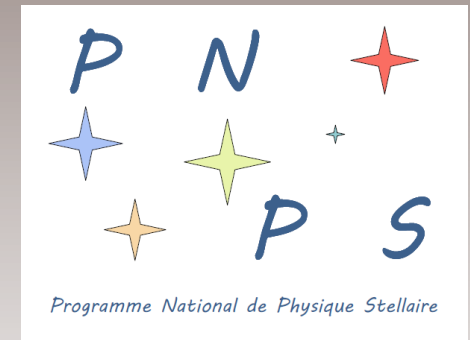


# PNPS thème Origines Bilan des résultats 2014-2018

Frédérique Motte, Fabrice Herpin et Nicolas Grosso  
pour le CS du PNPS

1. Phases précoces de la formation des étoiles
2. Population/amas d'étoiles jeunes
3. Processus d'accrétion et d'éjection
4. Disques protostellaires à protoplanétaires

Merci de vos inputs !



# Phases précoces de la formation des étoiles

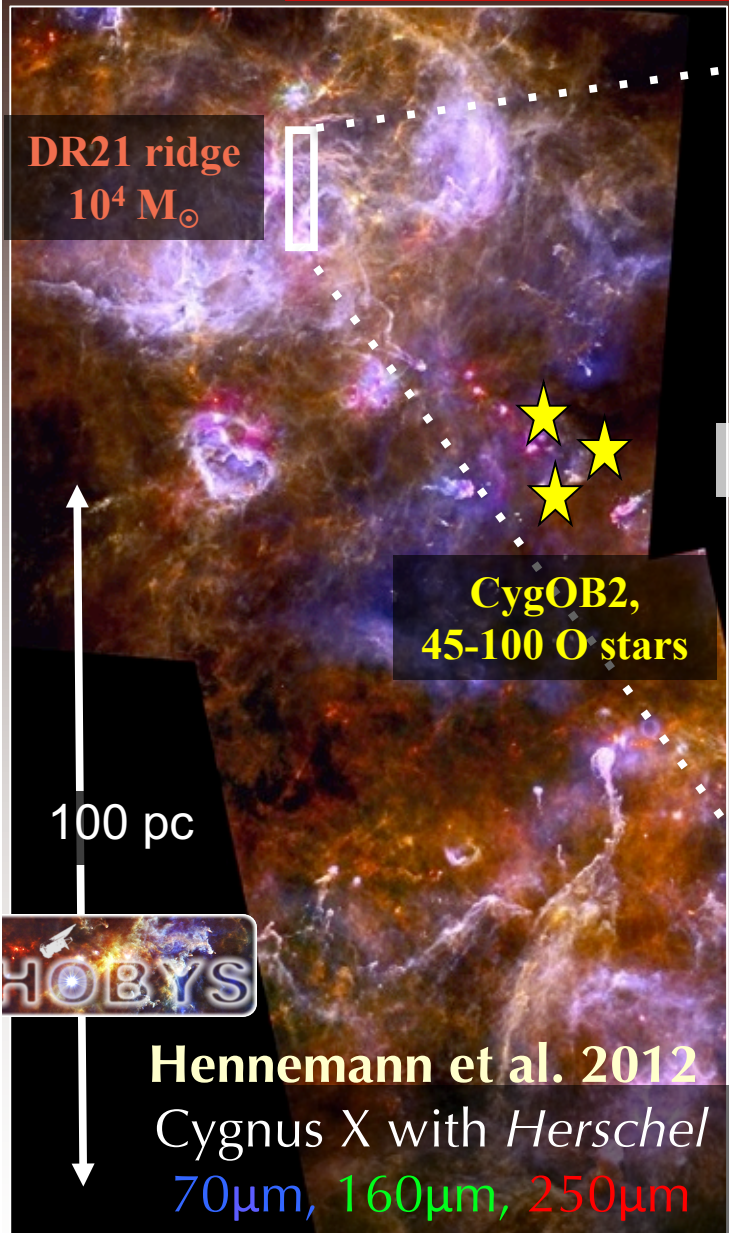
## Questions ouvertes :

- Quelle est l'origine de la fonction de masse initiale des étoiles ?
- Le processus de formation des étoiles est-il identique pour les étoiles massives ?
- Quel est l'impact de l'environnement (filaments, dynamique, B-field) ?
- Comment évolue la chimie des phases précoces ?
- ...

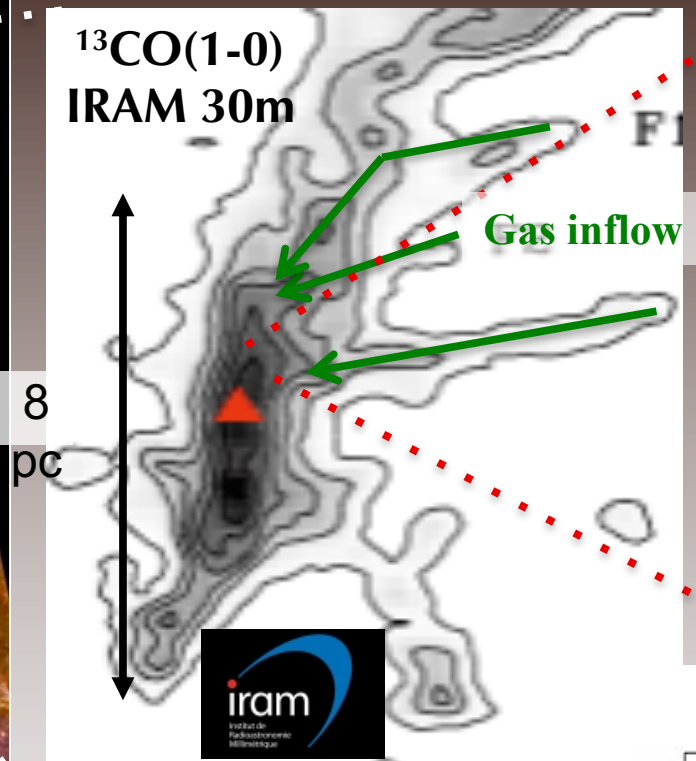
**Des observations** plus haute résolution angulaire : de Herschel à ALMA

**Des modèles** de proto-amas (échelle du kpc au 0.1 pc), incluant plus de physique (feedback)

# A dynamical link between clouds and protostars

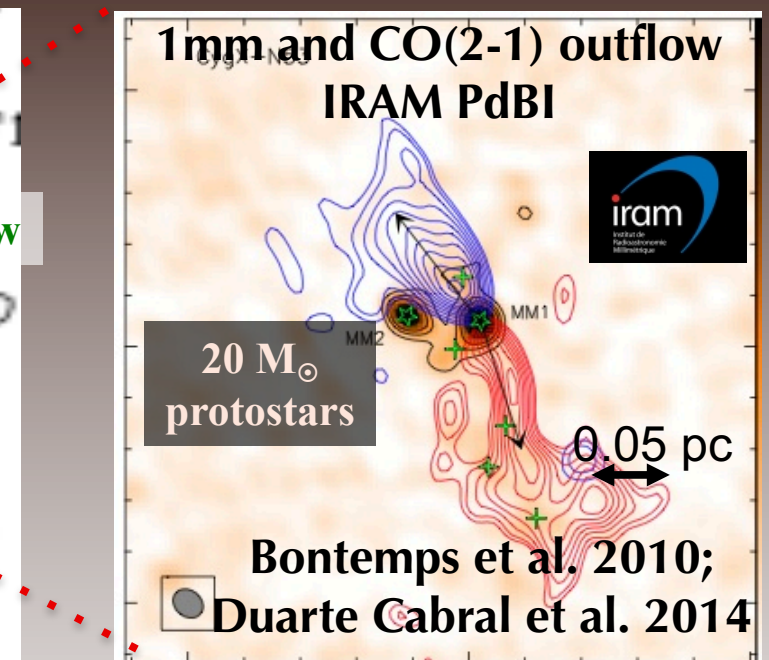


Montpellier 2018

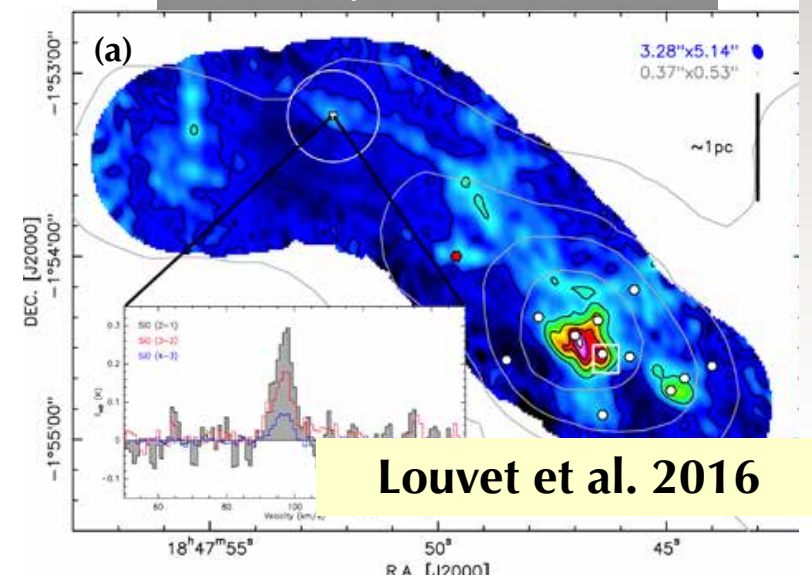


Schneider et al. 2010

Colloque d



Low-velocity shocks at cloud scale

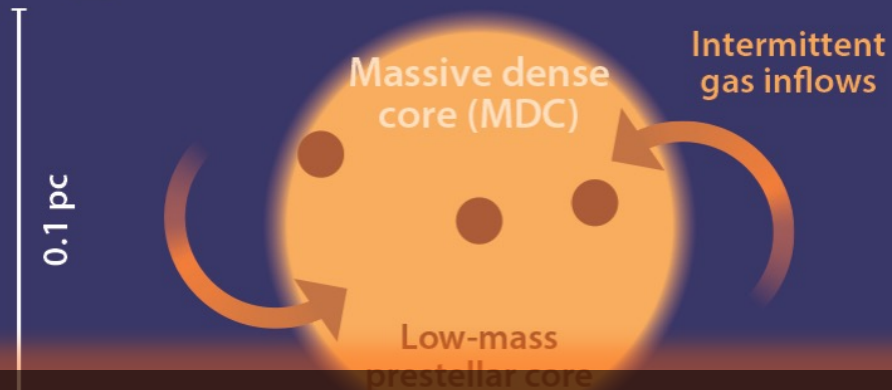




# In dynamical regions, the “gas reservoir” is not a single “core”

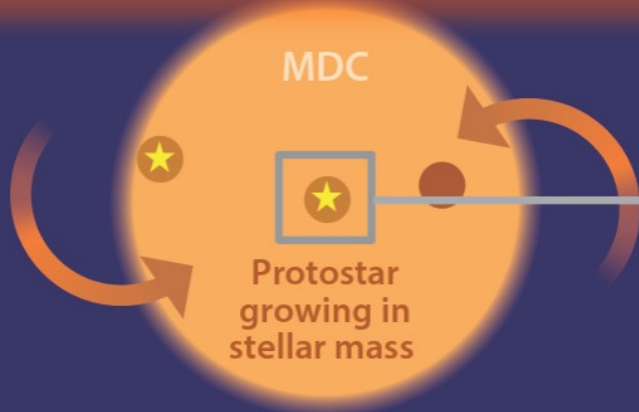
## MASSIVE DENSE CORE PHASES

2 Starless MDC phase ( $\sim 10^4$  year)



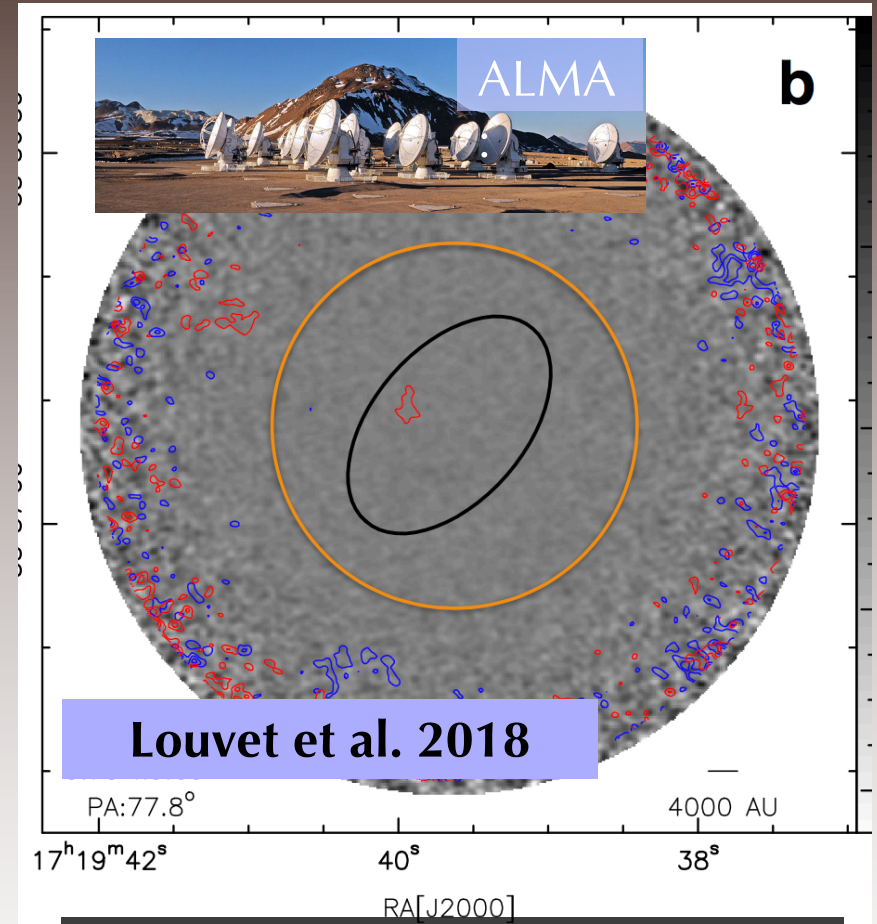
Low-mass prestellar cores become protostars with increasing mass

3 Protostellar MDC phase



Motte, Bontemps, & Louvet ARA&A 2018

Montpellier 2018



Louvet et al. 2018

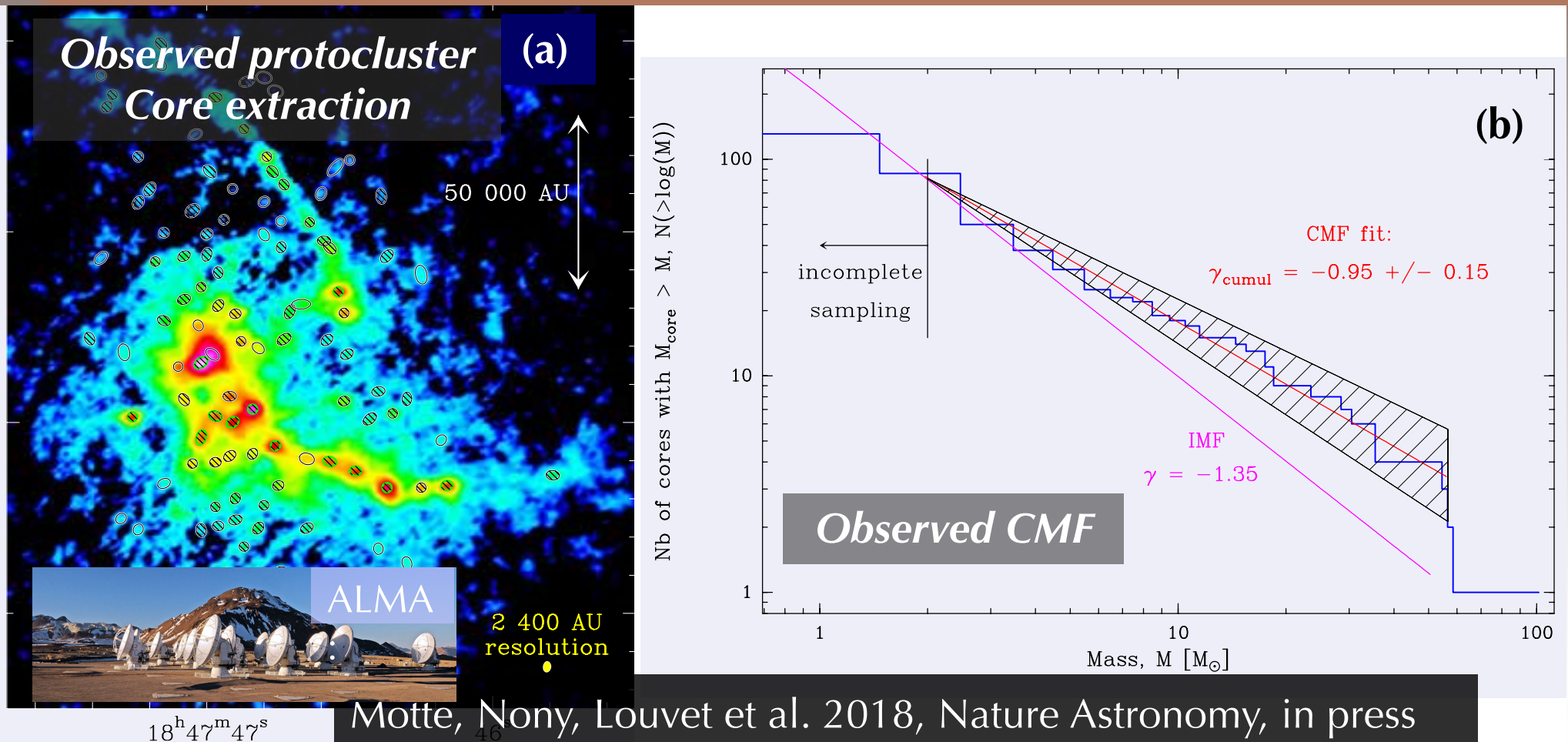
In Herschel MDCs, 0.15 pc,  $100 M_{\odot}$  no core is detected above the  $5\sigma$  mass sensitivity of  $\sim 0.1 M_{\odot}$

Colloque de prospective du PNPS



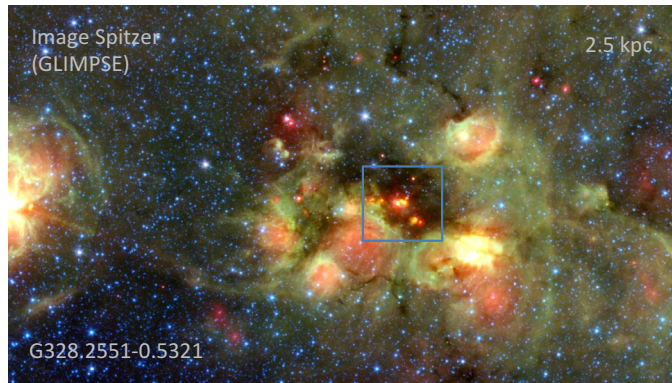
# Is the Core Mass Function at the origin of the IMF in dynamical clouds?

In a massive protocluster, the CMF is much flatter (top-heavy) than usually found. Perspective: ALMA-IMF large program in Cycle 5...

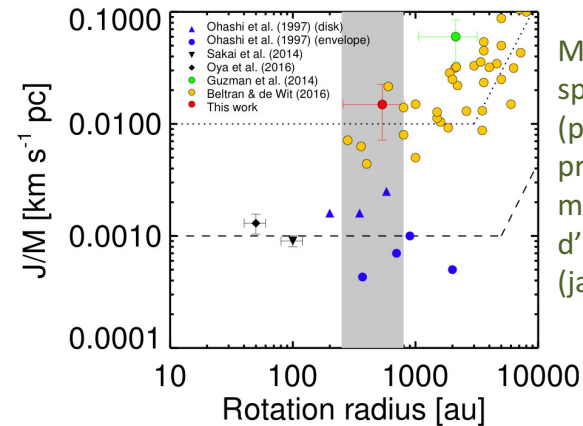


# Observations ALMA de Class 0 massives

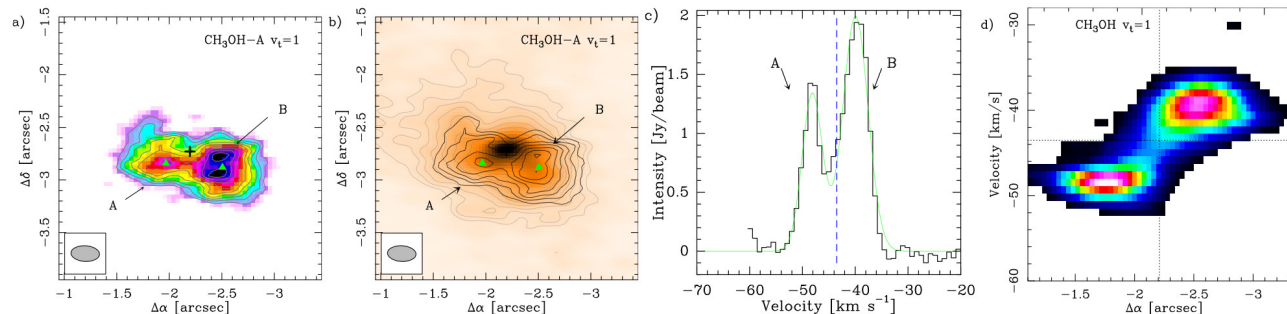
SPARKS – Un relevé ALMA vers les 35 clumps massifs les plus proches



Région observée avec ALMA (carré bleu) pour G328.25.



Moment angulaire spécifique pour G328.25 (pt rouge) par rapport aux proto-étoiles de faible masse (pts bleus) et d'autres objets massifs (jaunes).



Deux pics en  $\text{CH}_3\text{OH}$  excité ( $v=1$ ) vers chocs d'accrétion au rayon centrifuge dans G328.25 ? (Csengeri et al. 2018).

- 120 class 0 massives, moins de 15 candidats cœurs pré-stellaires massifs.
- Fragmentation réduite et effondrement « pc scale » (Csengeri et al. 2017).
- Chocs d'accrétion au rayon centrifuge de G328.25 (Csengeri et al. 2018).
- Moment angulaire initial 10x supérieur pour proto-étoiles massives ?

# Astrochimie des proto-étoiles massives

- Recherche de molécules complexes rares: projet W43-MM1 (Molet et al.).
- Analyse astro-chimique complète: CygX-N63 et DR21(OH) (Bontemps, Fechtenbaum et al.).
- Origine des cœurs chauds par chocs d'accrétion: SPARKS (Csengeri et al.).

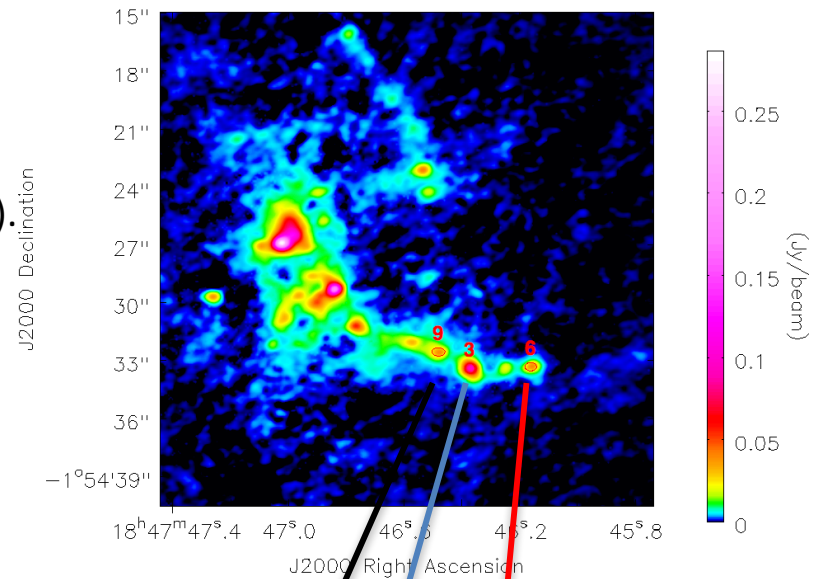
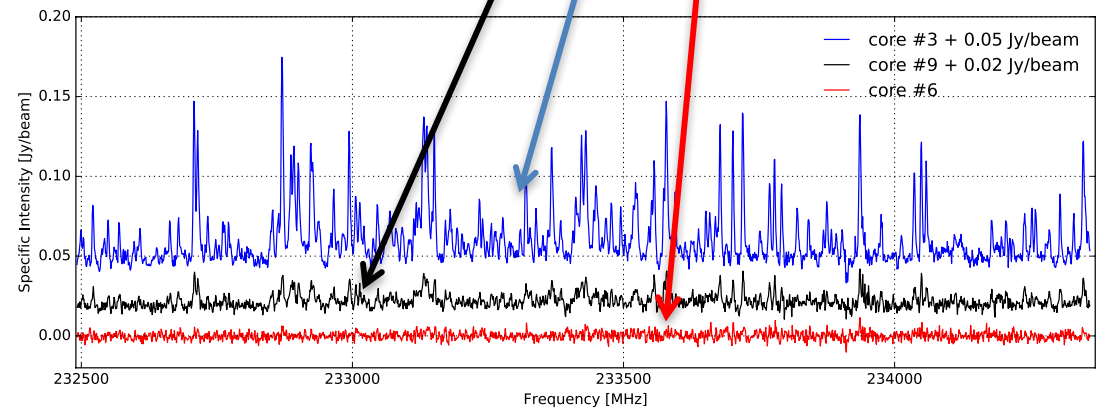
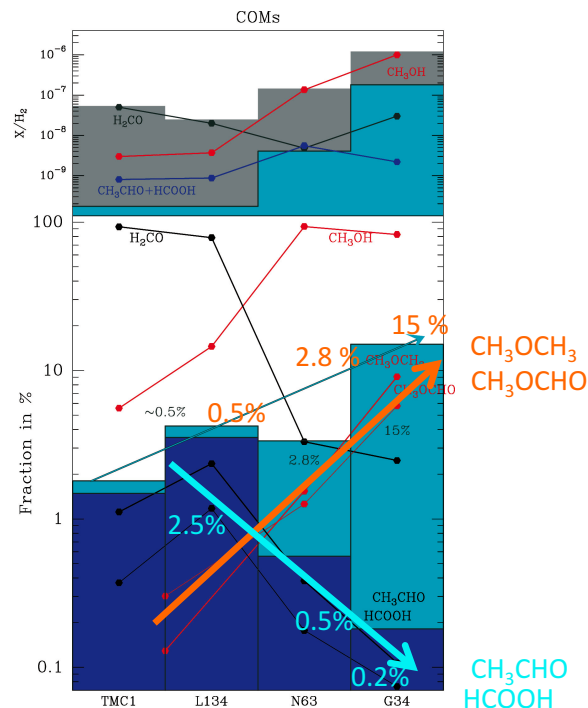


Image du continuum ALMA vers W43-MM1 avec méthode statistique de séparation continuum-raie (Molet et al.; thèse).



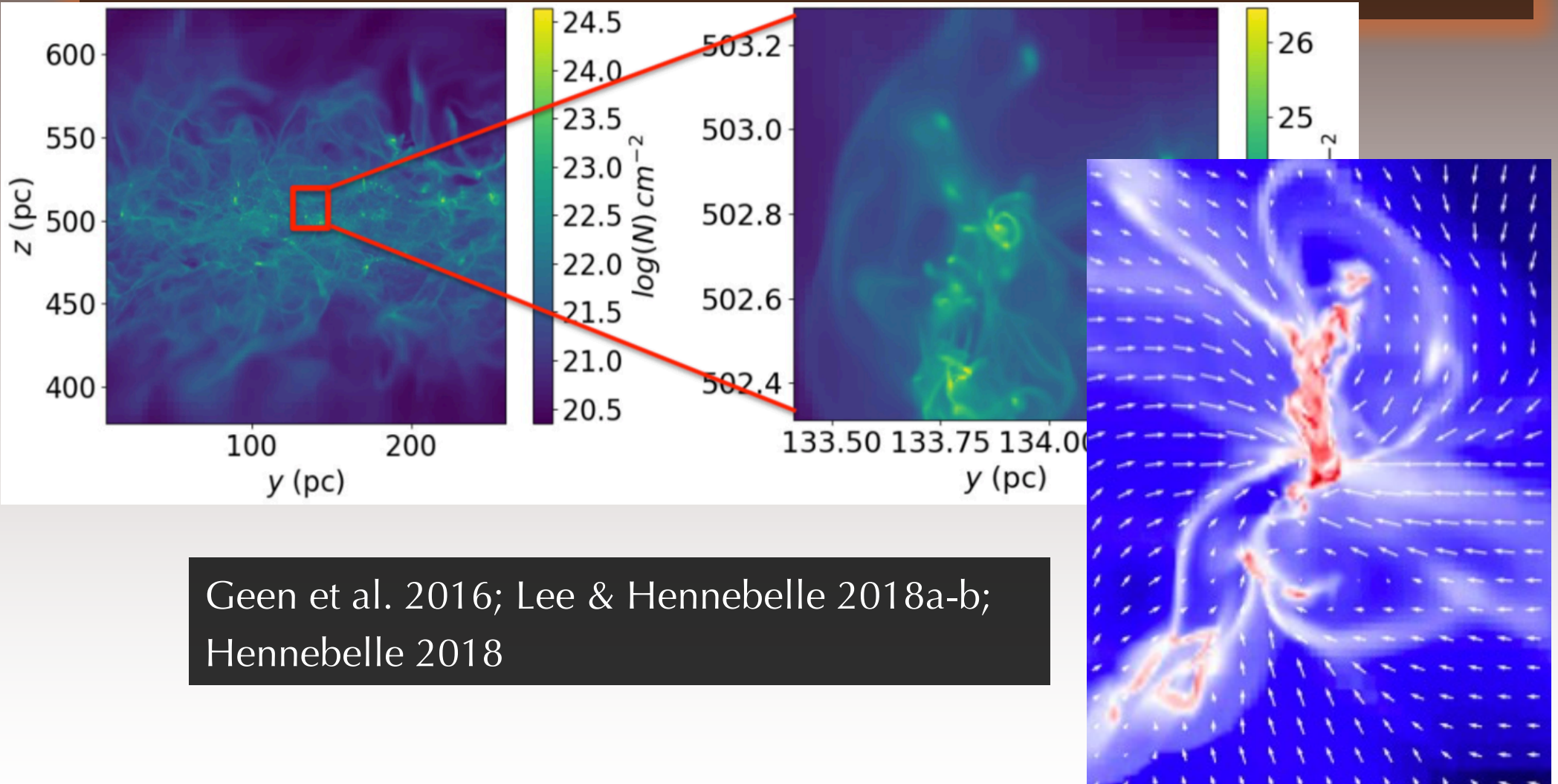
Spectres obtenus vers les sources #3, 9 et 6 de W43-MM1 (Molet et al.).

Evolution chimique des molécules complexes de 1<sup>ère</sup> (cyan) et 2<sup>nde</sup> (orange) génération vers la formation de cœurs chauds (Bontemps et al. en prép).



# RAMSES simulations of proto-clusters

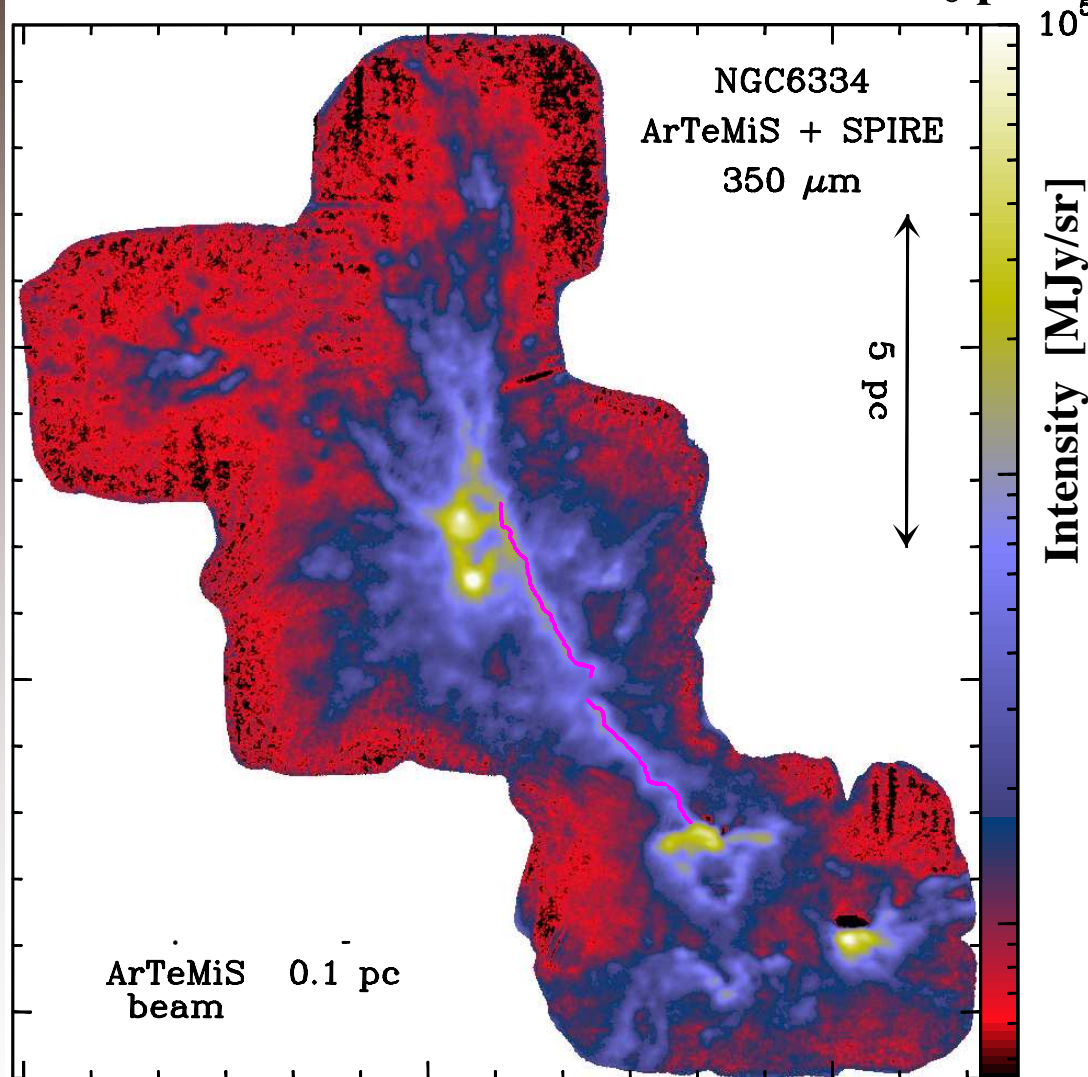
Simulations from galactic scales (kpc) to zoom simulations down to core scales (0.01 pc). A lot to investigate (CMFs...)



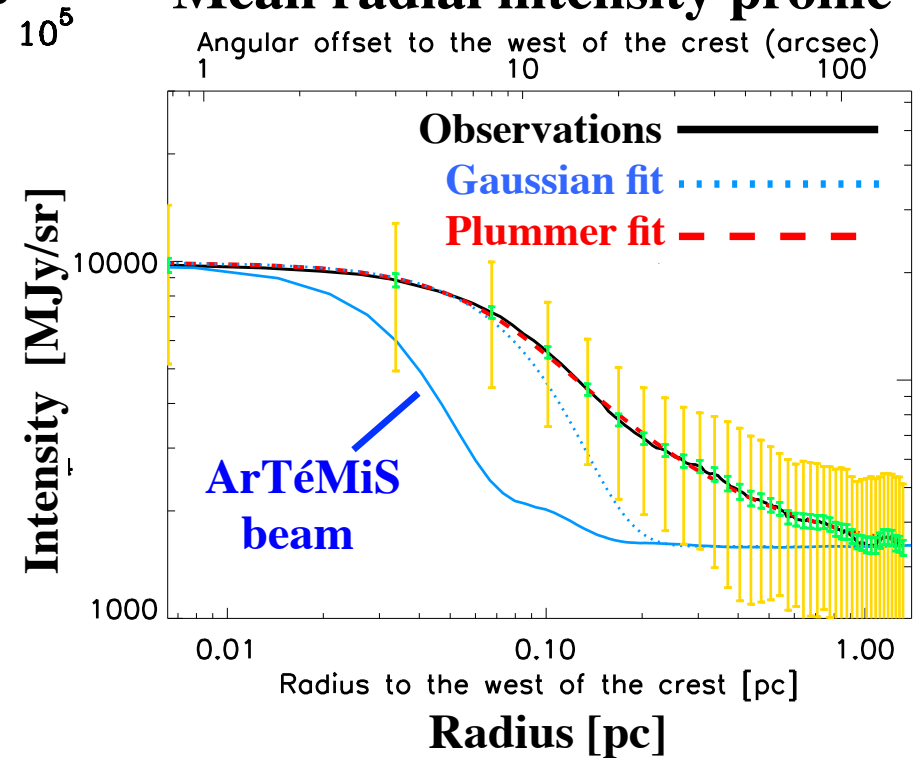
Geen et al. 2016; Lee & Hennebelle 2018a-b;  
Hennebelle 2018

# ArTéMiS: A powerful tool to study the properties/role of filaments in massive SF complexes beyond the Gould Belt

NGC6334 main filament:  $M/L \sim 1500 M_{\odot}/pc$



Mean radial intensity profile



- Deconvolved FWHM width and diameter of flat inner part:  $0.15 \pm 0.04$  pc (Linear resolution:  $8''$  or  $0.066$  pc)
- Consistent with *Herschel* results in nearby GB clouds (Arzoumanian+2011/18)

André, Revéret, Könyves+2016 - See Russeil+2013 & Tigé+2017 for *Herschel*/HOBYS results on NGC6334

## Population/amas d'étoiles jeunes

### Questions ouvertes :

- La fonction de masse initiale (IMF) des étoiles est-elle universelle ?
- Quelle est la multiplicité des étoiles jeunes ?
- Quelles sont les propriétés des étoiles qui sont héritées des caractéristiques du nuage ?

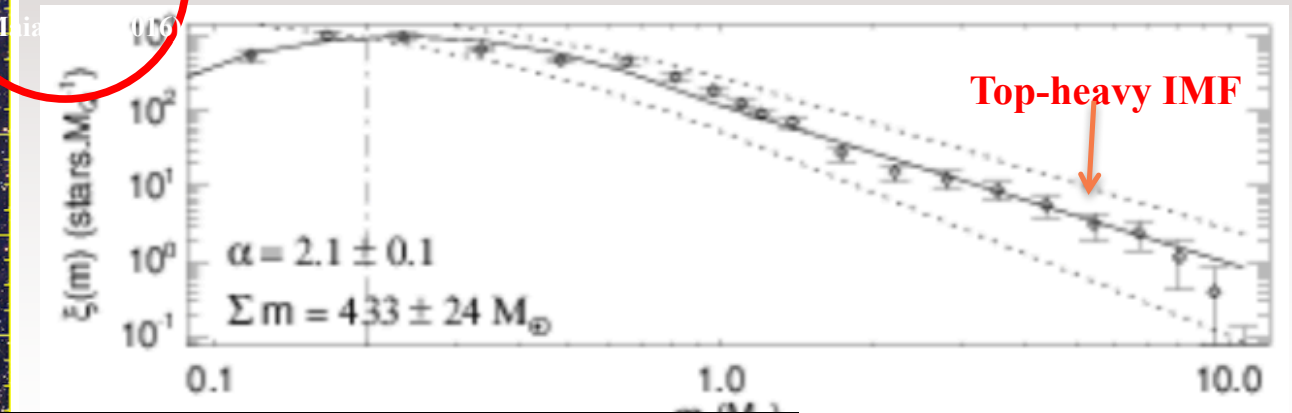
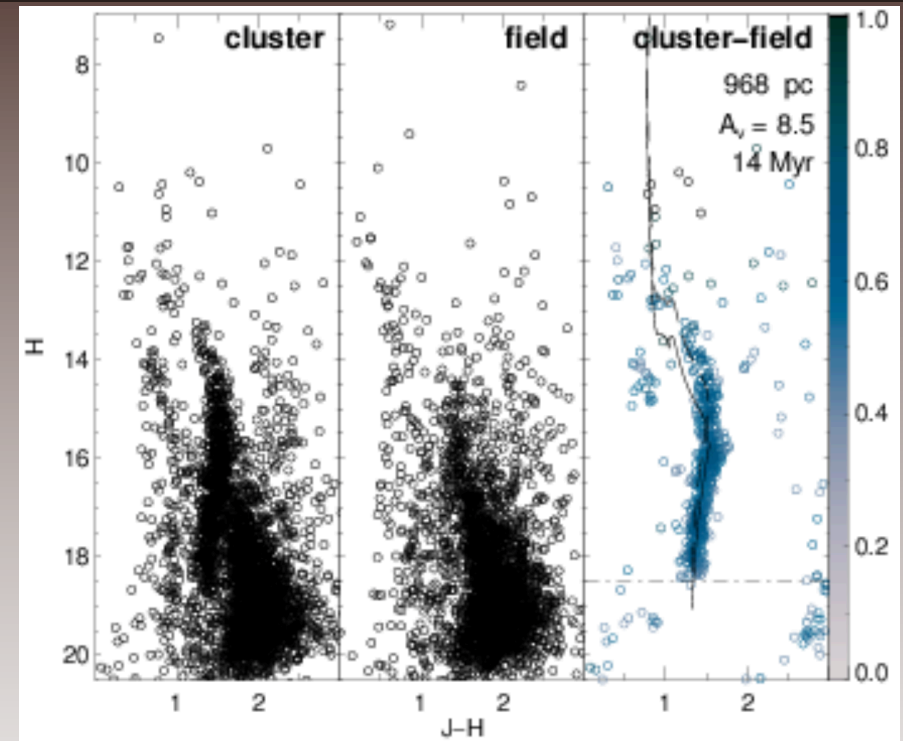
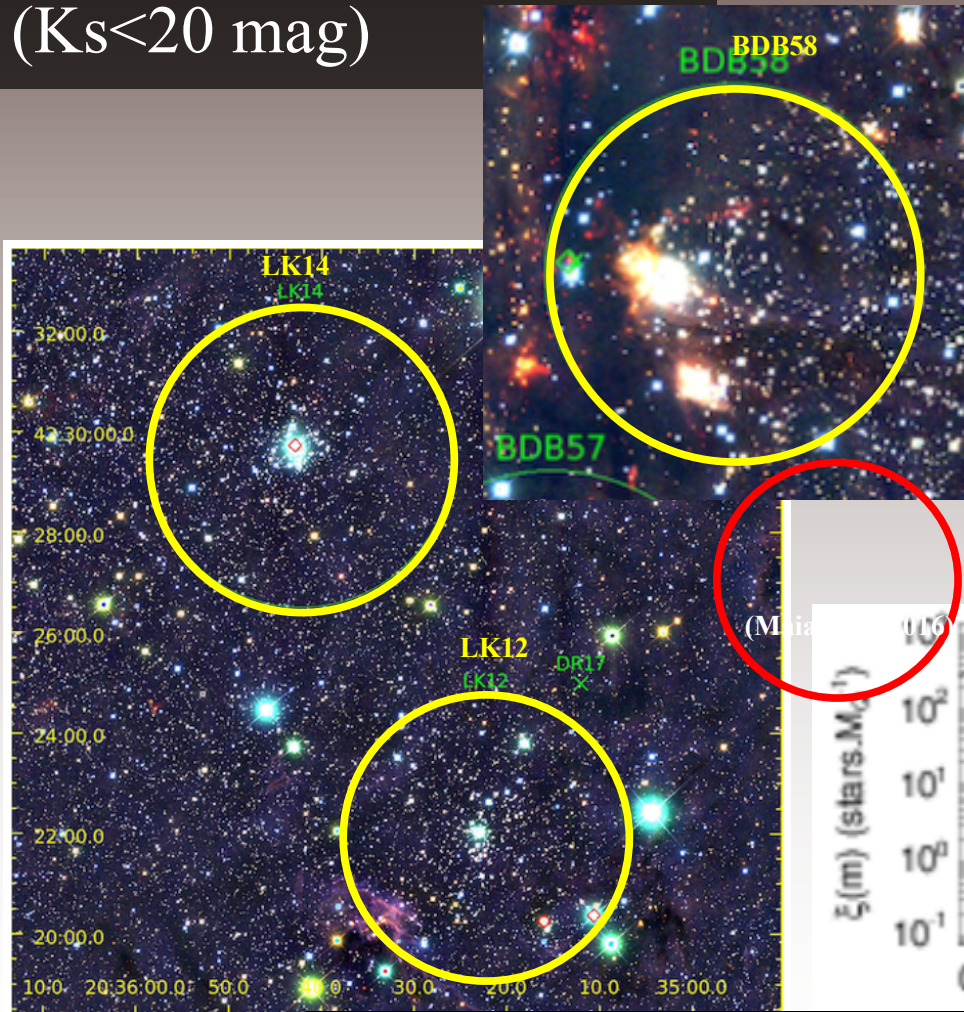
Des observations plus sensibles: de CFHT/TGAS à JWST/GAIA

...



# NIR studies of young (< 2 Myr) clusters

Deep WIRCam images  
(Ks < 20 mag)



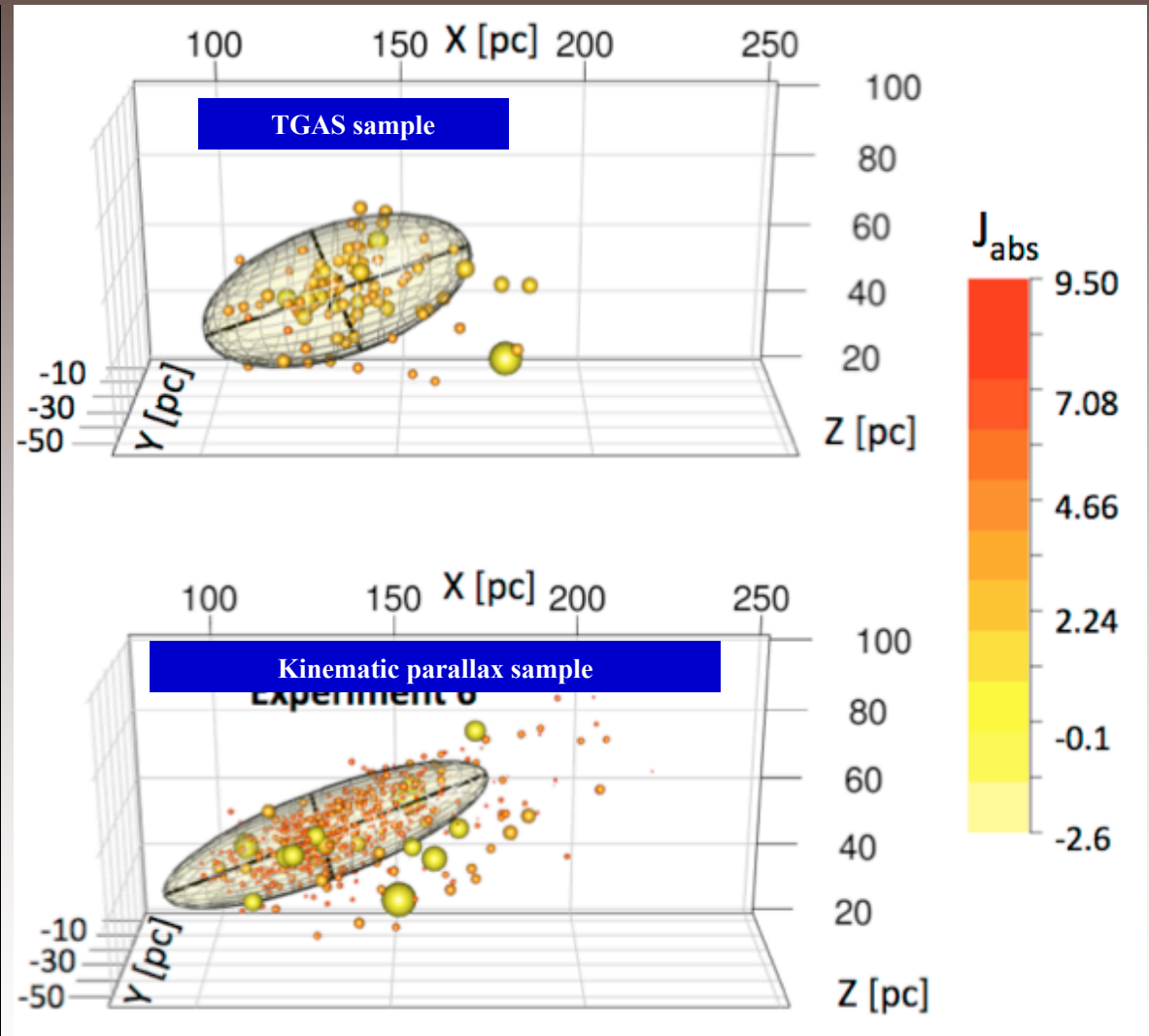
Do the most massive stars form first ?

# 3D structure of Upper Sco

- TGAS parallaxes for the brightest objects + kinematic parallaxes
- Elongated ellipsoids: imprint of star formation
- Massive stars more puffed up, i.e. more relaxed

→ **Massive stars form first ?**

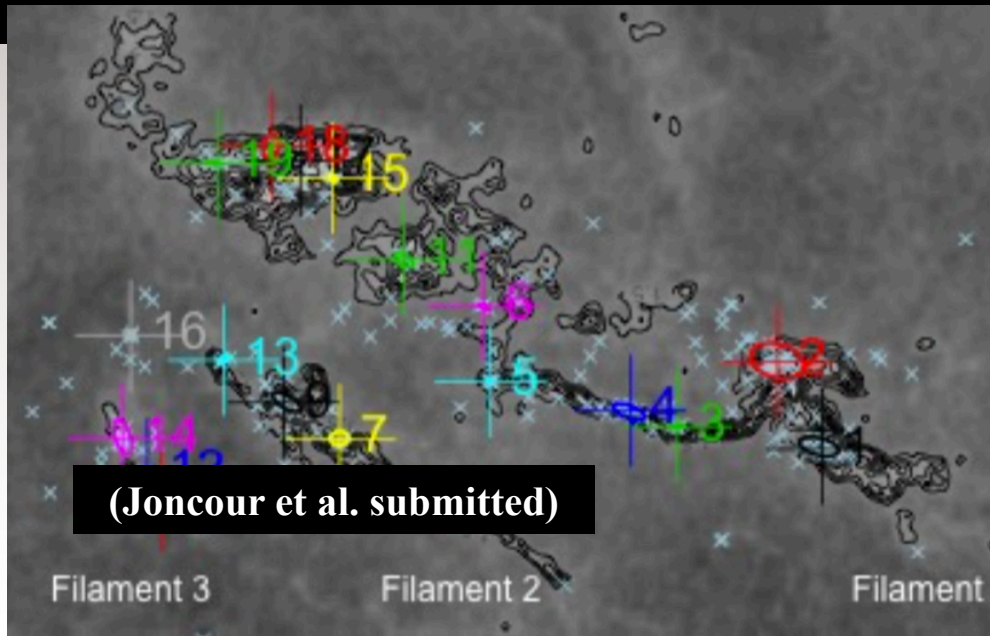
Wait for Gaia DR2...



(Galli et al. 2018)

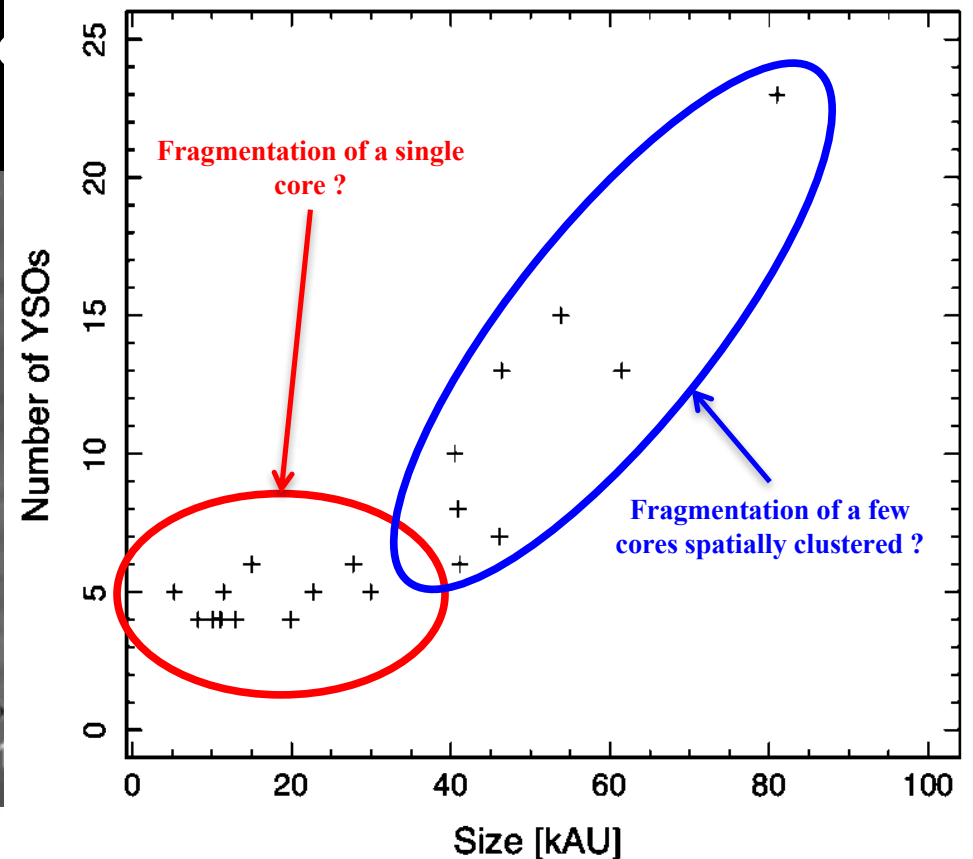
# Clustering and multiplicity in Taurus

- Using *dbscan* algorithm, identification of 20 stellar overdensities (NESTs) located along the filaments
- ~45% of stars are in NESTs
- Mean stellar density  $\sim 340 \text{ pc}^{-2}$ , up to  $2500 \text{ pc}^{-2}$



Bimodal size-star number relation

→ 2 fragmentation scenarii





## Processus d'accrétion/éjection

### Questions ouvertes :

- Comment s'évacue le moment angulaire ?
- Comment la matière est-elle accrétée ?

Des observations à haute résolution en submm : ALMA puis JWST

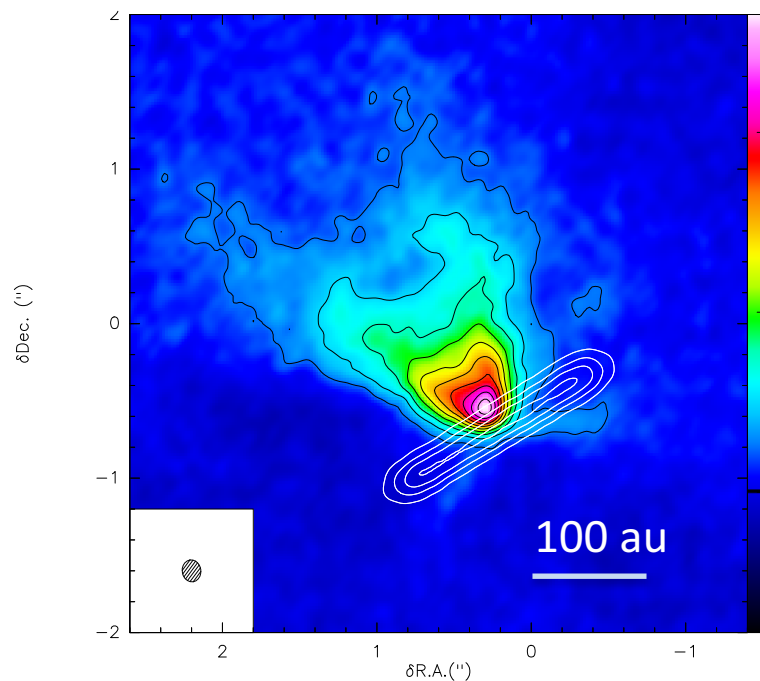
Des modèles analytiques et simulations

Des expériences de laboratoire (laser, chocs radiatifs)

# ALMA Observations of molecular outflows

Origin and impact of molecular outflows: extraction of mass and angular momentum

$^{12}\text{CO}$  integrated intensity



- ✧ Launching radius  $< 20\text{-}25$  au
- ✧ Rotation signature detected  $V\phi$   $0.1\text{-}0.5$  km/s
- ✧ Morphology and kinematics compatible with disk winds from  $r_0=0.5\text{-}3$  au
- ✧ **potentially strong impact on disk evolution**
- ✧ Cavity created by Bow-shock wings not excluded

FUTURE NEEDS :

Increase the sample + JWST

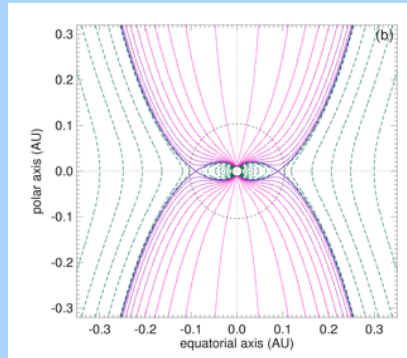
Models of cavity created by bow-shock propagation

Louvet, Dougados, Cabrit et al. 2018, submitted

# Accretion et Jets dans la magnétosphère des étoiles jeunes

(Thèse cotutelle R. Albuquerque: 2016 → 2019)

C. Sauty, V. Cayatte, R. Albuquerque (OP/LUTH), J. Lima, F. Gameiro (U. Porto), K. Tsinganos, N. Vlahakis (U. Athènes), L. Ibgui, C. Stehlé (OP/LERMA)



## solutions Analytiques :

utilisation de solutions autosimilaires comme conditions initiales (PLUTO 2,5D)

Stabilité et robuste des solutions autosimilaires  
=>  
simulations stationnaires ou quasistationnaires en quelques rotations stellaires

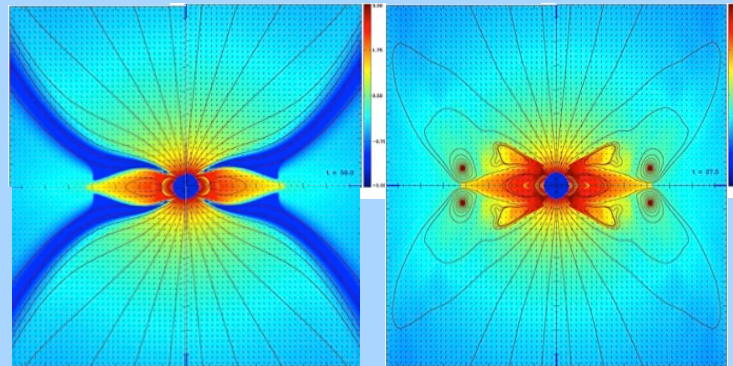
## Perspectives comparaison avec Obs. :

- Recherche d'autres solutions analytiques
- Inclusion du vent de disque
- Carte d'émission synthétiques des raies interdites du jet  
=> *PLUTO module SNEQ*
- Transfert de rayonnement dans la magnétosphère : Raies de Balmer  
=> *Coll. LERMA (SPEC, + long terme IRIS)*

## Simulations PLUTO 2,5 :

utilisation de solutions autosimilaires comme conditions initiales (PLUTO 2,5 D MHD)

- Jet stellaire
- accréation magnétosphérique
- Zone morte équatoriale



- *Comportement bimodal suivant le rapport taux d'accrétion/taux d'éjection + structure de la zone morte (densité, extension)*
- *= Avec ou Sans éjection magnétosphérique sporadique*

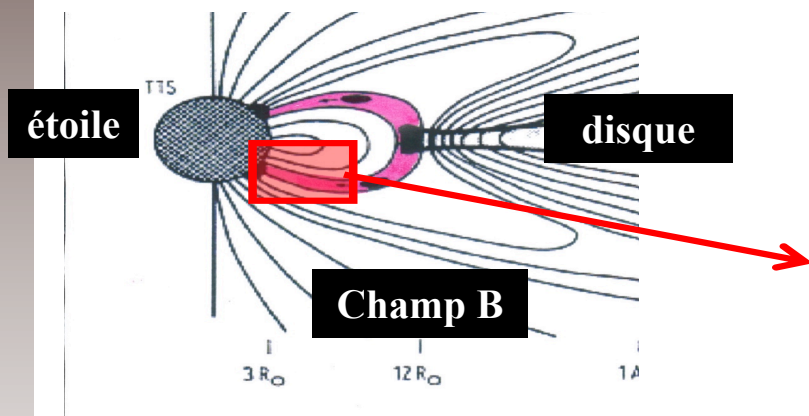
## Observations : analyse de plus de 35 étoiles, comparaison

- Dans le jet, mesure taux de perte de masse et vitesse du jet :
- raies de OI et SII, NLTE, opt. minces
- Dans l'accrétion magnétosphérique, taux d'accrétion, vitesse max d'accrétion :
- raies de Balmer, LTE, opt. épaisses



# Modeling the accretion on Young Stars :

L. de Sa, C. Stehlé, J. P. Chièze, I. Hubeny  
T. Lanz, S. Colombo, L. Ibgui, S. Orlando



## Accretion scheme

Corona  
T >  $10^6$  K  
 $\rho < 10^{-13}$  g/cm<sup>3</sup>

Expériences laser

Hot slab  
 $10^6$  K  
 $10^{-12}$  g/cm<sup>3</sup>

Chromosphere  
 $5 \cdot 10^3$  K

Photosphere  
 $10^4$  K

2  $10^4$  km

10<sup>3</sup> km

$10^{-10}$  g/cm<sup>3</sup>  
 $10^{-9}$  g/cm<sup>3</sup>  
 $10^{-7}$  g/cm<sup>3</sup>

Modèles MHD

- Signatures choc radiatif
- Spectro-polar (hot spots)
  - X-rays (corona)
  - UV profile (accretion flow)

# Summary (accretion shocks)

Team's results 2013-2018

1 D		
Setup of extended opacity tables at LTE	✓	Paper ready to be submitted ( de Sa et al.) PhD thesis of L. de Sa
1D Rad Hydro sims ( hybrid LTE-NLTE)	✓	
1D LTE emerging spectra	✓	
1D full NLTE Rad Sim	Waiting	
1D NLTE Rad Signatures	Waiting	
2D		
MHD sims with rad cooling : effect of B, geometry, modulations	✓	Matsakos et al. 2013 Orlando et al. 2013
Blocking of X rays by cold surrounding (hybrid scheme)	✓	Costa et al. 2016 Bonito et al. 2014
Computation of Rad Collisional opacities / emissivity	Preliminary tables	
RMHD NLTE simulations with PLUTO	Started	PhD work of S Colombo
3D		
Preliminary MHD sims with cooling (PLUTO)	✓	Matsakos et al., 2013
Development of 3D radiative transfert code for post processing	In progress (parallelisation)	Ibgui et al. 2013

## Disque protos-tellaire à proto-planétaire

### Questions ouvertes :

- Comment s'évacue le moment angulaire ?
- Quand et où se forment systèmes multiples ?
- Comment se forment les planètes ?

Des observations à haute résolution de l'IR au submm : ALMA vs SPHERE

Des modèles de transferts radiatifs

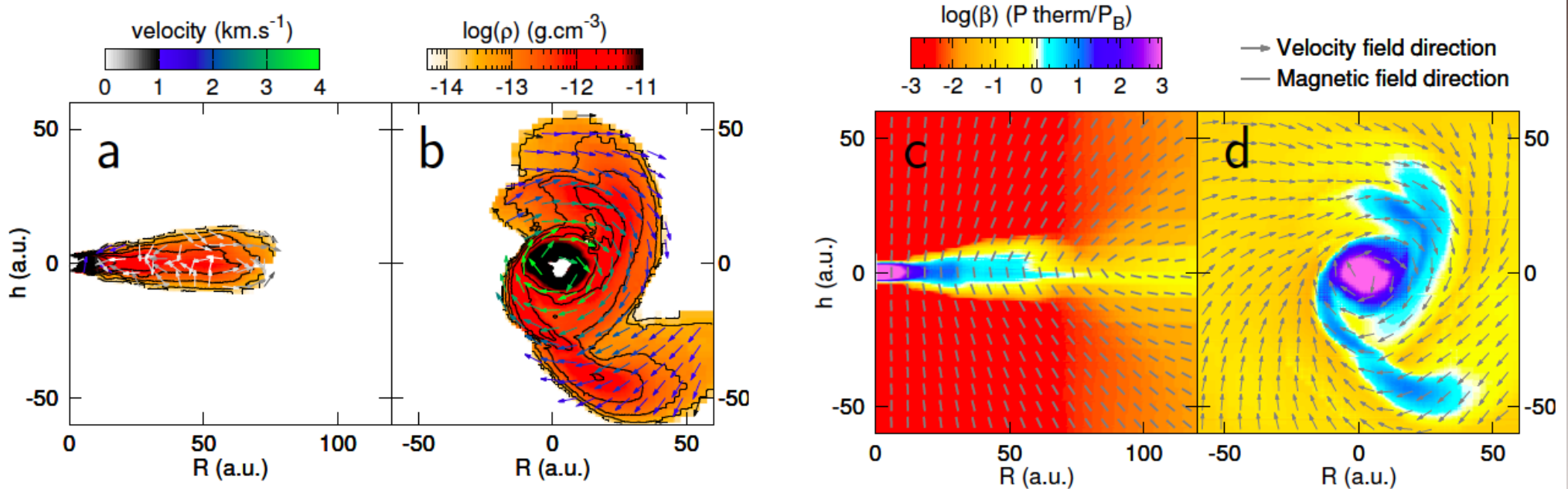
Des modèles d'effondrement de cœurs incluant toujours plus de physique

Des simulations hydro gaz + poussière

# Simulations 3D d'effondrement de coeurs denses avec MHD non-idéale

## Effet de la diffusion ambipolaire sur la formation des disques

*Masson et al. (2016)*



Expression analytique de la taille  
des disques jeunes

*Hennebelle et al. 2016*

$$r_{d,AD} \simeq 18 \text{ au}$$

$$\times \delta^{2/9} \left( \frac{\eta_{AD}}{0.1 \text{ s}} \right)^{2/9} \left( \frac{B_z}{0.1 \text{ G}} \right)^{-4/9} \left( \frac{M_d + M_*}{0.1 M_\odot} \right)^{1/3}$$

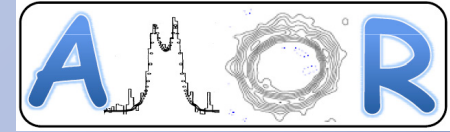
### Perspectives :

- étude de l'espace des paramètres
- évolution du mélange gaz-poussière
- étoiles massives





# Astrochimie Moléculaire et Origine des systèmes planétaires



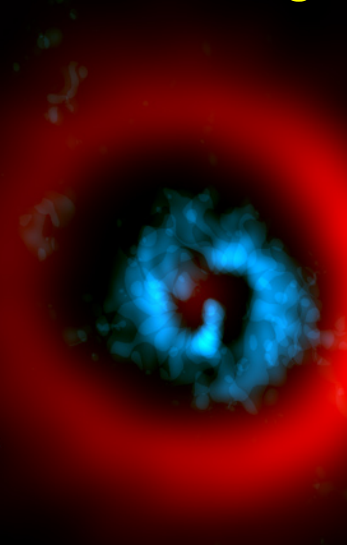
Période 2014 – 2018

**Mesures des masses stellaires** (T Tauri) : Guilloteau et al, 2014, AA, 567 - Simon et al 2017, ApJ, 844  
(en désaccord avec les types spectraux, facteur 2 pour même type spectral)

**Disques Hybrides** thèse + Péricaud et al 2017, AA, 600 (survey APEX & 30-m en CO)

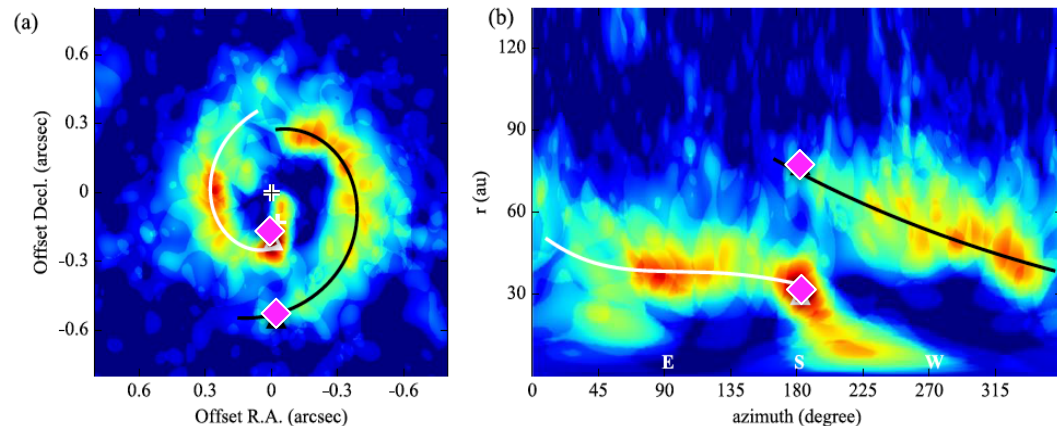
**Dynamique et accréation** dans les systèmes stellaires jeunes : 2 press-releases (ESO/ALMA)  
→ Etoile triple : GG Tau IR/mm – Dutrey et al 2016 A&ARv, 24  
→ Etoile simple : AB Aur mm – Tang et al 2017, ApJ, 840

**AB AURIGAE** Tang et al 2017



**ALMA – CO 2-1 & Dust**  
résolution 0.07" = 10 au

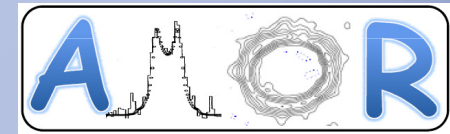
**Première détection d'une spirale de gaz CO dans la cavité (poussières "mm") d'un disque orbitant autour d'une étoile simple H Ae/Be**



**Position des 2 planètes potentielles (modèles Dong 2015)**



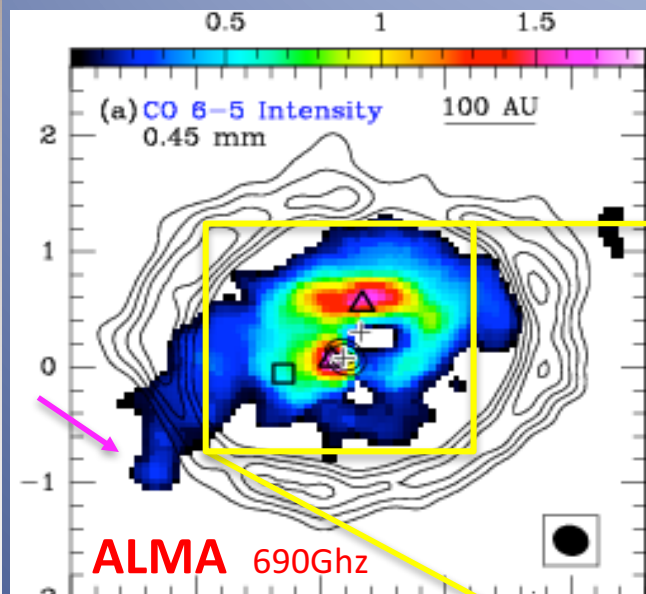
# Astrochimie Moléculaire et Origine des systèmes planétaires



## Dynamique et accrétion dans le système multiple GG Tau A

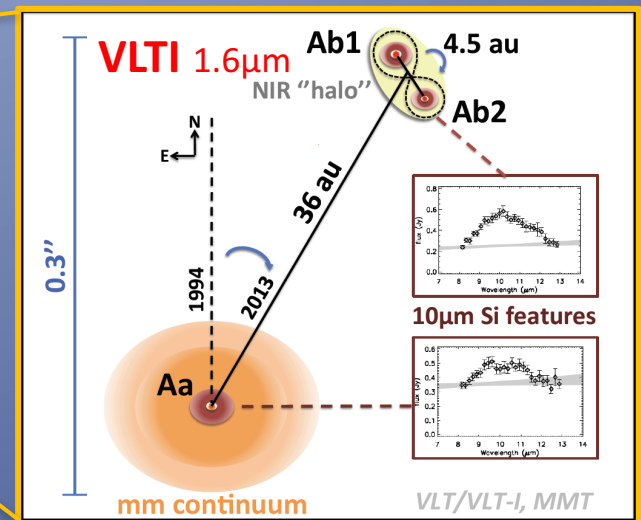
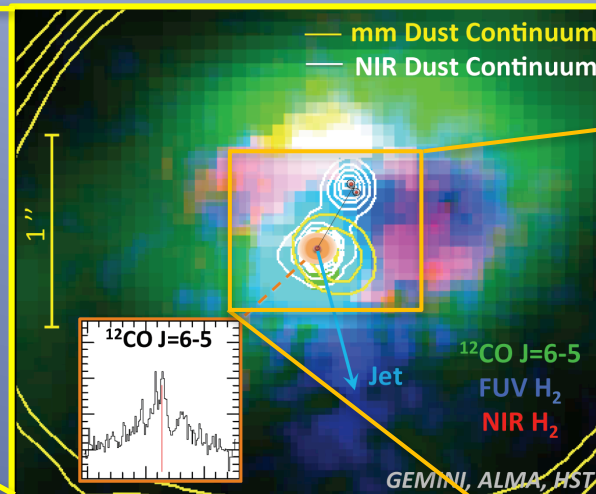
→ Synergie mm / IR :

- ALMA : dynamique des **streamers de gaz**  $^{12}\text{CO}(6-5)$  dans la cavité **chocs d'accrétion** sur les disques internes (CO, et  $\text{H}_2$  en IR) **proto-planète** (point chaud) au bord de l'anneau externe à 260 ua ? indices de **sillons/spirale** dans l'anneau en  $^{13}\text{CO}$  (planètes enfouies ?)
- VLTi : **binarité** de l'étoile secondaire (séparation 4.5 ua) → **troncature des disques internes**



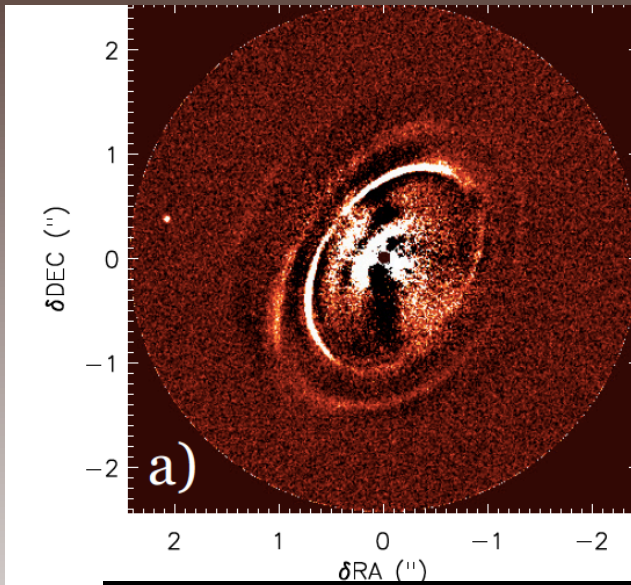
ALMA 690GHz

## GG TAU A : étoile T Tauri triple



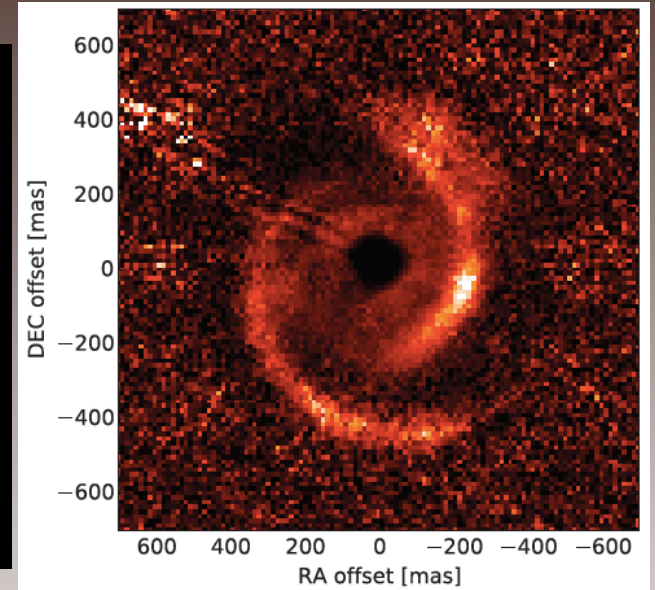
Tang et al 2016, ApJ  
 Dutrey et al 2014, Nature  
 Di Folco et al 2014, AA  
 Beck et 2012, ApJ

# Small scale features in protoplanetary disks



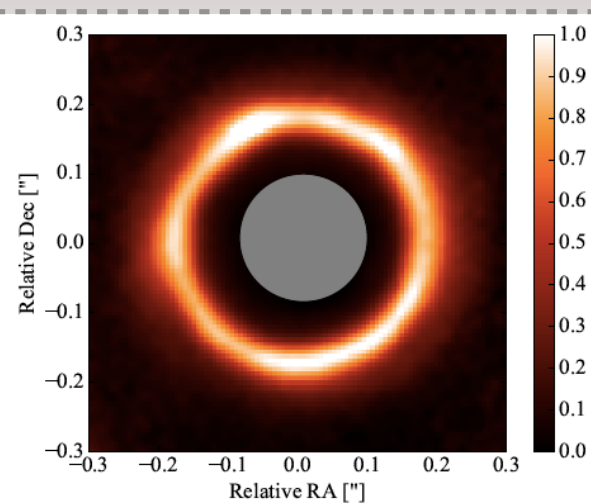
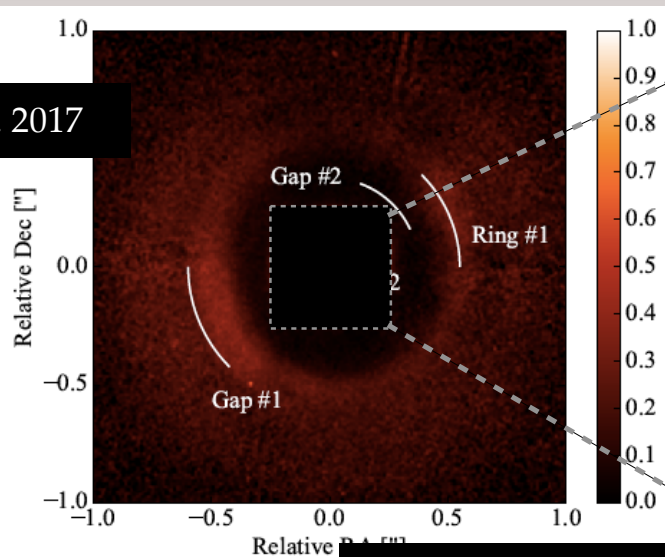
de Boer, Salter, Benisty et al 2016

Scattered light observations of protoplanetary disks with SPHERE/VLT show a large number of asymmetric features at the surface layers (rings, spirals, blobs, cavities).  
Maybe evidence for planets?



Benisty et al. 2015

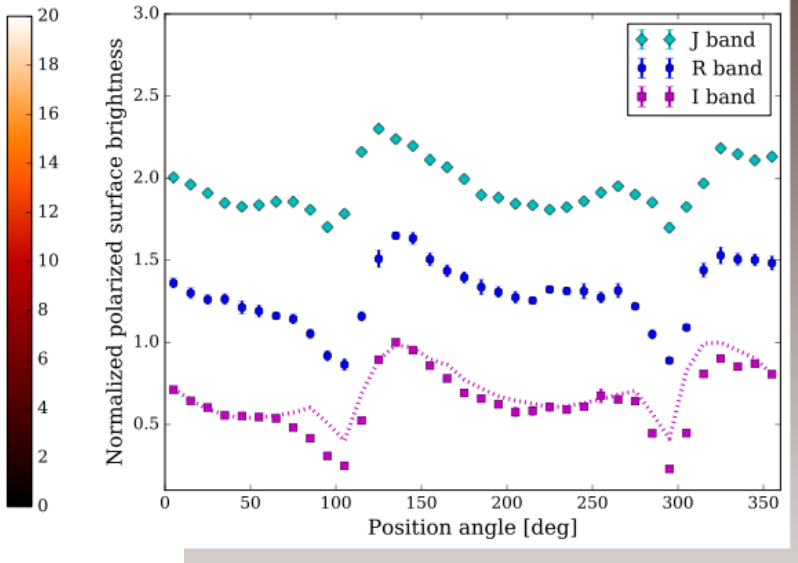
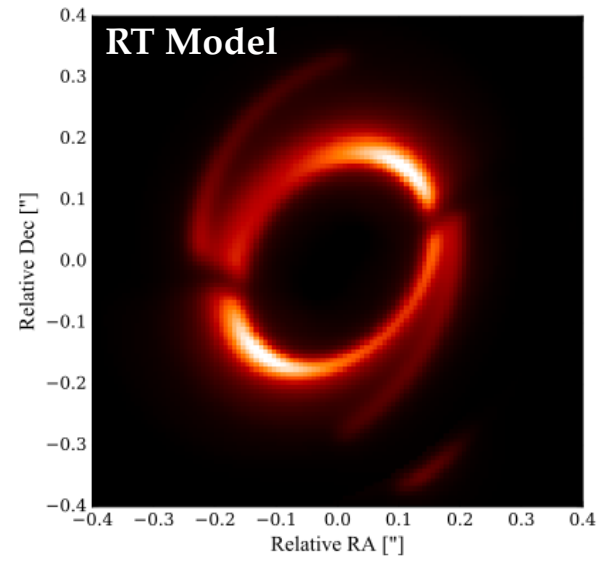
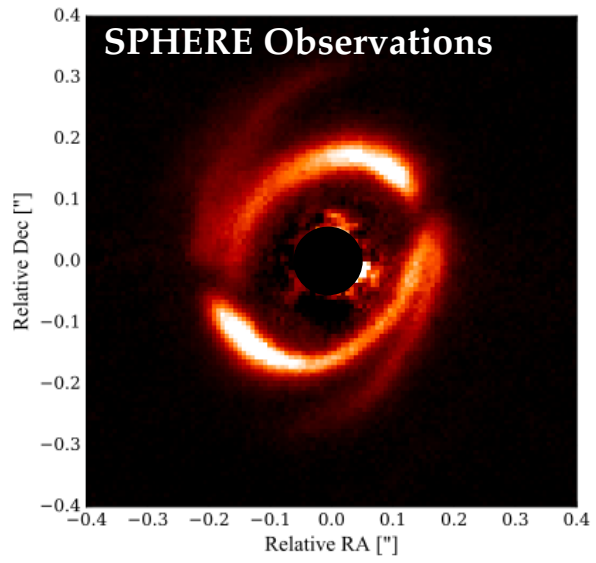
Pohl, Benisty et al. 2017



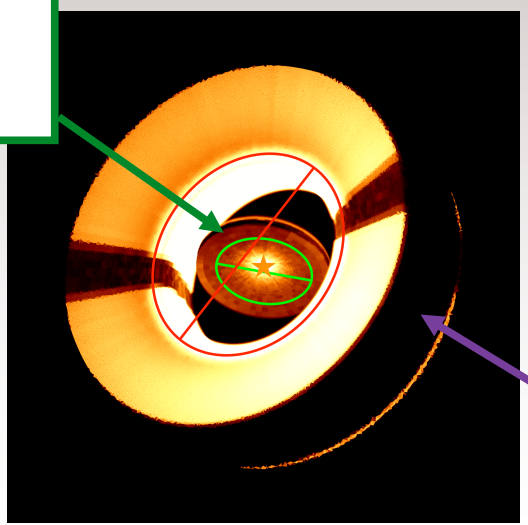
Prospective: comparison with ALMA data, combination with VLT



# Inner / outer disk misalignment in protoplanetary disks



$i \sim 48^\circ$ , PA  $\sim 80^\circ$   
NE = near side



$i \sim 38^\circ$ , PA  $\sim 142^\circ$   
SW = near side

- We observe a cavity, two spirals, two shadows and an asymmetric ring.
- The shadows are well reproduced with an inner / outer disk misalignment of  $72^\circ$  maybe due to the tidal interaction of massive bodies.

Prospective: comparison with ALMA data, combination with VLTI

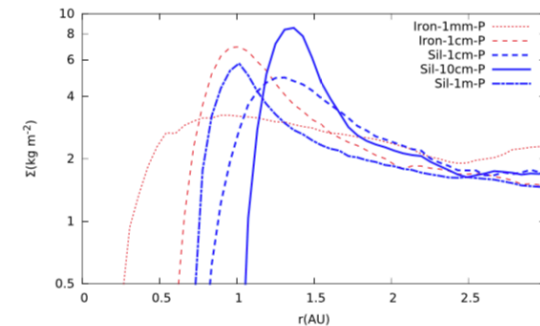
Benisty et al. 2017



# Poussière dans les disques protoplanétaires

- Photophorèse dans les régions internes des disques (thèse de Nicolás Cuello)

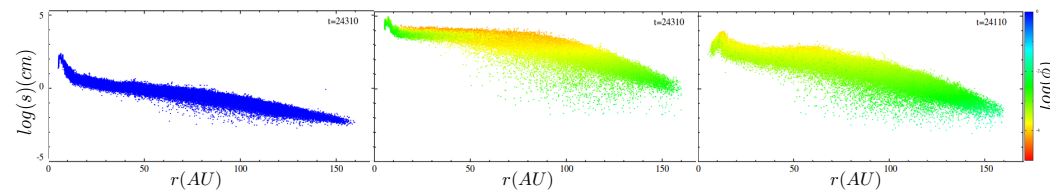
- Force repoussant les grains vers l'extérieur : plus de dérive radiale
- Distance minimale à l'étoile dépend de la taille et nature des grains



Cuello et al. 2014, 2016

- Influence de la porosité des grains sur leur évolution (thèse d'Anthony Garcia)

- Grains poreux dérivent plus lentement et croissent plus vite
- Ils survivent aux barrières de dérive et de fragmentation

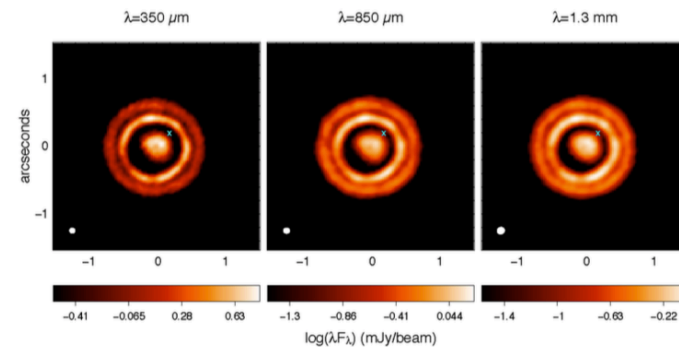


Garcia et al. 2016, 2018

# Poussière dans les disques protoplanétaires

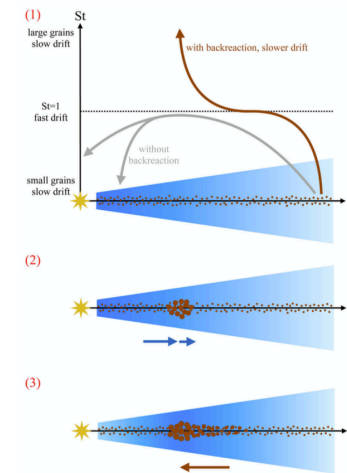
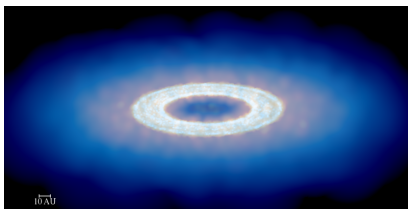
- Découverte des pièges à poussières auto-induits (*Self-Induced dust traps, SIDT*)

- Formation d'anneaux brillants et anneaux sombres dans les images synthétiques pour ALMA



Gonzalez et al. 2015

- Étude systématique du mécanisme et de sa robustesse
- Importance de la rétroaction !
- ➔ Lieux favorables à la formation des planétésimaux



Gonzalez et al. 2017

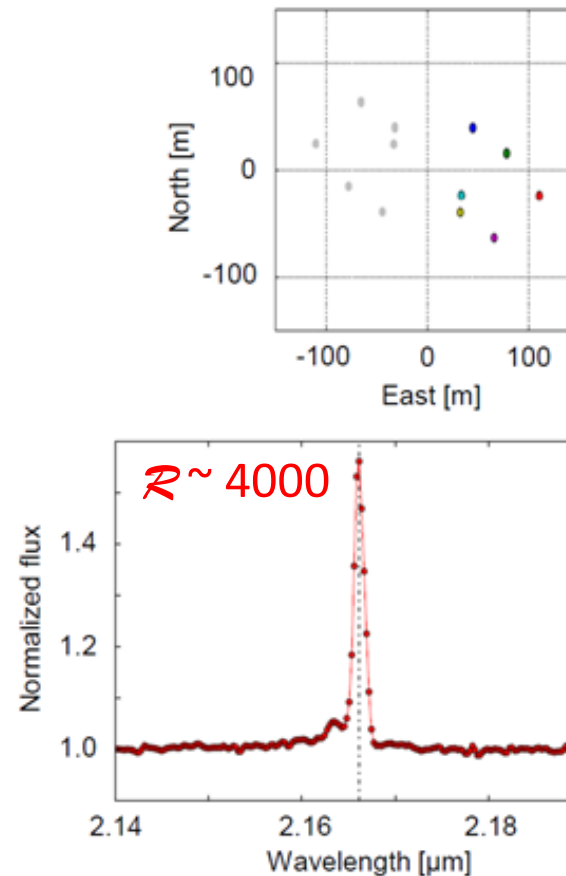
# GRAVITY observations of the T Tau binary system S CrA

- 2 CTTS that appear coeval
- $K_{\text{North}} = 6.6$
- $K_{\text{south}} = 7.3$
- $d \sim 130$  pc
- GRAVITY dual-field mode to resolve the circumstellar environment across the Bry line

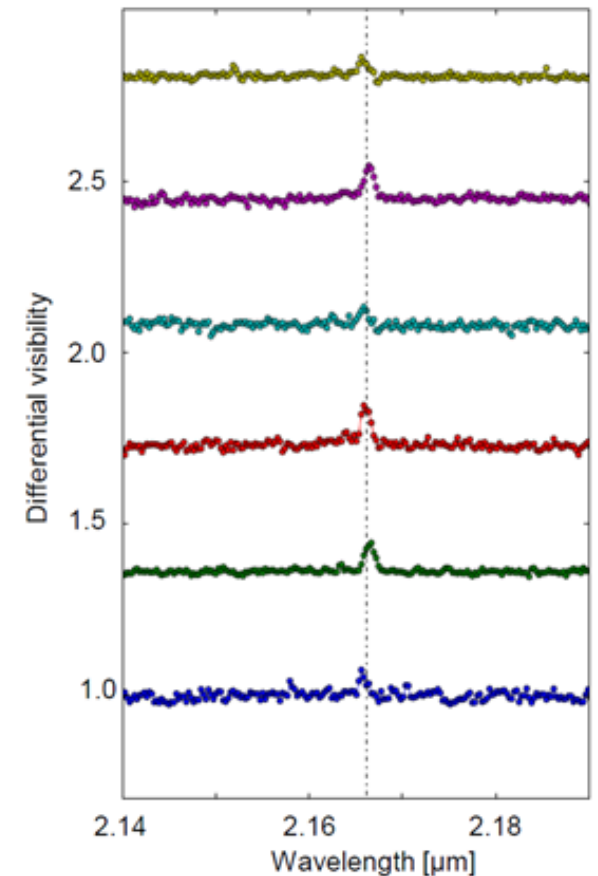
→

- Constraints on continuum
- Wind and magnetosphere on S CrA\_North resolved at sub-au scale

Combine GRAVITY and ESPADONS data for a detailed modeling



GRAVITY Collaboration 2017, A&A, 602, A94

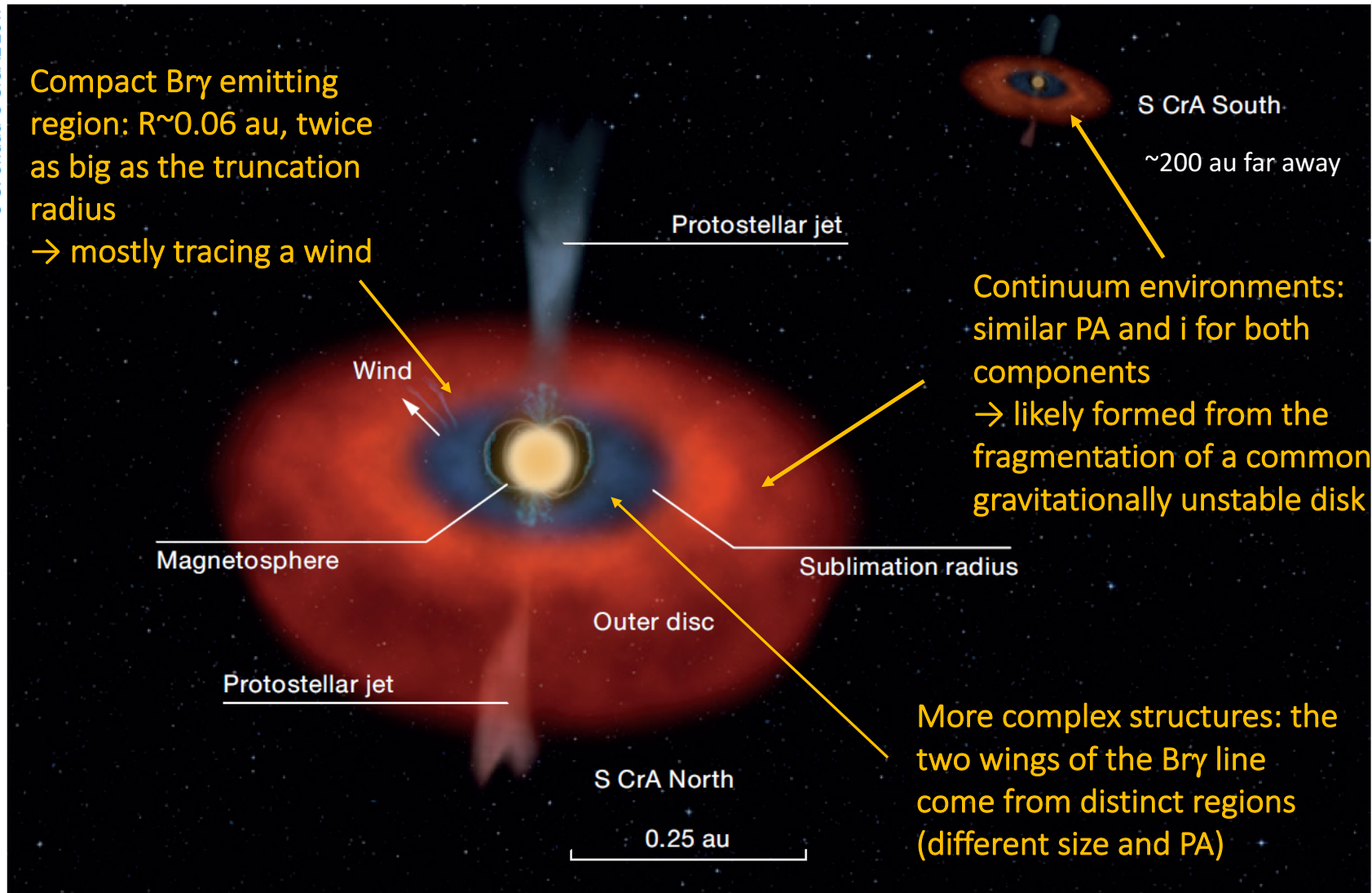


GRAVITY Collaboration: Garcia-Lopez, Perraut et al. 2017, A&A, 608, A78



© S. Crudd @ SIGAL 2017

Compact Br $\gamma$  emitting region:  $R \sim 0.06$  au, twice as big as the truncation radius  
→ mostly tracing a wind



GRAVITY Collaboration, 2017, The Messenger, 170, 10