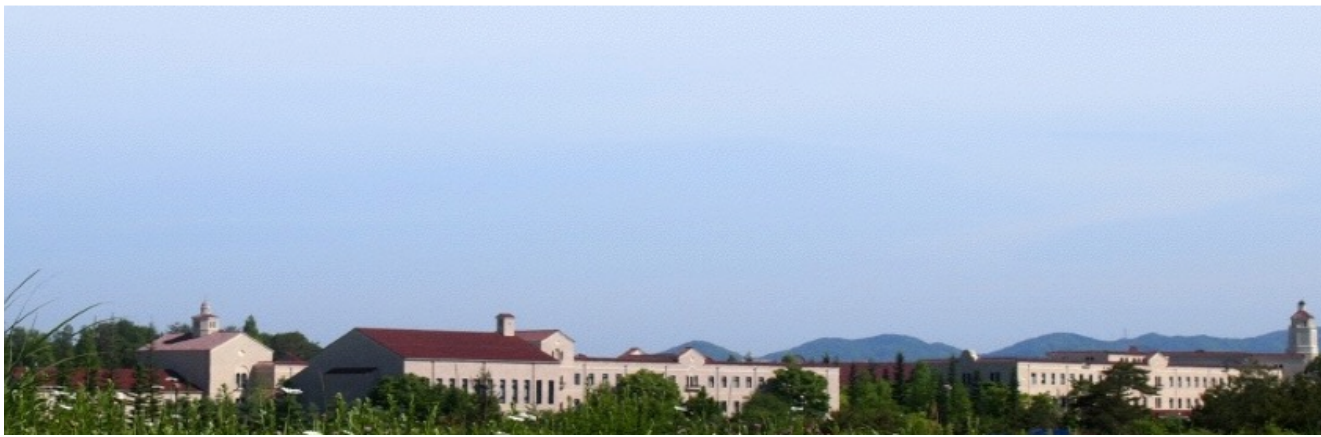




2015年11月18日 南極で切り開くテラヘルツ天文学 国立天文台

中性炭素原子輝線CIで探る 星間物質

瀬田 益道
(関西学院大学)



内容

- 分子雲と炭素原子輝線C I
- オリオン分子雲をC Iで見る
- 光解離領域PDRでC Iは良く見えるだろう
- 化学進化はC I強度に強い影響
- 銀河系スケールでのC I分布は

分子雲の重要性

(Myers 1978)

- 星間物質の分類
ガスとダストから成る
- 分子雲の形成と進化

HI雲

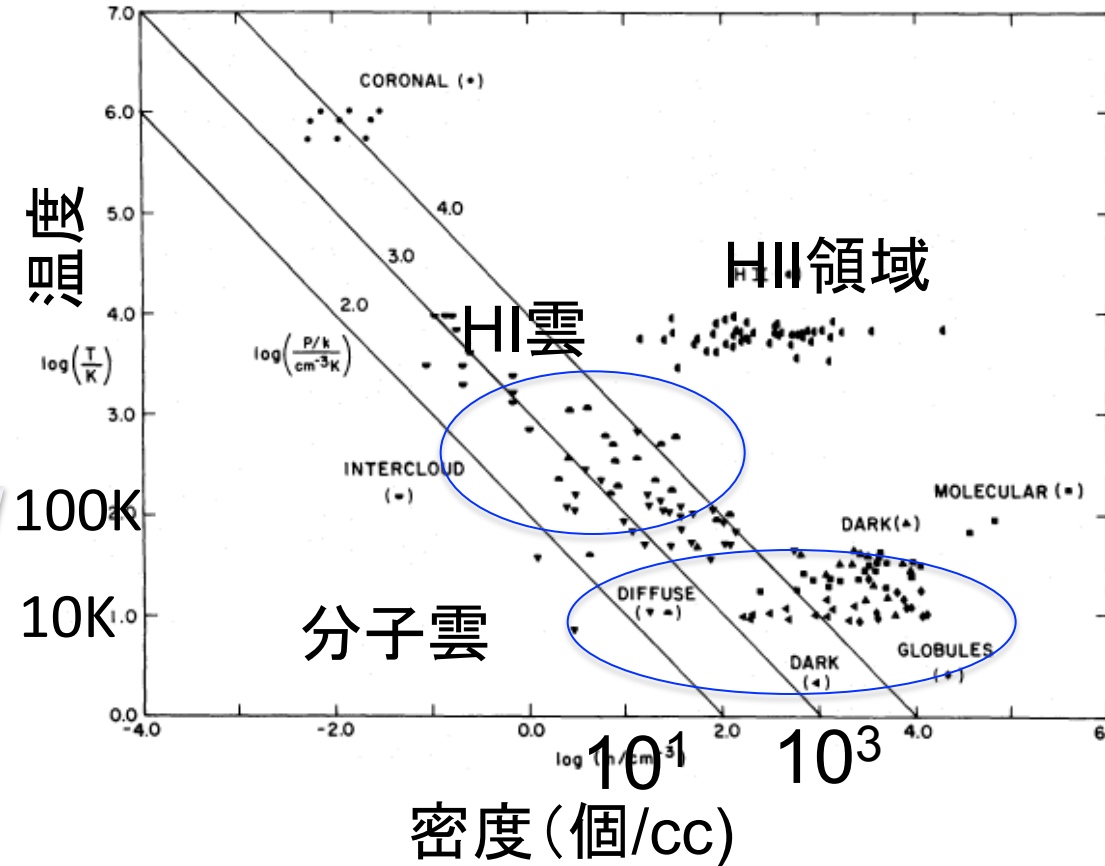
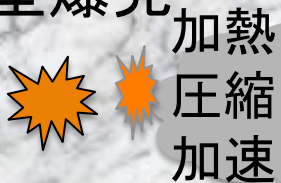
分子雲形成



大質量星



超新星爆発



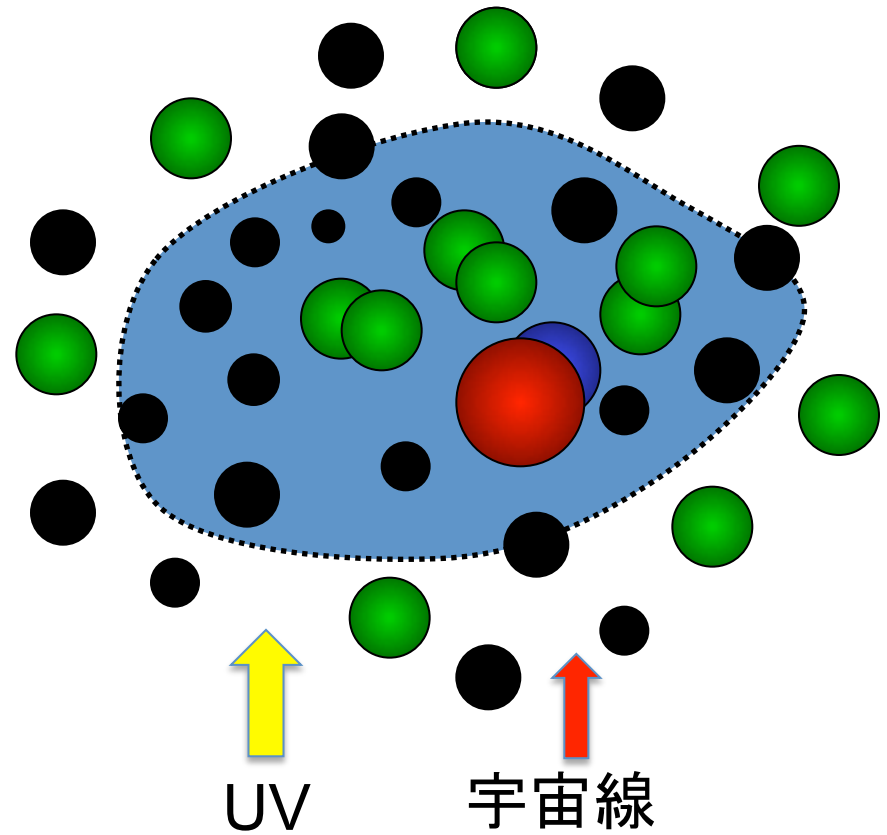
分子雲の重要性

- 星形成の母胎
- AGN のエネルギー源

分子雲の形成と進化は研究途上

分子雲を何で見るか

- 存在比
 - $[\text{He}]/[\text{H}] \sim 0.1$
 - $[\text{O}]/[\text{H}] \sim 5 \times 10^{-4}$
 - $[\text{C}]/[\text{H}] \sim 3 \times 10^{-4}$
- 主成分の水素分子は見えない
ダストの熱放射
励起されたガスの輝線
例 $\text{CO } J=1-0$
何が良いプローブか
紫外光・宇宙線で形態変化
水素原子電離 $> 13.6 \text{ eV}$
炭素原子電離 $> 11.3 \text{ eV}$
水素分子解離 $> 14.7 \text{ eV}$
 CO 解離 $> 11.1 \text{ eV}$
臨界密度や光学的な厚み



比較的多く、分子雲の周縁まで見える中性炭素CIは有力

中性炭素CI輝線

分子輝線は通常回転遷移を見ている

$$E_{molecule} = E_{electron} + E_{rotation} + E_{vibration}$$

CIは微細構造線: 電子の軌道角運動量とスピン角運動量の相互作用

電子の全軌道角運動量: $P(L=1)$

スピン角運動量 $S=1$

(Draine, 2011)

P状態では全角運動量、 $J=0, 1, 2$

臨界密度(100K)

${}^3P_2 - {}^3P_1$	809.34GHz (370um)	720個/cc
---------------------	-------------------	---------

${}^3P_1 - {}^3P_0$	492.16GHz (609um)	620個/cc
---------------------	-------------------	---------

輝線強度比から、励起温度を導ける(例Zmuidzinas et al., ApJ, 1988)

分子雲の質量を導ける(例Papadopoulos et al., MNRAS, 2004)

492GHz, 809GHzともに、南極の良く開いた大気の窓の中

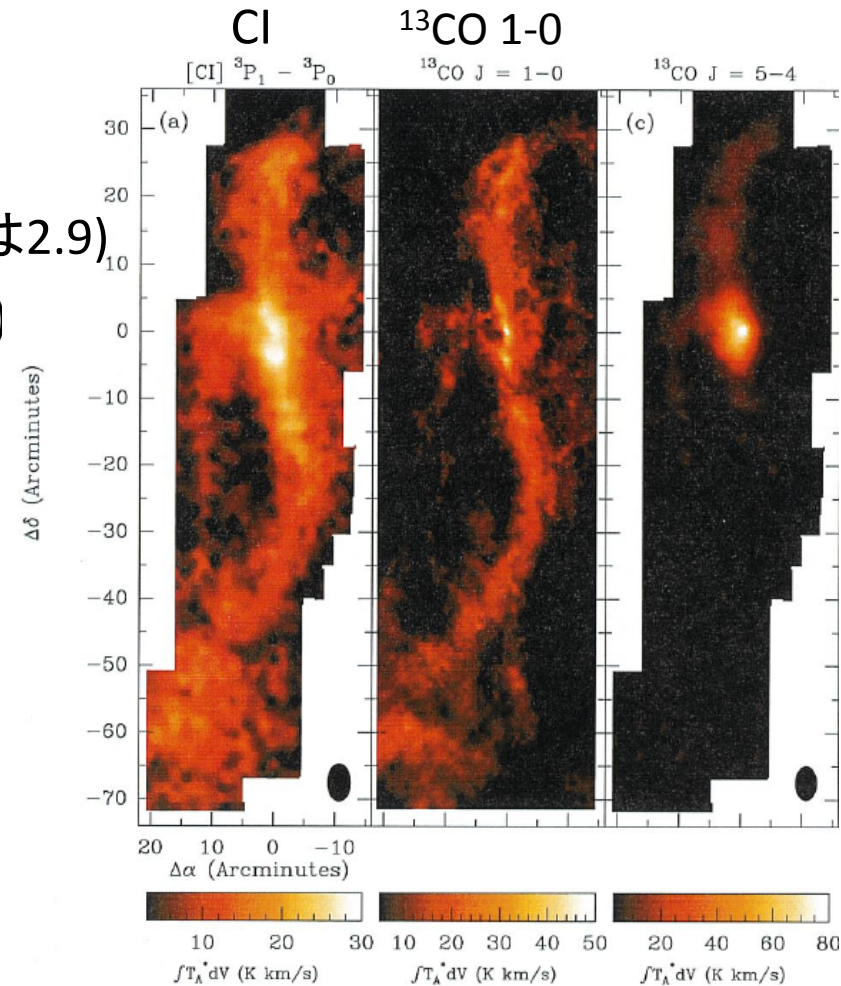
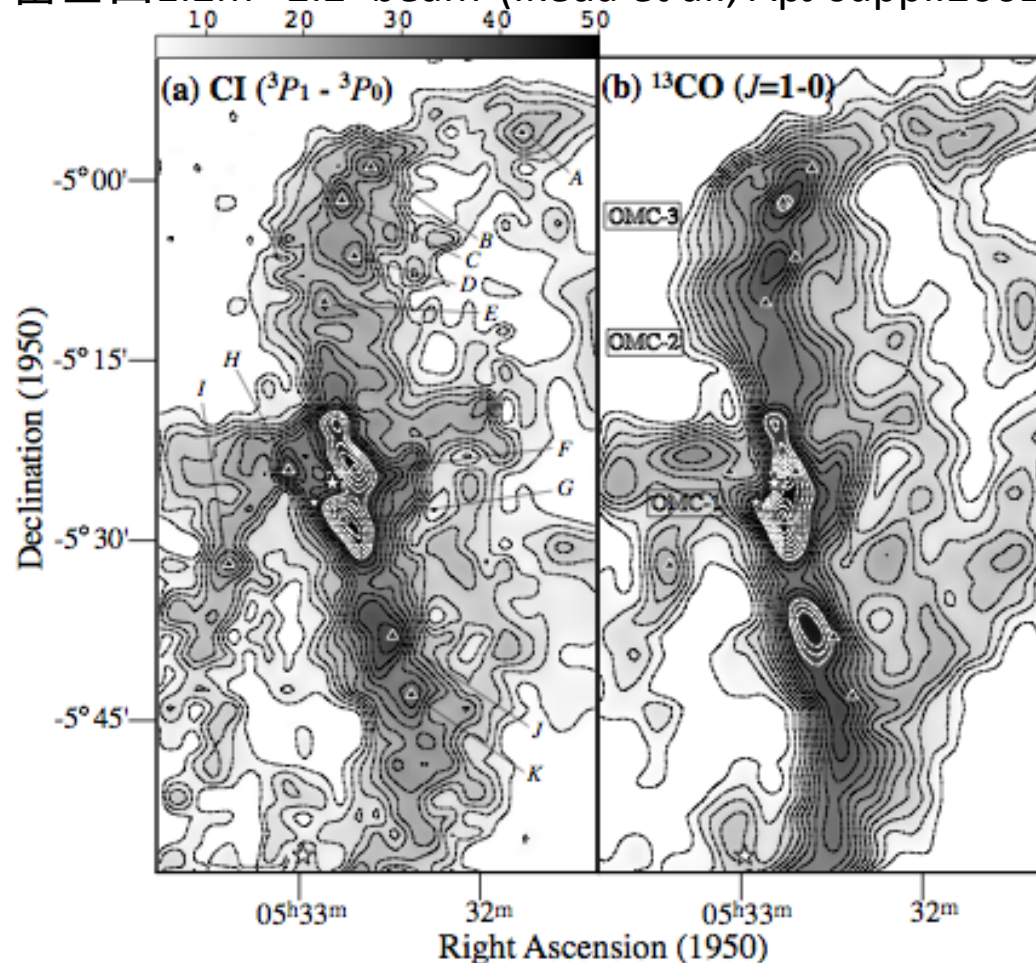
近傍の巨大分子雲オリオンのCI観測

CI $^3P_1 - ^3P_0$ 分布は、 $^{13}\text{CO } J=1-0$ と類似

CI/ ^{13}CO 強度比 = 0.5 ~ 0.8

柱密度 $N(\text{CI})/N(\text{CO})$ 内部 0.1 ~ 0.2 一定 (端では 2.9)

富士山 1.2m 2.2' beam (Ikeda et al., ApJ suppl. 2002)

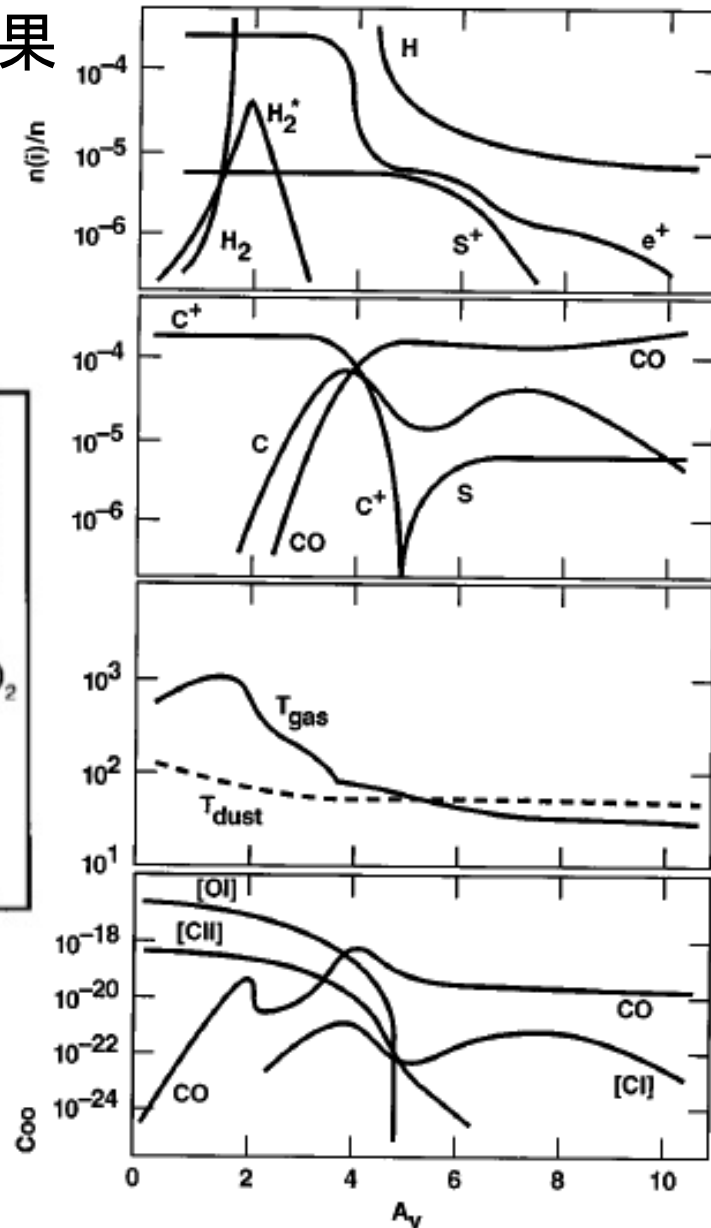
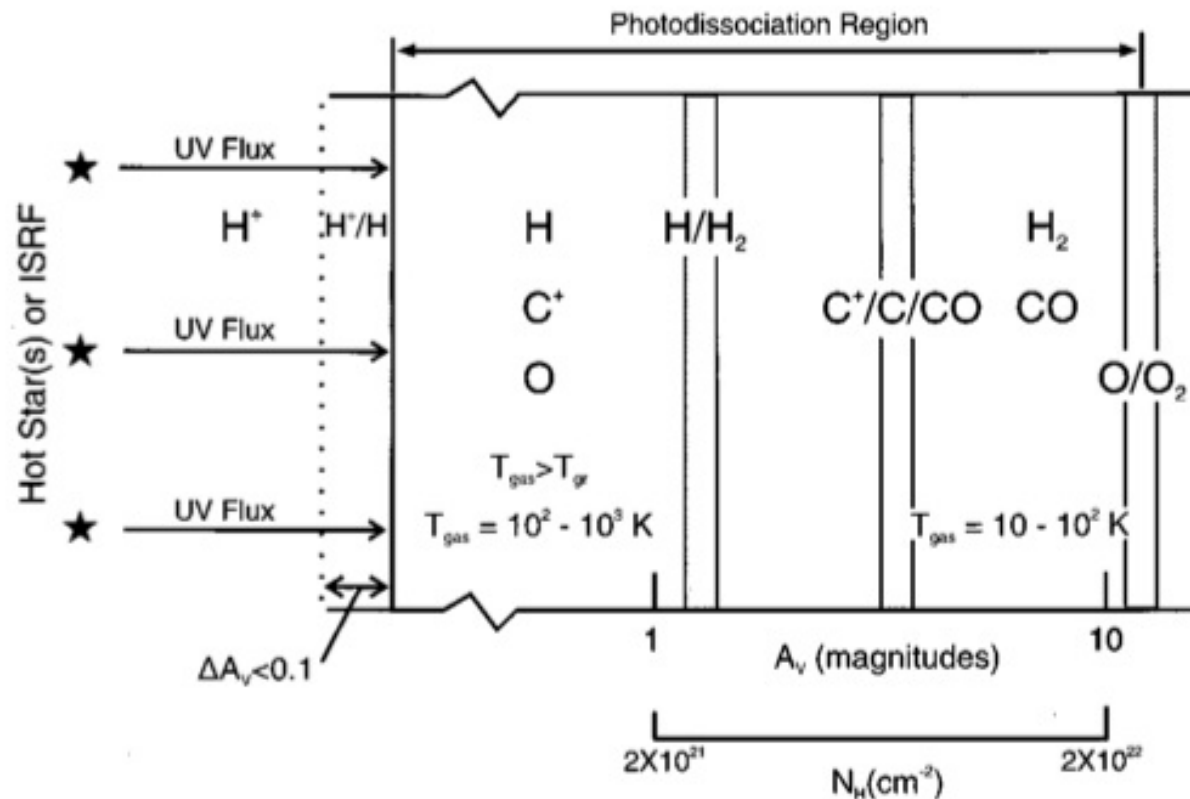


(Plume et al., ApJL 2000)

SWAS 4.3' ビーム

CIが見える領域 -PDR

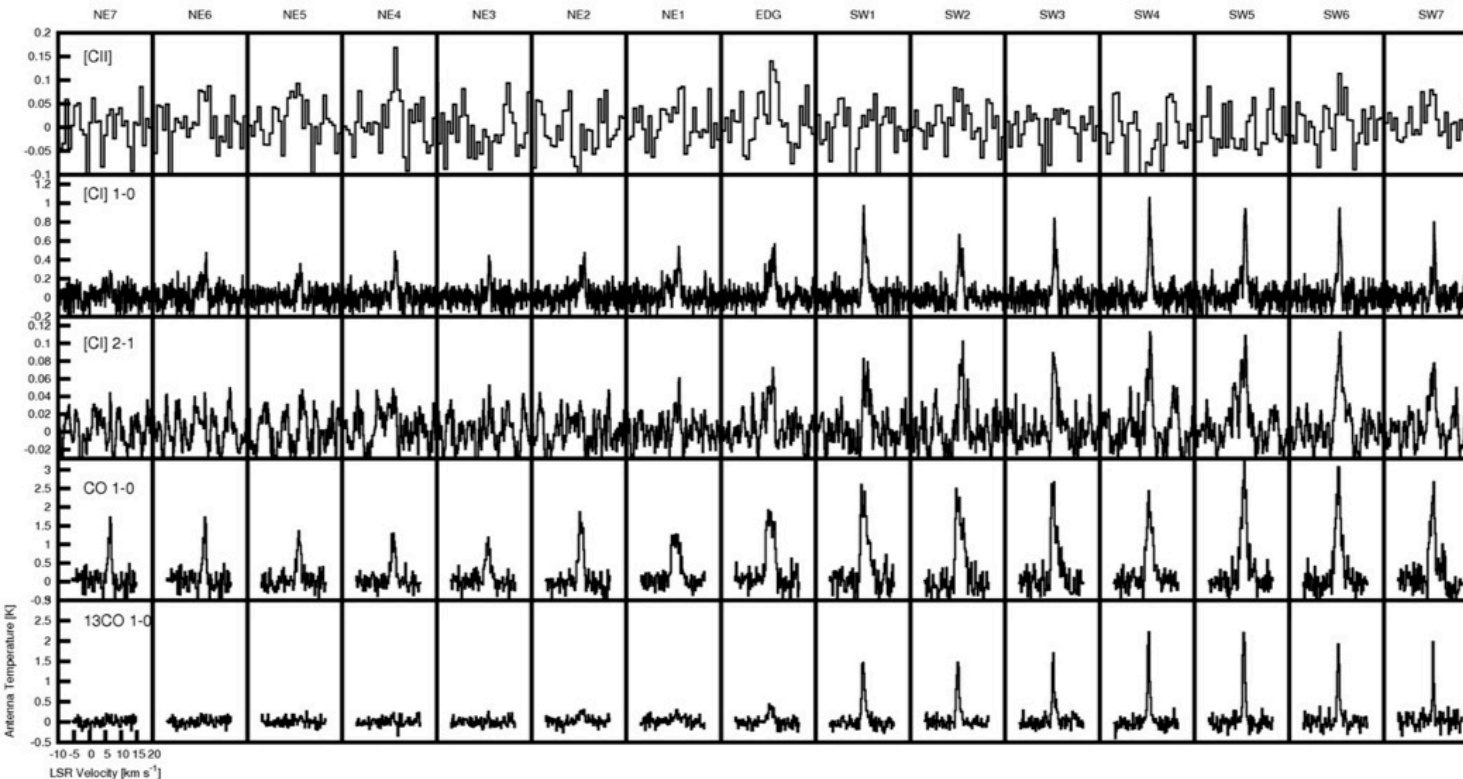
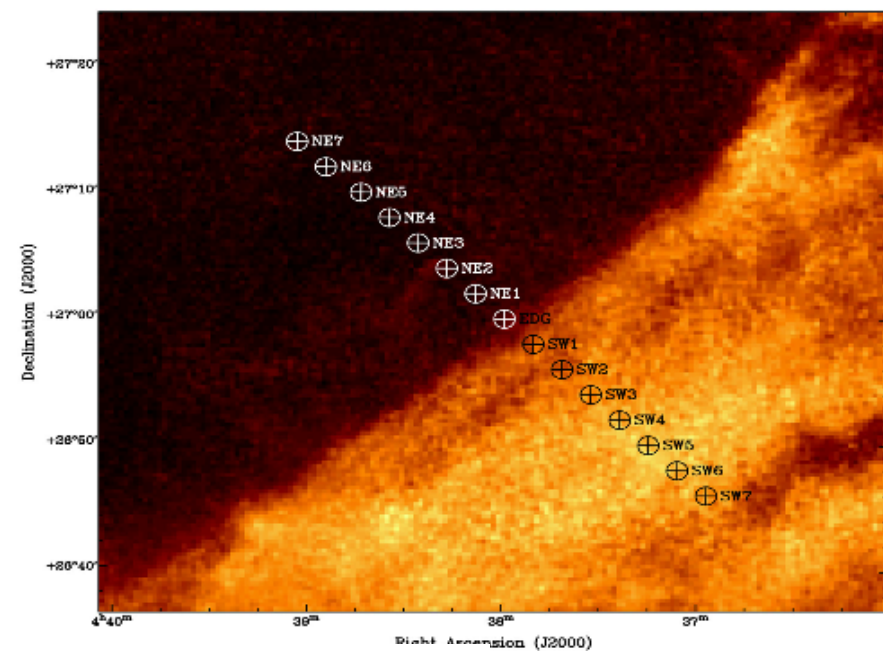
Photo dissociation Region (PDR) 計算結果
(Hollenbach & Tienen Rev. Mod. Phys. 1999)



PDRの観測例

牡牛座分子雲 (Orr, et al., ApJ, 2014)

PDRモデルで輝線強度を良く説明



CII 1.9THz

CI 492GHz

HIFI 44" @492GHz

CI 809GHz

^{12}CO 1-0

FCRAO14m 45"

^{13}CO 1-0

単純なPDRでは説明困難なC Iピーク

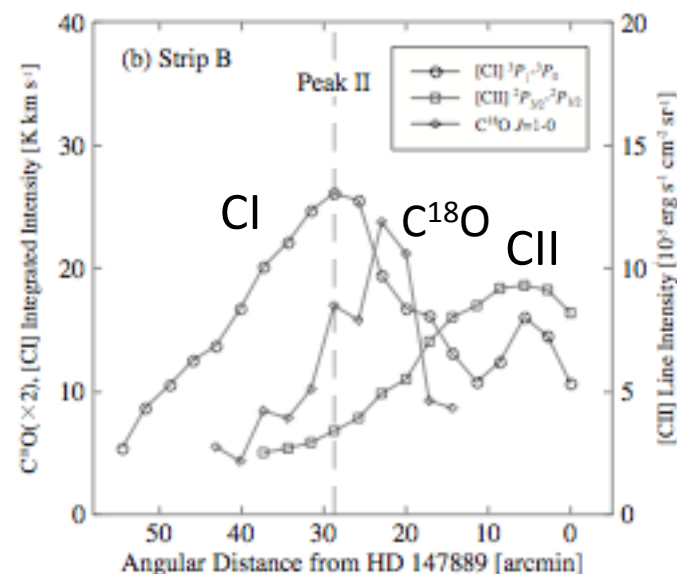
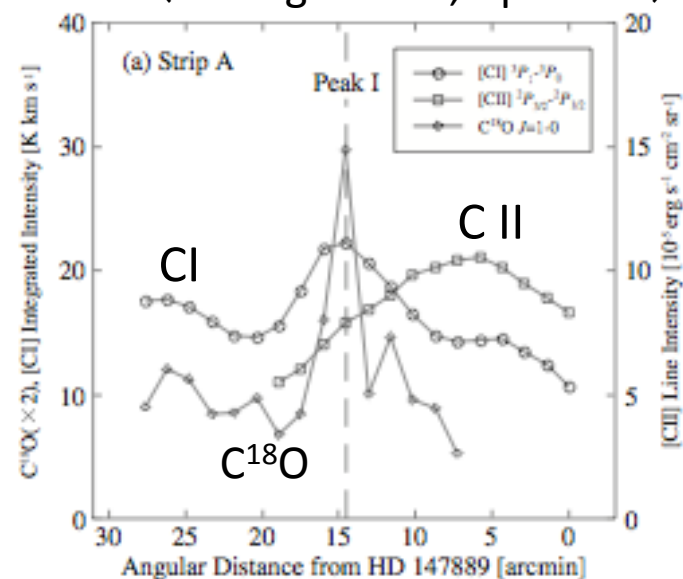
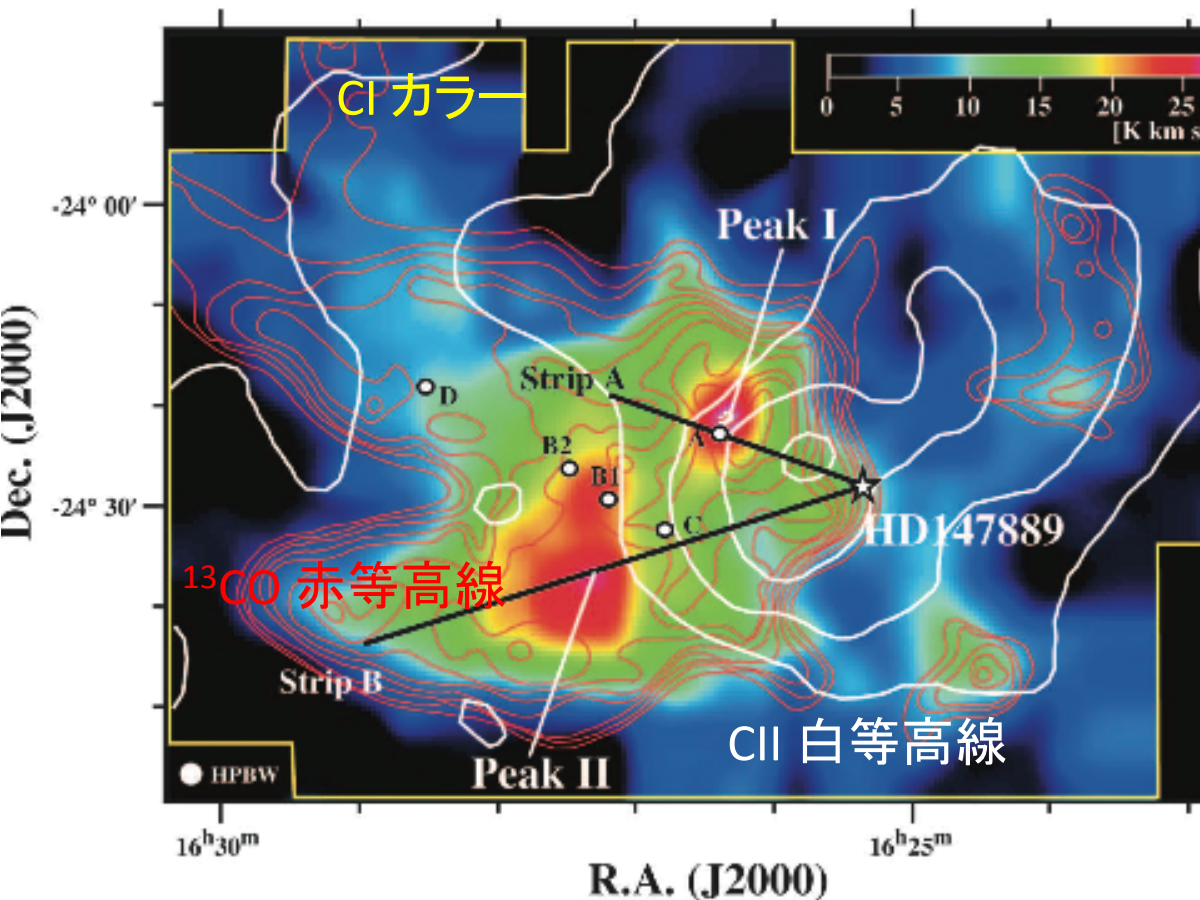
(Kamegai et al., ApJ 2003)

PDR 領域の暗黒星雲L1688 富士山1.2m

CIは ^{13}CO と似ている

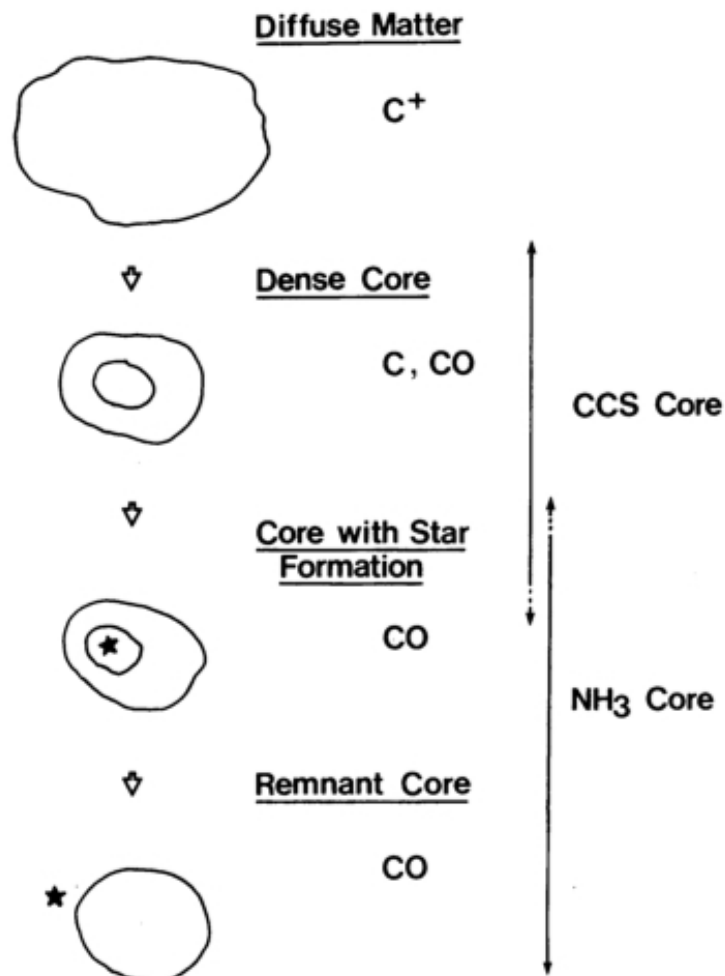
C^{18}O コアがCIピークより励起星側にある

低密度のPDR or 化学進化が進んでいない若いコア

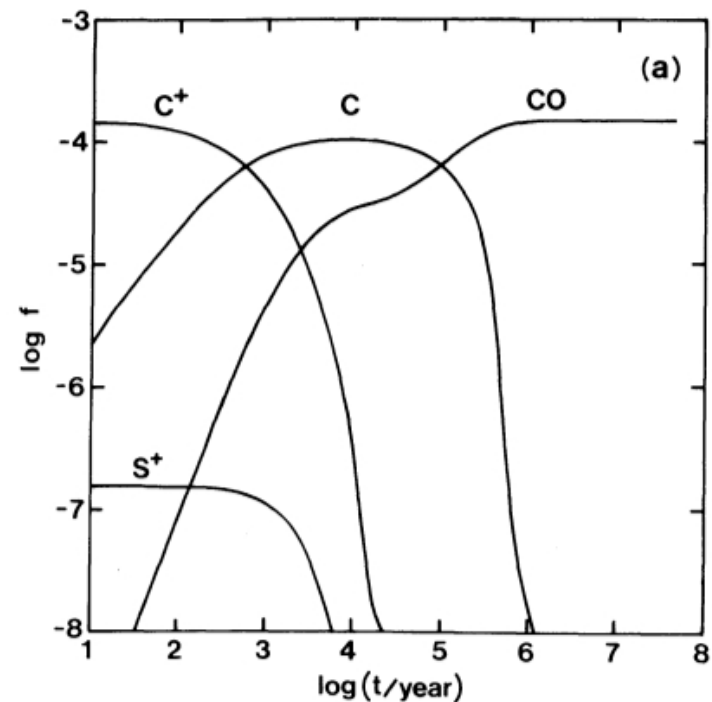
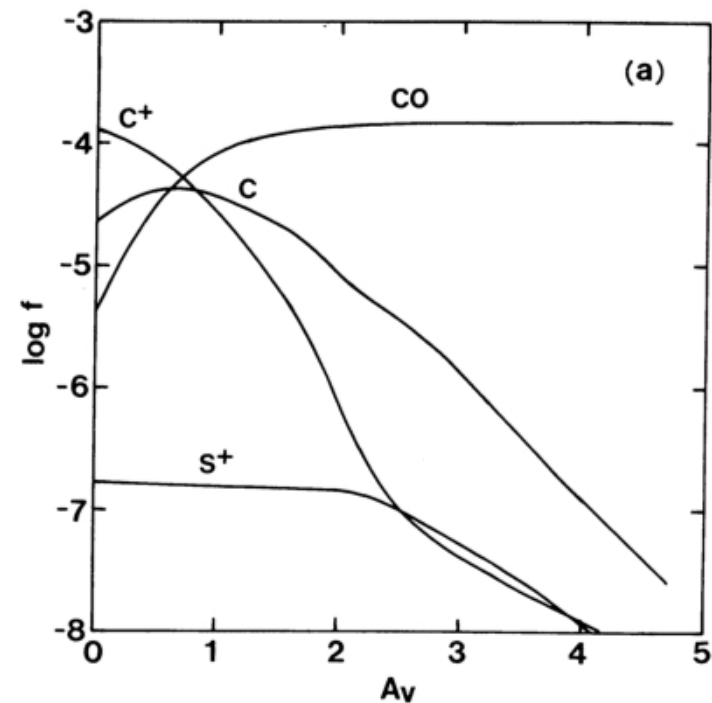


化学進化とCI

分子雲の組成は、時間的に変化する



(Suzuki et al., ApJ 1992)



分子雲の形成過程が見えた

暗黒星雲Heiles cloud 2

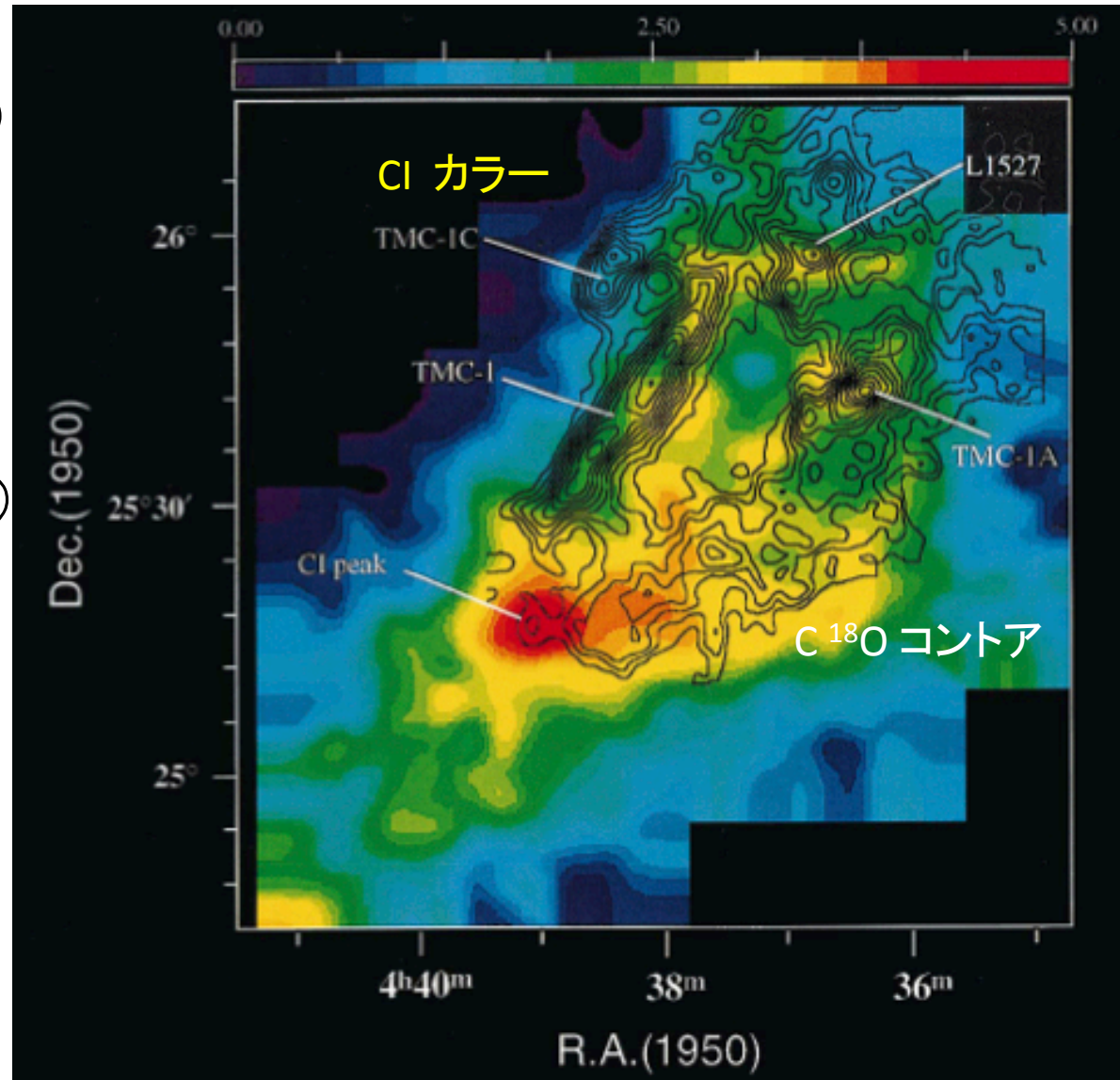
(Maezawa et al., ApJ 1999)

富士山1.2m

CI 強い(形成初期)

C¹⁸O強い
(形成から時間経過したコア)

北から南に分子雲コアが
形成されていっている。



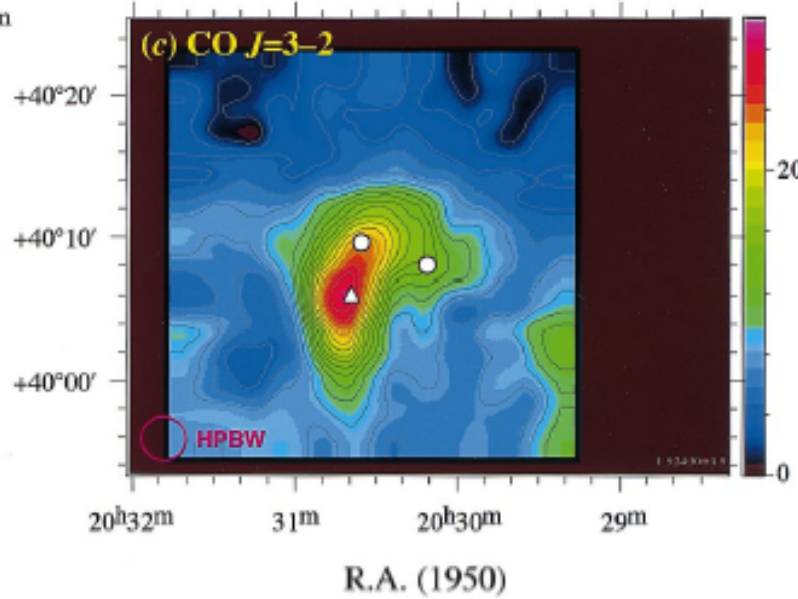
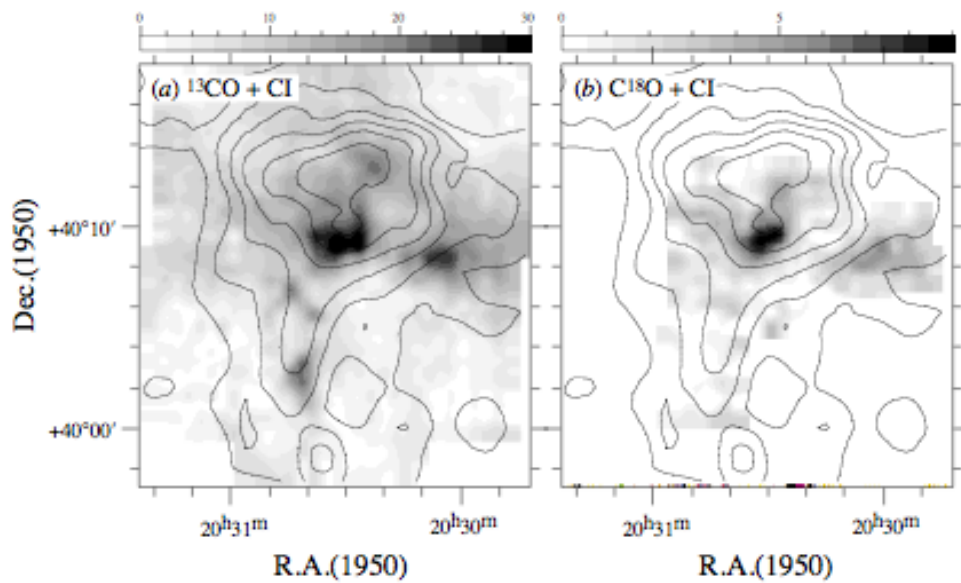
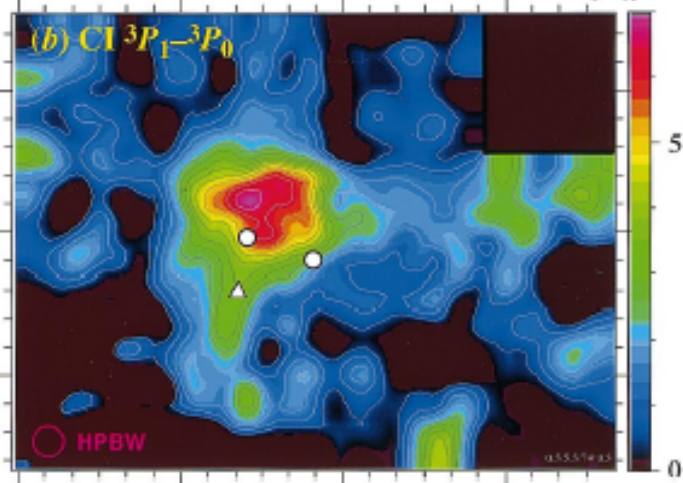
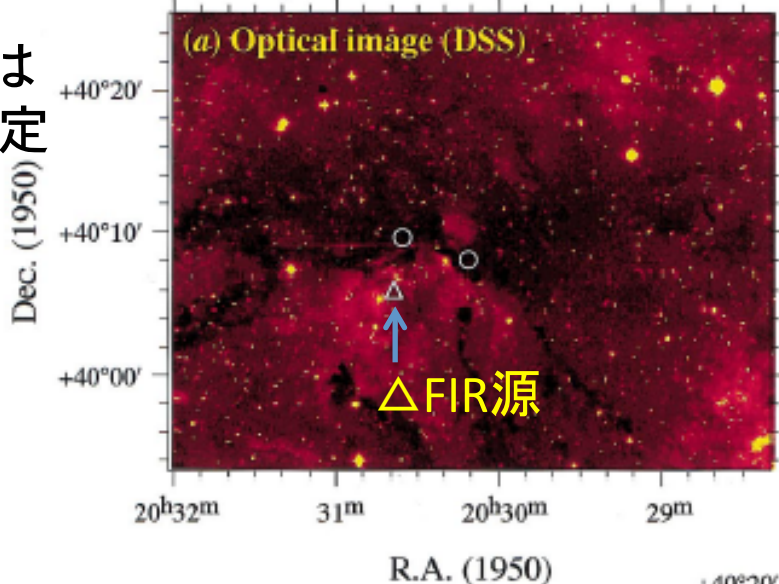
PDRはCIの起源では無い

HII領域赤外線暗黒星雲DR15 富士山1.2m (Oka et al., ApJ, 2001)

$\int T_A^* dV$

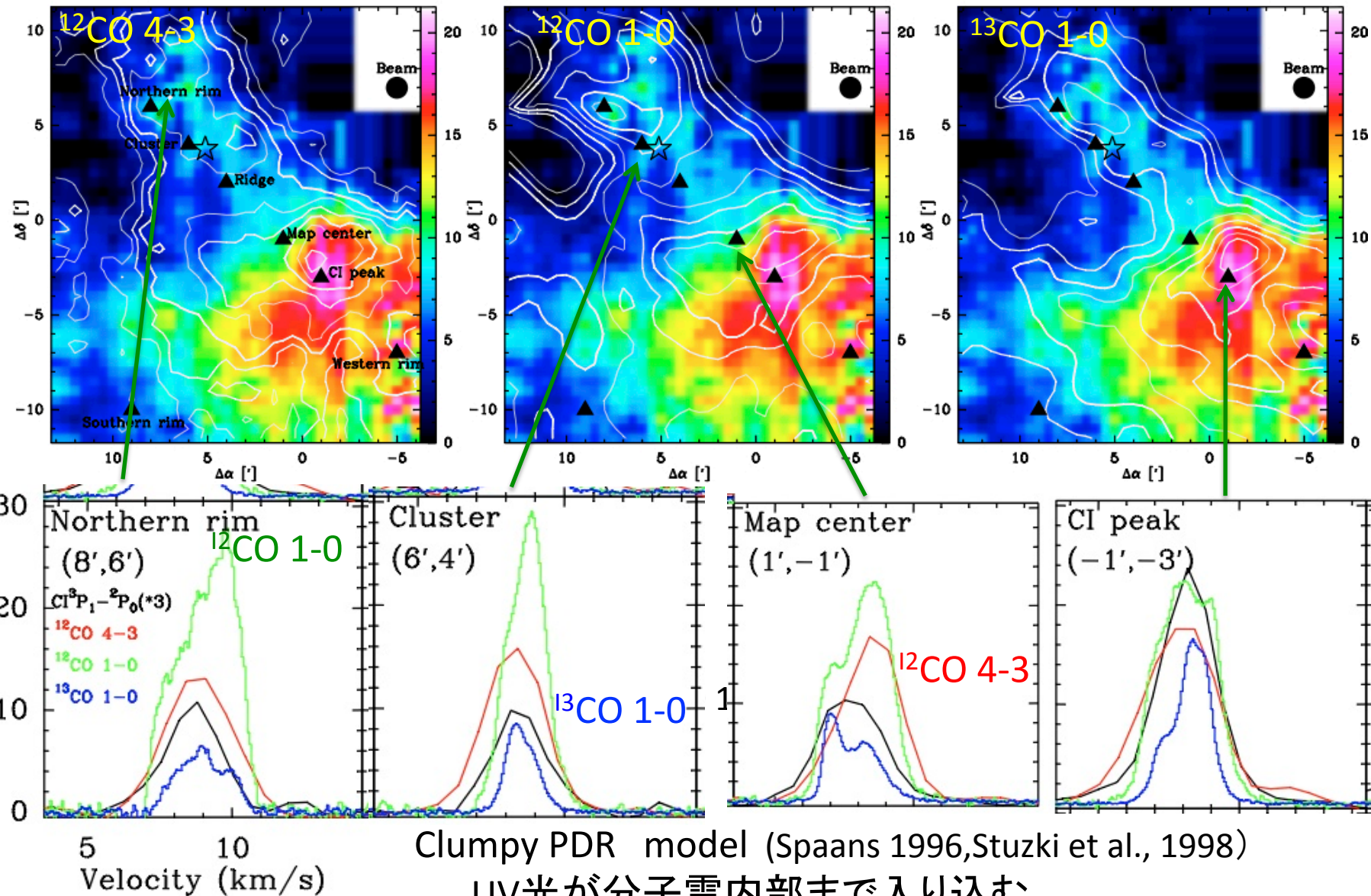
赤外暗黒雲IRDCは
 ^{13}CO , C^{18}O では同定

C I peakは
COコア後方の
冷たい領域



Clumpy PDRで説明-解釈の違い

散開星団IC348付随分子雲 CI(コントア) KOSMA3m 1' beam (Sun et al., A&A, 2008)



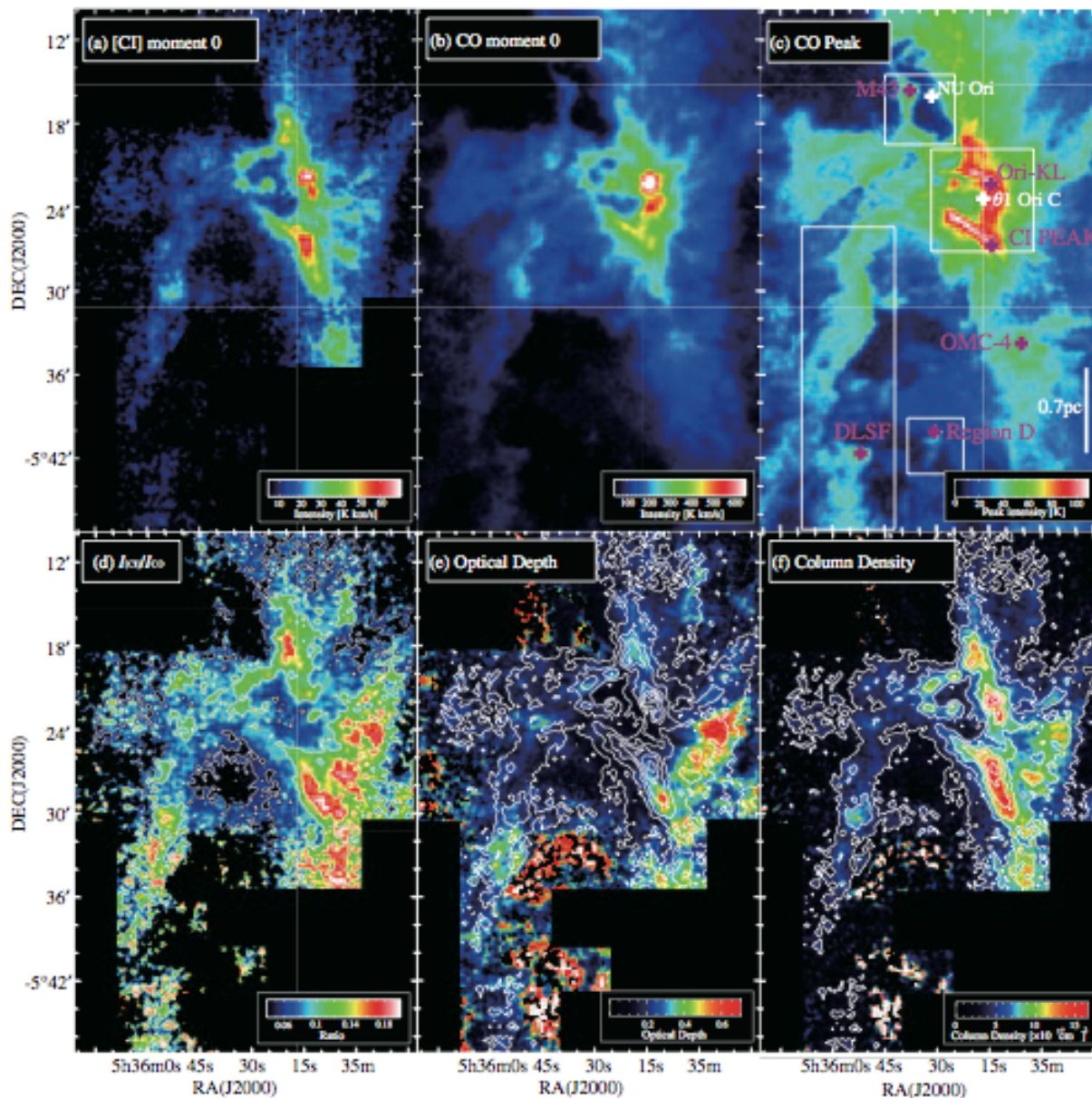
高分解能でOrion分子雲を見ると

ASTE 10m

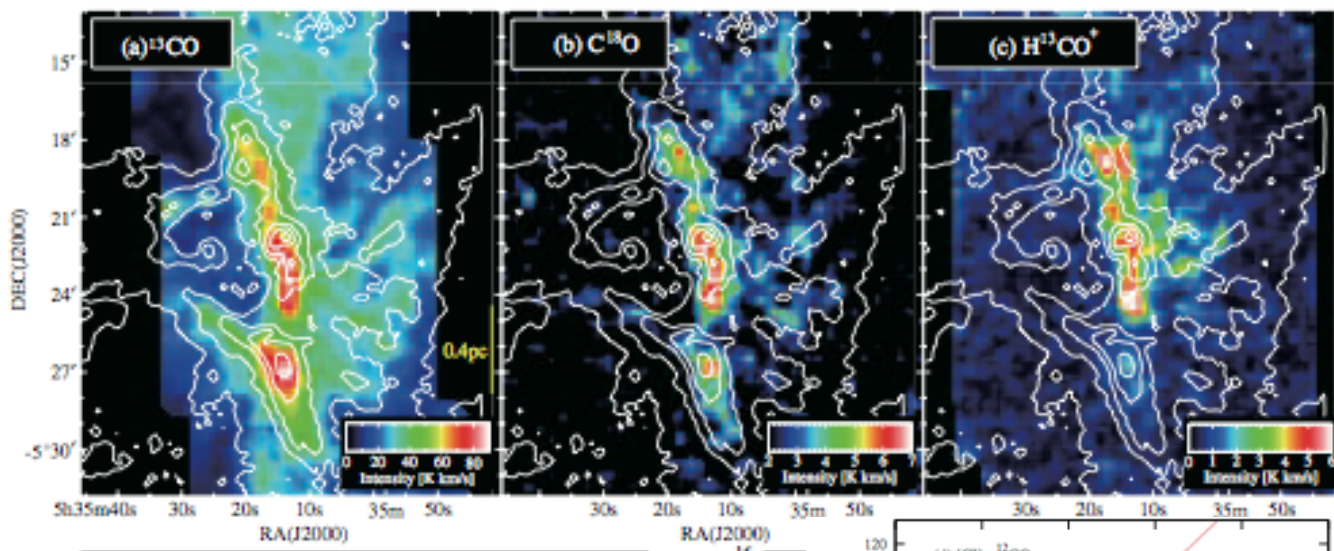
14" beam

(Shimajiri et al., ApJL, 2014)

^{12}CO の分布と類似



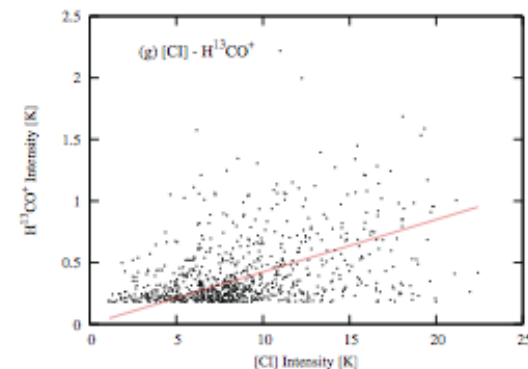
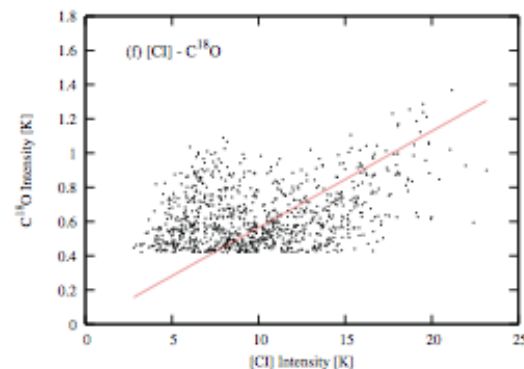
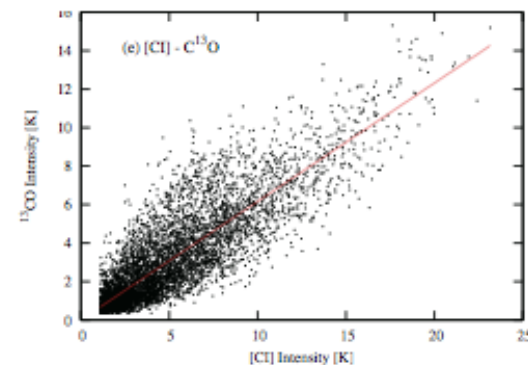
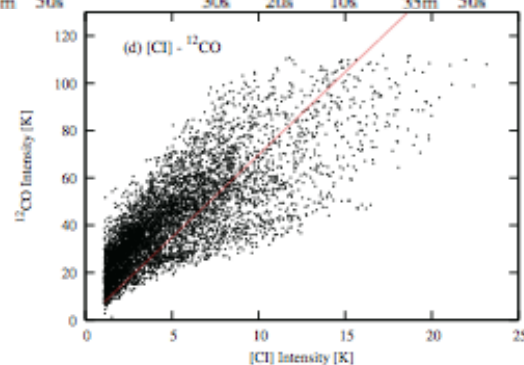
C Iと分子輝線との相関



(Shimajiri et al., ApJL, 2014)

^{13}CO とCIの相関が良い

Clumpy PDRをサポート



高銀緯雲の構造にCIで迫る

Translucent molecular cloud: Av a few mag.

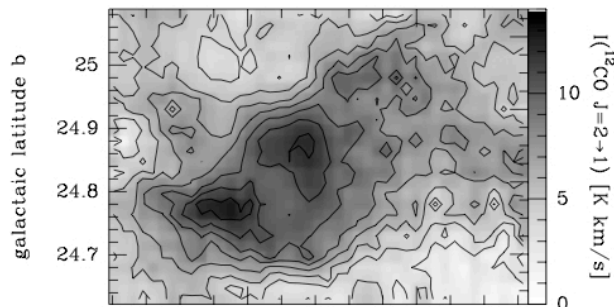
MCLD 123.5+24.9 距離100-200pc

^{12}CO 2-1と良い一致

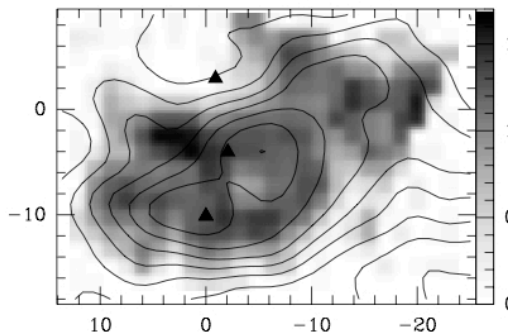
^{13}CO 1-0の方が広がりが狭い

強度 C/CO (^{13}CO ^{12}CO 1-0 ^{12}CO 2-1)は50%と低い
高密度のクランプが薄いガスに埋もれている

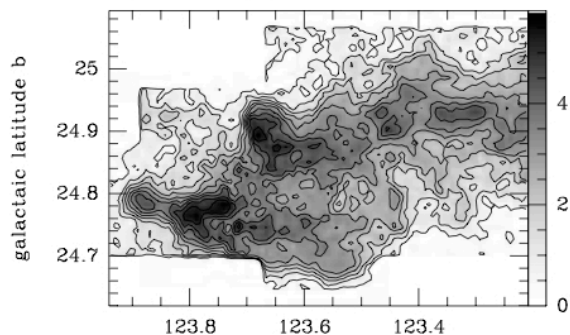
KOSMA: ^{12}CO J=2→1



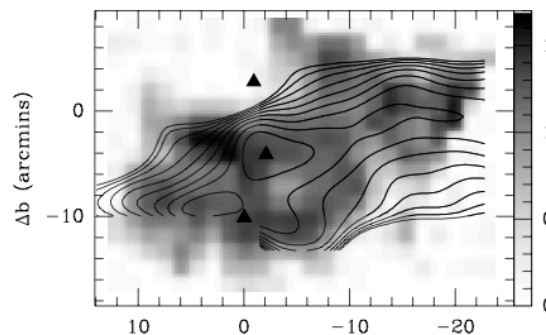
^{12}CO J=2→1 (contours), [CI] (greyscale)



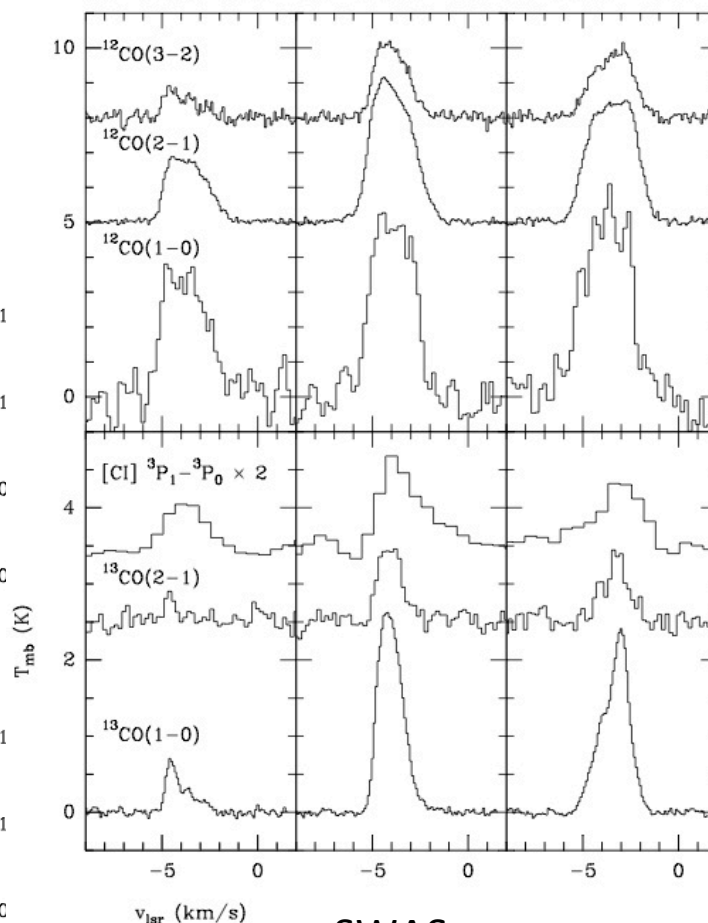
FCRAO: ^{13}CO J=1→0



^{13}CO J=1→0 (contours), [CI] (greyscale)



($\Delta l = -0.9, \Delta b = +2.9$) ($\Delta l = -2.1, \Delta b = -4.0$) ($\Delta l = 0.0, \Delta b = -10.1$)



SWAS

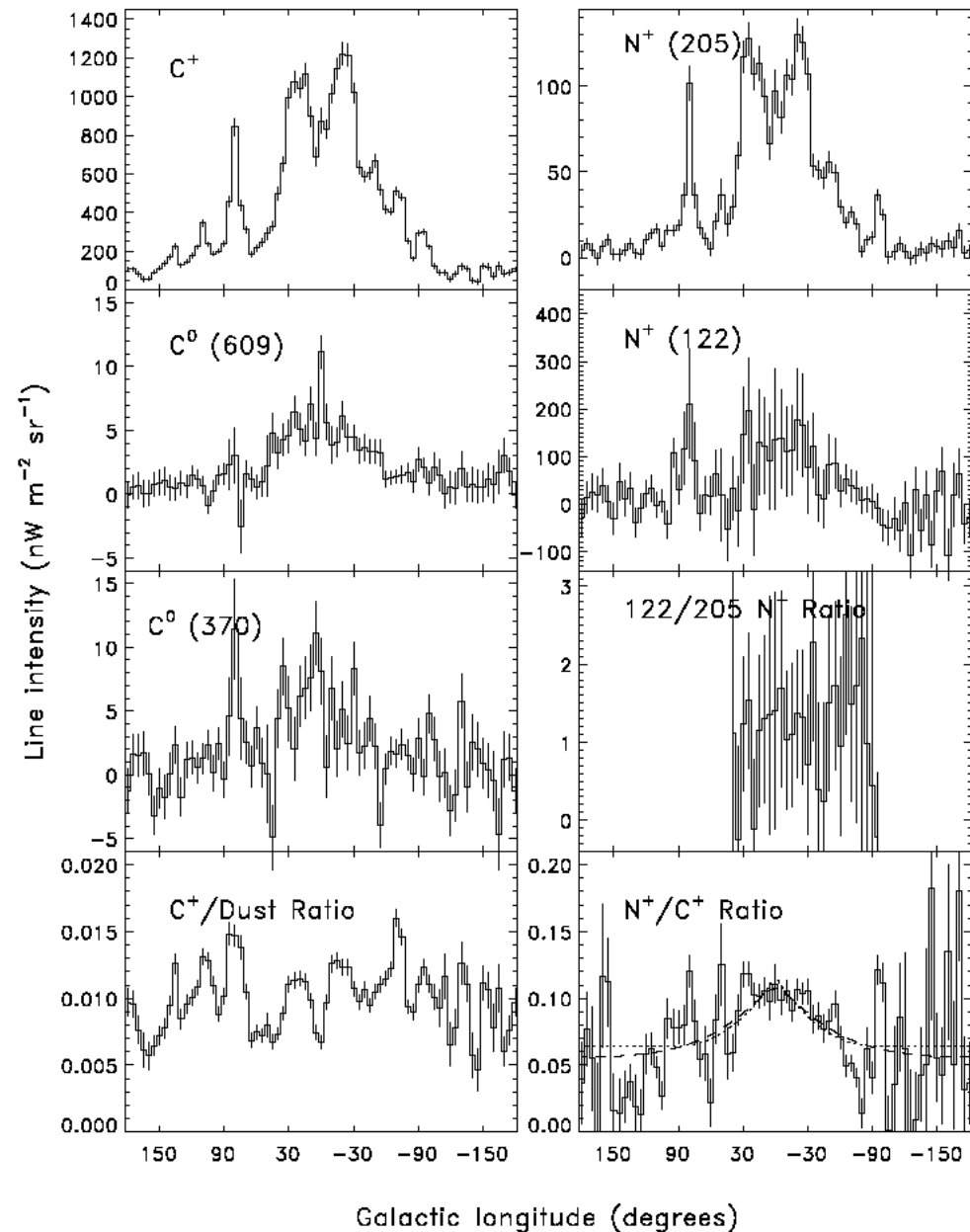
(Bensh et al., ApJ, 2003)

銀河スケールでのCI分布 (1)

COBEの銀河面サーベイ (7°)

(Wright, et al. ApJ, 1991)

[NII],[CII]が明るい



銀河スケールでのCI (2)

東大18cm鏡のサンプル観測

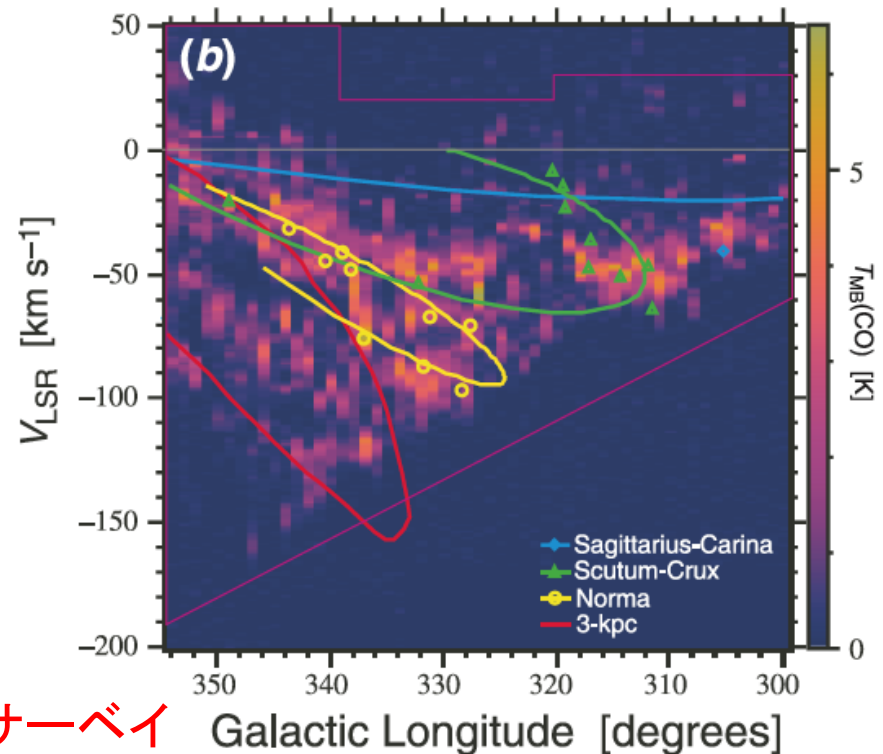
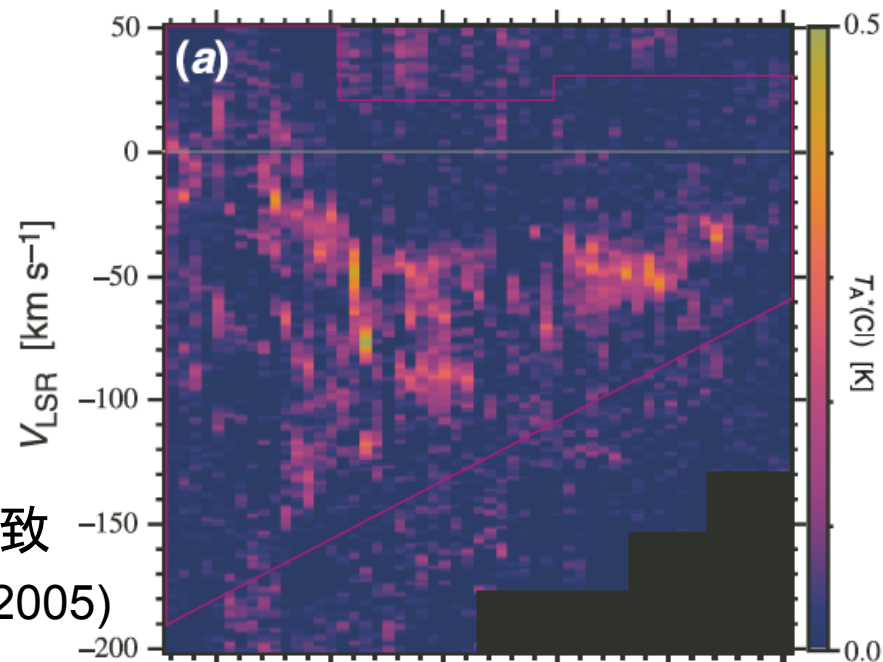
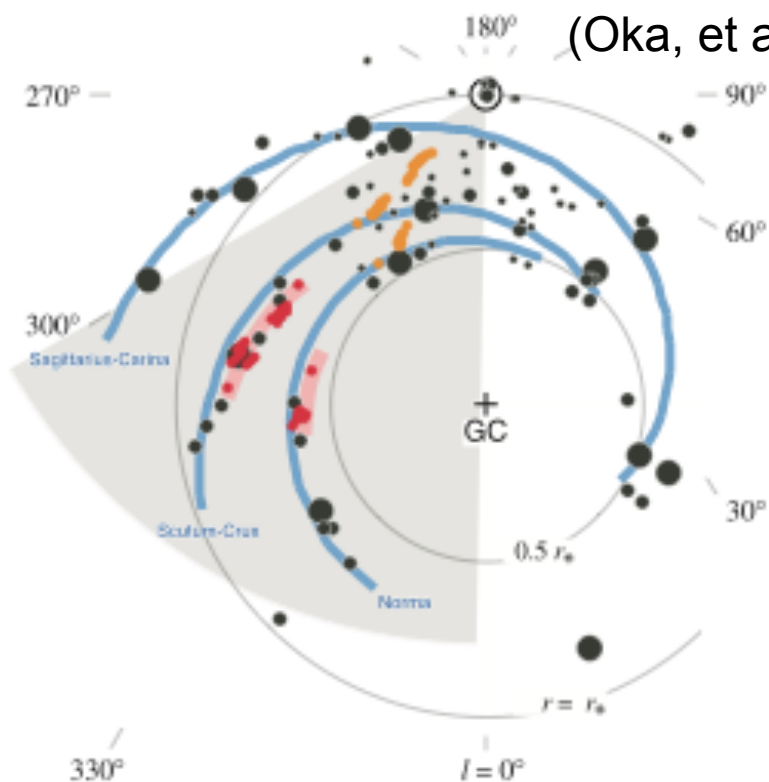
14' beam 1° 間隔、 $300^\circ < l < 354^\circ$

大局的には ^{12}CO 1-0 と類似

強度比C/CO 0.05-0.3

渦状腕の上流でCIが強い

腕での分子雲形成(原子→分子)と合致
(Oka, et al. ApJ, 2005)



次は、南極30cmサブミリ波望遠鏡で銀河面サーベイ

まとめ

- 中性炭素原子輝線C I、492 GHz & 809 GHzは、分子雲の形成と進化解明に有用。
- C Iの分布は、 ^{12}CO 、 ^{13}CO と大局的に類似。質量、励起温度も導ける。
- PDR領域で、C Iピークは分子雲の励起光源側にあるとは限らない。
- 分子雲内部のC I ピークは、化学進化やclumpy PDRモデルで説明が試みられている。
- 南極では、492 GHz & 809 GHzの2輝線が年中観測可能。同時観測で分子雲の形成と進化に迫りたい。