

B

O型星周囲の回転トロイドにおける
と降着流と分裂過程の
観測からのヒント

古屋 玲

徳島大学 全学共通教育センター

2014年1月22日(JST): 初代星・初代銀河研究会

本講演の流れ

1.銀河系内の大質量星形成領域の回転と降着の観測

- 概観
- (サブ)ミリ波干渉計による詳細観測

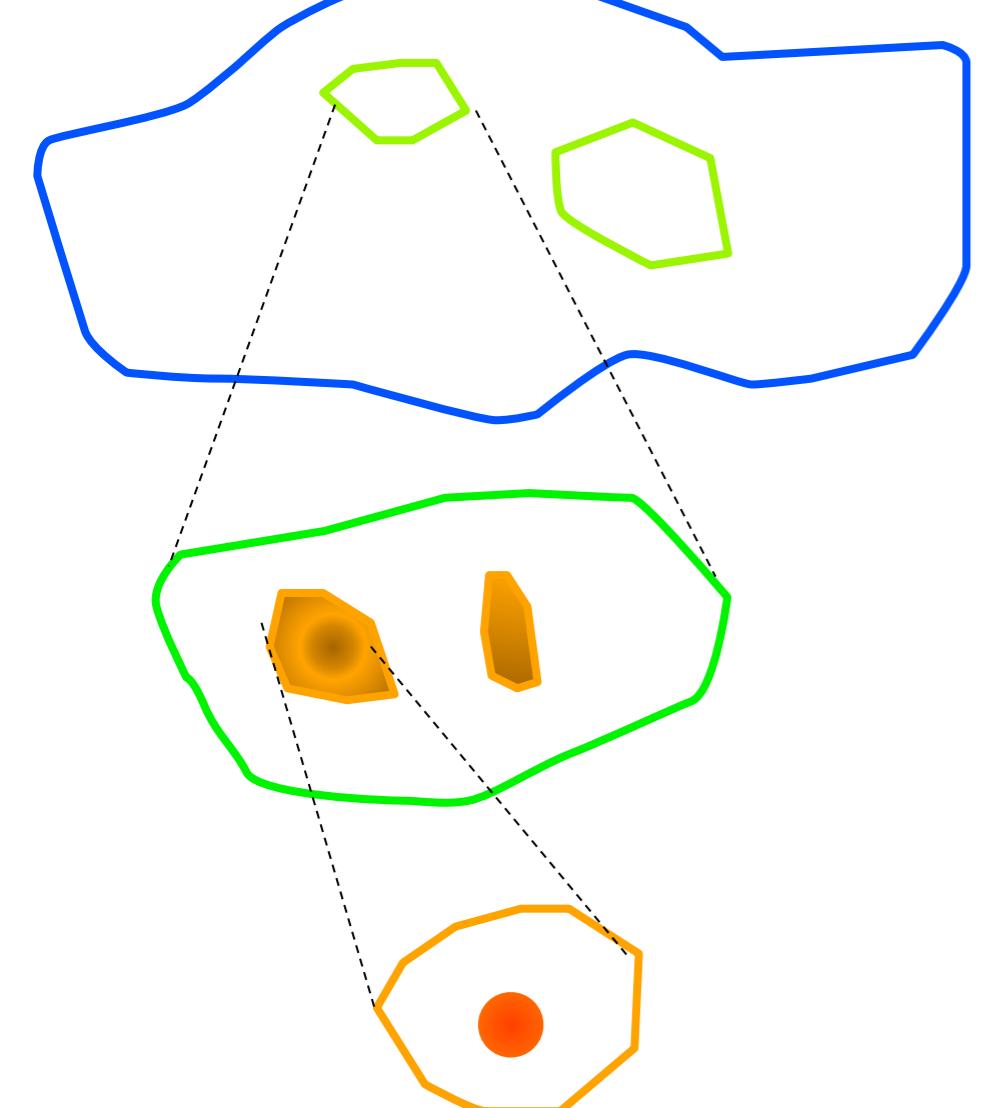
2.これまでの降着流の観測を整理する

- 動機
- サンプル、観測の限界
- 解析と結果

3.まとめ

銀河系内の大質量星形成領域

02



Clouds: 10–100 pc; 10 K; 10^3 cm^{-3} ;
 ^{13}CO , C^{18}O , etc

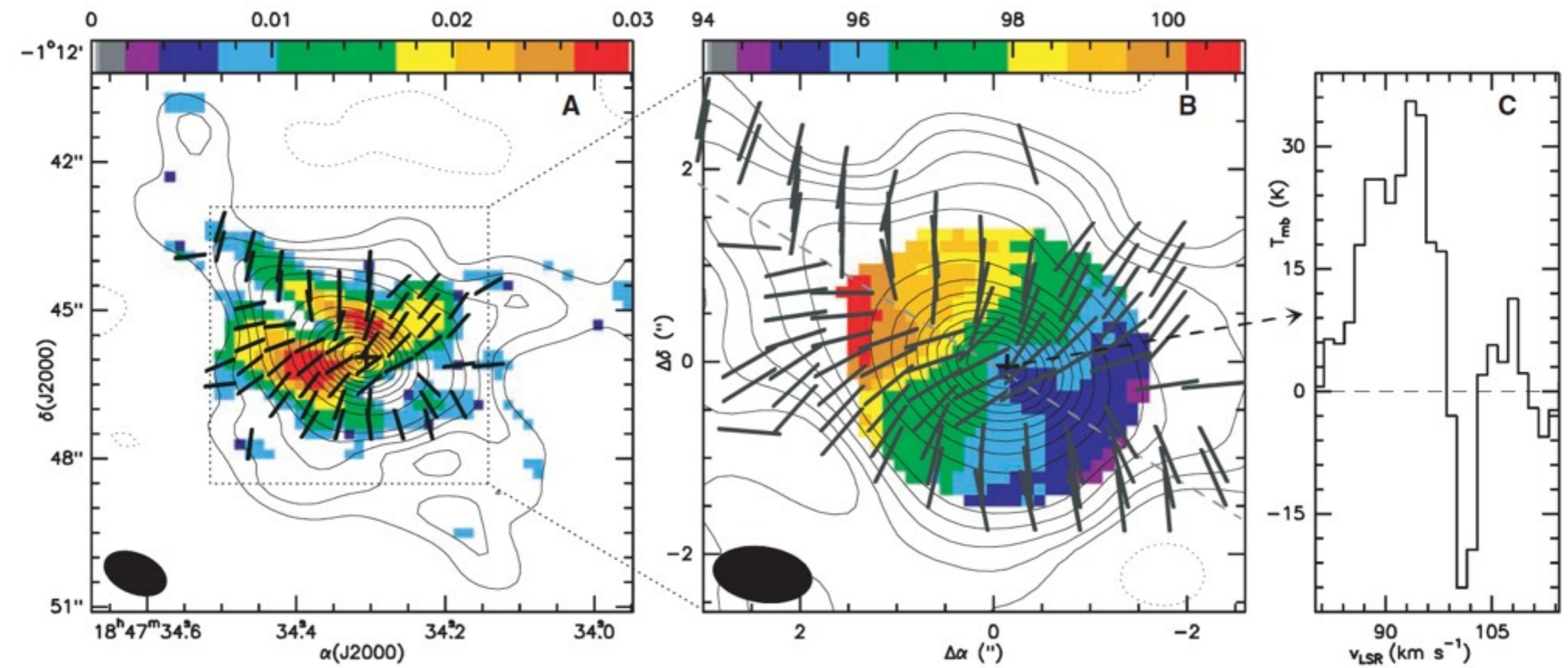
Clumps: 1 pc; 30 - 50 K; 10^5 cm^{-3} ; CS,
 C^{34}S etc

Hot Molecular Cores: 0.1 pc; 50
-100 K; 10^7 cm^{-3} ; CH_3CN , CN, etc

Massive YSOs: signposts: compact IR
source, masers, Ultra Compact HII
regions

分子輝線 + 干渉計による観測の例

03



Girart et al. 2009 Science 324, 1408

See also e.g, Welch+87, Sci. 238, 1550; Beltr'an+06 Nat. 443, 427; Zapata+08 AA 479, L25

若い大質量星周囲の回転ガスの観測まとめ 04

Disks

- Mass < a few $10 M_{\text{sun}}$
- Radius $\sim 1000 \text{ AU}$
- $L \sim 10^4 L_{\text{sun}} \rightarrow \text{B (proto)stars}$
- Large $t_{\text{ff}}/t_{\text{rot}}$
→ Equilibrium, circumstellar structures

Toroids

- Mass $> 100 M_{\text{sun}}$
- Radius $\sim 10000 \text{ AU}$
- $L > 10^5 L_{\text{sun}} \rightarrow \text{O (proto)stars}$
- Small $t_{\text{ff}}/t_{\text{rot}}$
→ Non-equilibrium, circum-cluster structures

See e.g, Cesaroni et al. 2007, Protostars & Planets V

回転ガスの観測：強みと弱み

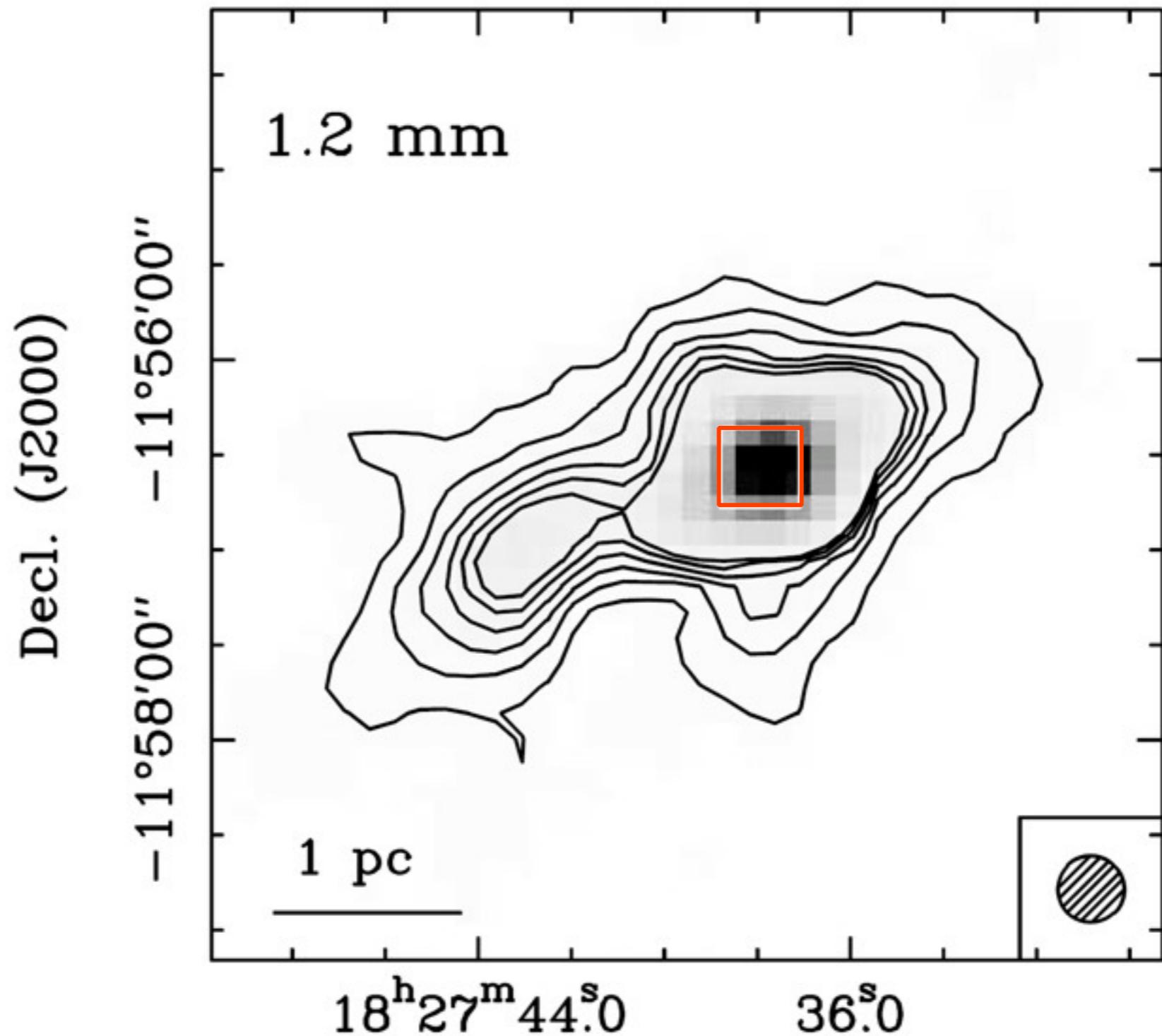
05

Continuum: IR, (sub)mm & cm	❖ High sensitivity in mass, esp, at submm (Detectable $0.1 M_{\text{sun}}$)	◦ Confusion between disk and wind emission ◦ No velocity info.
CH_3OH masers	❖ High angular resolution possible ❖ Very Common	◦ Derived stellar mass too low; ◦ H_2 jet parallel to CH_3OH masers ◦ Sensitive to variety of factors ◦ No column density info.
$\text{OH}, \text{H}_2\text{O}$ & SiO masers	❖ High angular resolution possible ❖ H_2O :Very Common	◦ Tracing outflow as well ◦ OH & SiO: Very few examples ◦ Sensitive to variety of factors ◦ No column density info.
Thermal Molecular Lines	❖ Possible to trace both outflow & disk ❖ Column density	◦ Poor angular resolution ◦ Ambiguity in abundance

分子輝線 + 干渉計による観測の例

06

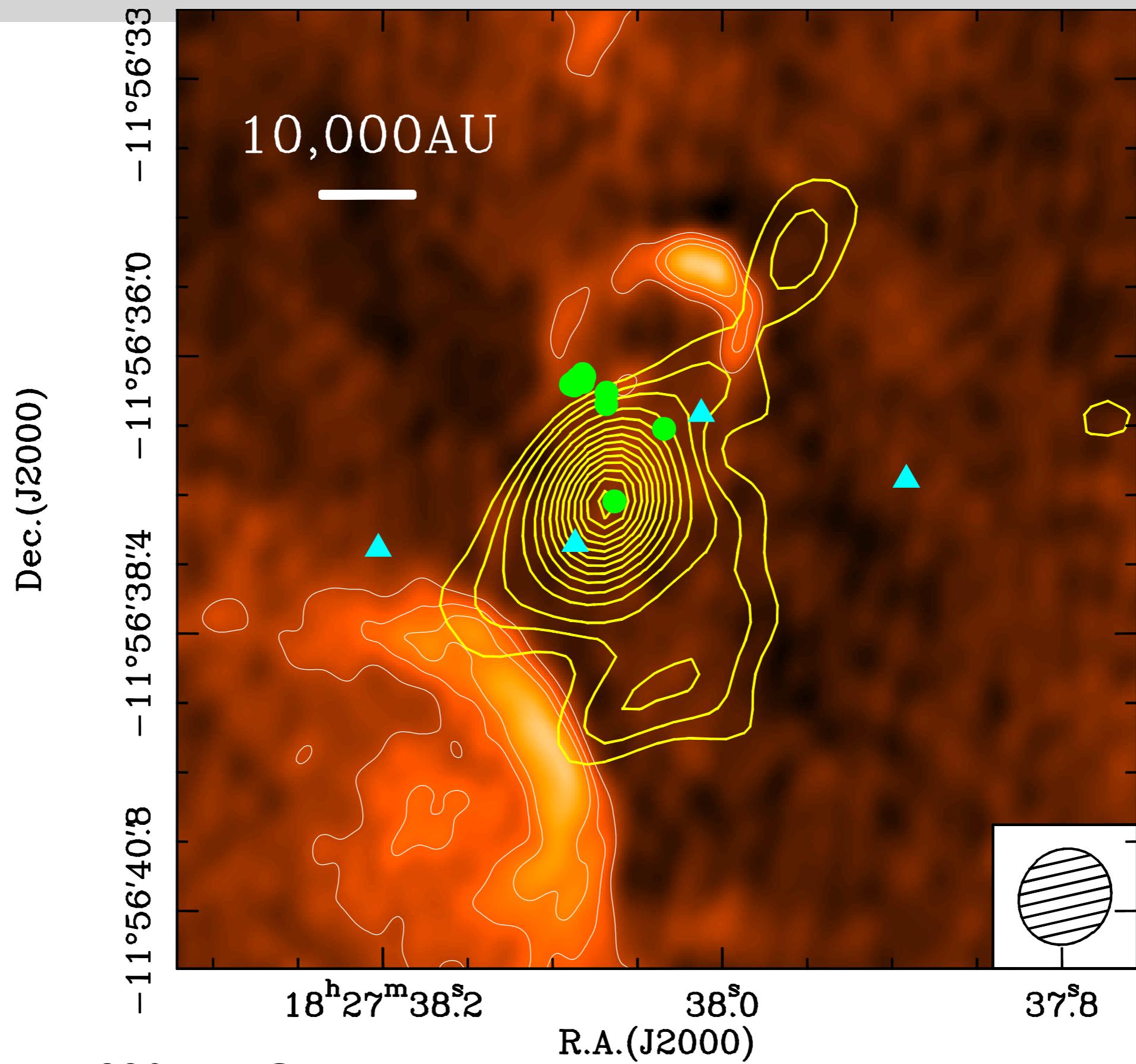
A pc-scale Clump: 1.2 mm Cont. towards G19.61-0.23



Clump mass = $2800 \pm 100 M_{\text{sun}}$; $T_d = 42 \text{ K}$; Size = $4.1 \times 1.7 \text{ pc}$ (Furuya et al. 2005a)

Image: 1.3 cm cont. ● : OH maser ▲ : H₂O maser

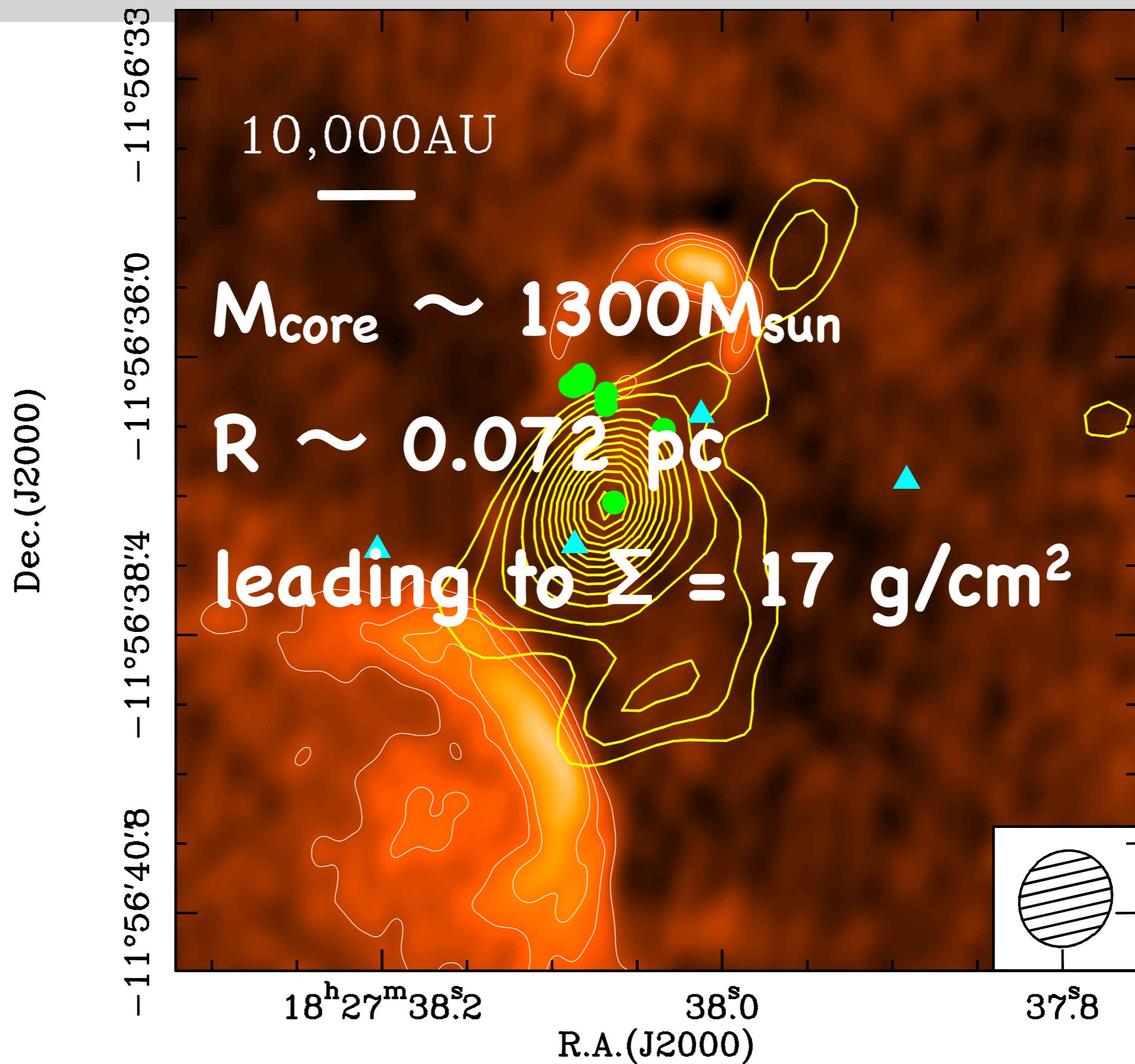
10



Yellow Contour: 890 μm Continuum

Furuya, Cesaroni & Shinnaga, 2011, AA, 525, A72

Image: 1.3 cm cont. ● : OH maser ▲ : H₂O maser



Yellow Contour: 890 μm Continuum

Furuya, Cesaroni & Shinnaga, 2011, AA, 525, A72

LETTERS

A minimum column density of 1 g cm^{-2} for massive star formation

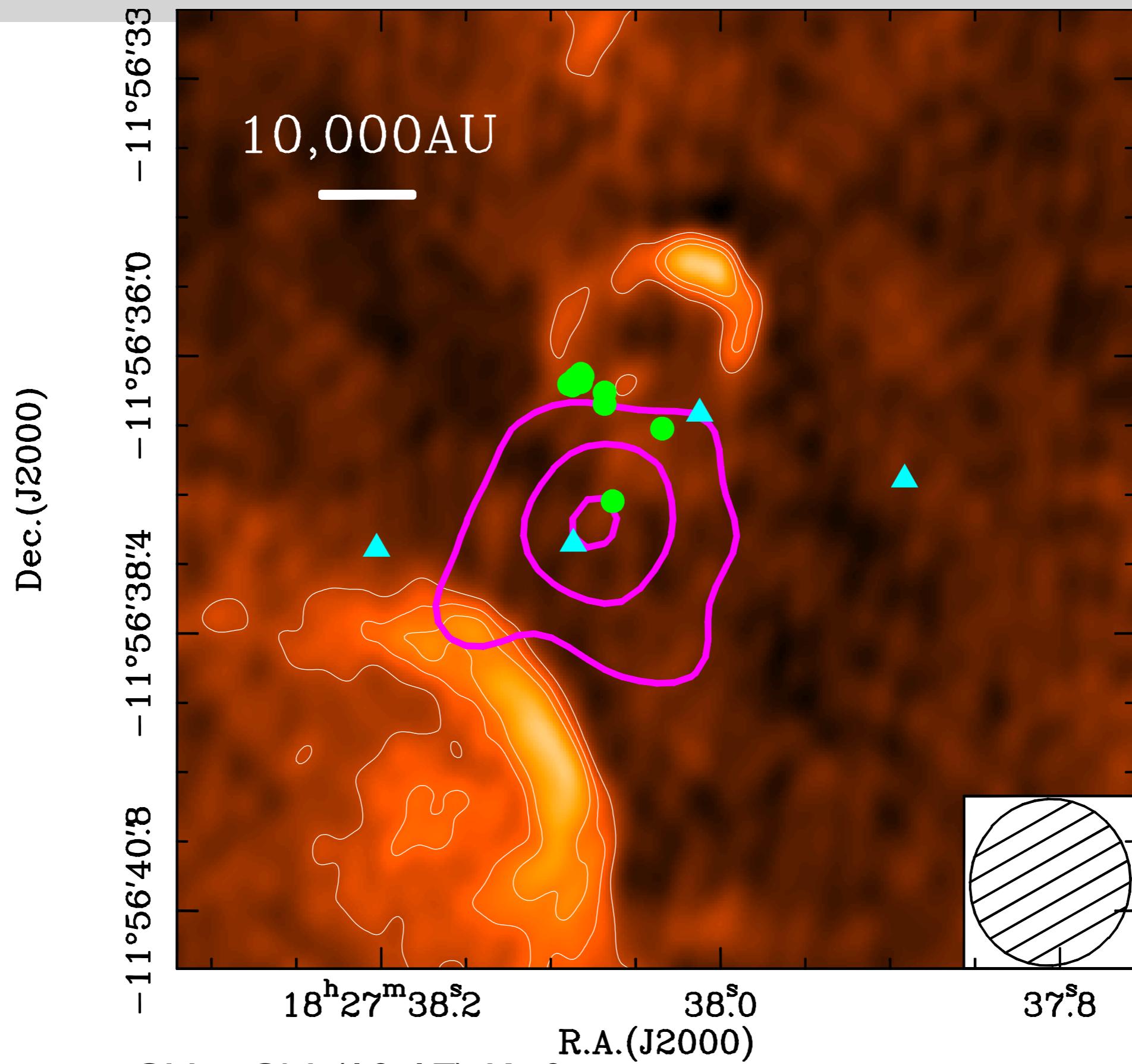
Mark R. Krumholz^{1,2} & Christopher F. McKee³

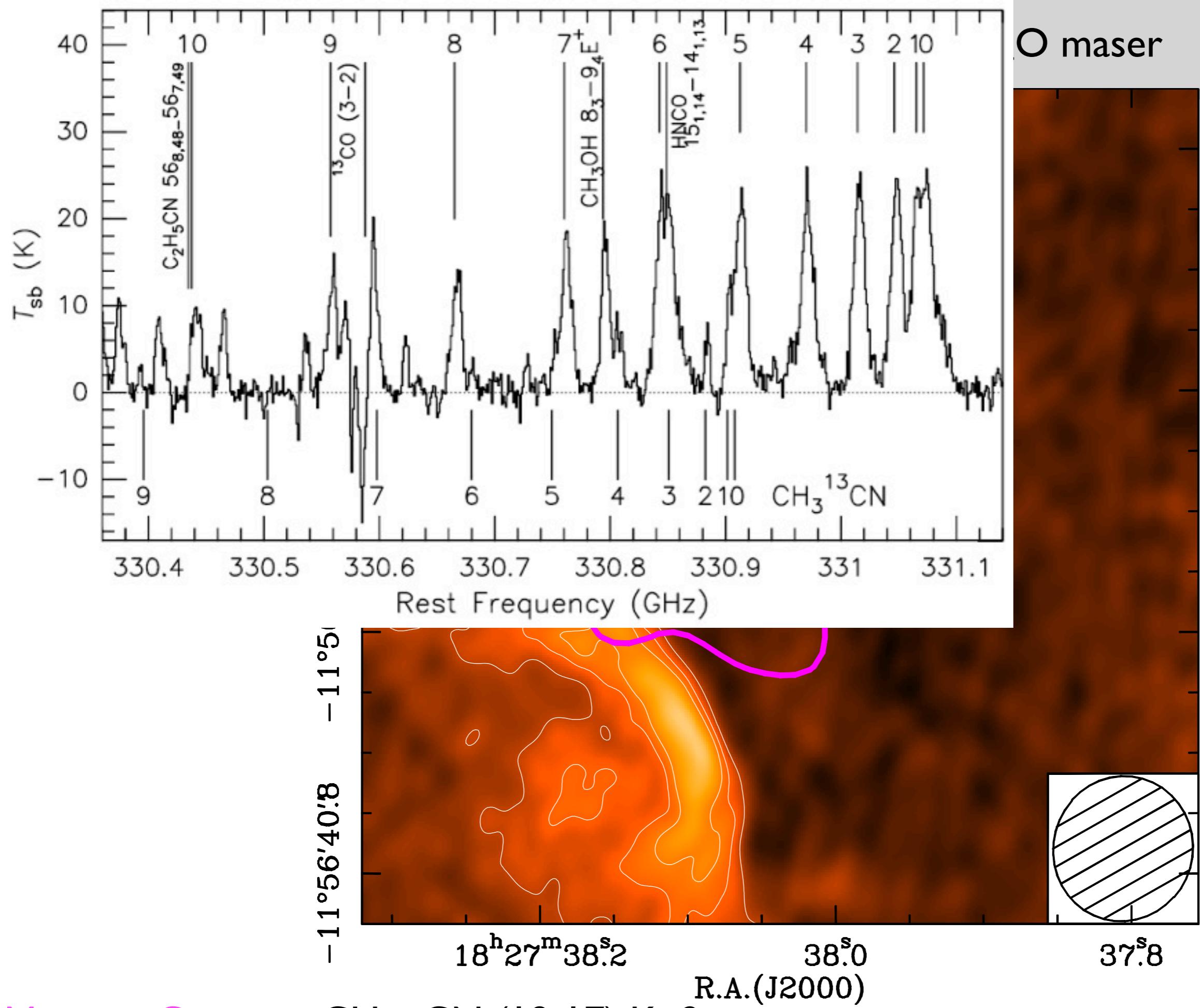
Massive stars are very rare, but their extreme luminosities make them both the only type of young star we can observe in distant galaxies and the dominant energy sources in the Universe today. They form rarely because efficient radiative cooling keeps most star-forming gas clouds close to isothermal as they collapse, and this favours fragmentation into stars of one solar mass or lower^{1–3}. Heating of a cloud by accreting low-mass stars within it can prevent fragmentation and allow formation of massive stars^{4,5}, but the necessary properties for a cloud to form massive stars—and therefore where massive stars form in a galaxy—have not yet been determined. Here we show that only clouds with column densities of at least 1 g cm^{-2} can avoid fragmentation and form massive stars. This threshold, and the environmental variation of the stellar initial mass function that it implies, naturally explain the characteristic column densities associated with massive star clusters^{6–9} and the difference between the radial profiles of H α and ultraviolet emission in galactic disks^{10,11}. The existence of a threshold also implies that the initial mass function should show detectable variation with environment within the Galaxy, that the characteristic

effective adiabatic index $\gamma \approx 1.4$ throughout its volume. As even $\gamma \approx 1.1$ –1.2 is sufficient to suppress fragmentation⁵, equation (1) implicitly defines a critical light-to-mass ratio η_{halt} above which fragmentation will halt in a cloud with a given Σ , δ and T_b . We describe our procedure for solving this equation in the Supplementary Information.

We approximate the infrared dust opacity as $\kappa = \delta \kappa_0 (\lambda_0 / \lambda)^2$, where δ is a dimensionless number that we define to be unity at solar metallicity, λ is the radiation wavelength, and $\lambda_0 = 100\text{ }\mu\text{m}$. Observations in the Milky Way indicate^{13,17} that, in cold regions where dust grains are coated with ice mantles, $\kappa_0 \approx 0.54\text{ cm}^2\text{ g}^{-1}$. Under Milky Way conditions the minimum temperature for interstellar gas is $T_b \approx 10\text{ K}$, with a weak density dependence that we ignore for simplicity. In addition to the Milky Way case, we also consider $\delta = 0.25$, $T_b = 10\text{ K}$, appropriate for a low-metallicity galaxy today, and $\delta = 0.25$, $T_b = 15\text{ K}$, typical of a galaxy at $z \approx 6$ that has low metallicity but a temperature floor of 15 K imposed by the cosmic microwave background. Figure 1 shows the value of η_{halt} calculated for the three cases. We find that η_{halt} declines with Σ because at higher Σ a cloud of fixed mass has a smaller radiating area and remains

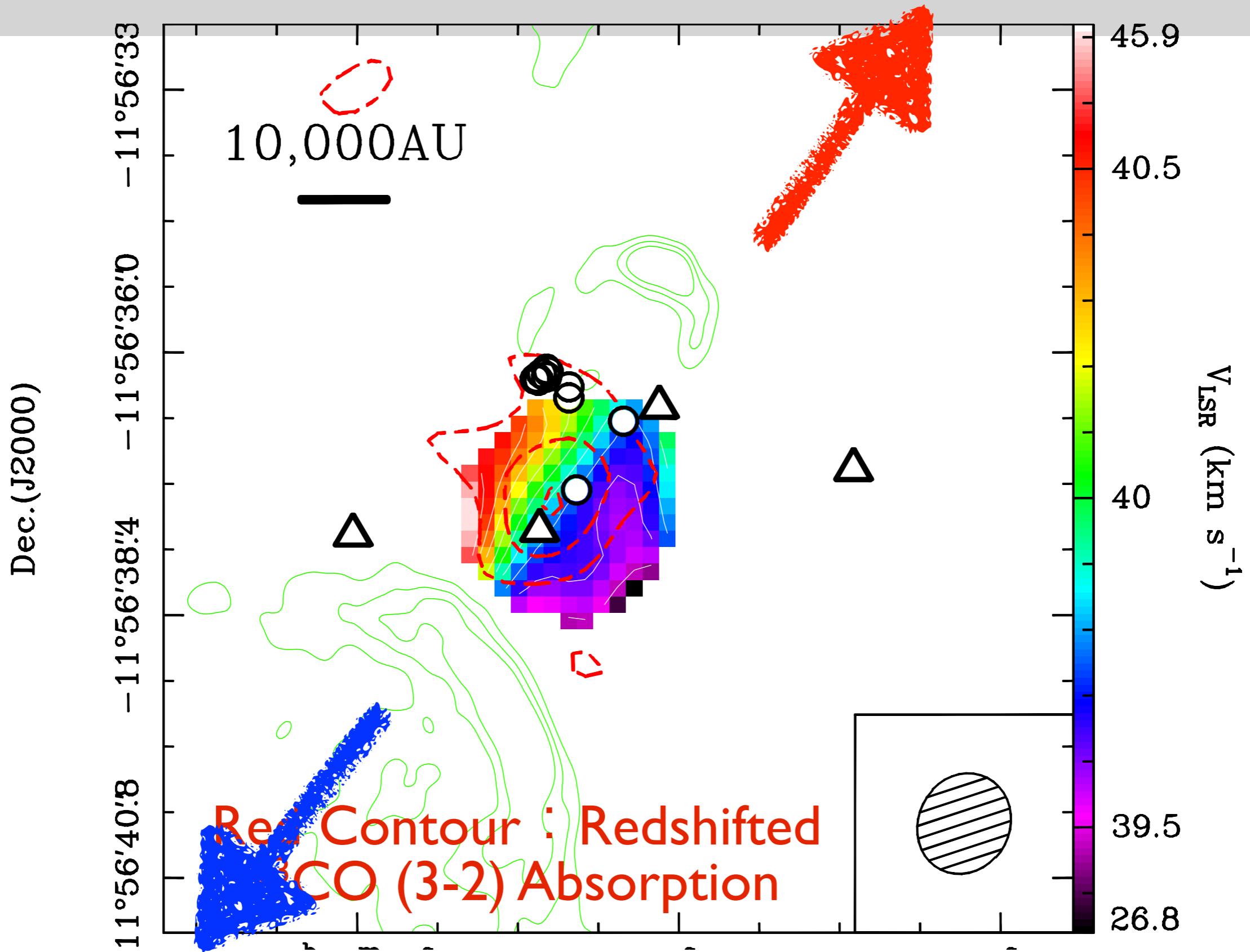
Image: 1.3 cm cont. ● : OH maser ▲ : H₂O maser





Magenta Contour: $CH_3^{13}CN$ (18-17) K=2
 Furuya, Cesaroni & Shinnaga, 2011, AA, 525, A72

Green contour : 1.3cm cont. \triangle : OH maser \circ : H_2O maser **16**

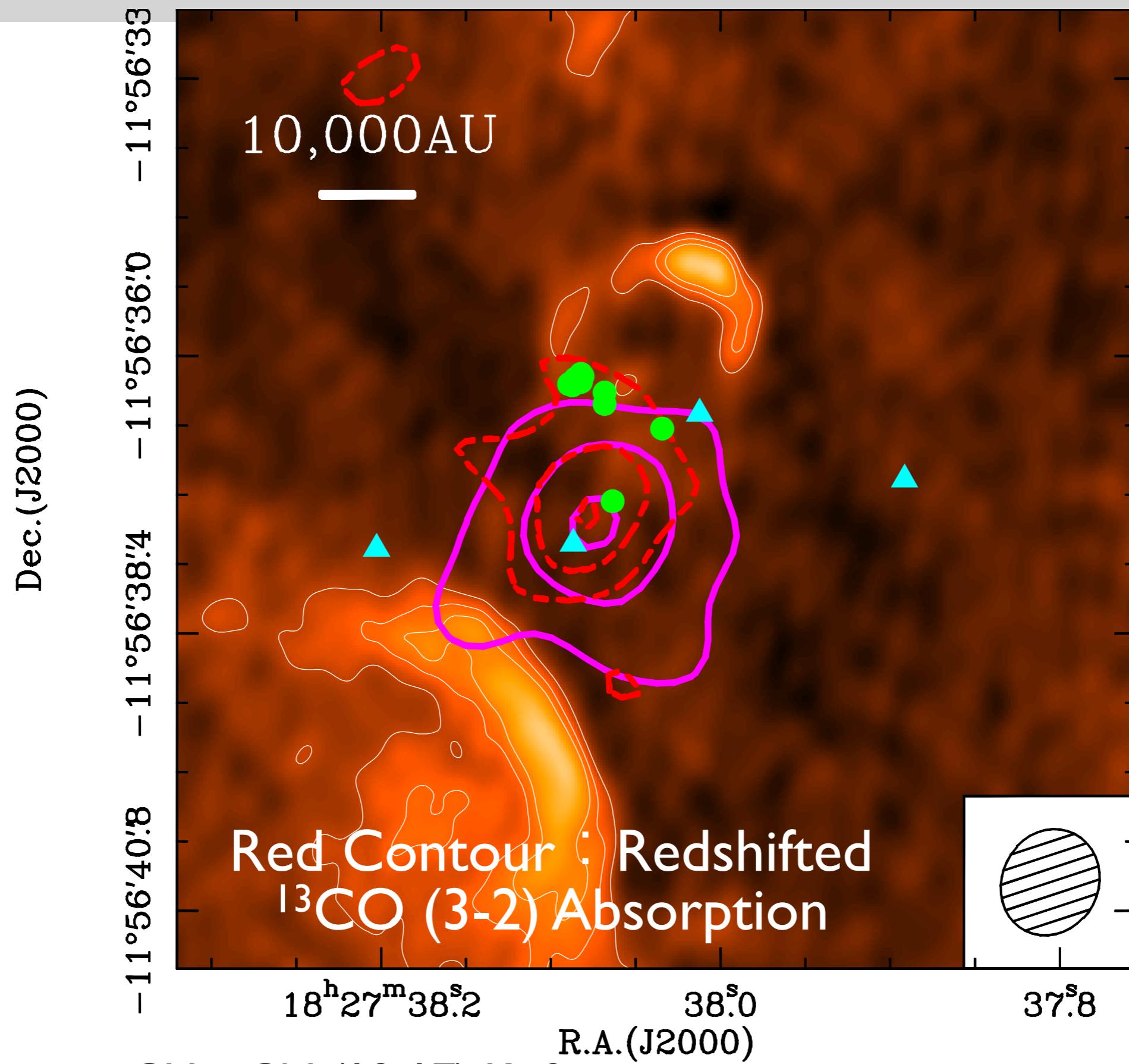


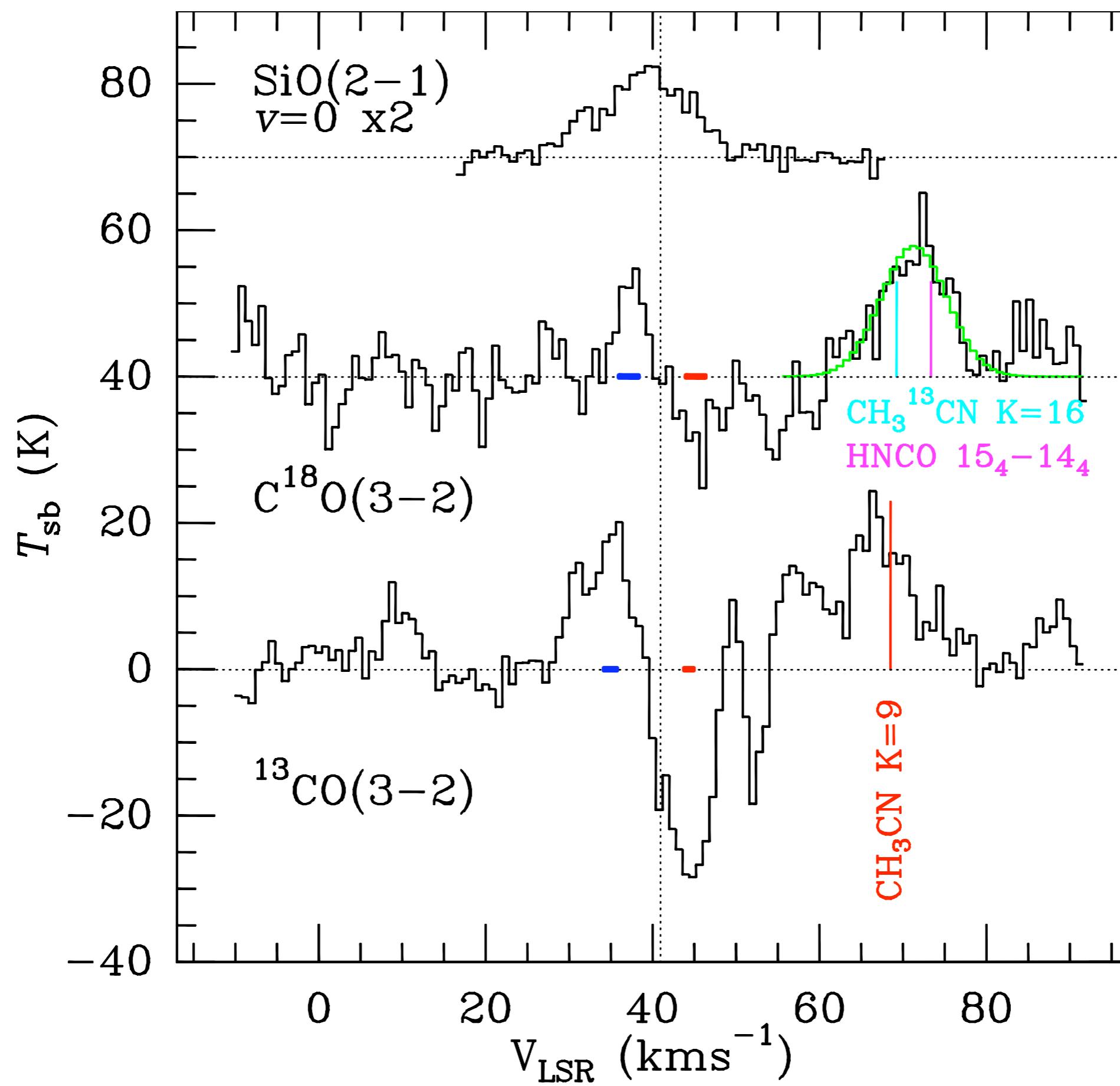
Color: Velocity field obtained from CH_3CN (18-17) K=7 and $\text{CH}_3^{13}\text{CN}$ (18-17) K=5

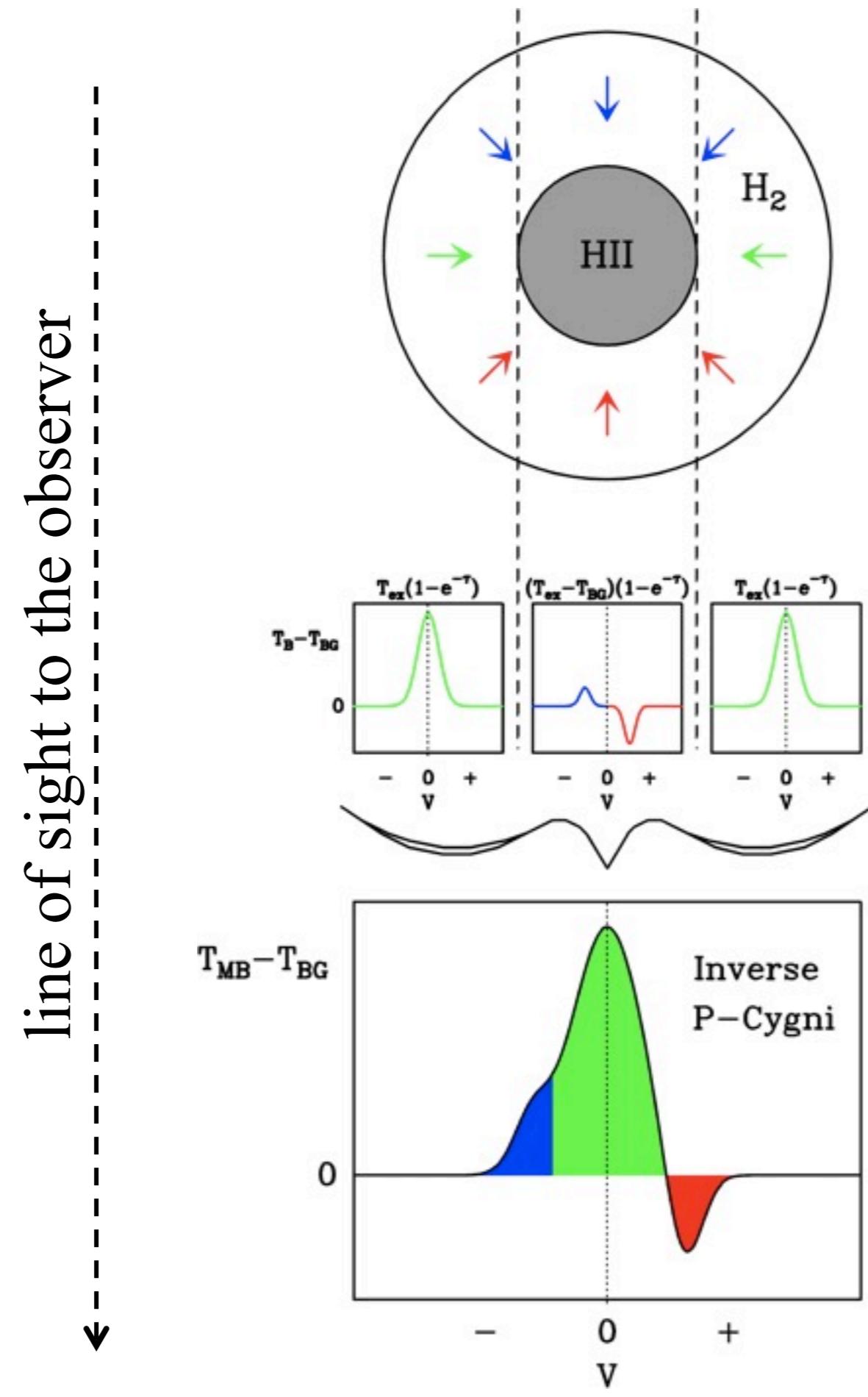
Furuya, Cesaroni & Shinnaga, 2011, AA, 525, A72

Image: 1.3 cm cont. ● : OH maser ▲ : H₂O maser

17



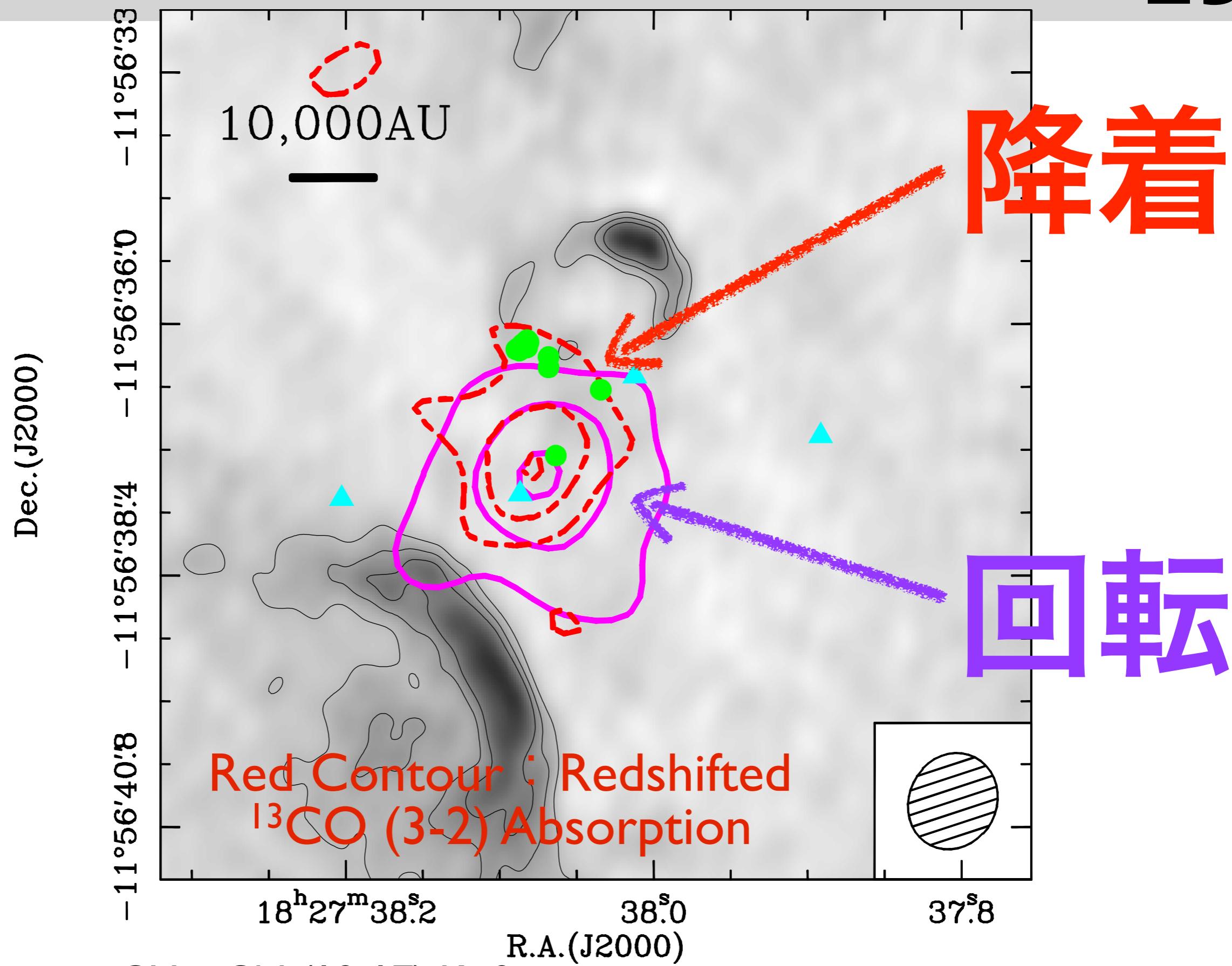




infalling
envelope

(C) Cesaron

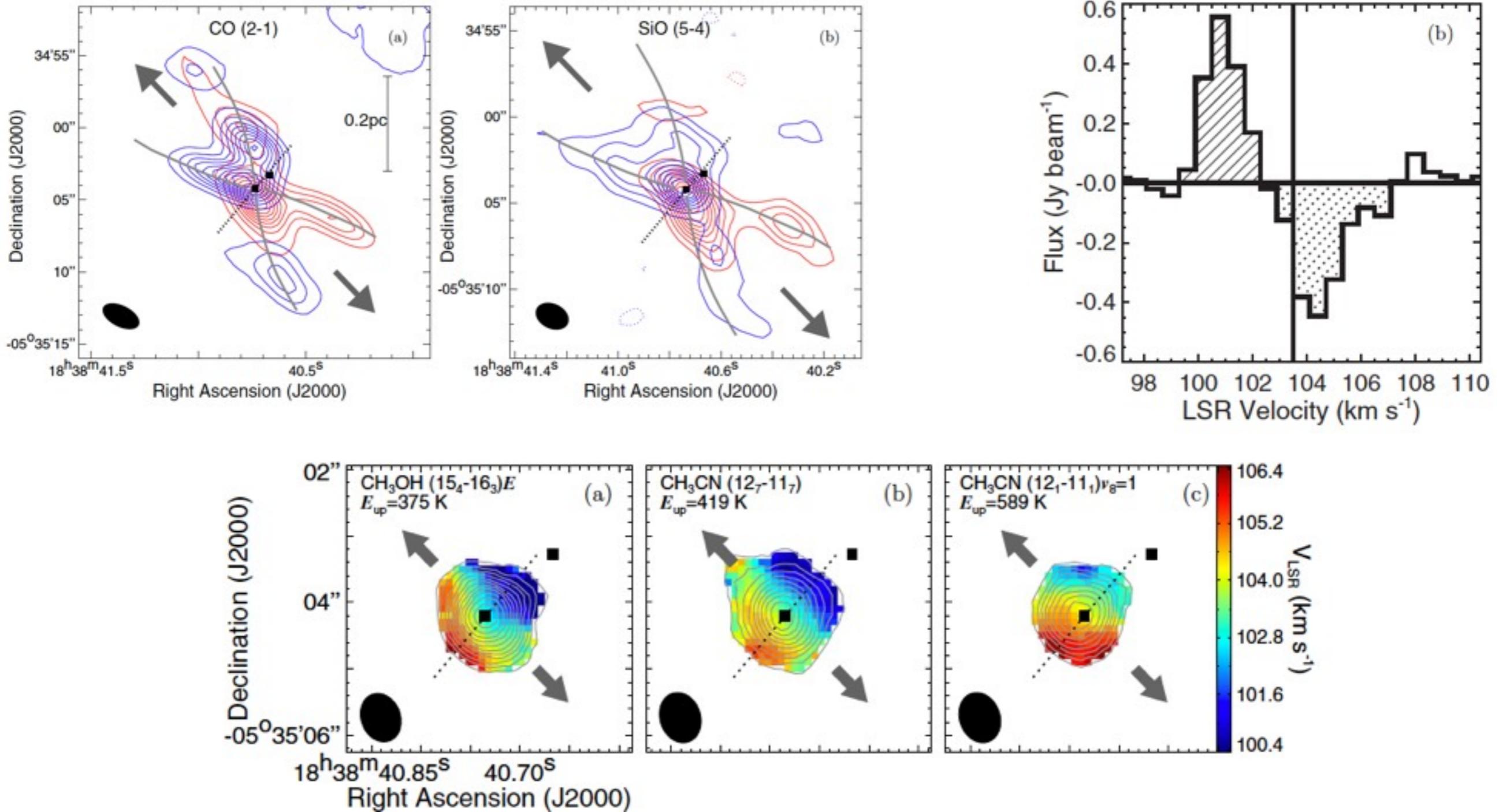
Image: 1.3 cm cont. ● : OH maser ▲ : H₂O maser



Furuya, Cesaroni & Shinnaga, 2011, AA, 525, A72

分子輝線 + 干渉計による最近の観測例

20



Qiu et al. 2012 ApJ 756, 170

See also e.g, Liu+11 ApJ 730, 102; Klaassen+12, AA 538, A40; Xu+12 AA 540, L13

本講演の流れ

1.銀河系内の大質量星形成領域の回転と降着の観測

- 概観
- (サブ)ミリ波干渉計による詳細観測

2.これまでの降着流の観測を整理する



- 動機
- サンプル、観測の限界
- 解析と結果

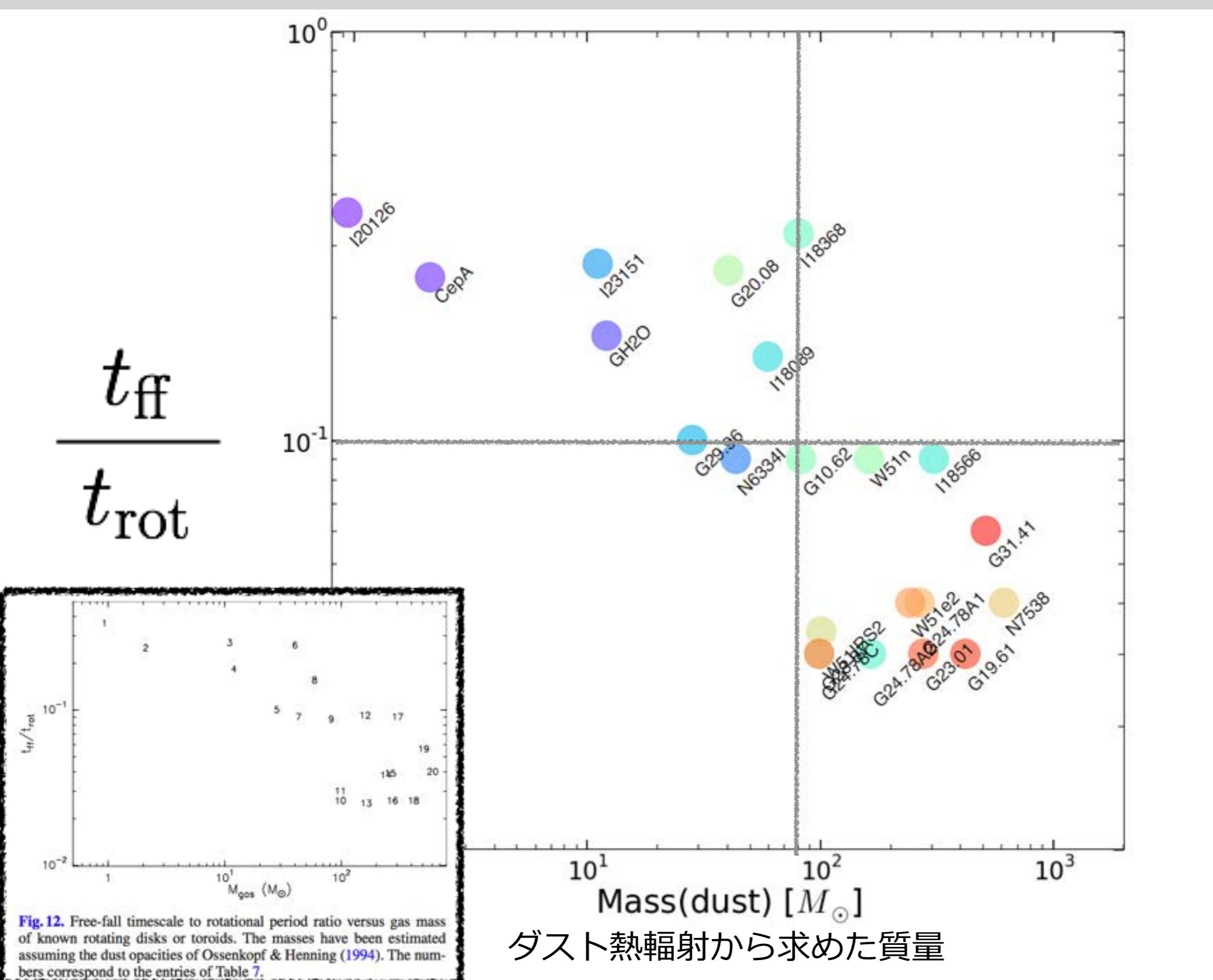
3.まとめ

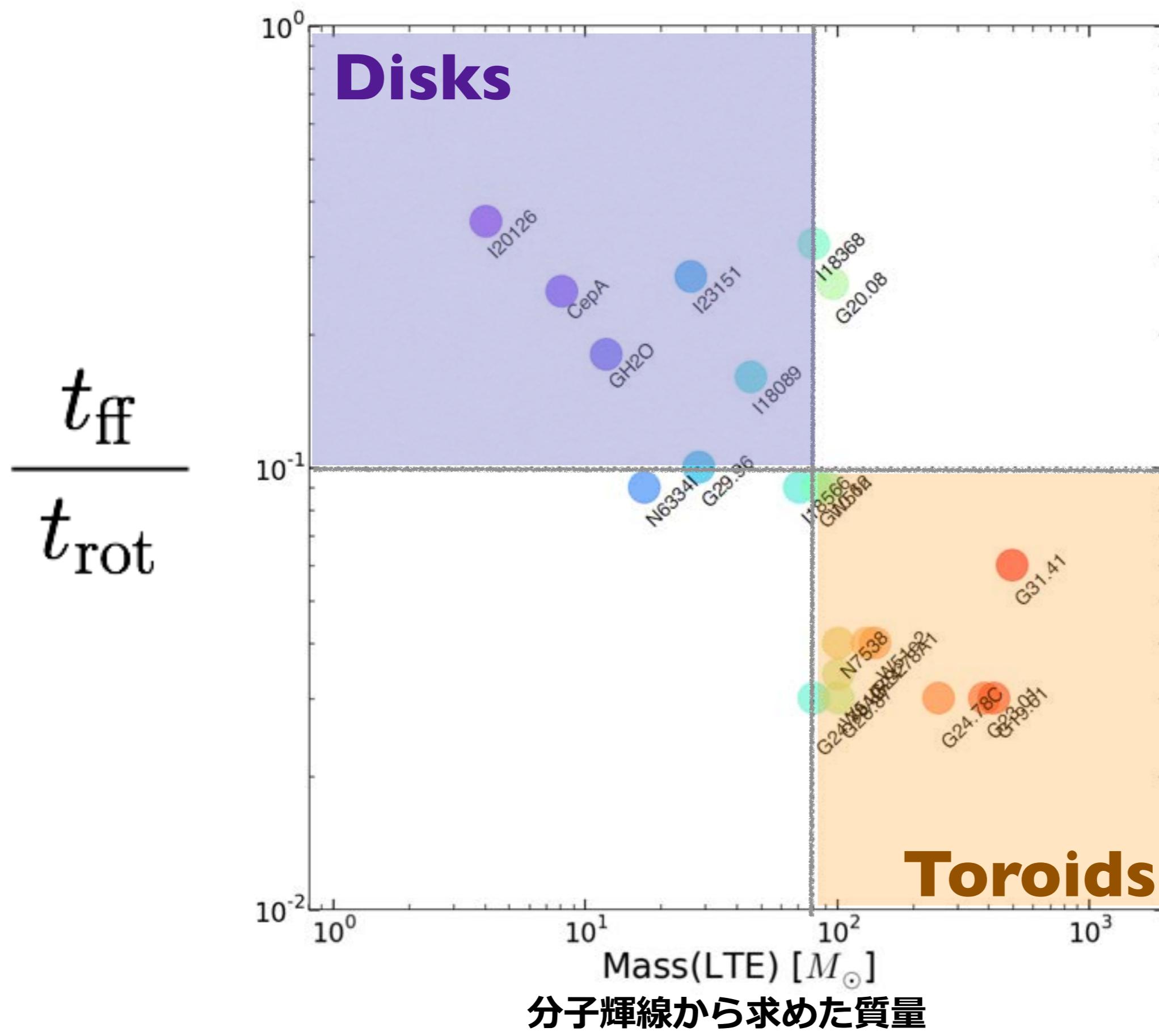
動機

- 最近、SMAデータでのinfallの論文が目につく。。。
- DiskとToroidという「まとめ」でホントウによかったのだろうか？
- ALMA以前の干渉計観測は何を明らかにしたのか？
- ALMAで何がわかりかけているか？

調査

- 論文を吟味





分子輝線から求めた質量

大質量星形成領域の観測

- 距離：遠い & 不定性大きい
- 複雑さ：中心星の同定が困難 → 全光度の推定困難

回転構造の観測

- 分子輝線： τ , T_{ex} , X_{mol} など”探査針”そのものの不定性
- 厚みと傾き角の推定も容易でない

落下運動の観測

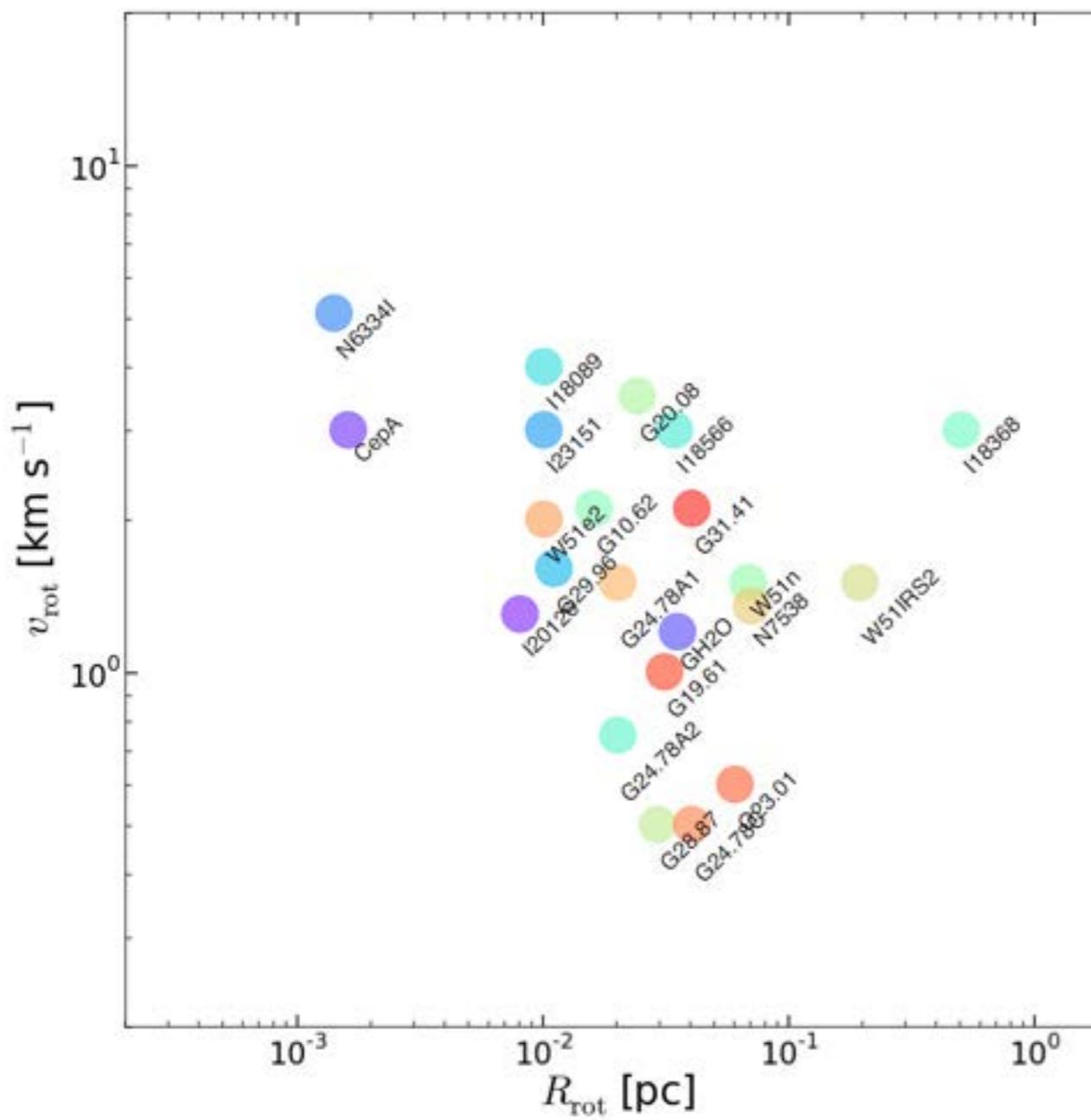
- 逆P-Cygniプロファイル利用：選択効果？
- 前景のガスによる吸収線との切り分け
- 視線上の v_{inf} のみ； $v_{\text{inf}}(\bar{\omega})$ の $\bar{\omega}$ はわからず
- 内部の乱流運動で速度幅増加；切り分け困難

$$v_{\text{inf}} = \frac{1}{2} |v_{\text{abs}} - v_{\text{emi}}| / \cos i$$

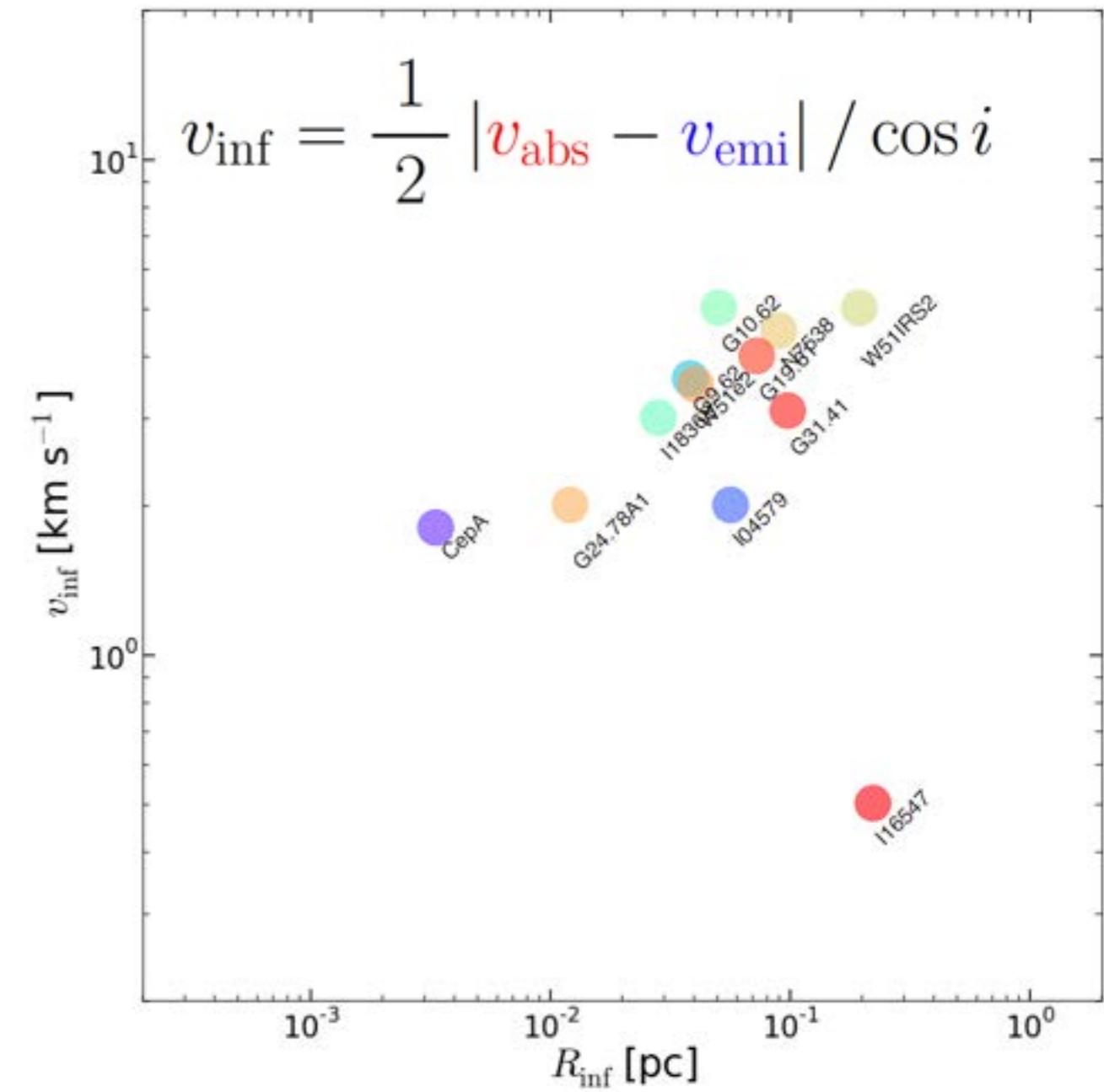
まずはサンプルの確認

26

回転速度 (km/s)



落下速度 (km/s)

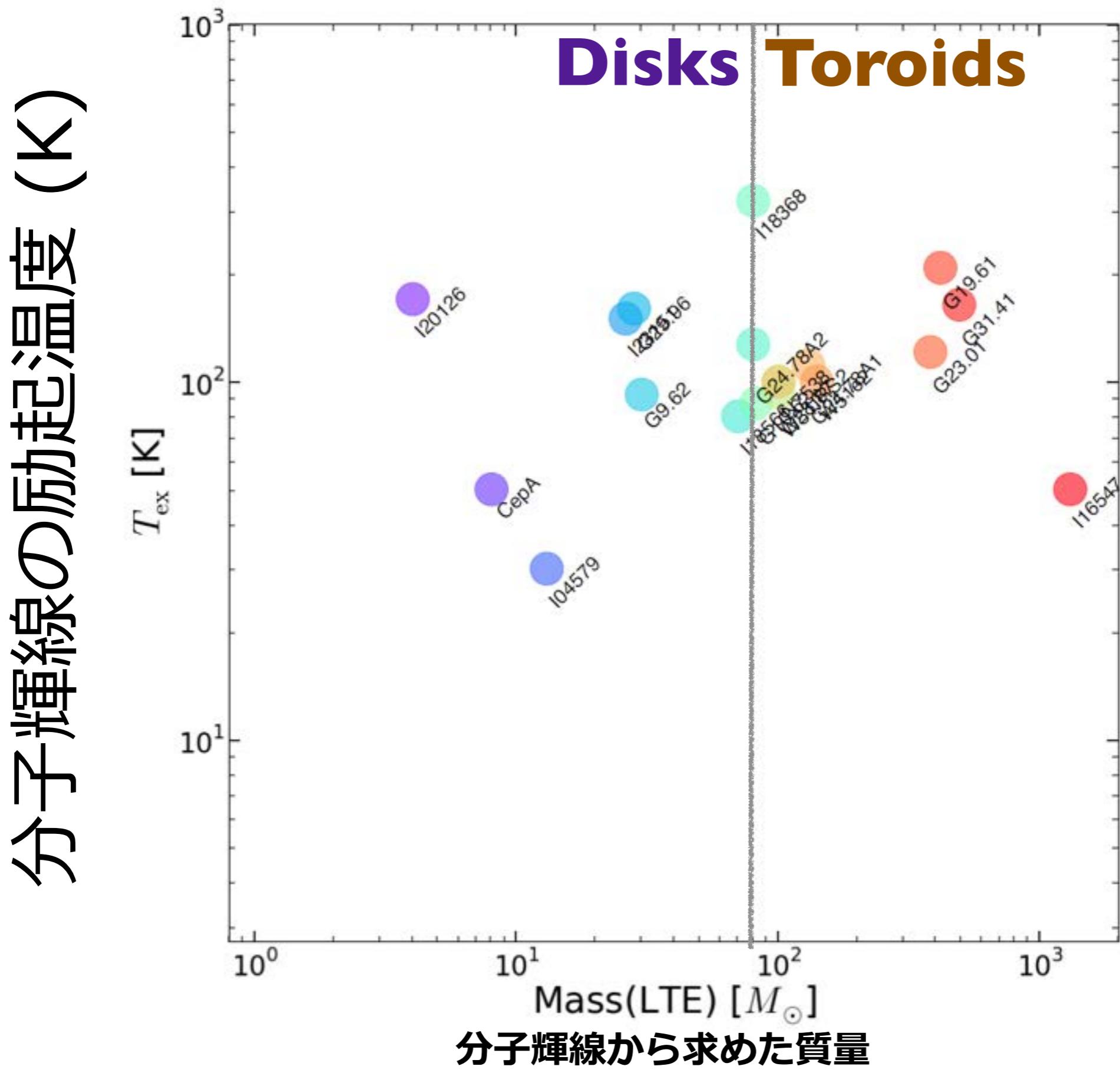


天球面に投影された回転半径 (pc)

落下速度の測定半径 (pc)

まずはサンプルの確認

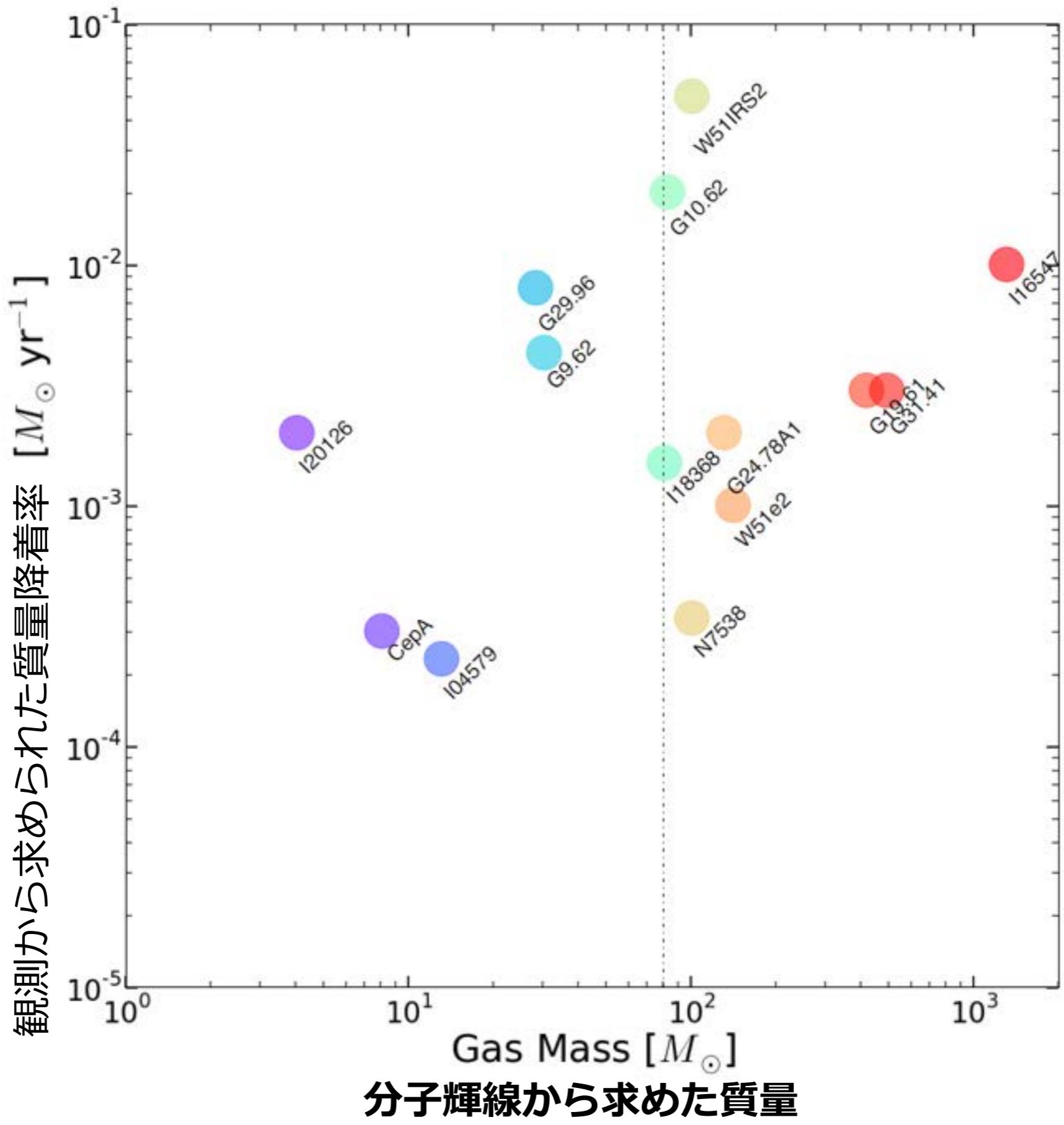
27



いざ解析：質量 vs. 降着率

28

$$\frac{dM_{\text{obs}}}{dt} = 4\pi R_{\text{inf}}^2 \mu m_{\text{H}} n_{\text{H}_2} v_{\text{inf}}$$

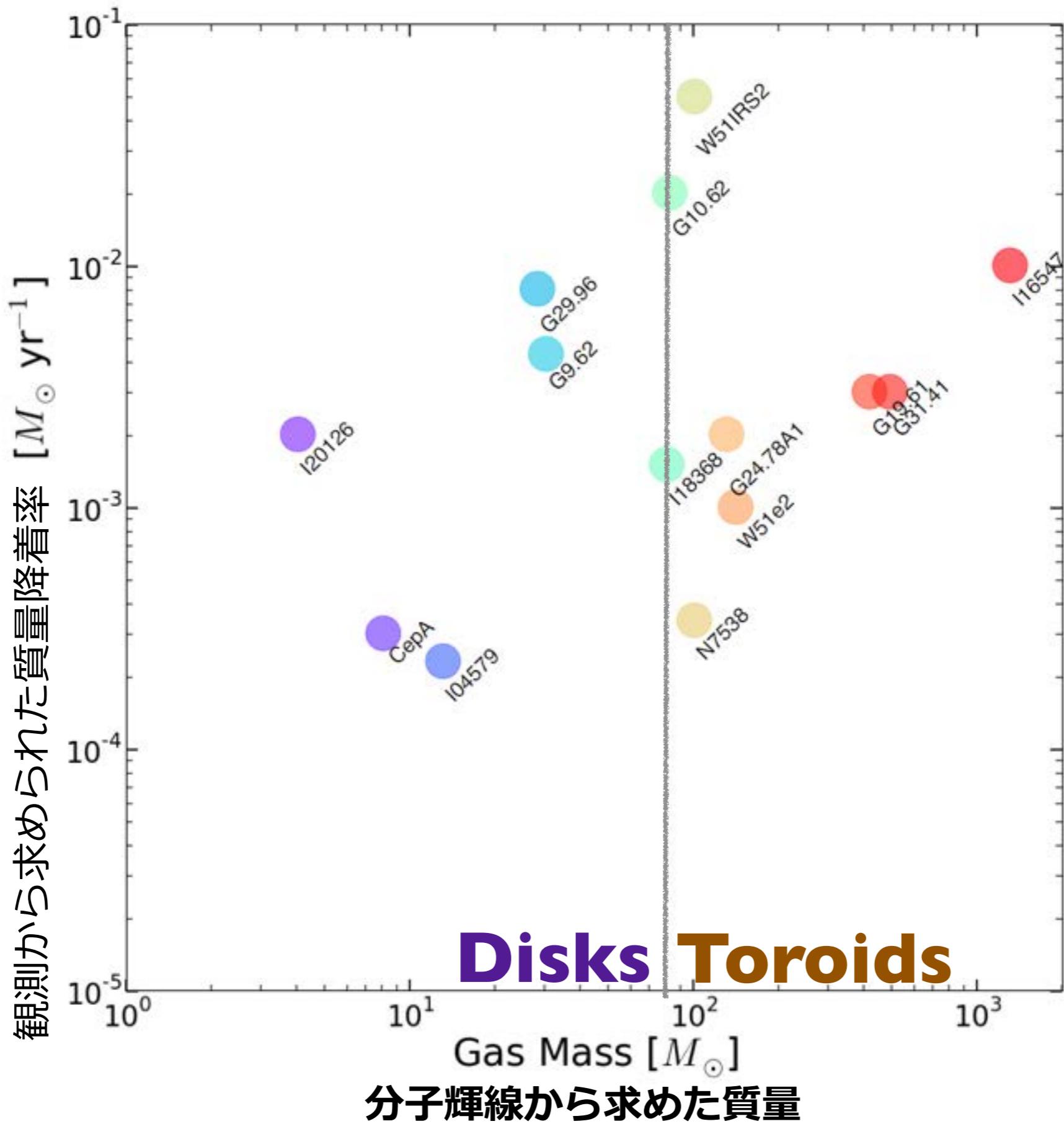


分子輝線から求めた質量

いざ解析：質量 vs. 降着率

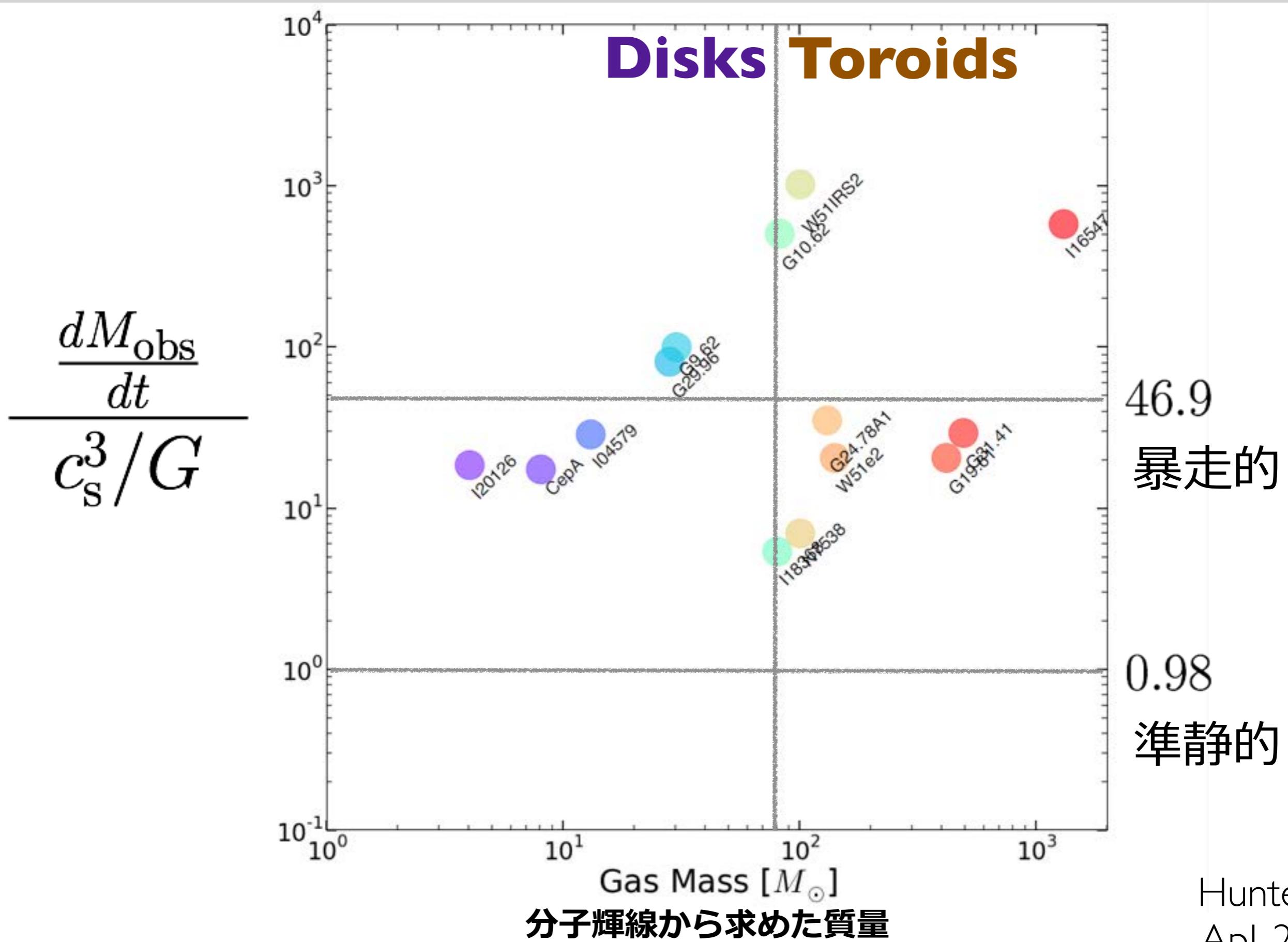
28

$$\frac{dM_{\text{obs}}}{dt} = 4\pi R_{\text{inf}}^2 \mu m_{\text{H}} n_{\text{H}_2} v_{\text{inf}}$$



いざ解析：質量 vs. 降着率の m_0 係数

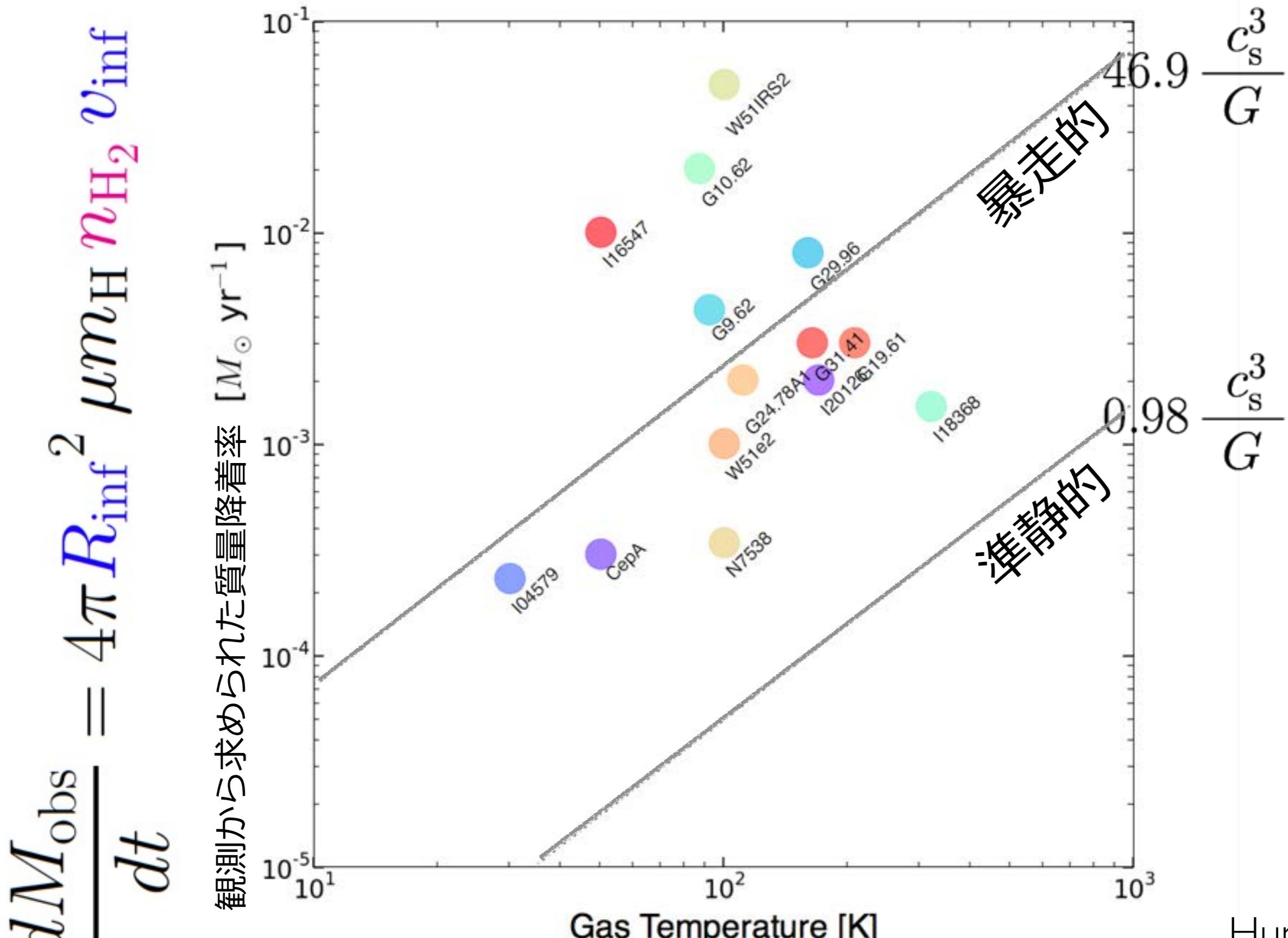
29



Hunter, 1977,
ApJ, 218, 834

いざ解析：ガスの温度 vs. 降着率

30

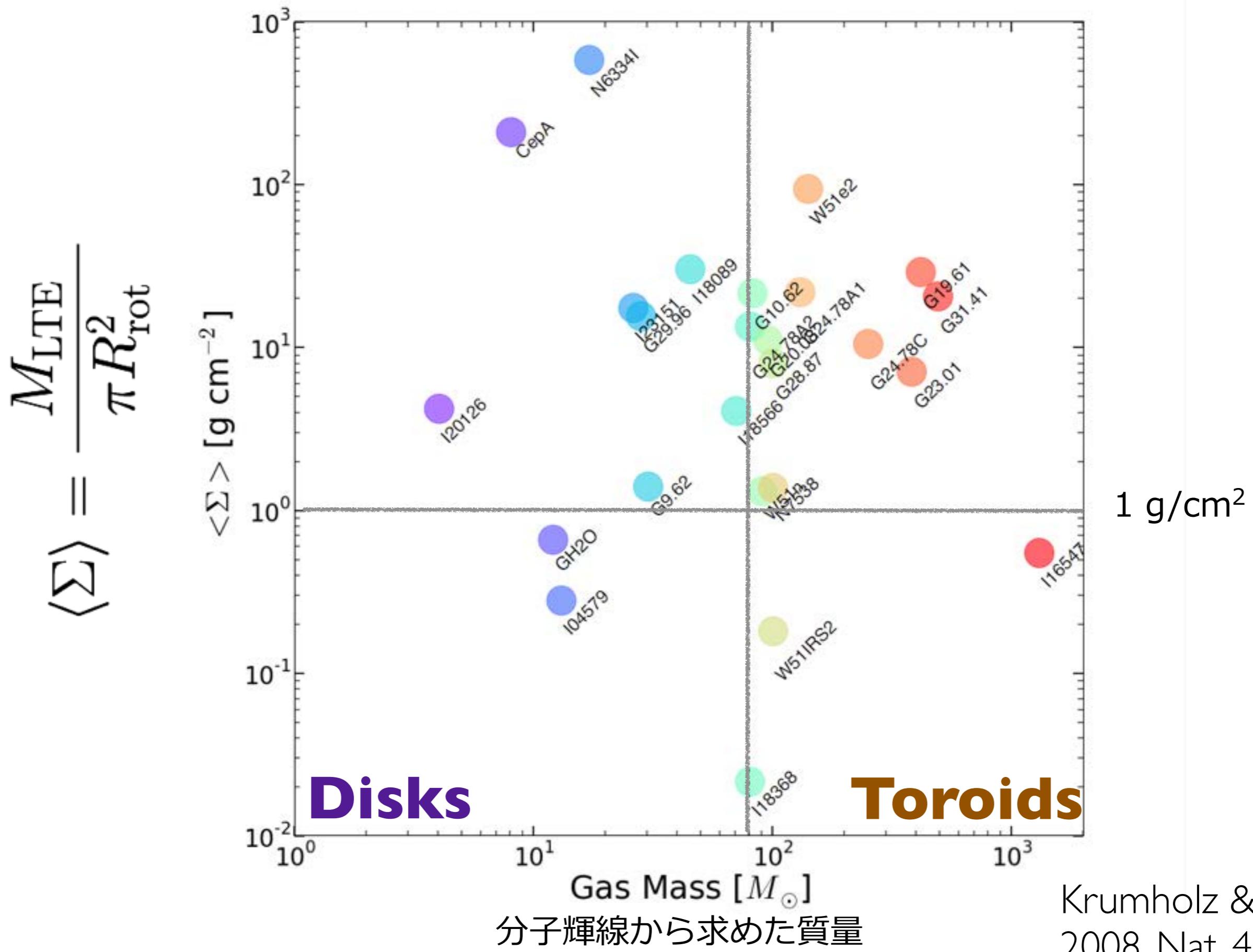


分子輝線からLTEを仮定して求めたガスの温度

Hunter, 1977,
ApJ, 218, 834

いざ解析：質量 vs. 平均面密度

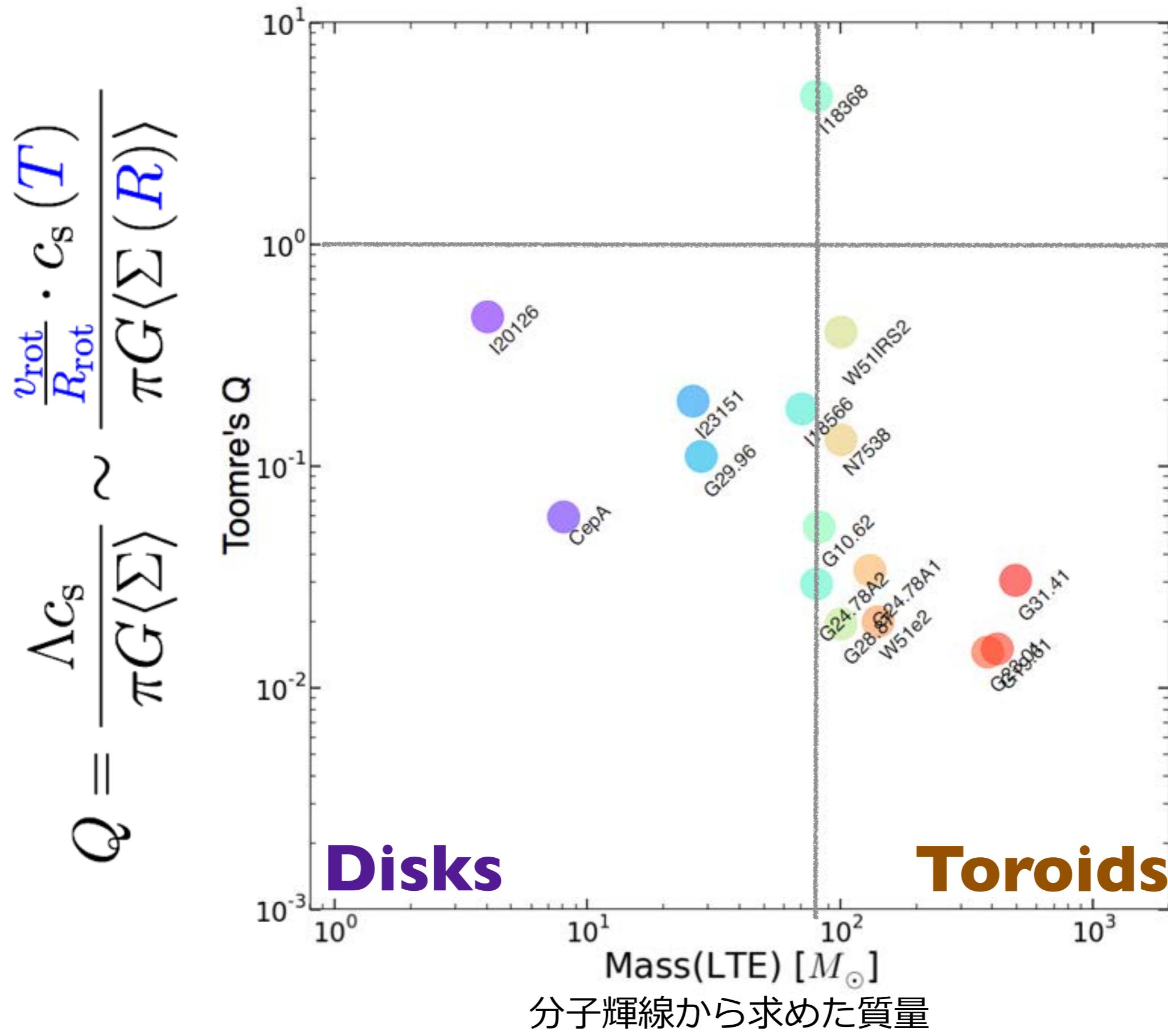
31



Krumholz & McKee
2008, Nat. 451, 1082

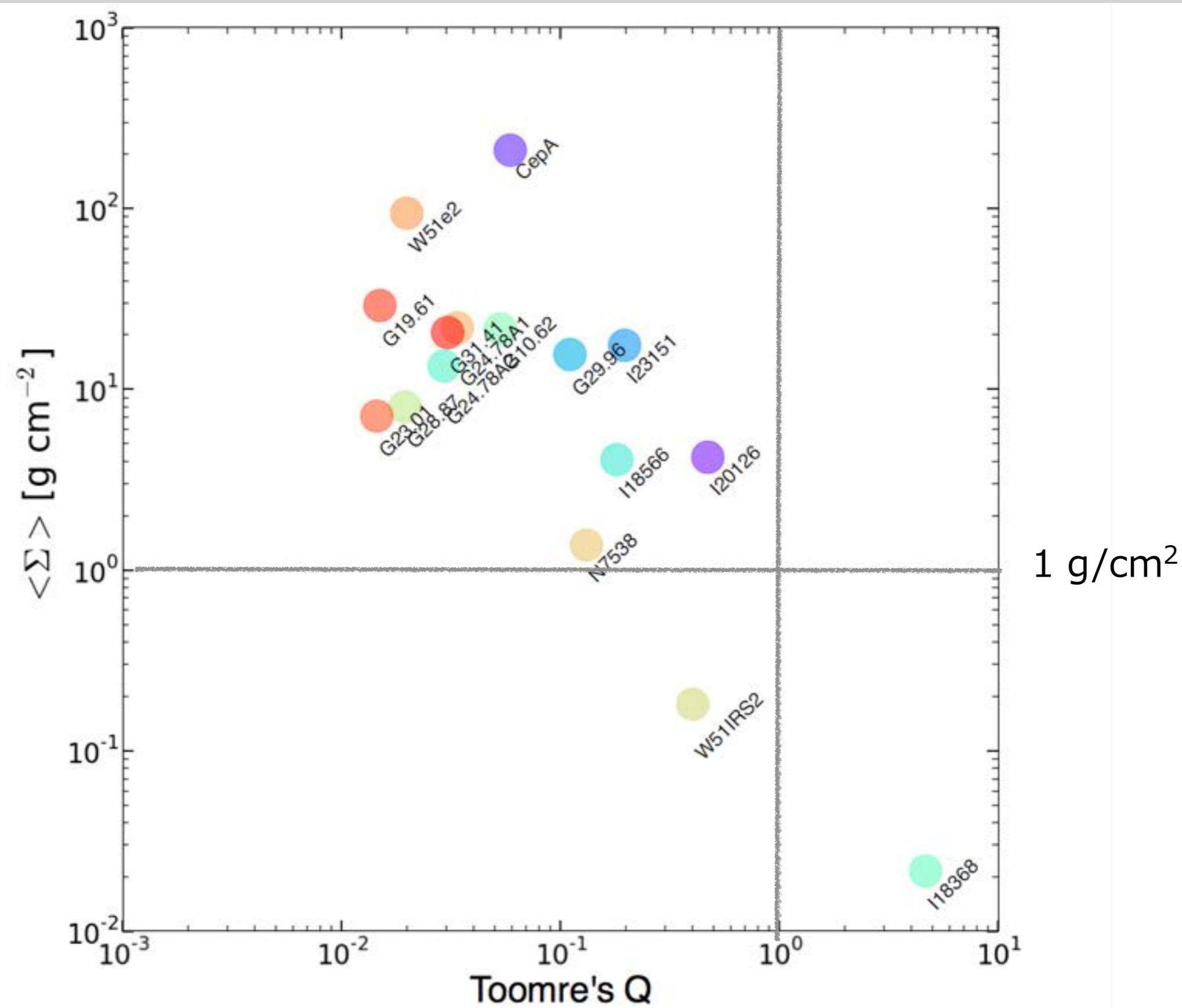
いざ解析：質量 vs. Toomre's Q

32



いざ解析 : Toomre's Q vs. 平均面密度

34



“ALMA前夜”の大質量星の回転と降着の観測

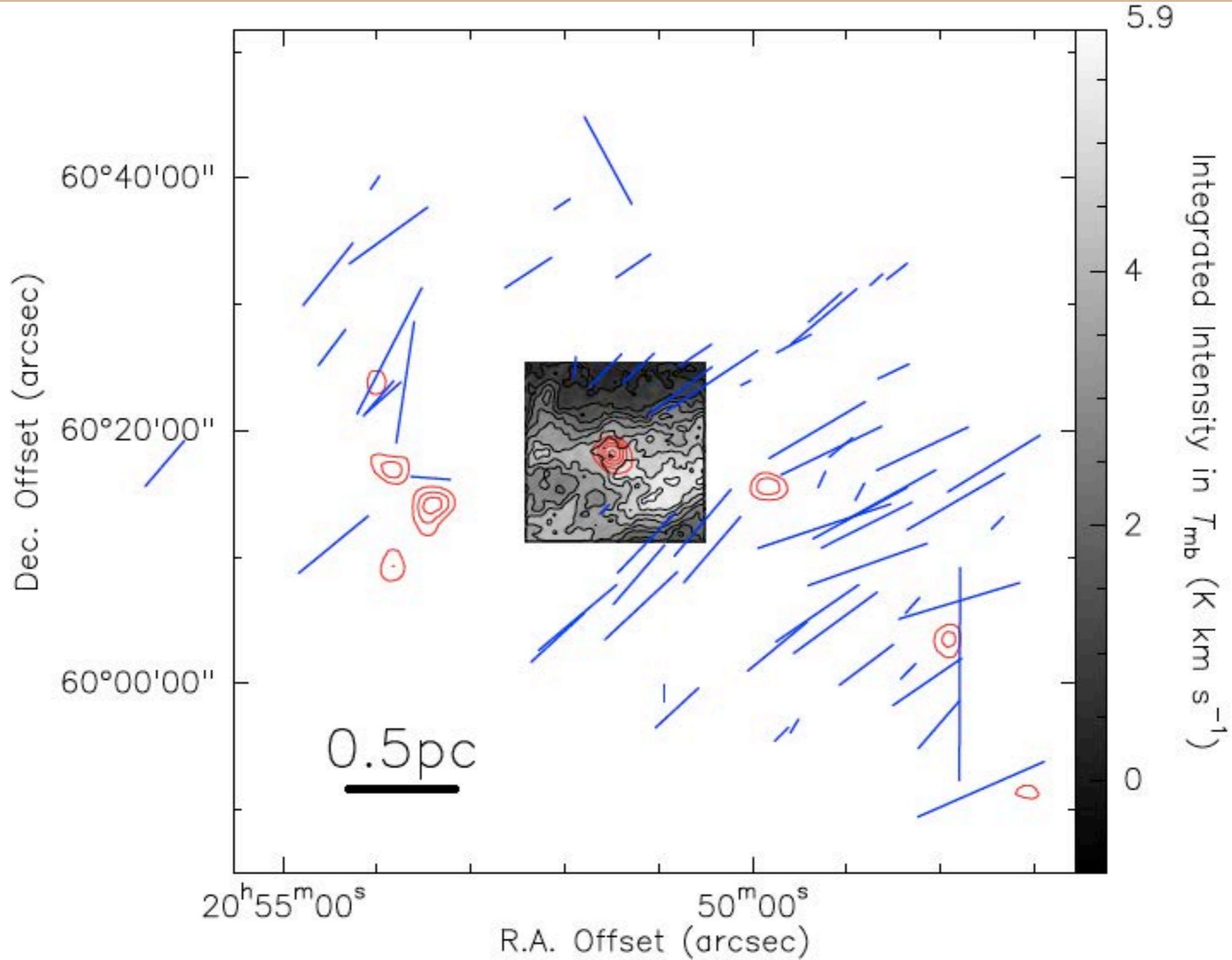
- 大降着率；不定性を考慮しても c_s^3/G の2~3桁増し
- “disk”も不安定：“disk-toroids”パラダイム再検証必要
- (中間赤外線撮像などから)分裂の兆候あり(今日は示さず)
 ← “1g/cm²”との整合性は？

ALMAでは

- 金属汚染された系内雲で素過程の研究を極める。
- low-metalの矮小/不規則銀河等で“ALMA前夜”的観測
- $z \sim 2$ より遠方でガス質量と星質量の比から
 ← CMFとIMFを質量について積分したもの

その系での“星形成のモード”

別のヒント：降着過程とCMFを決めるのは？ 36

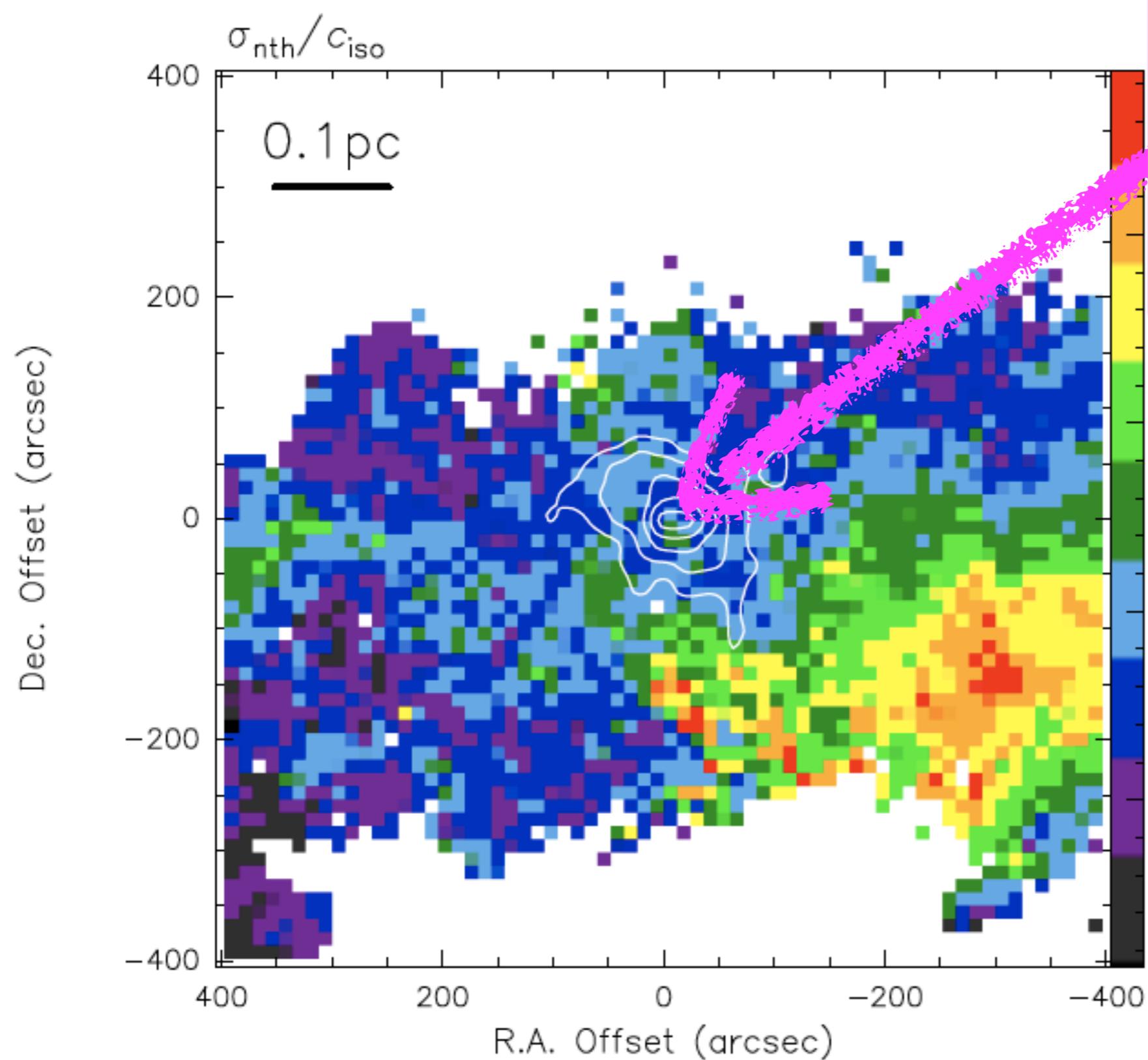


フィラメント状分子雲：平行磁場が貫く
 λ_J 程度の間隔で高密度コアが分布

Furuya et al. 2008, 2014, in prep
Poidevin & Bastien 2006

別のヒント：降着過程とCMFを決めるのは？ 37

非熱的速度分散と音速の比



高密度分子雲ガスの
落下は暴走的収縮解
(LPH解)に近い。

Furuya+06, 09b

希薄ガスは**超音速**
(等温)シリンダーの
安定性解析から**乱流**
で支えられている
局所的な**乱流散逸**で
コアはcollapseへ

Furuya+14 in prep.

“ALMA前夜”の大質量星の回転と降着の観測

- “disk と toroid”パラダイムに一定の妥当性あり
- 大降着率、しかしそれでも c_s^3/G の100倍程度
- (中間赤外線撮像などから)分裂の兆候あり(今日は示さず)
← “1g/cm²”との整合性は？

ALMAでは

- 金属汚染された系内雲で素過程の研究を極める。
- low-metalの矮小/不規則銀河等で“ALMA前夜”的観測
- z~2より遠方でガス質量と星質量の比から
← CMFとIMFを質量について積分したもの
その系での”星形成のモード”を素過程も含め議論したい