

# Observer les disques protoplanétaires avec ALMA, premiers résultats

Edwige Chapillon

LAB/IRAM



© Padilla/ALMA

# ALMA

## ALMA spécifications :

- Early science

	Cycle 0	Cycle 1	Cycle 2
Antennes	16	32 + 9	34 + 9 + 2
Resolution	~400m	~ 1km	~ 1km (b8,9) ~ 1.5km (b3,4,6,7)
ACA, TP	non	ACA limité	ACA + TP limité
Recepteurs	3,6,7,9	3,6,7,9	3,4,6,7,8,9 (85–690 GHz)
Polarisation	non	non	limité

- Construction achevée :

	Final
Antennes	66 (50 12m + 12 7m + 4 12m)
Resolution	~ 16km
ACA, TP	ACA + TP
Recepteurs	(1,2) 3,4,6,7,8,9,(10) (30–950 GHz)
Polarisation	totale

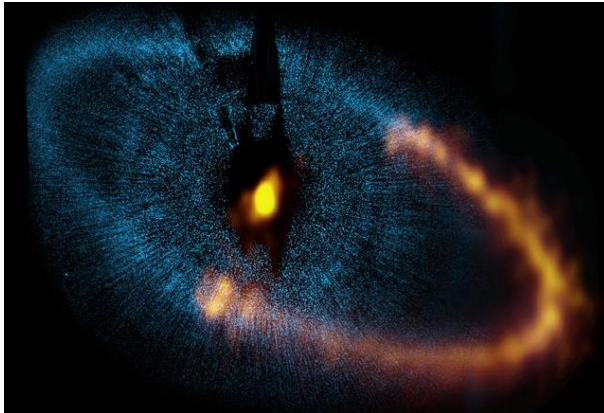
Résolution angulaire :

~ 2'' – –0.01''

Taille des disques  
protoplanétaires :  
100 – –1000UA

# Première publication ALMA : Fomalhaut

Boley et al. 2012 ApJ 750L 21B



- Observation continuum à 350 GHz,  $1.5 \times 1.2''$
- Anneau avec bords francs
- → confinement par des planètes

©ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) NASA/ESA Hubble Space Telescope

## Disques de transition

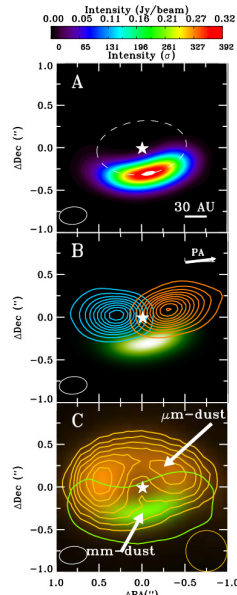
Disques dont la distribution en poussière montre une cavité interne, la cavité pouvant encore contenir du gaz

# Asymétries dans les disques : Oph IRS 48

## Van der Marel 2013 Science

- B9 observation ( $0.3 \times 0.2''$ ) de Oph IRS 48 (type A)
- très forte asymétrie du disque de poussière mm (contraste  $\sim 130$ )
- anneau en CO 6-5 et poussières  $\mu\text{m}$
- $\rightarrow$  “dust trap”, compagnon(s)

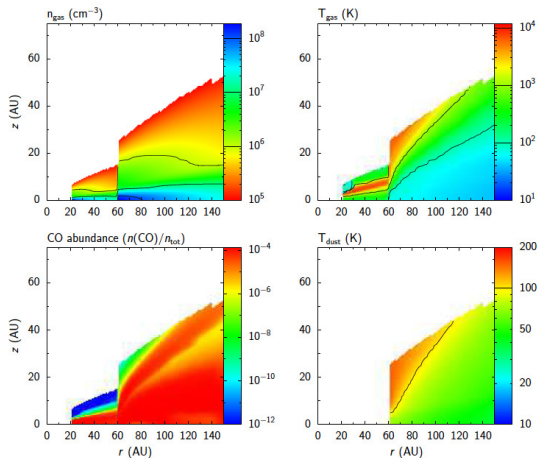
A : continuum à 685 GHz. B : émission intégrée CO 6-5,  
C : carte VLT/VISIR 18.7  $\mu\text{m}$



# Asymétries dans les disques : Oph IRS 48

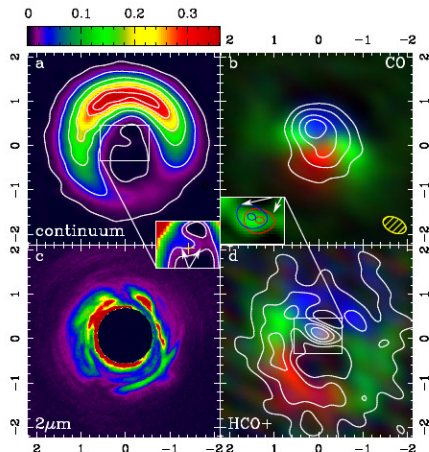
## Bruderer et al 2014

- $^{12}\text{CO}$  6-5 observation de Oph IRS 48
- model physico-chimique
- masse du disque de gaz  $\sim 1.4 \times 10^{-4} M_{\odot}$
- indiquerait gaz/poussière  $\sim 10$
- rayon interne en gaz  $\sim 20 \text{ AU}$
- companion(s)



# Asymétries dans les disques : HD 142527

Casassus et al 2013 *nature*



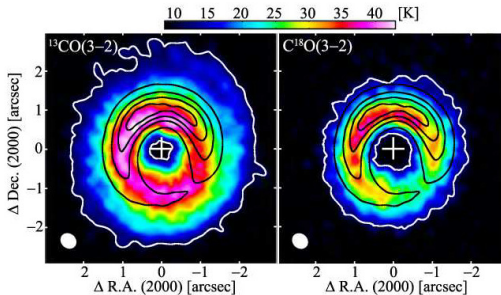
**Figure 1** ALMA observations of HD 142527, with a horseshoe dust continuum surrounding a cavity that still contains gas. We see diffuse CO gas in Keplerian rotation (coded in doppler-shifted colours), and filamentary emission in HCO<sup>+</sup>, with non-Keplerian flows near the star (comparison models illustrative of Keplerian rotation are shown in SI). The near-IR emission abuts onto the inner rim of the horseshoe-

- continuum +  $^{12}\text{CO}$  3-2 and HCO<sup>+</sup> 4-3 dans HD 142527 (HAe)
- forte asymétrie “fer à cheval” en continuum
- filament en HCO<sup>+</sup>

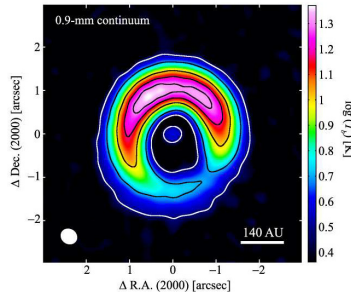
# Asymétries dans les disques : HD 142527

## Fukagawa et al 2013 PASJ

- continuum +  $^{13}\text{CO}$  et  $\text{C}^{18}\text{O}$  3-2 dans HD 142527
- anneau (en poussière et gaz) + disque interne
- forte asymétrie “fer à cheval”



contours noirs = continuum, couleur = gaz



continuum

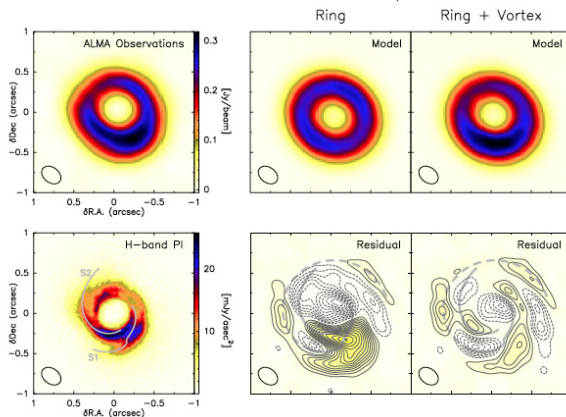
densité de surface au pic =  $28\text{g cm}^{-2}$  → gravitationnellement instable  
 ⇒ formation planétaire ?



# Asymétries dans les disques : SAO 206462 et SR 21

Perez et al. 2014

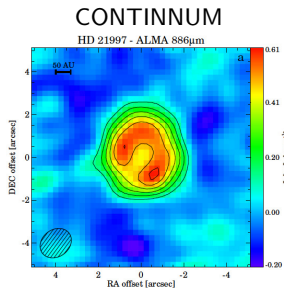
B9 observations continuum +  $^{12}\text{CO}$



- anneau + vortex (15 – 28 % du flux total)
- pour SAO 206462, coïncidence marginale avec la structure spirale détectée en IR

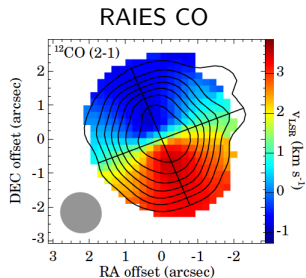
# Anneau “lisse” : HD 21997

Moor et al 2013 ApJ 777L ; Kospal et al 2013 ApJ 776



continuum à 886  $\mu$ m

- anneau “homogène”,
- rayon interne  $\sim 55$  AU



- $^{12}\text{CO}$  et  $^{13}\text{CO}$  2-1 et 3-2 +  $\text{C}^{18}\text{O}$  3-2
- pas de trou  $\rightarrow$  disque interne riche en gaz et dépourvu de poussières

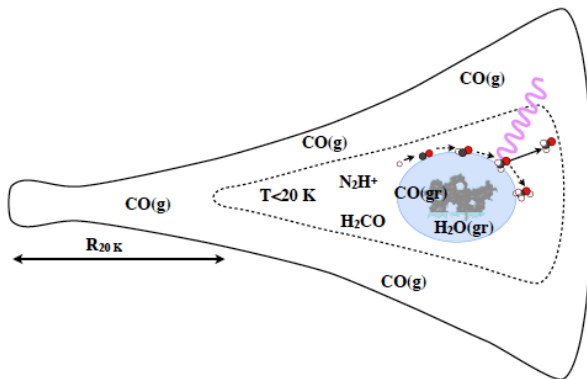
$\Rightarrow$  Disque “hybride” : gaz primordial et poussières de seconde génération

## Disques protoplanétaires

Disques riches en gaz ne présentant pas (encore ?) de cavités internes en poussières

# Structure des disques de gaz

En Théorie :

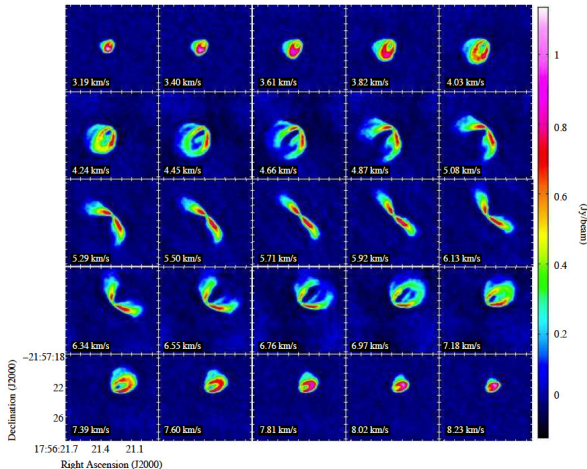


Qi et al 2013.

# Structure des disques de gaz – structure verticale

de Gregorio et al 2013 A&A, Rosenfeld et al. 2013 ApJ

Observation Science Verification de HD 163296 (Herbig Ae), B6 et B7, CO et continuum



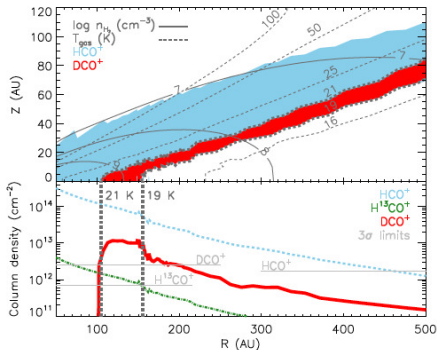
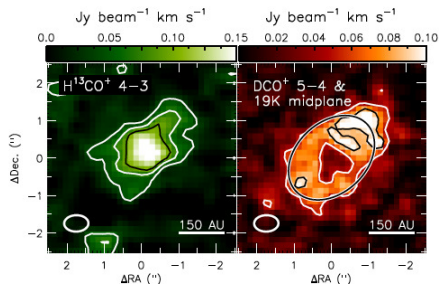
2 “couches” de CO  
→ CO déplété dans le plan du disque

$^{12}\text{CO}$  3-2 carte par canaux

# Structure des disques de gaz – structure radiale

Mathews et al 2013 A&A

$\text{DCO}^+$  et  $\text{HCO}^+$  dans HD 163296 (Science Verification)

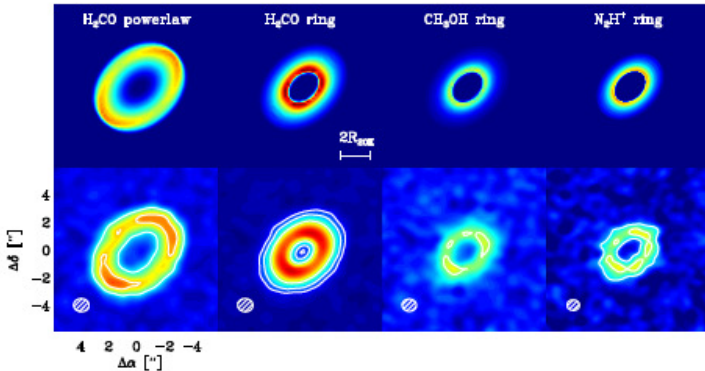


Limite des glaces CO  $\sim 155 \text{ AU}$

En accord avec la limite déduite des observations SMA (CO Qi et al 2011 et  $\text{H}_2\text{CO}$  Qi et al 2013)

# Structure des disques de gaz – structure radiale

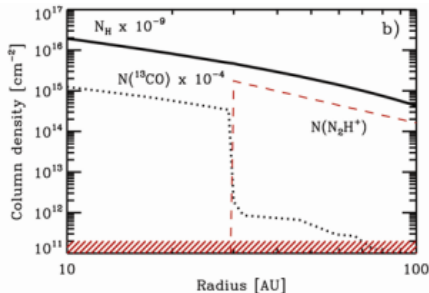
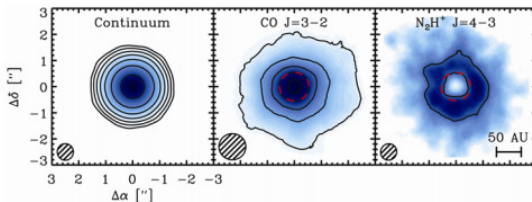
Limite des glaces de CO dans HD 163296, prédiction ALMA



Qi et al 2013

# Structure des disques de gaz – structure radiale

Öberg, Qi et al 2013  $\text{N}_2\text{H}^+$  dans TW Hya (Science Verification)



CO snow-line  $\sim 30$  AU

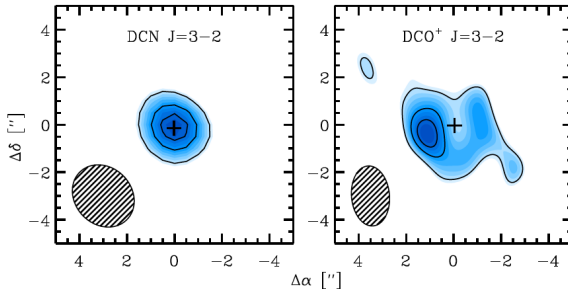


# Un peu de chimie – TW Hya

## Öberg et al 2012

Multiple mécanisme de deutération

DCN (ALMA science verification),  $\text{DCO}^+$  (SMA) 3-2



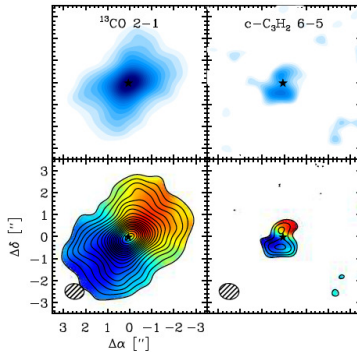
- DCN pique au centre,  $\rightarrow$  dans la région chaude  
Il existe une réaction de formation à  $T > 30 \text{ K}$  par  $\text{CH}_2\text{D}^+$
- $\text{DCO}^+$  est en anneau, formation à  $T < 30 \text{ K}$  avec  $\text{H}_2\text{D}^+$

# Un peu de chimie – TW Hya

Qi et al 2013

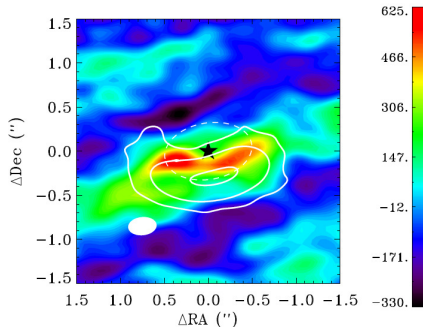
Détection de nouvelle molécules :

c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> dans TW Hya (Science Verification)



# Un peu de chimie – Oph IRS 48

van der Marel et al 2014



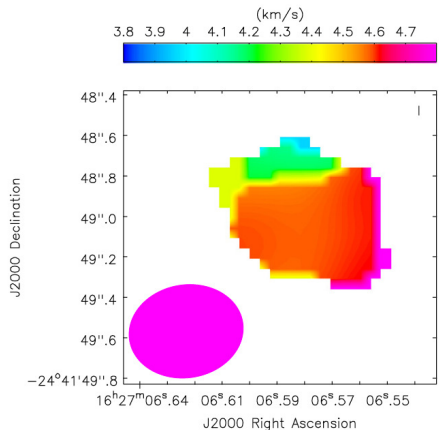
Carte d'intensité intégrée de  $\text{H}_2\text{CO}$  9(1,8)-8(1,7) sur Oph IRS 48

- distribution spatiale corrélée avec la poussière
- pas bien reproduit par les modèles
- abondance  $\sim 10^{-8} / \text{H}_2$

# $\rho$ -Oph 102

## Ricci et al 2012 ApJ 761L

- Observations B3 (100 GHz) et B7 (345 GHz) continuum + DCO<sup>+</sup>
- Resolution  $\sim 1.7''$  B3 et  $\sim 0.6''$  B9
- Disque non résolu
- Rayon externe  $\leq 40$  AU
- indice spectral  $\sim 2.3 \rightarrow$  grain mm
- Détection d'une composante compacte en <sup>12</sup>CO 3-2 à la position de l'étoile
- Masse  $\sim 0.3\%$ –1% du disque



# Résumé

## ALMA

Publications : Science Verification ou Cycle 0

Augmentation :

- de la sensibilité (nombre d'antennes)
- de la résolution angulaire (ligne de base)
- de la bande passante + flexibilité du corrélateur
- spectro-imagerie multi-logueur d'onde
- polarisation

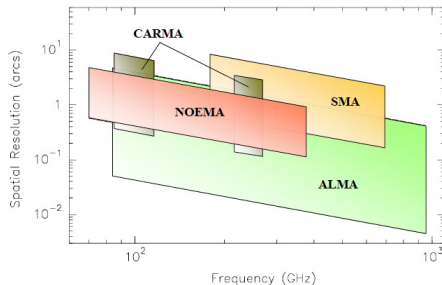
⇒

- imager les structures des disques
  - en poussière (interaction disque-planète...)
  - en gaz (condition physico-chimique...)
- structure des disques de poussières / évolution (grossissement des grains, sédimentation...)
- chercher de nouvelles molécules (étudier les disques couches par couches), survey
- meilleur analyse de la cinématique
- meilleur imagerie des disques internes, complémentarité avec l'IR/visible
- champ magnétique ?

Mais, même ALMA est limité en sensibilité

# Résumé

## Ne pas oublier NOEMA



À terme, sensibilité en continuum seulement 2 fois moins que (full) ALMA

## Développement des modèles de disques

nécessaire pour pouvoir interpréter les observations (observables)

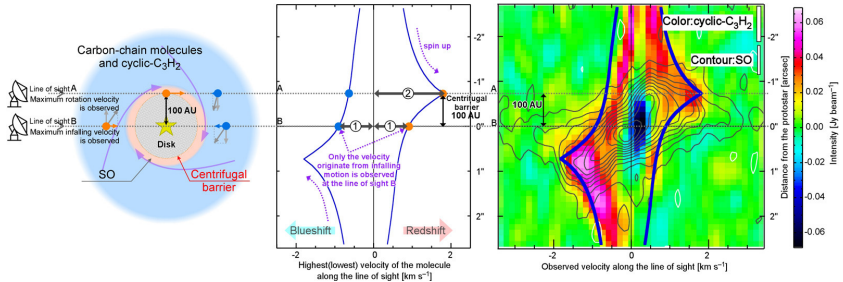
modèles physique ET chimique

# MERCI !



# Classe 0 L1527

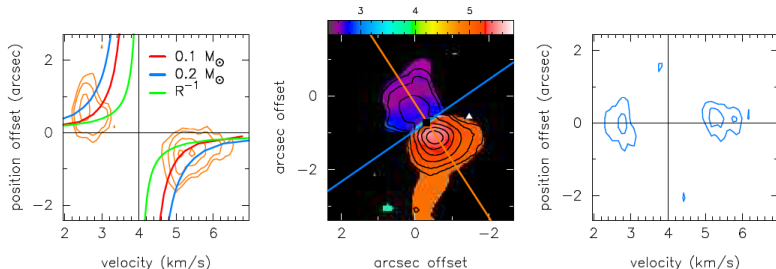
## Sakai et al 2014 Nature





# Classe 0 VLA1623

Murillo et al 2013 A&A

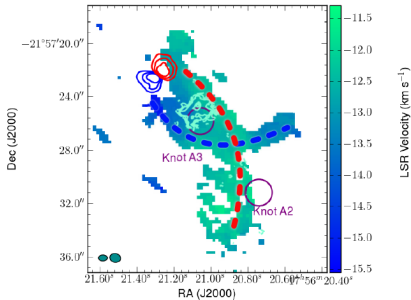


**Fig. 2.** Observed C<sup>18</sup>O (2-1): *Left:* Pure Keplerian rotation curves ( $v \propto R^{-0.5}$ , red and blue) and infall ( $v \propto R^{-1}$ , green) are overlaid on the PV diagram. This suggests that the emission may be rotationally supported with  $M_* \sim 0.1-0.2 M_\odot$ . *Center:* C<sup>18</sup>O velocity map (Moment 1, half-tone) and intensity integrated (Moment 0, contours) maps. Contours are in steps of  $3\sigma$ ,  $5\sigma$ ,  $10\sigma$ ,  $15\sigma$ ,  $20\sigma$  and  $25\sigma$  with  $\sigma = 13 \text{ mJy beam}^{-1}$ . VLA1623A and B's positions are marked with a square and triangle, respectively. Orange and blue lines indicate the image-space PV diagram cuts at PA =  $35^\circ$  (left) and  $125^\circ$  (right), respectively. *Right:* Lack of velocity gradient suggests no outflow contamination on the C<sup>18</sup>O emission. In both PV diagrams contours are in steps of  $3\sigma$ ,  $5\sigma$ ,  $10\sigma$  and  $15\sigma$  where  $\sigma = 19 \text{ mJy beam}^{-1}$  and the black lines indicate the systemic velocity and position of VLA1623A.

- C<sup>18</sup>O 2-1 + continuum
- 3 sources continuum
- disque en rotation képlérienne autour de VLA1623 A (rayon  $\sim 150 \text{ AU}$ ,  $M_* \sim 0.2 M_\odot$ )

# Outflow : HD 163296

Klaassen et al 2013 A&A



- B6 et B7 observation de HD 163296 (Science Verification)
- outflow / vent de disque en CO
- CO 3-2 pics correspondant aux “knots HH”

