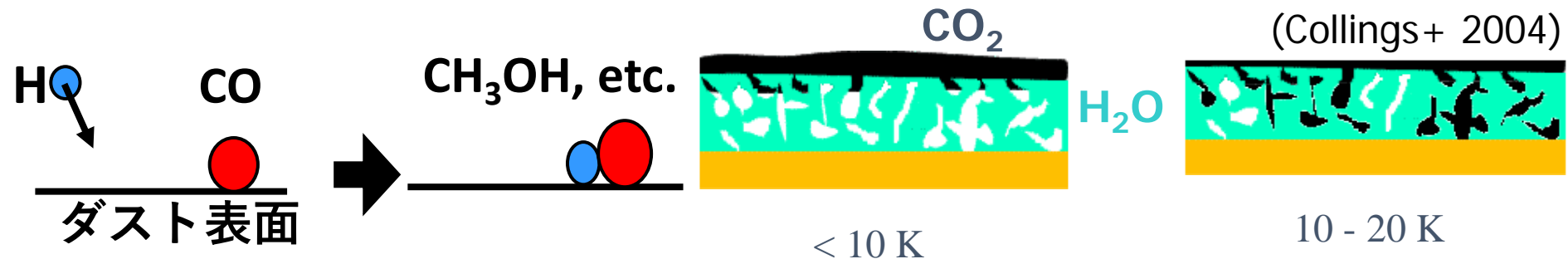


This work! R [AU] (Zhang+ 2019)

観測を再現するには、 $CO/H_2 \sim 10^{-6}$ @ $r = 5$ au

COスノーラインの内側でもCOガス枯渇

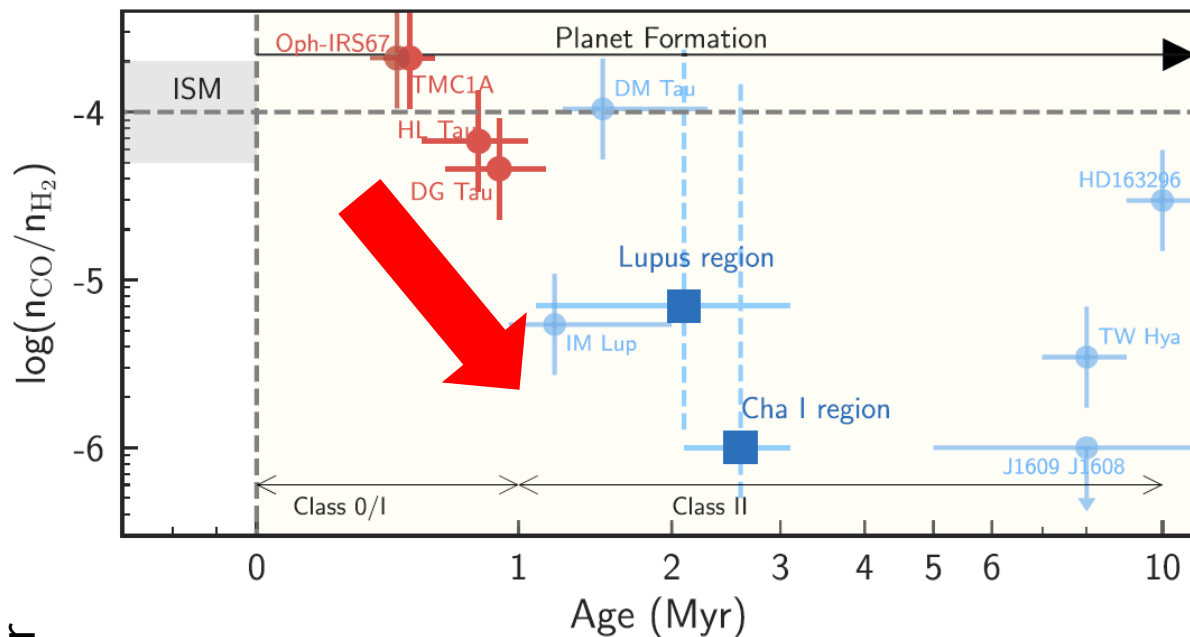
より蒸発しにくい分子へ変化&H2O氷にトラップ?



円盤におけるCOガスの枯渇

CO/H₂

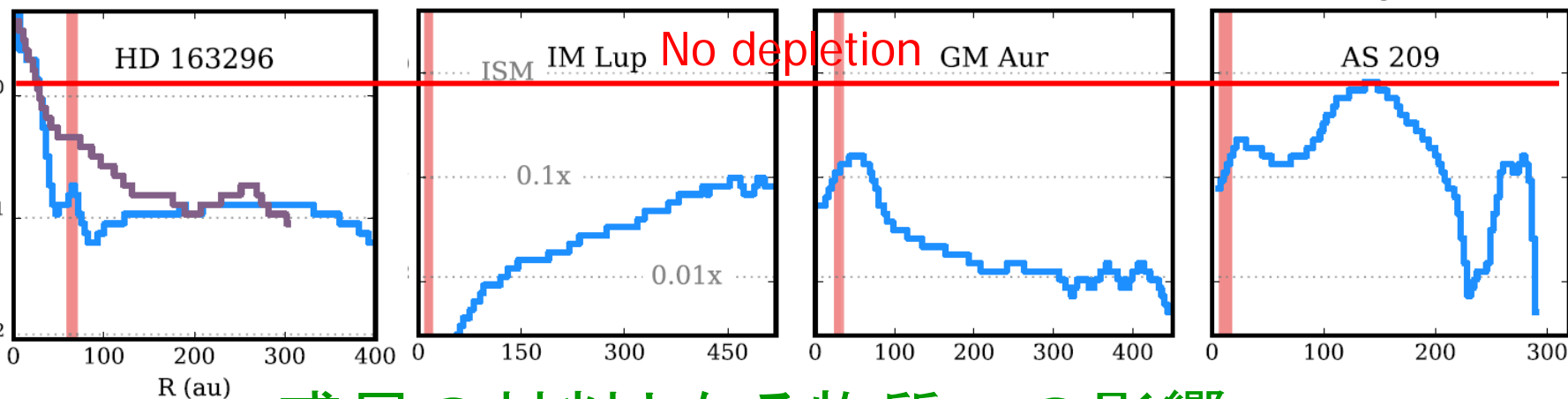
(Bergner+2020, Zhang+2020)



少なくとも一部の円盤では数MyrのタイムスケールでCOガスが枯渇している

CO gas depletion factor

(MAPS: Zhang+2021)

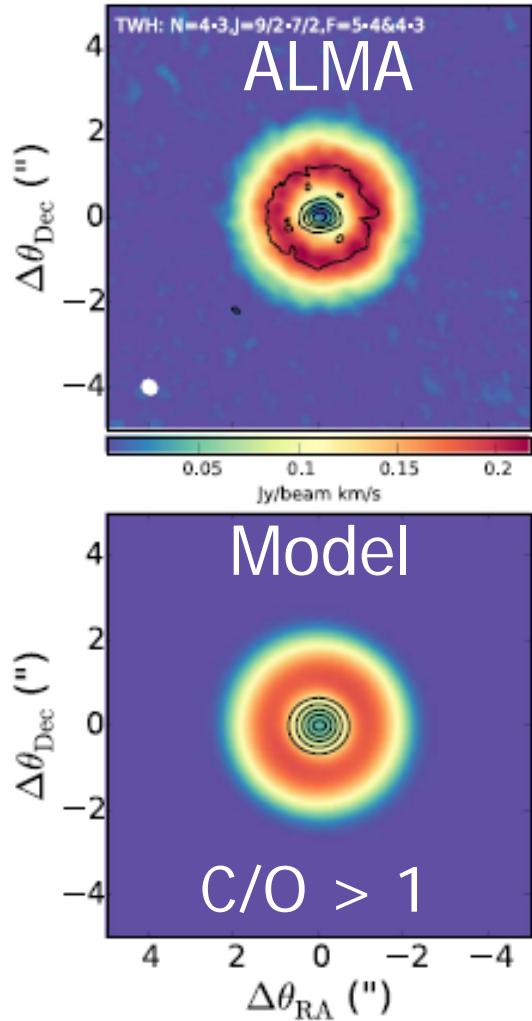


惑星の材料となる物質への影響？

円盤におけるC/O 元素組成比の観測

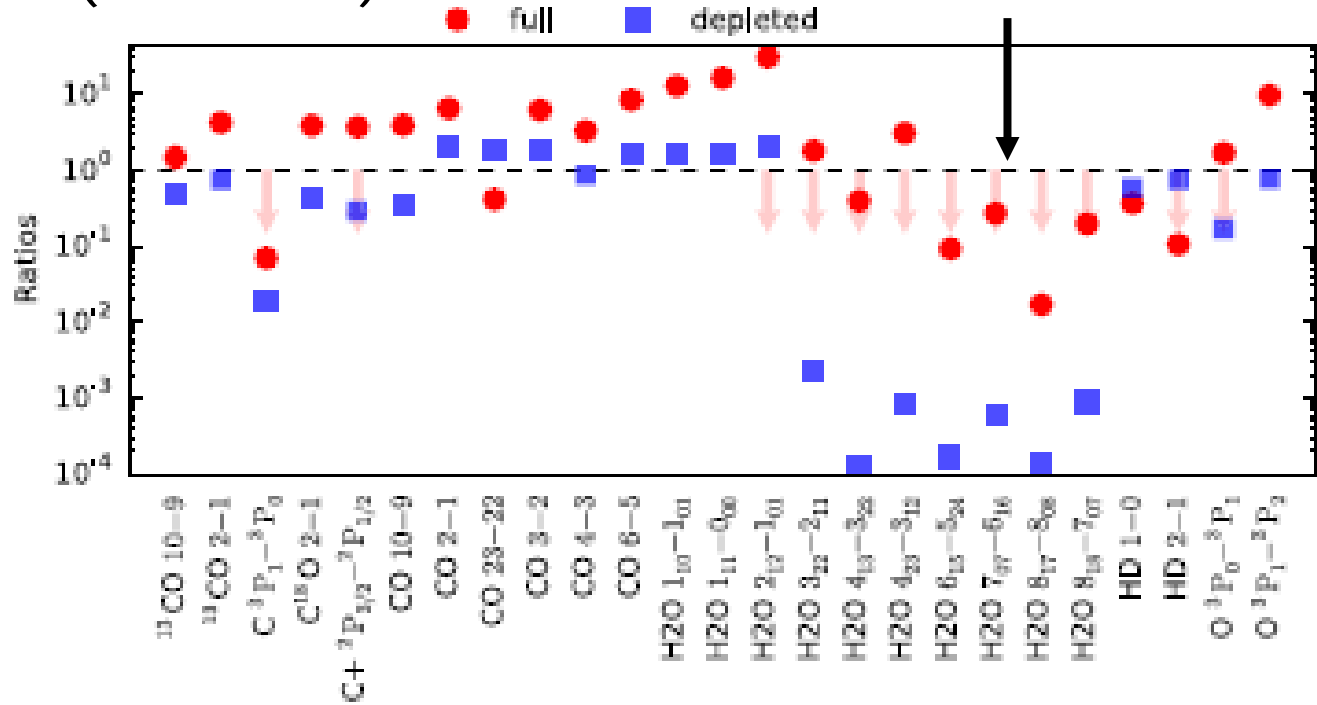
C2H

(Bergin+ 2016)



Model =
Observations
(Herschel, etc.)

(Du+ 2015)

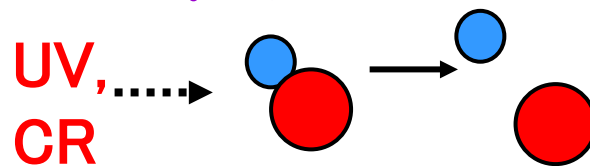


(cf. Thi+ 2010, Kamp+ 2013, Kama+ 2016, ...)

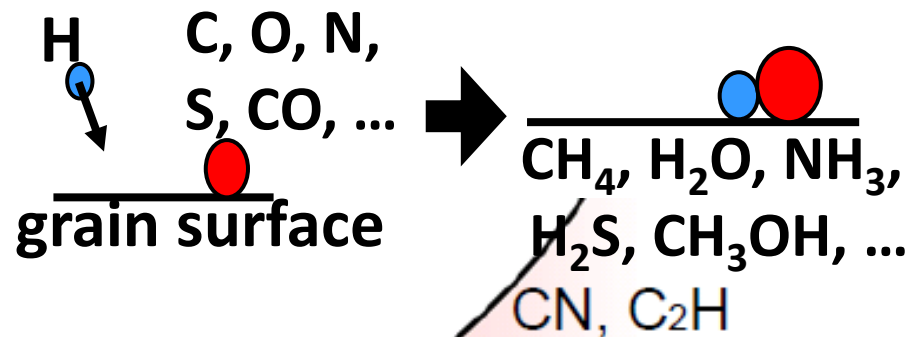
ハーシェル望遠鏡やALMAによる観測 & モデル計算
→COガス枯渇やC/O元素組成比の変化を示唆

円盤ガスの元素組成の進化 ～ダスト進化との関連～

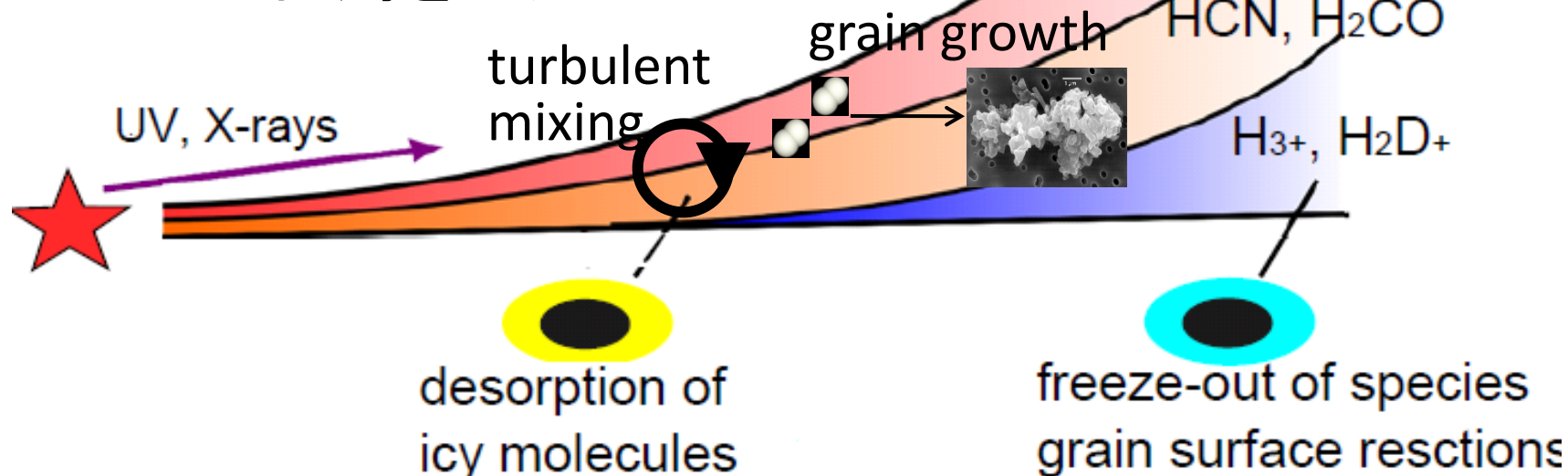
1. 紫外線や宇宙線による
COの解離



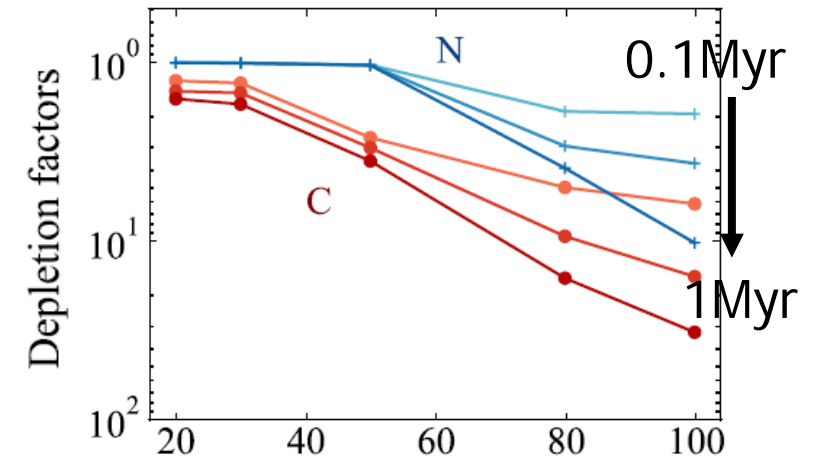
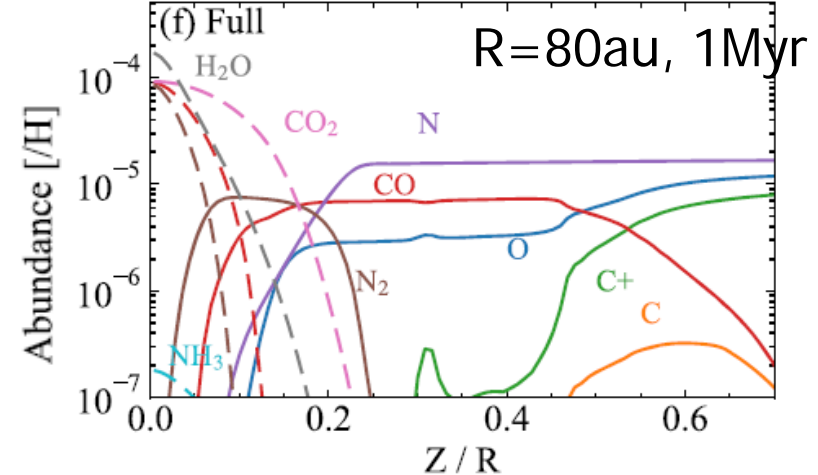
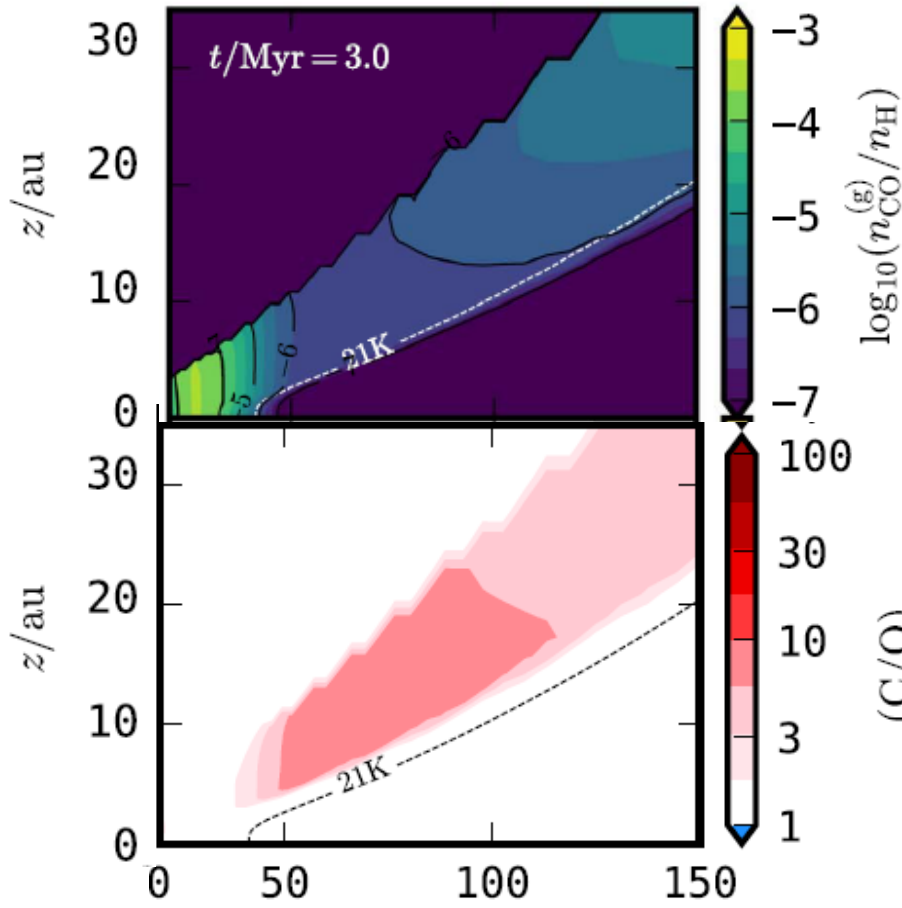
2. 塵表面での 蒸発しにくい
(非揮発性)分子 の生成



3. 乱流拡散 & ダスト成長
→COガス枯渇を加速



円盤における元素組成進化



(Furuya + 2022)

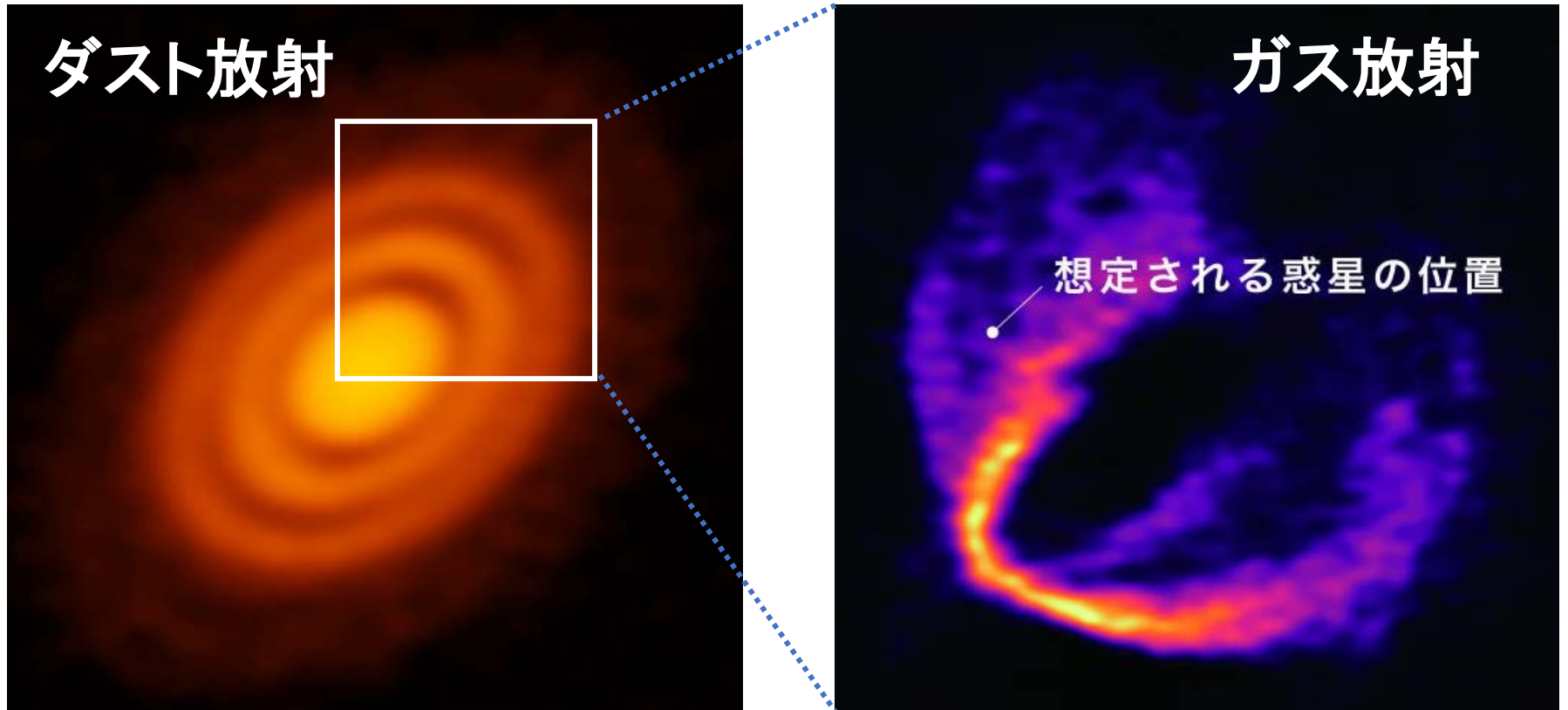
(Krijt+2020)

ダスト進化 (合体成長、沈殿、中心星へのドリフト)
+ 塵表面反応

→ 気相の炭素、酸素、窒素の元素存在量が減少、
C/O比やN/C比が変化: ALMA観測と整合的

速度構造から惑星の存在を示唆

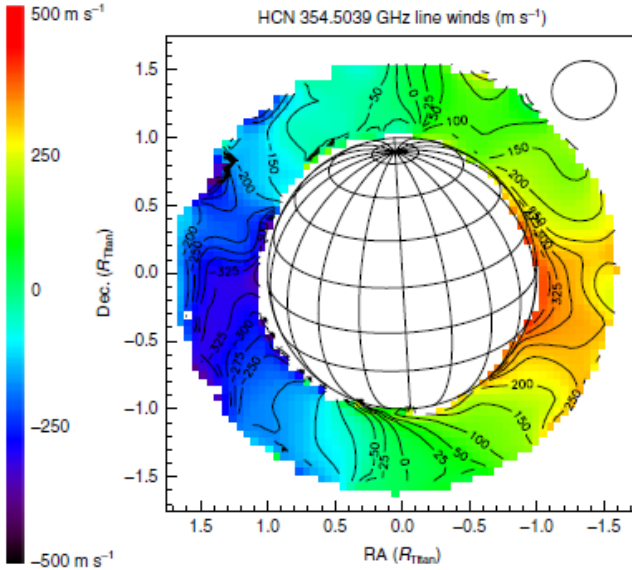
(Pinte et al. 2018)



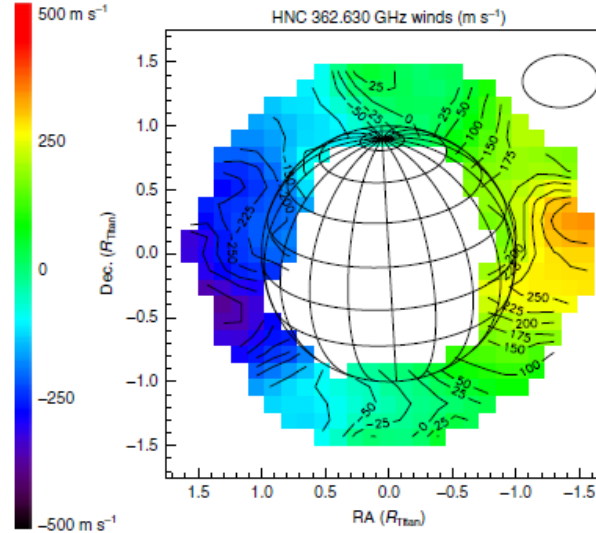
ケプラー回転運動からのずれを測定することにより、
ダスト放射にギャップのある位置に、惑星が
存在することを示唆

タイタン大気中のウィンドのALMA観測

HCN

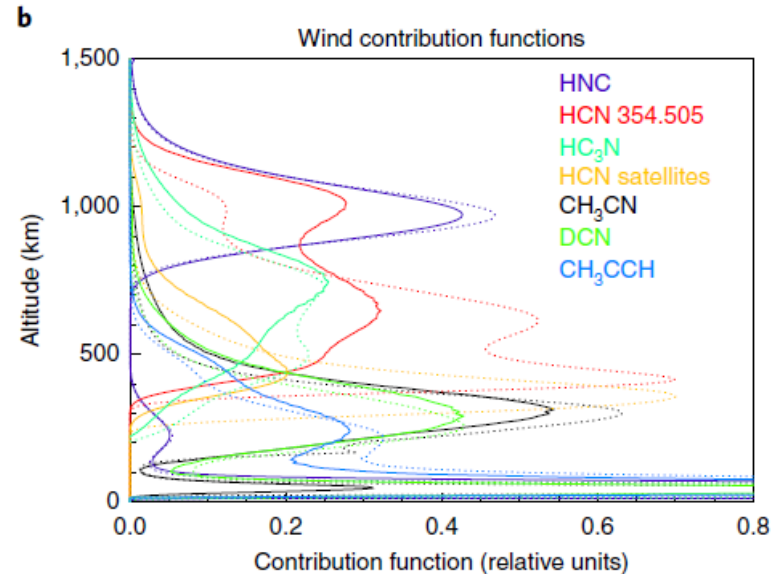
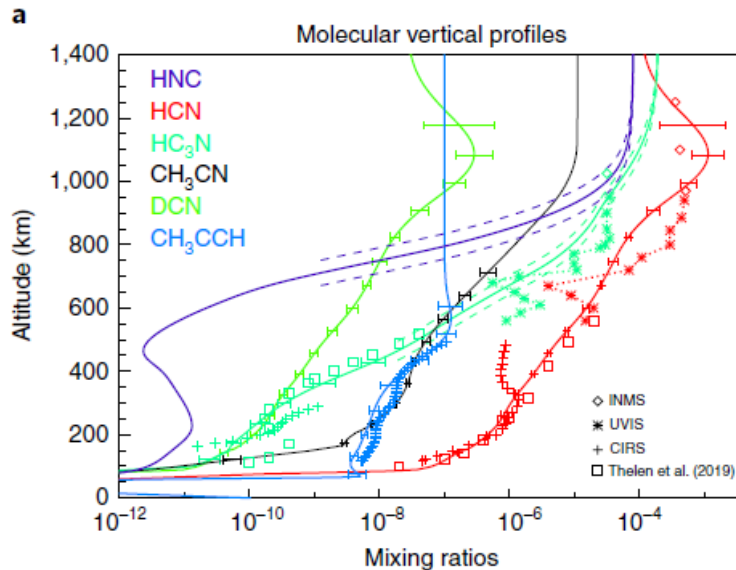


HNC

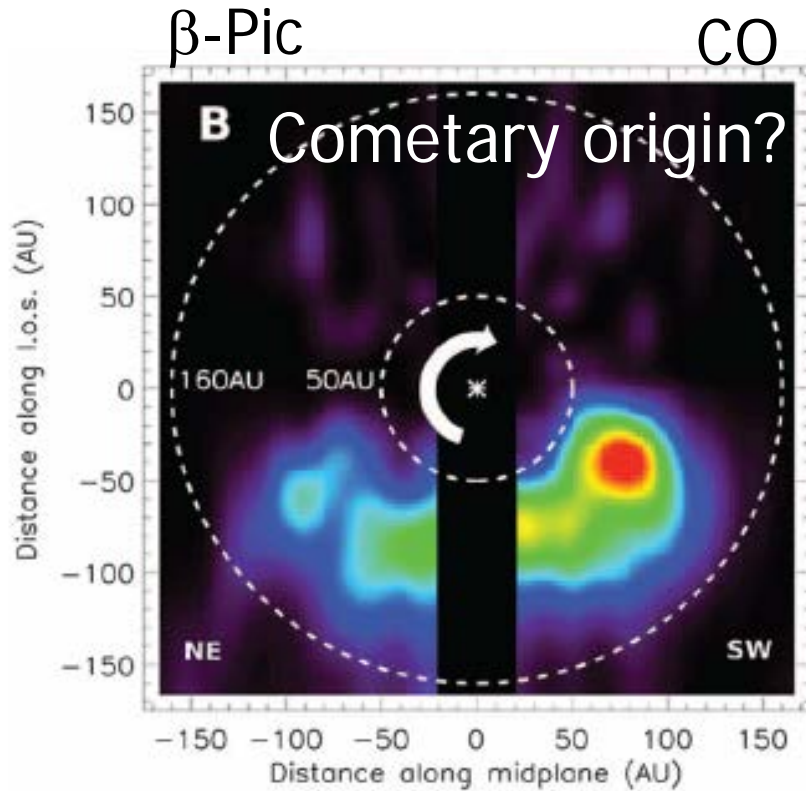


(Lellouch+ 2019)

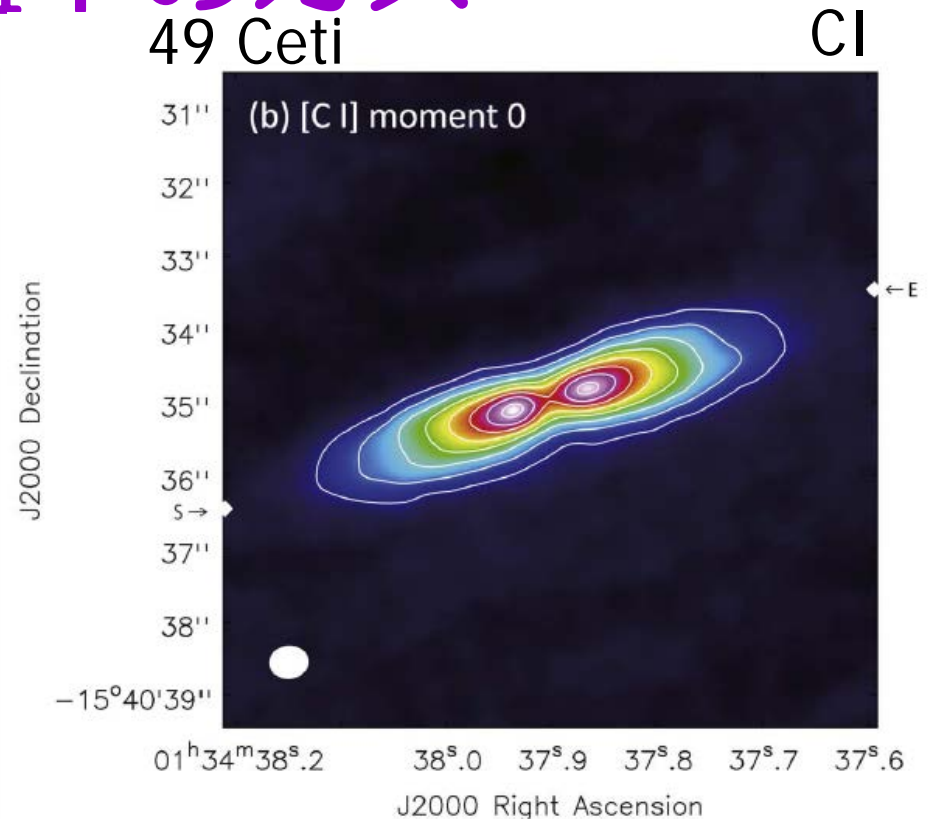
高度 $\sim 1000\text{km}$ に
 $\sim 340\text{m/s}$ の
 prograde windを
 検出。HNCは
 高度 $>870\text{km}$ のみ
 をトレース。



残骸円盤中のガス



(Dent et al. 2014)



(Higuchi et al. 2019)

これまで主にダストのみが見つかった残骸円盤に
大量のガスが存在することがALMA観測で明らかになった

ガスの起源は何？

原始惑星系円盤ガスの生き残り？彗星の衝突？

惑星形成や軌道進化への影響は？

原始惑星系円盤からのガス輝線の観測

紫外線 H₂ Lyman-Werner band transitions

ミリ波・サブミリ波
CO, ¹³CO, C¹⁸O, C¹⁷O, ¹³C¹⁸O, ¹³C¹⁷O, HCO⁺, H¹³CO⁺, DCO⁺, HC¹⁸O⁺, [CI], C₂H, C₂D, c-C₃H₂

可視光 [OI] 6300A

H₂CO, HCOOH, CH₃OH, CH₃OCH₃, CH₃OCHO, HCN, H¹³CN, DCN, HC¹⁵N, HNC, CN, C¹⁵N, N₂H⁺, N₂D⁺, NO, HC₃N, CH₃CN, CH₂CN, CS, C³⁴S, ¹³CS, H₂S, SO, SO₂, H₂CS, etc.

近赤外線

H₂ v=1-0 S(1), S(0), CO Δv=2, Δv=1,

H₂O, OH, HCN, C₂H₂, CH₄

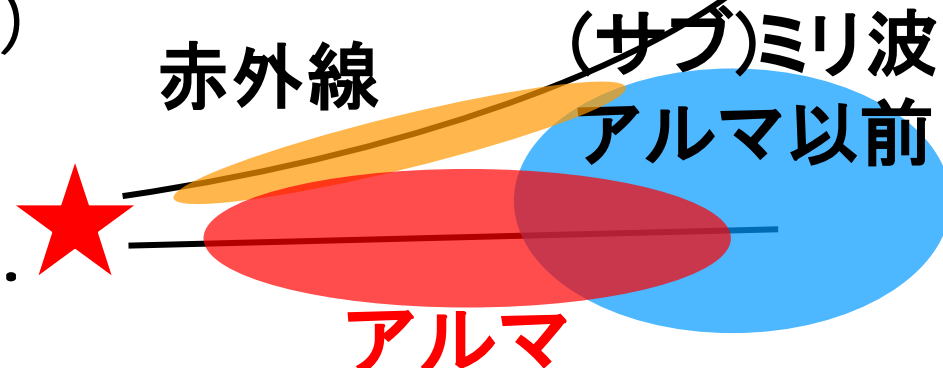
中間赤外線

H₂ v=0-0 S(1), S(2), S(4)

H₂O, OH, HCN, C₂H₂, CO₂, ¹³CO₂, (Spitzer Space Telescope, JWST)

遠赤外線

[OI] 63um, 145um, CO, H₂O, CH⁺, HD, NH₃, etc. (Herschel Space Observatory)



これまでに観測された星間分子の一部

CH+	HCN	H2CO	HC3N	CH3OH	HC5N	HCOOCH3	HC7N
CS	HNC	H2CS	HCOOH	CH3CN	CH3CCH	CH3C3N	HC9N
CO	HCO	H2CN	CH2NH	CH3NC	CH3NH2	CH3COOH	HC11N
CN	OCS	HNCO	CH2CO	CH3SH	CH3CHO	CH2CHCHO	C2H5CN
C2	CH2	HNCS	NH2CN	NH2CHO	CH2CHCN	CH2OHCHO	CH3C4H
CH	C2H	C3H	C4H	C5H	C6H	H2C6	CH3C5N
CO+	C3	c-C3H	c-C3H2	H2C4	c-C2H4O		CH3OCH3
CF+	CO2	C3N	H2C3	HC3NH+	CH2CHOH		C2H5OH
CN-	C2O	C3O	CH2CN	C5N-	C6H-		CH3CONH2
	C2S	C3S	HCCNC				CH3COCH3
	HCO+	CH3	HNCCC				OHCH2CH2OH
	HOC+	C2H2	CH4				C2H5OCHO
	HCS+	HOCO+	H2COH+	→ アミノ酸? →			C8H-
		HCNH ₄ -					NH2CH2COOH?

C3N-

1970年
~ 10種



1980年
~ 50種



1995年
~ 100種



2020年
~ 225種



2023年
~ 290種

彗星や隕石中のアミノ酸の検出例

スターダスト

はやぶさ2
リュウグウ

JAXA

太陽系内の物質は、どのようにして生成されたのか？

NA

グリシン(アミノ酸)の検出

サンプルリターン ミッション

近年のALMA観測：円盤における
複雑な有機分子や稀少同位体分子の検出
+ 化学反応ネットワーク計算の進展
→ Ryuguサンプルに應用して
太陽系物質の起源を探る！

その場観測

(Altwegg et al. 2016)

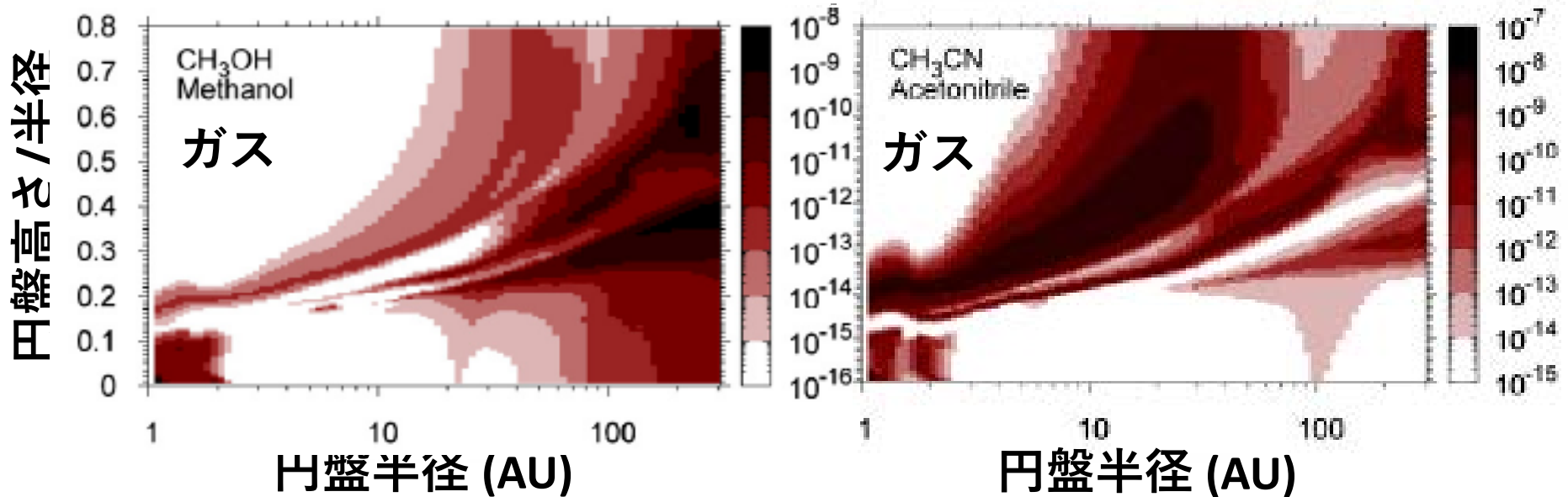
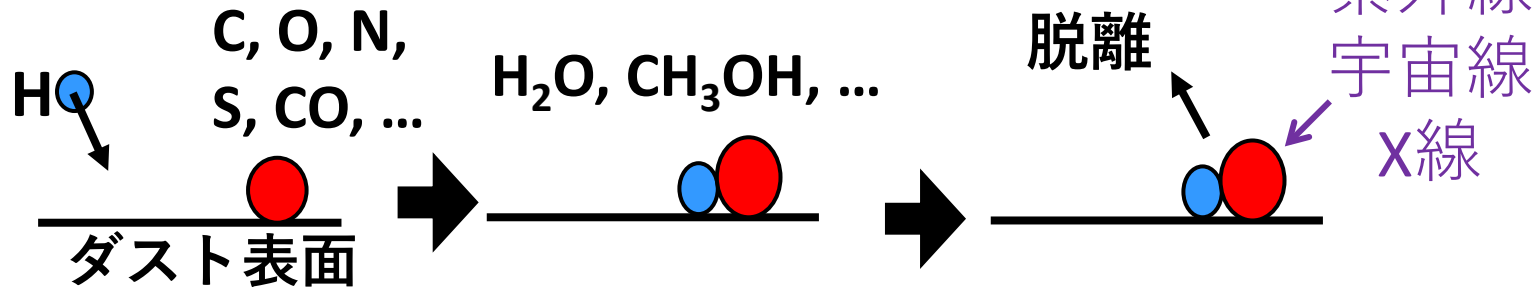
様々なアミノ酸の検出

ESA

原始惑星系円盤中の有機分子生成

塵表面反応

光脱離

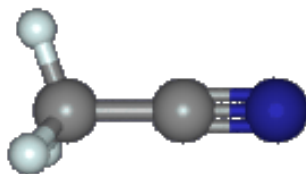
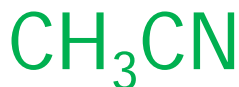
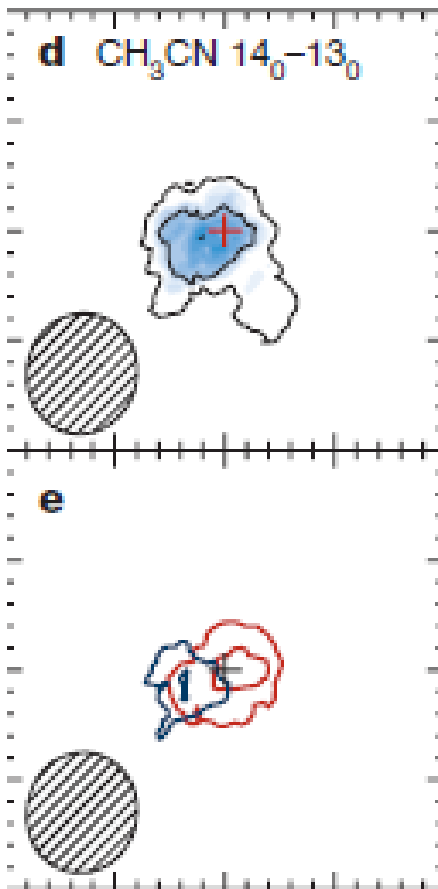


円盤赤道面付近では、塵表面反応が効率的におこり、複雑な有機分子が生成、非熱的脱離により気相へ

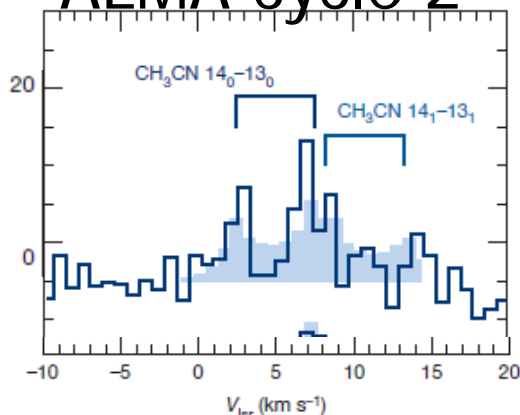
(Walsh, Millar, HN et al. 2014)

アルマによる原始惑星系円盤からの複雑な有機分子の検出

MWC480

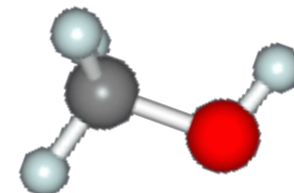
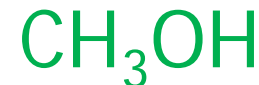
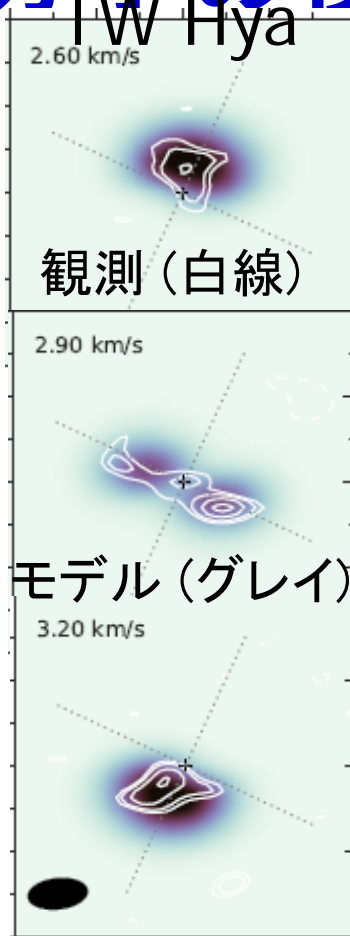


ALMA cycle 2

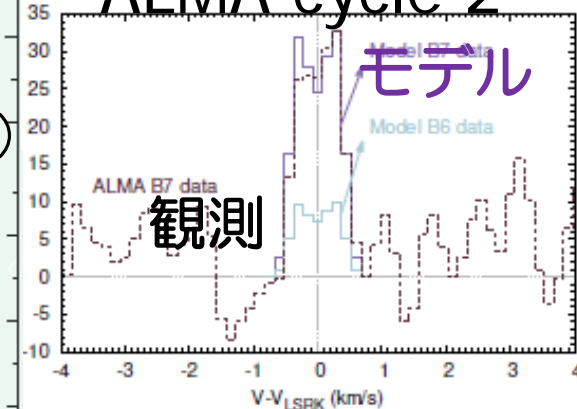


(Oberg et al. 2015)

TW Hya



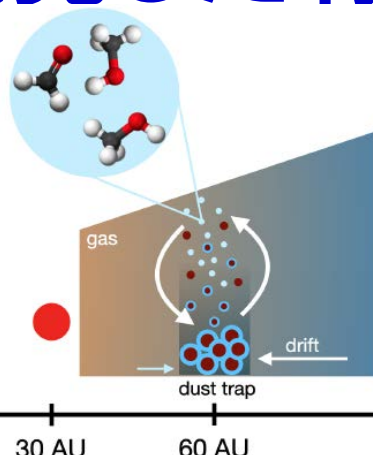
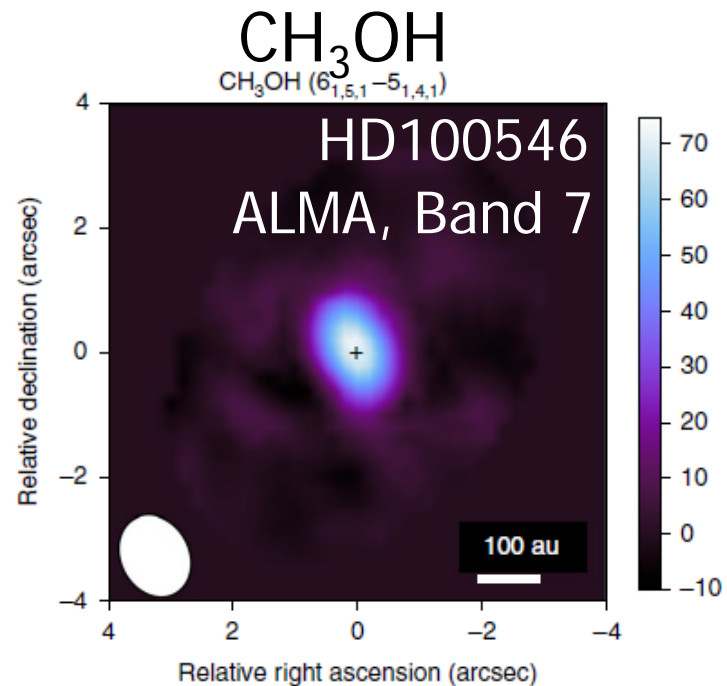
ALMA cycle 2



(Walsh et al. 2016)

円盤外縁の低温領域より複雑な有機分子を検出
 (塵表面からの非熱的脱離を示唆)
 太陽系の彗星と類似の組成比を示す

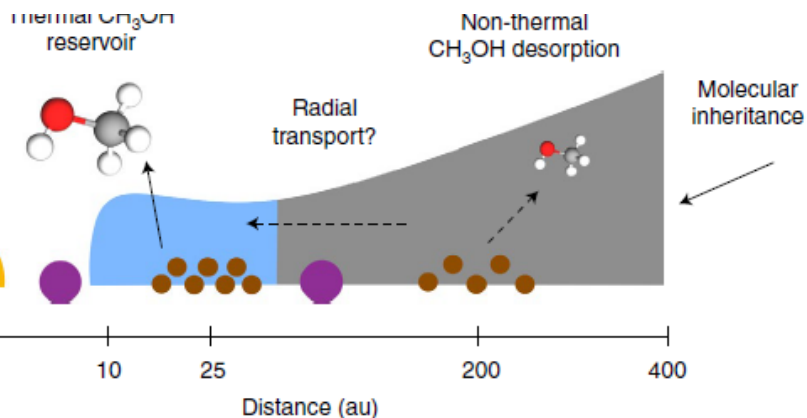
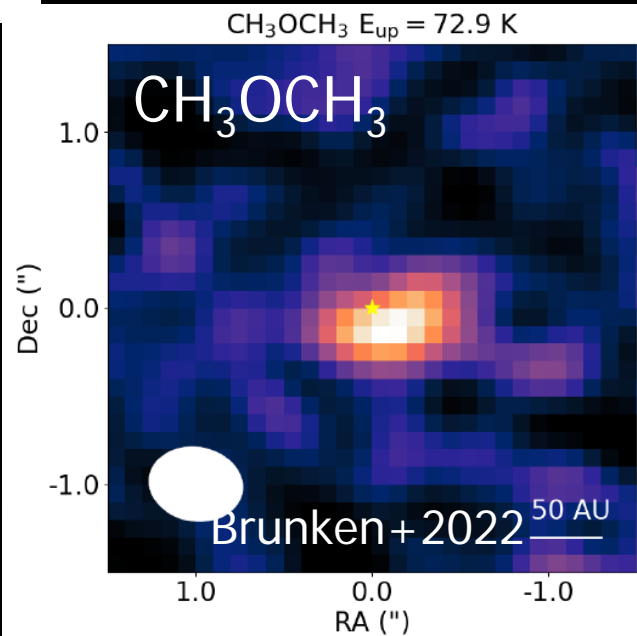
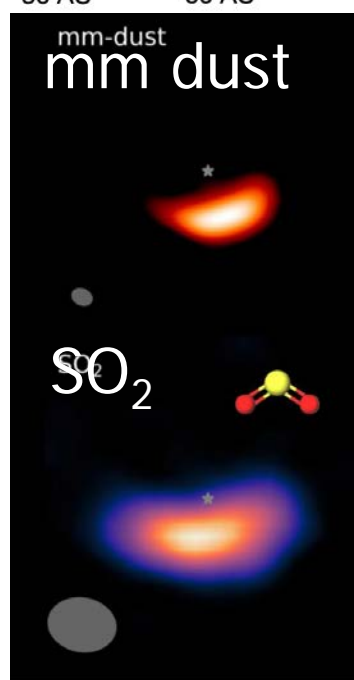
塵表面から熱的に蒸発した有機分子の観測



ALMA, Band 7
(polarization mode)

Oph IRS 48

Oph-IRS 48 Ice Trap

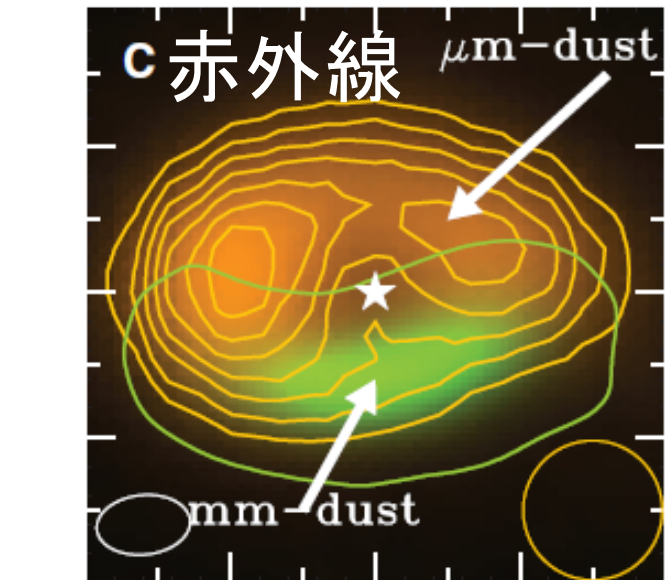
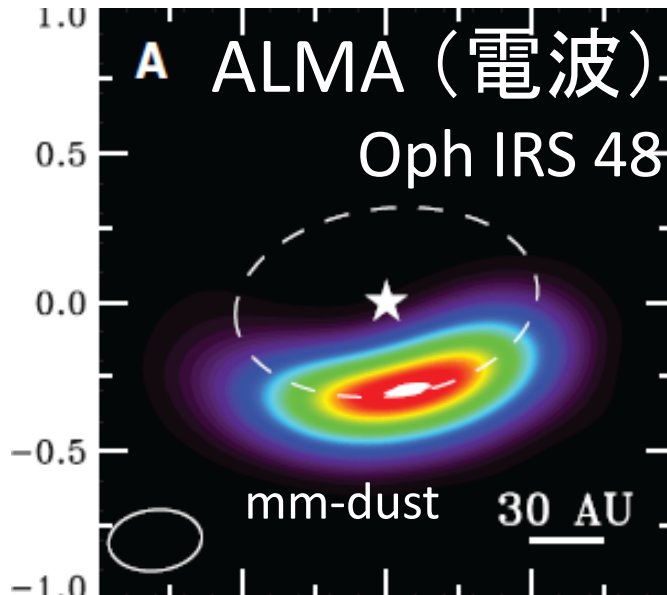


(Booth+ 2021a)

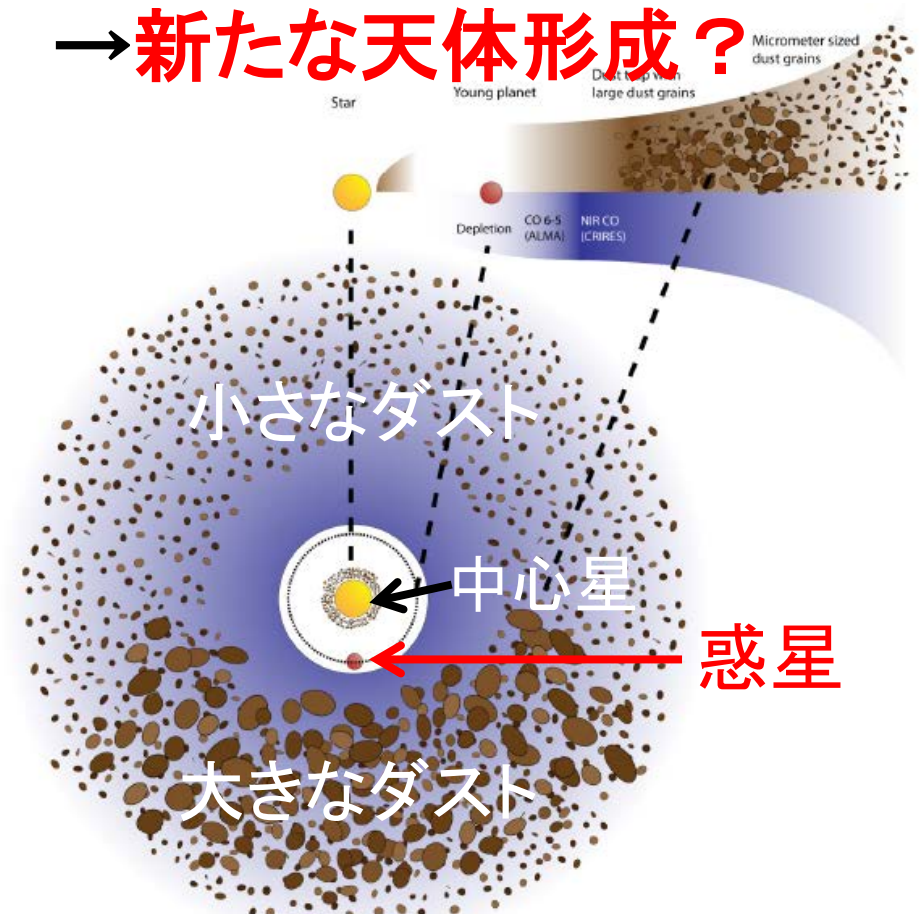
(van der Marel+ 2021, Booth+ 2021b)

氷の組成の情報が直接的に得られる

円盤中のダスト分布の大きな偏り



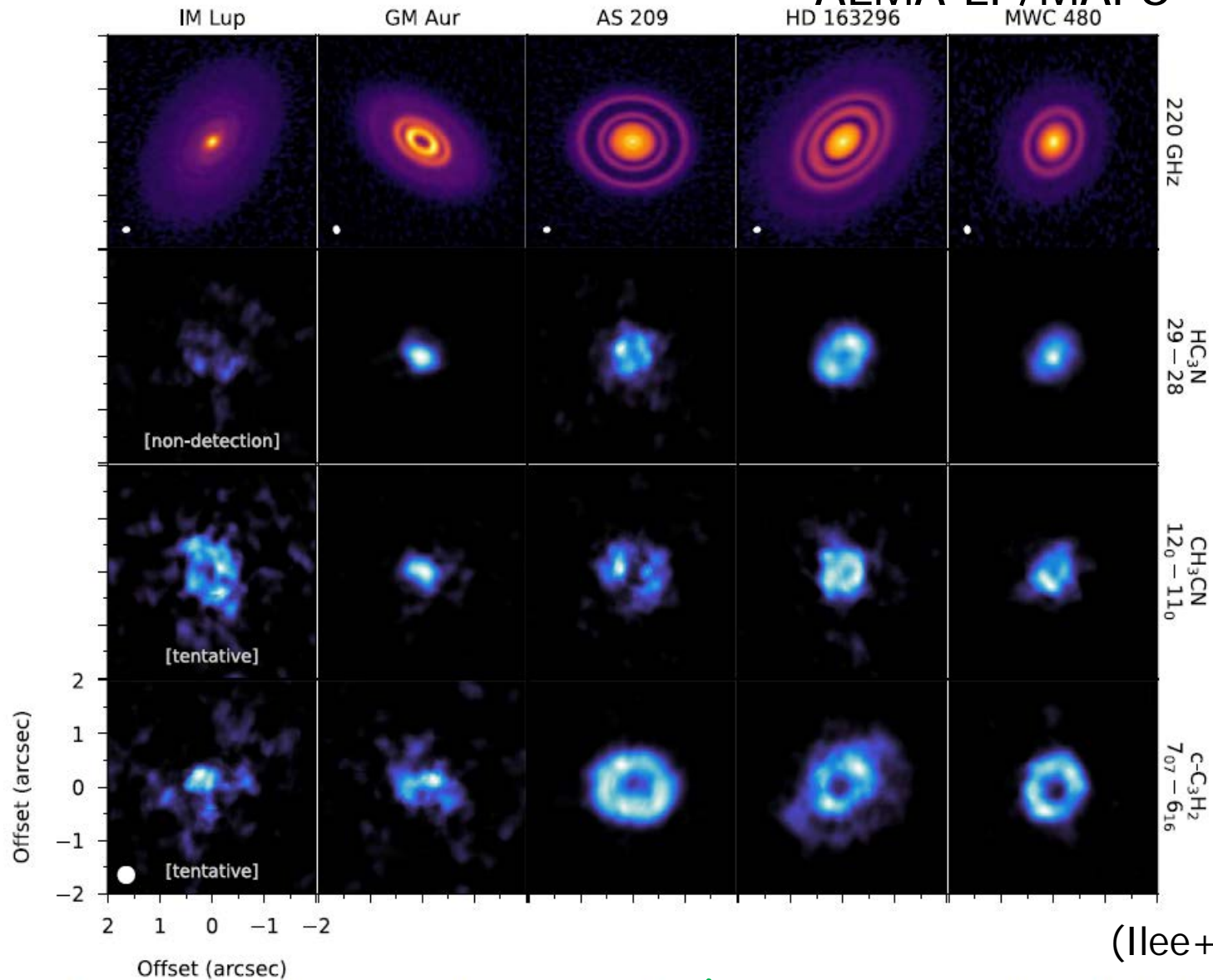
惑星との重力相互作用の結果、
大きなダストが円盤の片側に
偏って分布した
→ **新たな天体形成?**



(van der Marel et al. 2013)

円盤内の複雑な有機分子の分布

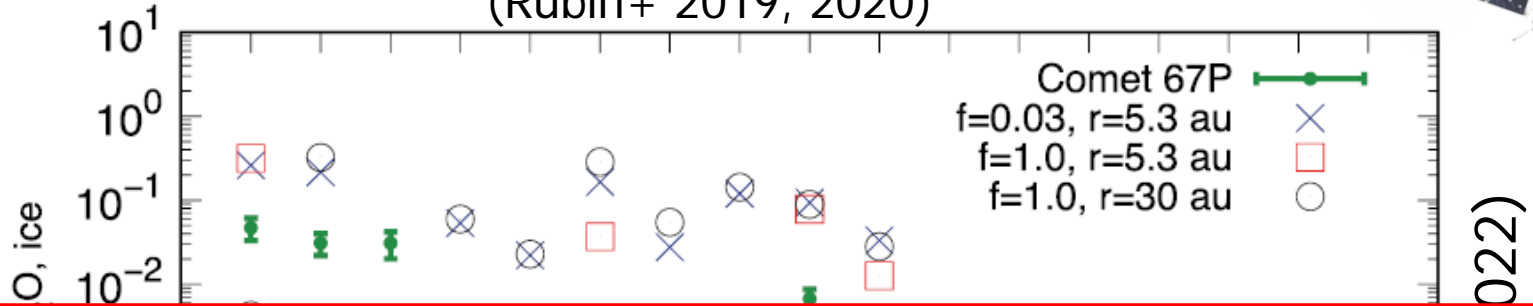
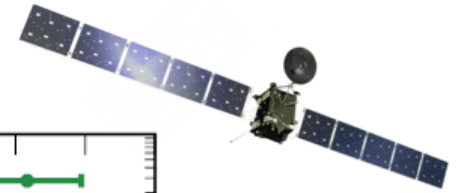
ALMA LP/MAPS (PI: K. Oberg)



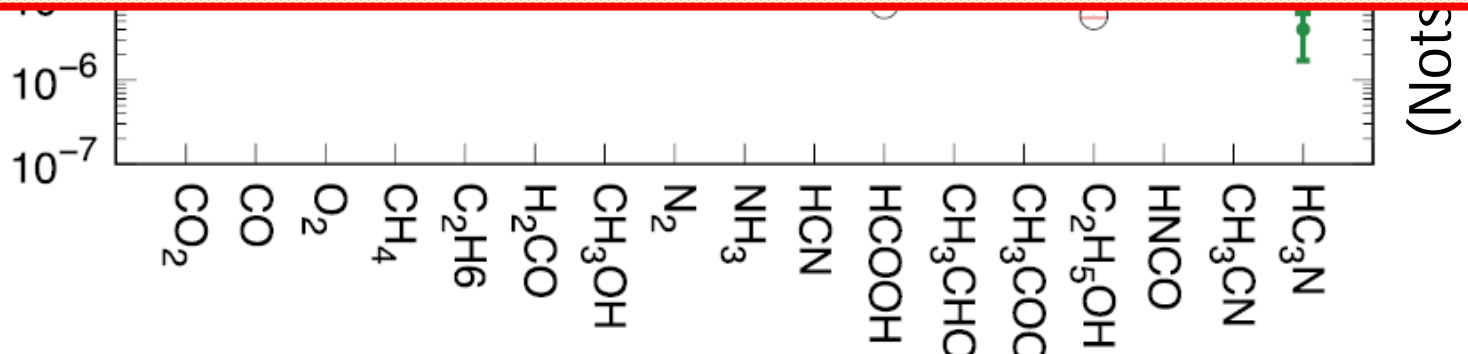
複雑な有機分子は、ダストの分布と相関？

彗星中の分子の観測とモデルの比較

COMs in 67P/ Churyumov-Gerasimenko
(Rubin+ 2019, 2020)



円盤における複雑な有機分子生成過程は、
観測により検証可能になりつつある



67P/C.-G. 彗星で見つかった分子の存在量と
円盤のモデル計算の結果がよい一致

(cf. Walsh et al. 2014, 2015)

原始惑星系円盤からのガス輝線の観測

紫外線 H₂ Lyman-Werner band transitions

ミリ波・サブミリ波
CO, ¹³CO, C¹⁸O, C¹⁷O, ¹³C¹⁸O,

¹³C¹⁷O, HCO⁺, H¹³CO⁺, DCO⁺,
HC¹⁸O⁺, [CI], C₂H, C₂D, c-C₃H₂

H₂CO, HCOOH, CH₃OH,
CH₃OCH₃, CH₃OCHO,

HCN, H¹³CN, DCN, HC¹⁵N,
HNC, CN, C¹⁵N, N₂H⁺, N₂D⁺,

NO, HC₃N, CH₃CN, CH₂CN,
CS, C³⁴S, ¹³CS, H₂S,

SO, SO₂, H₂CS, etc.

可視光 [OI] 6300A

近赤外線

H₂ v=1-0 S(1), S(0),
CO Δv=2, Δv=1,

H₂O, OH, HCN, C₂H₂, CH₄

中間赤外線

H₂ v=0-0 S(1), S(2), S(4)

H₂O, OH, HCN, C₂H₂, CO₂, ¹³CO₂,

遠赤外線

[OI] 63um, 145um,
CO, H₂O, CH⁺, HD, NH₃, etc.

(Herschel Space Observatory)

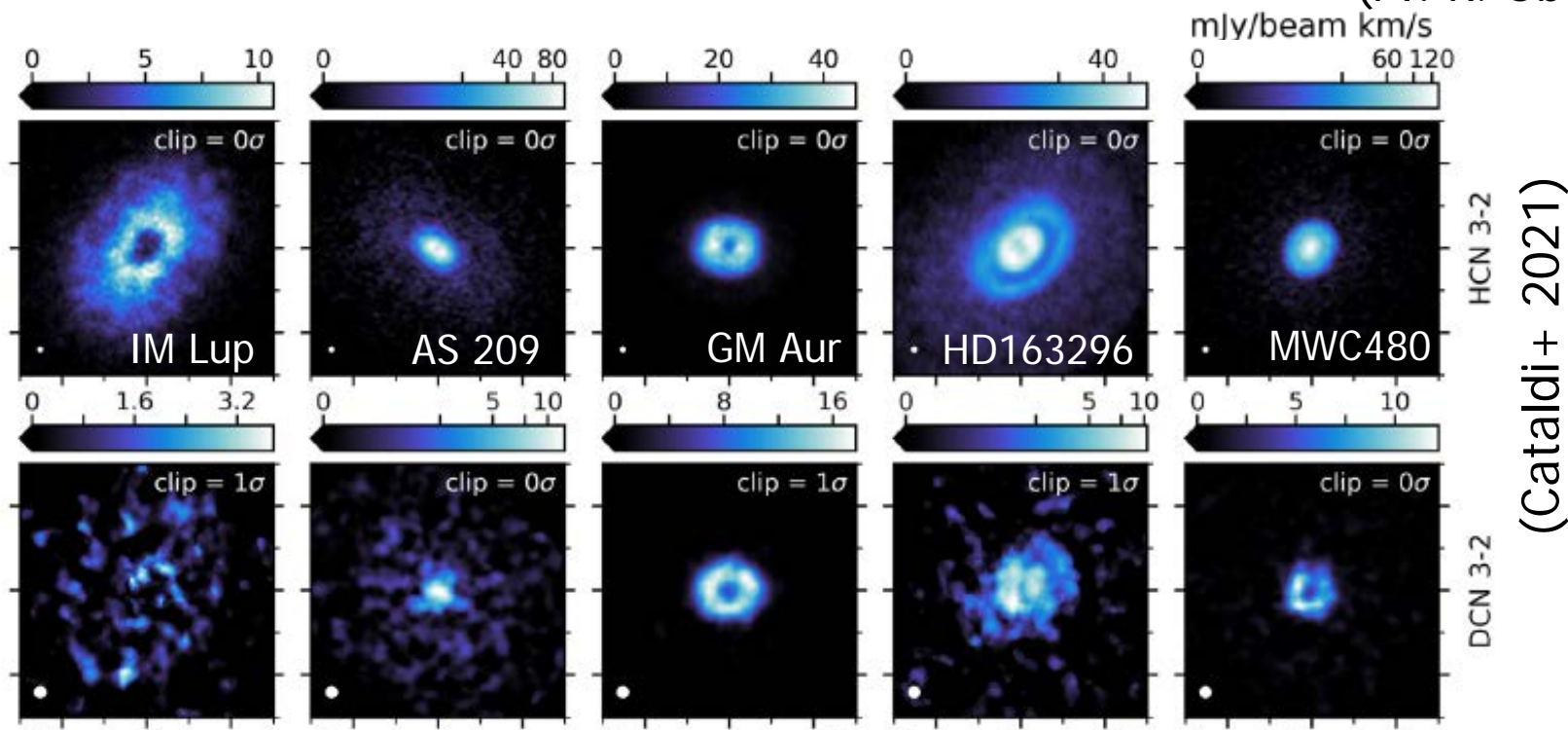
赤外線

(サブ)ミリ波
アルマ以前



円盤における希少同位体分子の分布

ALMA LP/MAPS (PI: K. Oberg)



(Cataldi+ 2021)

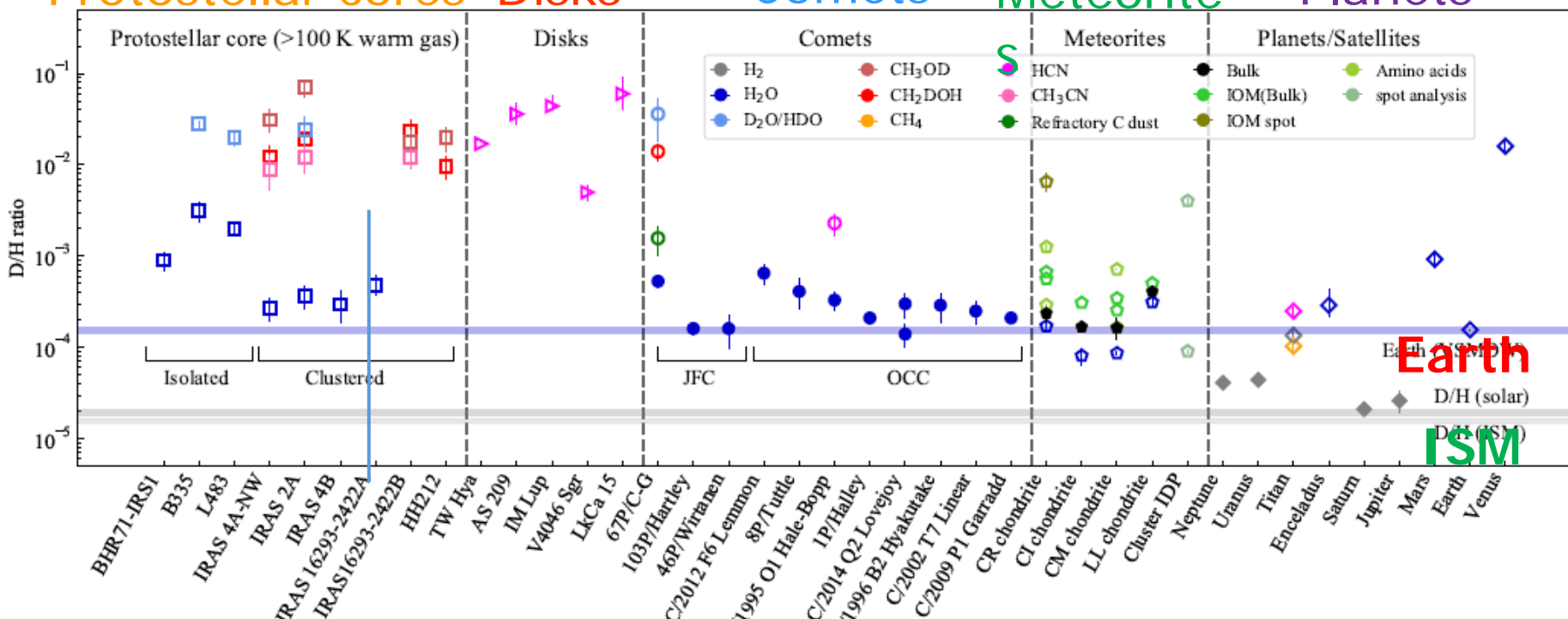
同位体比の観測により、物質進化を探る

主な同位体濃縮過程

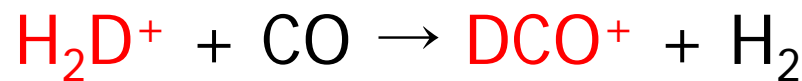
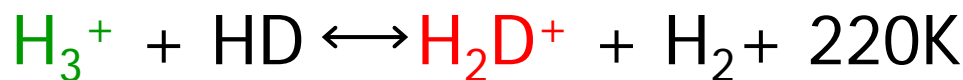
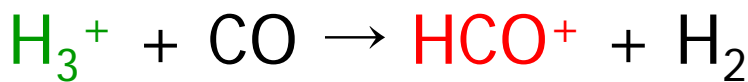
- 同位体交換反応: D, ^{13}C
- 選択的光解離: ^{15}N , ^{17}O , ^{18}O

重水：地球上の海水の起源？

Protostellar cores Disks Comets Meteorite Planets



重水素濃縮 ⇔ 同位体交換反応：低温下で濃縮する
気相反応



固相反応

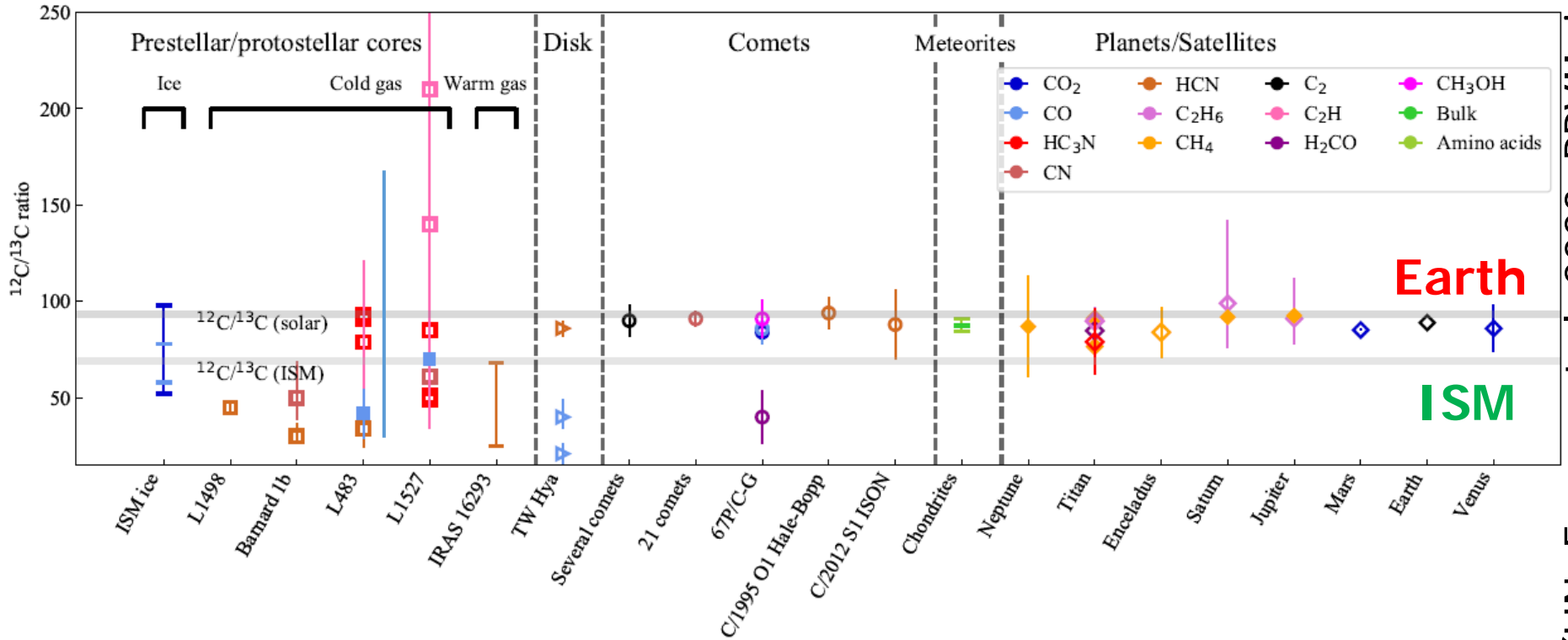


高温

低温

炭素同位体比濃縮

Protostellar cores Disks Comets Meteorites Planets

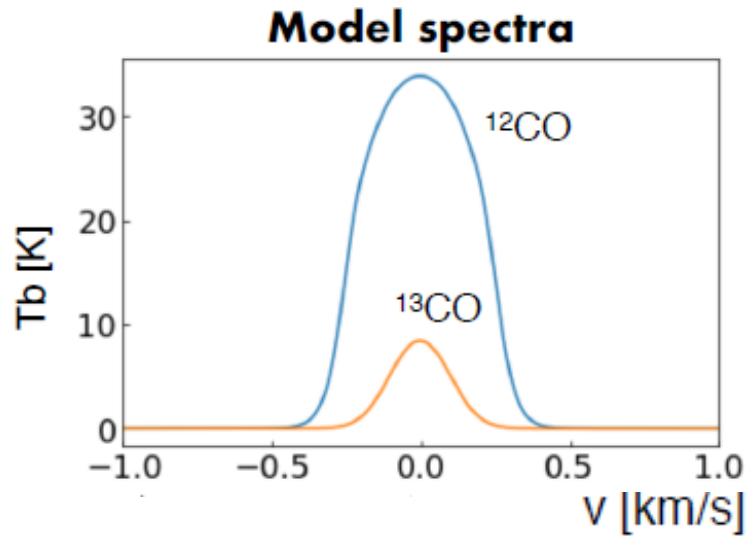


(HN, Furuya et al. 2023, PPVII, in press)

原始惑星系円盤における $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比は？

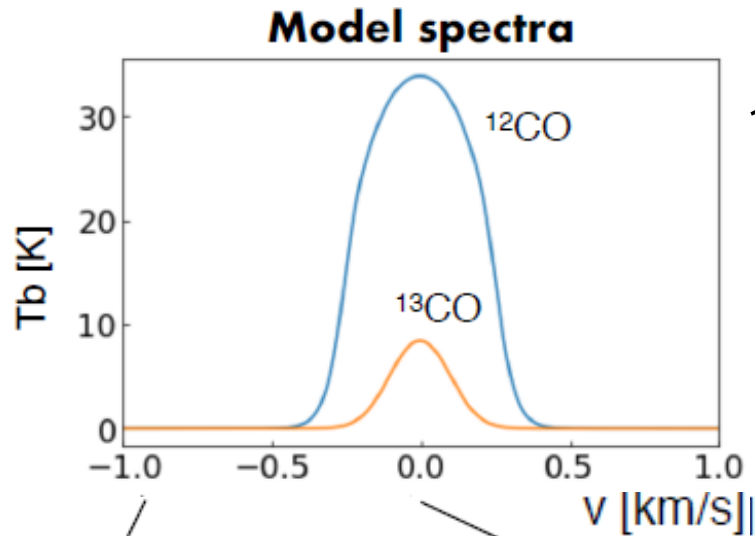
$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比は、太陽系天体ではほぼ一様
星形成前後の分子雲コアではばらつきがある

円盤における $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 比の測定法？

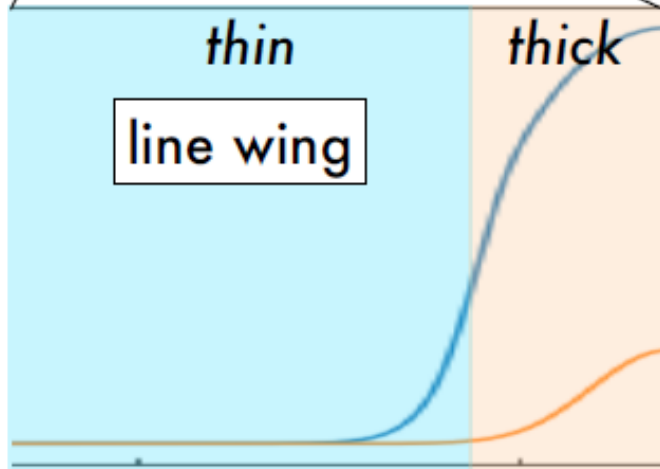


^{12}CO : 円盤では光学的に厚い
→ 同位体比の測定が困難

円盤における $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 比の測定法？



^{12}CO : 円盤では光学的に厚い
→ 同位体比の測定が困難

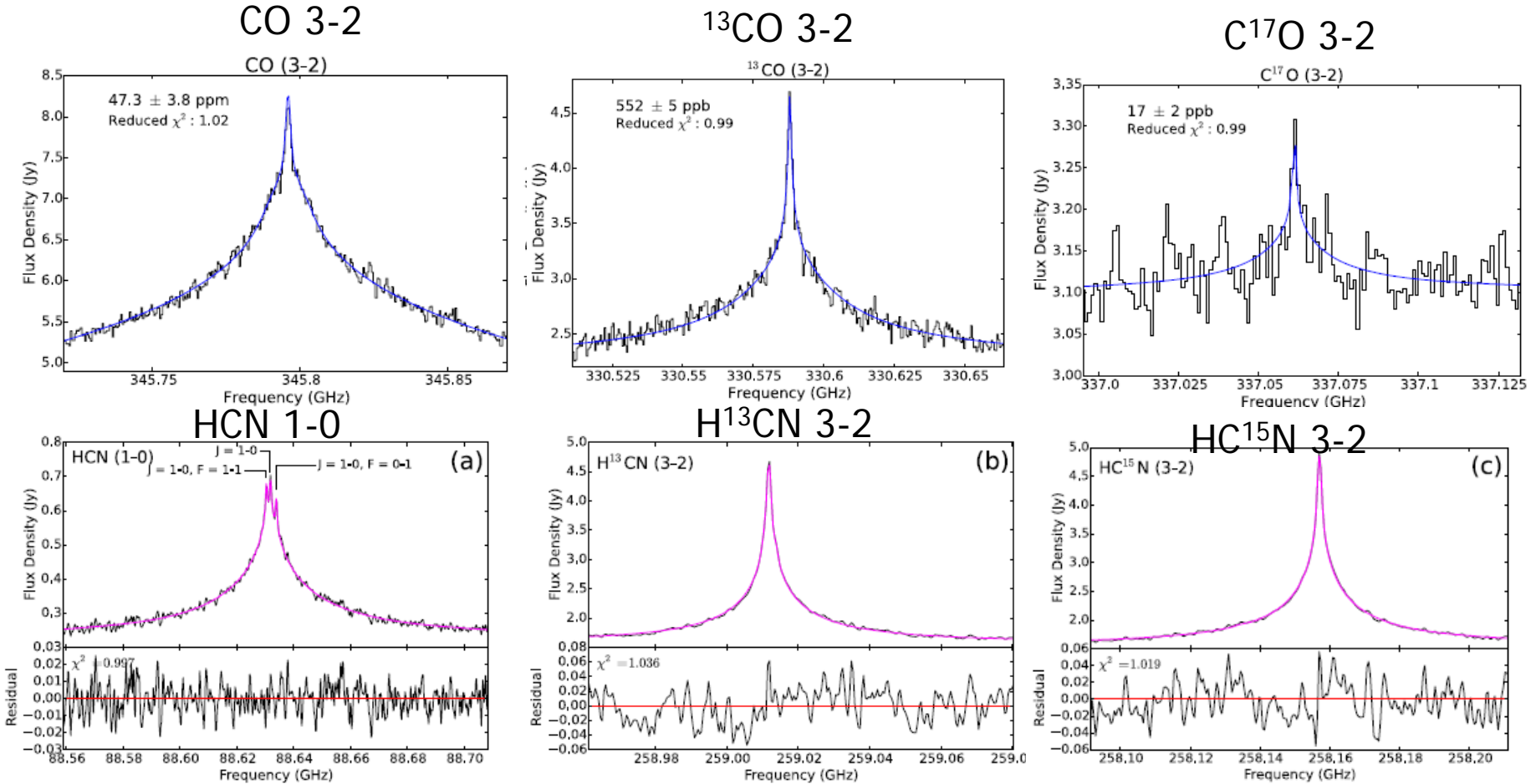


光学的に薄い輝線のウイング部分を利用して同位体比を測定

太陽系内天体(タイタン)での観測例

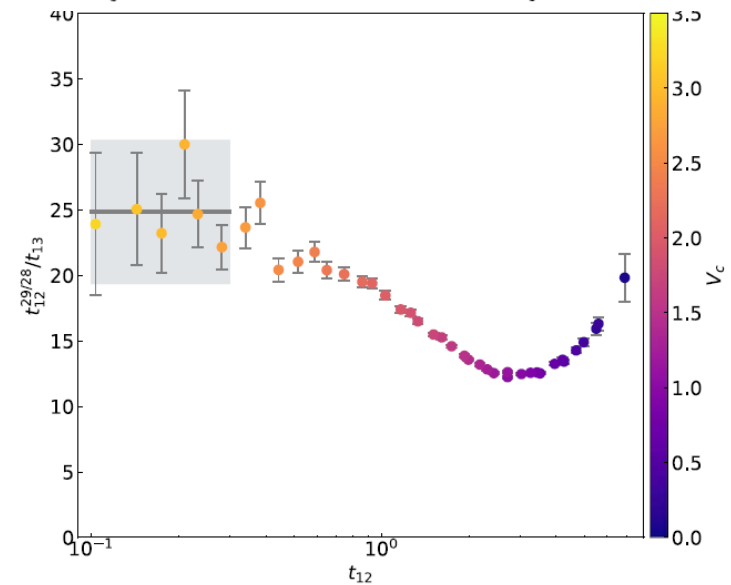
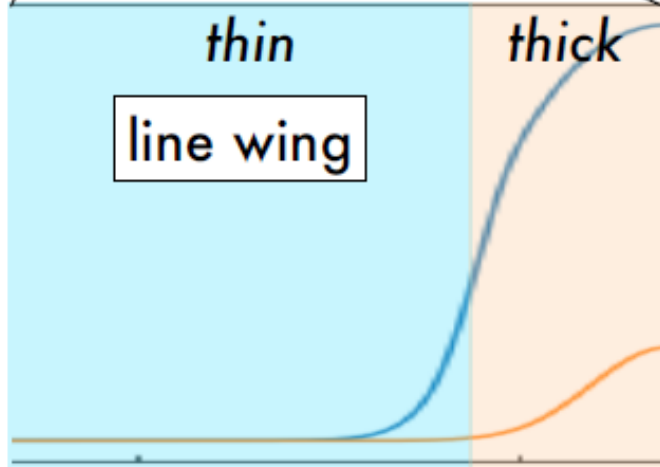
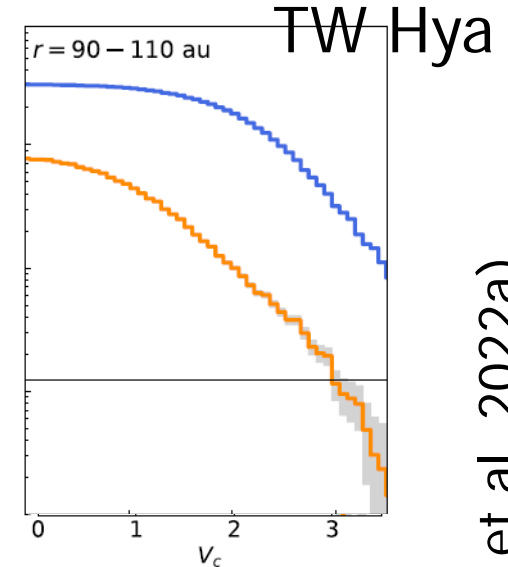
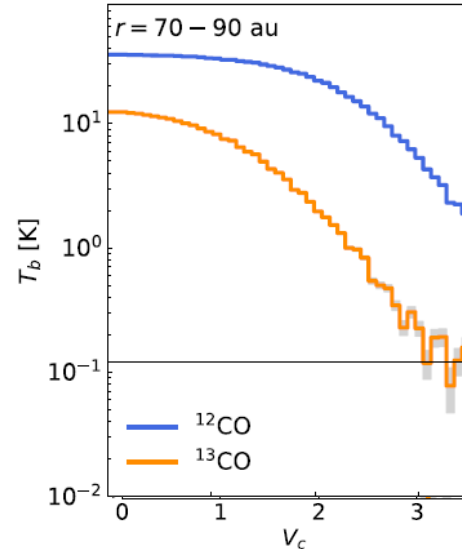
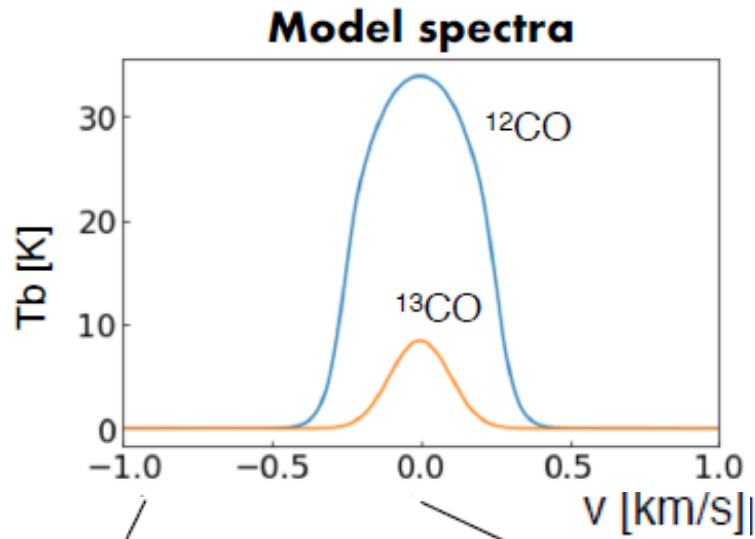
タイタン大気のALMA観測

(Serigano+ 2016, Molter+ 2016)



光学的に薄いライン・ウイングを用いて
同位体比を測定

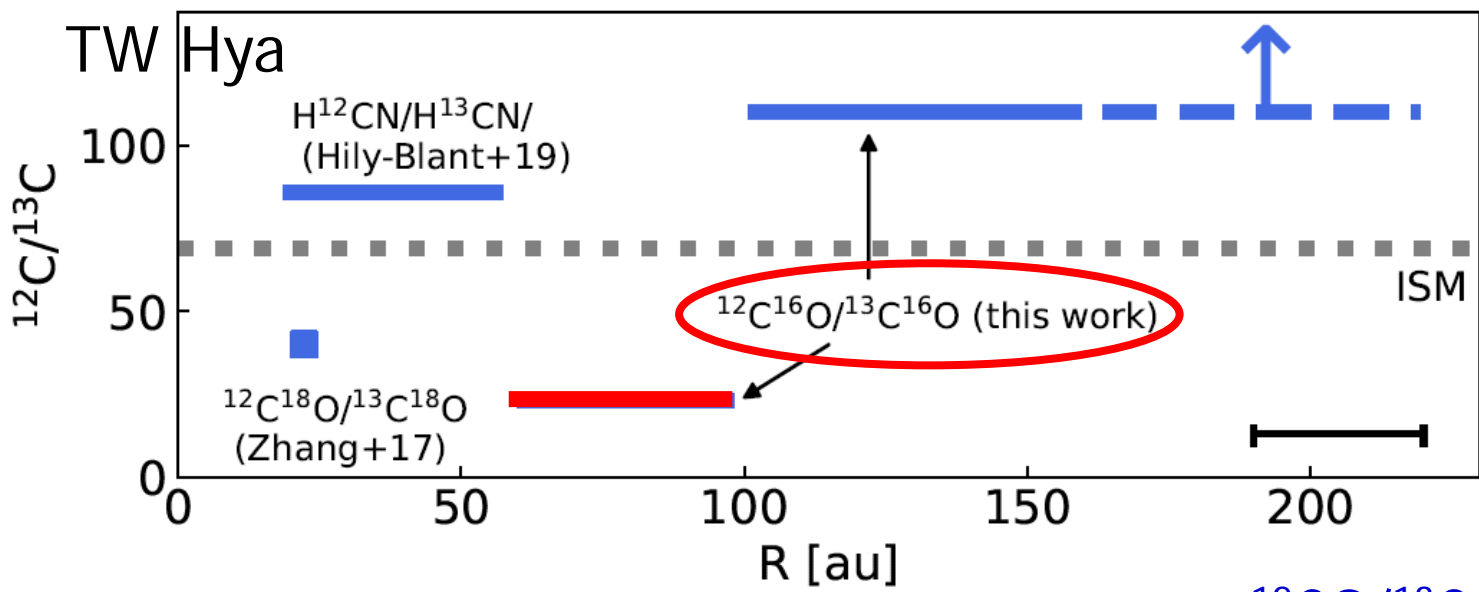
円盤における $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 比の測定



$^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO} = 21 \pm 5$ @ $R=70-110$ au

: 星間物質の平均値 (~ 69) に比べて小さな値

議論：炭素同位体比の偏りの生成過程

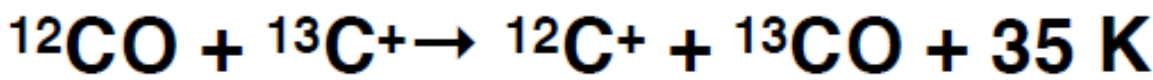


(Yoshida, HN et al. 2022a)

R < 100 au で $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 比が低い

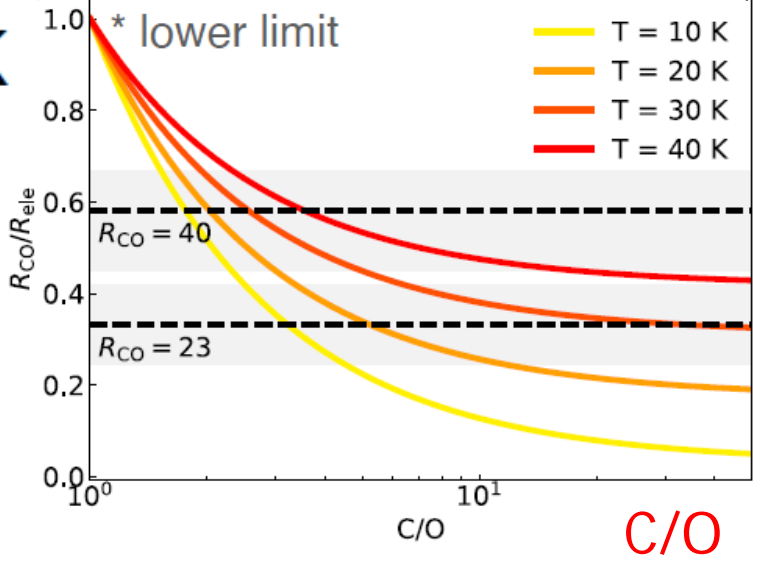
$^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$

(星間物質の平均値69で規格化)

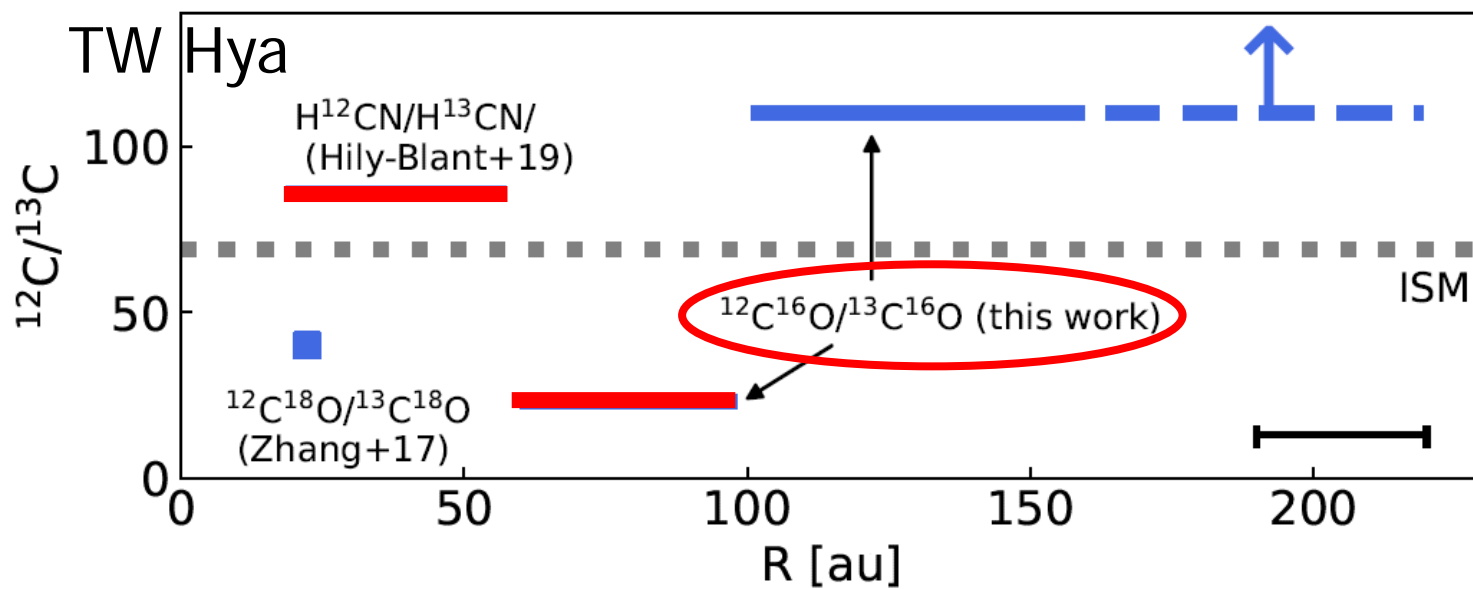


→ $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ の観測値は
C/O > 5, T < 30K で再現可

**$^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 比は C/O 比の
良いトレーサー**

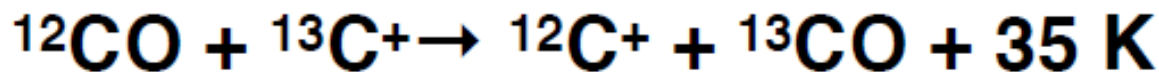


議論：炭素同位体比の偏りの生成過程



(Yoshida, HN et al. 2022a)

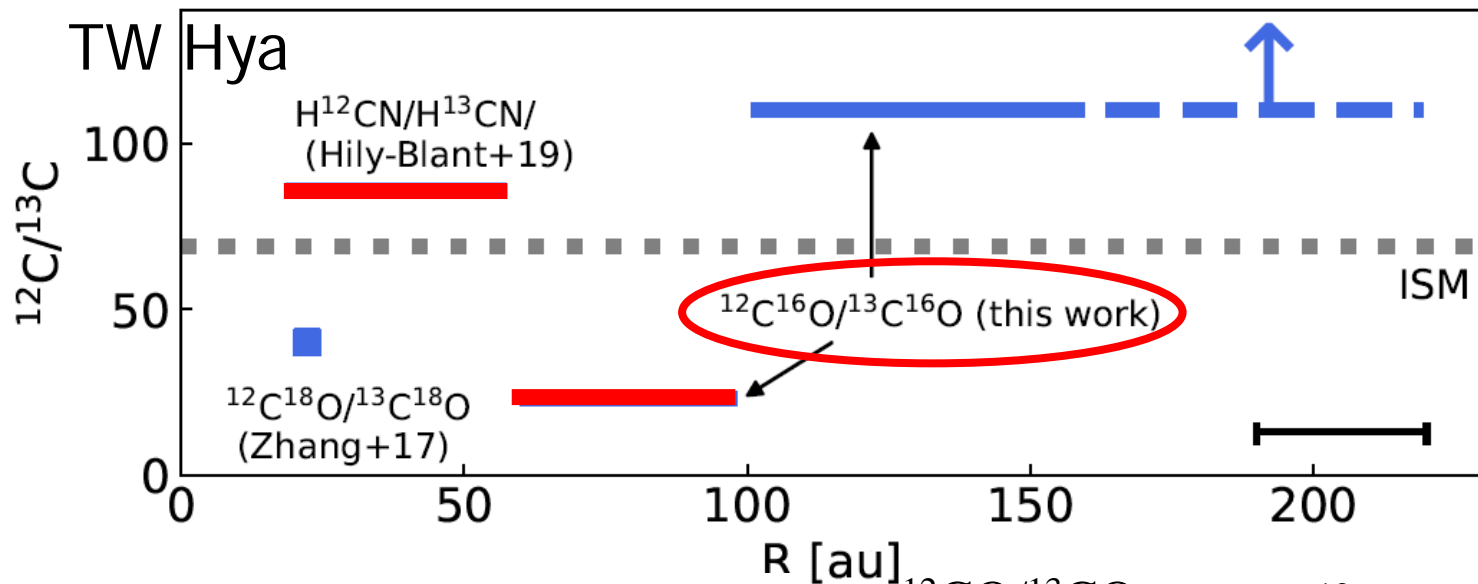
$R < 100$ au で $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 比が低く $\text{H}^{12}\text{CN}/\text{H}^{13}\text{CN}$ 比が高い



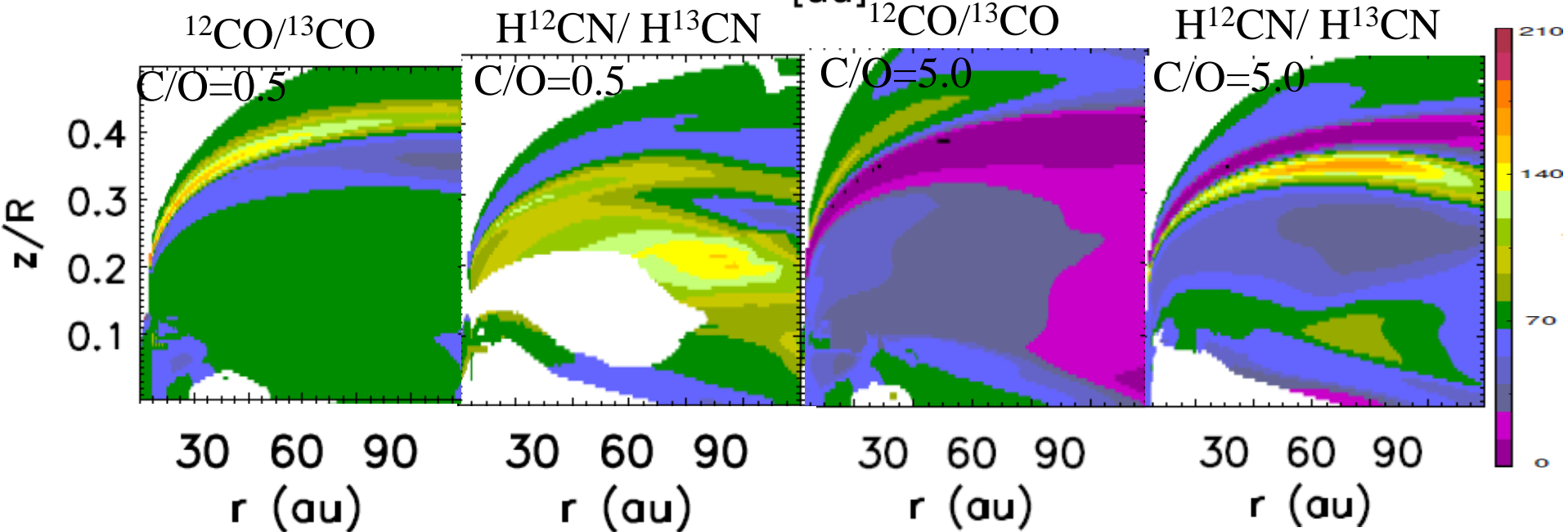
$$\frac{[\text{H}^{12}\text{CN}]}{[\text{H}^{13}\text{CN}]} \approx \frac{[^{12}\text{C}^+]}{[^{13}\text{C}^+]} = \exp\left(\frac{35 \text{ [K]}}{T}\right) \frac{[^{12}\text{CO}]}{[^{13}\text{CO}]}$$

$^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ と $\text{H}^{12}\text{CN}/\text{H}^{13}\text{CN}$ の観測値は
T~27Kで説明可

議論：炭素同位体比の偏りの生成過程



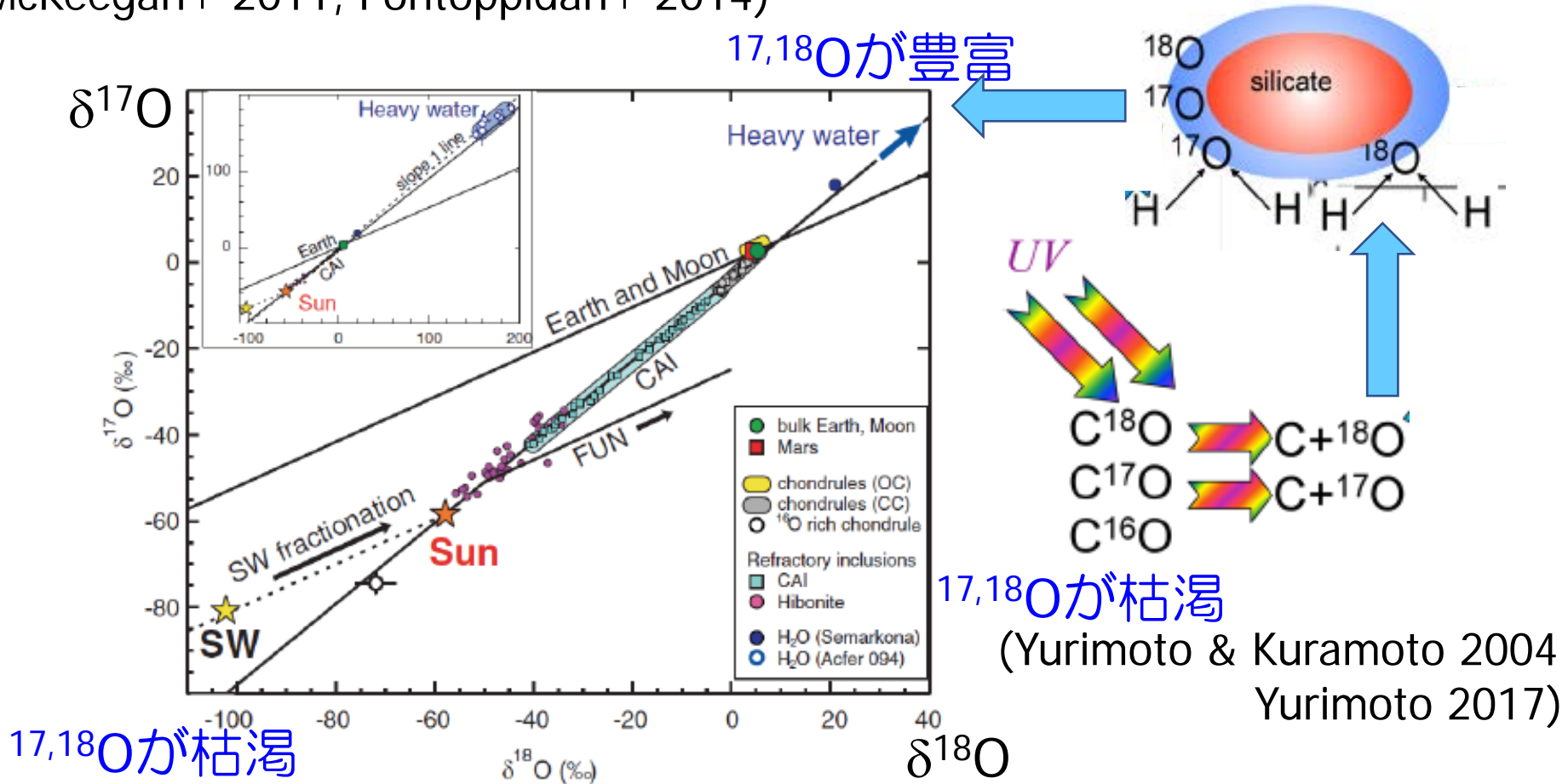
(Yoshida, HN et al. 2022a)



(Lee, HN et al. 2023, in prep.)

太陽系初期の酸素同位体異常の起源

(McKeegan+ 2011, Pontoppidan+ 2014)



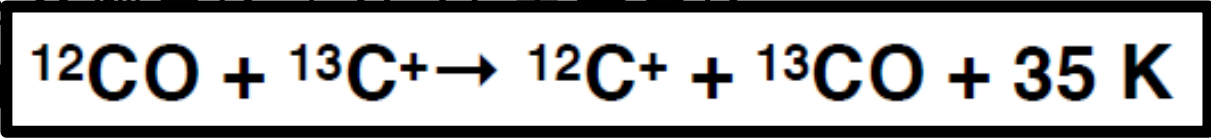
選択的光解離の効果により同位体分別したOが
 H_2O 氷になる→ $^{17,18}\text{O}$ が豊富な氷ができる

炭素同位体濃縮のモデル計算

炭素同位体を含む化学反応ネットワーク計算 (Furuya+ 2011, 2022)

炭素同位体交換反応 + ガス相と氷相

(三相モデル)



		気相			氷									
		C	HCN	CO	CO	CO ₂	H ₂ CO	CH ₃ OH	HCOOH	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₄	HCN	HNCO
A	X _{mol}	1.1(-9)	1.2(-8)	2.9(-6)	2.2(-5)	1.3(-6)	1.5(-5)	5.6(-5)	3.2(-9)	8.9(-7)	3.2(-8)	5.4(-8)	7.0(-8)	5.5(-8)
	¹² C/ ¹³ C	143	82	46	61	61	61	60	61	73	88	87	85	84
B	¹² C/ ¹³ C	148	67	48	61	58	61	60	61	75	83	64	74	80
C	X _{mol}	4.1(-17)	4.1(-13)	7.9(-15)	3.0(-7)	1.4(-10)	1.7(-7)	2.5(-7)	1.8(-14)	1.5(-7)	5.6(-9)	8.3(-8)	3.3(-6)	2.1(-10)
	¹² C/ ¹³ C	48	45	50	60	62	60	61	56	77	549	110	56	54

酸素を含む分子 (COから生成した分子) と炭素のみを含む分子 (C, C⁺から生成した分子) で ¹²C/¹³C 比が二極化

Ryuguサンプルに炭素同位体比の二極化が見られるか？

(Yabuta+ 2018, Noguchi+ 2018)

	CP MMs (anhydrous)			Fluffy fine grained MMs (hydrous)		
Sample ID	D10IB009	D10IB356	D10IB004	D10IB178	D10IB163	D10IB017
Mineralogy	GEMS, Olivine, pyroxene					olivine, Low-Ca pyroxene, Fe-rich spinel, Minor Mg-rich serpentine, Magnesite
Organic chemistry	Carboxylic acids, Aliphatic, Nitrile (CN) or N-heterocycles Abundant globules	COOH, Aliphatic	ketone, COOH Chondritic IOM-like	-	ketone, COOH Chondritic IOM-like One globule	Aromatic, Aromatic ketone, COOH Chondritic IOM-like
Isotope	$\delta^{15}\text{N} = \sim 600\text{‰} - 1,000\text{‰}$ $\delta\text{D} = \sim 8,000\text{‰} - 1,0000\text{‰}$	-	$\delta^{15}\text{N} = \sim 300\text{‰}$ $\delta\text{D} = \text{normal}$	-	-	-
Aqueous alteration	No	No	No	Weak	Weak	Moderate

原始太陽系円盤も炭素が豊富 (C/O > 1) だったのか？

有機物の官能基に炭素同位体比の2極化がとりこまれたものを、リュウグウ・サンプルに検出できるか？

Summary

原始惑星系円盤ダスト・ガスの高空間分解の観測
ギャップ・リング構造、周惑星円盤候補天体の発見

円盤内のダスト運動の観測的検証

円盤ガス輝線の圧力広がり発見

10Myrの円盤の $<5\text{au}$ に $7M_J$ のガスが存在
MRI dead zoneにおけるガス集積の兆候？

COスノーライン内側におけるCOガス枯渇

円盤COガス枯渇問題

円盤における気相分子の塵表面への凍結と
塵表面反応 x ダスト進化で説明可？

円盤における有機分子と同位体分子

複雑な有機分子や稀少同位体分子のALMA観測

x 同位体化学反応計算 x リュウグウサンプル

→ 原始太陽系星雲の環境を探る