

系外銀河における 中性炭素原子輝線観測

筑波大学 D1

保田 敦司 (YASUDA Atsushi)

水素分子(H₂)ガス量の測定

- 水素分子(H₂)

- 宇宙に最も豊富に存在する分子
- 銀河進化や星形成の理解に重要
- 電気双極子モーメントを持たないため、分子雲(~数十 K)中のH₂分子の直接観測は困難。

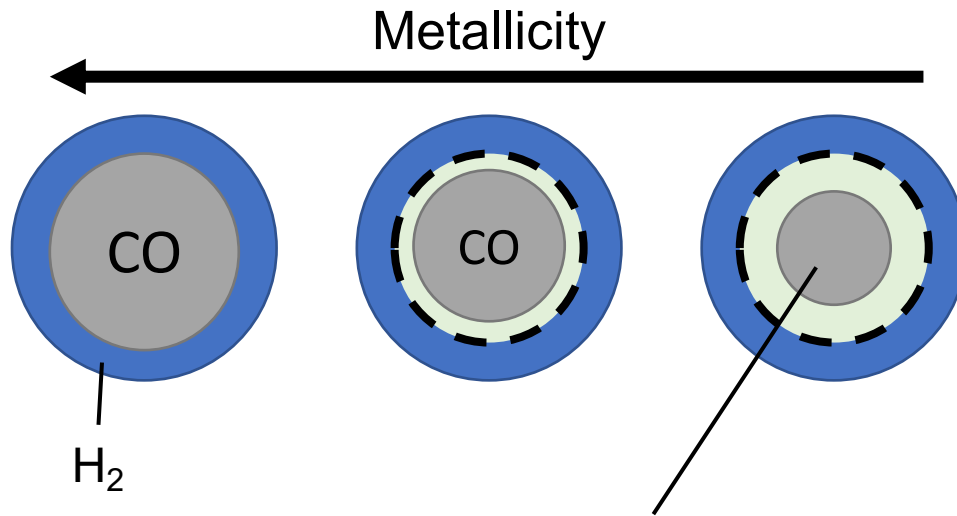
- 一酸化炭素(CO)

- 分子雲中でH₂分子に次ぐ存在量 ($[CO]/[H_2] \sim 10^{-4}$)
- ¹²CO(J=1-0): 極低温の分子雲でも容易に励起 ($E/k = 5.5$ K)
- CO-H₂質量変換係数 X_{CO} (¹²CO(J=1-0))

$$N(H_2)[\text{cm}^{-2}] = X_{CO} I_{CO} \quad (I_{CO} = \int T dv)$$

H₂ガストレーサーとしてのCOの課題

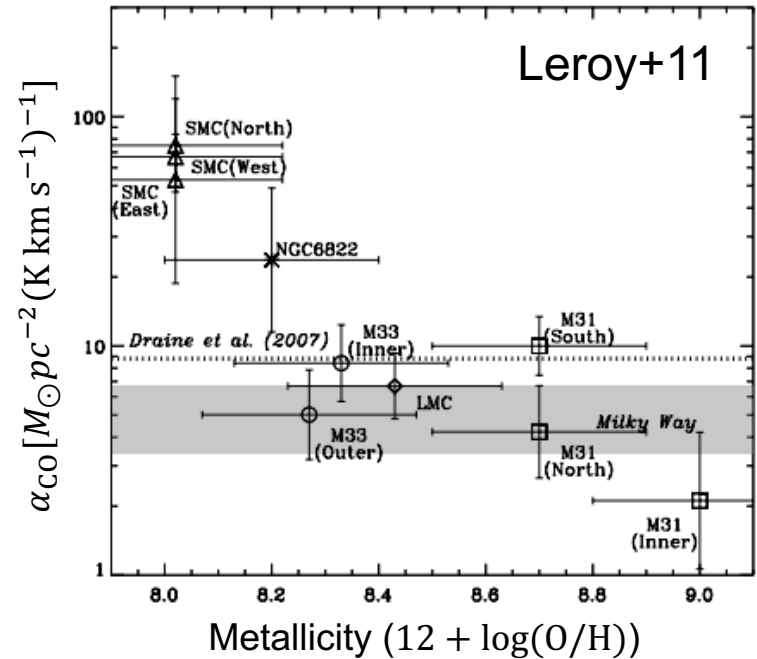
- low metallicity



COで観測されるH₂ガスが実際よりも小さくなる

- high-*z* galaxy

- ¹²CO(J=1-0)静止周波数: $\nu_{\text{rest}} = 115.271$ GHz
- High-J CO & high-J CO/CO(1-0) line ratioからCO(1-0)を推定
→ Line ratio: 銀河のタイプ・銀河内部でばらつき
High-J CO: warm & dense gasをトレース



中性炭素原子C I

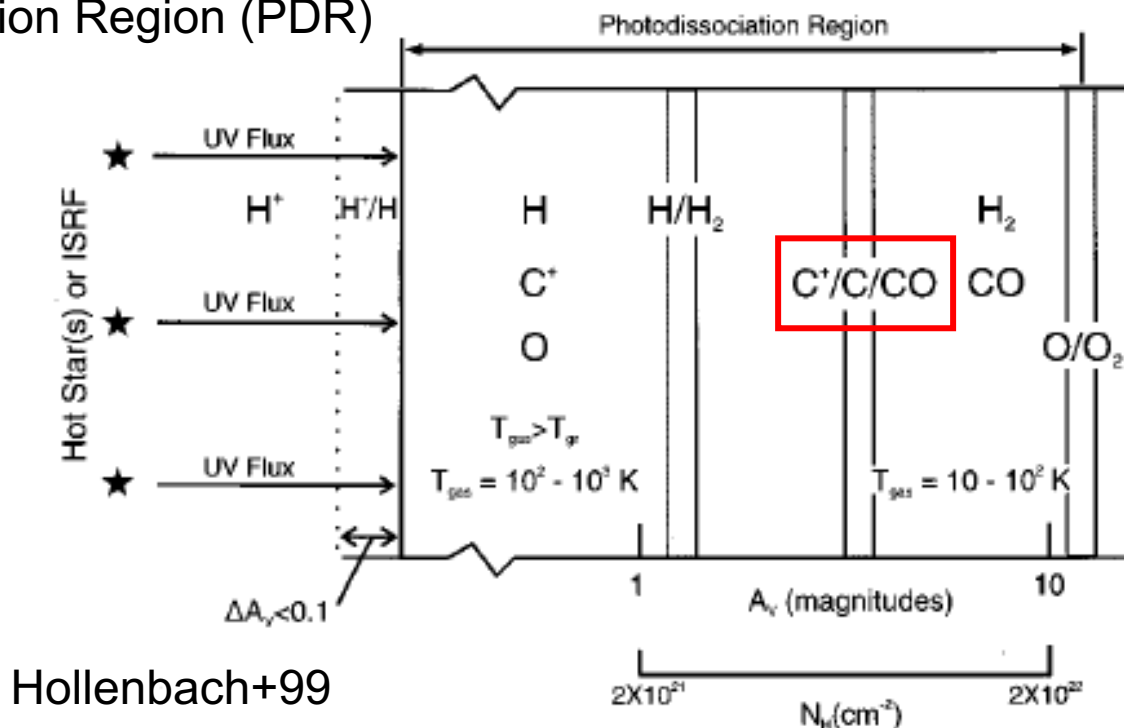
• サブミリ波 & テラヘルツ帯で観測

➤ [C I] ($^3P_1 - ^3P_0$) ([C I] (1-0)) $\nu_{\text{rest}} = 492.161 \text{ GHz}$

➤ [C I] ($^3P_2 - ^3P_1$) ([C I] (2-1)) $\nu_{\text{rest}} = 809.344 \text{ GHz}$

(CO(4-3): 461.041 GHz, CO(7-6): 806.651 GHz)

Photodissociation Region (PDR)



H₂トレーサーとしての[CI]輝線

- 臨界密度
 - CO(1-0): $\sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$
 - [CI](1-0): $\sim 500 \text{ cm}^{-3}$ [CI](2-1): $\sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ (Papadopoulos+04)
- $\nu_{\text{rest}}([\text{CI}]) > \nu_{\text{rest}}(\text{CO}(1-0))$
 - CO(1-0)よりもhigh- z での観測が可能
- Low metallicity領域や強い(FUV, cosmic ray)輻射場でCO光解離 ($\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{O}$)の促進。
 - Cの存在量が増加。COに代わるH₂トレーサーとして期待

Simulation (Papadopoulos+18)

$$n = 50 \text{ cm}^{-3}$$

$$Z = 1Z_{\odot} \quad Z = 0.2Z_{\odot}$$

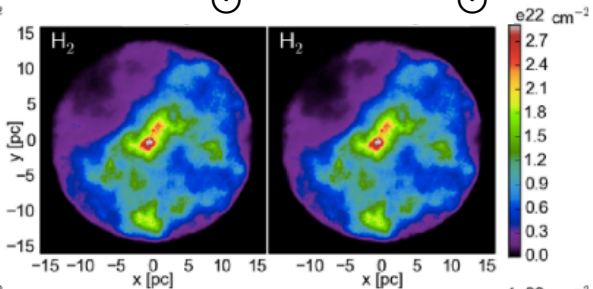
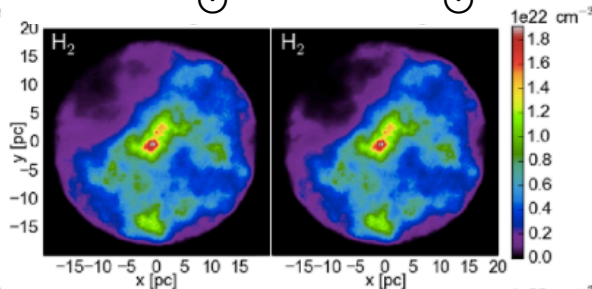
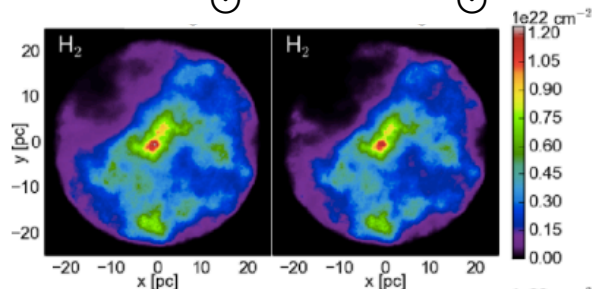
$$n = 100 \text{ cm}^{-3}$$

$$Z = 1Z_{\odot} \quad Z = 0.2Z_{\odot}$$

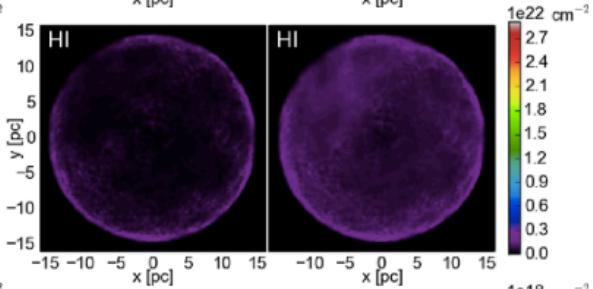
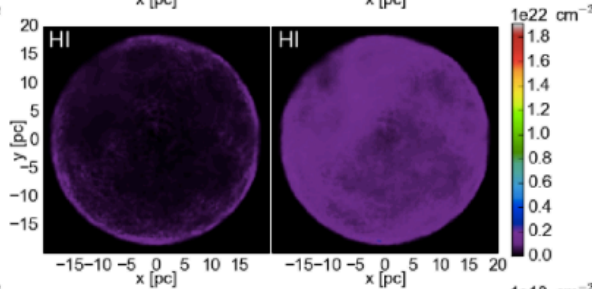
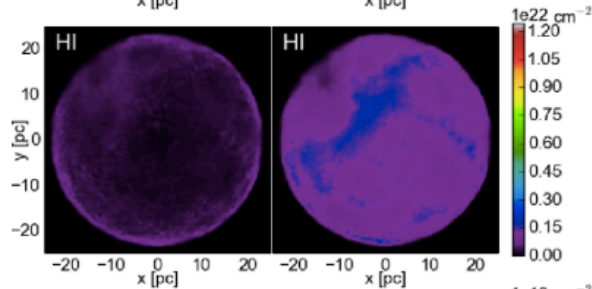
$$n = 200 \text{ cm}^{-3}$$

$$Z = 1Z_{\odot} \quad Z = 0.2Z_{\odot}$$

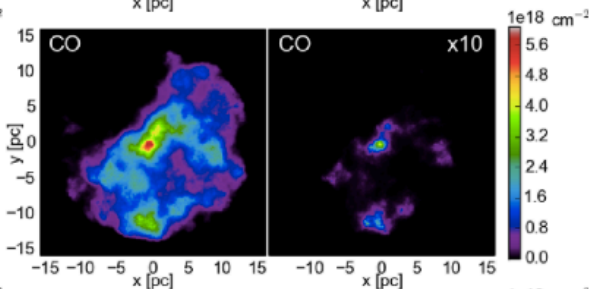
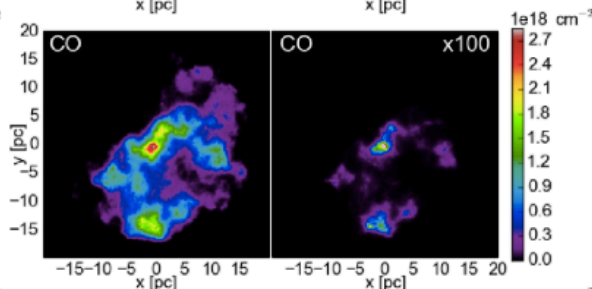
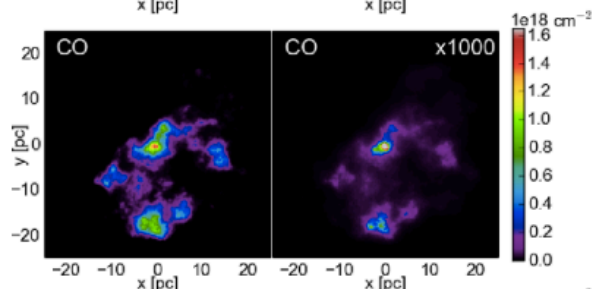
H₂



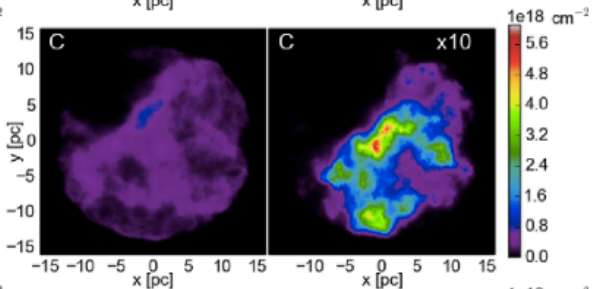
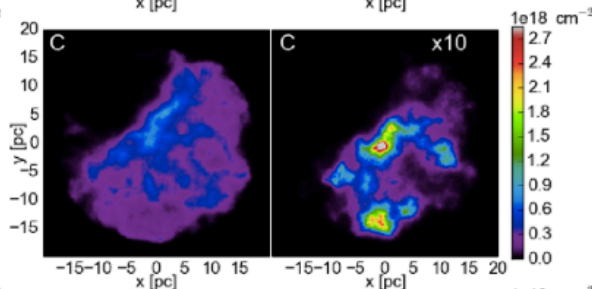
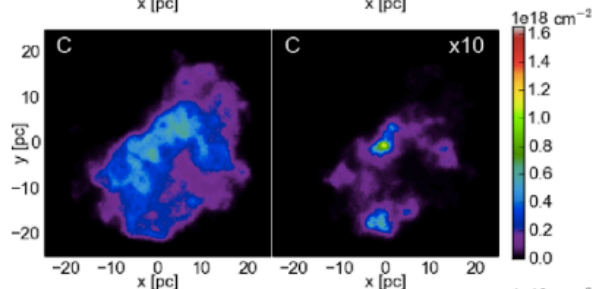
HI



CO



CI



Simulation (Papadopoulos+18)

ζ' : Cosmic ray energy density

$n = 50 \text{ cm}^{-3}$

$\zeta' = 30$ $\zeta' = 300$

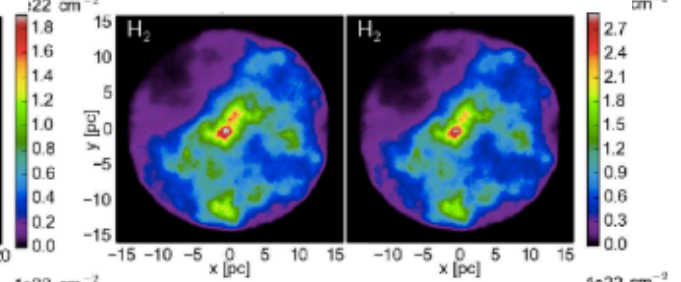
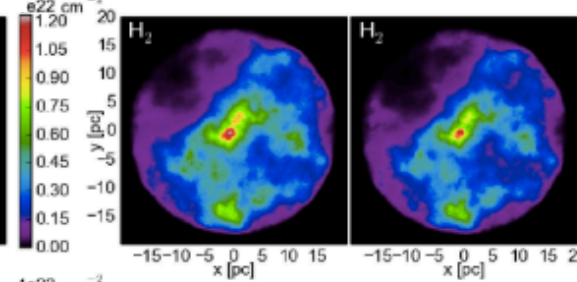
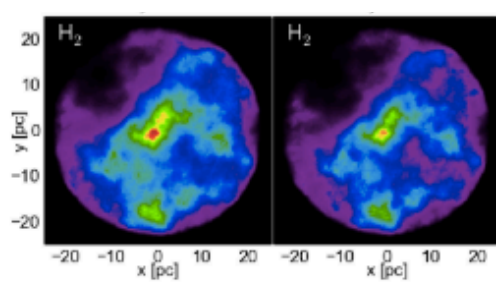
$n = 100 \text{ cm}^{-3}$

$\zeta' = 30$ $\zeta' = 300$

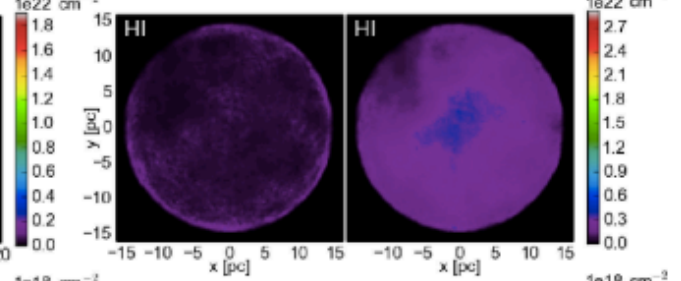
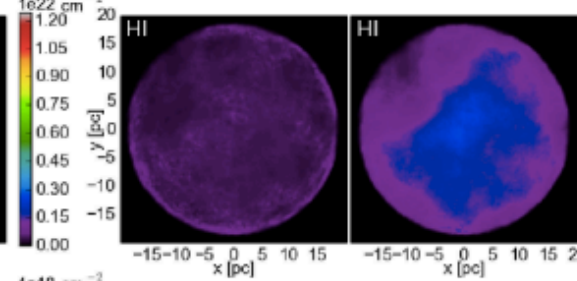
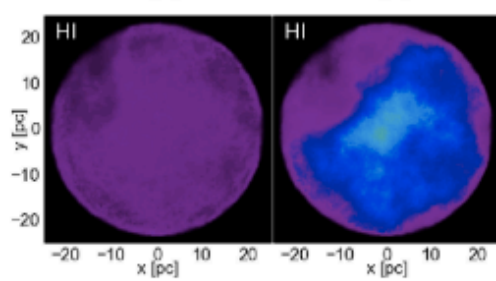
$n = 200 \text{ cm}^{-3}$

$\zeta' = 30$ $\zeta' = 300$

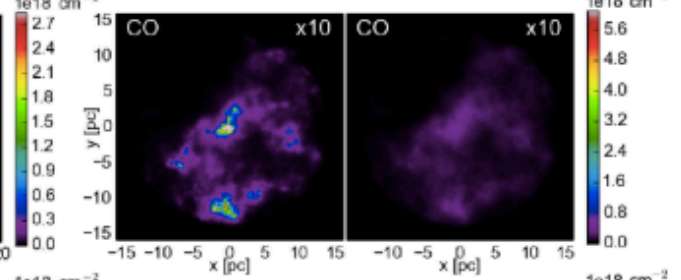
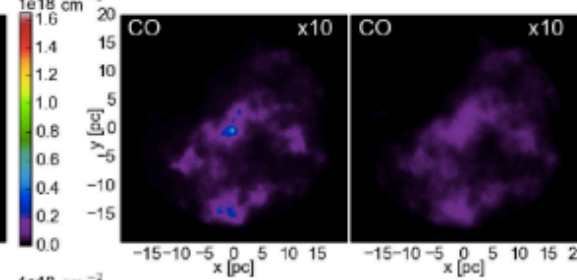
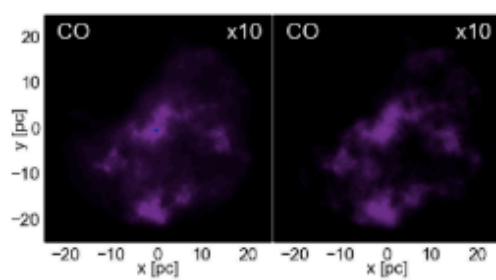
H₂



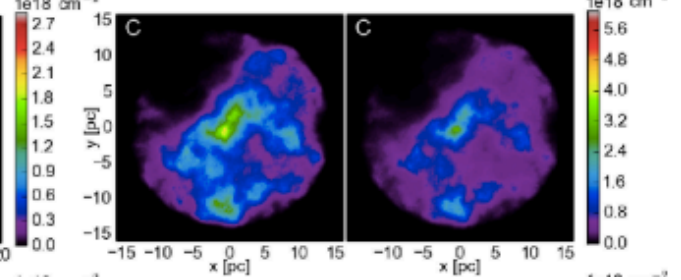
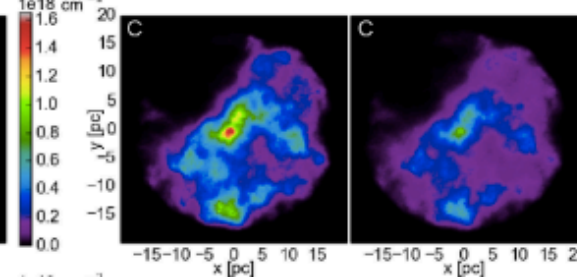
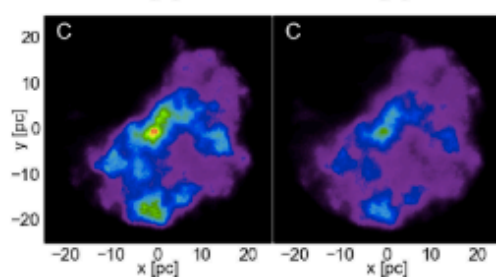
HI



CO



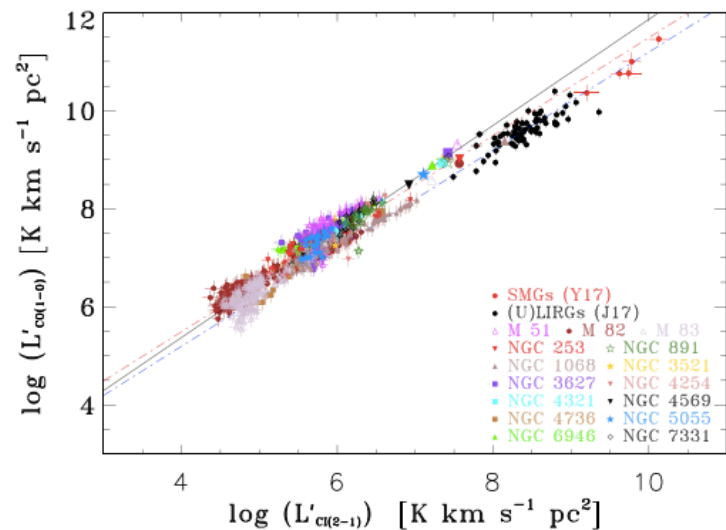
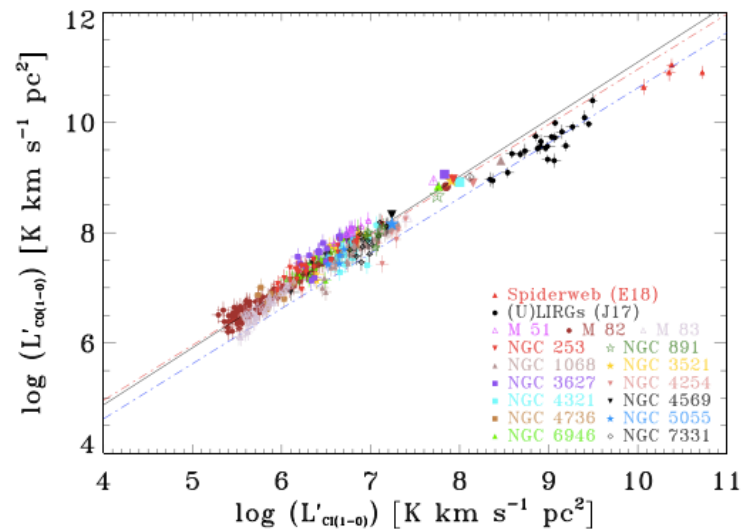
CI



[CI]輝線観測(銀河系内)

- Orion A and B clouds (Ikeda+02, 富士山頂サブミリ波望遠鏡)
 - Integrated intensity of [CI](1-0)/ ^{13}CO (1-0): almost constant value (0.5 ~ 0.8)
 - Abundance ratio $N(\text{CI})/N(\text{CO})$: almost constant at the interior
 - Orion A giant molecular cloud (Shimajiri+13, ASTE)
 - Optically depth $\tau_{\text{CI}} = 0.1 \sim 0.75 \rightarrow$ optically thin
 - [CI](1-0)分布が ^{13}CO (1-0)分布と相関が良い
- CIは分子雲内部までCOと共存、dense領域をトレース

[CI]輝線観測(近傍銀河)



Jiao+19

- Herschelによる近傍銀河の[CI](1-0)、[CI](2-1)輝線観測(~ kpc scale)。
 - 15 nearby spiral galaxy + Seyfert and starburst galaxy + LINER
 - [CI](1-0) ([CI](2-1)) and CO(1-0) luminosities
- tight and nearly relation



kpc scaleでは[CI](1-0, 2-1)とCO(1-0)は線形相関

[CI]輝線観測における課題

近傍銀河での[CI]輝線観測

- COとの相関(様々な領域(構造)、環境、分子雲の性質に対する変化)
- H₂ガストレーサーとしての有用性 (CO?, [CI]?, Dust?)



- High-z galaxy
- Low metallicity region
における[CI]のH₂ガス
トレーサーとしての有用性

• これまでの近傍銀河における[CI]輝線観測

- 銀河中心の観測 (Israel+05, Krips+16, Miyamoto+18, Salak+19)
- Herschelによる1点 or kpc scale観測 (Jiao+17, 19, Israel+15)

銀河の構造が分解可能なスケール(sub-kpc)以下での広域[CI]輝線観測が不足

近傍棒渦巻銀河 M83

Morphology ¹	SAB
Ra. (J2000) ¹	13 ^h 37 ^m 00 ^s .48
Dec. (J2000) ¹	−29°51′56″.48
Distance [Mpc] ¹	4.5
PA [deg] ¹	45
Inclination [deg] ¹	24

1: Kuno et al. (2007)

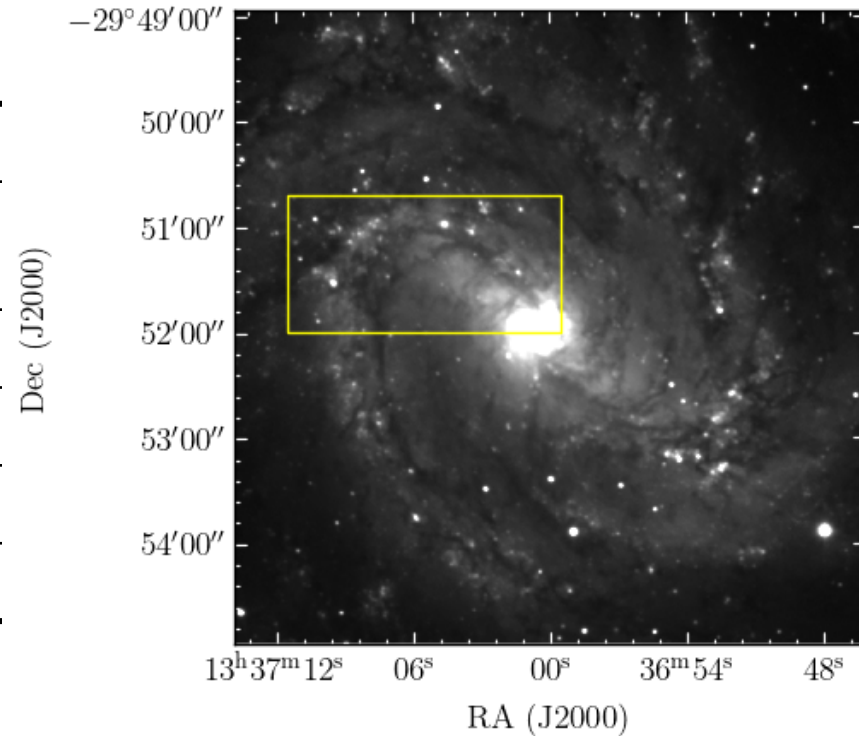


豊富なCO multi-line data

- 干渉計(ALMA):
 - $^{12}\text{CO}(1-0, 2-1, 3-2)$ (PI: Hirota)
 - $^{13}\text{CO}(1-0)$ (PI: Sakamoto)
- 単一鏡:
 - $^{12}\text{CO}(1-0)$ (NRO45m, Kuno+07)
 - $^{12}\text{CO}(3-2)$ (ASTE, Muraoka+09)

近傍棒渦巻銀河 M83

Telescope	ASTE (PI: Miyamoto)
Observation line	[CI](3P_1 - 3P_0) (492.160651 GHz)
HPBW	$17'' \times 17'' (= 387 \times 387 \text{ pc})$
Main beam efficiency	0.45 at 490 GHz
Observation seasons	2017/07~08, 2019/07
Data Reduction	COMING-ART (Sorai+19)



V-band image (gray) & observation region with ASTE (yellow rectangle)

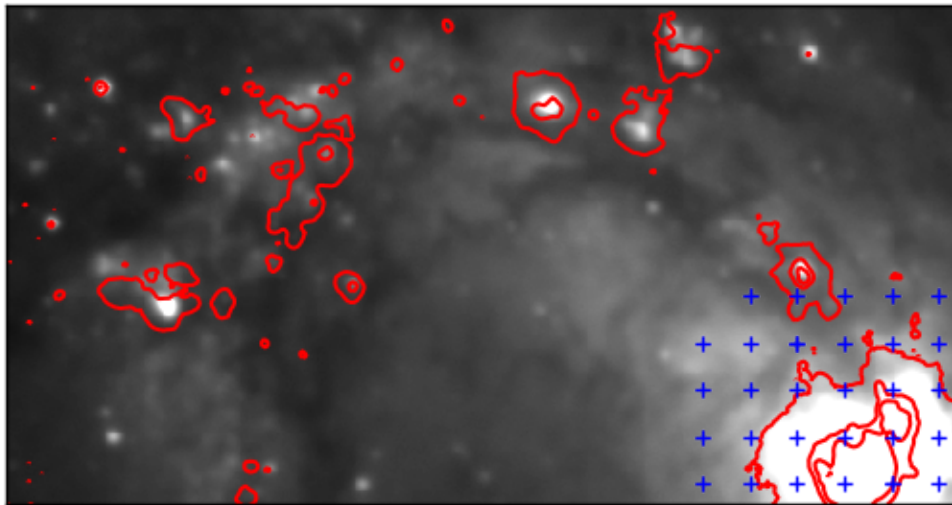
- 領域毎での[CI](1-0)/CO line ratioの変化
- Line ratioを変化させる要因(環境・分子雲の性質など)の解明

近傍棒渦巻銀河 M83

- CO archival data

- $^{12}\text{CO}(1-0)$: NRO45m (CO Atlas), Kuno+07
- $^{12}\text{CO}(3-2)$: ASTE, Muraoka+09

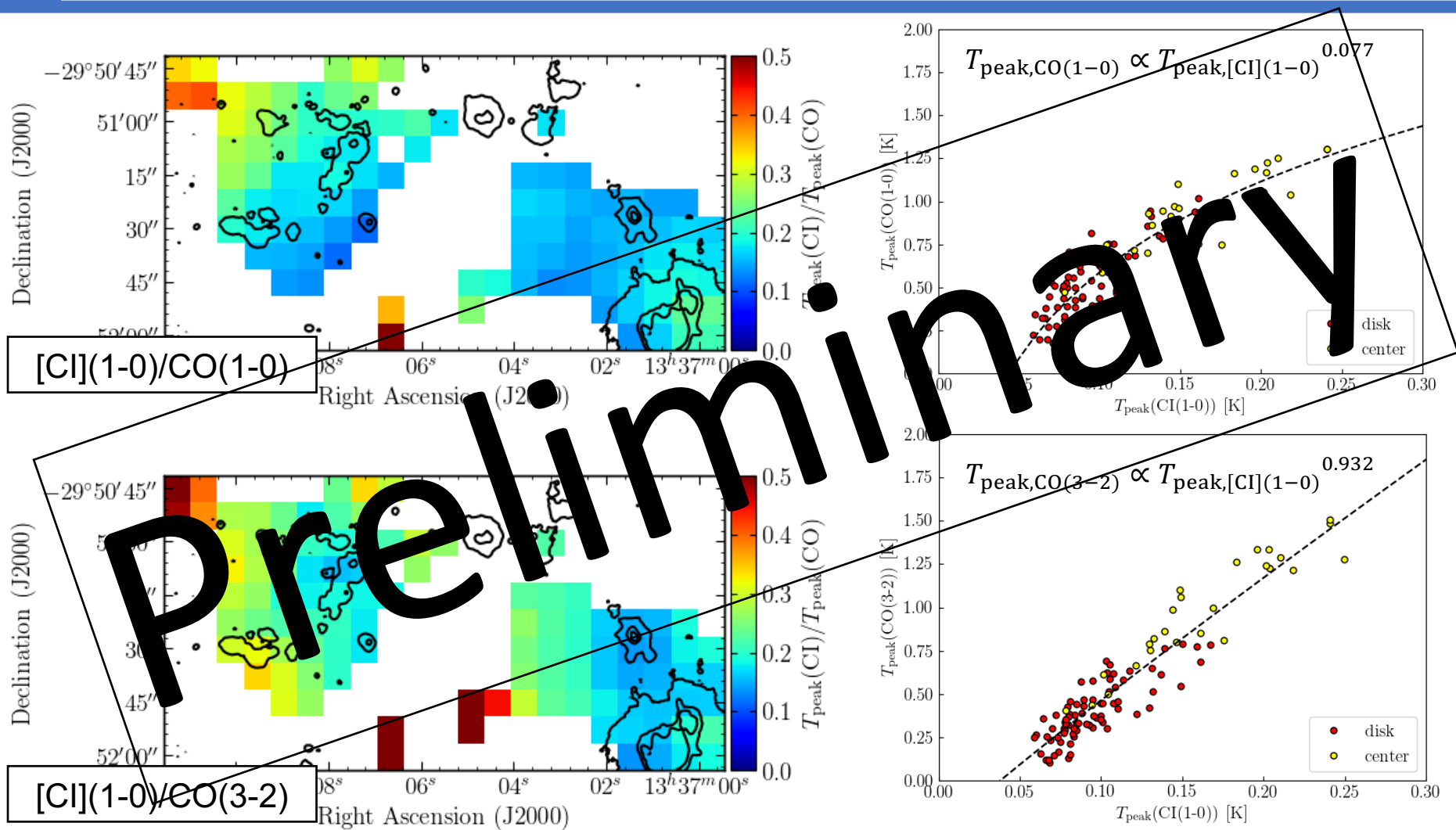
- 領域区分



V-band image (gray) & $\text{H}\alpha$ intensity (red contour)

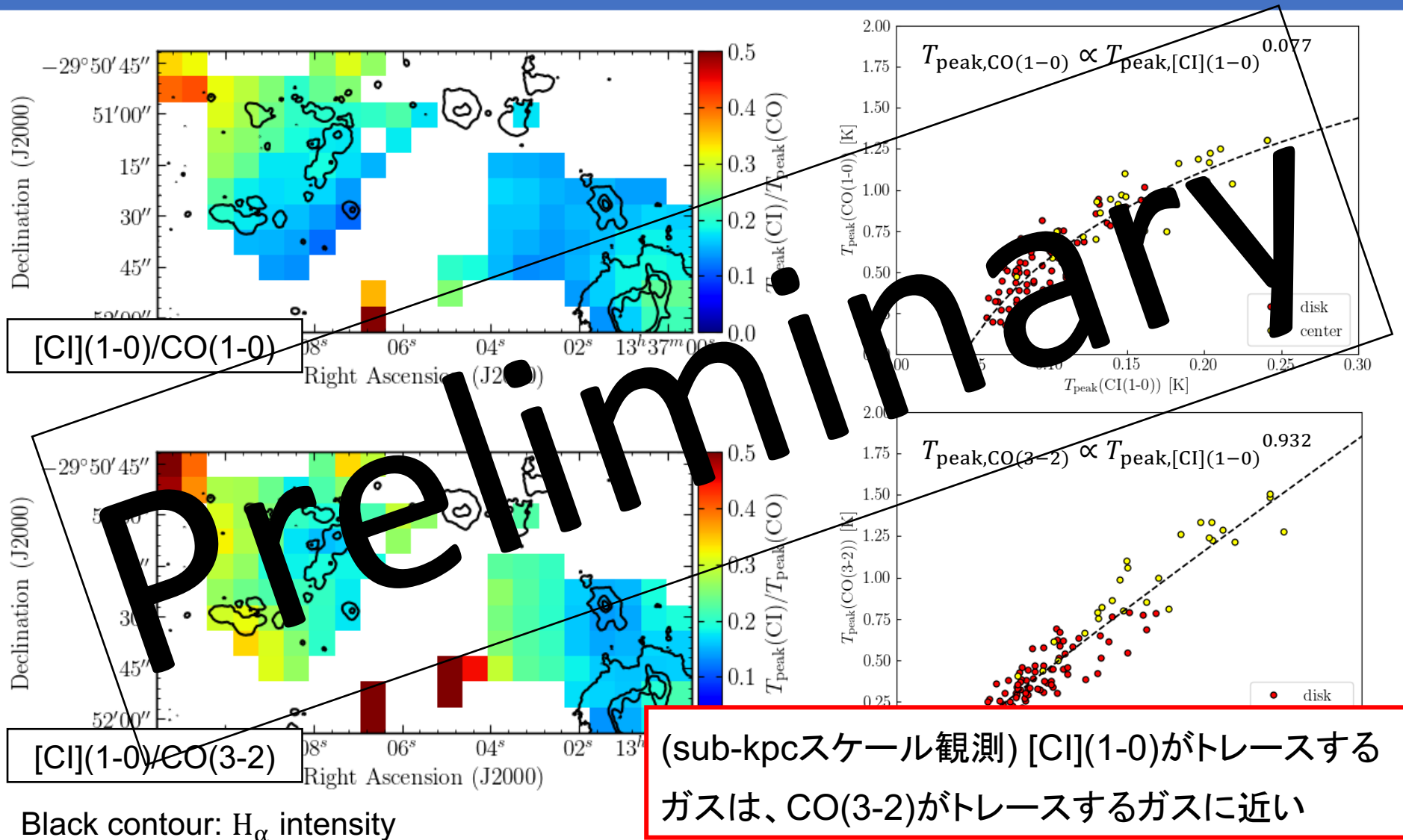
- ピクセルごとに[CI](1-0)/CO line ratio(積分強度・ピーク温度、 3σ 以上)を測定
- 銀河中心(center)と円盤(disk)領域での[CI](1-0)/CO line ratioの変化を議論
- 青点 : center 青点以外 : disk

結果 - [CI](1-0) – COピーク温度

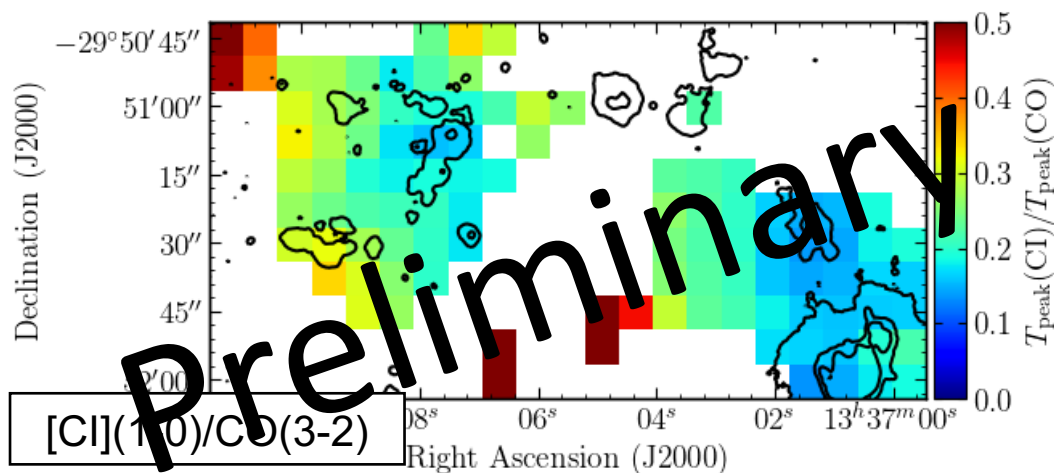
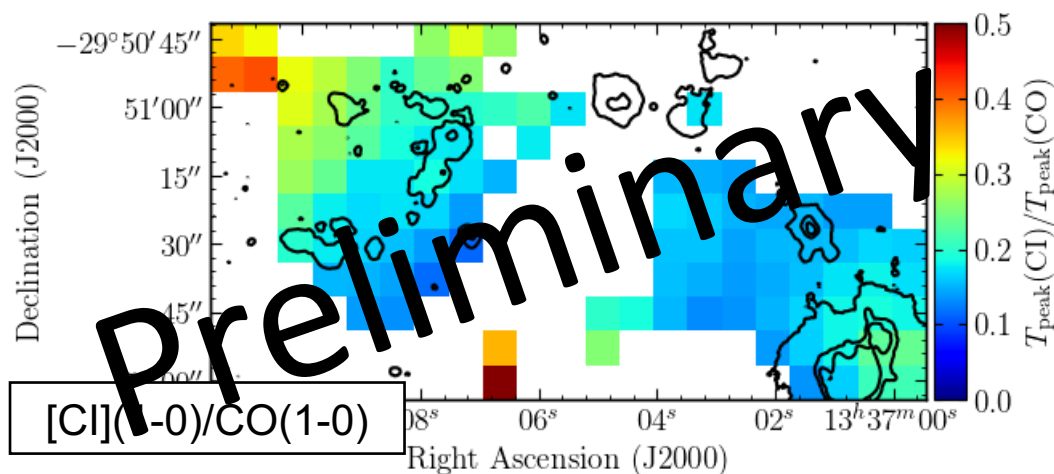


Black contour: H_{α} intensity

結果 - [CI](1-0) – COピーク温度



議論 - [CI](1-0) – COピーク温度分布



Black contour: H_α intensity

- [CI](1-0) vs CO(1-0)
以下の領域で比が増加傾向
(1) Armの上流 → 下流
(2) Bar → 銀河中心
- [CI](1-0) vs CO(3-2)
 H_α peak付近で比が減少傾向



- ガスの性質(ガス温度・密度・CI/CO存在比)
 - 環境(輻射場強度)
- との関連は？

[CI]/CO強度比とガスの物理状態

- RADEX for non-LTE analysis (van der Tak+07)
 - [CI]/CO強度比を増減させるガス密度・温度・CI/CO存在比の条件を推定
 - CI/CO存在比 = CI柱密度 N_{CI} / CO柱密度 N_{CO}
→ 観測結果から制限
 - CI柱密度 N_{CI} : CI励起温度 T_{ex} に依存
 - CI励起温度 $T_{\text{ex}} = \frac{38.8}{\ln\left(\frac{2.11}{R}\right)}$ with $R \equiv \frac{\int T_{\text{mb}}([\text{CI}](2-1))dv}{\int T_{\text{mb}}([\text{CI}](1-0))dv}$
- T_{ex} 測定には[CI](2-1)輝線観測(= 809 GHz) も必要

まとめ

- 中性炭素原子輝線[CI](3P_1 - 3P_0): $\nu_{\text{rest}} = 492.161 \text{ GHz}$), [CI](3P_2 - 3P_1): $\nu_{\text{rest}} = 809.344 \text{ GHz}$ はCO光解離が活発な領域(low metallicity, high FUV・cosmic ray rate)で、COに代わるH₂トレーサーとして期待。
- これまでの近傍銀河[CI]輝線観測: 銀河中心、Herschelによる> kpc scale観測
→銀河構造が分解可能なスケール(sub-kpc)以下での広域[CI]輝線観測が不足
- ASTEによる近傍棒渦巻銀河M83の[CI](1-0)輝線観測(~0.4kpc)
 - [CI](1-0)がトレースするガスは、CO(3-2)がトレースするガスに近い
 - ピーク温度比分布 [CI](1-0) vs. CO(1-0): (1) arm領域 (2) bar ~ center領域 で勾配
[CI](1-0) vs. CO(3-2) : H α peak付近で減少傾向
 - [CI]/CO強度比とガスの性質との相関をより正確に議論するなら、[CI](2-1)輝線も必要