

La ricerca dei dischi attorno alle (proto)stelle O

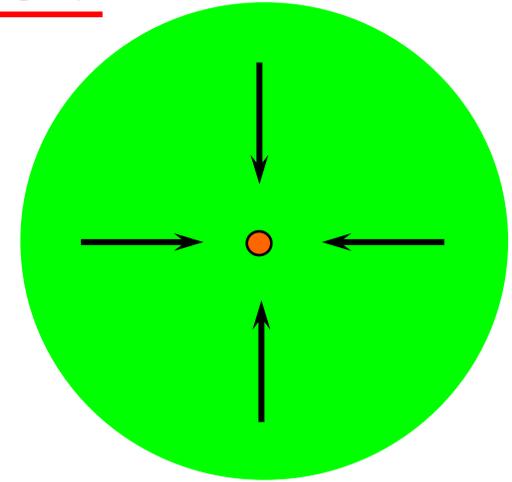
Riccardo Cesaroni

INAF – Osservatorio Astrofisico di Arcetri

- 1) La formazione delle stelle OB e il ruolo dei dischi
- 2) Situazione pre-ALMA: evidenza di dischi attorno a stelle B e toroidi attorno a stelle O
- 3) ALMA Cycle 0: rivelati dischi attorno a stelle B
- 4) ALMA Cycle 2: ricerca dischi attorno a stelle O

Come si formano le stelle?

Nucleo (**protostella**) con **inviluppo**:



- **Contrazione** protostella $\rightarrow t_{\text{KH}}$
- **Accrescimento** da inviluppo su protostella $\rightarrow t_{\text{acc}}$

$t_{\text{acc}}/t_{\text{KH}}$ **cresce** con M_* e $t_{\text{acc}} > t_{\text{KH}}$ per $M_* > 8 M_{\odot} \rightarrow$
contrazione rapida e **bruciamento H** in fase di
accrescimento

\rightarrow **Pressione radiazione blocca accrescimento**

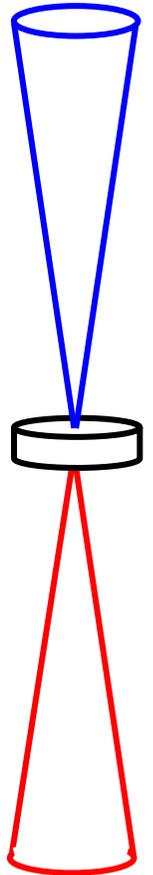
SOLUZIONE

Accrescimento mediante disco (+outflow) (Yorke & Sonnhalter, Krumholz et al.):

Outflow → incanala i fotoni →
→ riduce la pressione di radiazione

Disco → concentra l'accrescimento →
→ aumenta la ram pressure

→ L'esistenza dei dischi in stelle OB
indicherebbe una continuità nel modo di
formazione, dalla piccola all'alta massa



Buone notizie: teoria

- Tutte le teorie di formazione stellare predicono dischi attorno a stelle OB (dimensioni ~ 100 - 1000 AU) - e.g. Bonnell 2005, Krumholz et al. 2007, Keto 2007
- Le teorie spiegano la formazione di stelle fino a $140 M_{\odot}$ mediante disco di accrescimento → soluzione problema pressione di radiazione (Kuiper et al. 2010, 2011)

Cattive notizie: osservazioni

→ Dischi attorno a stelle OB molto difficili da osservare: **lontani** ed **embedded**

→ dist. OB > 1 kpc, disco ~ 100 AU → **HPBW $< 0.1''$**

→ $A_V=1000$ → **$\lambda > \text{mid-IR}$** necessaria

Prima: risoluzione angolare **radio-submm $> 0.5''$**

Adesso: fattibile con ALMA!

Situazione pre-ALMA

(e.g. Cesaroni et al. 2007)

- (Proto)stelle **B** ($\sim 10^4 L_{\odot}$): qualche **evidenza** di **dischi** di accrescimento circumstellari (kepleriani)
- (Proto)stelle **O** ($> 10^5 L_{\odot}$): **nessuna evidenza** di **dischi**; solo **toroidi** rotanti (molto massicci)

Progetto ALMA Cycle 0

*R. Cesaroni, H. Zinnecker, M.T. Beltran, S. Etoka, D. Galli, C. Hummel,
N. Kumar, L. Moscadelli, T. Preibisch, A. Sanchez-Monge, T. Stanke,
F. Van der Tak, S. Vig, C.M. Walmsley, K.S. Wang*

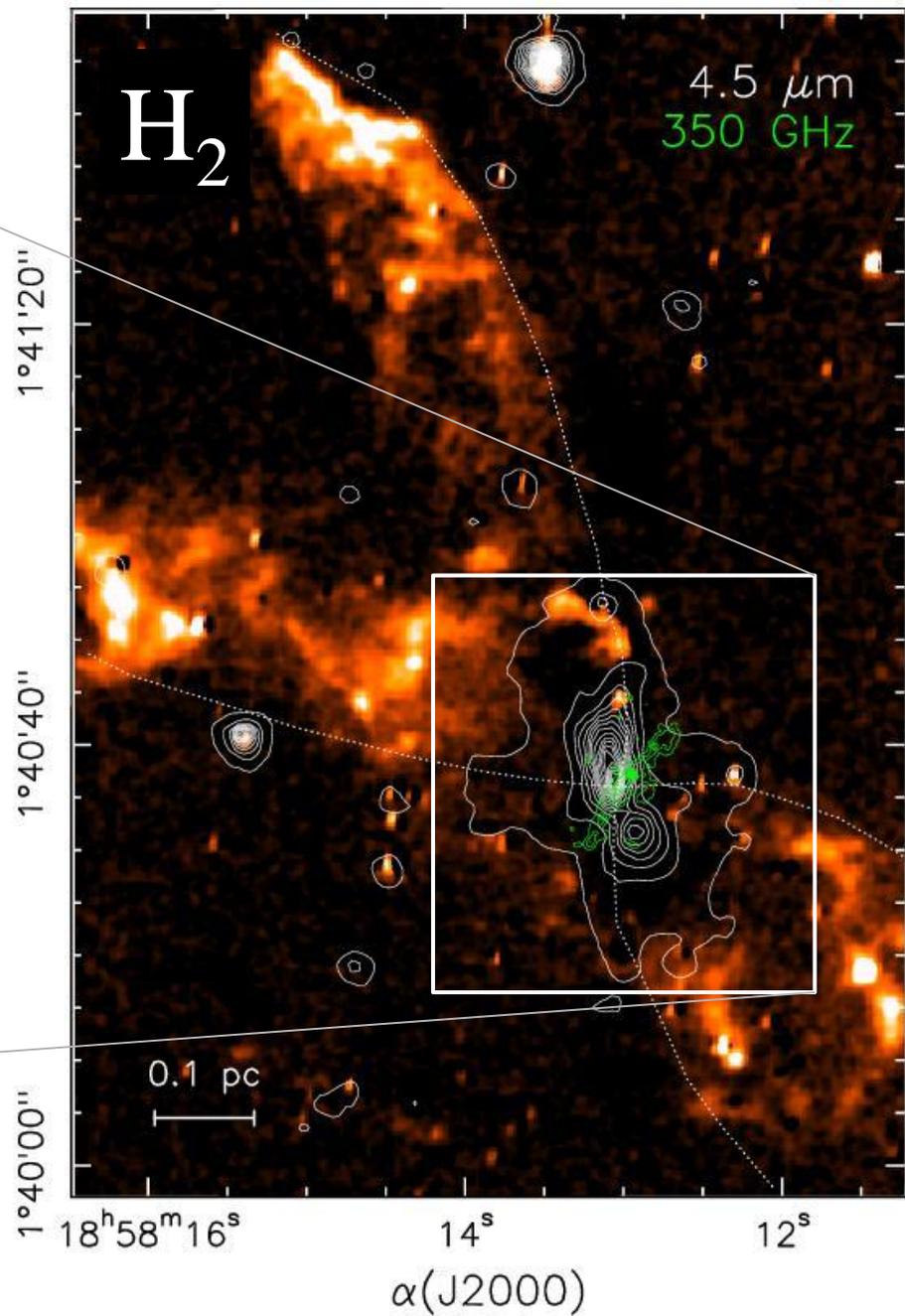
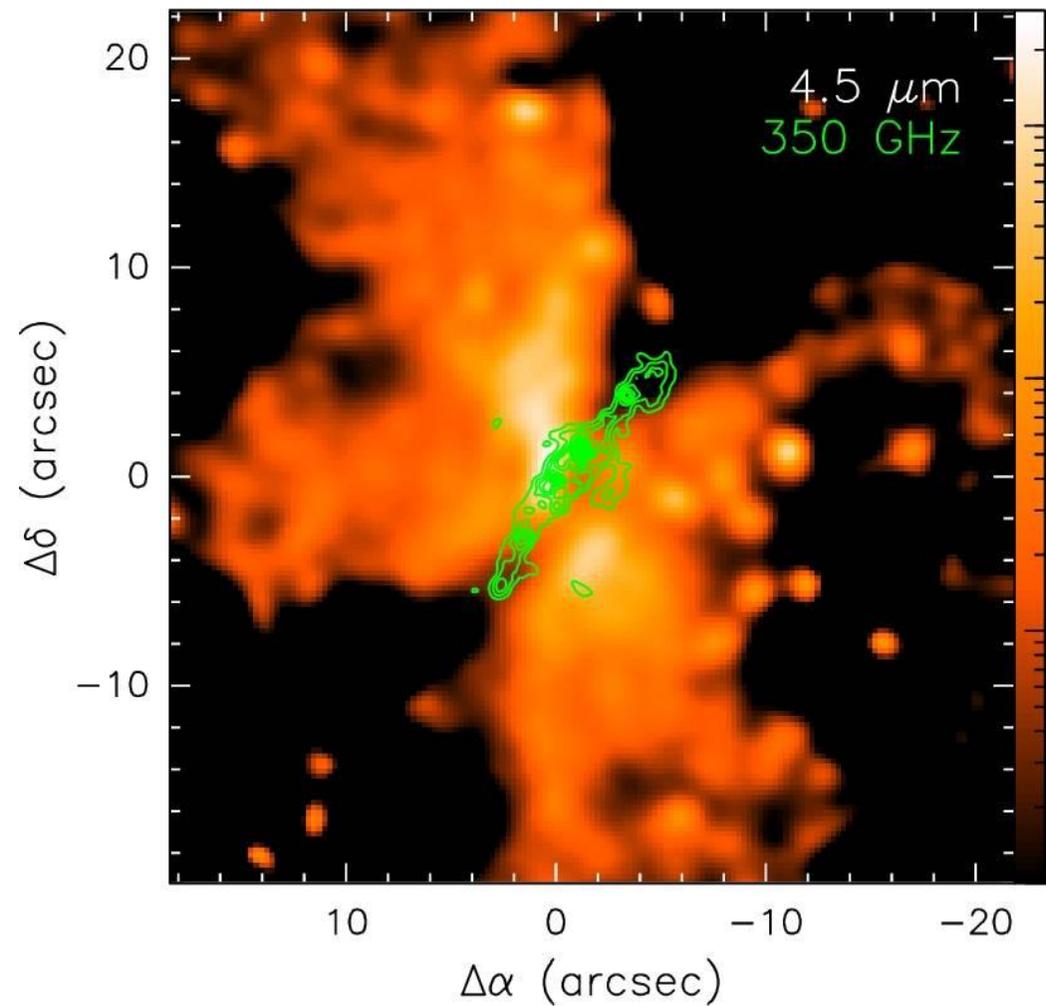
Scopo: Trovare altri **dischi (quasi-)kepleriani** attorno a **(proto)stelle B** → **formazione stelle B** mediante **disco di accrescimento**

Metodo: Osservazioni **alta risoluzione** (0.4'') in traccianti di **alta densità/temperatura** (CH₃CN) per disco e di **shock** (SiO) per jet/outflow

Target: **2 YSOs** con **10⁴ L₀** + **bipolar** nebulae + **ali** riga SiO + emissione **CH₃CN** + distanza **< 3 kpc**

Risultati: $G35.20+0.74$ N

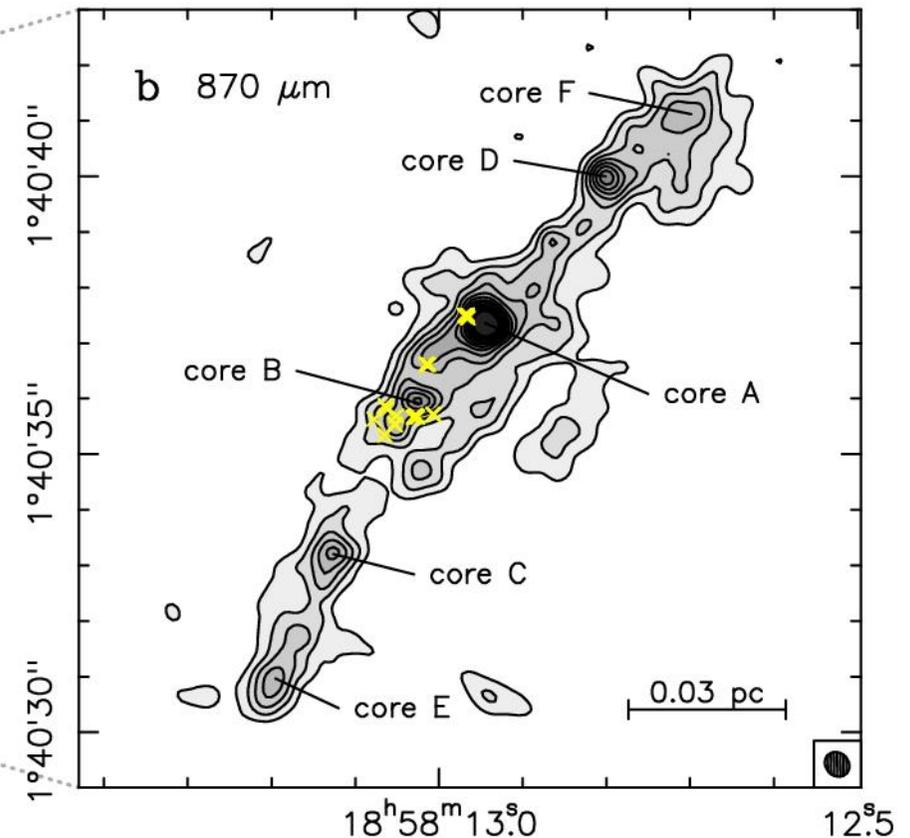
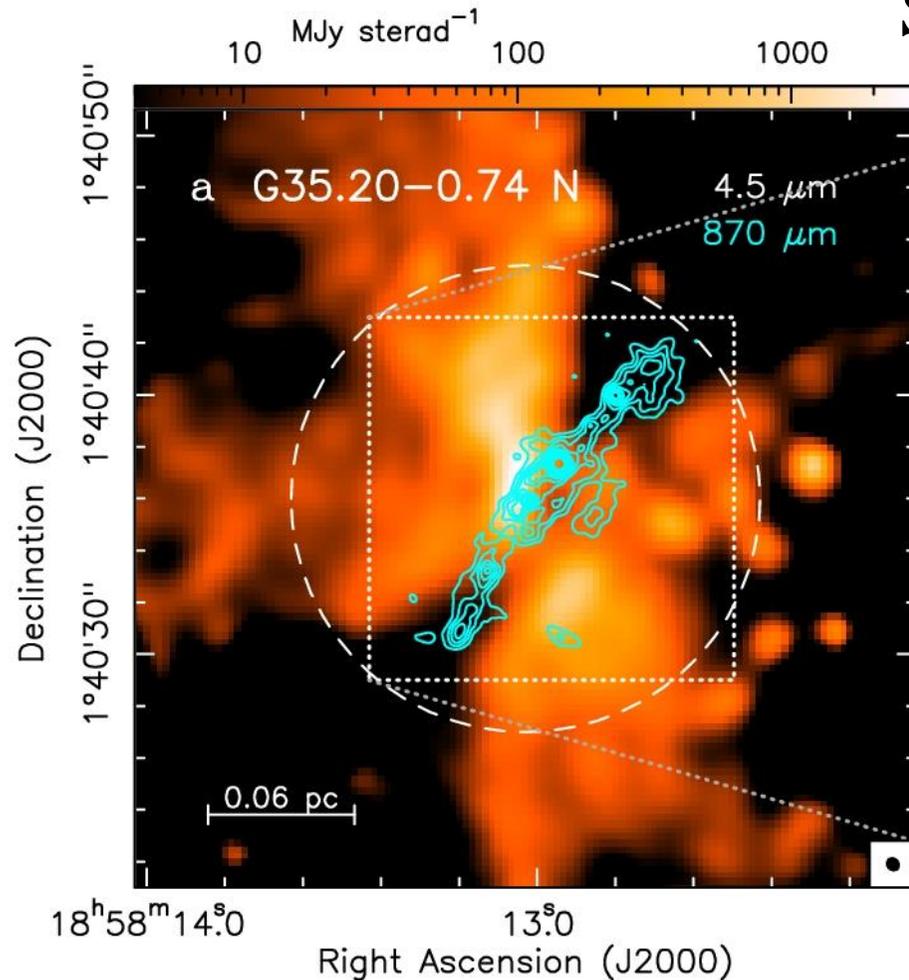
G35.20-0.74N

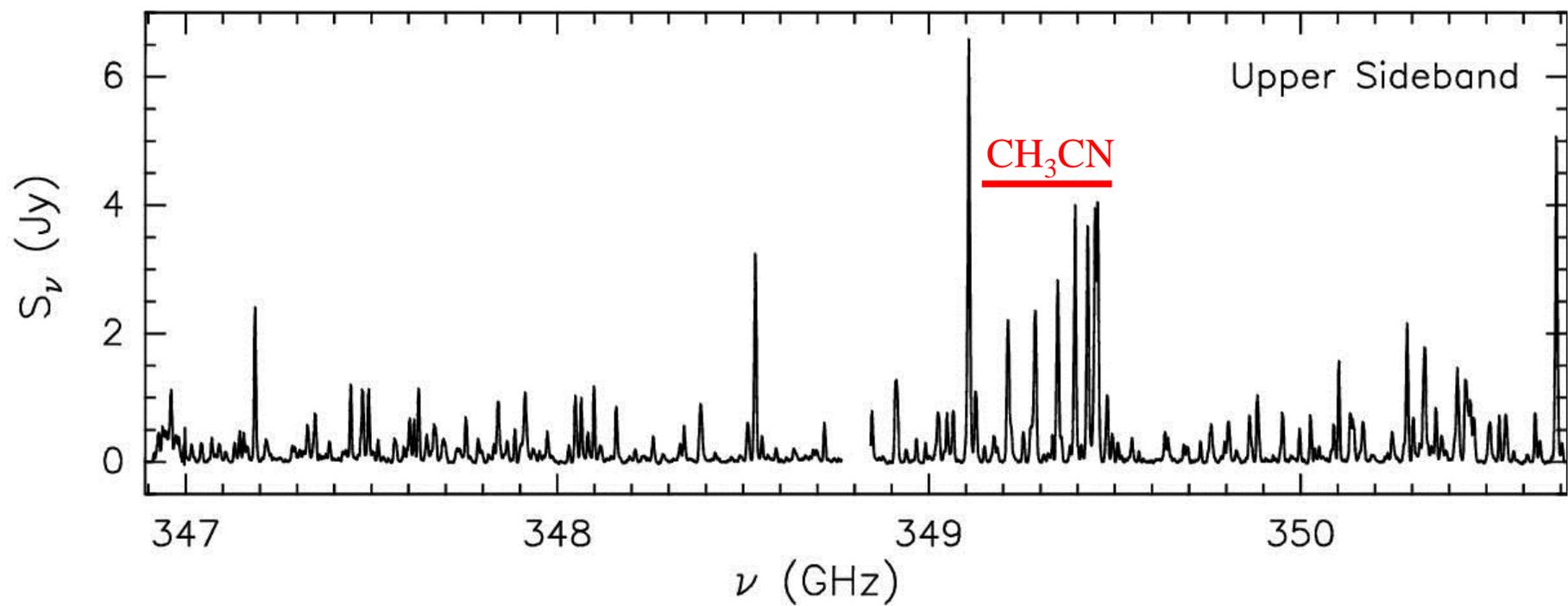
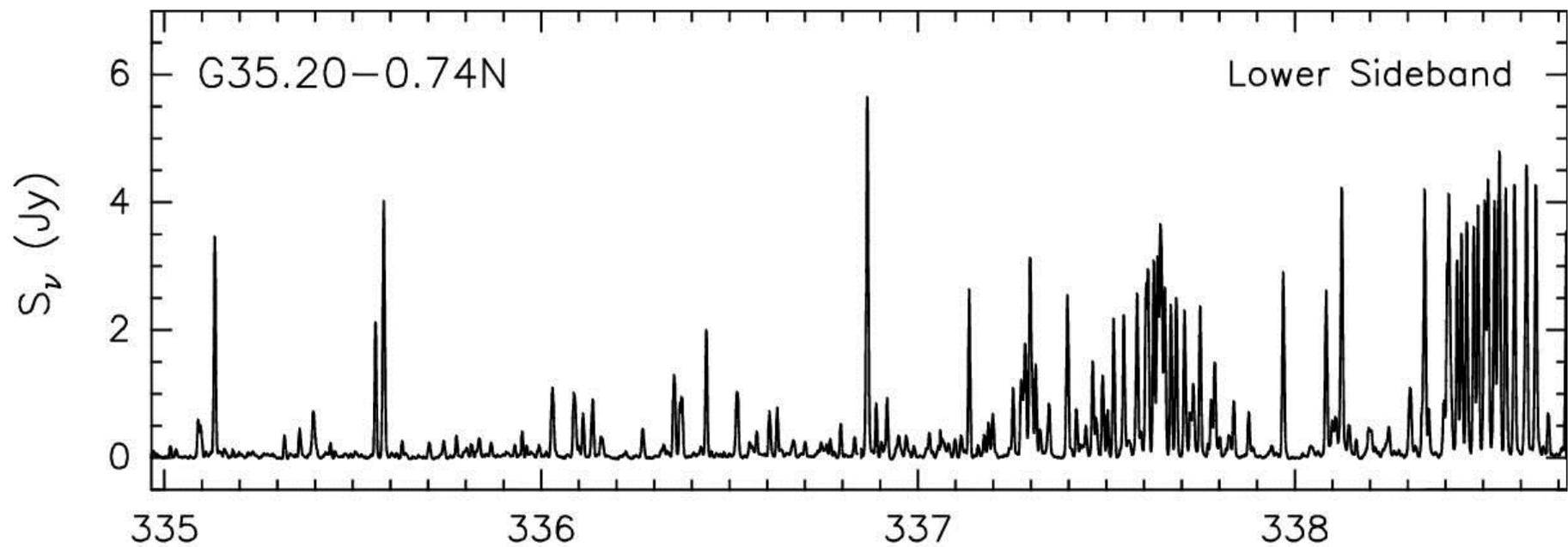


ALMA 350 GHz continuo:

- **filamento** ($\sim 40 M_{\odot}$) perpendicolare a nebulosa bipolare
- ~ 6 **core** lungo il filamento

Sanchez-Monge et al. (2013, 2014)

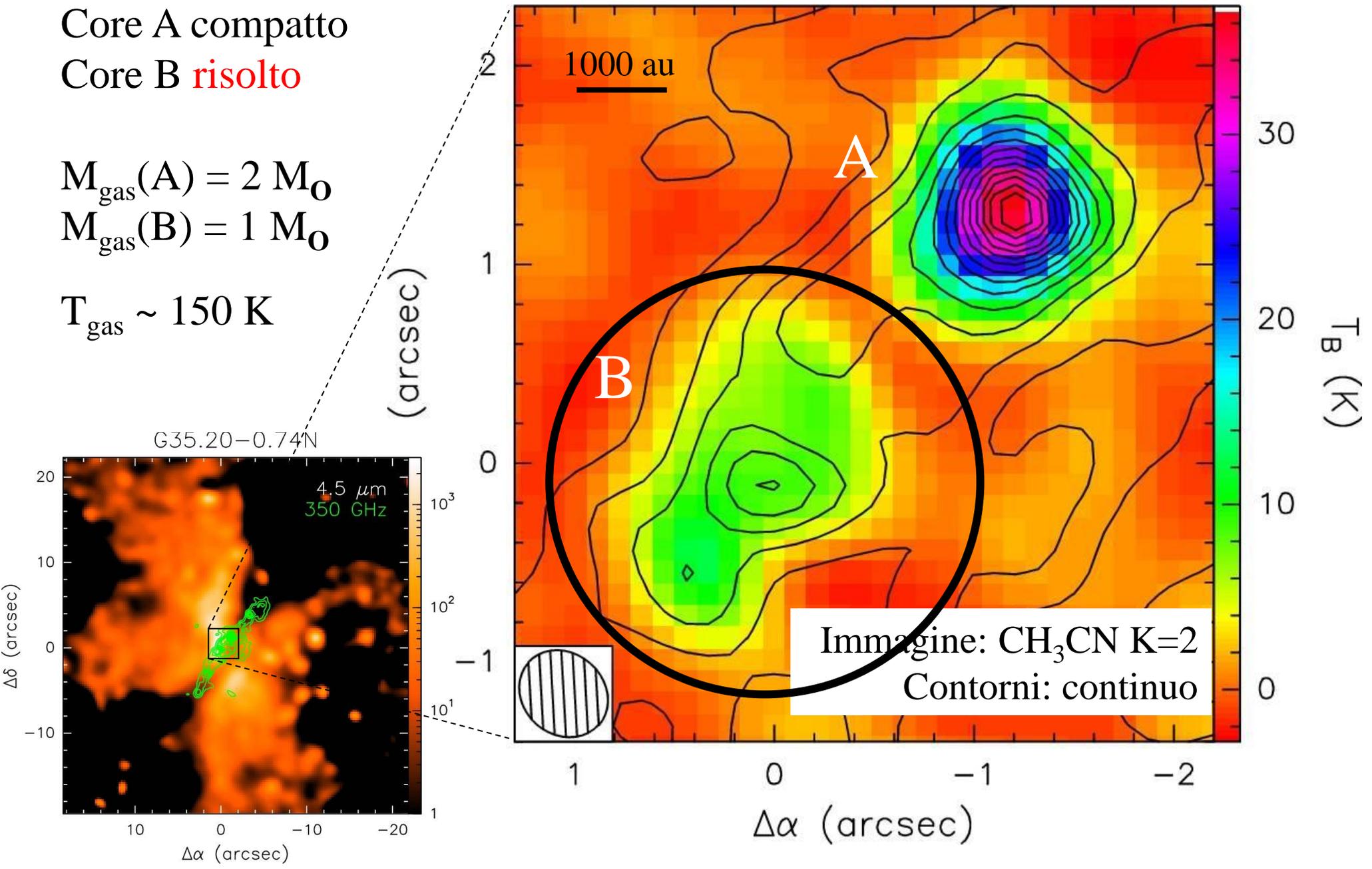


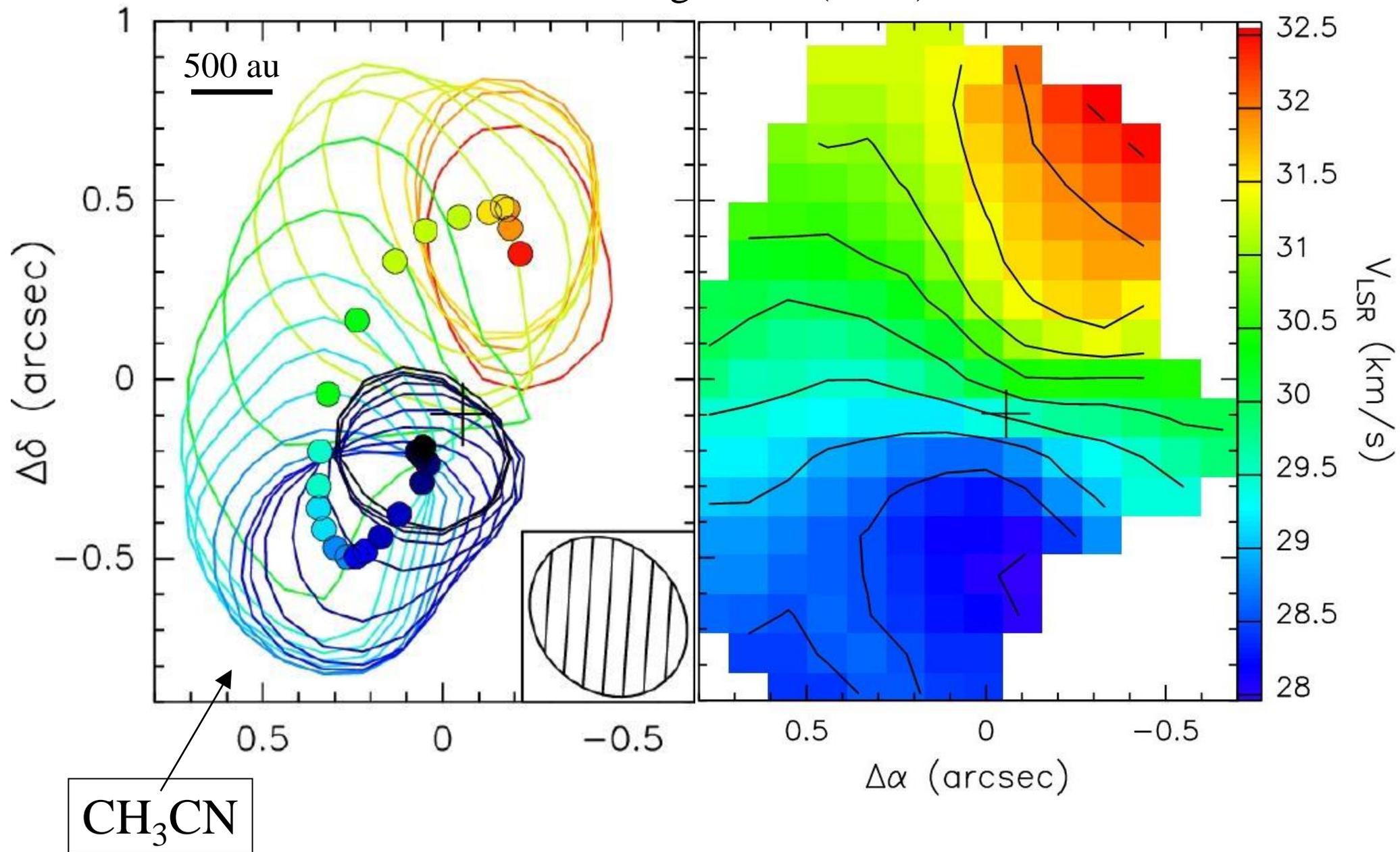


Core A compatto
Core B **risolto**

$M_{\text{gas}}(\text{A}) = 2 M_{\odot}$
 $M_{\text{gas}}(\text{B}) = 1 M_{\odot}$

$T_{\text{gas}} \sim 150 \text{ K}$

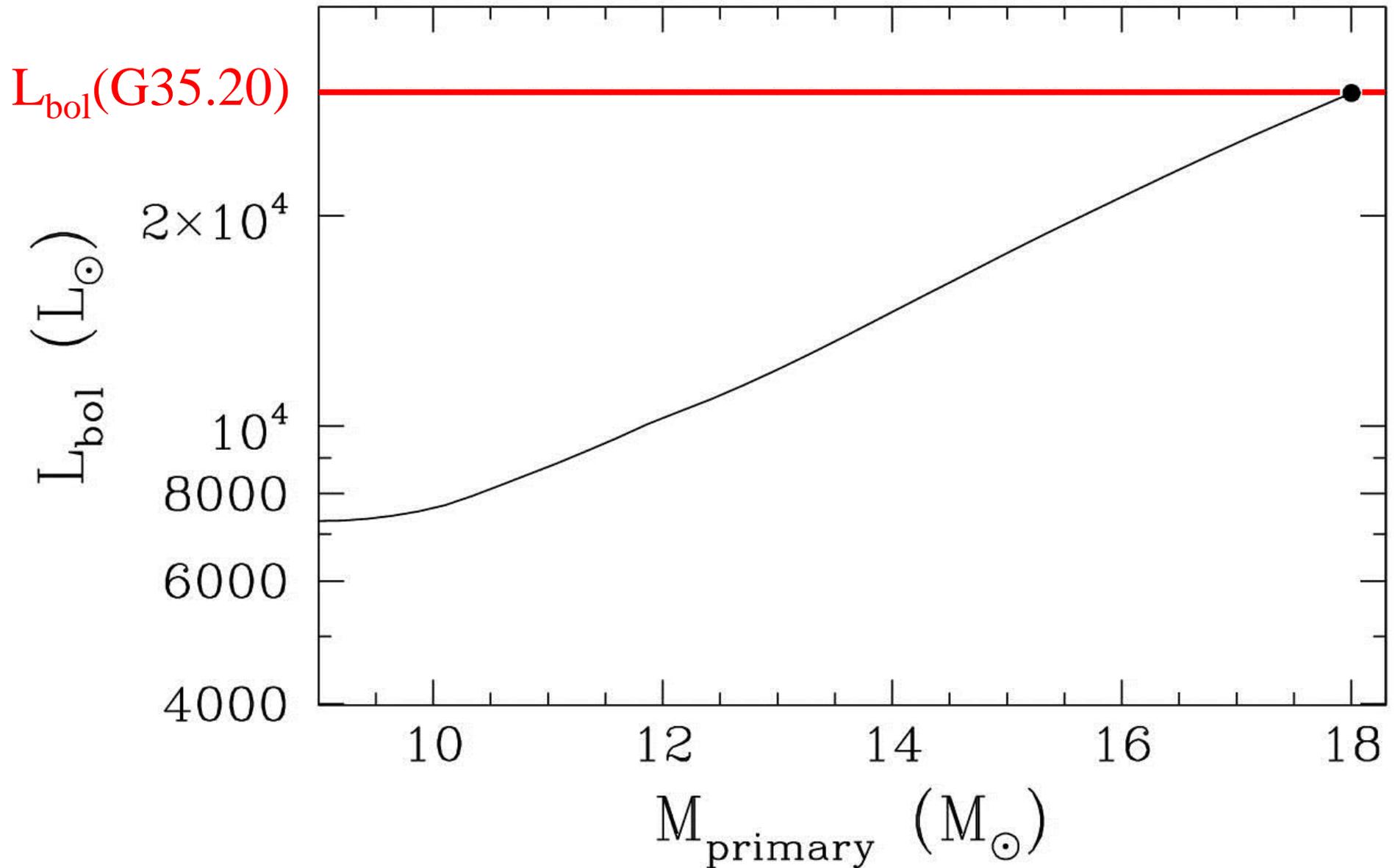




- **Fit** del campo di velocità con **disco Kepleriano** :
 - $M_{\text{stella}} = 18 M_{\odot}$
 - inclinazione disco = 19°
 - P.A. disco = 157°
 - Posizione stella molto vicina a **picco continuo**
 - Velocità sistemica: $V_{\text{LSR}}(\text{stella}) = 30 \text{ km/s}$
- **Distribuzione** picchi di velocità $\rightarrow R_{\text{disco}} = 2500 \text{ au}$
- **Continuo** 350 GHz $\rightarrow M_{\text{disco}} = 1 M_{\odot} \ll M_{\text{stella}} \rightarrow$
consistente con rotazione kepleriana

$L_{\text{stella}}(18 M_{\odot}) = L_{\text{bol}} = 3 \cdot 10^4 L_{\odot} \rightarrow$ sistema binario? \rightarrow
disco kepleriano *circum-binario*?

Luminosità totale sistema binario con $M_p+M_s=18 M_\odot$



Risultati: G35.03+0.35

G35.03+0.35

MJy/sterad

10^{10}

10^{11}

24 μm
343 GHz
3.6 cm

4.5 μm
350 GHz

10^3

10^2

10^1

0.5 pc

5

0

-5

$\Delta\alpha$ (arcsec)

δ (J2000)

2°01'20"

2°01'15"

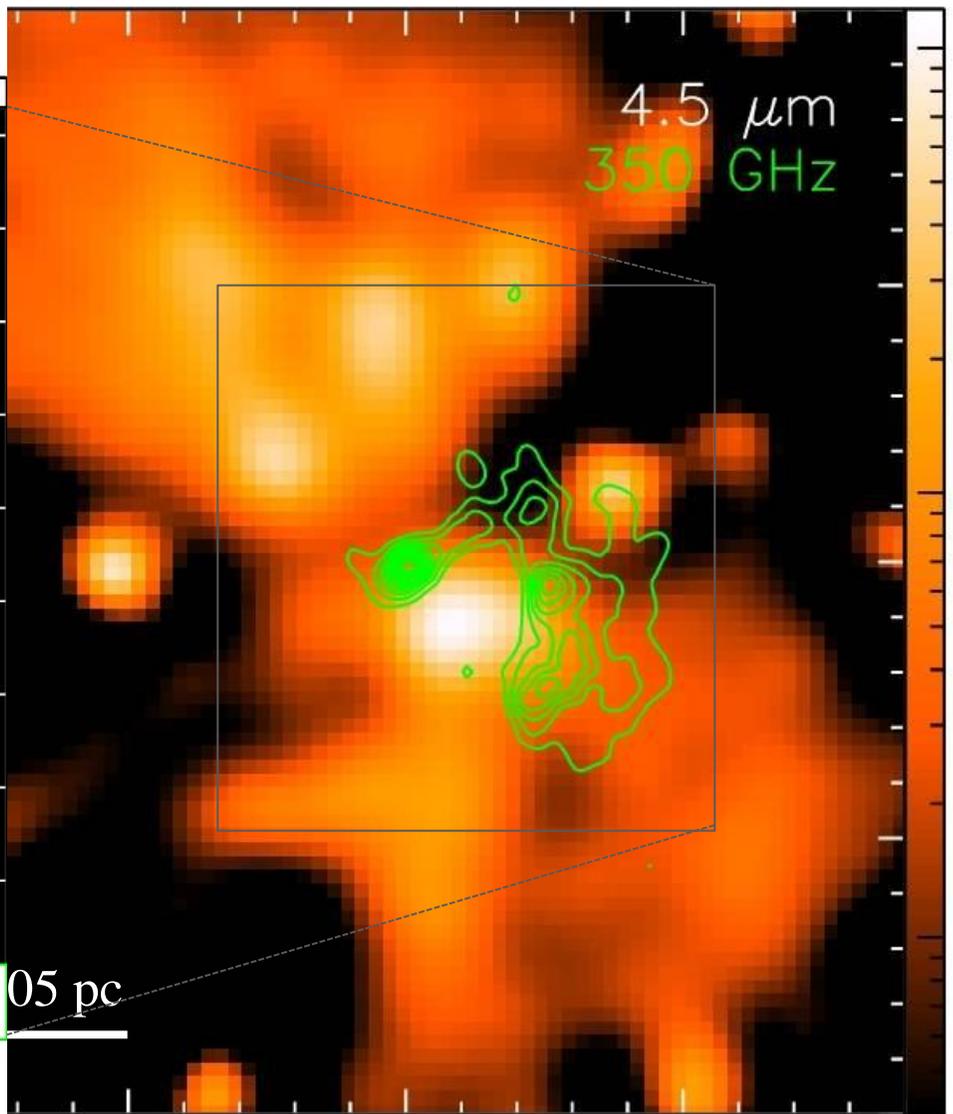
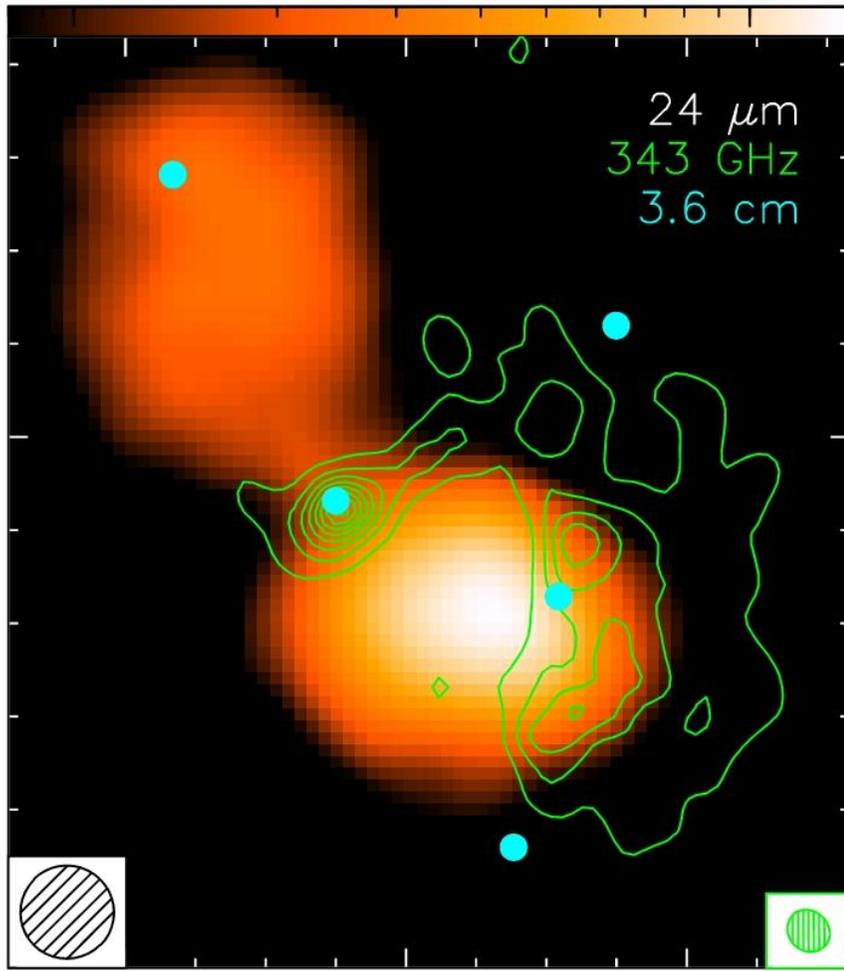
18^h54^m00.^s8

00.^s6

00.^s4

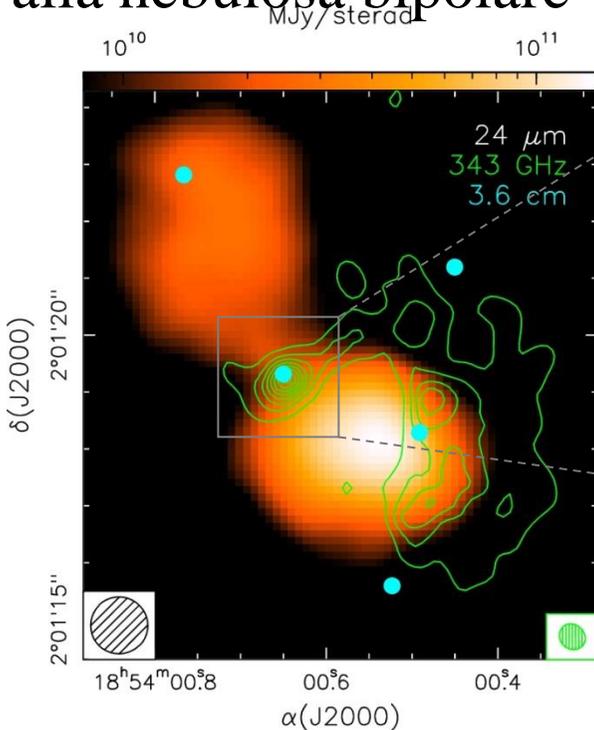
α (J2000)

Beltran et al. (2014)

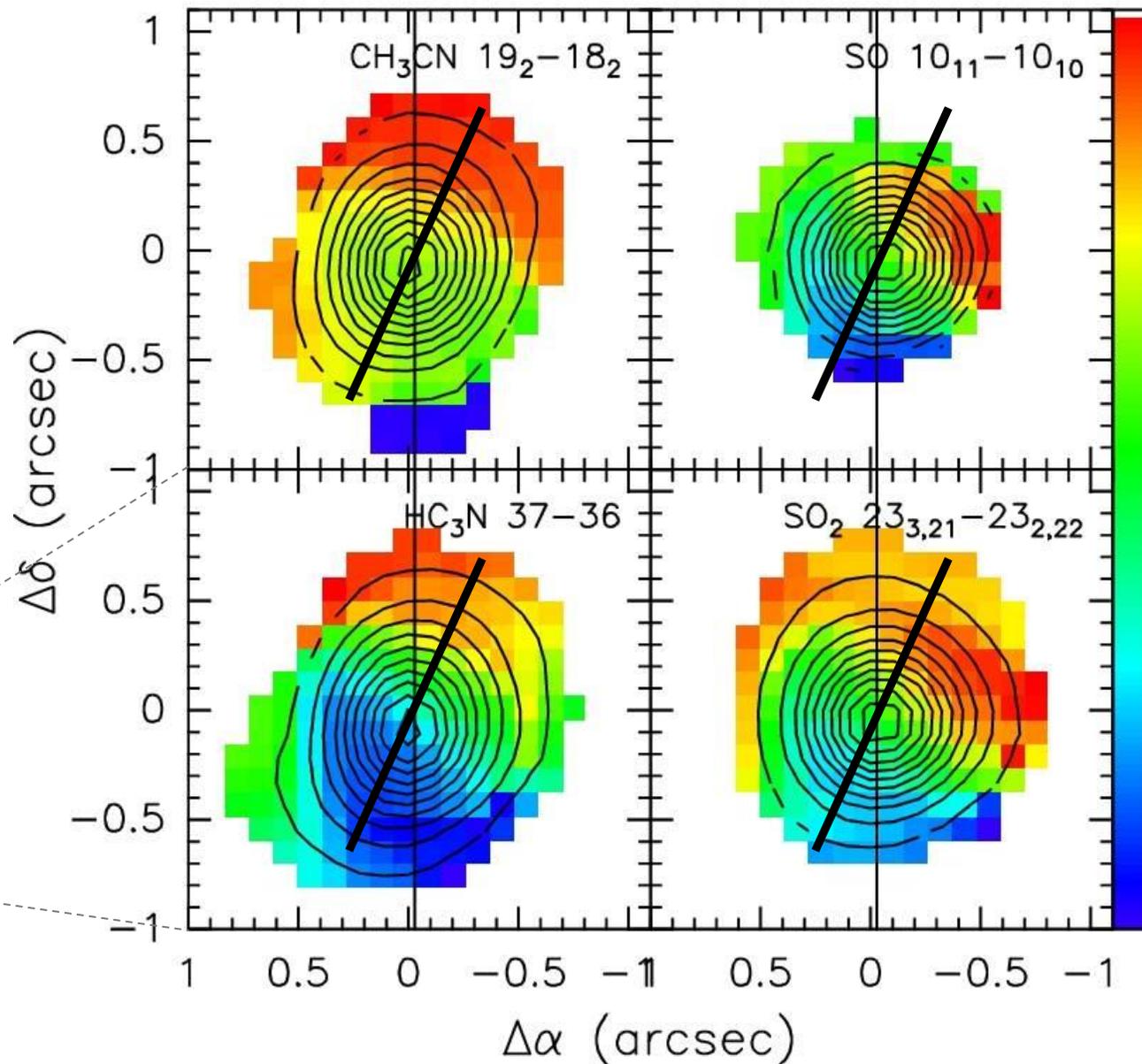


Beltran et al. (2014)

Mappe di brillantezza
(contorni) e velocità
(colore) in varie
molecole →
Gradiente di velocità
circa **perpendicolare**
alla nebulosa bipolare



G35.03+0.35

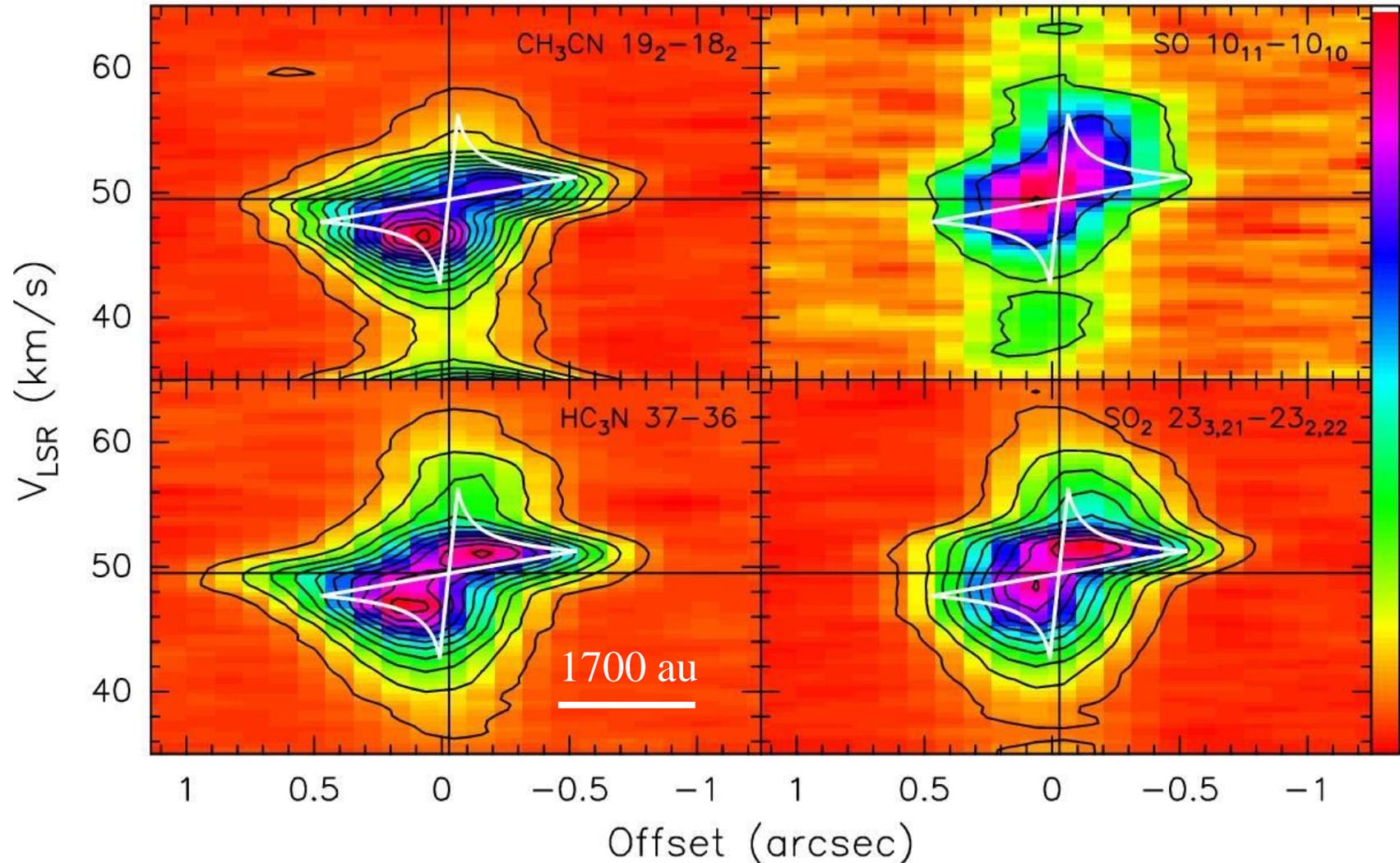


G35.03+0.35 main core

- Plot posizione-velocità lungo gradiente di velocità
- Curva bianca: rotazione **kepleriana** attorno a $9 M_{\odot}$

G35.03+0.35

Beltran et al. (2014)



Dischi

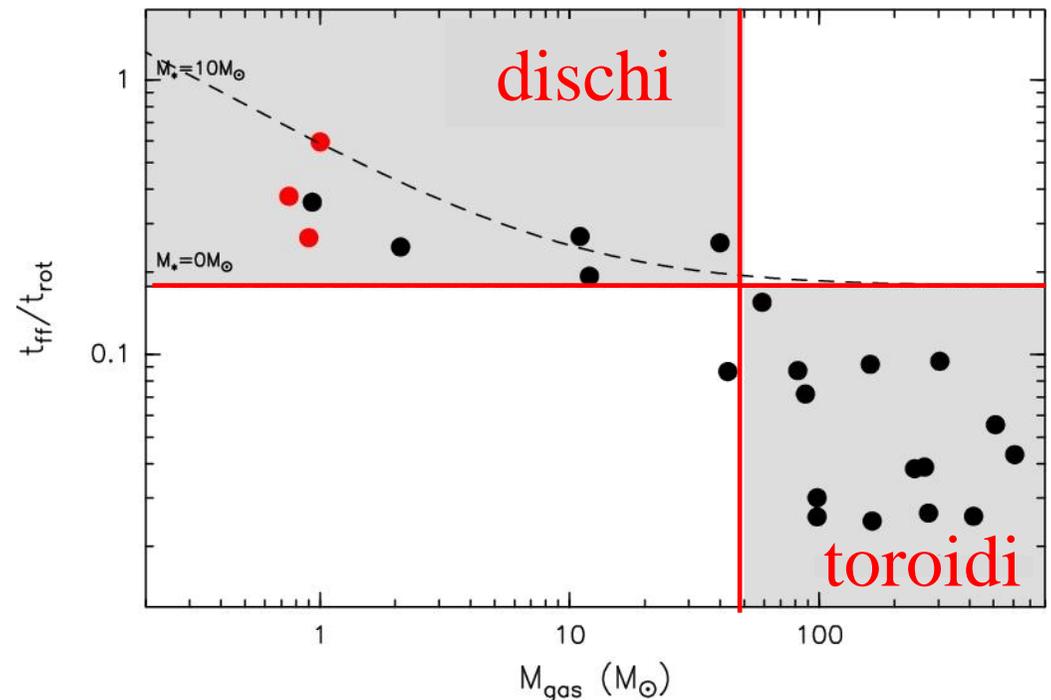
- $M < \text{alcune } 10 M_{\odot}$
 - $R \sim 1000 \text{ AU}$
 - $L \sim 10^4 L_{\odot} \rightarrow$ (proto)stelle **B**
 - grande $t_{\text{acc}}/t_{\text{rot}}$
- \rightarrow strutture *circumstellari* in equilibrio

$$\frac{t_{ff}}{t_{rot}} = \sqrt{\frac{M_{star} + M_{gas}}{32 M_{gas}}}$$

Beltran et al. (2010, 2014)
Sanchez-Monge et al. (2014)

Toroidi

- $M > 100 M_{\odot}$
 - $R \sim 10000 \text{ AU}$
 - $L > 10^5 L_{\odot} \rightarrow$ (proto)stelle **O**
 - piccolo $t_{\text{acc}}/t_{\text{rot}}$
- \rightarrow strutture **transienti** attorno a *cluster*



Interrogativo

Perché **non** si osservano **dischi** attorno a
(proto)stelle di **tipo O** ?

Possibile causa: **bias osservativo** per scarsa
sensibilità e bassa *risoluzione angolare*

Ipotesi:

$$\text{HPBW} = R_{\text{disk}}/4$$

$$\text{FWHM}_{\text{line}} = V_{\text{rot}}(R_{\text{disk}})$$

$$M_{\text{disk}} \propto M_{\text{star}}$$

$$\langle N_{\text{col}} \rangle = \text{cost.}$$

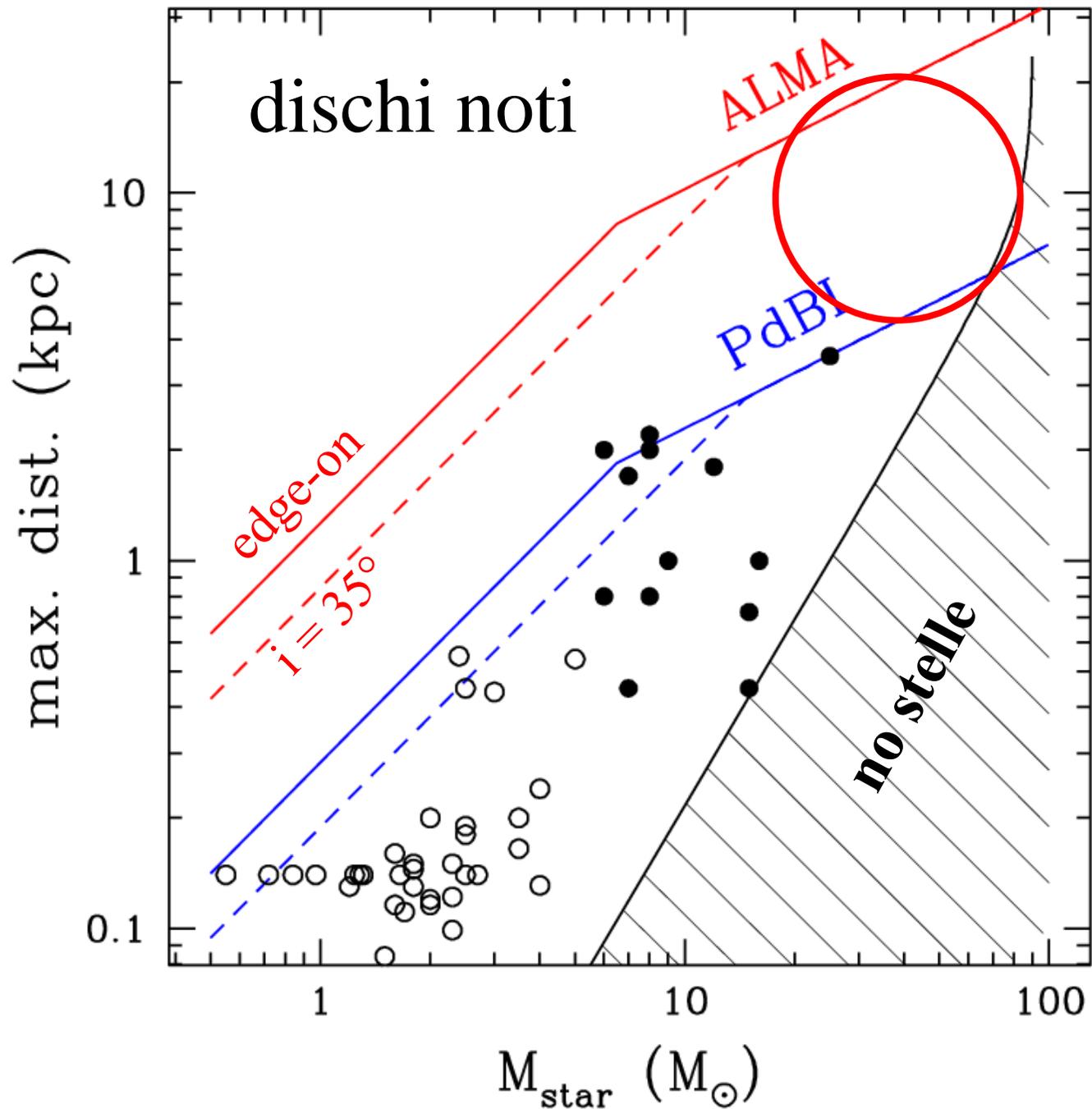
$$T_{\text{B}} > 20 \text{ K}$$

$$\nu = 230 \text{ GHz}$$

5 ore ON-source

$$\text{risol. spett.} = 0.2 \text{ km/s}$$

$$S/N = 20$$

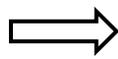


Proposta ALMA Cycle 2: 11 ore

R. Cesaroni, M.T. Beltran, H. Beuther, A. Chrysostomou, T. Csengeri, S. Etoaka, G. Fuller, D. Galli, R. Galvan-Madrid, C. Goddi, T. Henning, M. Hoare, C. Hummel, K. Johnston, P. Klaassen, R. Kuiper, N. Kumar, S. Lumsden, L. Maud, L. Moscadelli, J. Mottram, T. Peters, T. Ratzka, A. Sanchez-Monge, P. Schilke, F. van der Tak, L. Testi, M. Thompson, S. Vig, C.M. Walmsley, K.-S. Wang, H. Zinnecker

- **Scopo:** Rivelare primo **disco** attorno a **(proto)stella O**
- **Metodo:** **alta risoluzione** (0.2'') a **1 mm**; traccianti di **alta densità/temperatura** otticamente **sottili** ($^{13}\text{CH}_3\text{CN}$) per disco e di **shock** (SiO) per jet/outflow
- **Target:** **toroidi** con $L_{\text{bol}} > 10^5 L_{\text{O}}$ + **colore mid-IR** di protostella OB + evidenza di **outflow** + emissione **CH_3CN** o analogo + distanza **< 8 kpc** → **7 oggetti**

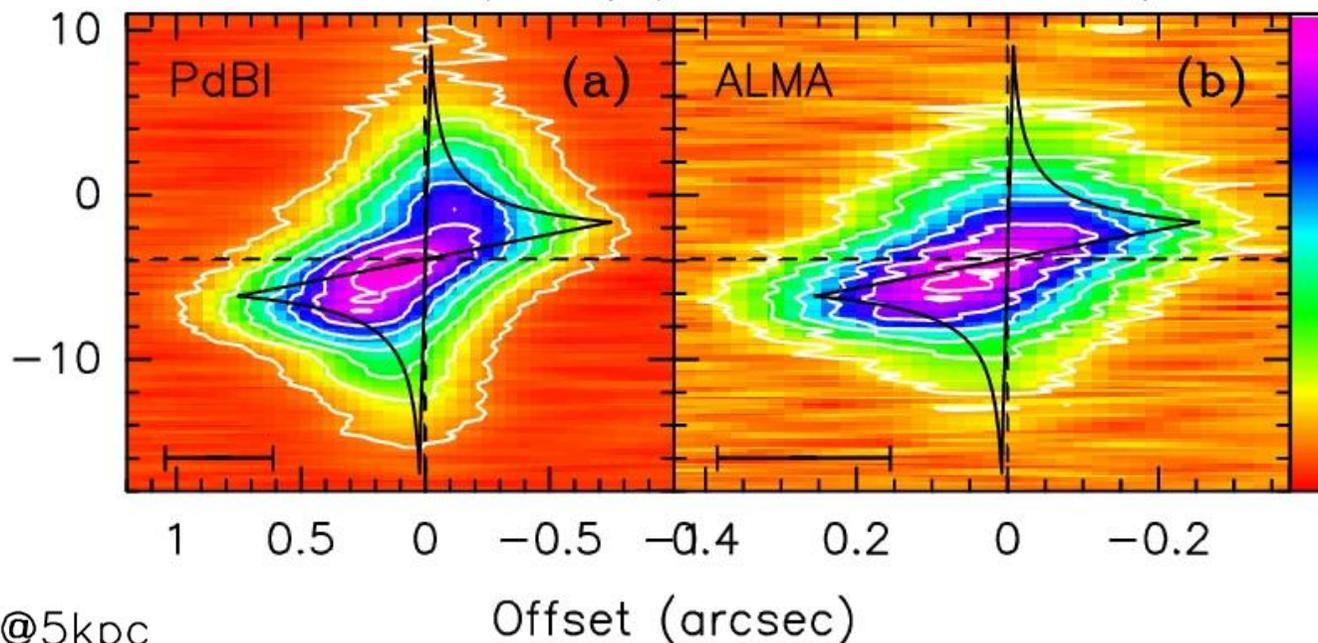
P-V plot di
disco **vero**
visto da ALMA
a 5 kpc



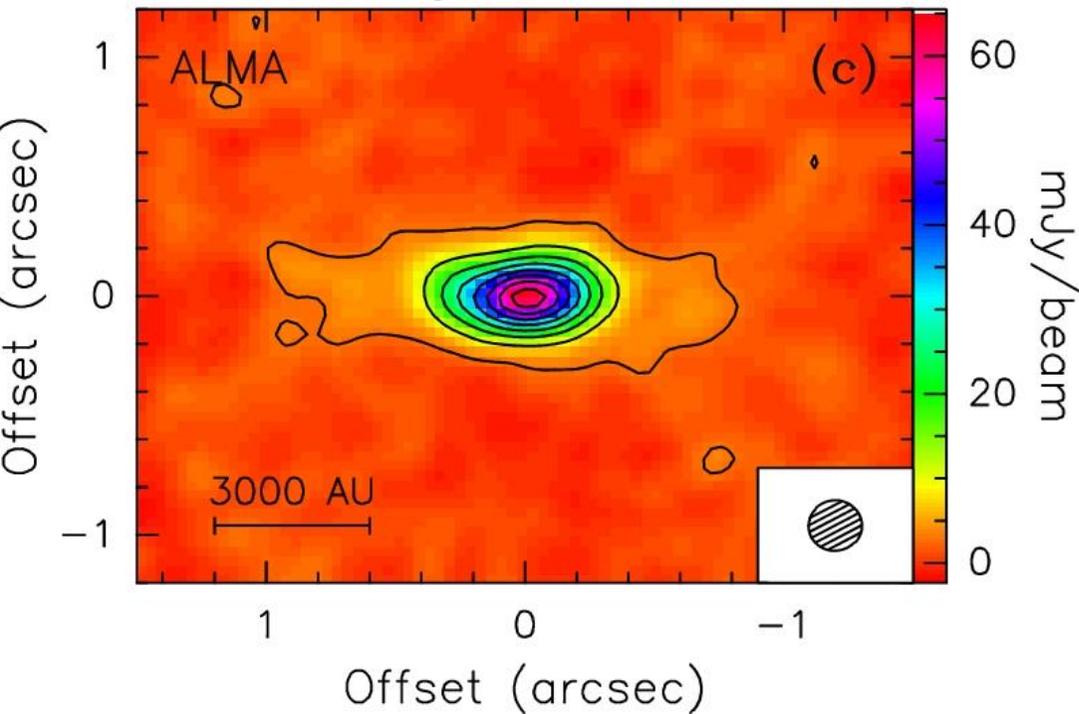
V_{LSR} (km/s)

IRAS20126+4104 (1.6 kpc)

simulation @ 5 kpc



model $^{13}\text{CH}_3\text{CN}(13-12)$ @5kpc



simulazione di disco
attorno a stella di
 $44 M_{\odot}$ osservato con
ALMA a 5 kpc



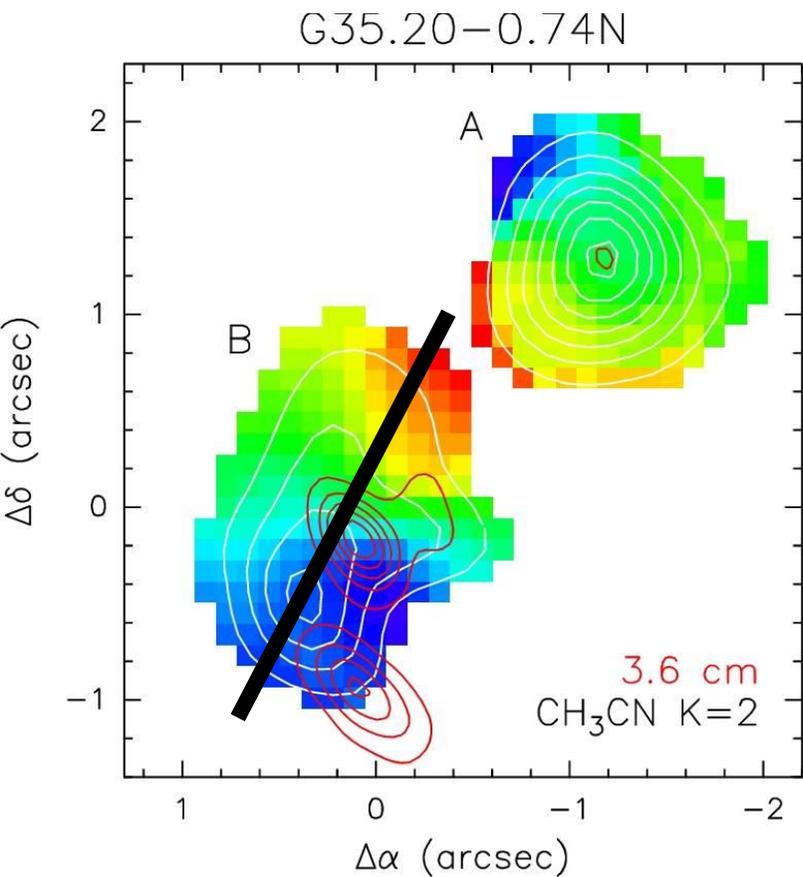
Risultato “garantito”

- **Detection** → formazione mediante disco
probabile anche per **stelle O**
- **Non-detection** → altro meccanismo necessario
per formazione **stelle O**

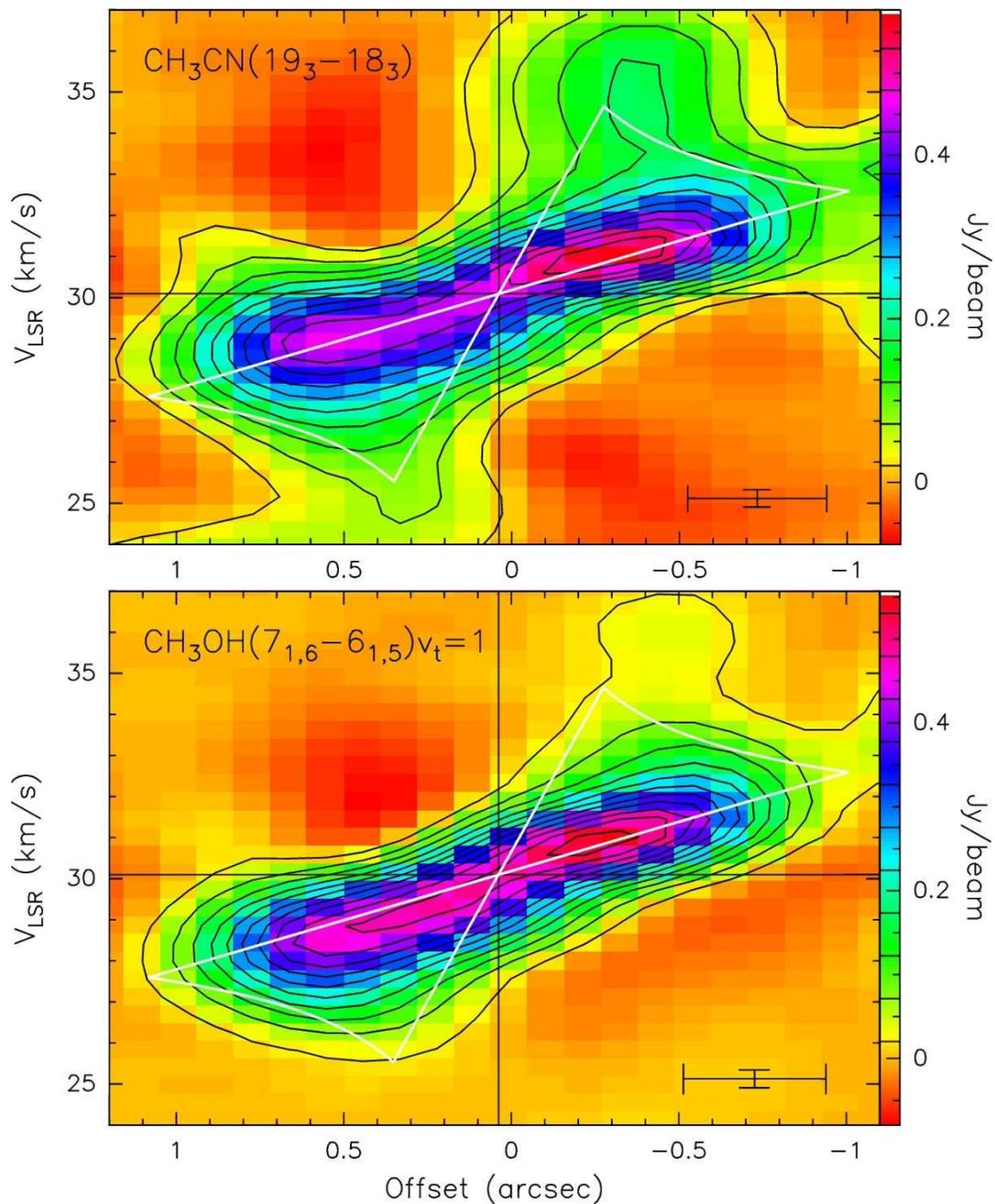
Inoltre: struttura disco, relazione con jet,
frammentazione involuppo, chimica gas
circumstellare, ecc. ...

G35.20-0.74N core B

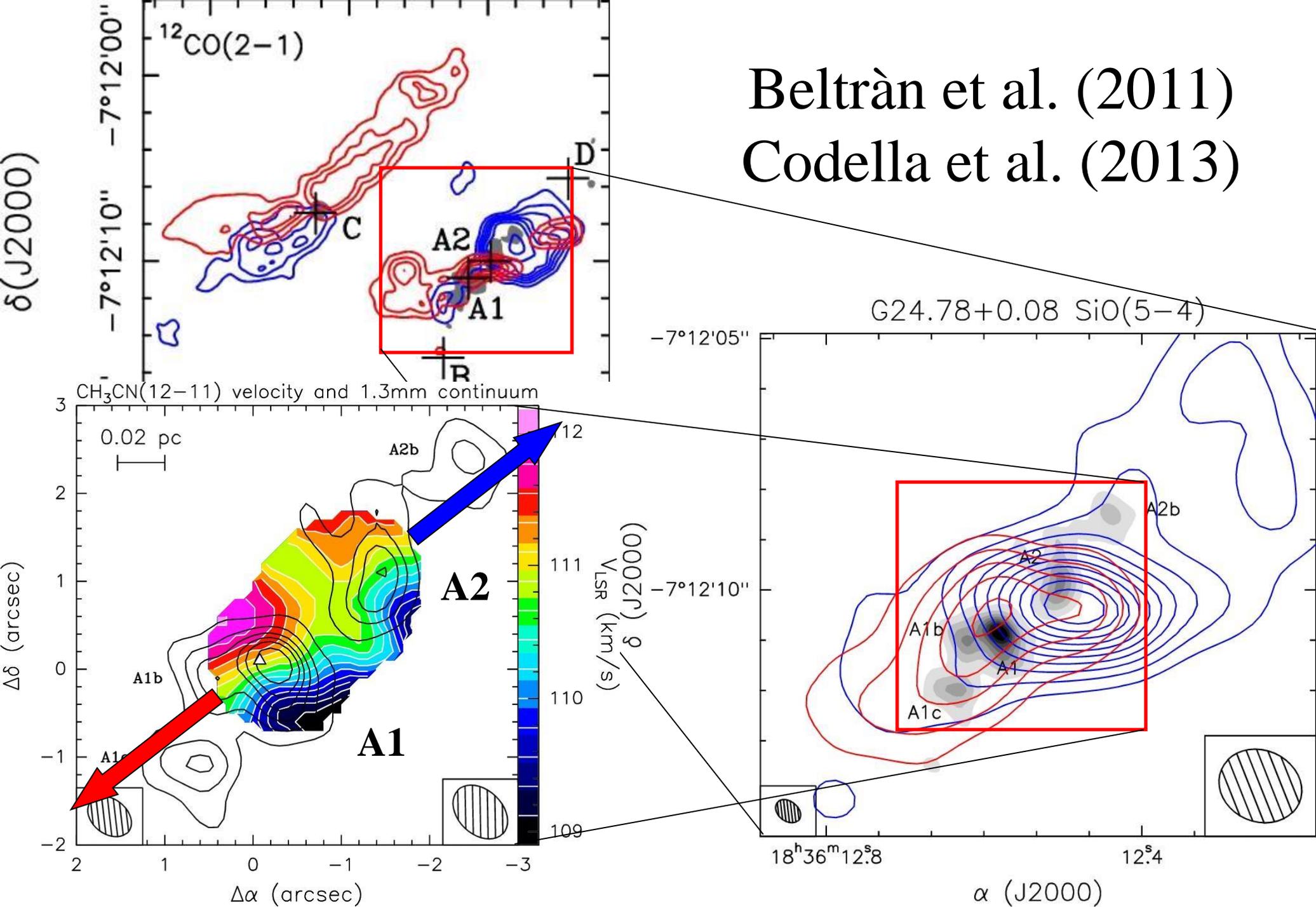
- Plot posizione-velocità lungo gradiente di velocità
- Curva bianca: rotazione kepleriana attorno a $18 M_{\odot}$



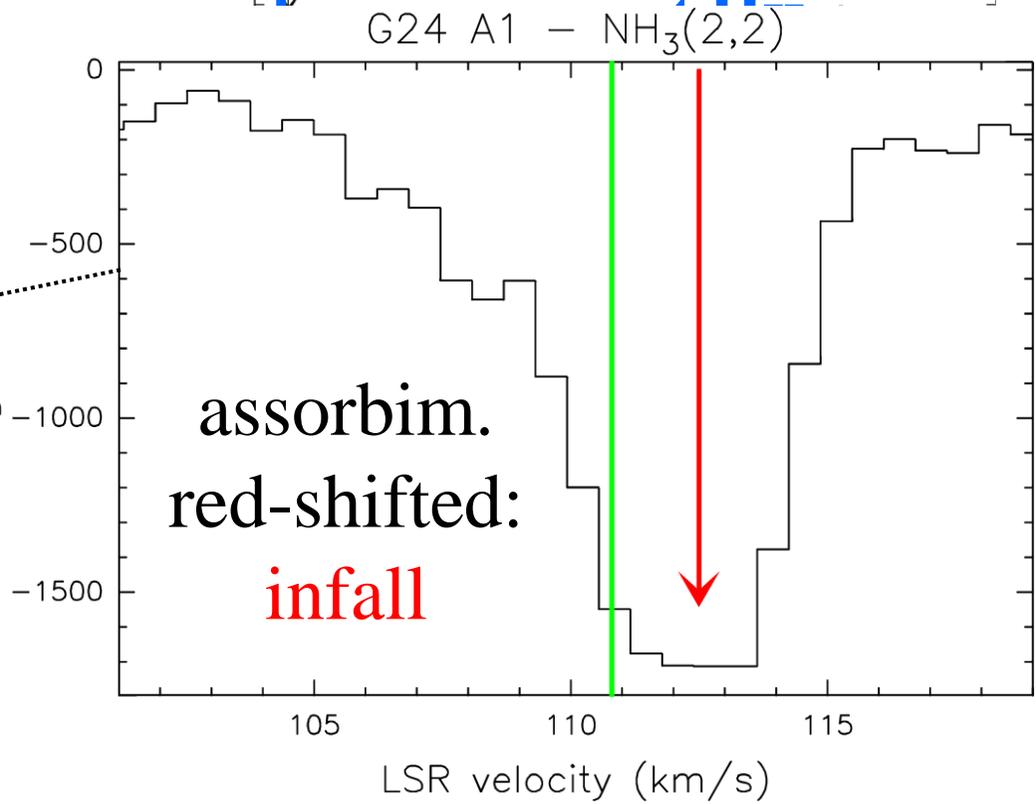
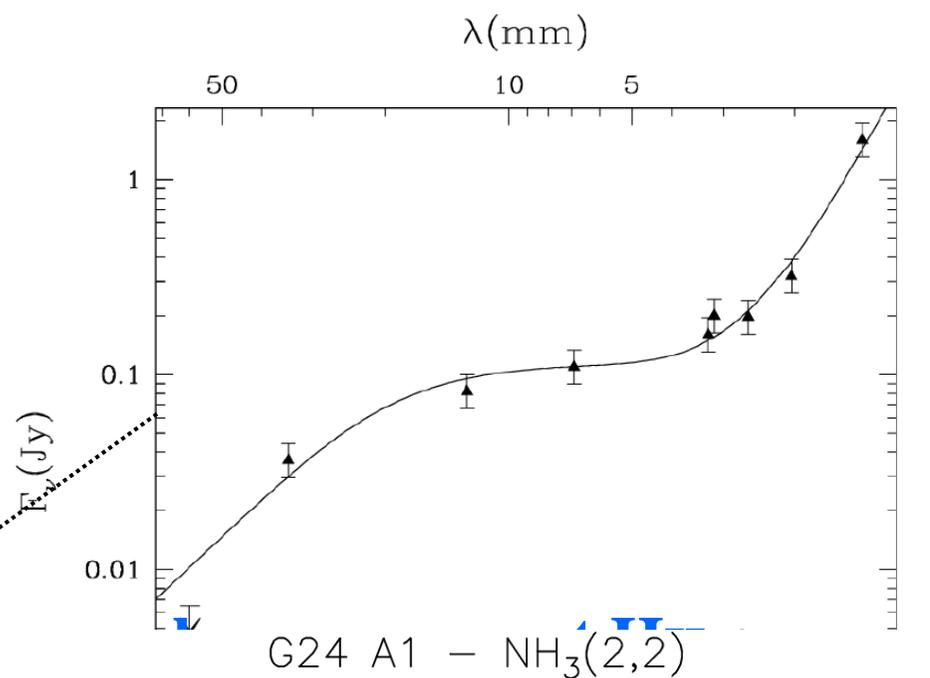
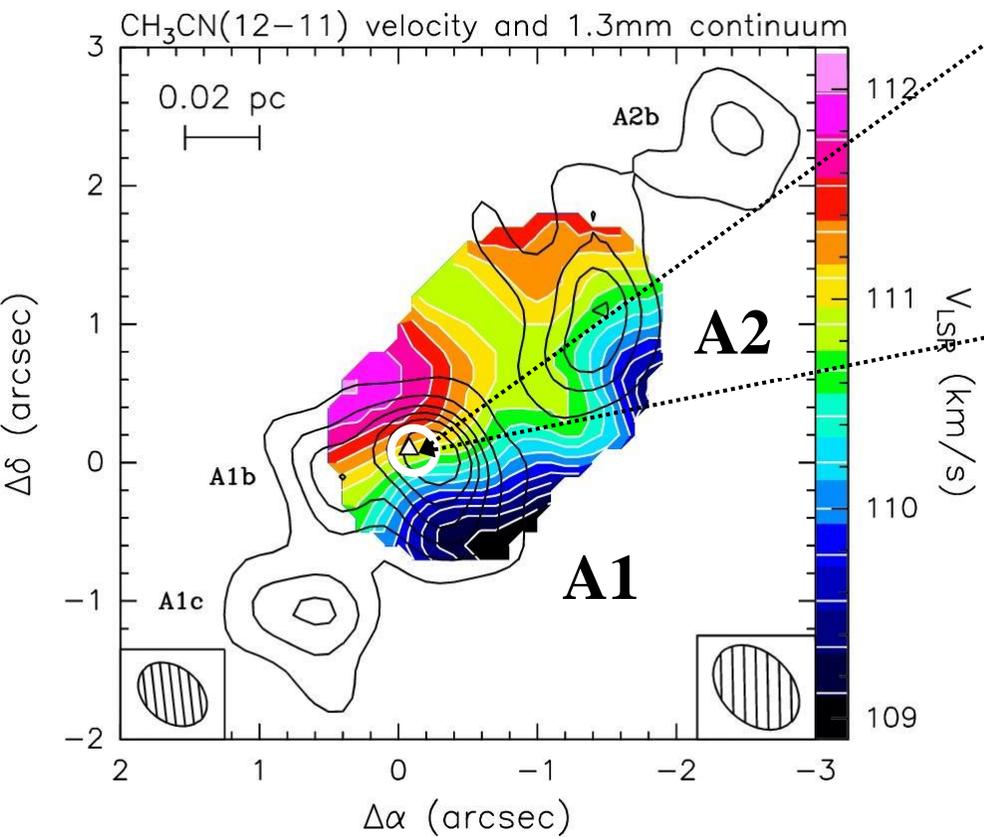
Sanchez-Monge et al. (2014)



Beltràn et al. (2011)
Codella et al. (2013)



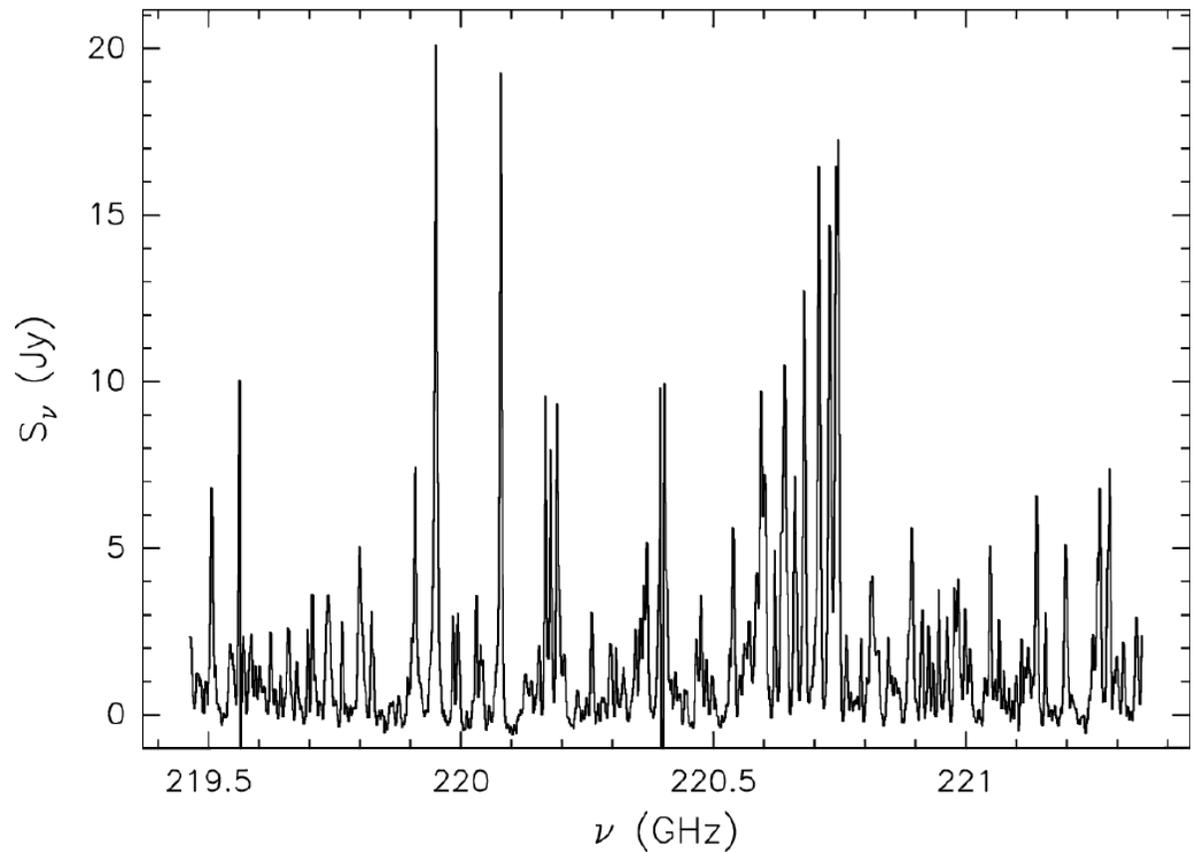
Beltran et al. (2006)
Beltran et al. (2011)



Tuttavia può essere “challenging”
persino con ALMA:

Righe **otticamente sottili** necessarie → difficili da
distinguere

Line forest!



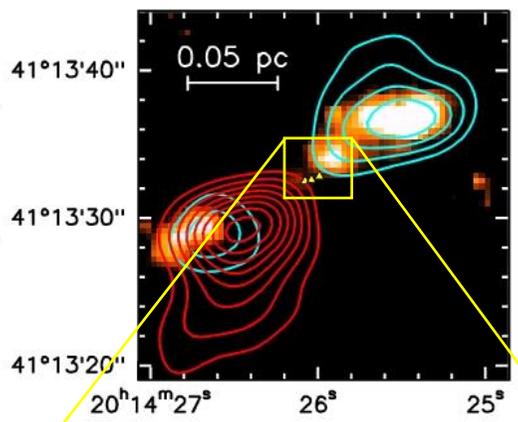
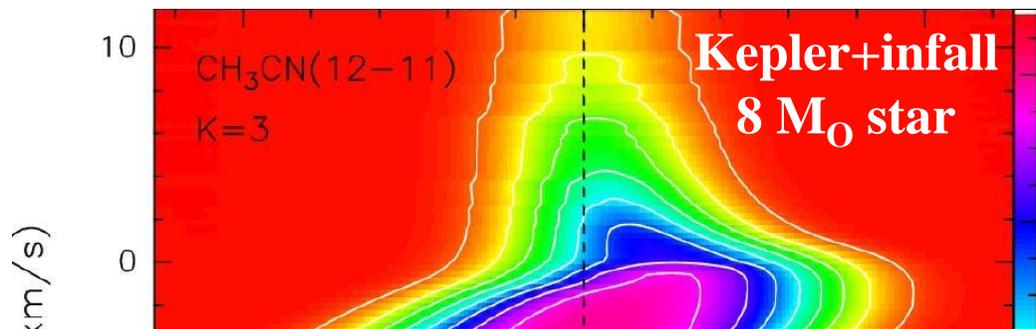
Osservazioni pre-ALMA: Esempio di stella **O**

Risultati:

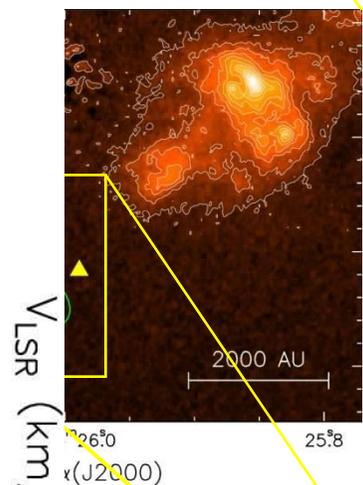
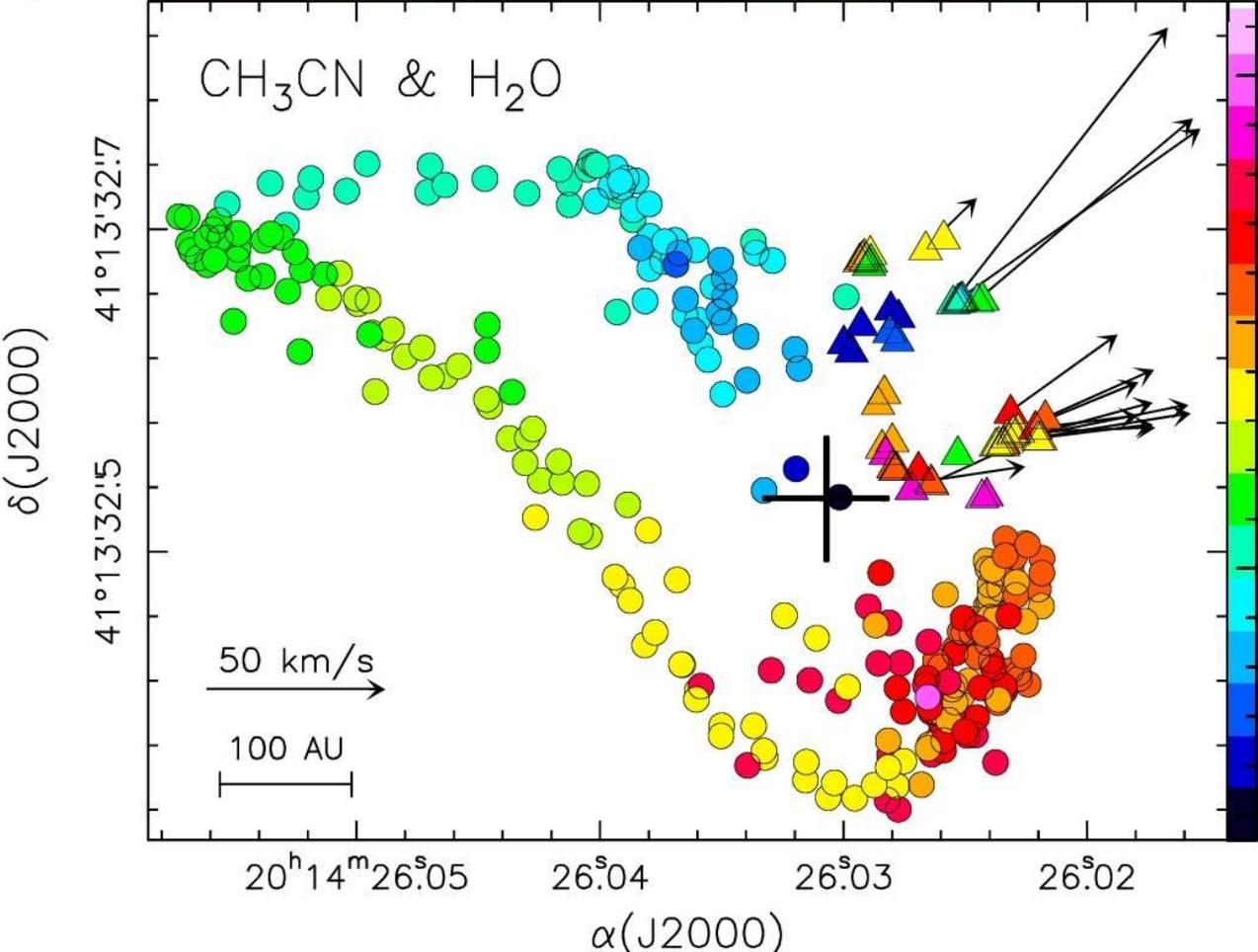
- $M_{\text{star}} = 20 M_{\odot}$ dentro core con $M_{\text{gas}} = 130 M_{\odot}$
- Gradiente di velocità perpendicolare ad asse outflow
→ core **rotante** → **toroide** (\neq disco)
- Assorbimento red-shifted in riga molecolare contro regione HII → **infall** verso stella O ($10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$)
→ **accrescimento** sulla stella?

Osservazioni pre-ALMA:
Esempio di **stella B**

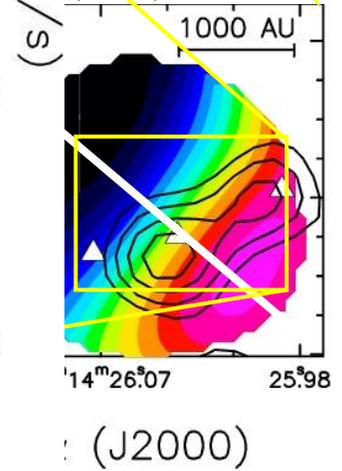
IRAS 20126+4104



- Image: H₂ v=1-0 S(1)
- HCO⁺(1-0) blue
 - HCO⁺(1-0) red
 - ▲ H₂O masers



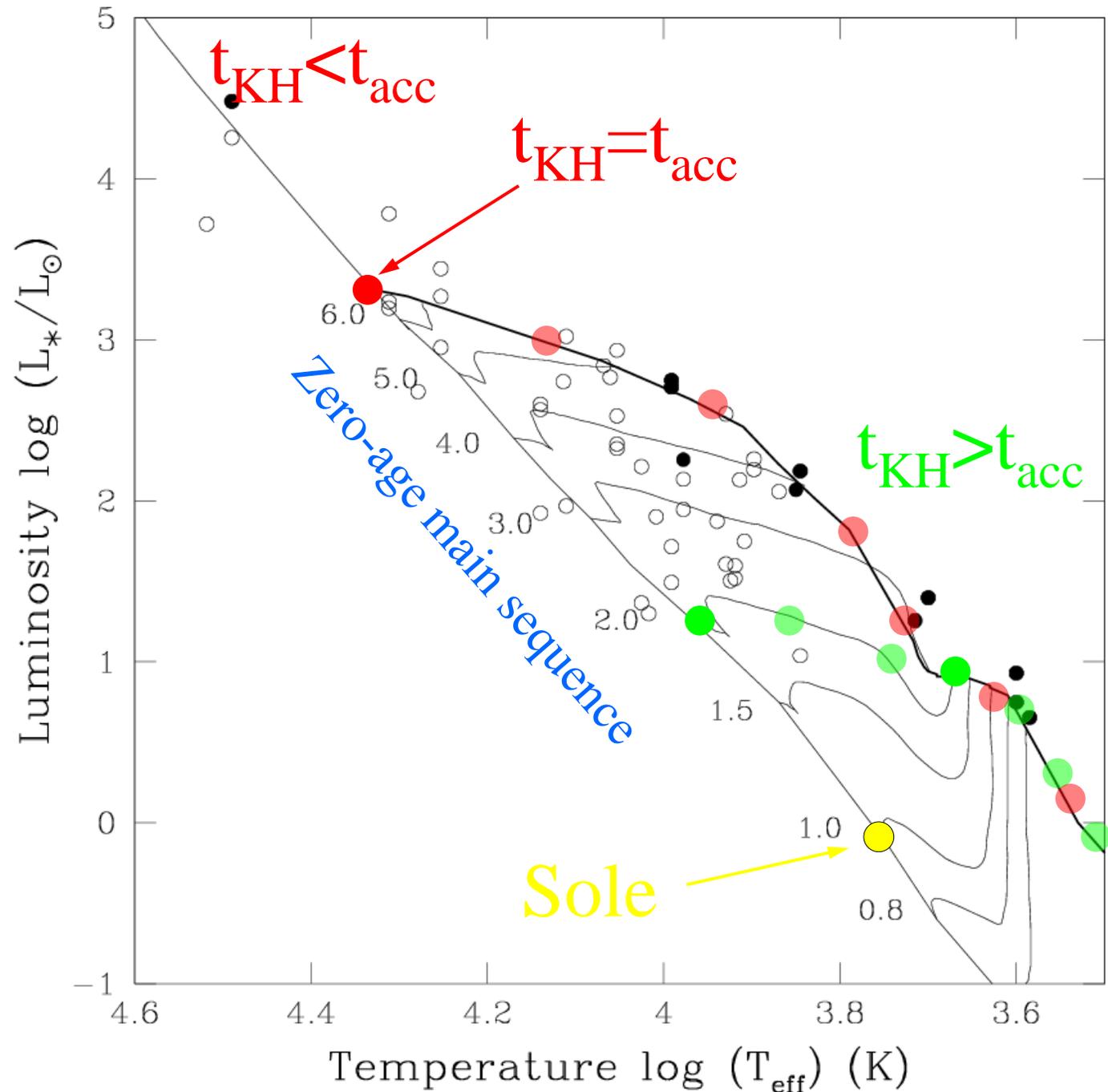
- Image: H₂ at 2 μ m
- CH₃CN
 - ▲ H₂O masers



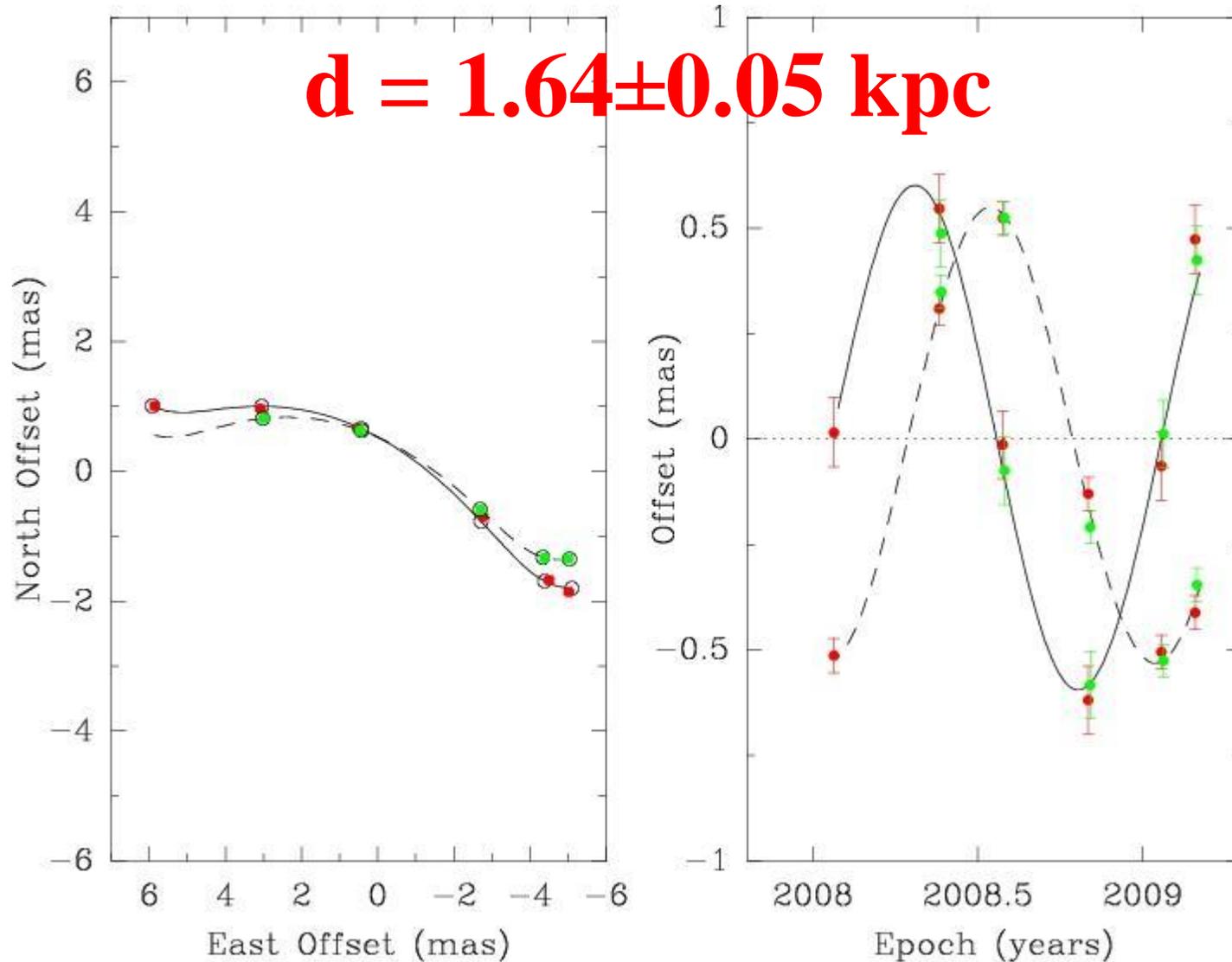
- Color: $V_{\text{LSR}}(\text{C}^{34}\text{S})$
- △ H₂O masers
 - 3.6cm cont.

Palla & Stahler (1990, 1993)

accrescimento con
 $dM/dt=10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$

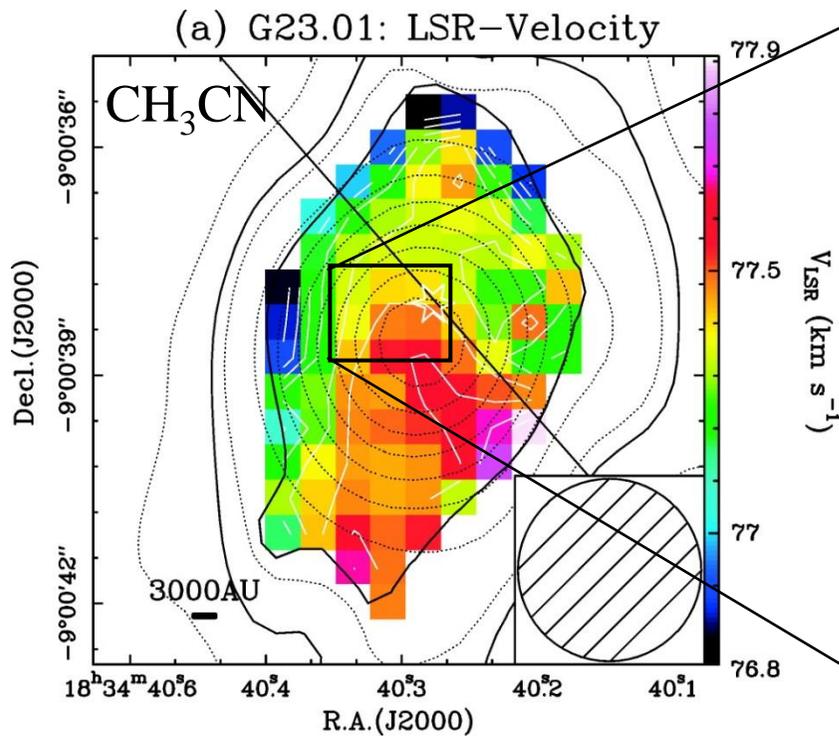


Misura di distanza di **IRAS 20126+4104** con Parallasse maser H₂O (Moscadelli et al. 2010)



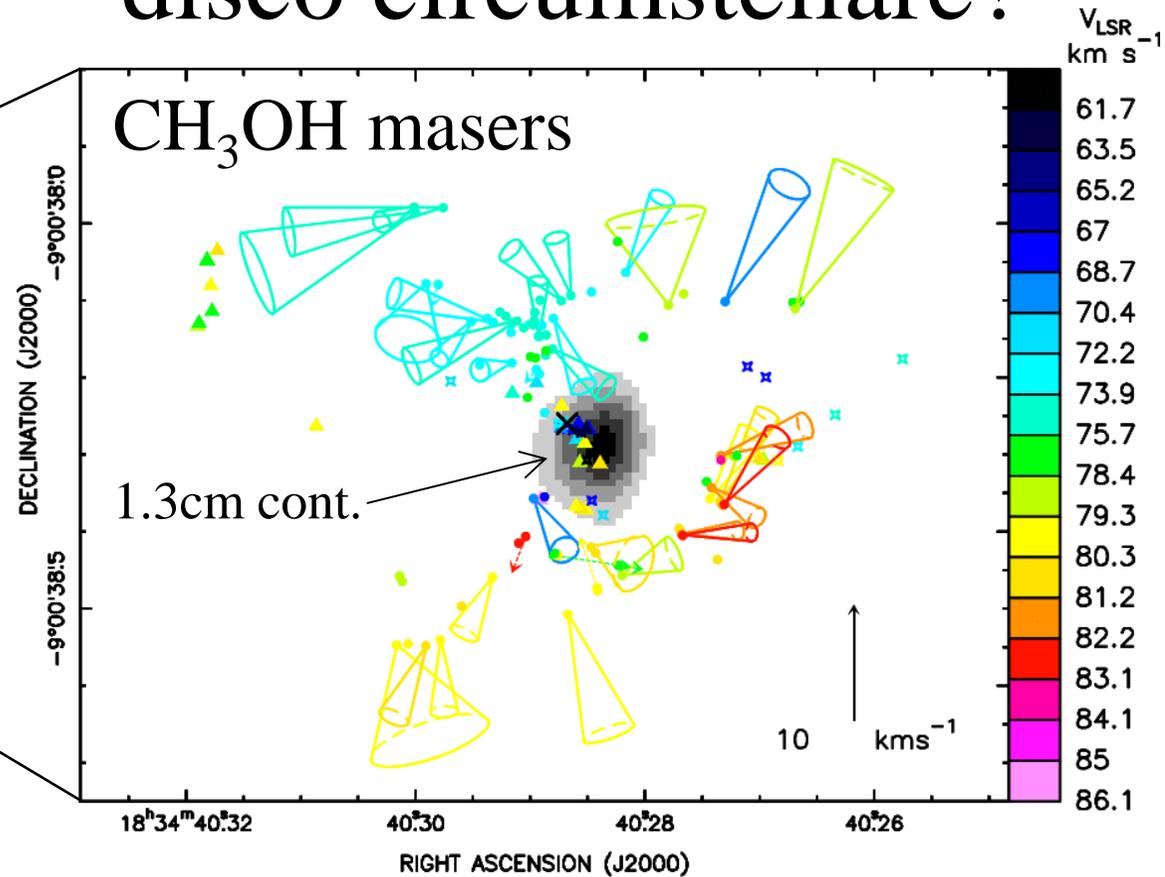
Il futuro: con ALMA completo dischi dentro toroidi in stelle O

toroide rotante?



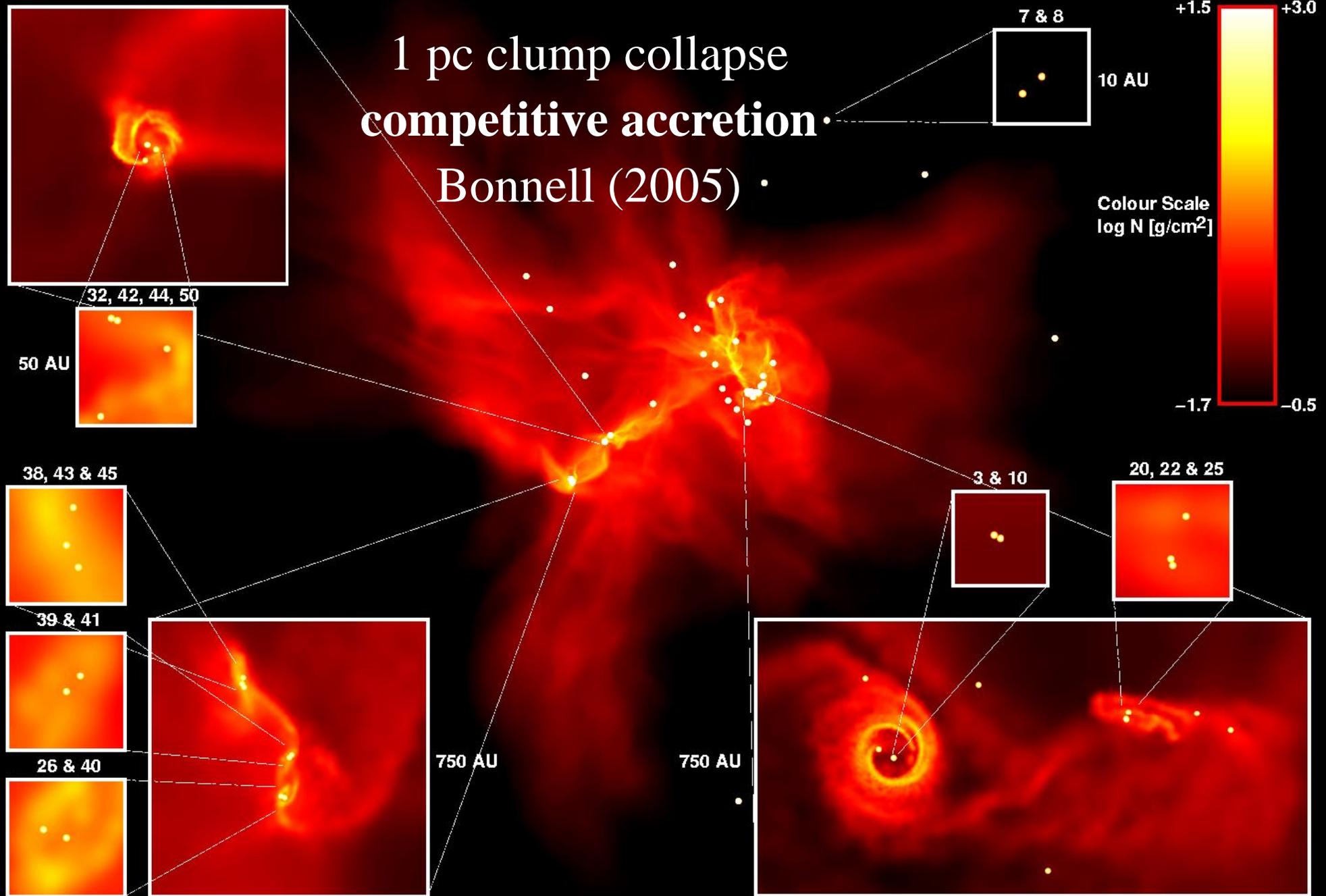
Furuya et al. (2008)

disco circumstellare?



Sanna et al. (2010)

1 pc clump collapse competitive accretion Bonnell (2005)



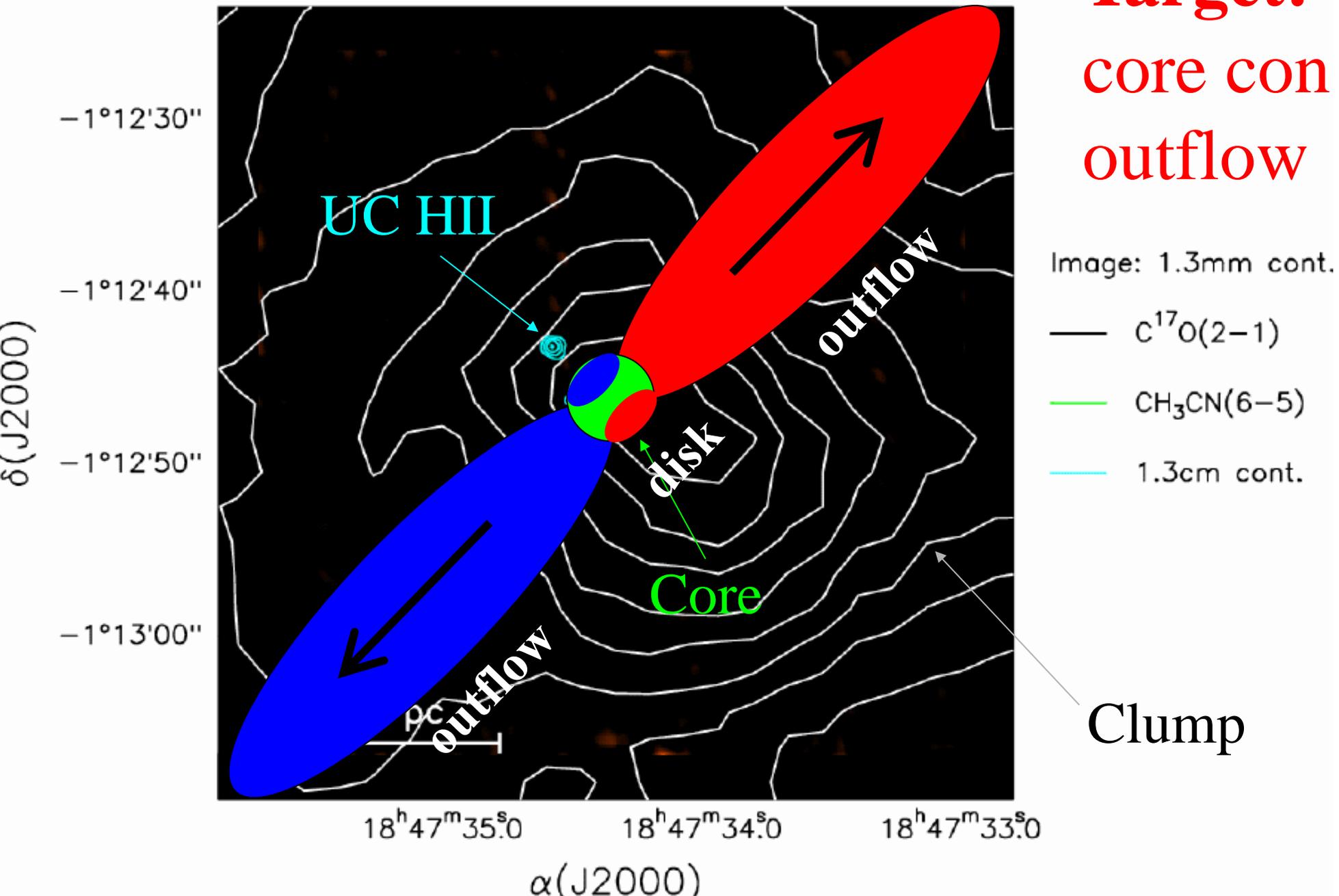
Ricerca dei dischi

Dove cercarli? → scelta **target**

Cosa osservare? → scelta **tracciante**

G31.41+0.31

Target:
core con
outflow



Traccianti possibili:

$A_V \sim 1000 \text{ mag} \rightarrow \text{radio-submm}$

TRACCIANTE	PRO	CONTRA
Righe maser	Alta risol. angolare; moti propri \rightarrow vel. 3D	Informazione “patchy”
Continuo (sub)mm	Banda larga \rightarrow Alta sensibilità	No info velocità Confusione con free-free e/o involuppo
Righe molecolari termiche	Cinematica e geometria di outflow e disco	Risoluzione e sensibilità \rightarrow ALMA!