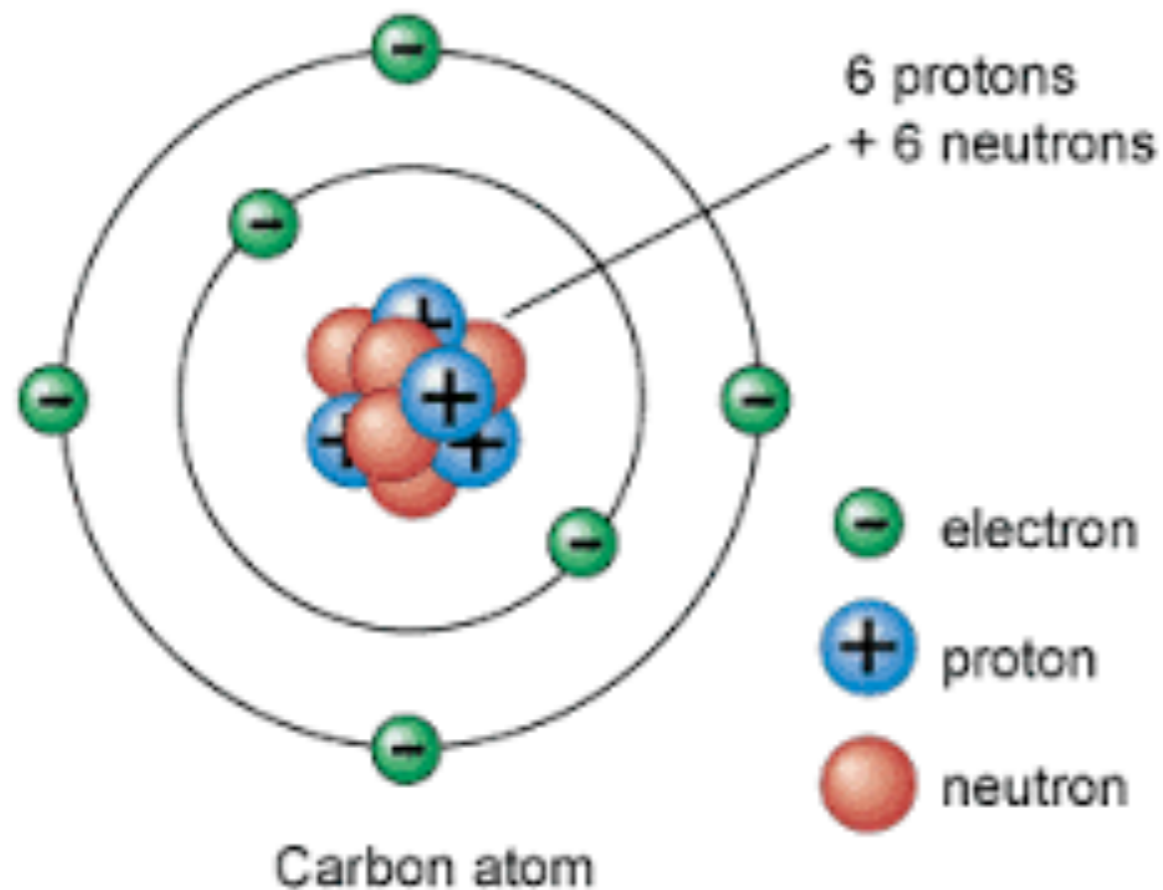


ALMA Workshop 「系外銀河における微細構造線の観測とその理解」

2014年12月2-3日@東大天文センター

Nearby Galaxiesでの

[C I]の観測について

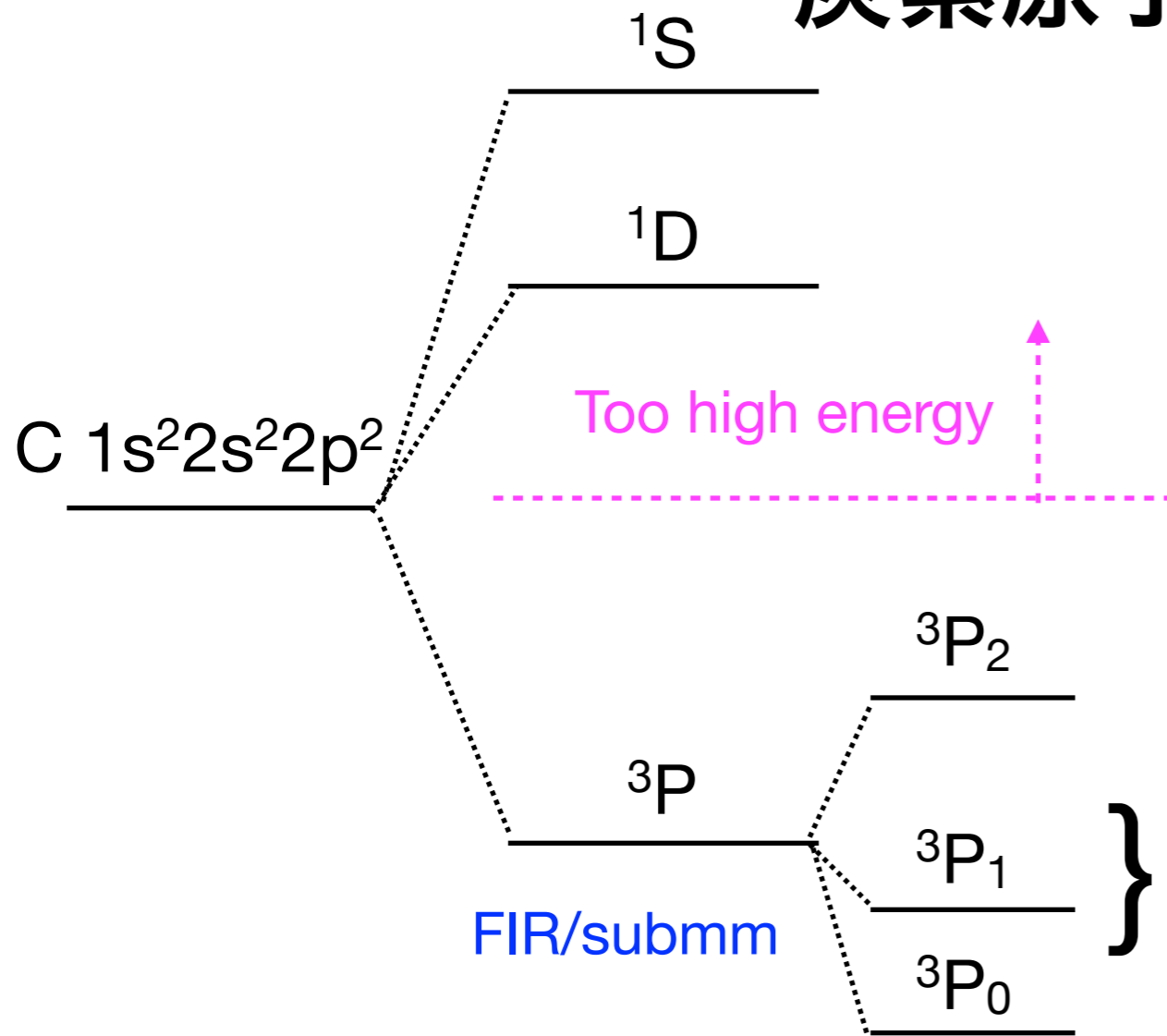


- [C I]とは？
- 分子ガス質量のトレーサー
- 輝線比を用いた種々の診断

Takuma Izumi
The Univ. of Tokyo
(takumaizumi@ioa.s.u-tokyo.ac.jp)

[CI]とは？

炭素原子輝線：[C I]



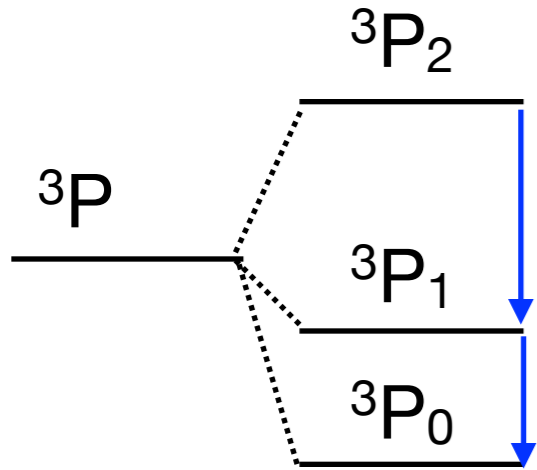
- 電子基底（最安定な $3P$ 状態）はさらに3準位微細構造系に分裂。
- 3準位ゆえにモデル化が簡単
→ **LTEと背景温度を仮定すれば、 T_{ex} と τ (C I)が求まる。**
- 周波数的に、ALMAでhigh-z天体を観測するのに適している。

[C I]	ν_{rest} [GHz]	$n_{cr@50K}$ [cm ⁻³]	E_u [K]
$3P_2-3P_1$ (2-1)	809.34	3000	62.5
$3P_1-3P_0$ (1-0)	492.16	500	23.6

← ALMA Band 10

← ALMA Band 8

[CI]輝線の励起を解く under LTE



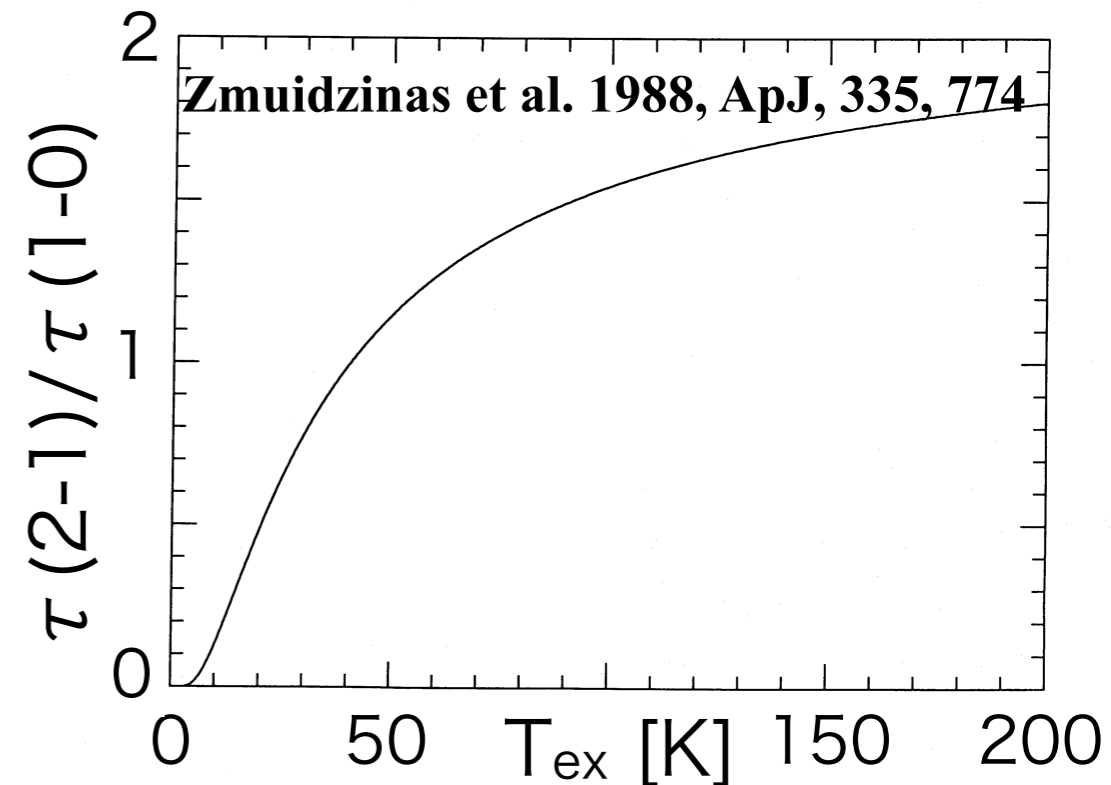
$$\Delta T_{3P_2 \rightarrow 3P_1} = (J(T_{\text{ex}}) - J(T_{\text{bg}}))(1 - \exp(-\tau_{3P_2 \rightarrow 3P_1}))$$

$$\Delta T_{3P_1 \rightarrow 3P_0} = (J(T_{\text{ex}}) - J(T_{\text{bg}}))(1 - \exp(-\tau_{3P_1 \rightarrow 3P_0}))$$

- ただし、 $J(T) = \frac{h\nu/k_B}{\exp(h\nu/k_B T) - 1}$: submm/FIRなのでRJ近似は不可
- また、LTE条件下では励起温度 T_{ex} は1-0と2-1遷移で共通。 τ も互いに独立ではなく、励起温度の関数として決まる。

$$\tau_{ul} = \frac{c^2 \phi(\nu)}{8\pi\nu_{ul}^2} N_l A_{ul} \frac{g_u}{g_l} \left(1 - \exp\left(-\frac{h\nu_{ul}}{kT_{\text{ex}}}\right)\right)$$

- 以上を使うと全部解ける。



分子ガス質量のトレーサーとしての[CI]

- 予想に反して[CI]は分子雲のどこからでも出ている。
- その分布はoptically-thinな ^{13}CO と（ほぼ）完璧に一致。
- しかも、 $X(\text{CI})/X(\text{CO})$ abundance比も一様なようだ。
- その原因は…？

分子ガス質量のトレーサー

- 空間分解した測定：
 - 位置の関数として柱密度を測定し、対象領域で積分
- 一般的な水素分子柱密度のトレーサーとしては、
 - **ダスト放射**：○ 化学組成、励起に依存しない。× emissivity/opacityがwell-determinedである必要、速度場の情報が得られない、ダスト温度の精密測定が必要。
 - **^{13}CO** ：○ 速度場の測定も可能（複数成分への分離が容易）、ダストの詳細な性質が不要。× 化学組成、励起に敏感。
- **[CI]**はどうか？
 - 期待すること：Classical PDR (homogeneous, steady-state chemistry) の観点では、分子が解離されるlow- A_V 領域をトレースしているはず。。

分子ガス質量のトレーサー

- 空間分解した測定：

- 位置の関数

- 一般的な水素

- ダスト放射

opacityがw

ダスト温度の

- ^{13}CO : C

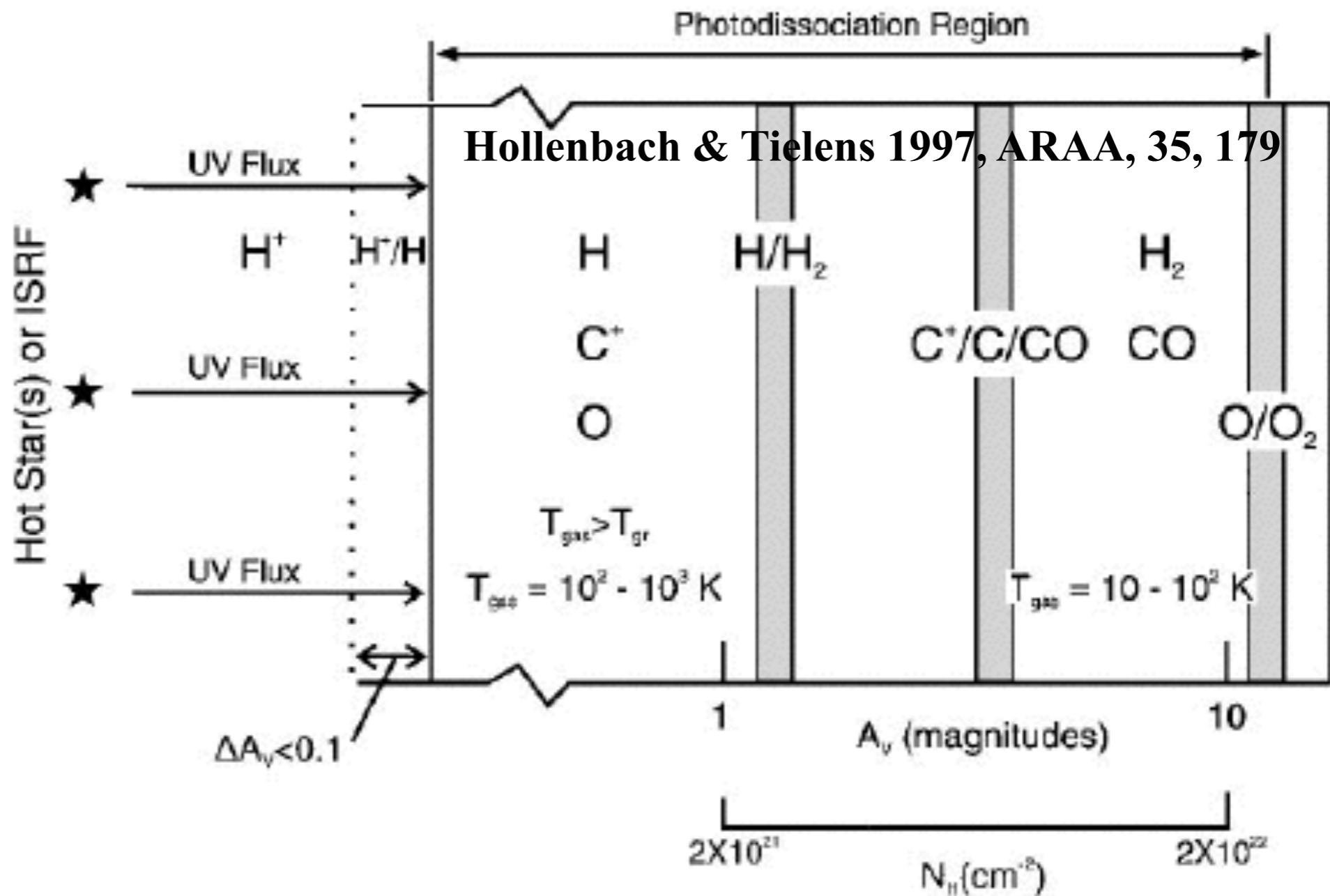
トの詳細な性

- [C]はどうか

- 期待するこ

chemistry)

ているはず。



分子ガス質量のトレーサー

- 空間分解した測定：

- 位置の関数

- 一般的な水素

- ダスト放射

opacityがわかれば

ダスト温度がわかれば

- ^{13}CO

トの詳細

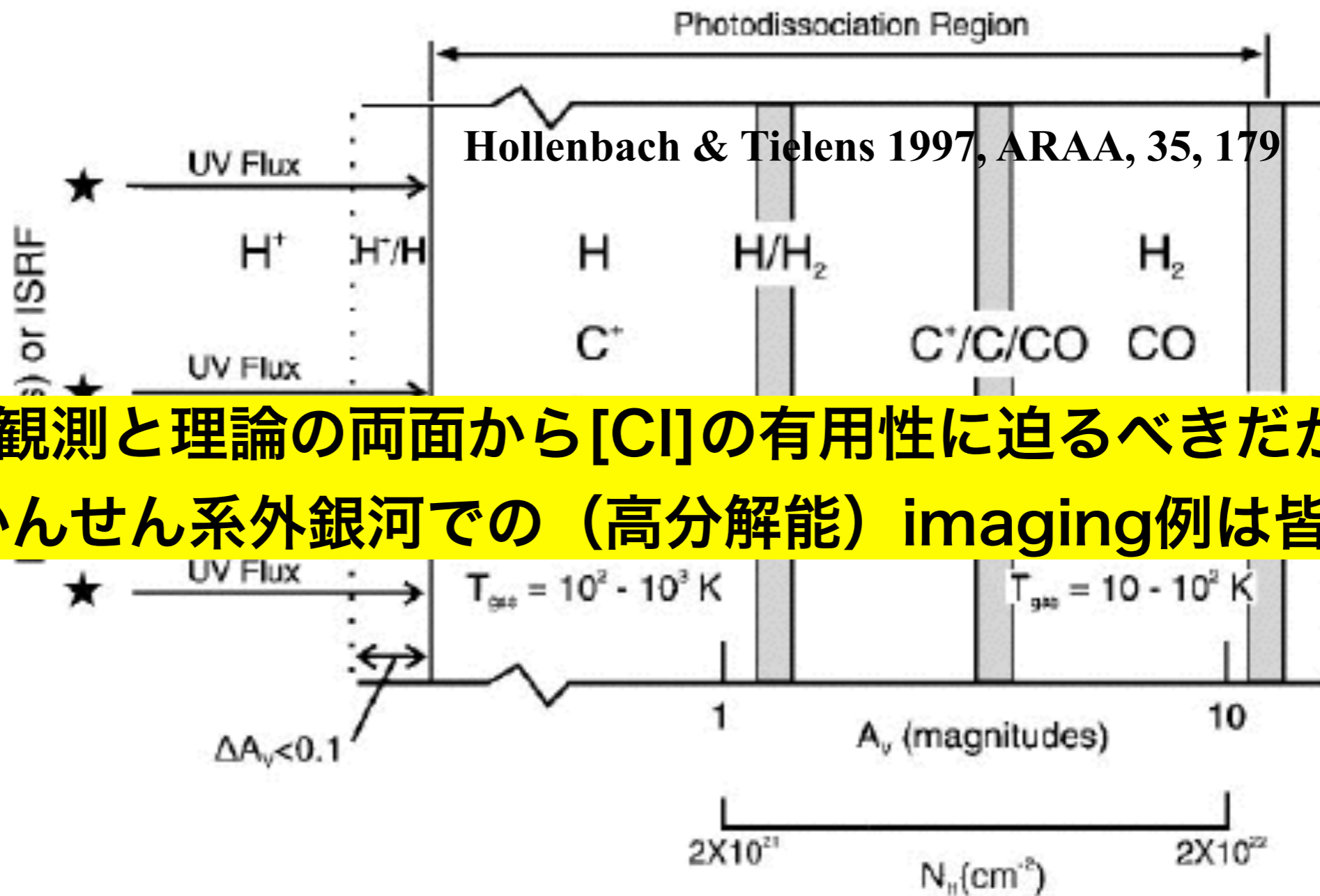
- [CI]はどうか

- 期待する

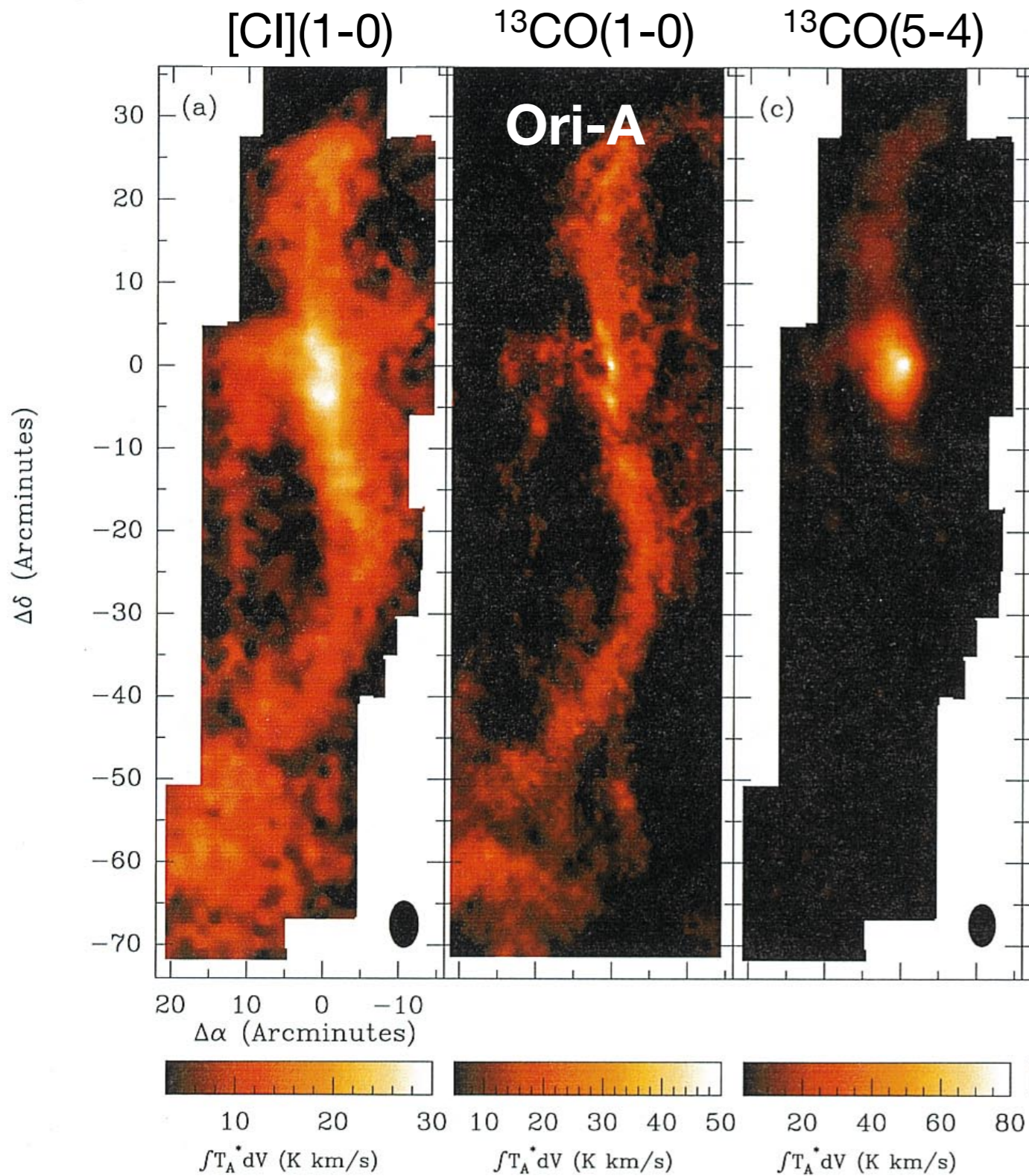
chemistry)

ているはず。

観測と理論の両面から [CI] の有用性に迫るべきだが、
いかなせん系外銀河での (高分解能) imaging例は皆無。。

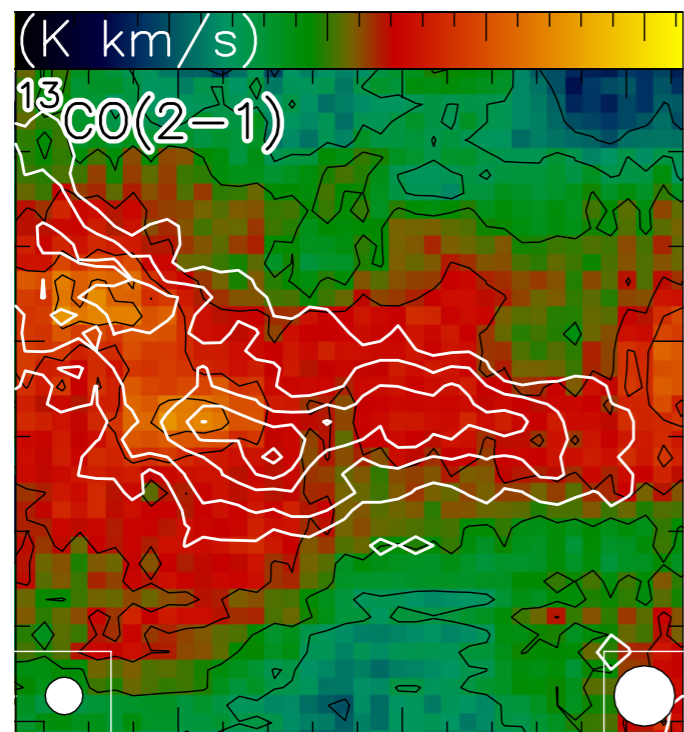
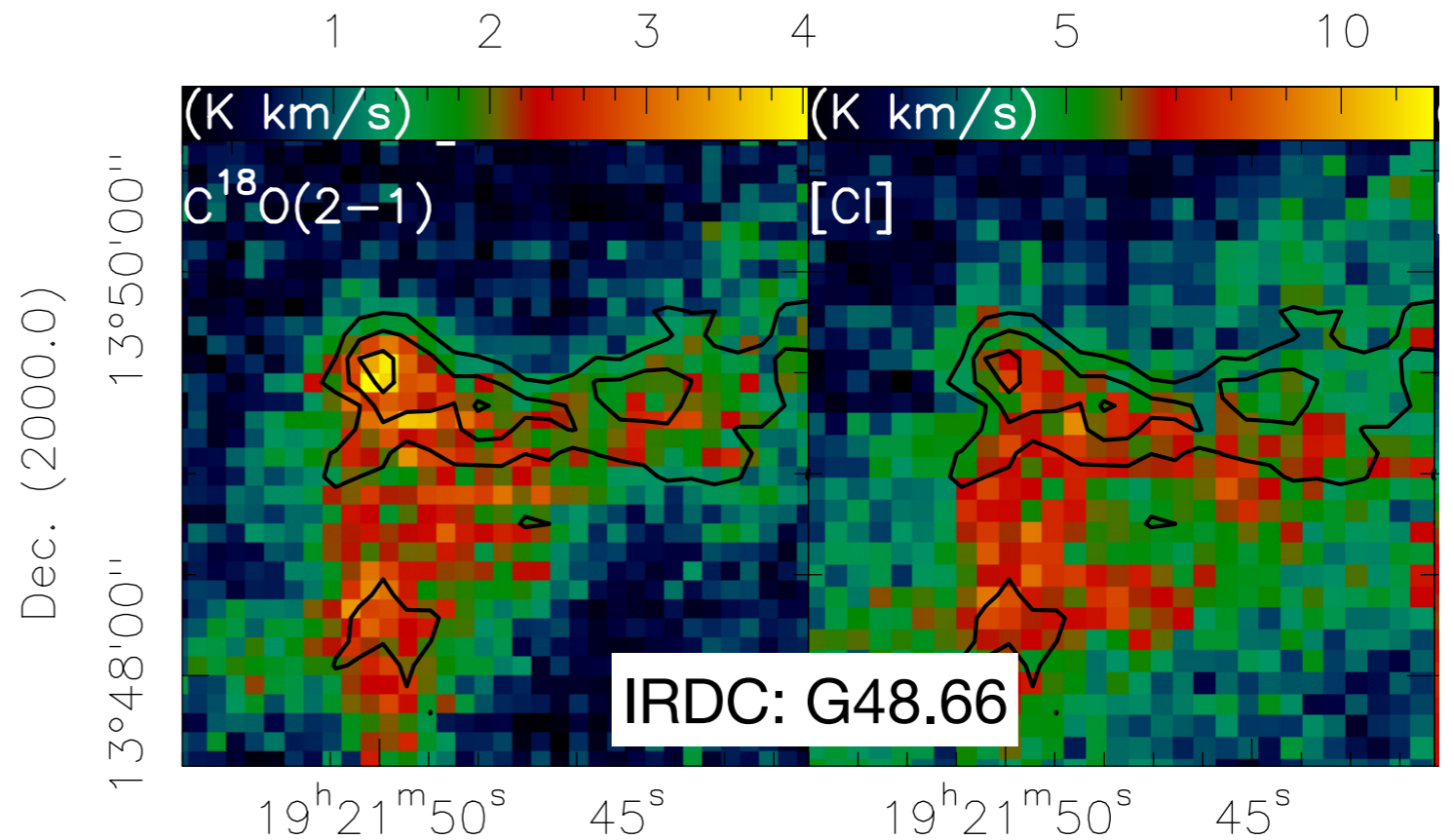
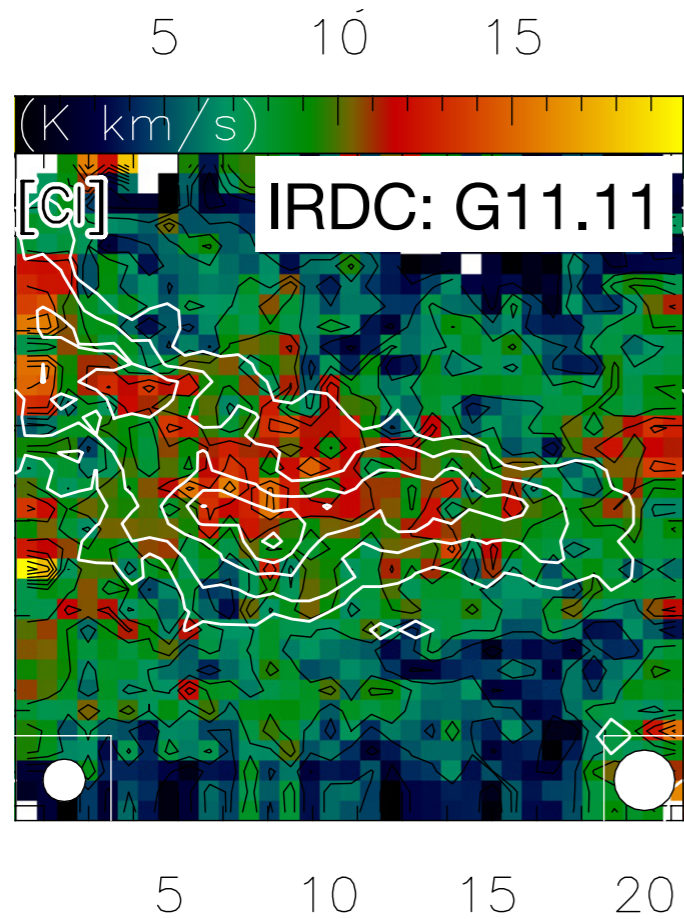


系内天体観測からの示唆：空間分布(1)



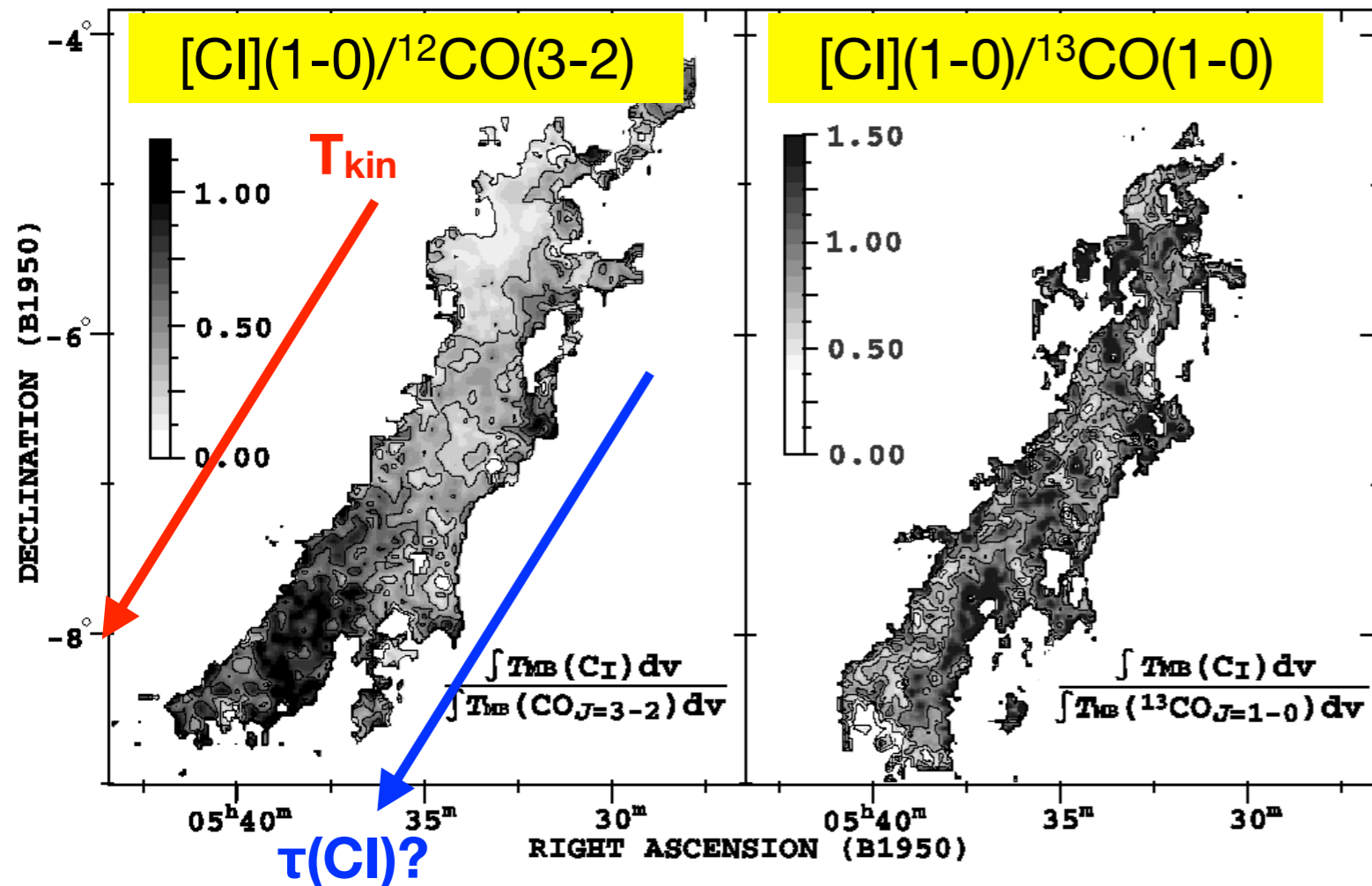
- [C I]と ^{13}CO は基本的に同じ分布をしている。
(e.g., Ikeda et al. 1999, ApJ, 527, L59; Plume et al. 2000, ApJ, 539, L133; Ojha et al. 2001, ApJ, 548, 253)
- しかも分子雲にubiquitous。
(e.g., Schilke et al. 1995; Kramer et al. 2008, A&A, 547, 555; Tatematsu et al. 1999, ApJ, 526, 295)

系内天体観測からの示唆：空間分布(2)



- IRDCからも、[C I]放射は強くでている。
→ Classical-PDRの適用は難しそう。
- またしても ^{13}CO (や $C^{18}O$) とほぼ同様の空間分布。

系内天体観測からの示唆：空間分布(3)



Ikeda et al. 1999, ApJ, 527, L59

- $[CI](1-0)/^{12}CO(3-2)$ 比は場所ごとに違う (Ori-Aの場合は南北のgradient)
→ Ori-Aに付随する T_{kin} の南北gradientを反映して、 $\tau(CI)$ が変化していることを反映？
- $[CI](1-0)/^{13}CO(1-0)$ 比はほぼ一様！
→ $[CI]$ と ^{13}CO は同程度のopacity、かつabundance比がほぼ一様であることを示唆。
- C+/C/COとlayerに分かれるclassical-PDRの描像とは矛盾？

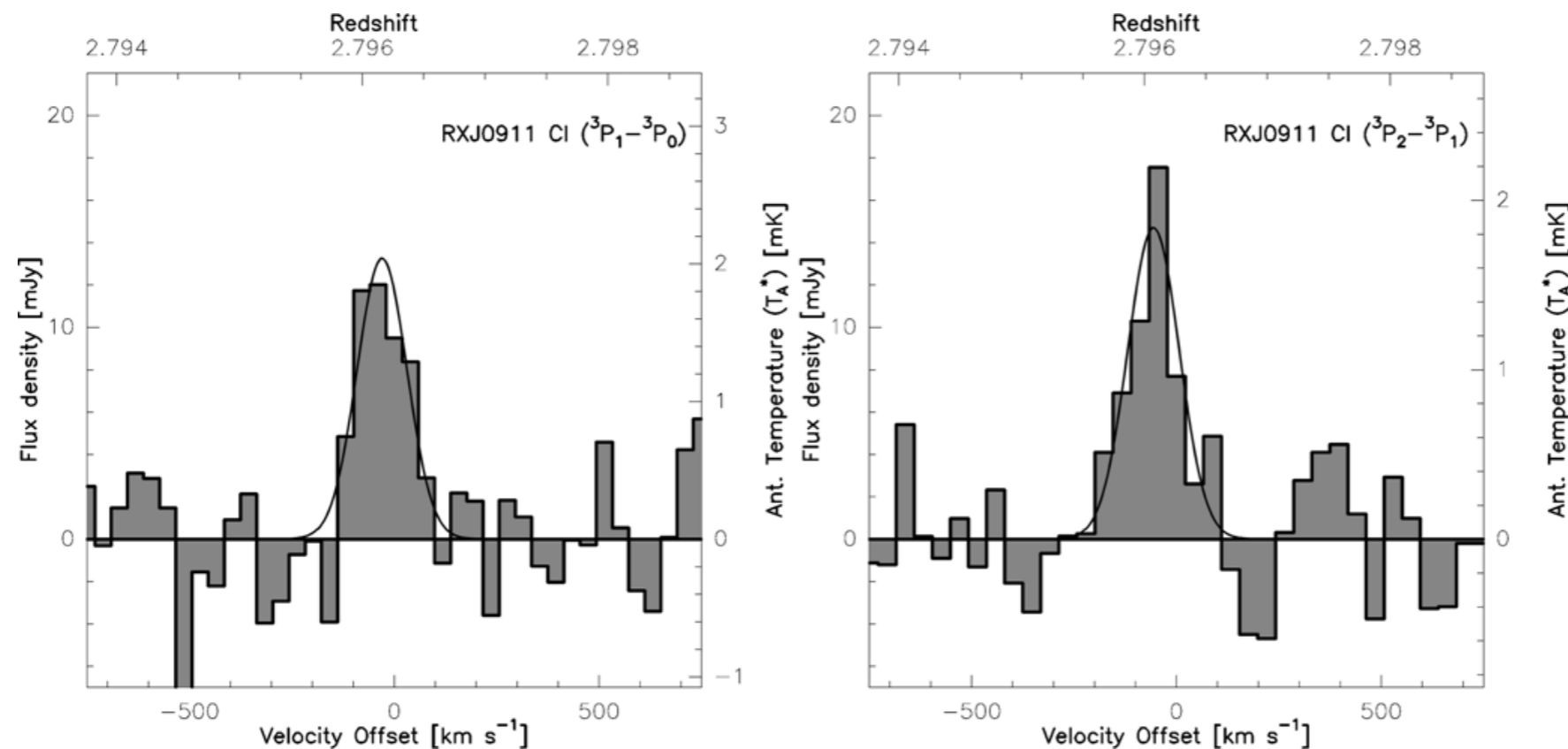
High-z天体の観測例：[CI]のabundance

- $2.2 < z < 6.4$ の17個のQSO/SMG（観測+文献）

- 励起温度は、
$$T_{\text{ex}} = 38.8 \times \left(\ln \left(\frac{2.11}{L'_{\text{CI}(2-1)/\text{CI}(1-0)}} \right) \right)^{-1}$$

- Optically-thinを仮定して、[CI]の質量は、

$$M_{[\text{CI}]} = 1.9 \times 10^{-4} Q(T_{\text{ex}}) e^{23.6/T_{\text{ex}}} L'_{[\text{CI}](1-0)} [M_{\odot}]$$



Walter et al. 2011,
ApJ, 730, 18

High-z天体の観測例：[C I]のabundance

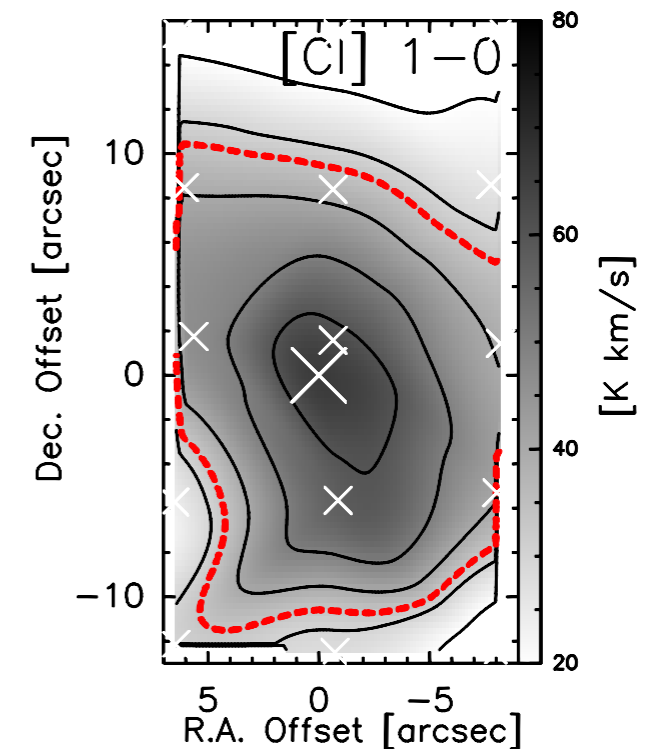
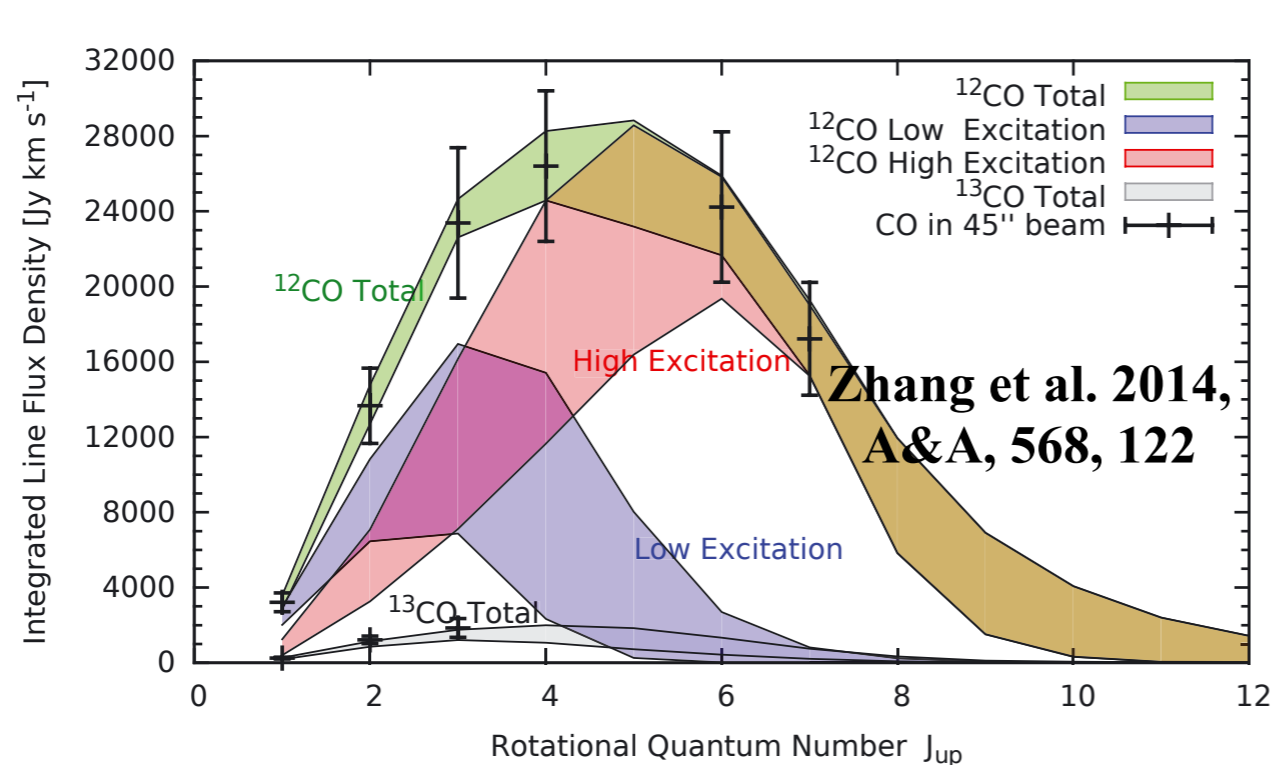
- 励起温度は $T_{\text{ex}} \sim 30\text{K}$ ：近傍銀河と同程度
- Fractional abundanceは $X(\text{C I})/X(\text{H}_2) \sim 8 \times 10^{-5}$ 程度でほぼ一定
- See also, Weis et al. 2005, A&A, 429, L25; Alaghband-Zadeh et al. 2013, MNRAS, 435, 1493

Walter et al. 2011, ApJ, 730, 18

Source	T_{ex}^a (K)	$M_{\text{C I}}$ ($10^7 M_{\odot}$)	M_{H_2} ($10^{10} M_{\odot}$)	$X[\text{C I}]/X[\text{H}_2]$ 10^{-5}	$L_{\text{C I}(1-0)}/L_{\text{FIR}}$ 10^{-6}	$L'_{\text{C I}(1-0)}/L'_{\text{CO}(3-2)}$	$L'_{\text{C I}(2-1)}/L'_{\text{C I}(1-0)}$
SMMJ02399-0136	21.6 ± 6.3	2.0 ± 0.2	4.0 ± 0.5	8.1 ± 1.4	10 ± 4	0.30 ± 0.05	0.35 ± 0.18
APM08279+5255	30.00	0.050 ± 0.007	0.154 ± 0.014	5.4 ± 0.9	1.3 ± 0.6	0.21 ± 0.03	<0.44
RXJ0911+0551	23.5 ± 3.0	0.26 ± 0.04	0.32 ± 0.04	14 ± 3	4.2 ± 1.8	0.52 ± 0.10	0.41 ± 0.08
F10214	42.0 ± 10.9	0.36 ± 0.06	0.95 ± 0.18	6.4 ± 1.7	1.4 ± 0.6	0.24 ± 0.06	0.8 ± 0.2
SDSSJ1148+5251	30.00	...	2.2 ± 0.5	...	...	...	...
SMMJ123549+6215	30.00	1.8 ± 0.3	3.4 ± 0.4	9 ± 2	12 ± 5	0.34 ± 0.08	<0.34
GN20.2	30.00	...	3.0 ± 1.2	...	...	...	...
GN20	30.00	...	4.7 ± 0.6	...	...	...	...
BRI1335-0417	30.00	<11	6.8 ± 1.4	<28	<13	<1.1	<0.13
SMMJ14011+0252	32.4 ± 5.2	0.15 ± 0.03	0.31 ± 0.03	8.2 ± 1.6	14 ± 6	0.32 ± 0.06	0.64 ± 0.12
Cloverleaf	26.7 ± 3.0	0.76 ± 0.12	3.32 ± 0.05	3.8 ± 0.6	2.9 ± 1.3	0.15 ± 0.02	0.49 ± 0.08
SMMJ16359+6612	26.2 ± 4.0	0.16 ± 0.03	0.34 ± 0.02	7.8 ± 1.5	12 ± 5	0.30 ± 0.06	0.48 ± 0.11
SMMJ163650+4057	30.00	<1.4	3.9 ± 0.5	<5.8	<9	<0.22	<1.0
SMMJ163658+4105	30.00	1.8 ± 0.4	4.6 ± 0.5	6.4 ± 1.5	9 ± 4	0.25 ± 0.06	<0.82
MM18423+5938	34.1 ± 8.8	0.5 ± 0.1	0.79 ± 0.08	11 ± 3	8 ± 4	0.41 ± 0.10	0.7 ± 0.2
SMMJ213511-0102	22.4 ± 0.6	0.91 ± 0.03	0.95 ± 0.01	15.9 ± 0.5	14 ± 6	0.60 ± 0.02	0.37 ± 0.02
PSSJ2322+1944	32.8 ± 7.4	0.71 ± 0.11	2.4 ± 0.3	4.9 ± 1.0	4.1 ± 1.8	0.19 ± 0.04	0.65 ± 0.17

[CI]に関する問題

- ^{13}CO と一致する、ほぼ分子雲の”どこにでもある”ことの原因は？
- ほぼ一定のfractional abundanceの原因は？
- これらが解明されると、気持ちに余裕をもってmassの推定に使える。。

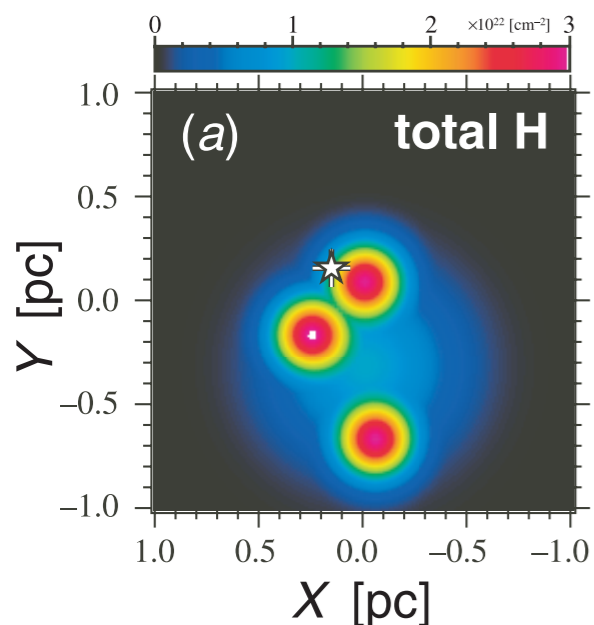


CircinusではCOのLVG解析から求めたガス質量と、[CI]のLTE解析から求めたガス質量はほぼ一致。

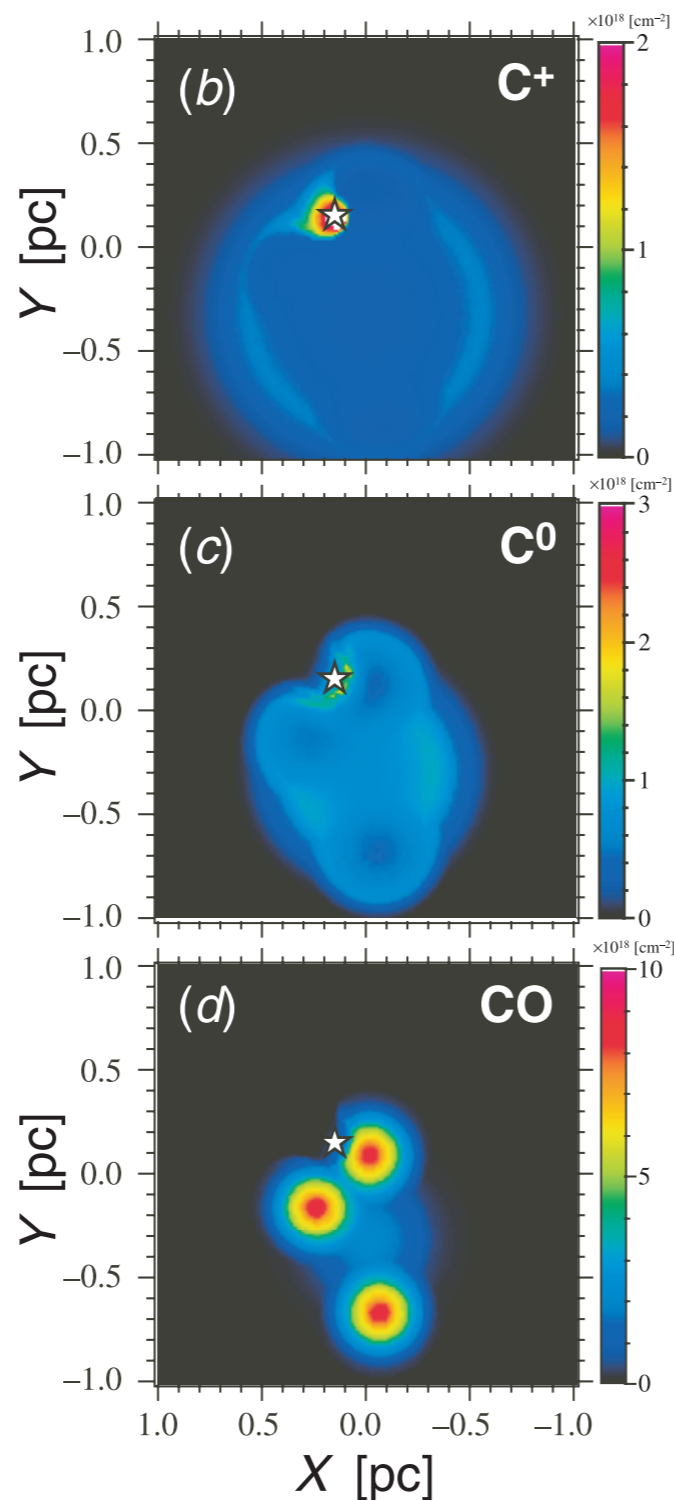
Possible interpretations (1): Clumpy-PDR

Steady-state PDR Model
for the NGC 1333 Cloud

clump size = 0.0 pc
filling factor = 1.0



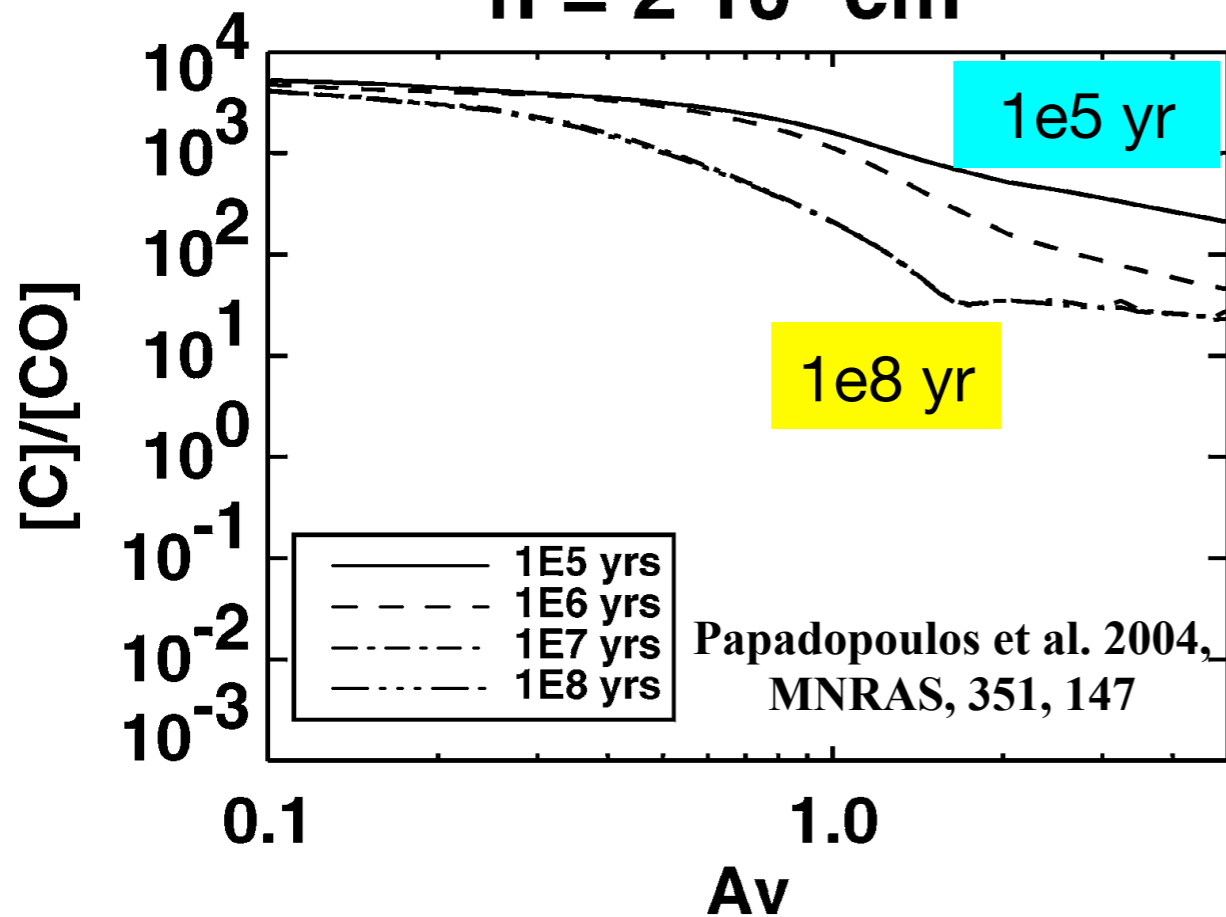
Oka et al. 2004,
ApJ, 602, 803



- Classicalに想定されていた、“homogeneous medium”を変える (e.g., Oka et al. 2004, ApJ, 602, 803)。
- Turbulence etc.で密度構造にムラを作れば、想像以上に分子雲内部にUV光が浸透し、[C I]が増えるだろう。

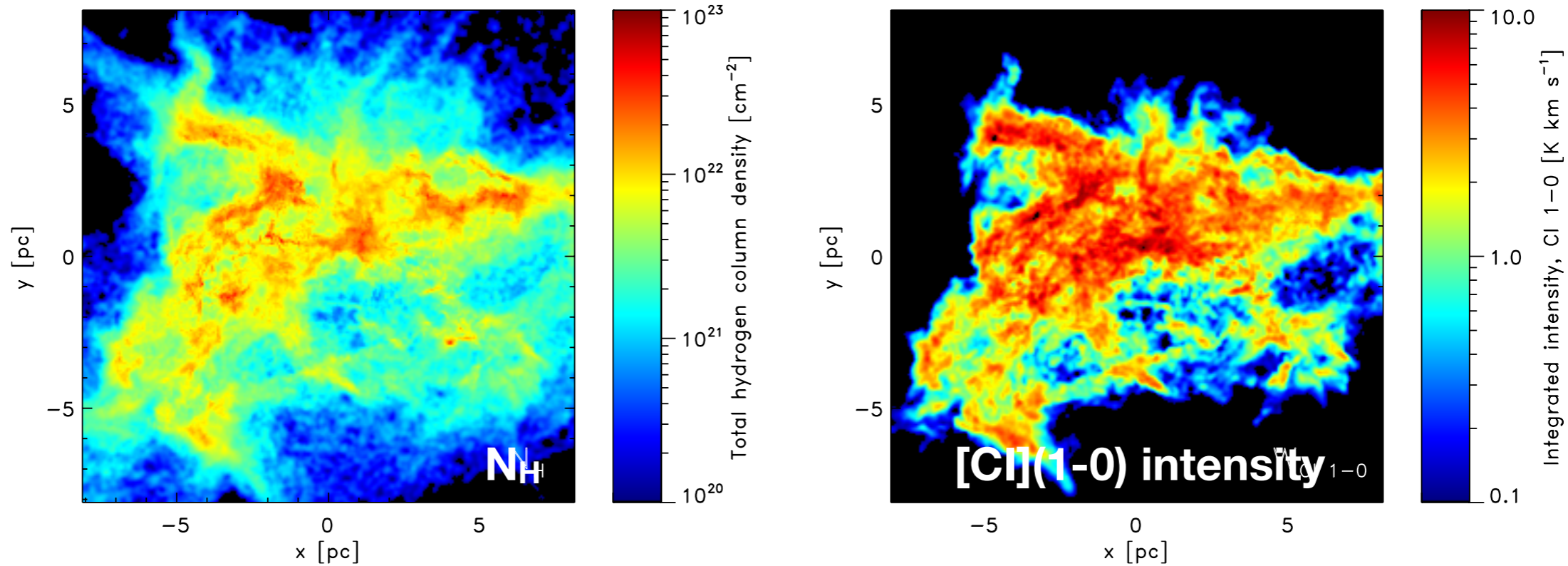
Possible interpretations (2): Non-equilibrium + Turbulence + CR

$$n = 2 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$$

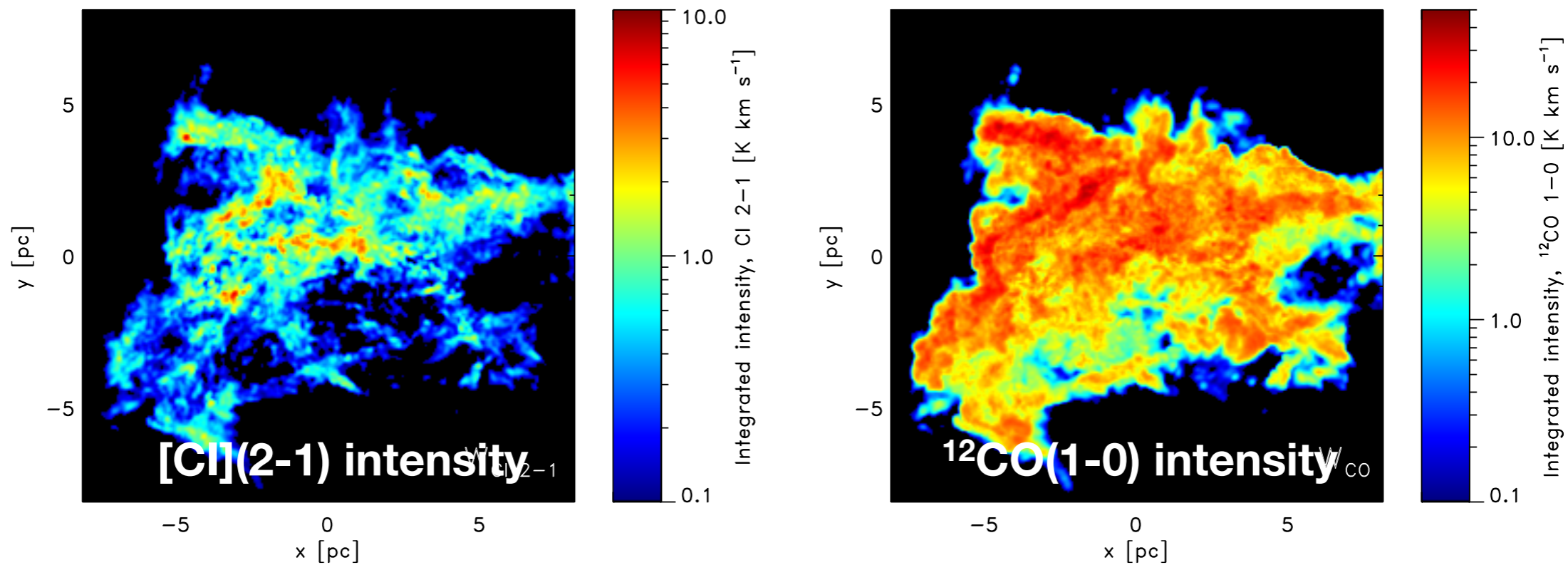


- 星間化学は**非平衡**。
- 化学反応の（平衡状態までの）タイムスケール： $O(1e7 \text{ yr}) >$
Dynamical time： $O(1e6-7 \text{ yr})$
- 従って、steady state abundance ratioは実現できない。
- Turbulenceは領域ごとの**abundanceの違いを均質化**してしまう。
(e.g., Papadopoulos et al. 2004, MNRAS, 351, 147; Glover et al. 2014 in press.)
- Cosmic-Rayは、分子雲深部に浸透し、COを解離。[C]をenhance
(c.f., M82中心部 Schilke et al. 1993, ApJ, 417, L67)。

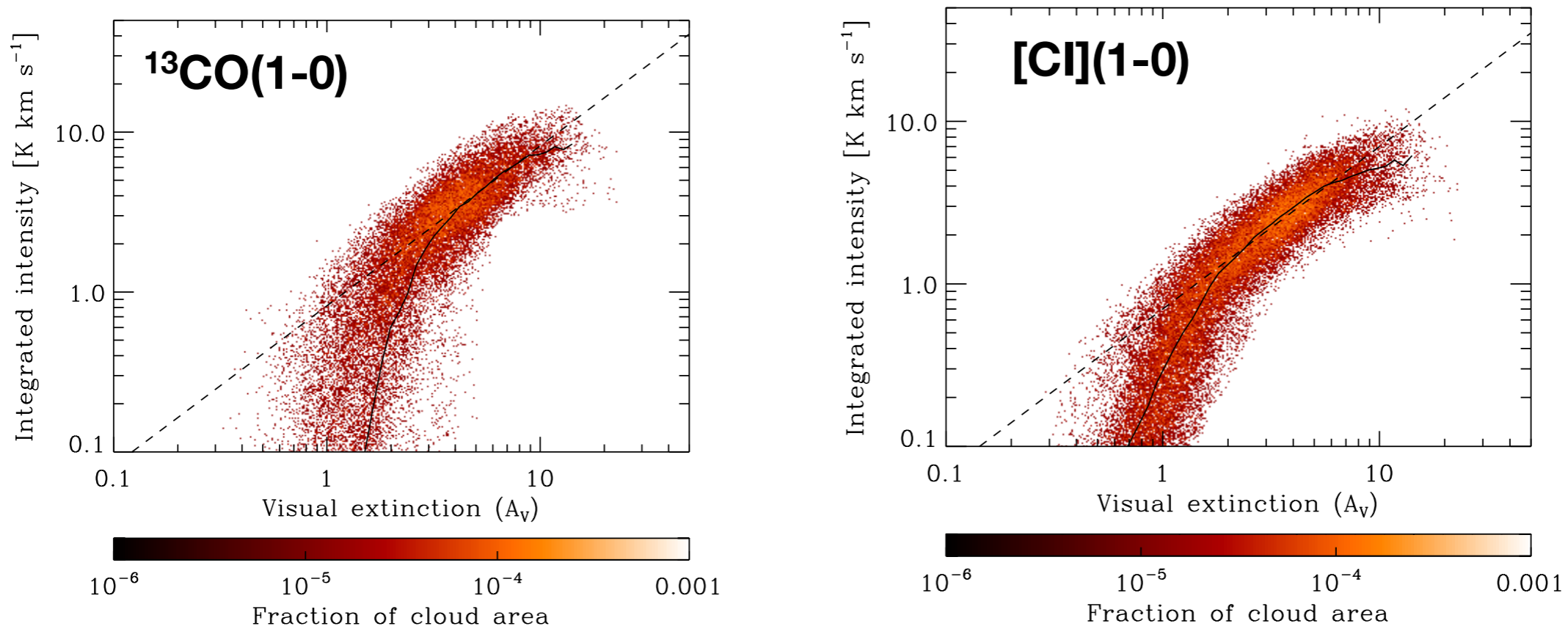
Numerical Simulation (1)



Glover et al. in press.



Numerical Simulation (2)



Glover et al. in press.

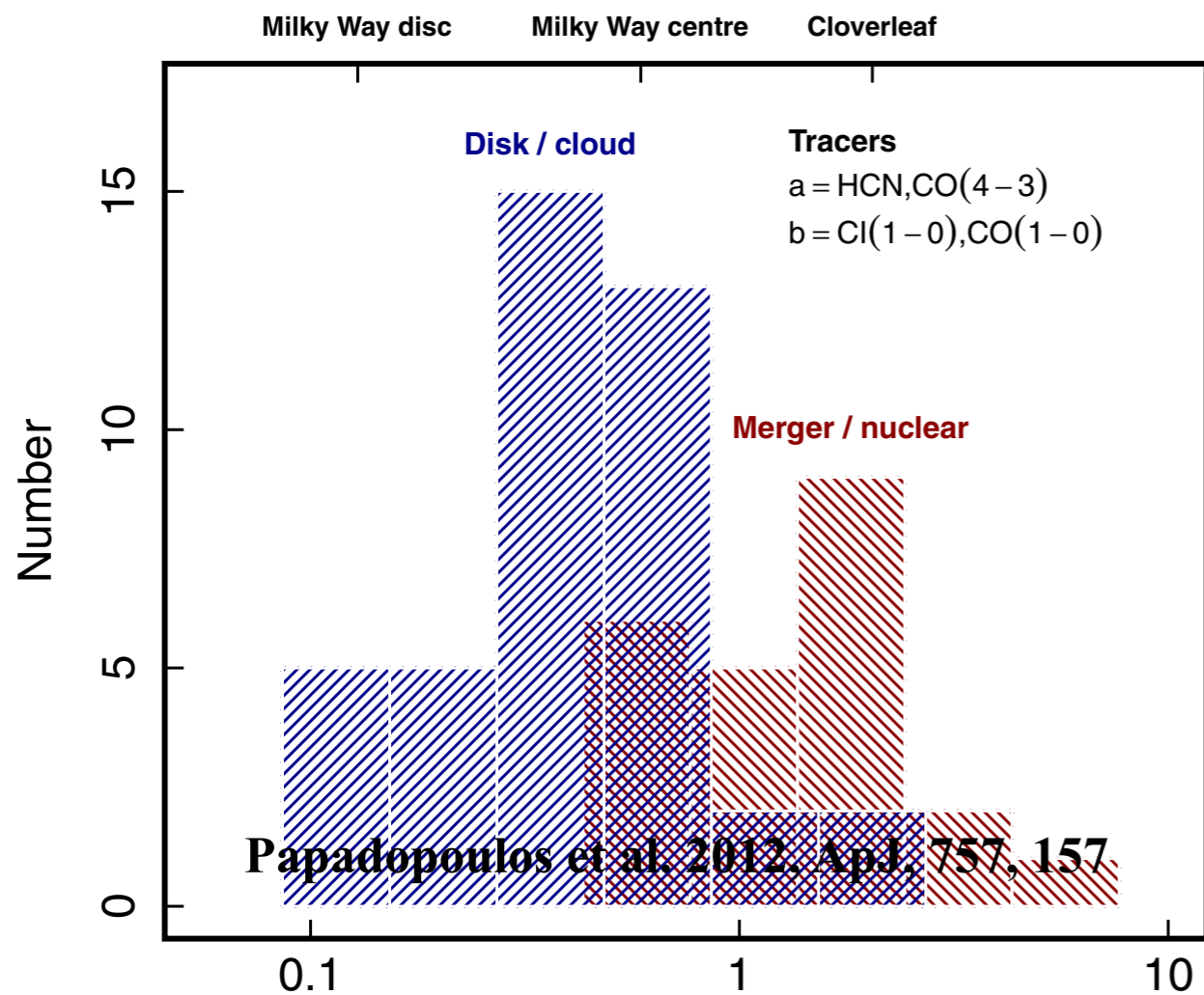
- ¹³CO並み、low-A_Vに限ればそれ以上に高いlinearityを[CI]は示す。
→ 1.5 < A_V < 7で[CI]が有用である。
→ N_{H2}では、**5e20-1e22 cm⁻²**程度の範囲。
- 上記の範囲で、**X_{[CI](1-0)} ~ 1×10²¹ cm⁻² (K km/s)⁻¹**

[CI]に関する問題 まとめ

- これまでの研究をまとめると、おおむね[CI]を分子ガス質量のトレーサーとすること自体は大丈夫そうだ。
- ただし、なぜ分子ガスをトレースできるのか、観測的にはよく分かっていない。
→ Clumpy PDR, Turbulence, Non-equilibrium chemistry, Cosmic-Ray
- 空間分解できる近傍銀河 (Milky Wayにはないvigorousな星形成環境がある; NGC 253, M82, etc) で、[CI](1-0), (2-1)や、CO系を定量評価することが重要だろう。
→ 最終的にはHigh-z天体のガス質量、fractionの評価へ。

おまけ：輝線比を用いた診断：

(1) 星形成モード

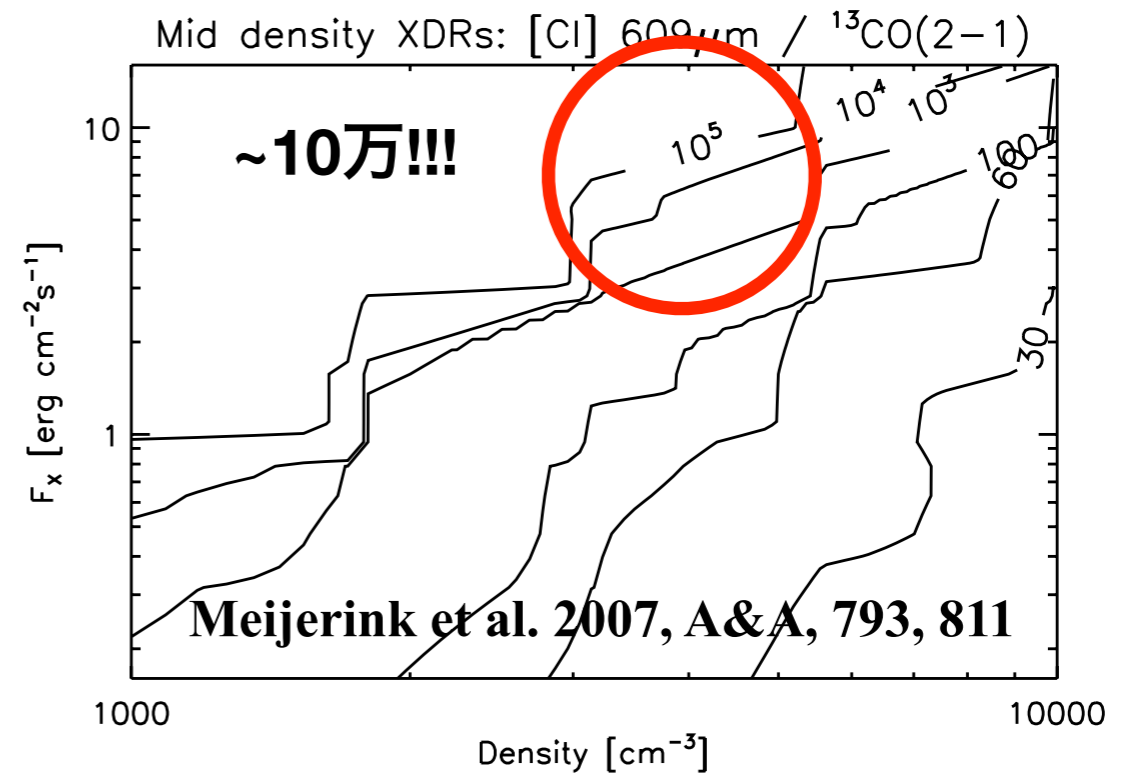
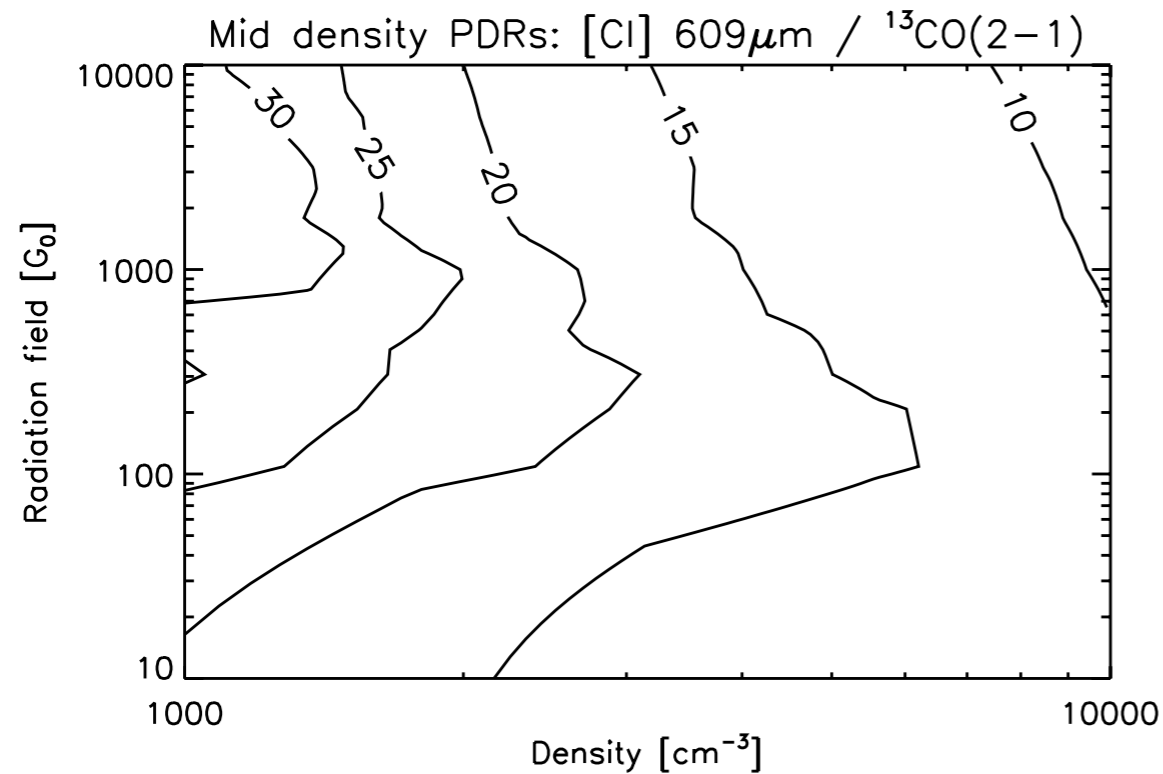


横軸はたとえばCO(4-3)/[CI](1-0)

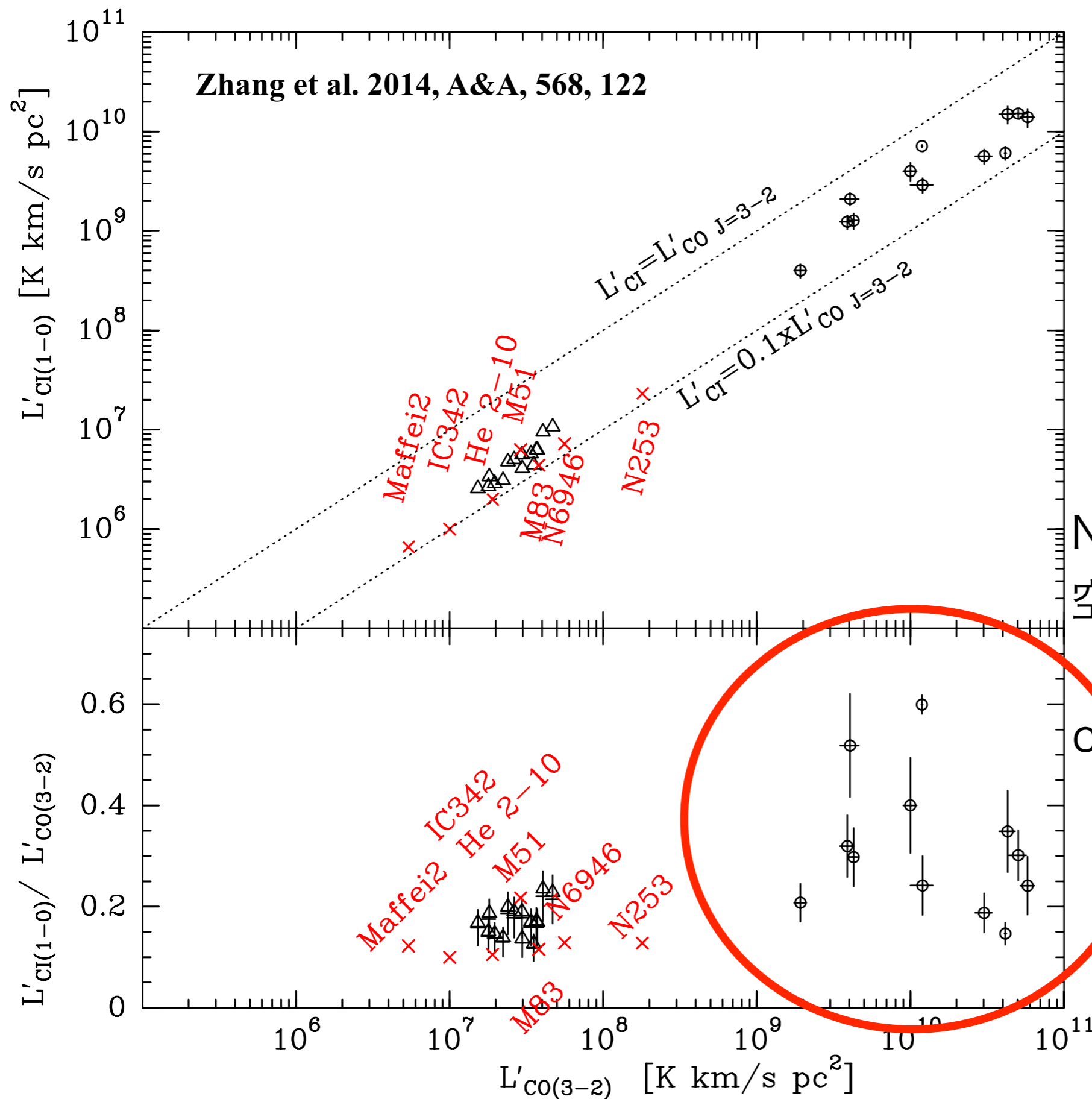
- [CI]がtotal gasを、HCNやhigh-J COがdense gasを見ているとする。
- (dense gas)/(total gas)の比を、それらの輝線で代替するとして調べると、**バーストモードの星形成と quiescentな星形成で輝線比に差が出る。**
- [CI]で分子ガス質量を測りつつ、隣接するCO(4-3)との輝線比をとって星形成モードを調べる@宇宙の古今

おまけ：輝線比を用いた診断：

(2) 熱源診断



- Cosmic-RayにCOが解離されたように、X線でも同様にCOは解離、[CI]を著しくenhanceするという予測もある。
- ただし、これはhomogeneous, steady stateなgas-phase modelである点に注意。



なぜかhigh-z天体で
(微妙に) 比が高い。
QSOの影響 (XDR) ?

NearbyでAGN近傍だけを
空間分解して観測すべし。

c.f. Takano, Izumi et al.
ALMA Cycle 2