

単一鏡テラヘルツ帯観測による 星間化学

酒井剛¹、渡邊祥正²

1: 電気通信大学、2: 東京大学

目次

- THz帯観測について
- [CI]観測について（時間があれば）

分子輝線

- 臨界密度(n_{cr})

$$n_{cr} \propto m^2 n^3$$

- E_u

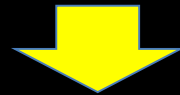
$$E_u \propto \frac{n^2}{4B}$$

High Excitation Lines

Band 11			E_u	n_{cr}
HCN	$J=17-16$	1505.029 GHz	650 K	2(9) cm^{-3}
HCO ⁺	$J=17-16$	1514.583 GHz	650 K	3(8) cm^{-3}
	$J=15-14$	1336.714 GHz	510 K	2(8) cm^{-3}
CO	$J=13-12$	1496.922 GHz	350 K	2(6) cm^{-3}
	$J=11-10$	1267.014 GHz	250 K	1(6) cm^{-3}
c.f. Band 10				
HCO ⁺	$J=10-9$	891.557 GHz	160 K	6(7) cm^{-3}
HCN	$J=10-9$	885.970 GHz	160 K	3(8) cm^{-3}

THz Astronomy

- **高密度・高温の分子ガストレーサー**
(Continuum & Spectral Lines)
e.g.) HCN ($J=4-3$), HCO⁺ ($J=4-3$)
Star Forming Regions, Protoplanetary Disks,
Shocked Regions, AGNs, & SBGs
- **基本的な軽い分子の基底状態の遷移の観測**
(Spectral Lines)
Simple Hydrides (HF, OH⁺, H₂O⁺, H₂D⁺ etc.)
Atomic Lines (C, C⁺, N⁺, O etc.)



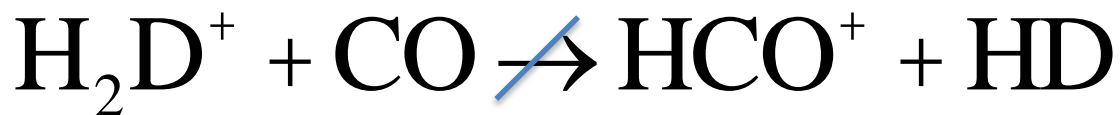
単一鏡を用いたサイエンス



- 分子雲内の分子では重水素濃縮が起きている。
 - 例えば、 $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{D}^+ \sim 0.1$ ($\text{D}/\text{H} \sim 10^{-5}$)

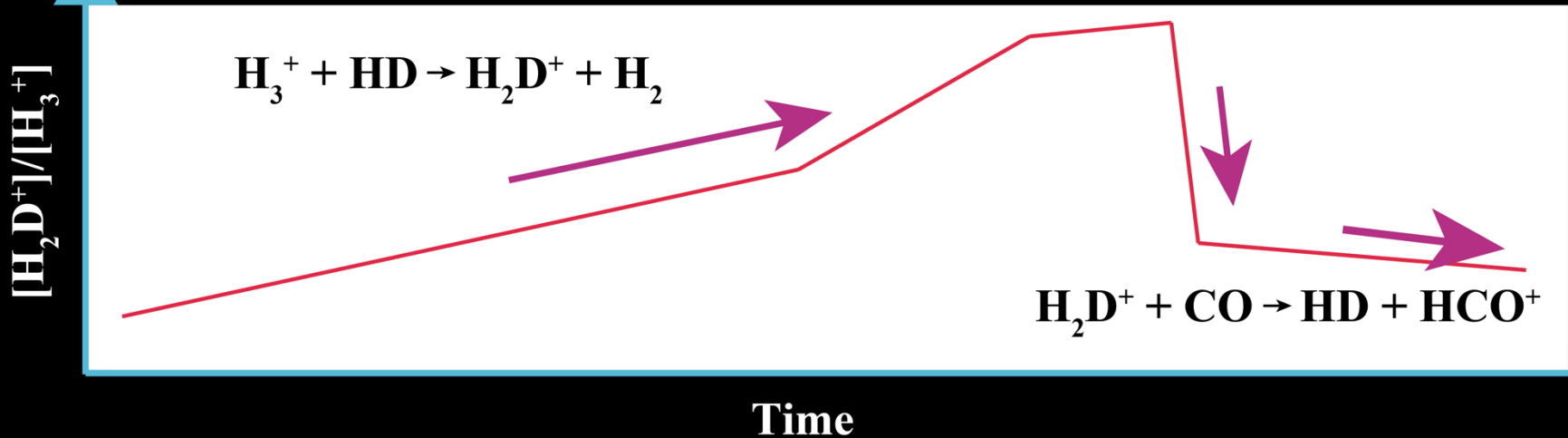
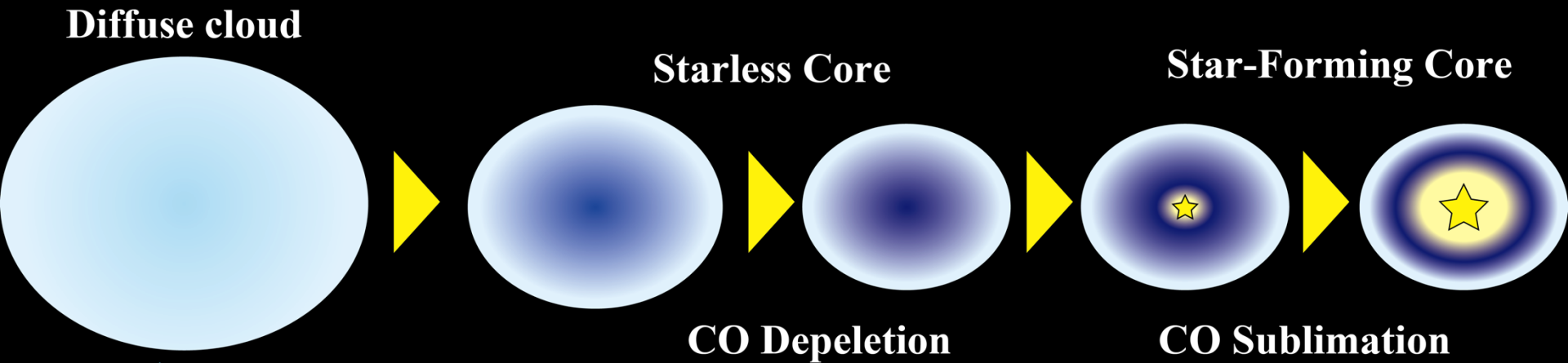


– CO depletion ($< \sim 20 \text{ K}$)



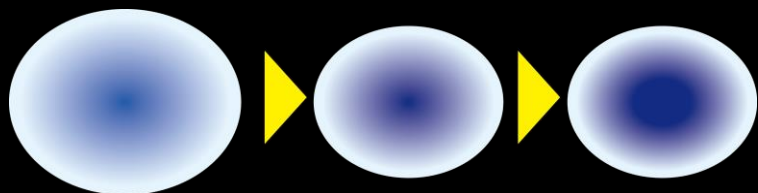
- H_2D^+ は様々な分子の反応に関与しているため、様々な分子で重水素濃縮が起きる。

重水素濃縮と星形成の関係

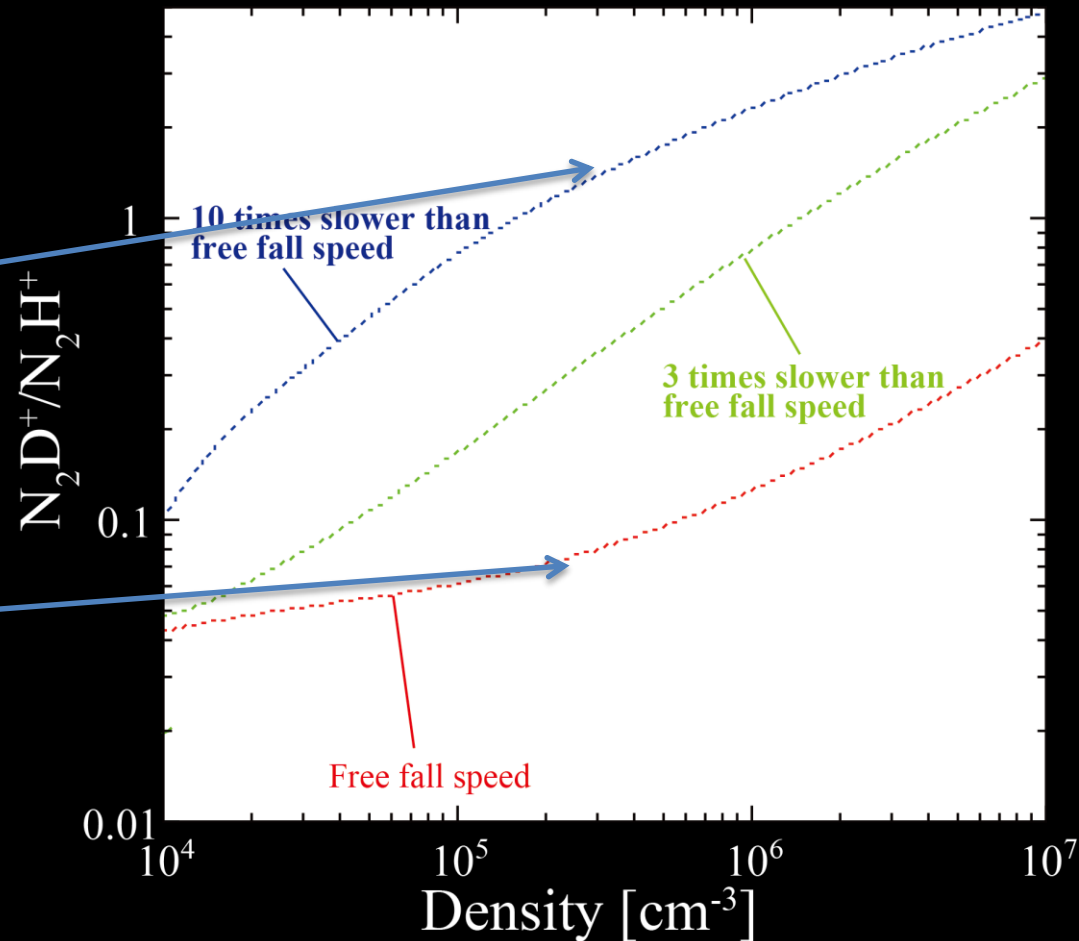
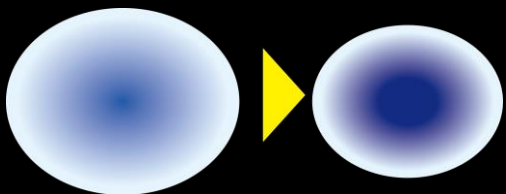


重水素濃縮度と分子雲の収縮速度の関係

Slowly collapsing core

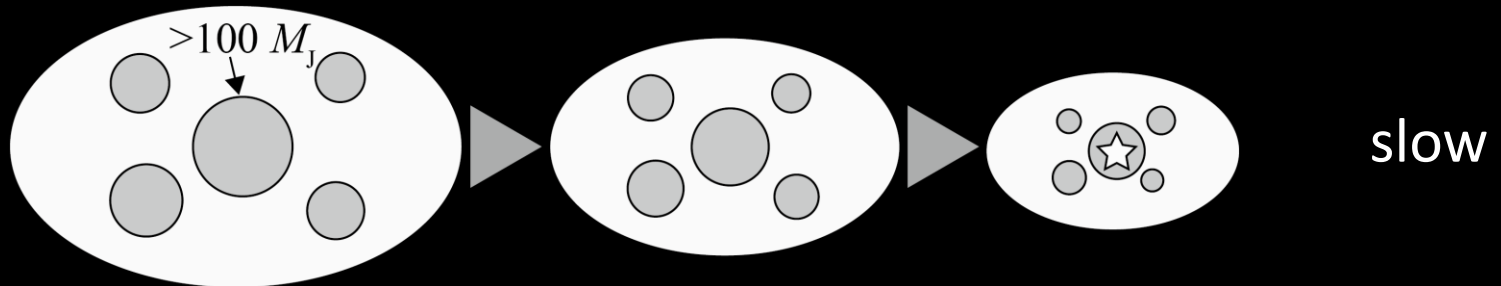


Fast collapsing core

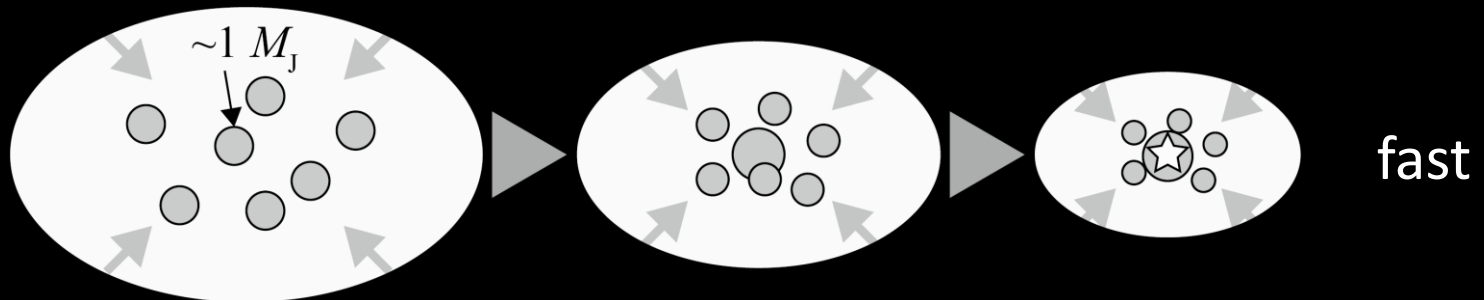


大質量星形成のモデル

- ***Turbulent Core accretion*** (McKee & Tan, 2002, 2003)

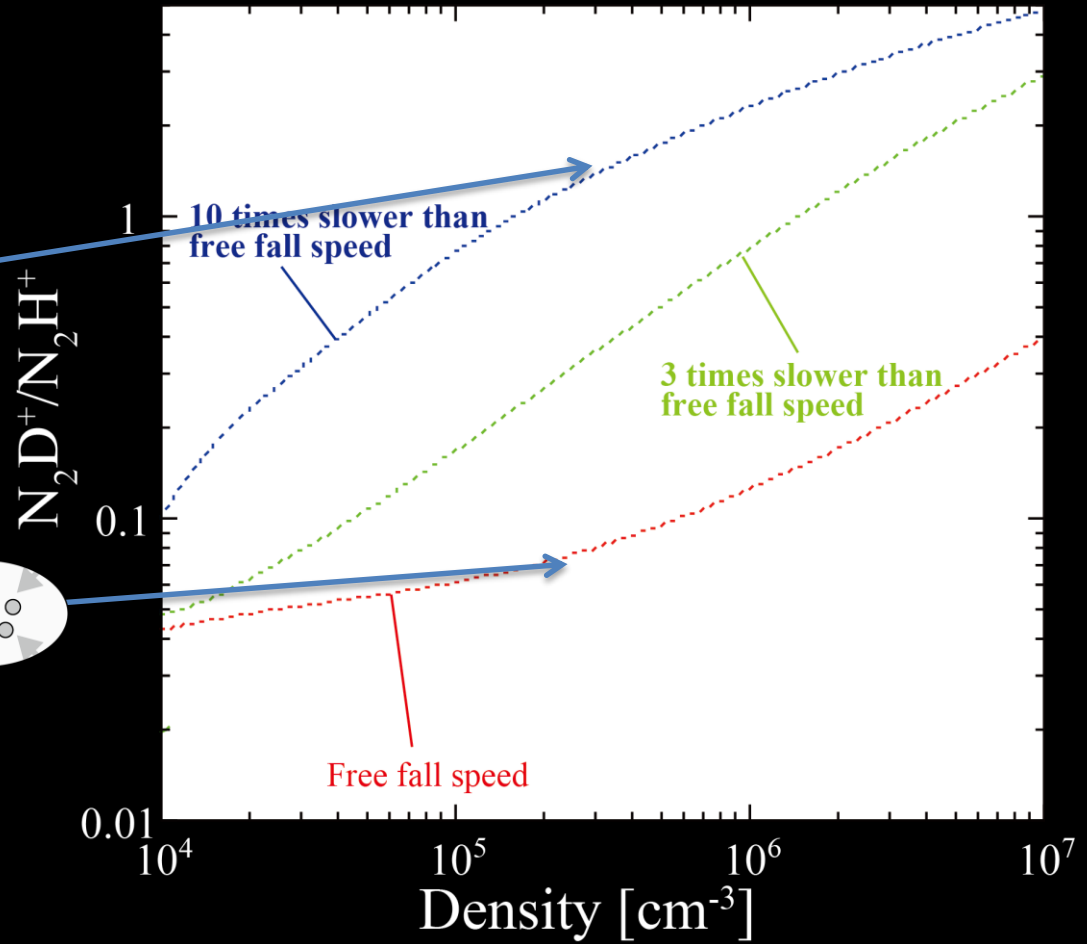
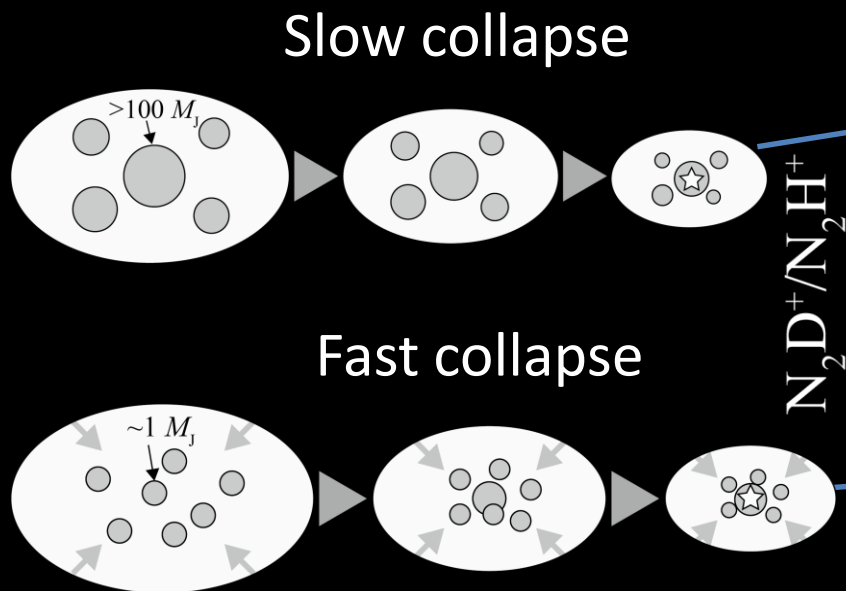


- ***Competitive accretion*** (Bonnell et al. 2001)



2つのモデルでは、分子雲コア形成のタイムスケールが大きく異なる。

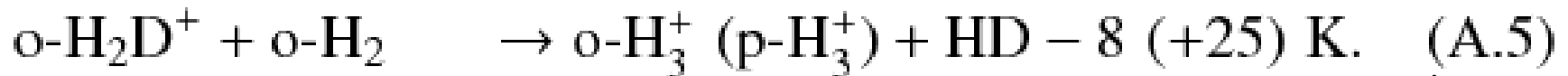
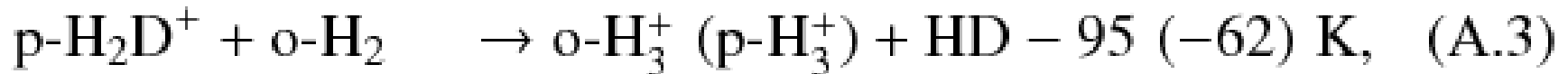
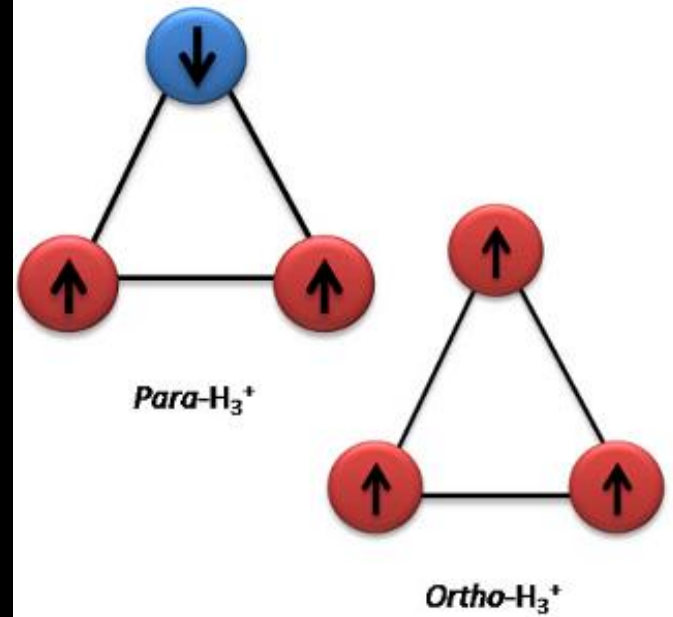
重水素濃縮度と分子雲の収縮速度の関係



重水素濃縮度から、2つのモデルの切り分けも可能(かもしれない)

Ortho and para H_2D^+

- para- H_2D^+ : 1.37 THz
- ortho- H_2D^+ : 372 GHz



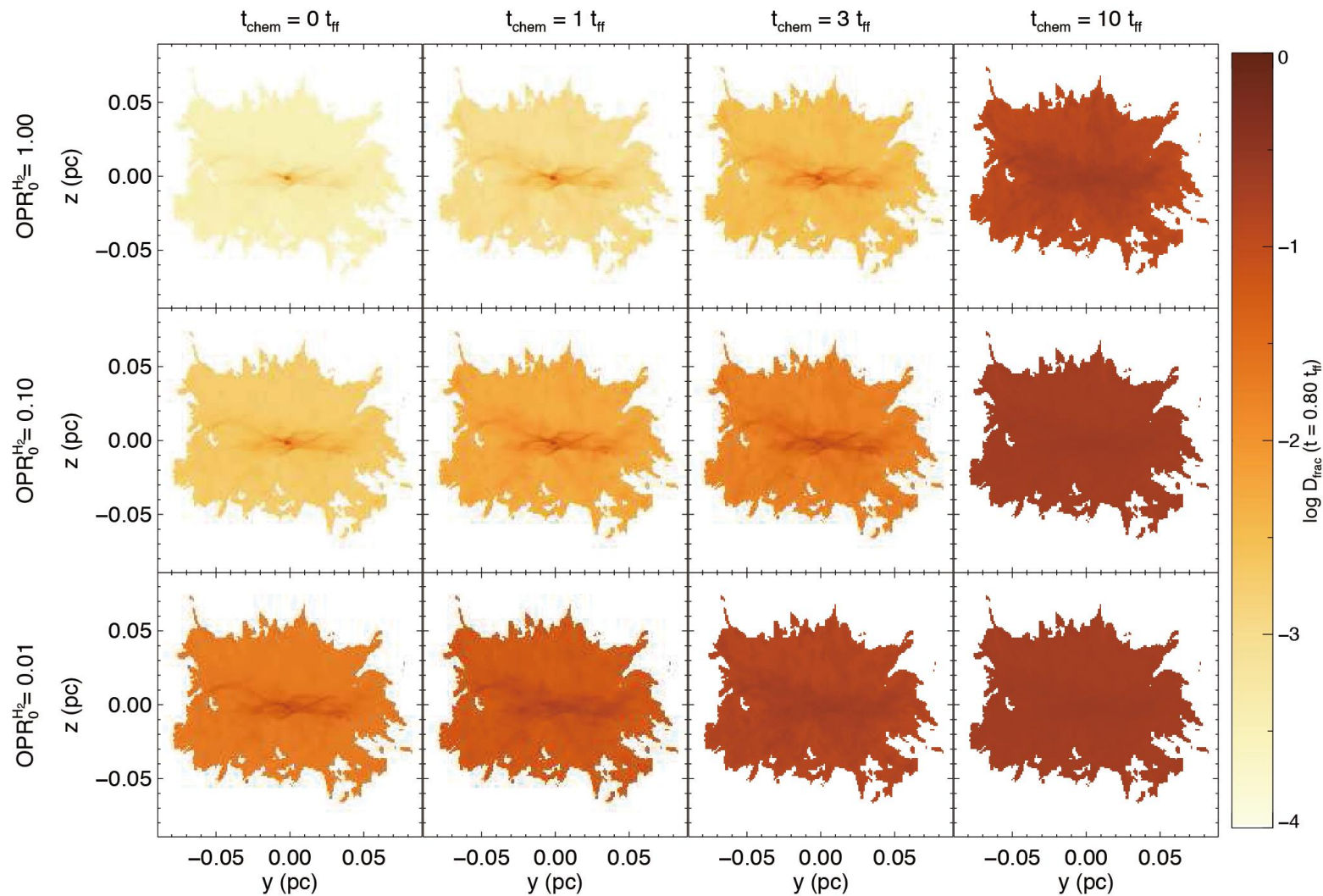
Furuya et al. 2015

o-H_2 の内部エネルギーは p-H_2 の内部エネルギーより約170K高い。

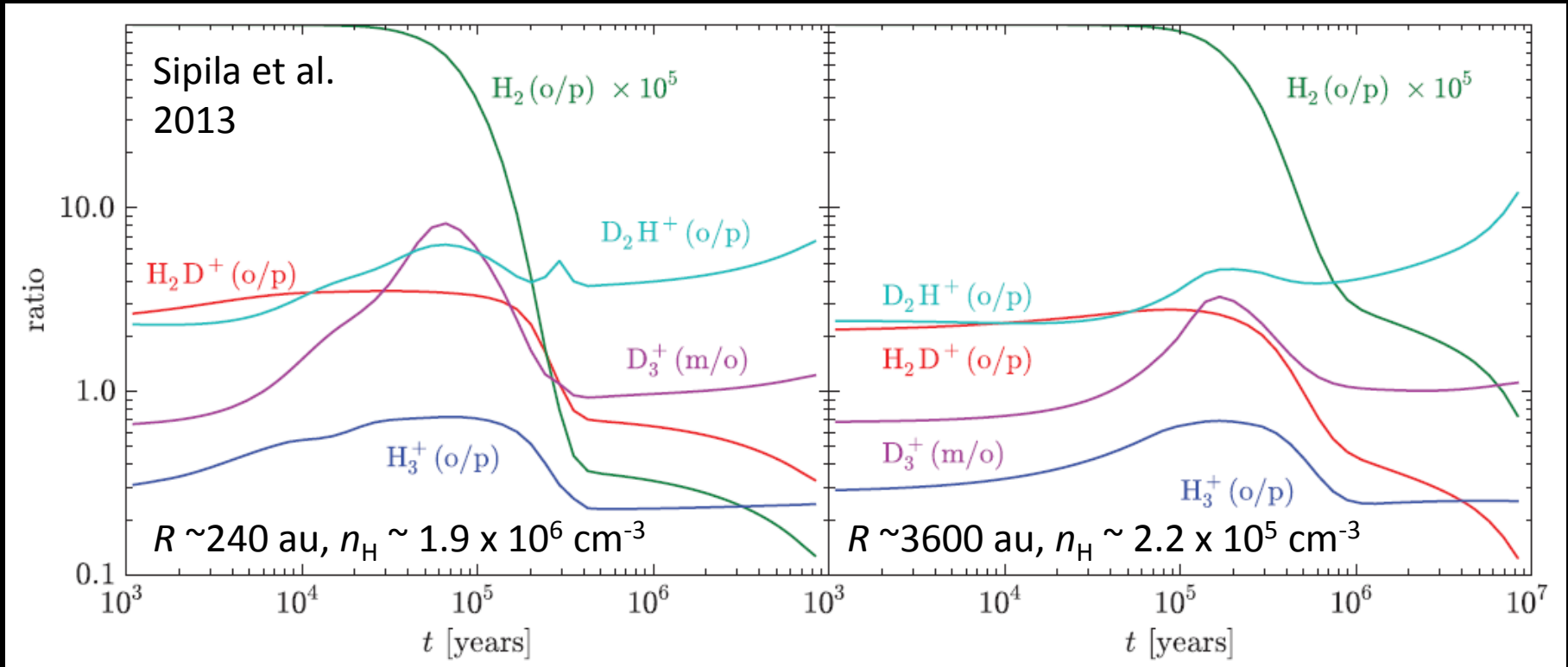
o-H_2 が多いと、重水素濃縮が妨げられる。

化学モデル計算の例

Goodson, Kong et al. 2016



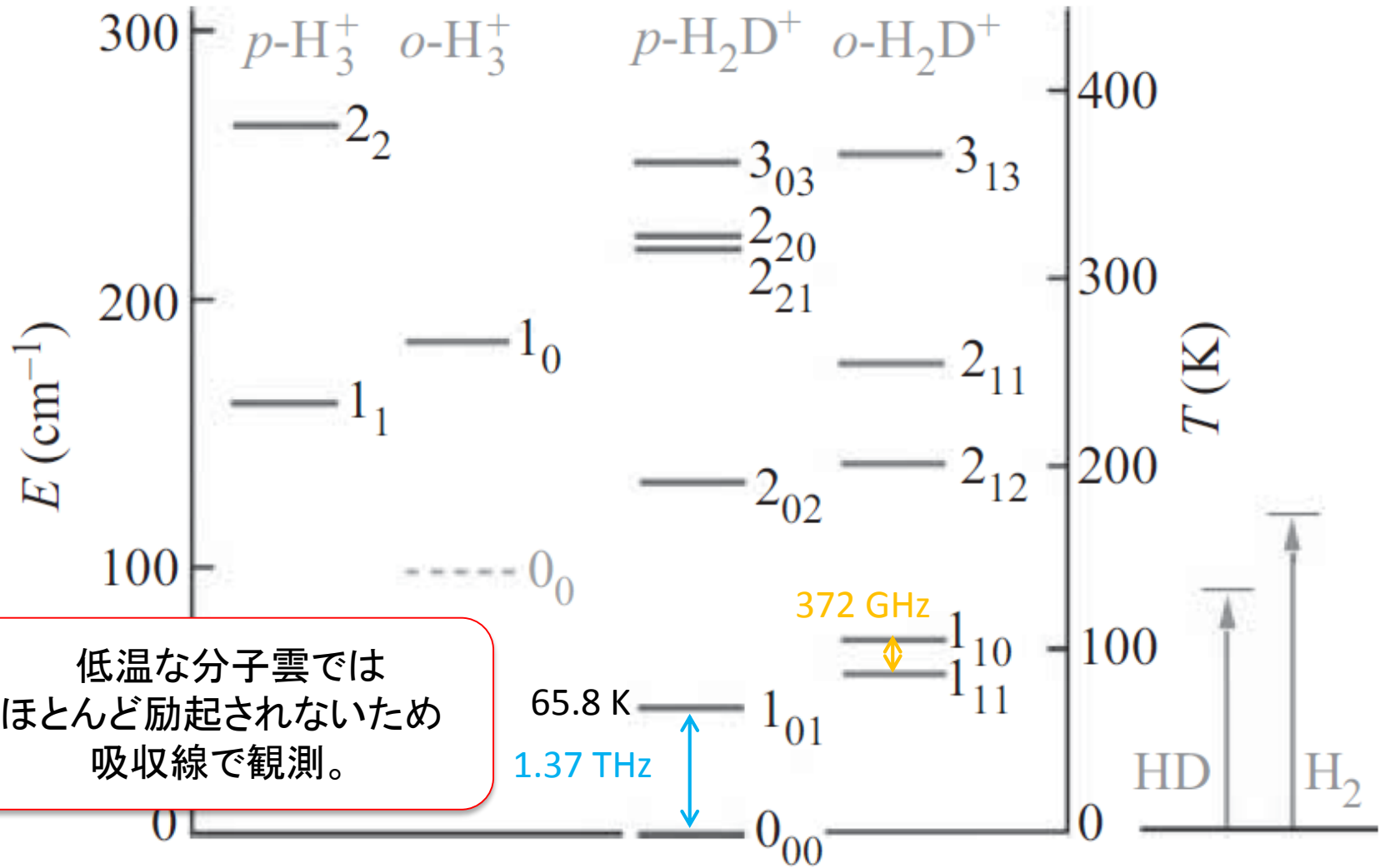
H₂D⁺のortho/para比



- H₂D⁺のo/p比は、H₂のo/p比に依存する。

H₂D⁺のo/p比を知ることは重水素濃縮の変化を理解するために重要

Ortho and Para H_2D^+

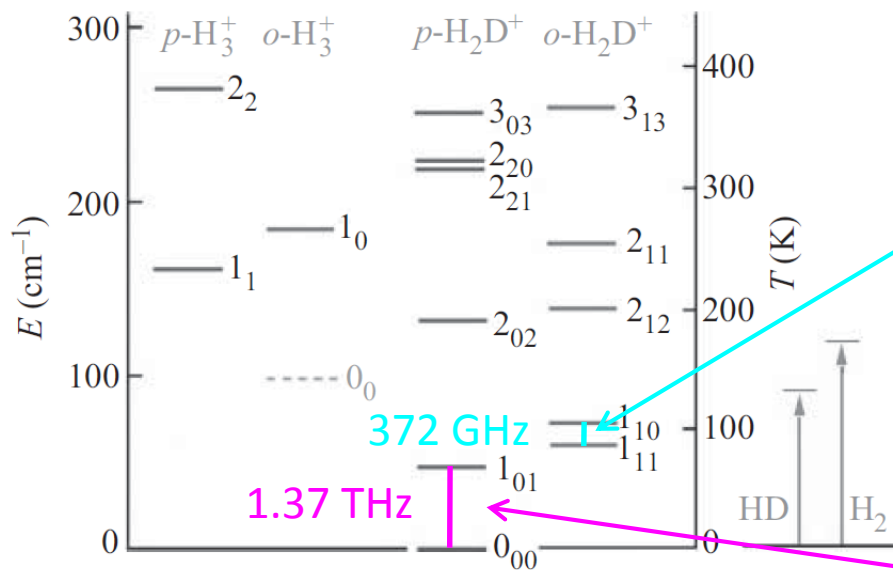


低温な分子雲では
ほとんど励起されないため
吸収線で観測。

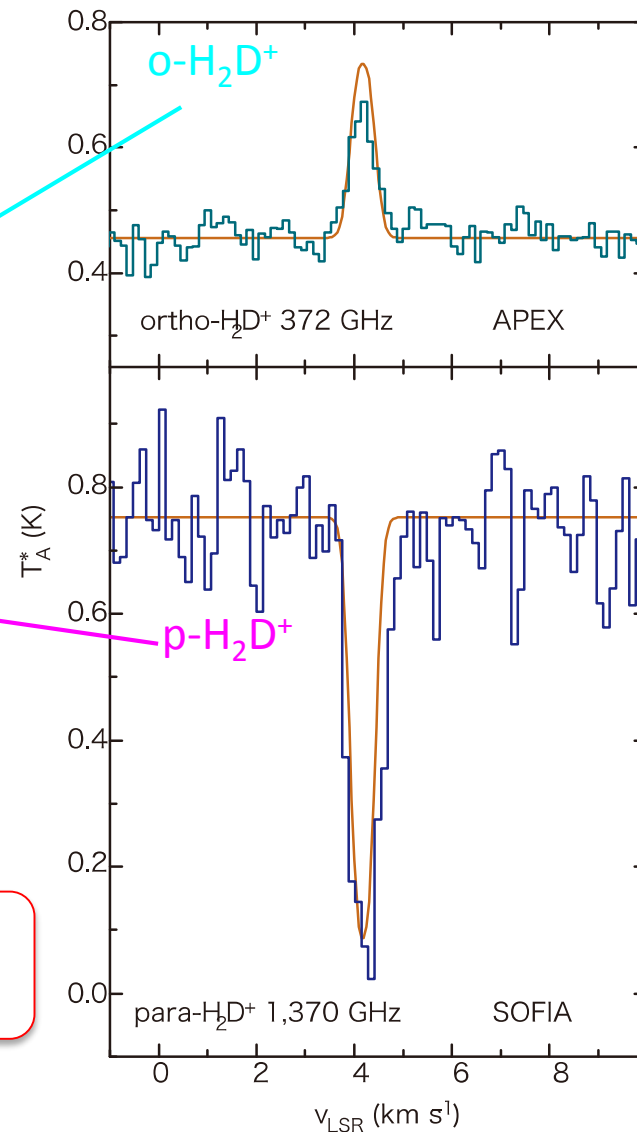
SOFIAによるp-H₂D⁺の観測

Brünken et al. 2014, Nature

IRAS 16293-2422

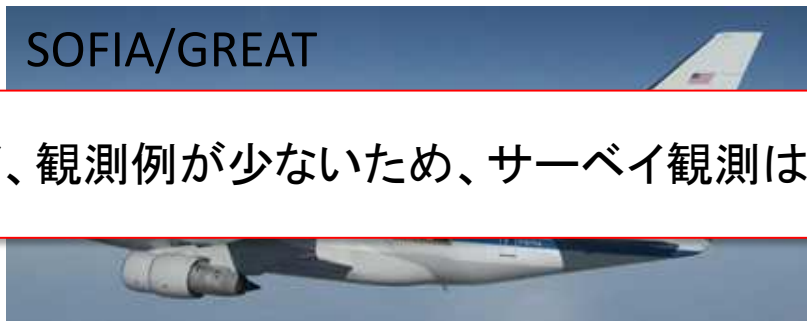


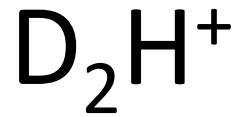
$$o\text{-H}_2\text{D}^+ / p\text{-H}_2\text{D}^+ = 0.07 \pm 0.03$$



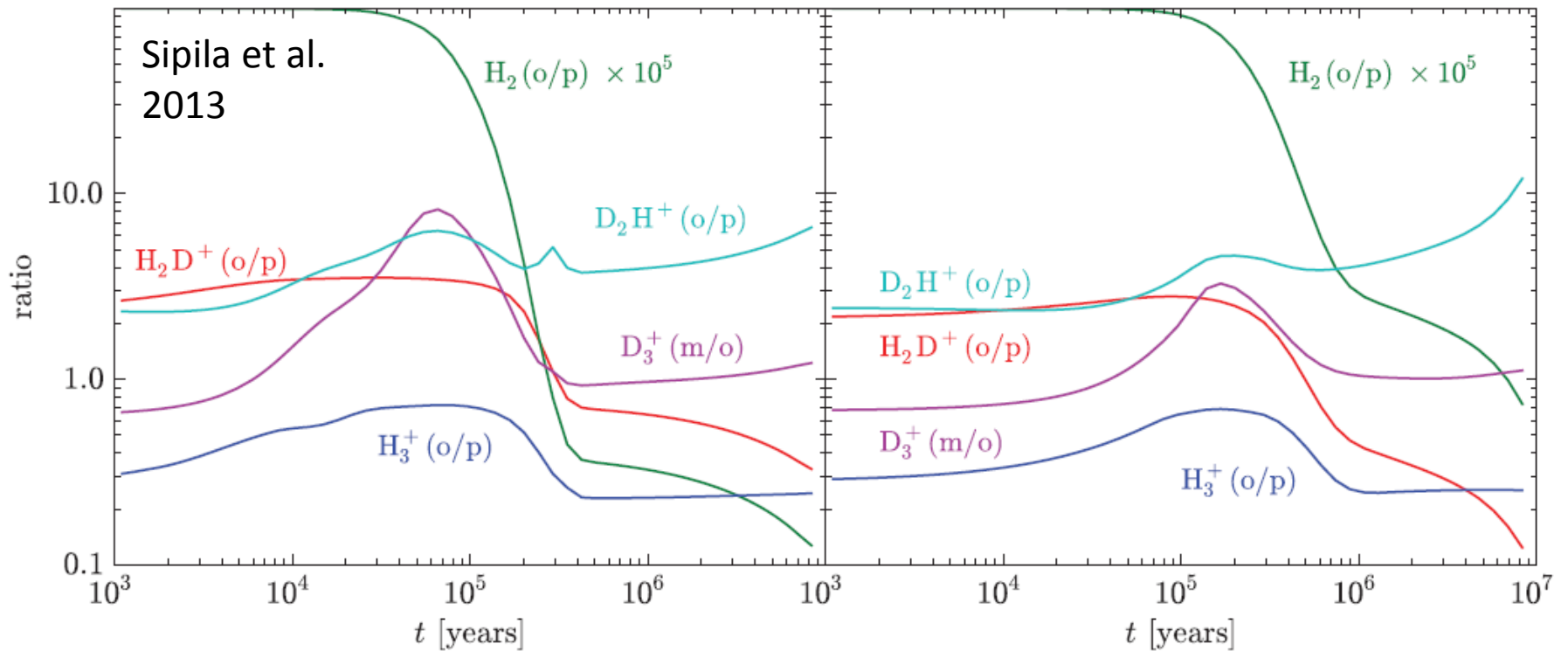
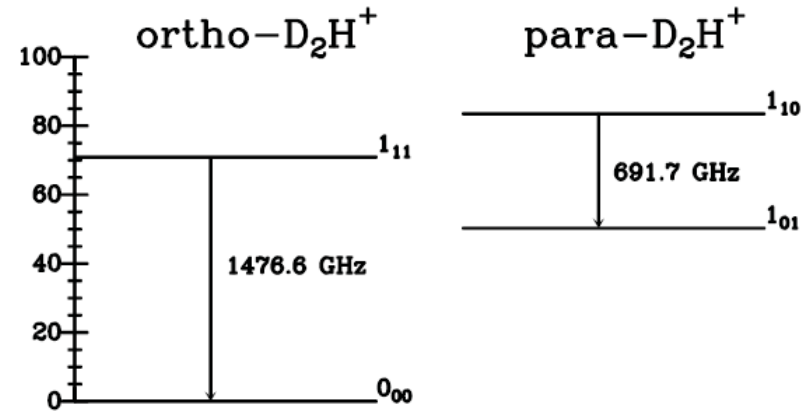
SOFIA/GREAT

まだ、観測例が少ないため、サーベイ観測は重要



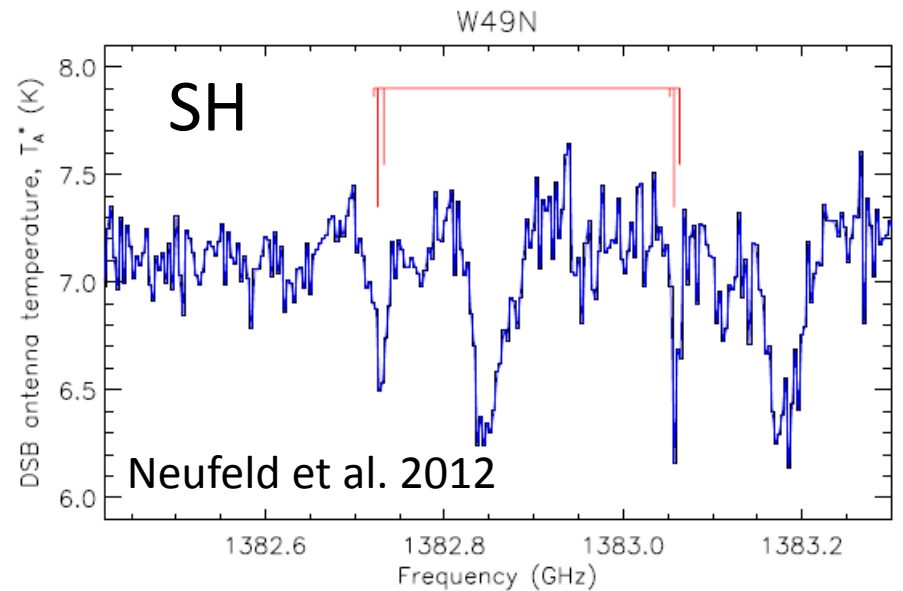
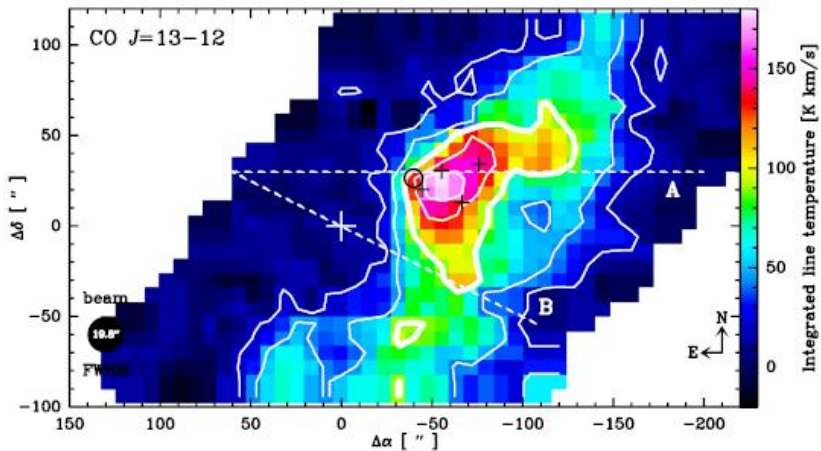
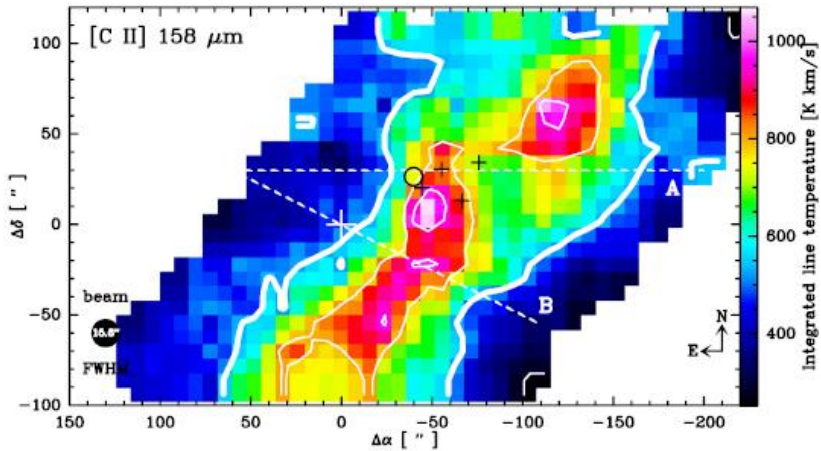


- ortho- D_2H^+ : 1476.6 GHz
- para- D_2H^+ : 691.7 GHz

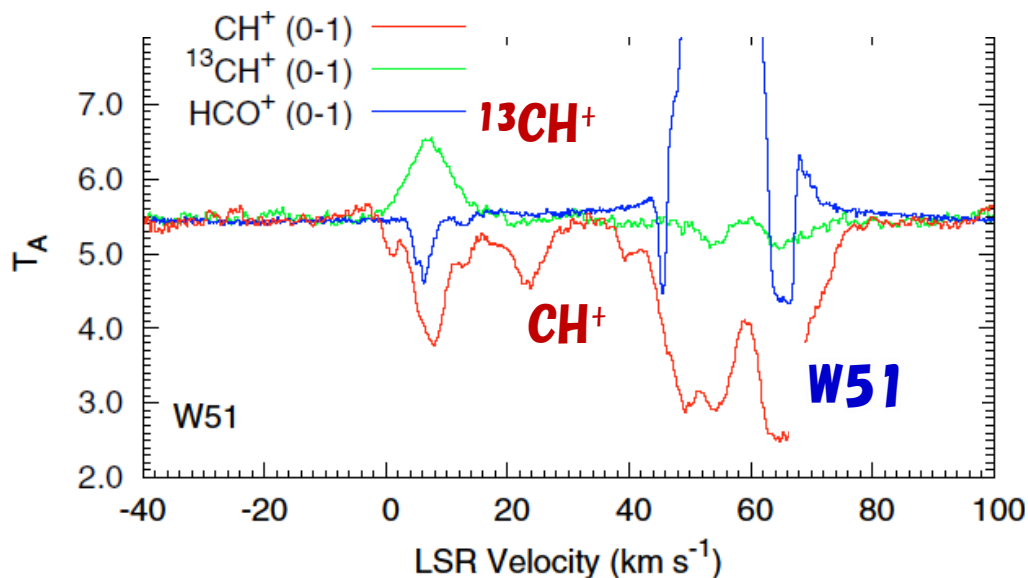


SOFIA in Operation

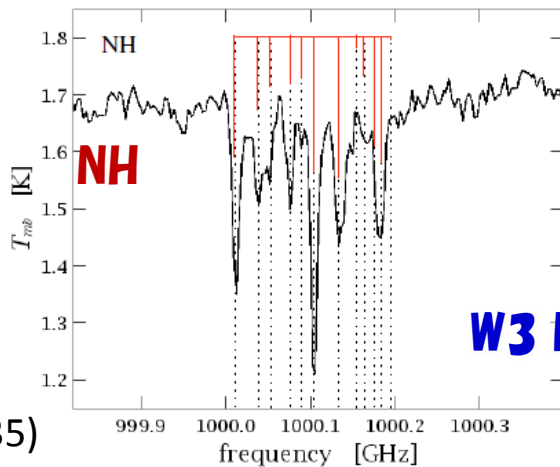
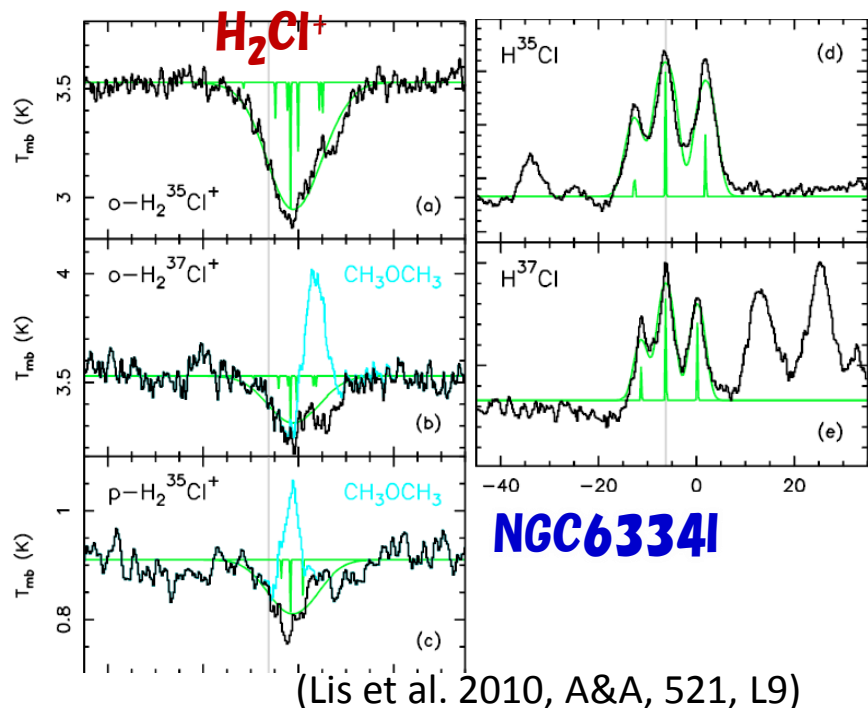
Perez-Beaupuits et al. 2012
M17SW



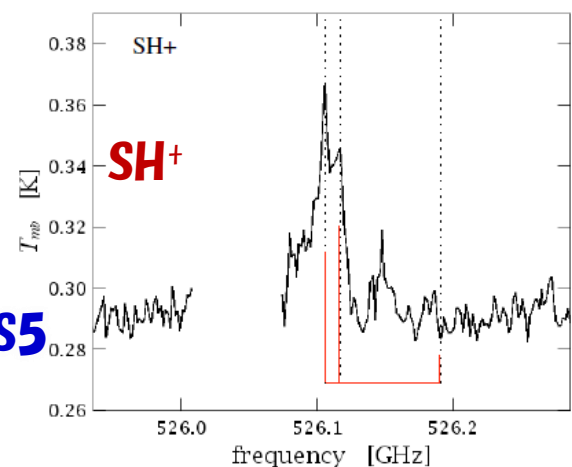
Herschel/HIFI: Light Species



(Emission lines in the CH^+ and $^{13}\text{CH}^+$ spectra are all methanol lines from the SFRs)
 (Falgarone et al. 2010, A&A, 521, L15)



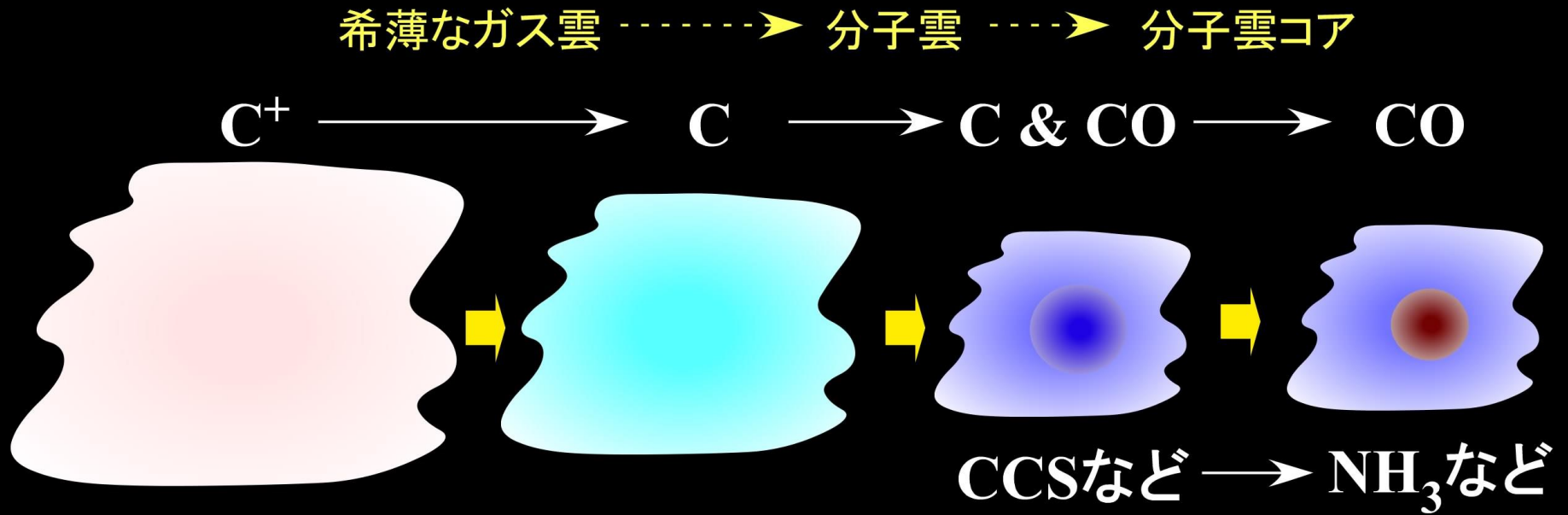
(Benz et al. 2010, A&A, 521, L35)



THz帯観測 まとめ

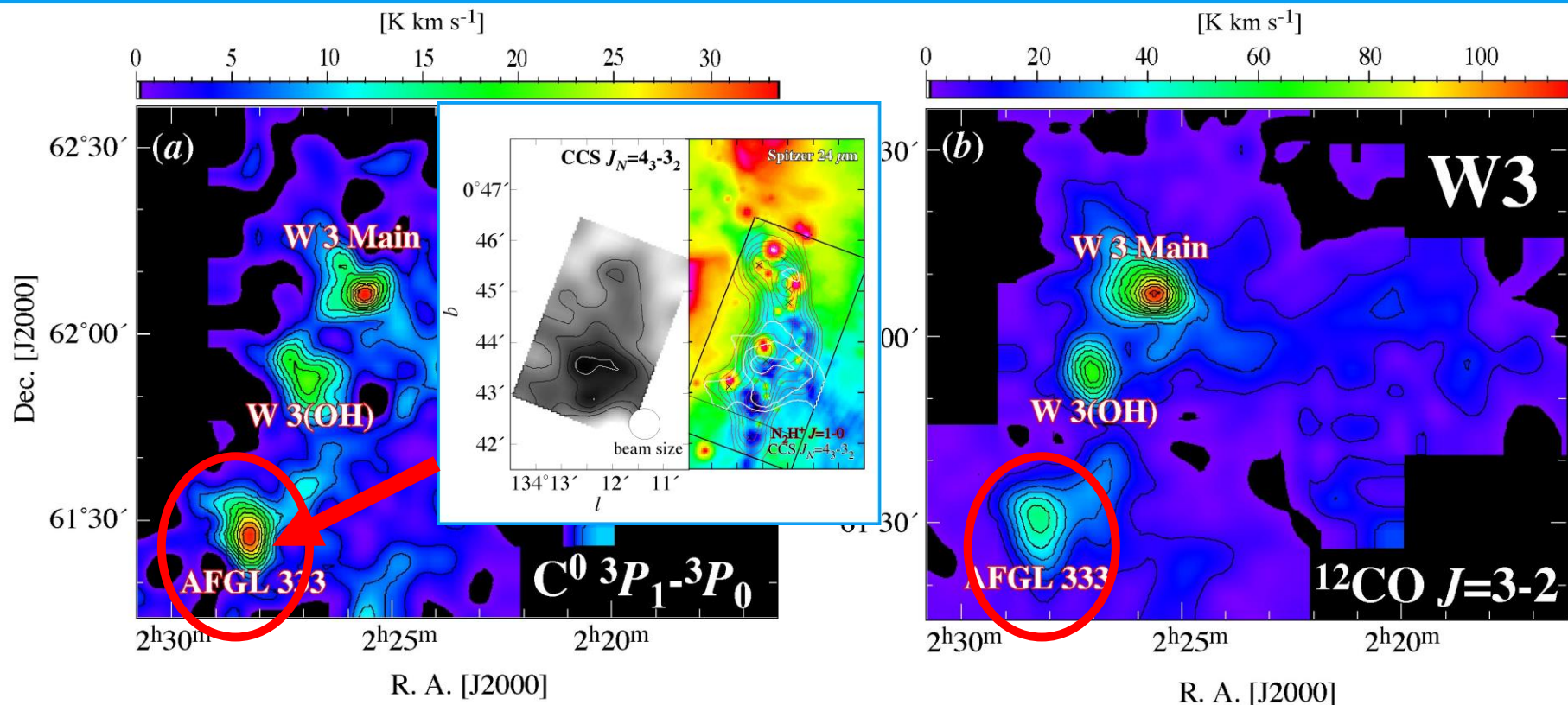
- 軽い分子の基底状態の遷移の観測
 - 特にpara- H_2D^+ : 1.37 THz
 - H_2D^+ のo/p比を調べることで、重水素濃縮についてより正確な情報が得られる。
 - 低温な分子雲では、あまり励起されない。
 - 吸収線で観測される。
 - 観測領域がバイアスされる。
 - まだ観測例が少ないので、サーベイ観測は重要
- シングルビーム (or 2ビーム)
 - + FMLO (田村、谷口 et al.)

中性炭素原子(C⁰)



- 分子雲形成初期にはC/CO比が高い。

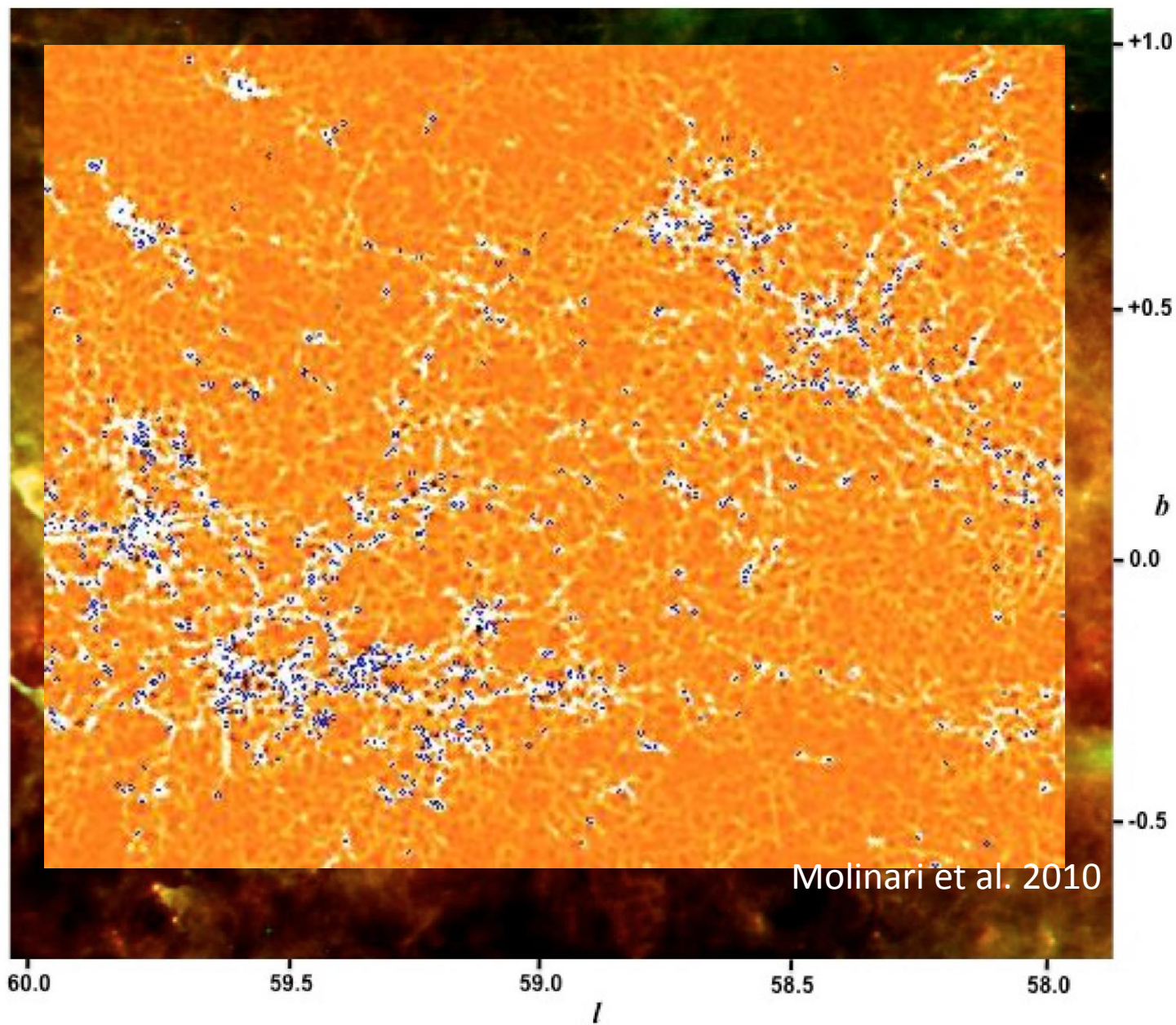
[CI] toward the W 3 GMC



C/CO比から分子雲形成について調べる。

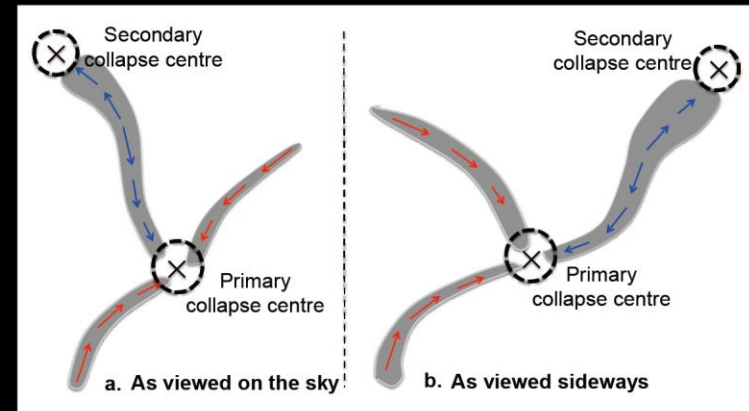
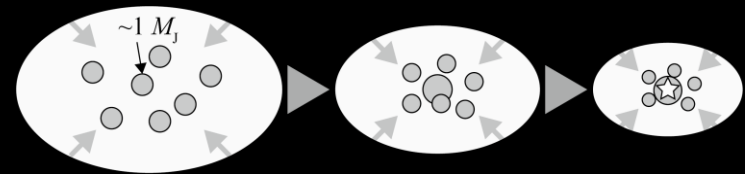
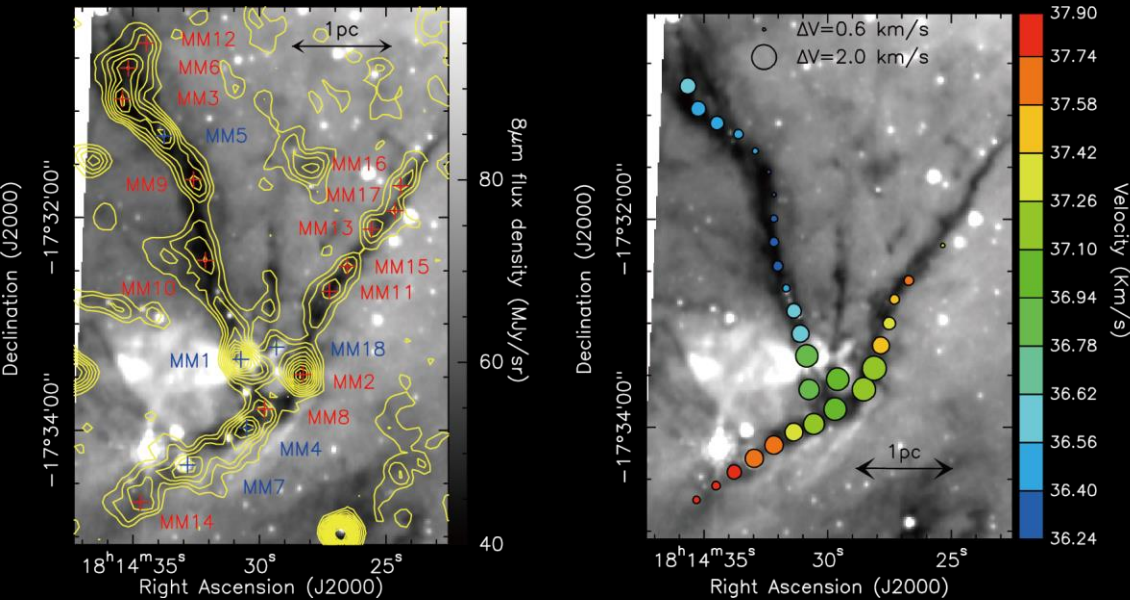
[CI]: 492 GHz (809 GHz)

分子雲のフィラメント構造



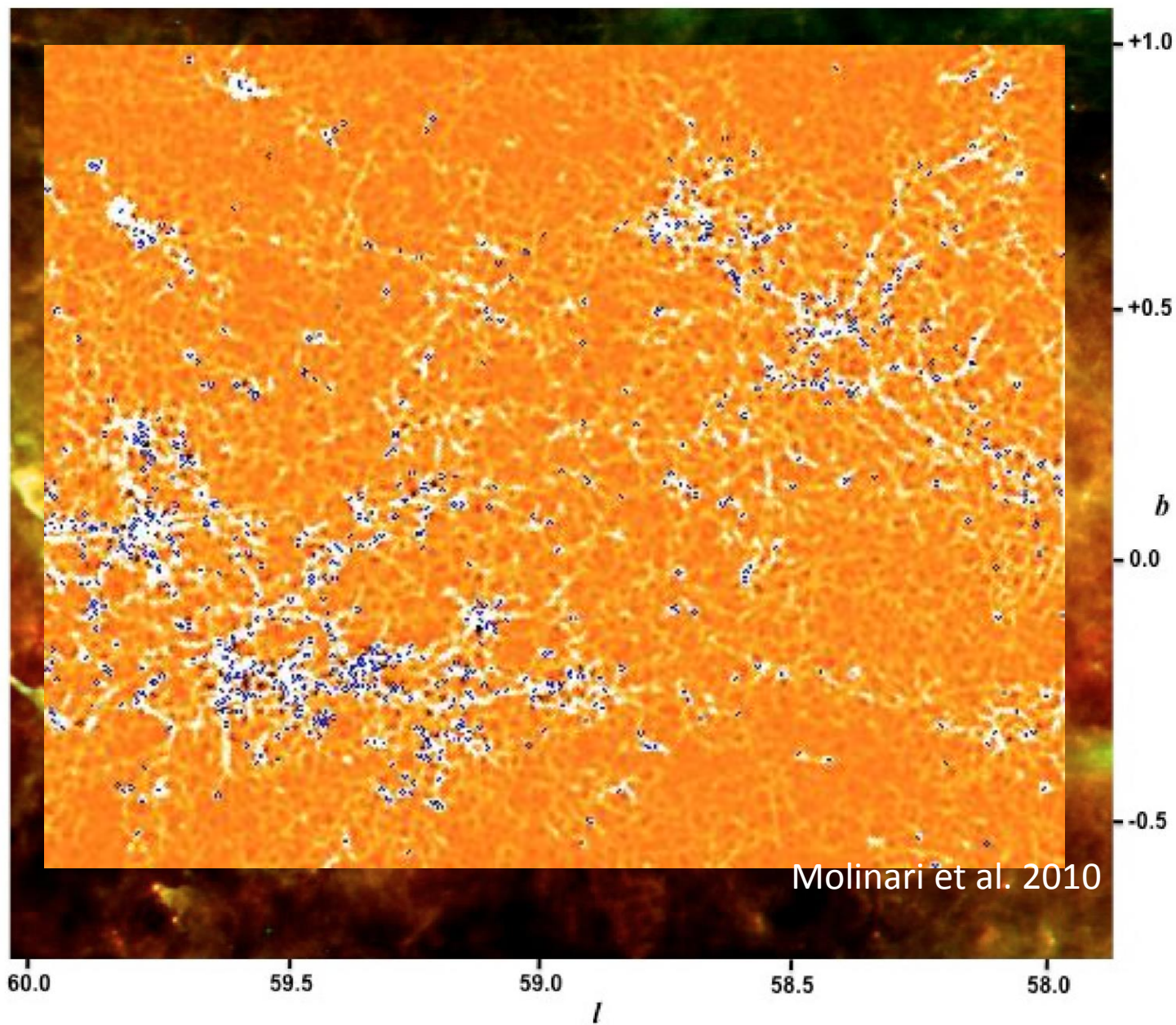
フィラメントを介した質量降着

- Peretto et al. 2014



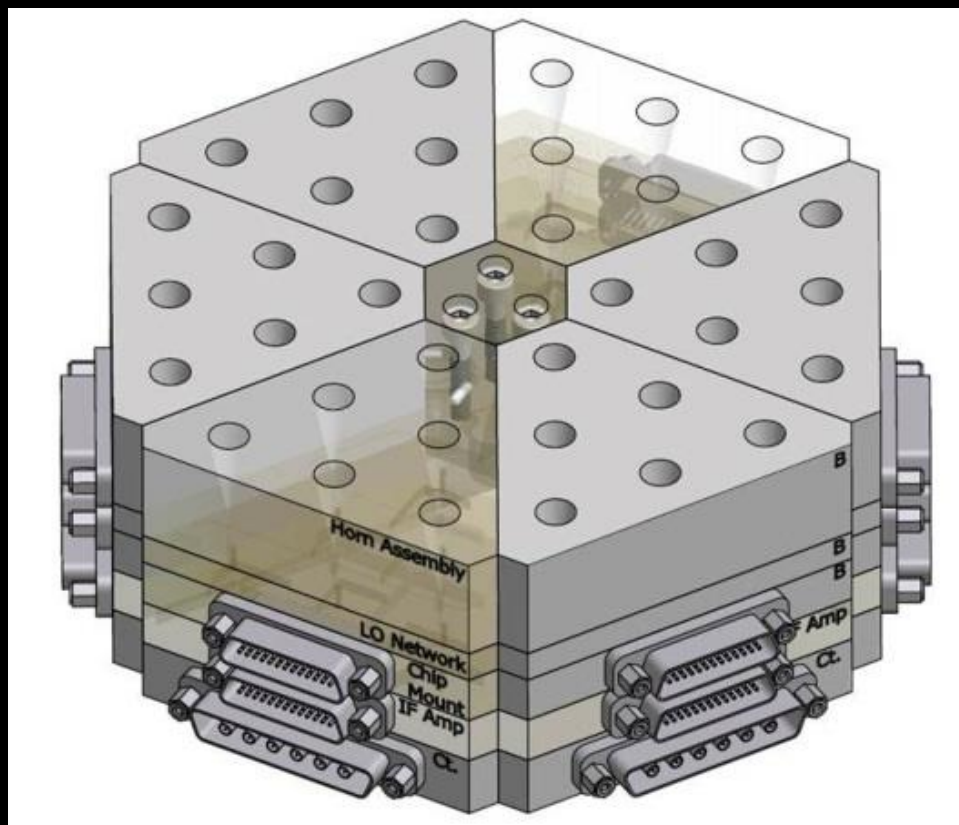
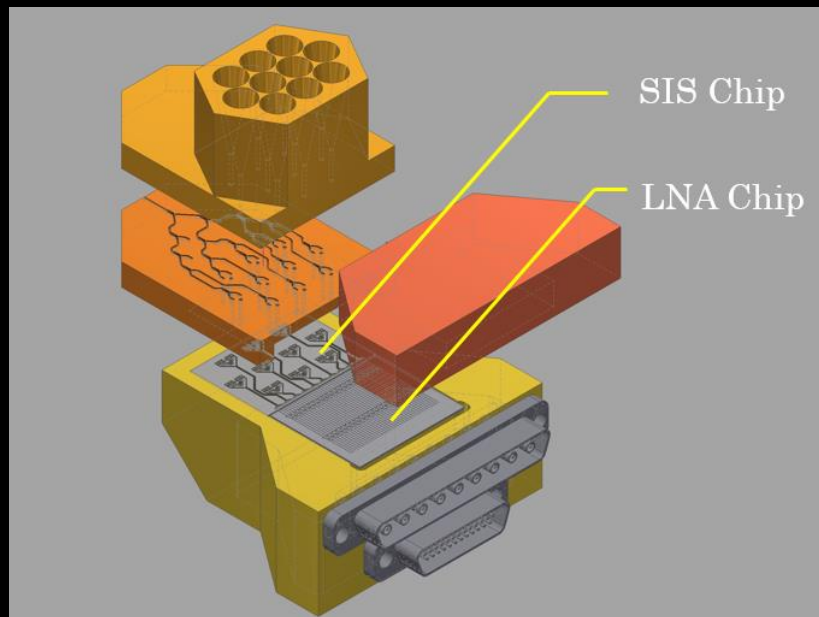
c/CO比からも分子雲クランプ形成の
タイムスケールについて調べる。

分子雲のフィラメント構造



[CI]サーベイ用マルチビーム受信機

- サーベイ用マルチビーム受信機
(+ 超伝導分光計)



(受信機WSのShanさんのスライドから)

まとめ

- THz帯
 - 基本的な軽い分子の観測
 - 特にpara-H₂D⁺
 - 必要な受信機
 - シングルビーム
- [CI] 492 GHz
 - 銀河面サーベイ
 - 必要な受信機
 - マルチビーム