

# 南極30m級テラヘルツ望遠鏡 で探る近傍銀河 (ライン観測)

久野成夫(筑波大学)

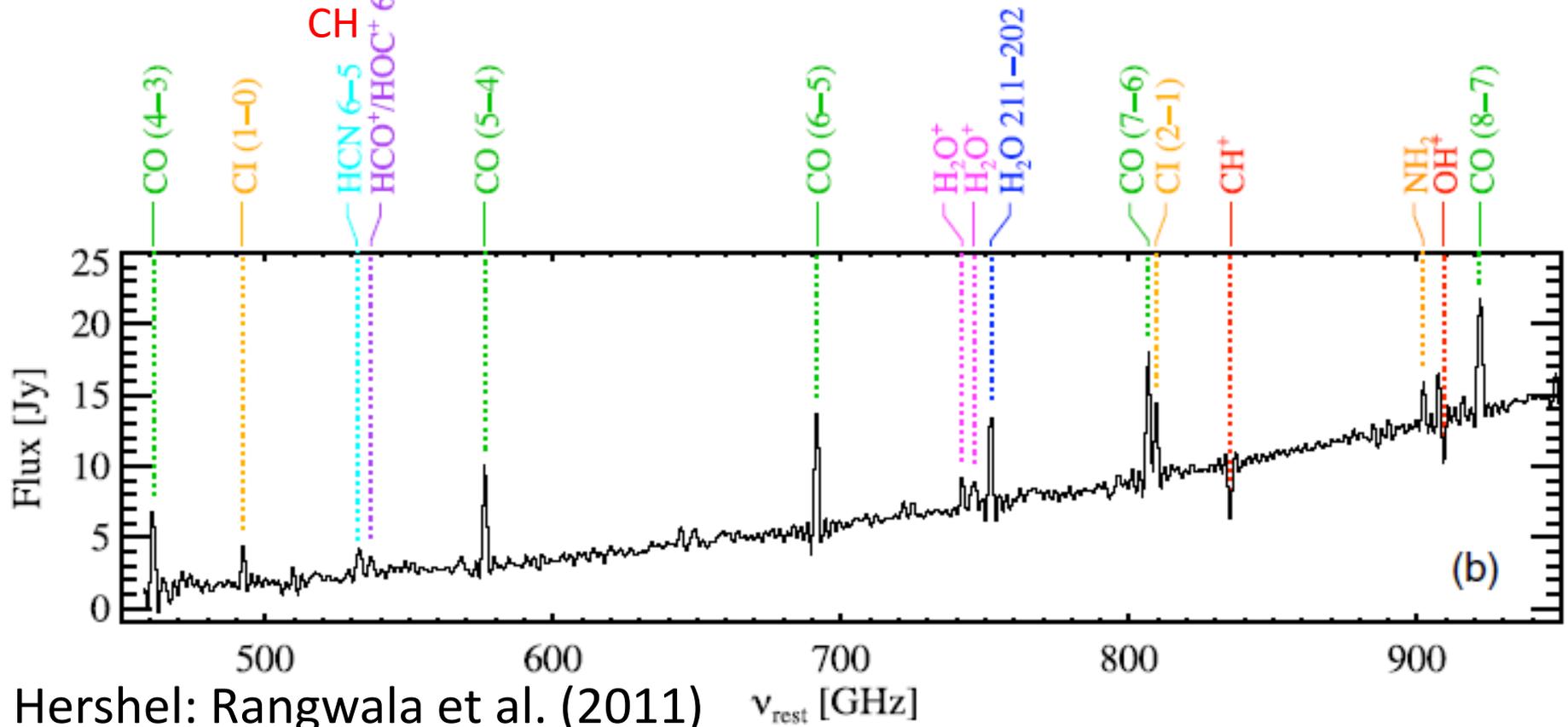
高野秀路(日本大学)

# 近傍銀河のSubmm-THz帯でどの輝線・吸収線が受かるか？

## Arp220

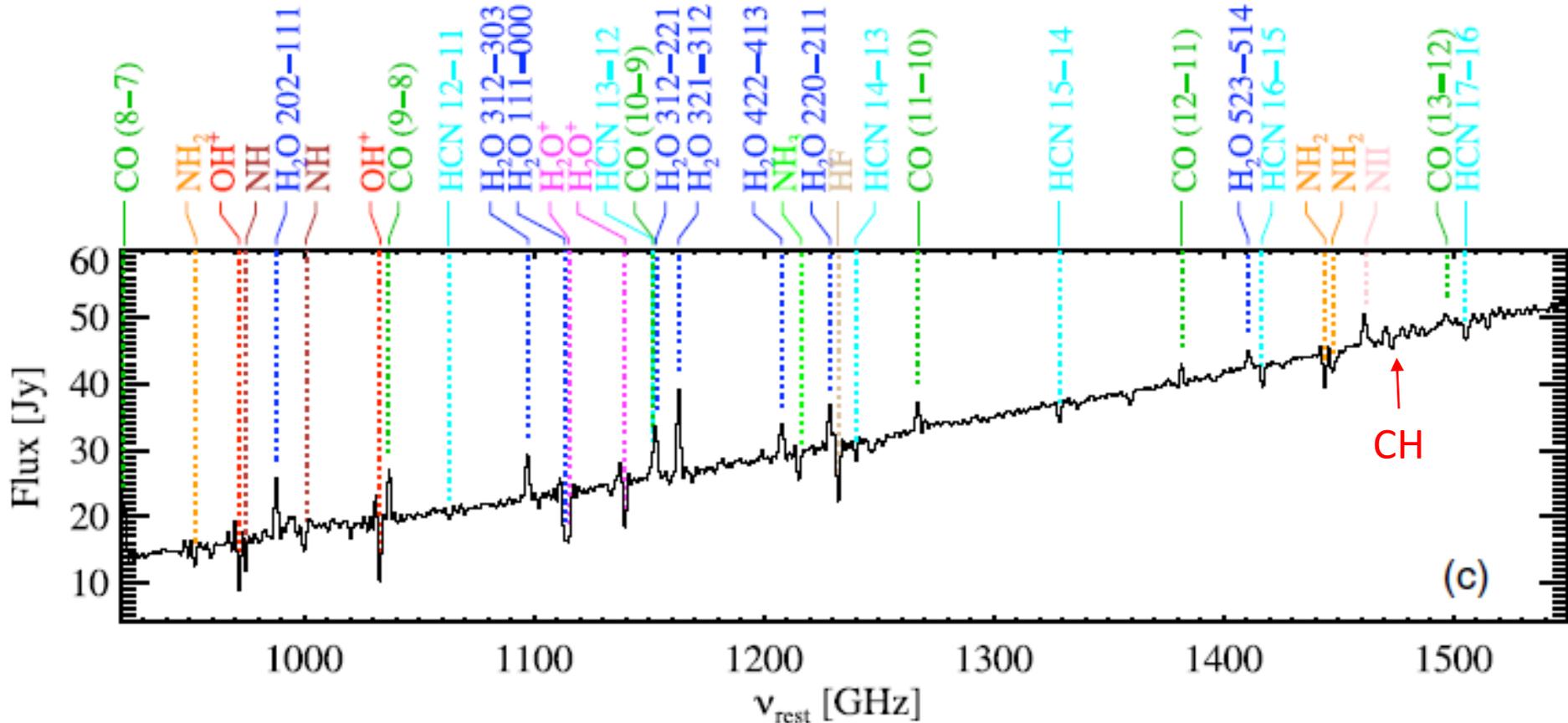
- 最近傍のULIRG(Ultra Luminous IR Galaxy)  $L_{\text{FIR}} \sim 10^{12} L_{\odot}$
- $D=77\text{Mpc}$  ( $z \sim 0.0181$ )
- $M_{\text{H}_2} \sim 10^{10} M_{\odot}$

CO, [CI], H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O, OH<sup>+</sup>, CH



Herschel: Rangwala et al. (2011)  $\nu_{\text{rest}}$  [GHz]

- CO, CI, NII, CH, OH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, ArH<sup>+</sup>, HF, (H<sub>2</sub>O)



Herschel: Rangwala et al. (2011)

- マッピング可能なライン

- CO, C<sup>18</sup>O, N<sub>2</sub>

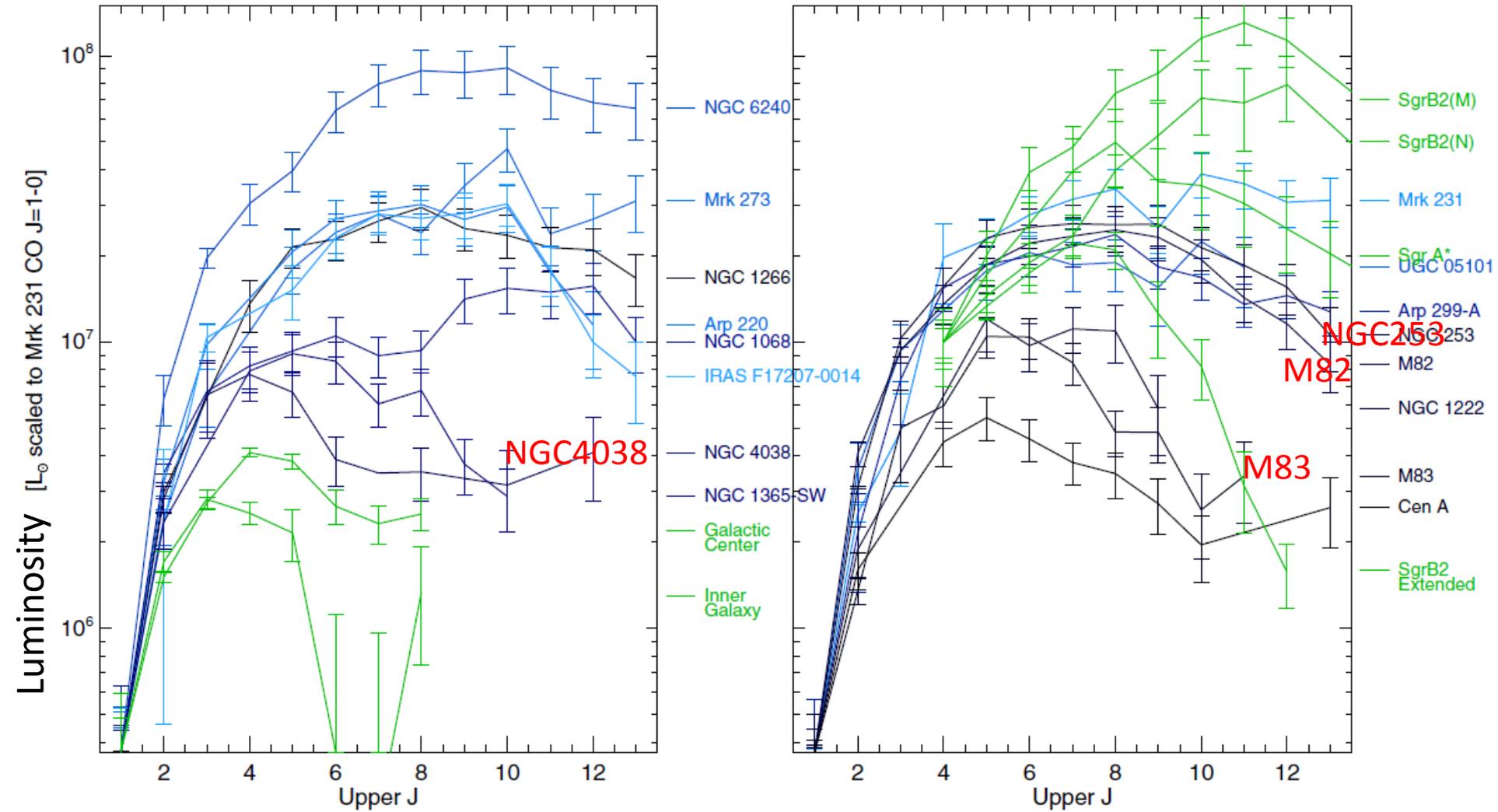
- 分子ガスの物理状態の分布

- ALMAで苦しい周波数

- CH, OH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, ArH<sup>+</sup>, HF

# CO Spectral Line Energy Distributions (J=1-0) $\rightarrow$ (J=13-12)(1497GHz)

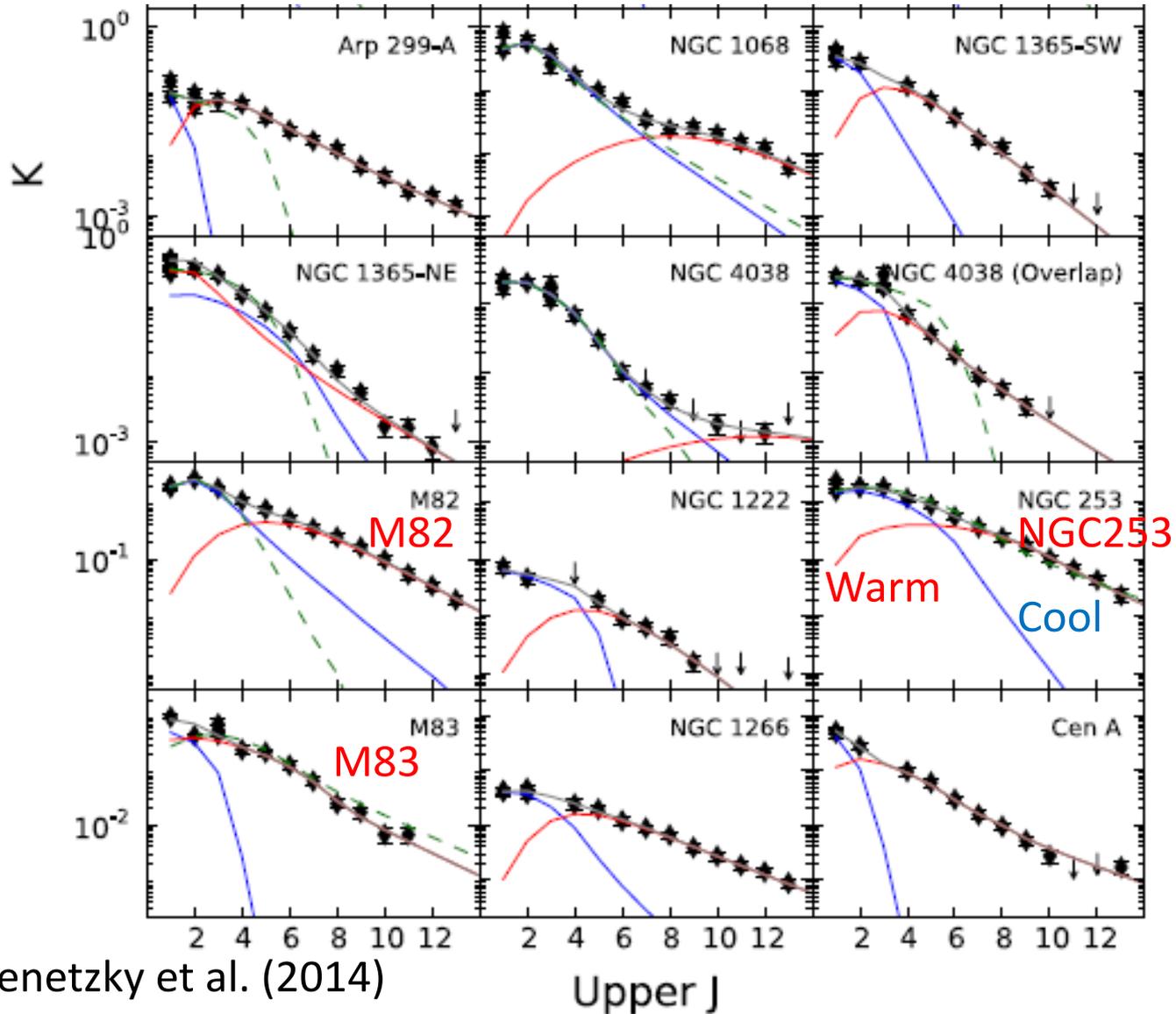
近傍銀河17個



Herschel: Kamenetzky et al. (2014)

# • 2成分でフィット (RADEX)

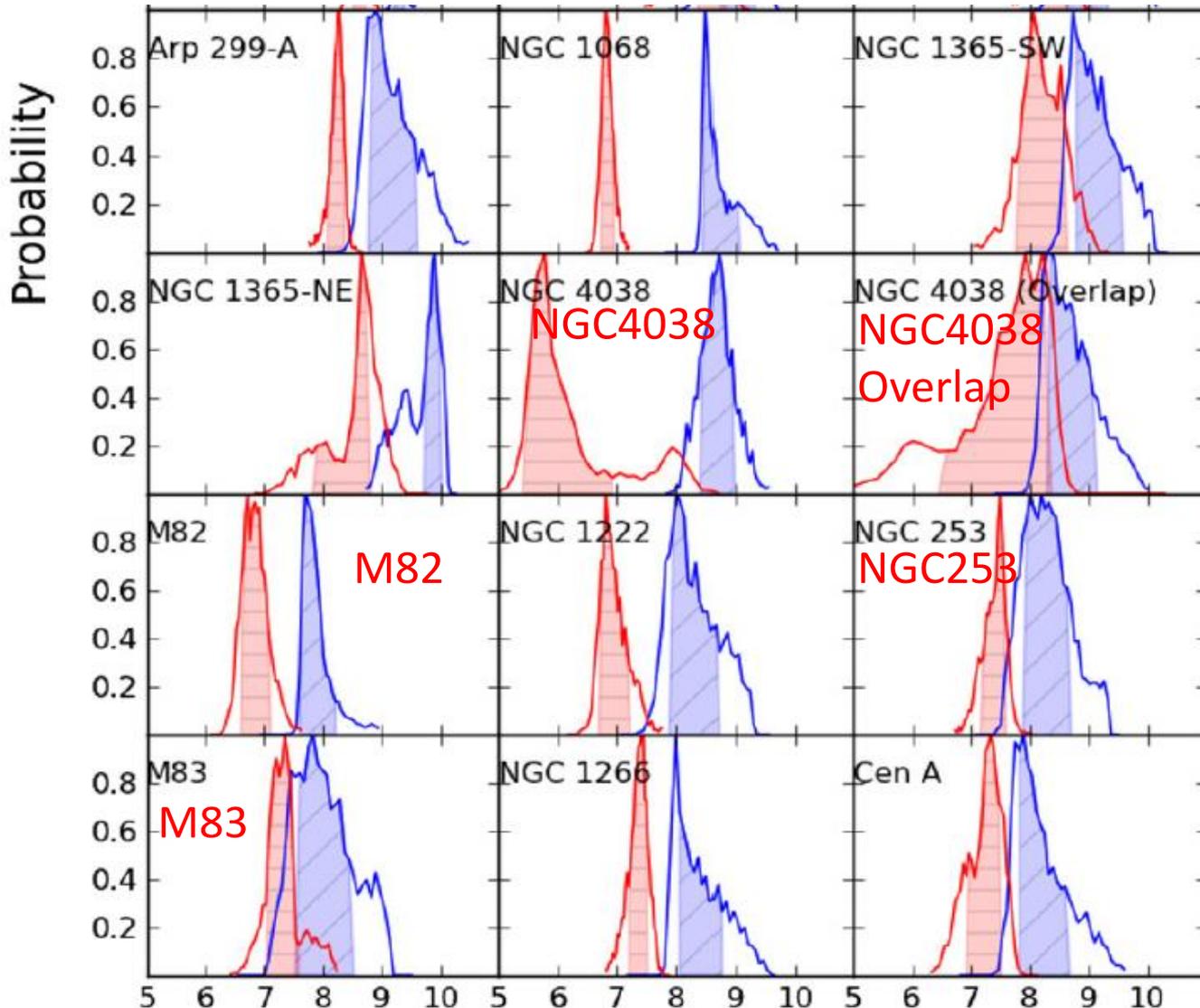
- Cool & Warm 成分 ( $n$ ,  $T_k$ ,  $N_{CO}$ ,  $\varphi$ )



Kamenetzky et al. (2014)

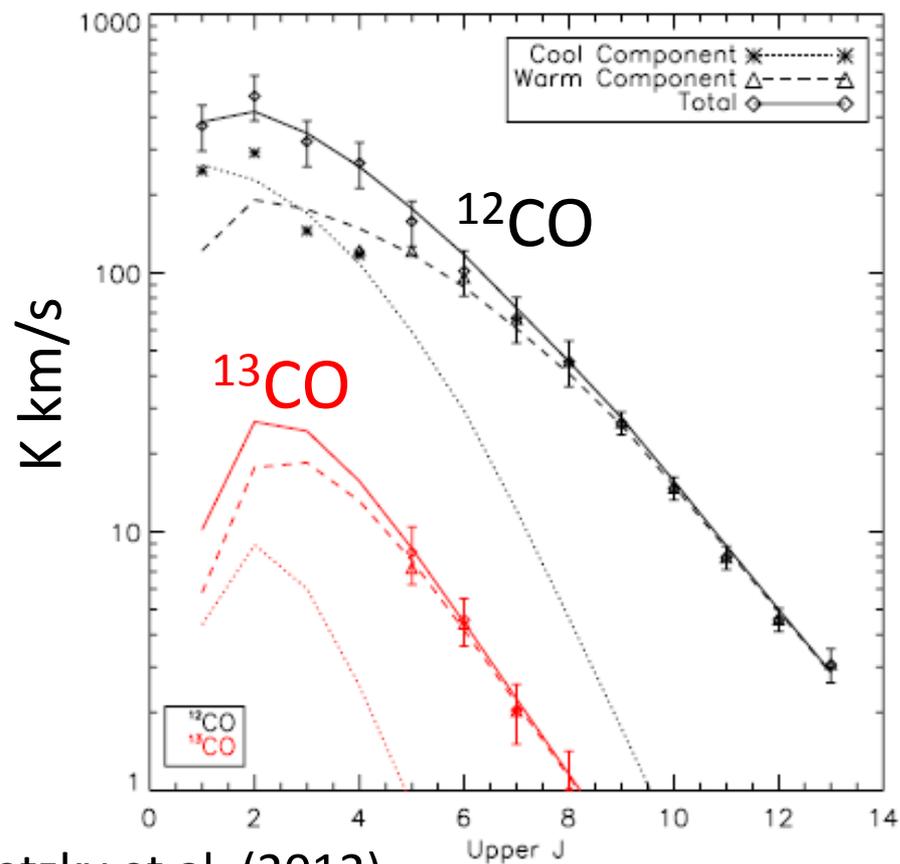
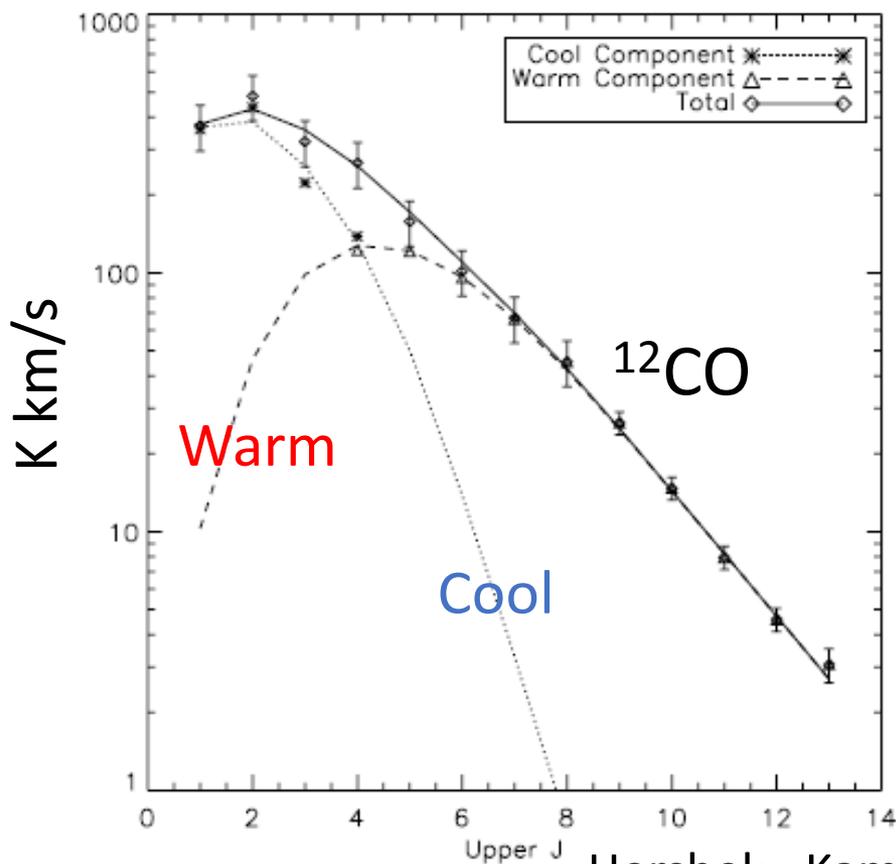
# • Cool & Warm成分ごとの質量

- より正確な分子ガス質量 (スターバースト銀河での  $X_{CO} \propto v_n/T$  の不定性)
- 分子ガスの物理状態の比較 (星形成の規模との関係)



# M82: スターバースト銀河 (残念ながら南極からは観測できない)

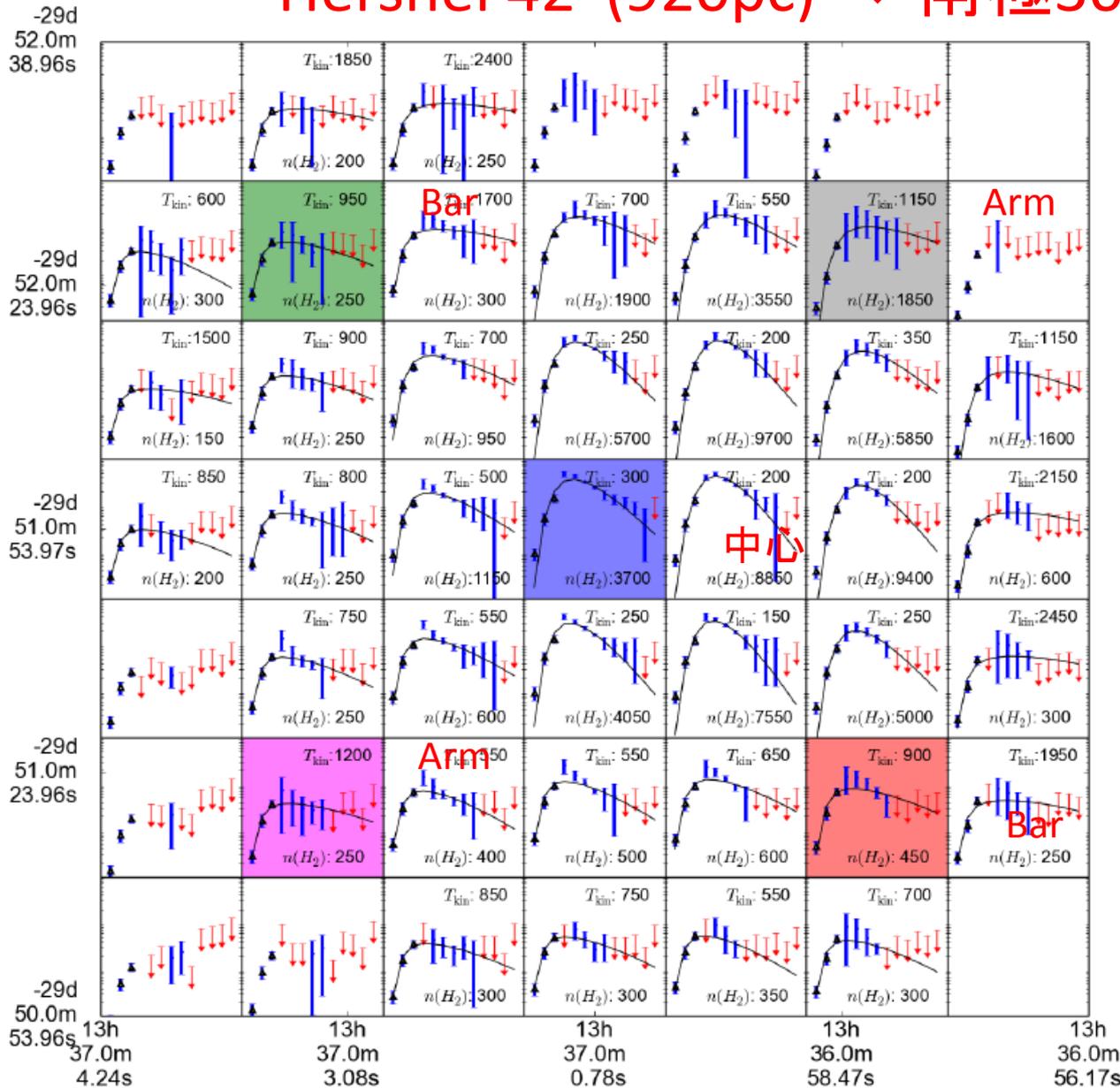
- $^{12}\text{CO} + ^{13}\text{CO} \rightarrow$  高精度化
- $\text{CO}(J=13-12) \sim 10\text{mK}$ 
  - 南極30m:  $dV=20\text{km/s}$  積分時間 $\sim 10$ 時間 ( $5\sigma$ )
  - ビームフィリングファクターが上がる  $\Rightarrow$  マッピング可能? (マルチビーム)



Herschel: Kamenetzky et al. (2012)

# • M83 SLEDs map (体積密度分布)

Herschel 42" (920pc)  $\Rightarrow$  南極30m  $\sim$  5" (110pc)



• GMCスケールで温度、体積密度の比較

•  $SFR \propto \Sigma^n \Rightarrow SFR \propto \rho^n$

Wu et al. (2015)

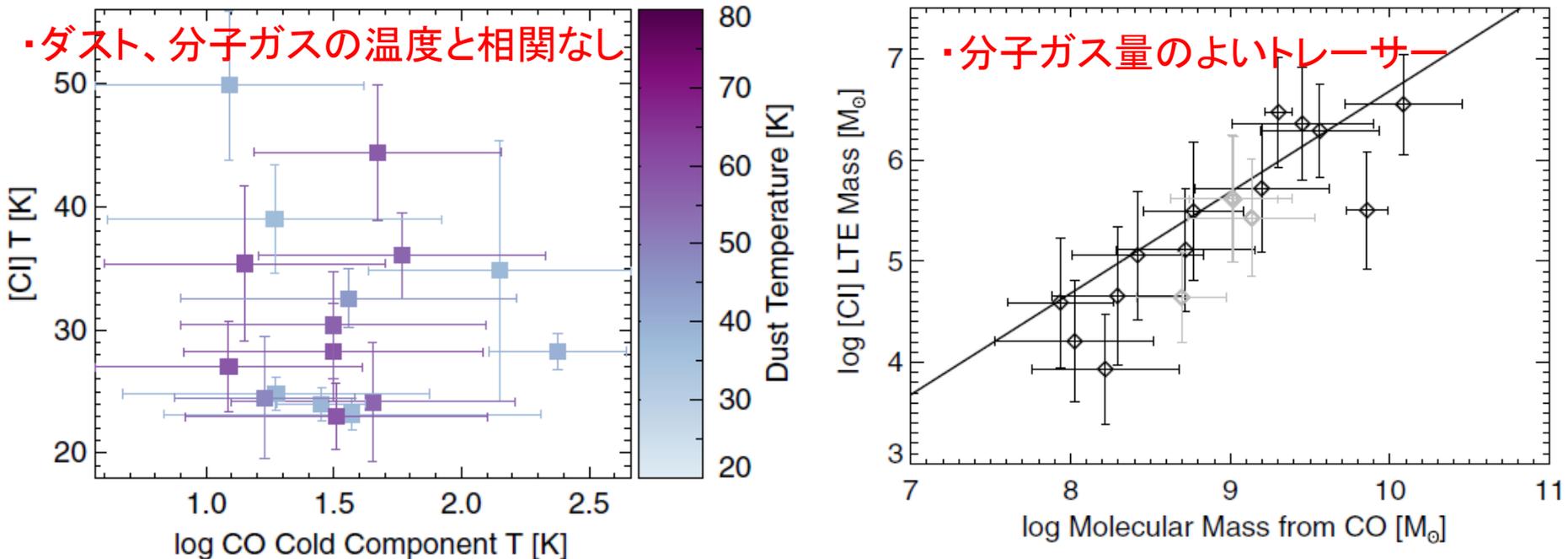
# [CI](1-0)(492GHz)&(2-1)(809GHz)

- 南極:[CI]2輝線観測可能(492GHz, 809GHz)

$$\text{励起温度: } T_{\text{ex}} = E_{2-1} \left[ \ln \left( \frac{g_2 A_{2-1} S_{1-0}}{g_1 A_{1-0} S_{2-1}} \right) \right]^{-1}$$

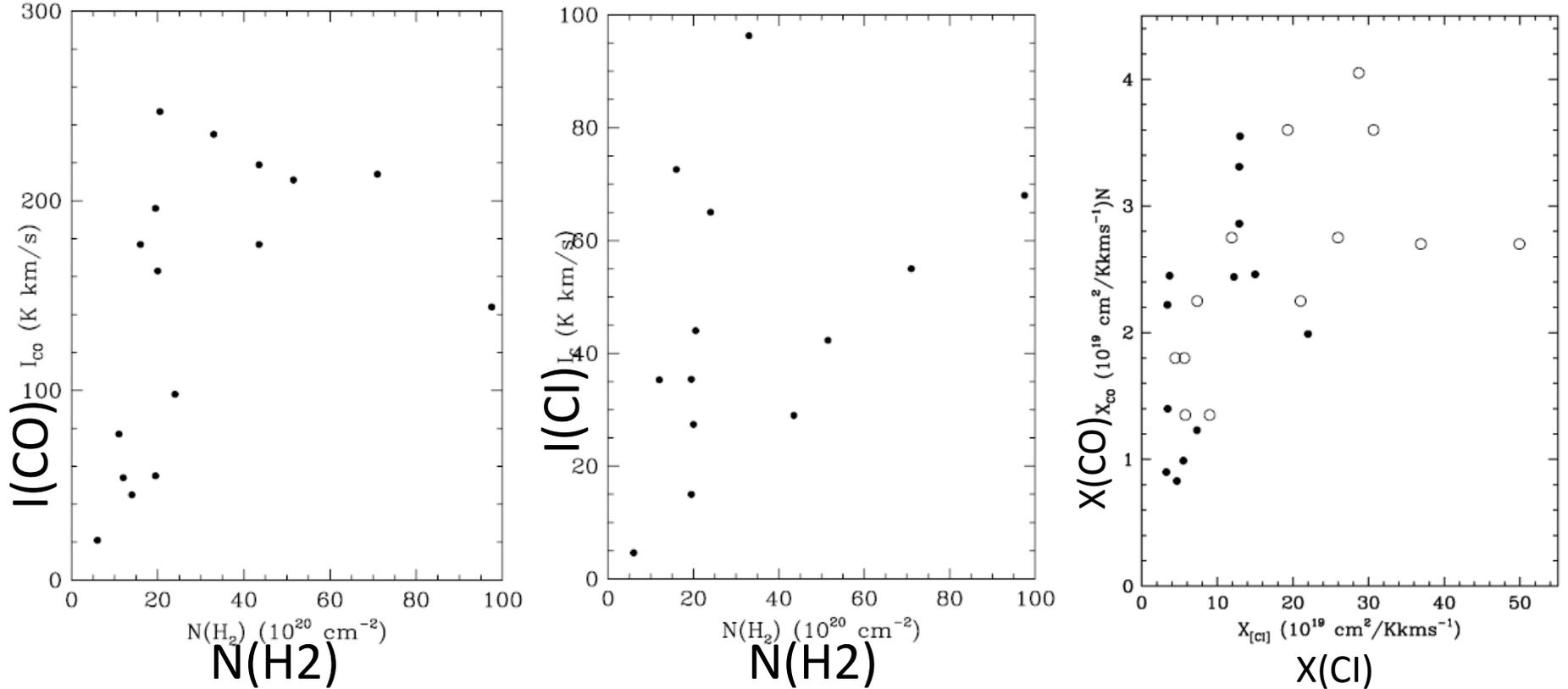
A: アインシュタインA係数  
g: 統計的重み  
E: エネルギー差

## 近傍銀河17個 (Herschel)



Herschel: Kamenetzky et al. (2014)

# (U)LIRG & starburst

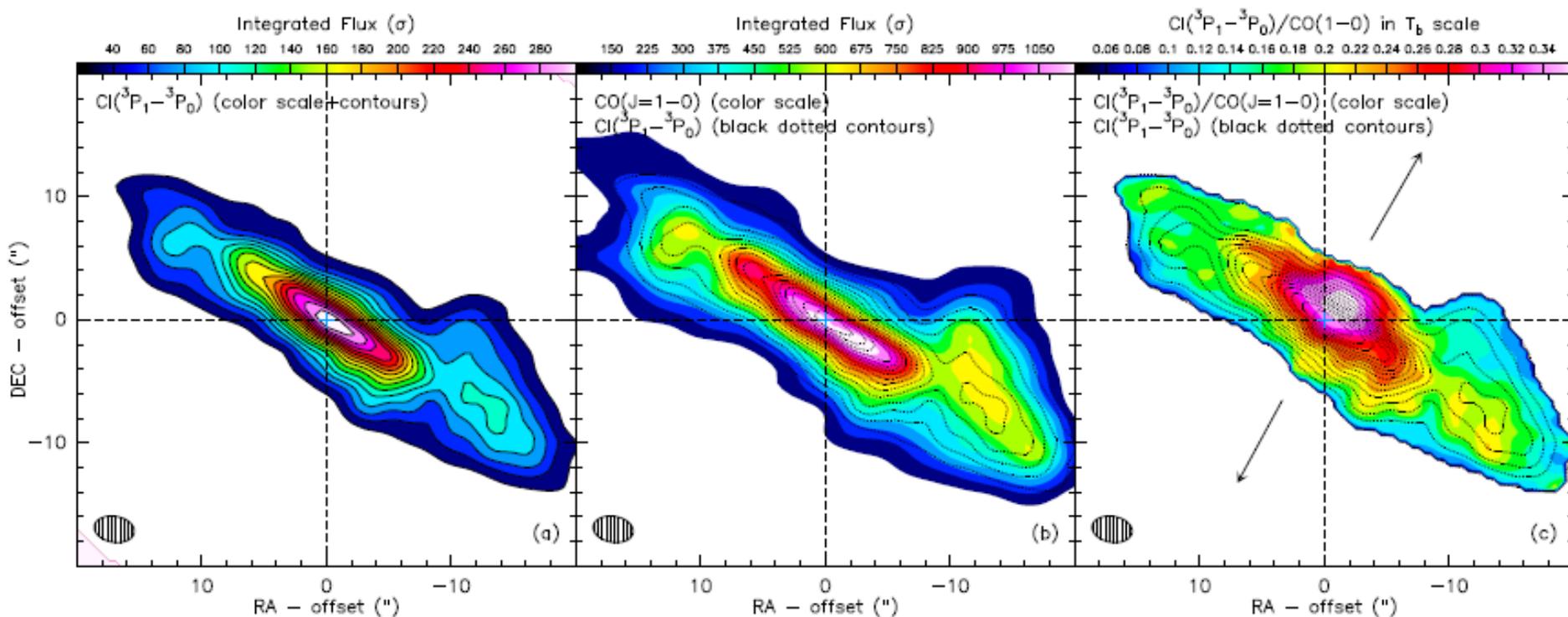


Herschel: Israel et al. (2015)

- 比較的高密度ガスをトレース  $n(\text{H}_2) \geq 10^4 \text{ cm}^{-3}$
- 1輝線ではCOよりよくない？

- Cl: 分子ガスのよいトレーサー？
  - 高密度ガス領域、一部は光学的に厚い
  - High z で使えるか？

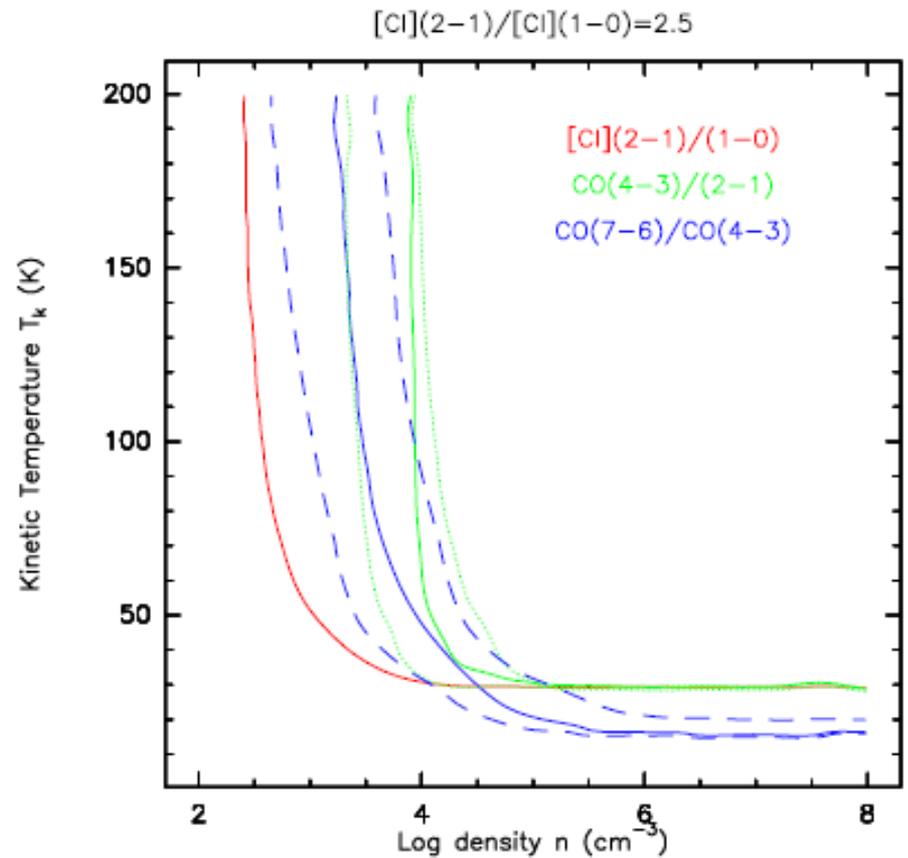
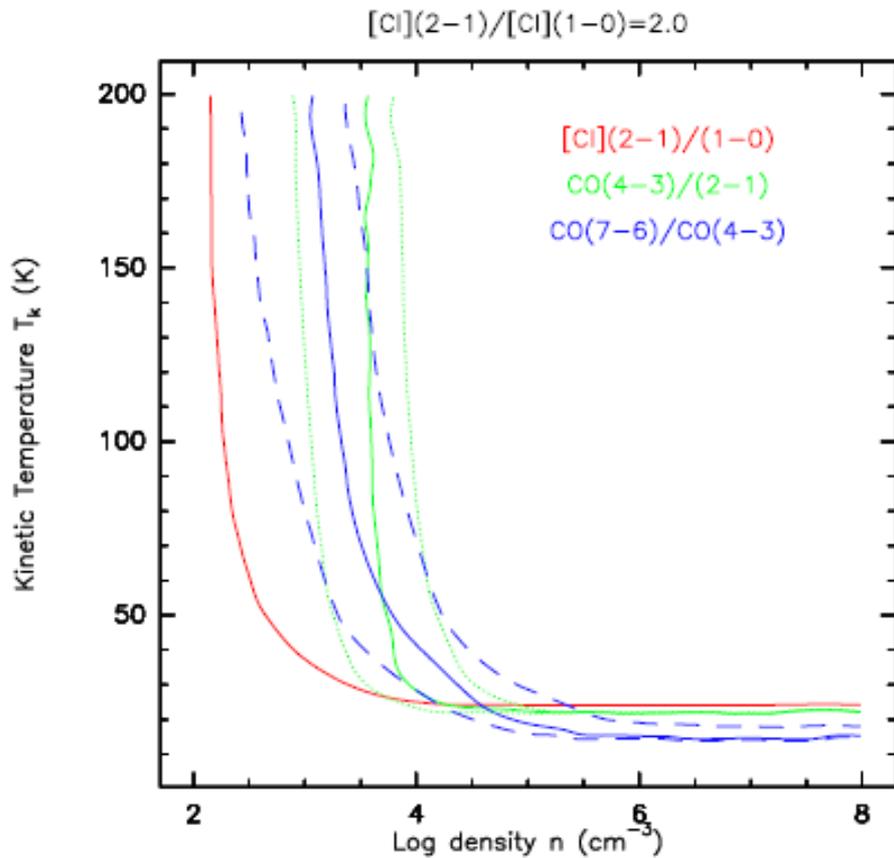
## NGC253



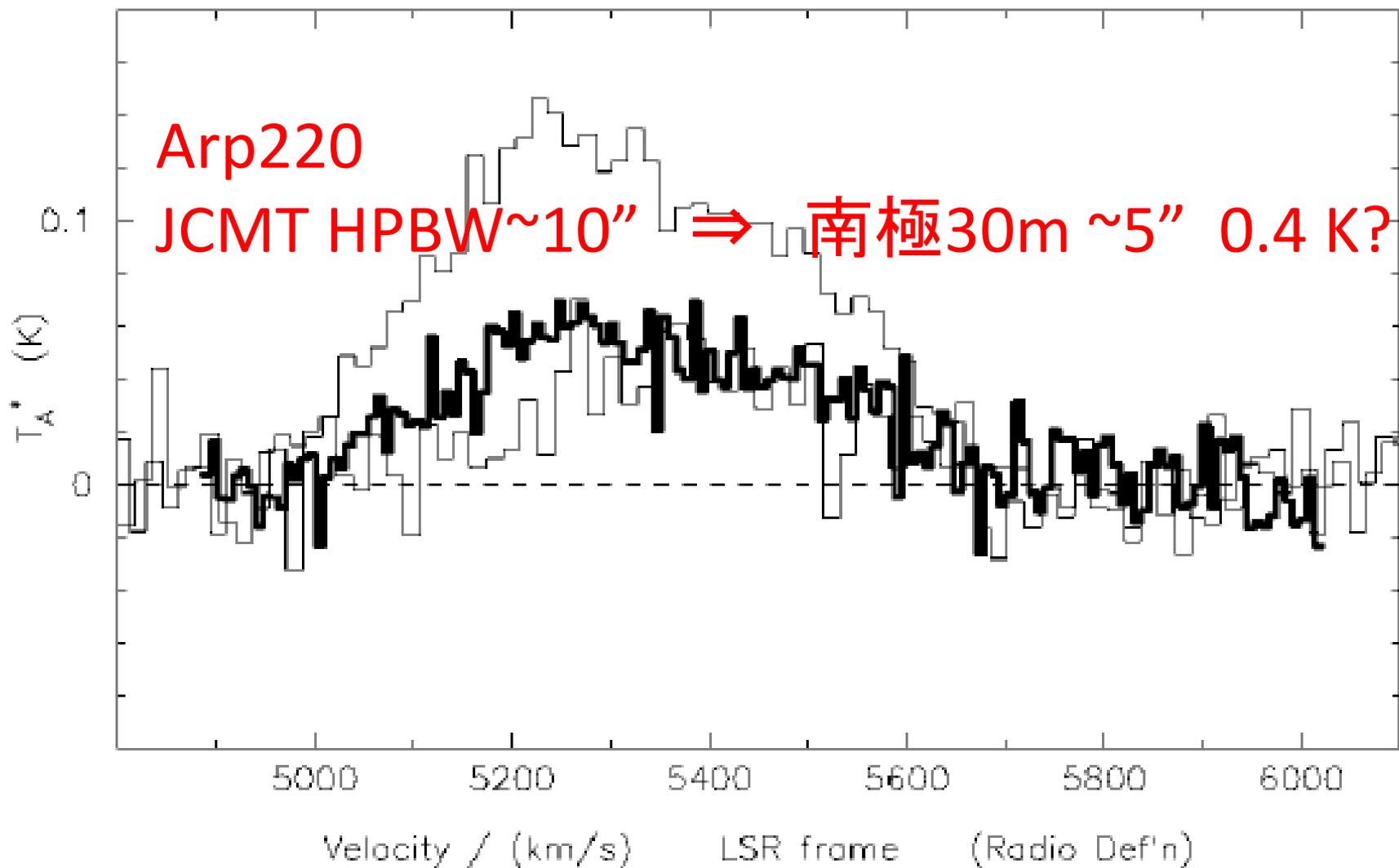
ALMA HPBW $\sim 3''$

Krips et al. (2016)

•  $\text{Cl} + \text{CO} \Rightarrow$  分子ガスの物理状態



LVG model: Israel et al. (2015)

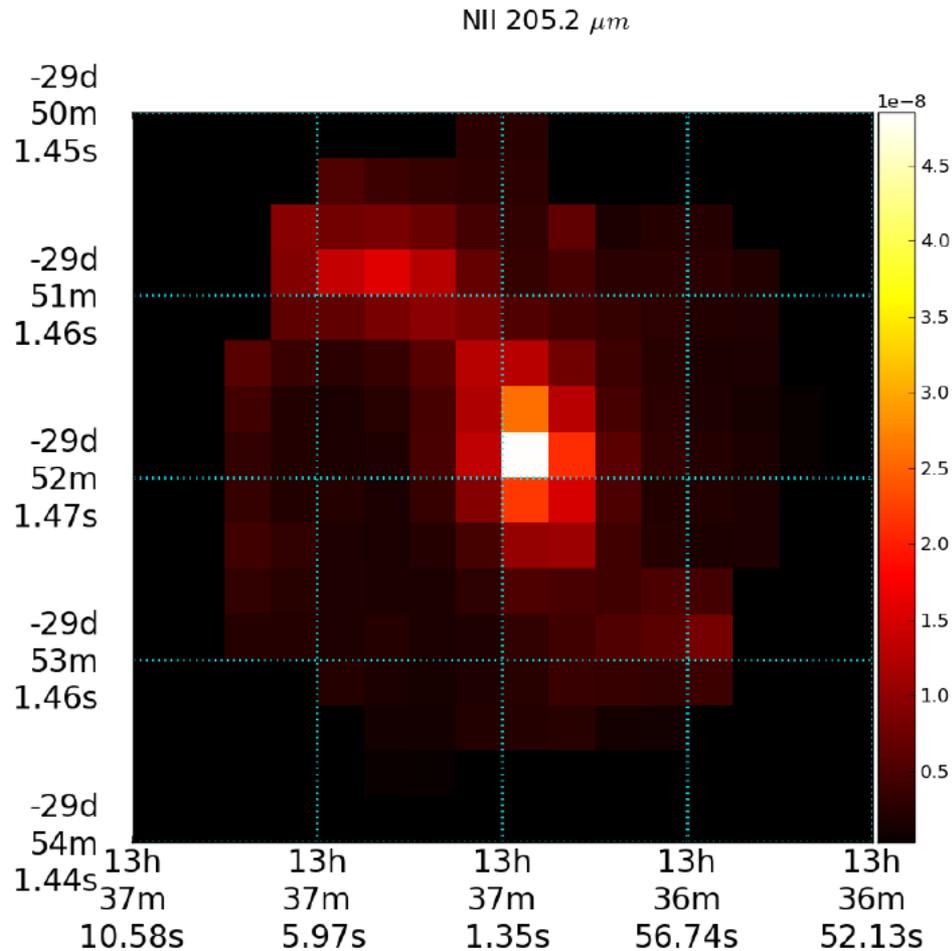
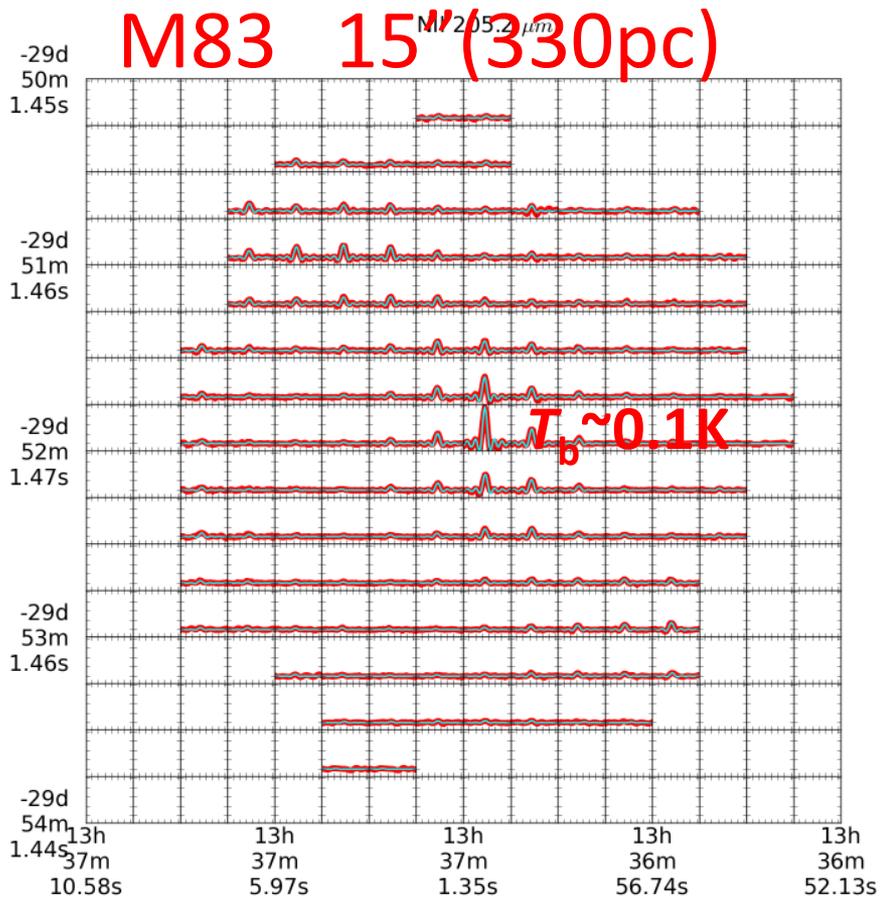


JCMT: Papadopoulos et al. (2004)

# NII(1461GHz)

## • 星形成率のトレーサー

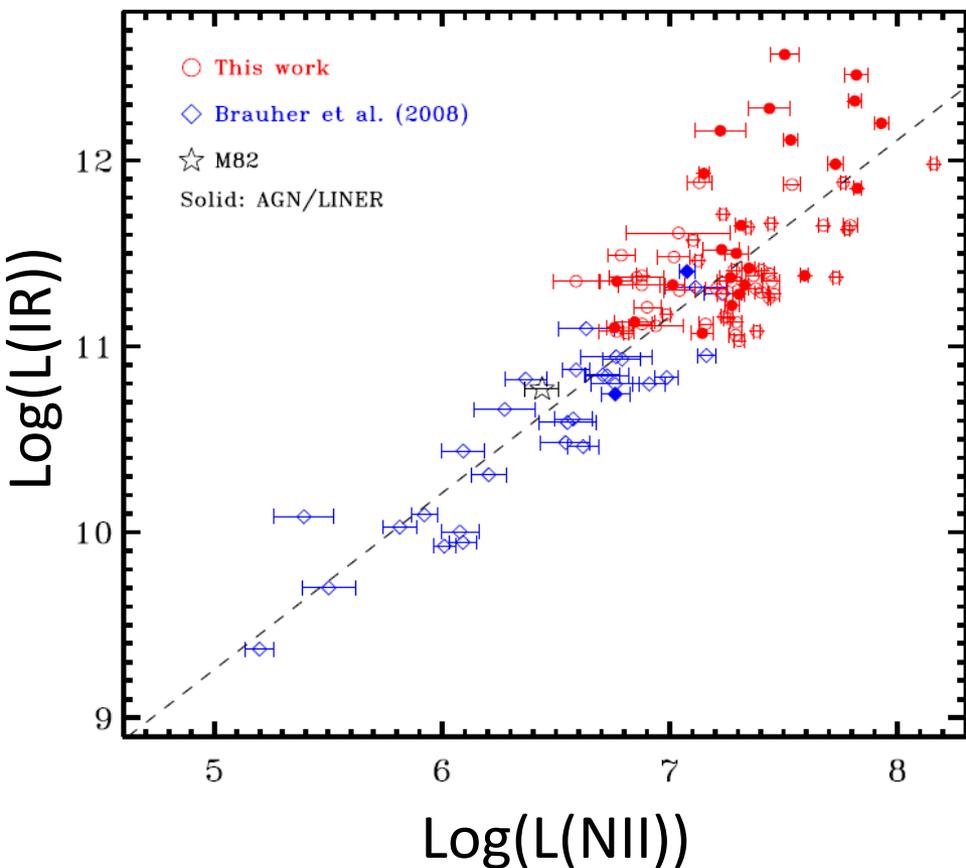
- 希薄な電離ガス: 臨界密度  $\sim 50\text{cm}^{-3}$



Herschel: Wu et al. (2015)

# ULIRG

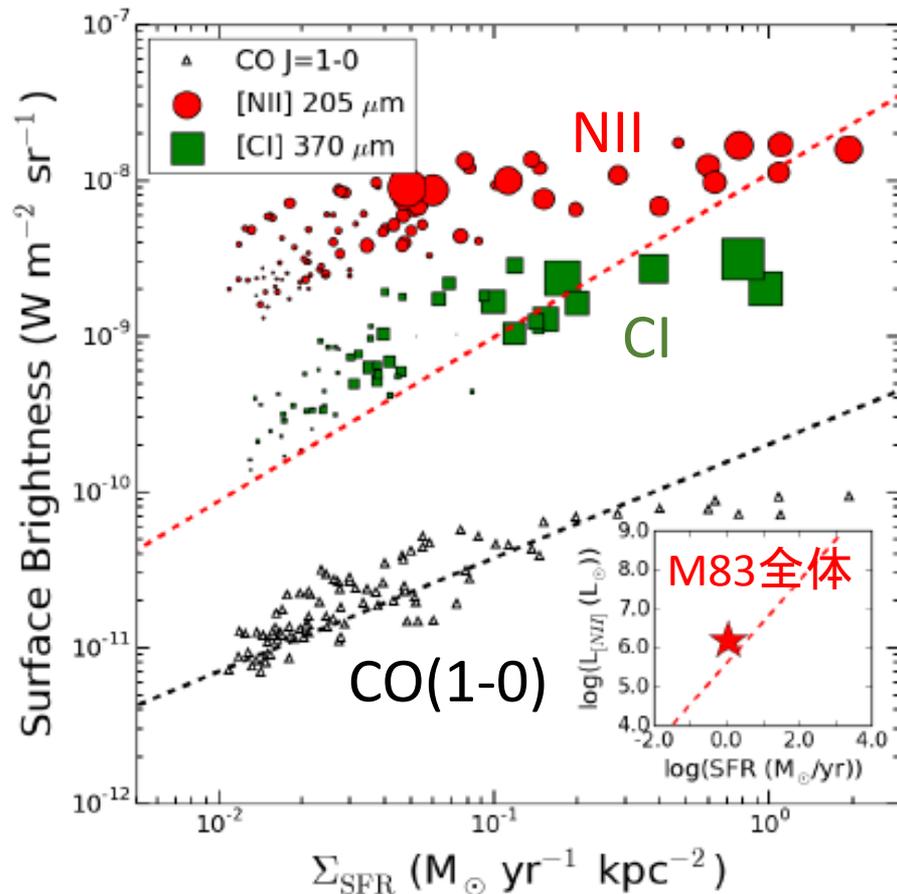
- 銀河全体:  $SFR \propto L(\text{NII})$



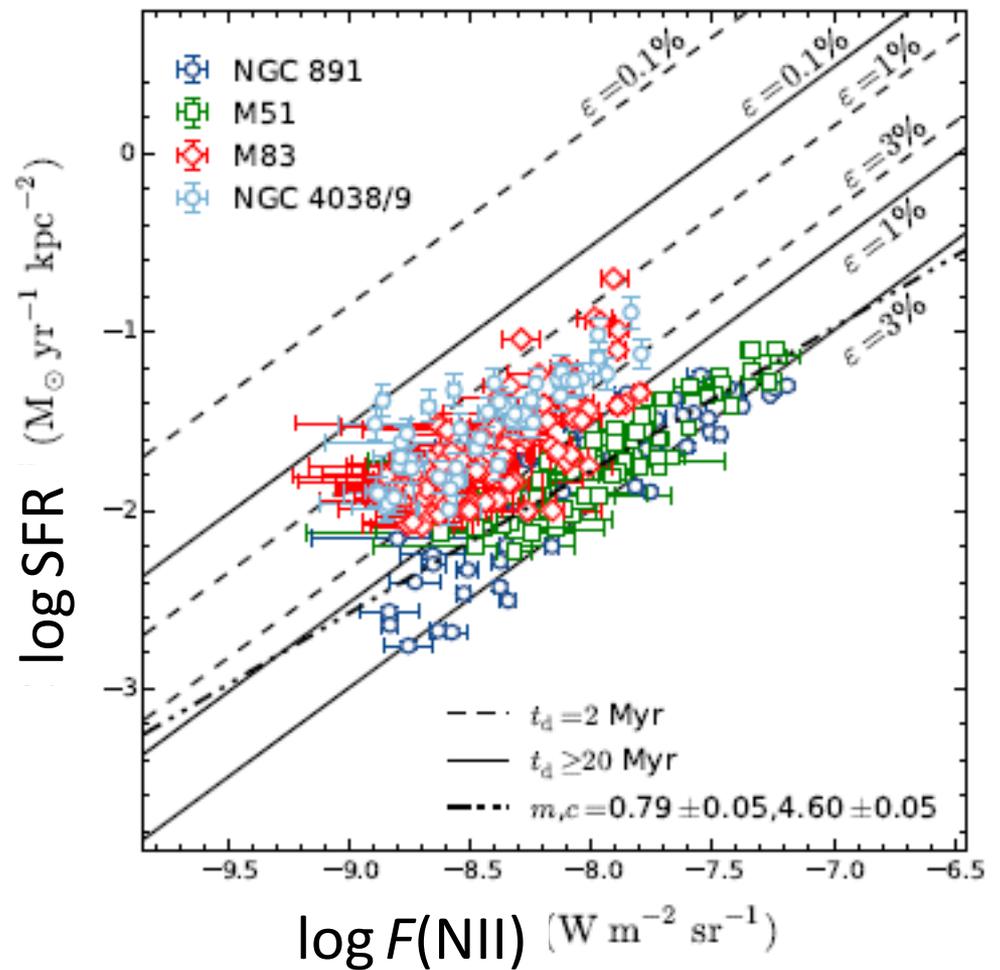
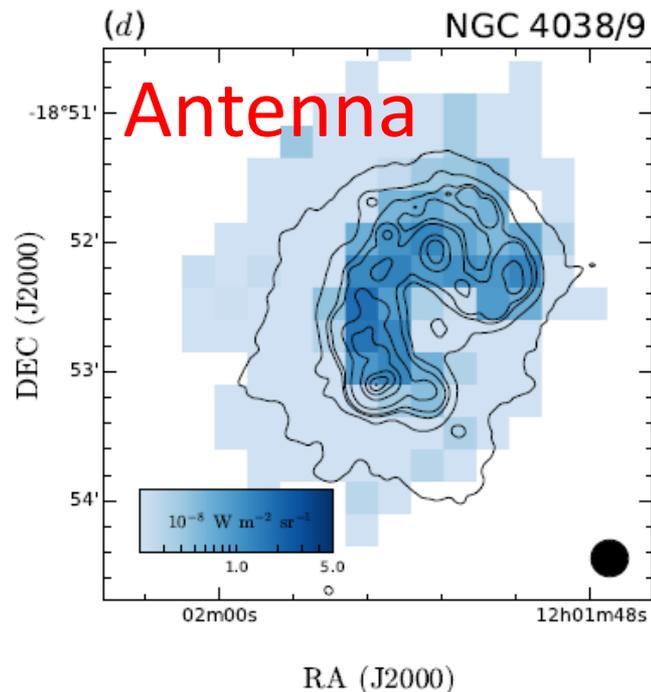
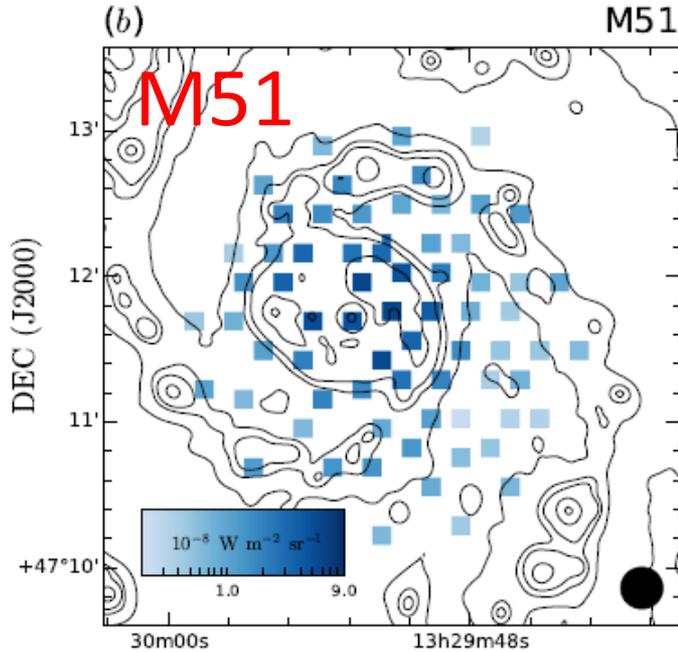
Herschel: Zhao et al. (2013)

# M83

- NIIは頭打ち



Herschel: Wu et al. (2015)

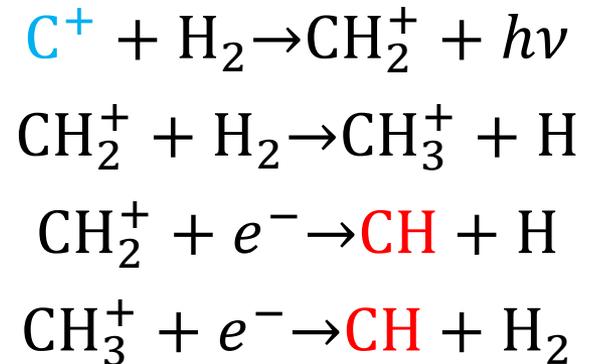
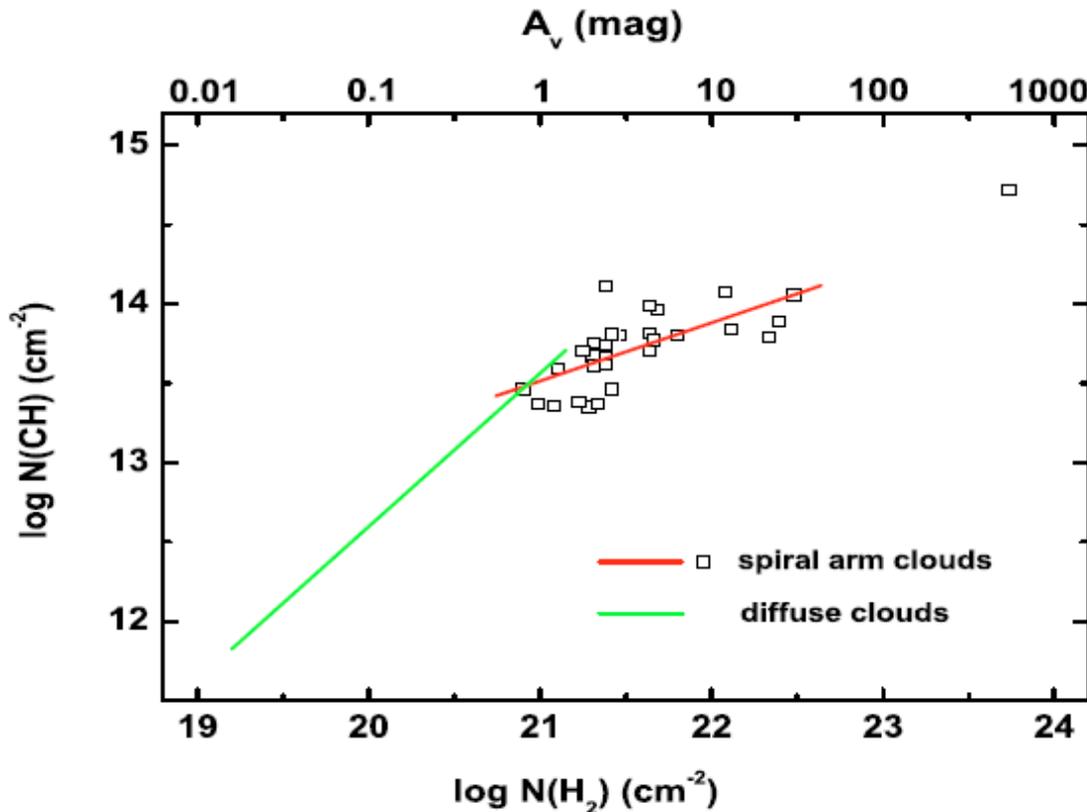


• SFR vs.  $F(\text{NII})$

- 良い相間
- 星形成の活発度による違い？
- 強い星形成  $\Rightarrow$  NIIの放射率が下がる

# CH(532/536GHz, 1471/1477GHz)

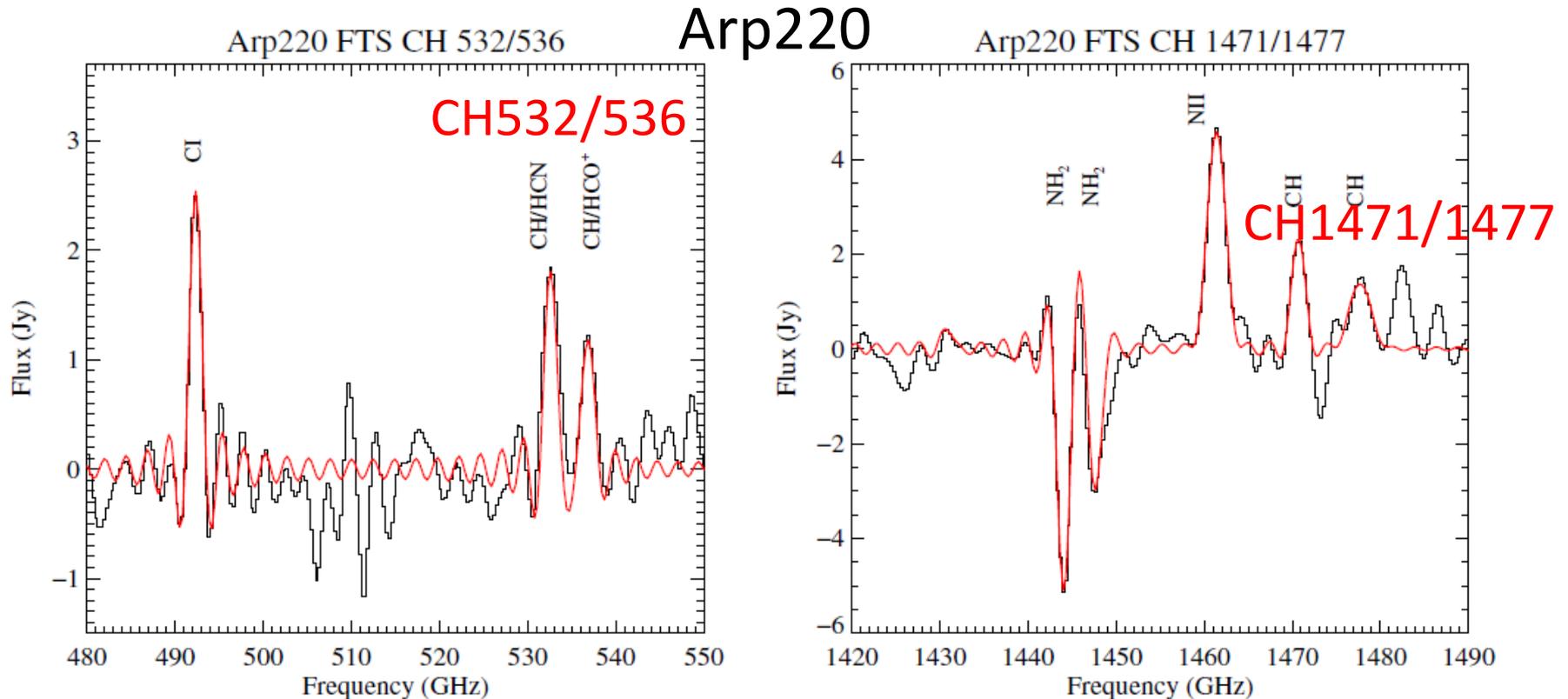
- 分子ガスのトレーサー: 希薄でUVが透過できるガス
  - 高密度領域では、 $C^+$ がなくなる  $\Rightarrow$  CHも形成されない



• 超微細構造線 ⇒ 光学の厚み

• 2輝線 ⇒ 励起温度

e.g., Arp220:  $T_{\text{ex}} = 41 \pm 10\text{K}$



$T_b \sim 4\text{mK}$  (Herschel) (点源なら:  $\sim 0.3\text{K}$  (南極30m))

Herschel: Rangwala et al. (2014)

どういった領域から放射されるか？

X[CH/CO]

• NGC1068(AGN) ≫ NGC253、M82(Starburst)

⇒AGNの指標？

Table 4  
H<sub>2</sub> Column Densities from CO and CH

Galaxy	$L_{\text{FIR}}$ ( $L_{\text{sun}}$ )	X[CH/CO] <sup>a</sup>	[N(H <sub>2</sub> )] <sub>CH</sub> <sup>b</sup> (cm <sup>-2</sup> )	[N(H <sub>2</sub> )] <sub>CO</sub> (cm <sup>-2</sup> )	References <sup>c</sup>
Arp 220	$1.8 \times 10^{12}$	$4.5 \times 10^{-5}$	$(4.0 - 7.1) \times 10^{23}$	$2.0_{-1.2}^{+0.0} \times 10^{24}$	Rangwala et al. (2011)
NGC 1068	$2 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{-4}$	$(1.8 - 3.2) \times 10^{22}$	$4.4_{-1.9}^{+0.6} \times 10^{22}$	Spinoglio et al. (2012)
NGC 253	$2 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{-5}$	$(1.3 - 2.2) \times 10^{21}$	$2.3_{-1.9}^{+3.7} \times 10^{22}$	This work
M 82	$5.6 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{-5}$	$(0.7 - 1.3) \times 10^{21}$	$1.2_{-0.2}^{+1.8} \times 10^{22}$	This work

Notes.

<sup>a</sup> Derived using the CH 560 μm line.

<sup>b</sup> See text in Section 4.1 for explanation of ranges.

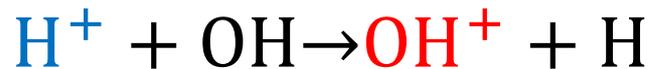
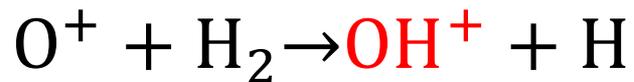
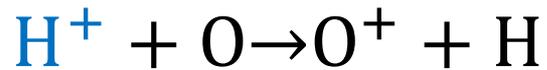
<sup>c</sup> References for CO measurements.

Herschel: Rangwala et al. (2014)

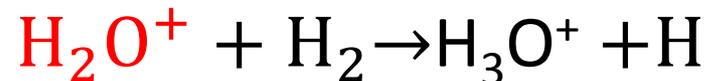
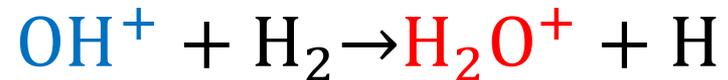
$\text{OH}^+$ (909GHz, 971GHz, 1033GHz)  
 $\text{H}_2\text{O}^+$ (1115GHz, 1139GHz)

- $\text{OH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$ :  $\text{H}^+$ が多く、分子の割合が小さいところが多い  
⇒ AGNで豊富 (AGNの指標?)

$\text{OH}^+$

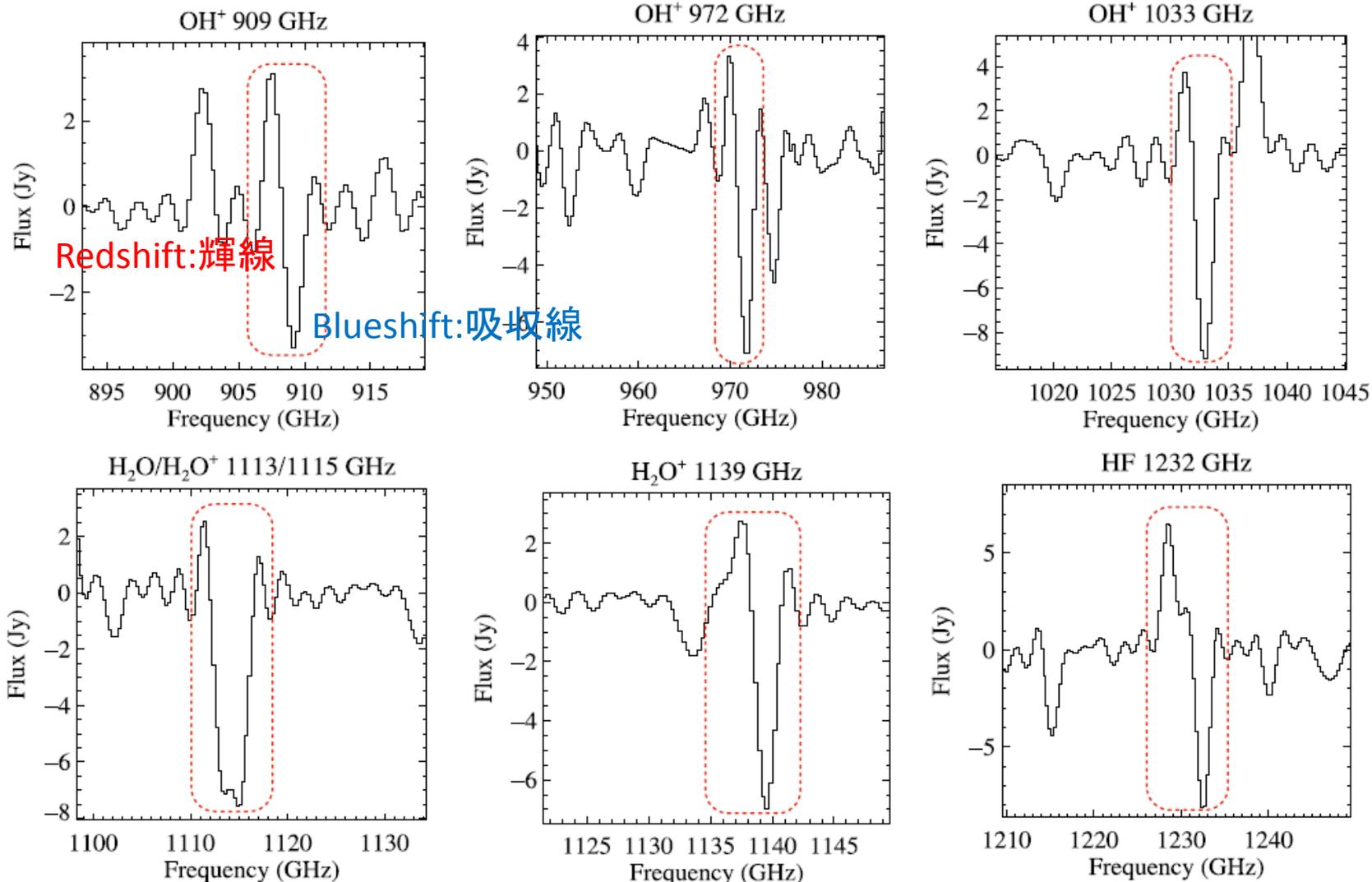


$\text{H}_2\text{O}^+$



• P Cygni profiles  $\Rightarrow$  分子ガスのアウトフロー  
噴出速度、分子ガスの放出率

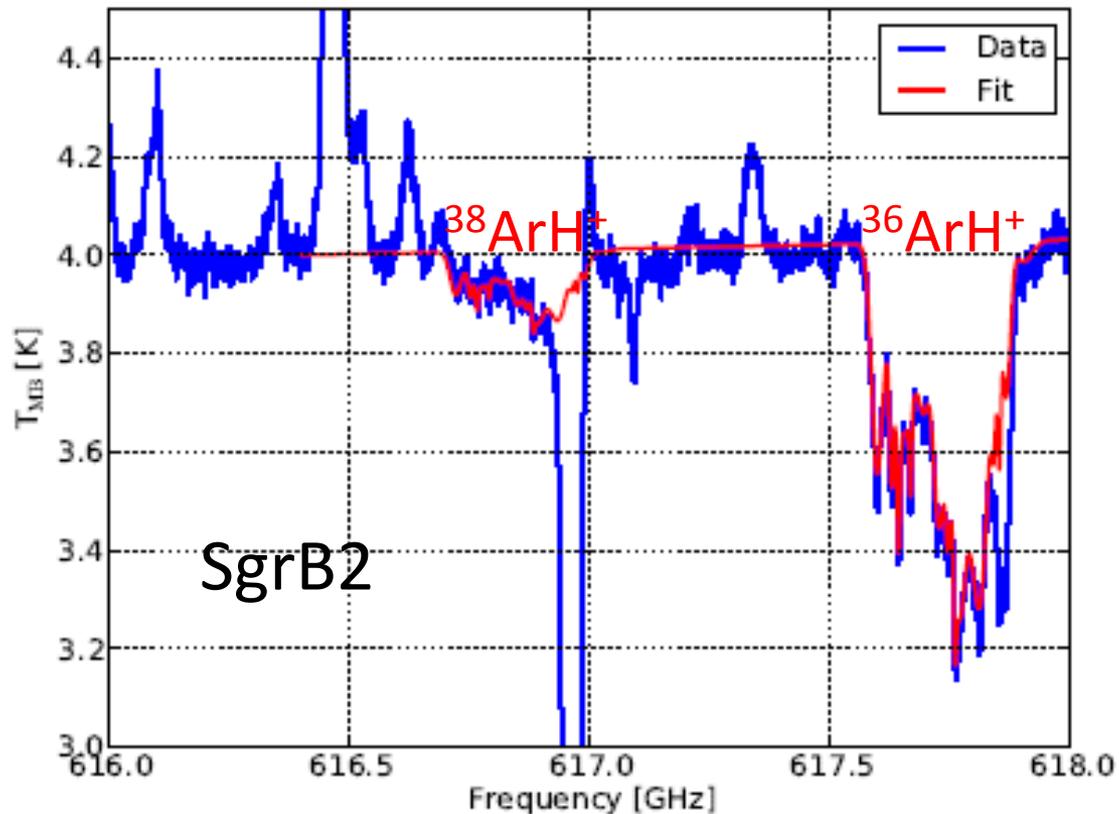
Arp220



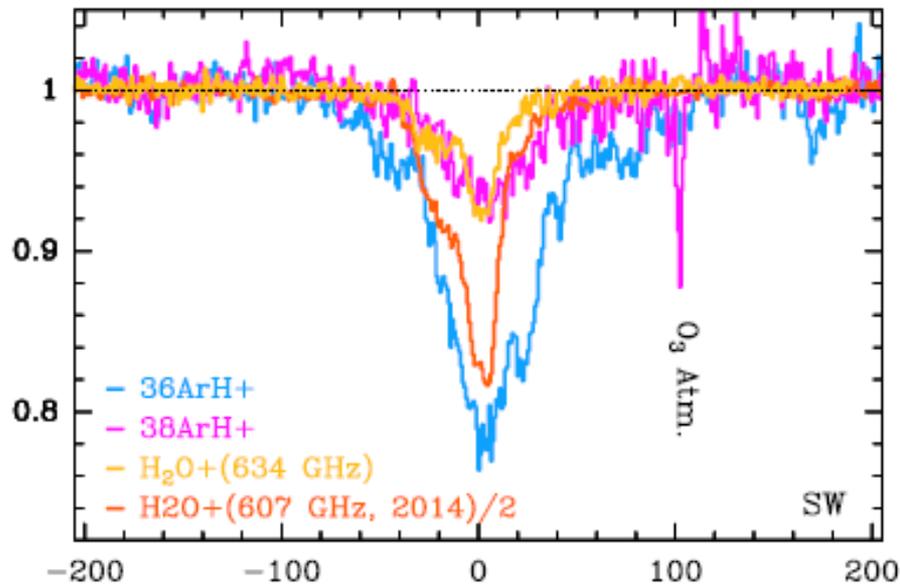
Herschel: Rangwala et al. (2011)

# ArH<sup>+</sup>(618GHz, 1235GHz)

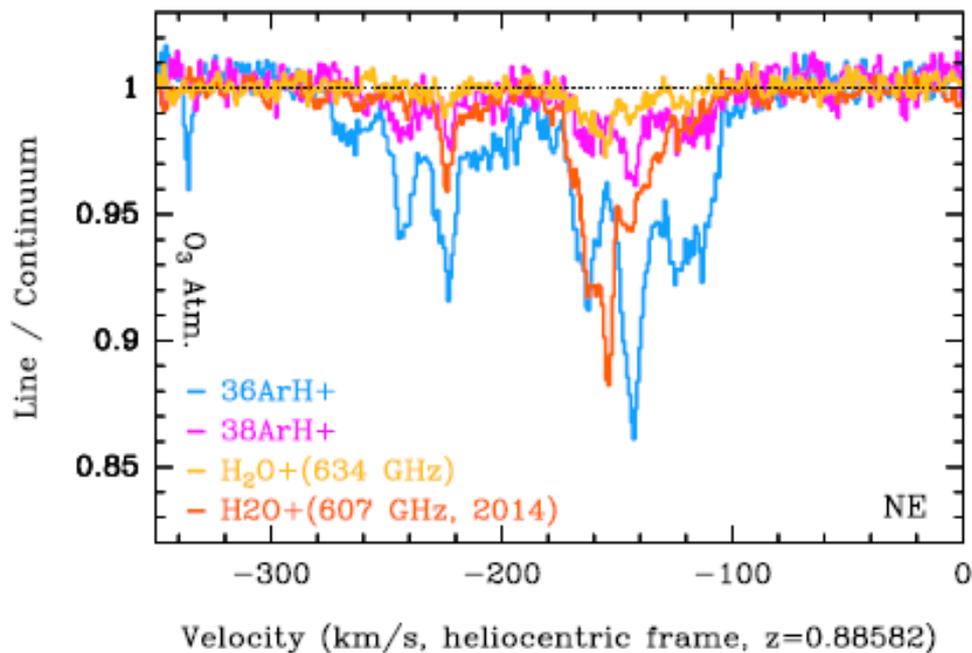
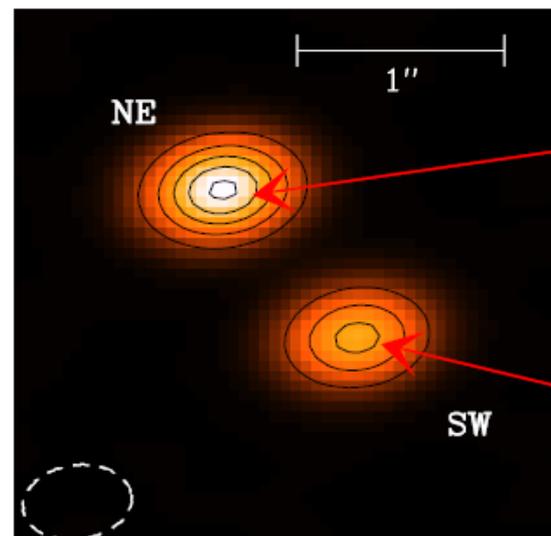
- 希薄なガス：分子ガスの割合 $10^{-4}$ - $10^{-3}$ で存在比が最大  
⇒ 原始ガスの良いトレーサー



Herschel: Schilke et al. (2014)



ALMA 339 GHz Continuum



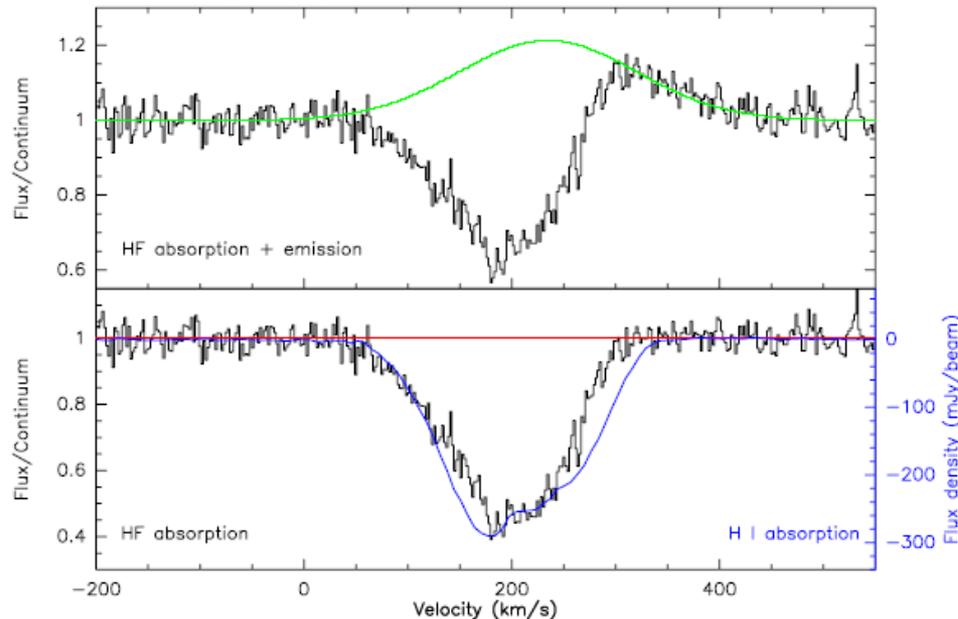
PKS1830-211  
 z=0.88582

ALMA: Muller et al. (2015)

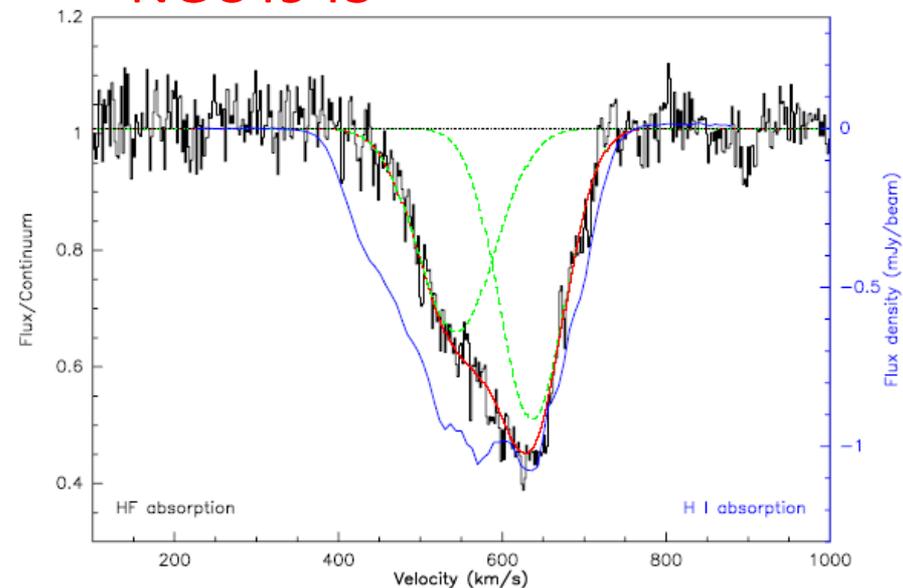
# HF(1232GHz)

- 一度形成されると壊れにくい
- 分子ガスのよいトレーサー (HF/H<sub>2</sub>が一定)
- 臨界密度が高い:  $\sim 10^9 \text{ cm}^{-3} \Rightarrow$  吸収線
- P Cygni profile  $\Rightarrow$  分子ガスのアウトフロー

## NGC253



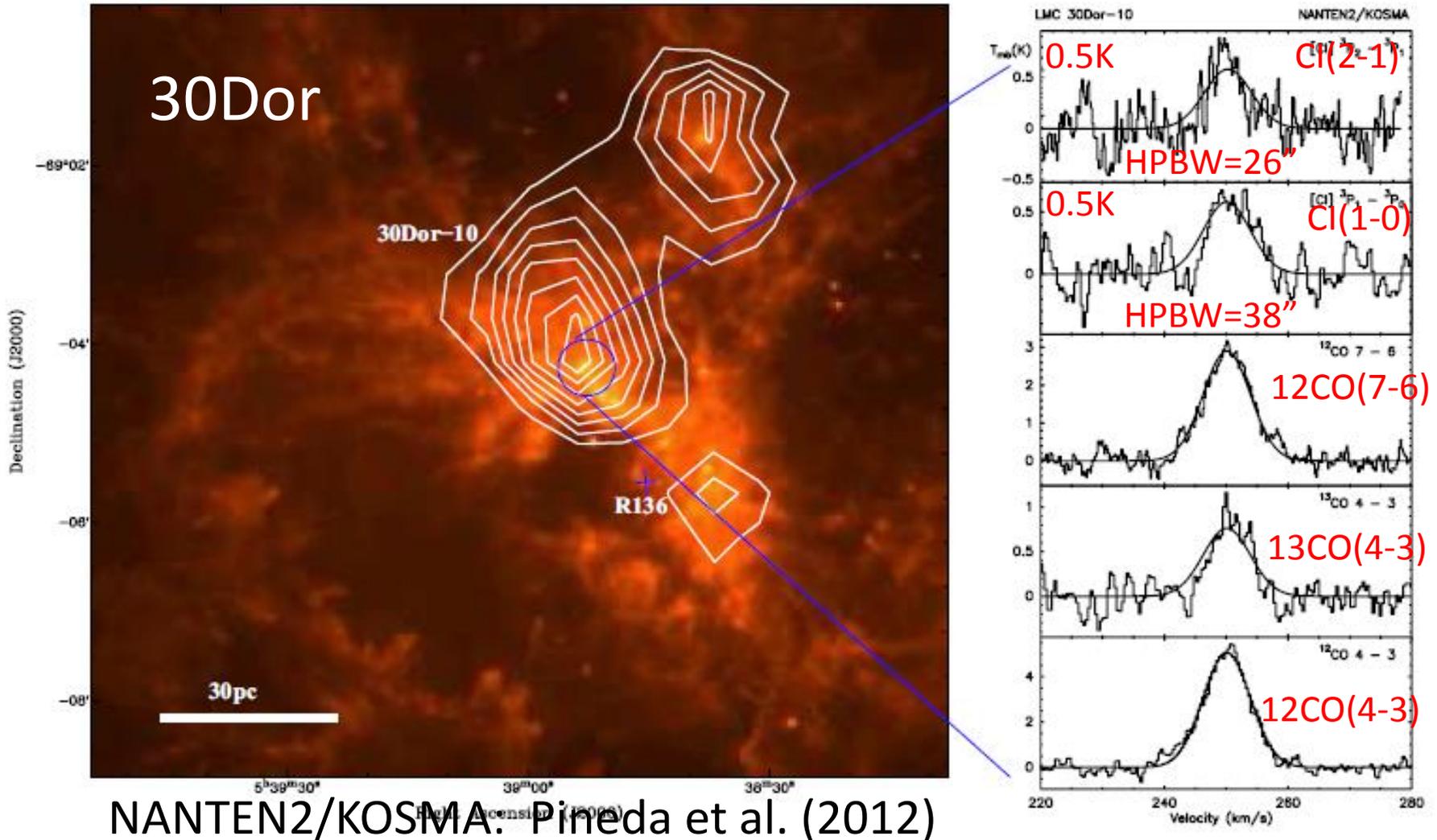
## NGC4945



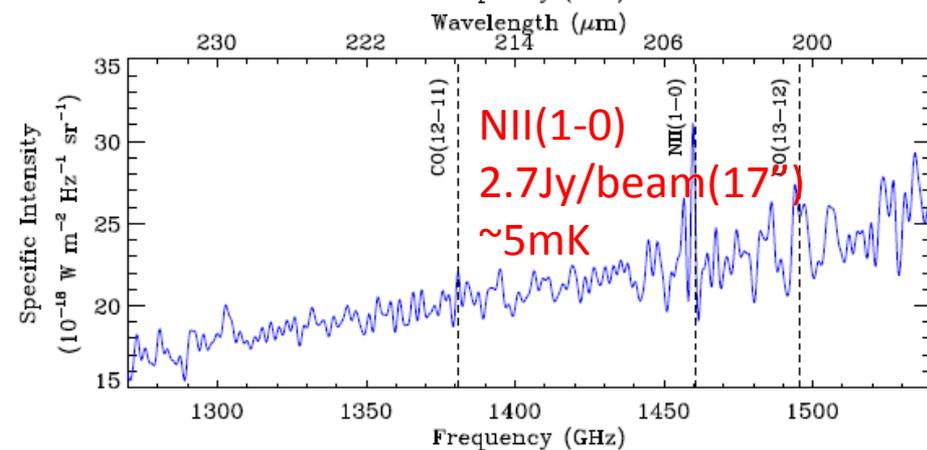
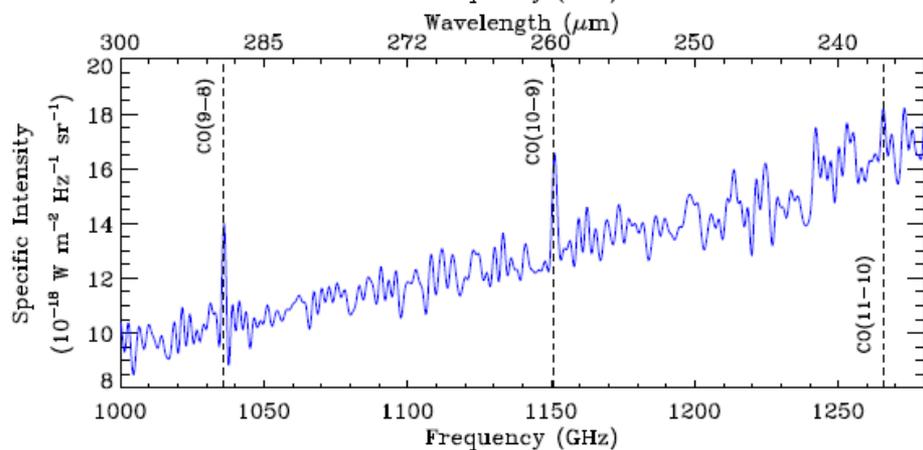
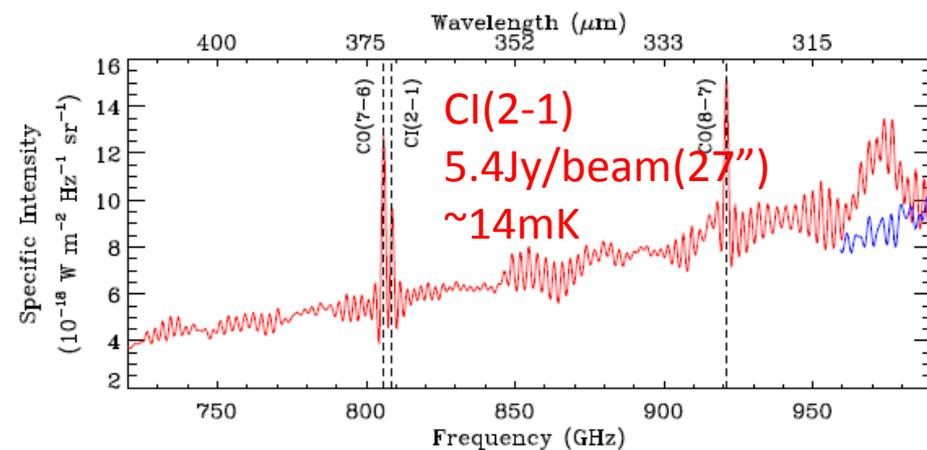
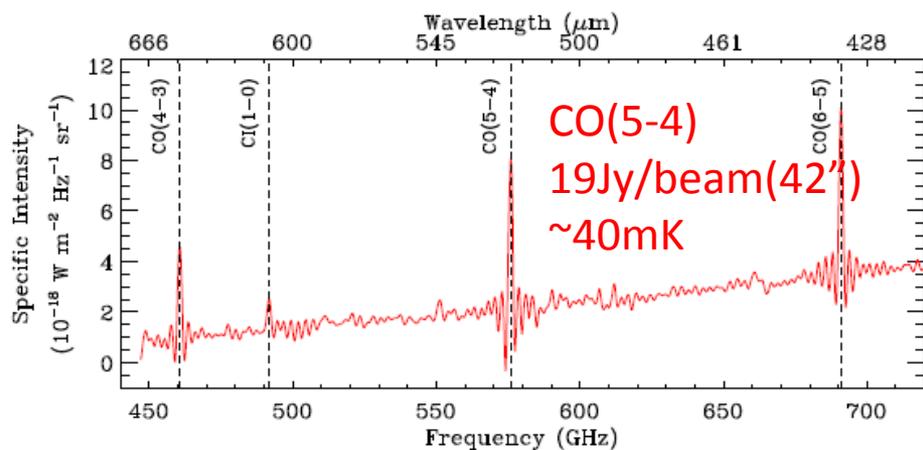
Herschel: Monje et al. (2014)

# LMC

- 距離:  $\sim 50\text{kpc}$
- Herschel:  $17''\text{-}42''$  (4-10pc)  $\Rightarrow$  南極30m:  $1''.7\text{-}5''$  (0.4-1.2pc)



# NGC159W



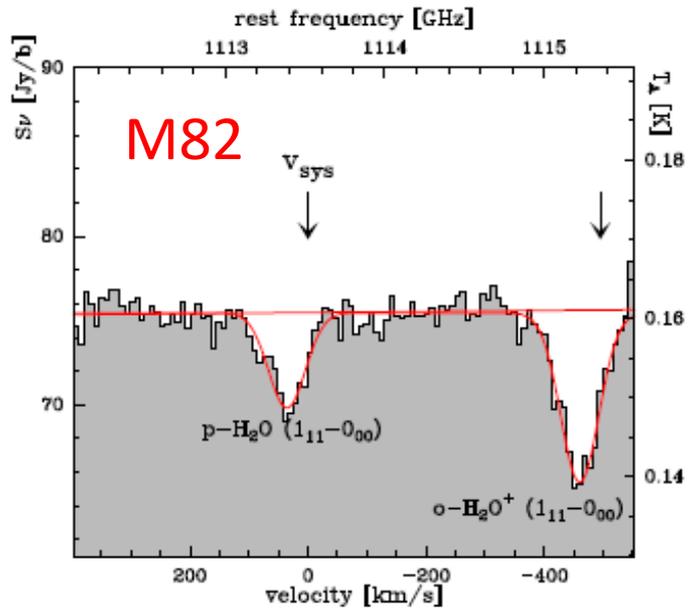
Herschel: Lee et al. (2016)

# まとめ

- CO Spectral Line Energy Distributions :  
GMCスケールでの温度、体積密度？
- CI: 分子ガスのトレーサー？ 分子ガスの物理状態？
- NII: 星形成率の指標？
- CH: AGNの指標？
- ON<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>: AGNの指標？ アウトフロー？
- ArH<sup>+</sup>: 希薄なガス、原子ガスのトレーサー
- HF: 分子ガスのトレーサー？ アウトフロー？
- H<sub>2</sub>O？
- 個別天体: LMC

# H2O

- P Cygni profile  $\Rightarrow$  分子ガスのアウトフロー



van der Tak et al. (2016)

