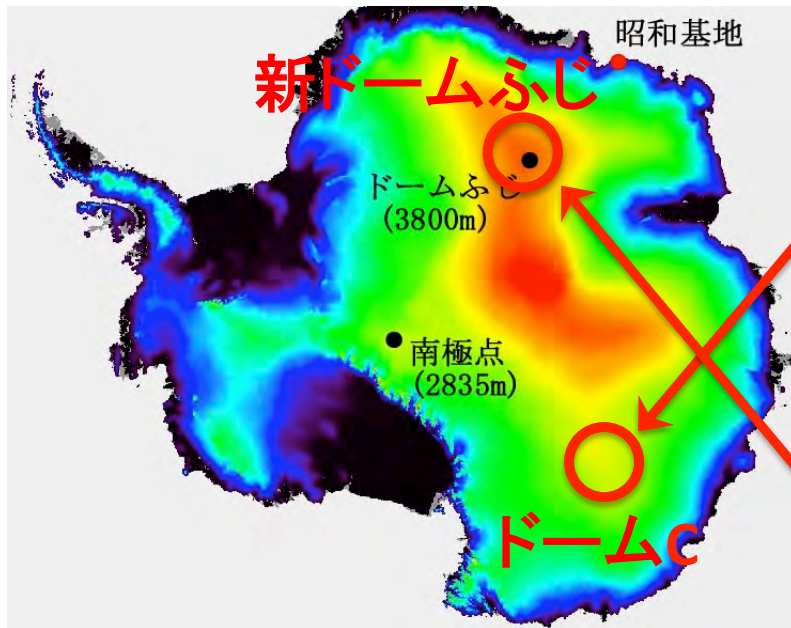


# 南極望遠鏡に向けたX線化学と 重水素化合物の観測的研究

渡邊祥正 (宇宙観測研究室)

# 南極テラヘルツ望遠鏡計画



## 南極10m電波望遠鏡

- 周波数:  
200 GHz ~ 1500 GHz
- 鏡面精度:  $< 20\mu\text{m}$
- 指向精度:  $< 0.5''$
- 視野:  $\sim 1$ 平方度
- 電波カメラ
- ヘテロダイン受信機



## 標高が高い

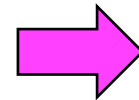
標高: 3,200 – 4,000 m

## 気温が極めて低い

平均気温:  $-54^{\circ}\text{C}$  ( $-20^{\circ}\text{C} \sim -80^{\circ}\text{C}$ )

水蒸気量が非常に少ない

## 晴天率が高い

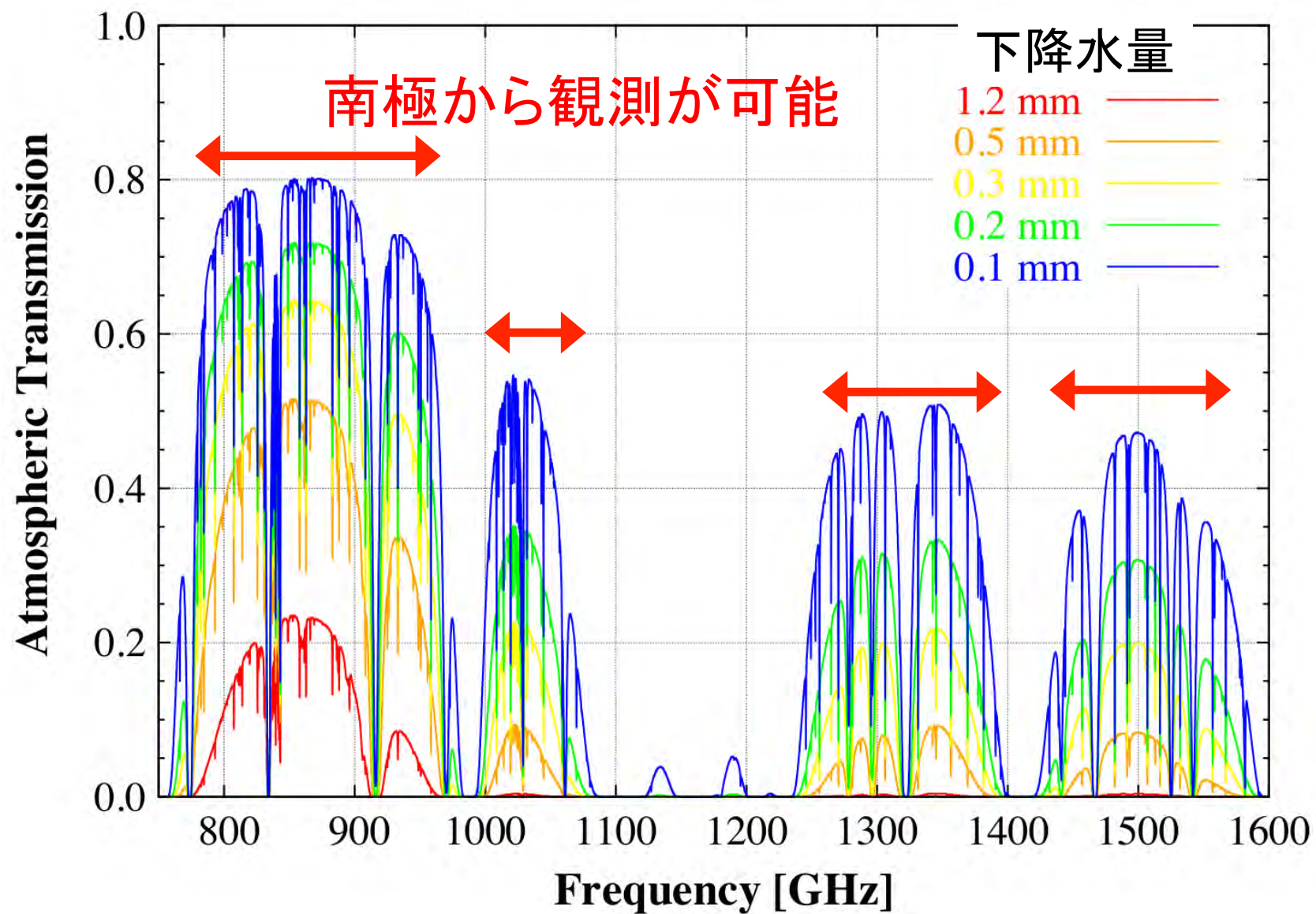


## 南極30m級電波望遠鏡

(検討中)

テラヘルツ帯での  
観測が可能

# テラヘルツ帯における大気の窓

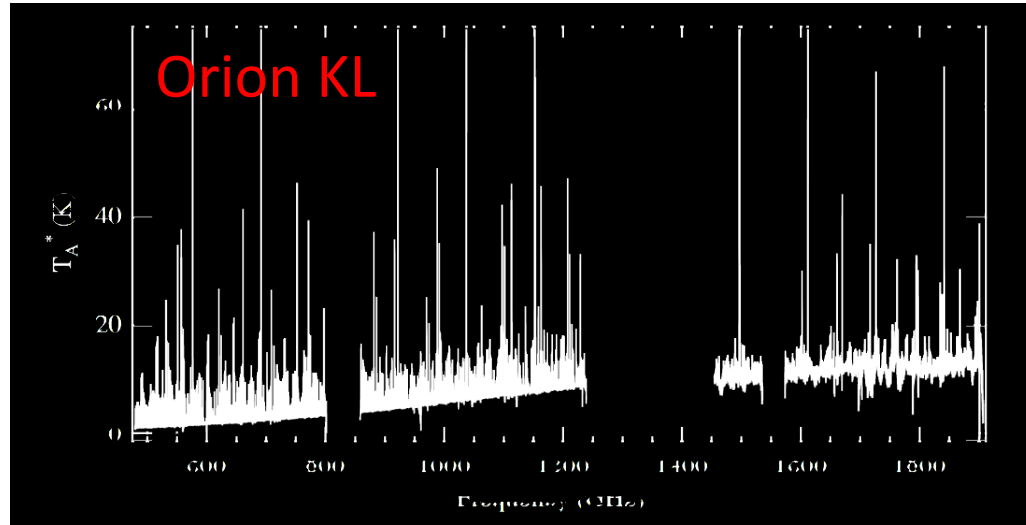


# これまでのテラヘルツ帯の観測

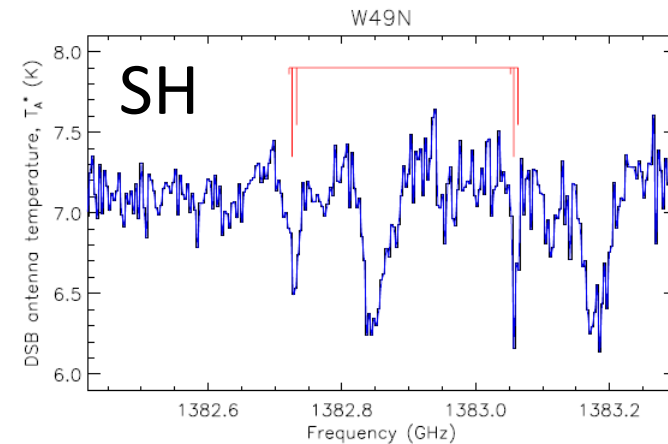
## Herschel衛星 (主鏡口径3.5 m)



Bergin et al. 2011



## SOFIA (主鏡口径2.5 m)



Neufeld et al. 2012

衛星や航空機のため主鏡口径が小さい

# 南極テラヘルツ望遠鏡の観測ターゲット

## 南極望遠鏡: 大口径(10m)のテラヘルツ望遠鏡

- 銀河形成・銀河進化 (暗黒銀河探し)
- 活動銀河核(AGN)
- 近傍銀河
- 銀河面サーベイ
- 星惑星形成
- 星間化学
- 時間変動天体
- 惑星大気

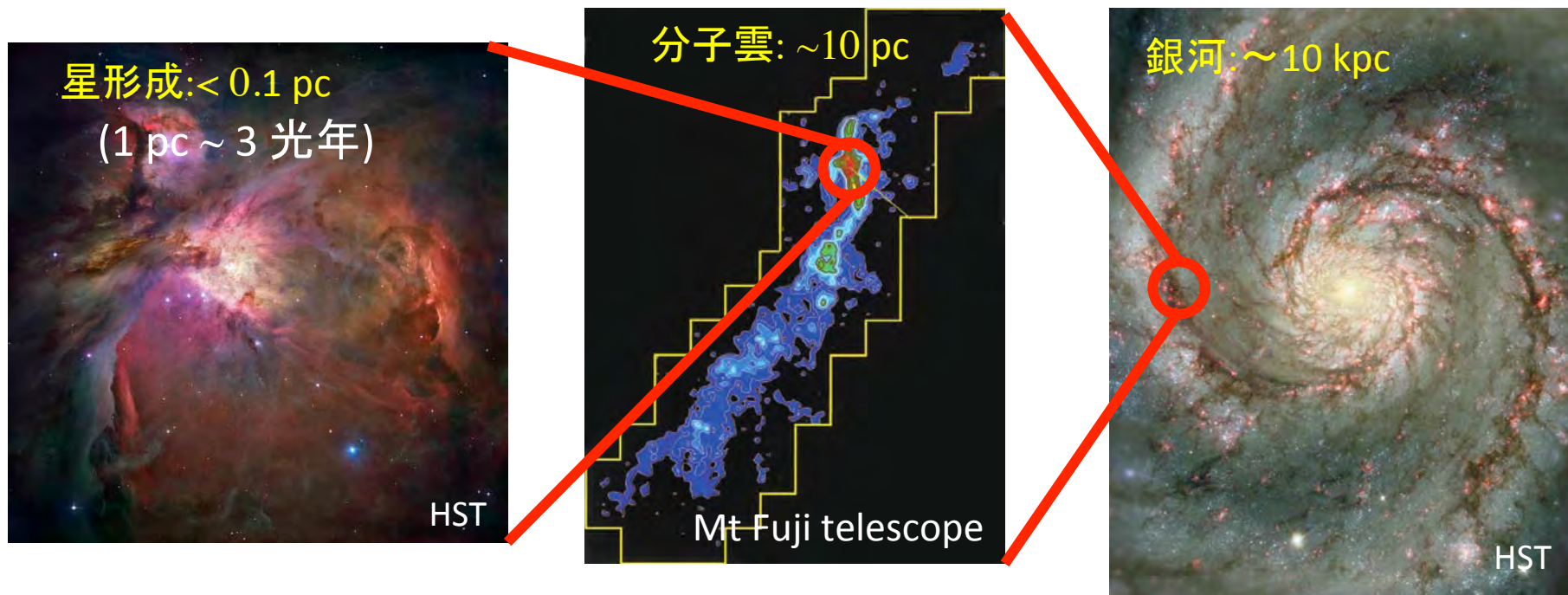
本研究のターゲット

ヘテロダイン観測(分光観測)

→ 星間分子の化学組成



# 分子雲・星間分子



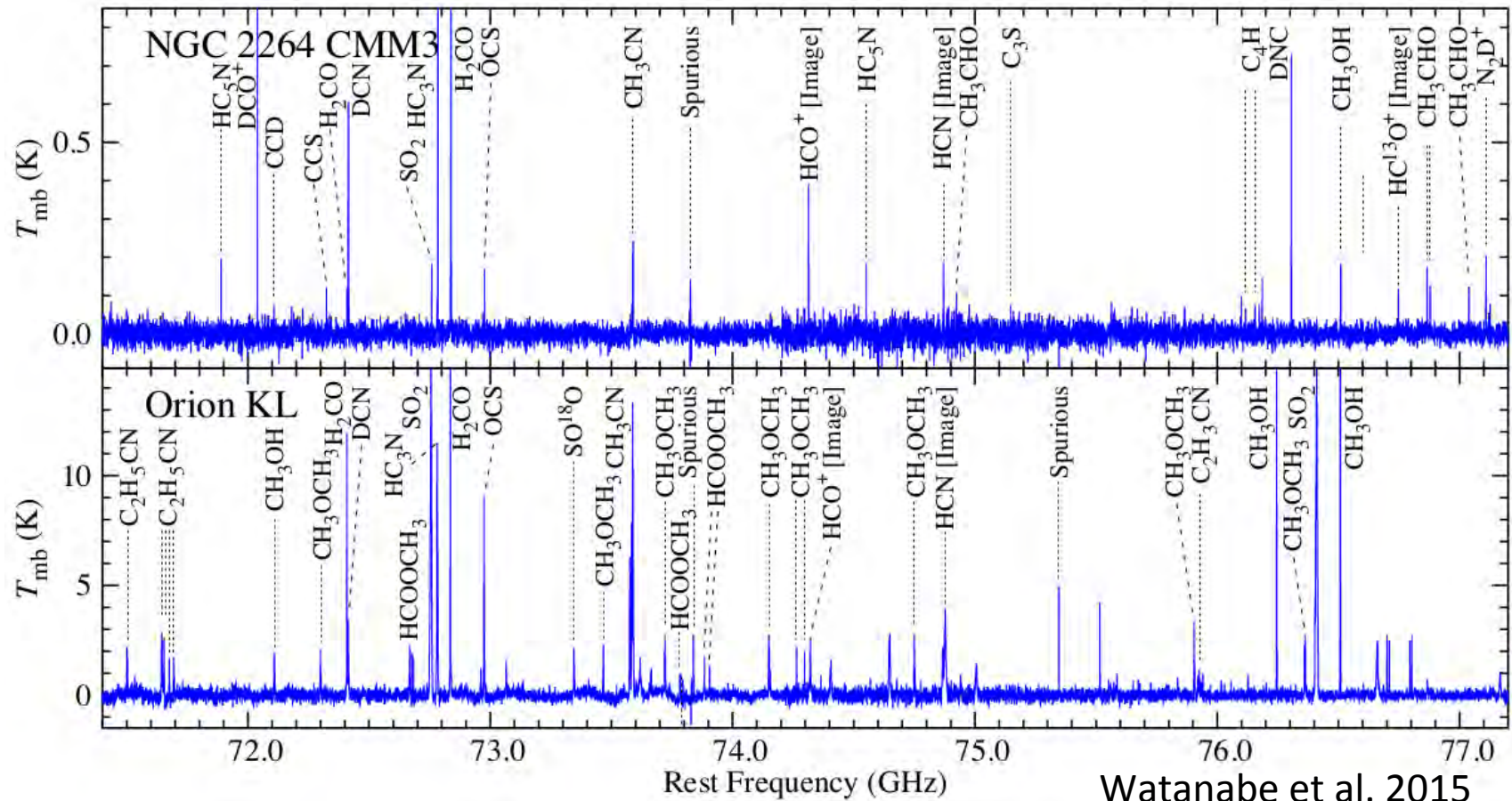
## 分子雲

- 主に水素分子が主成分の分子ガス塊
- 恒星の材料

## 星間分子

- 分子ガスに含まれる微量の化学物質
- 200種類程度の分子が検出されている

# 星間分子の化学組成 (e.g. NGC 2264 CMM3)



同じホットコアでも異なる化学組成

NGC 2264 CMM3: 炭素鎖分子、重水素化合物

Orion: 大型の有機分子、硫黄を含む分子



化学組成の違い

- 天体の進化
- 周囲の環境

# テラヘルツ帯での分子観測：高励起の遷移

回転準位エネルギー  $E_J = \frac{h^2}{8\pi^2 I} J(J + 1)$   
 $\nu(J \rightarrow J - 1) = \frac{h^2}{4\pi^2 I} J$

HCN	$J=17-16$	1505.029 GHz	650 K	$2(9) \text{ cm}^{-3}$
HCO <sup>+</sup>	$J=17-16$	1514.583 GHz	650 K	$3(8) \text{ cm}^{-3}$
	$J=15-14$	1336.714 GHz	510 K	$2(8) \text{ cm}^{-3}$
CO	$J=13-12$	1496.922 GHz	350 K	$2(6) \text{ cm}^{-3}$
	$J=11-10$	1267.014 GHz	250 K	$1(6) \text{ cm}^{-3}$

## 高密度・高温の分子ガストレーサー

(スペクトル線 & 連続波)

星形成領域、原始惑星系円盤、衝撃波領域  
活動銀河核(AGN)、爆発的星形成銀河



# テラヘルツ帯での分子観測：基本的な分子

$$\nu(J \rightarrow J - 1) = \frac{h^2}{4\pi^2 I} J$$

→ 慣性モーメントI: 小

→ 遷移エネルギー: 大

## 基本的な分子の観測

(スペクトル線)

単純な水素化合物(HF, OH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>D<sup>+</sup> etc.)

原子の微細構造線 (C, C<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, O etc.)

CH	N = 1 - 0	1470.7 GHz
p-H <sub>2</sub> D <sup>+</sup>	J = 1 - 0	1370.1 GHz
o-D <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	J = 1 - 0	1476.6 GHz
NII	2 - 1	1461.1 GHz

## 星間分子の化学反応の基礎的分子

# 1. M51のULX天体におけるX線化学

- 活動銀河核の診断方法の確立

# 活動銀河核(AGN)

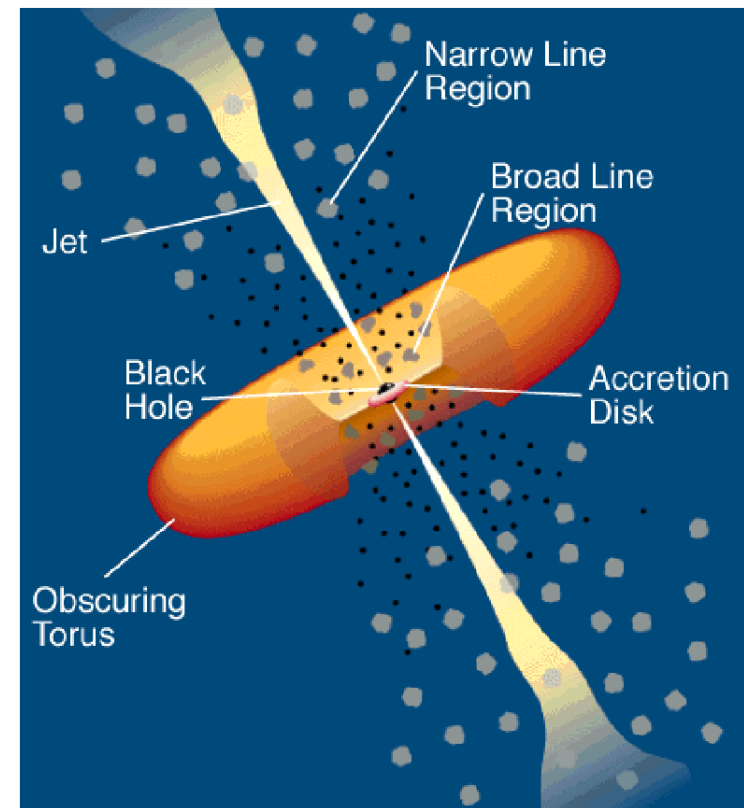
活動銀河核 (AGN)

Active **G**alactic **N**uclei

銀河中心の巨大ブラックホール

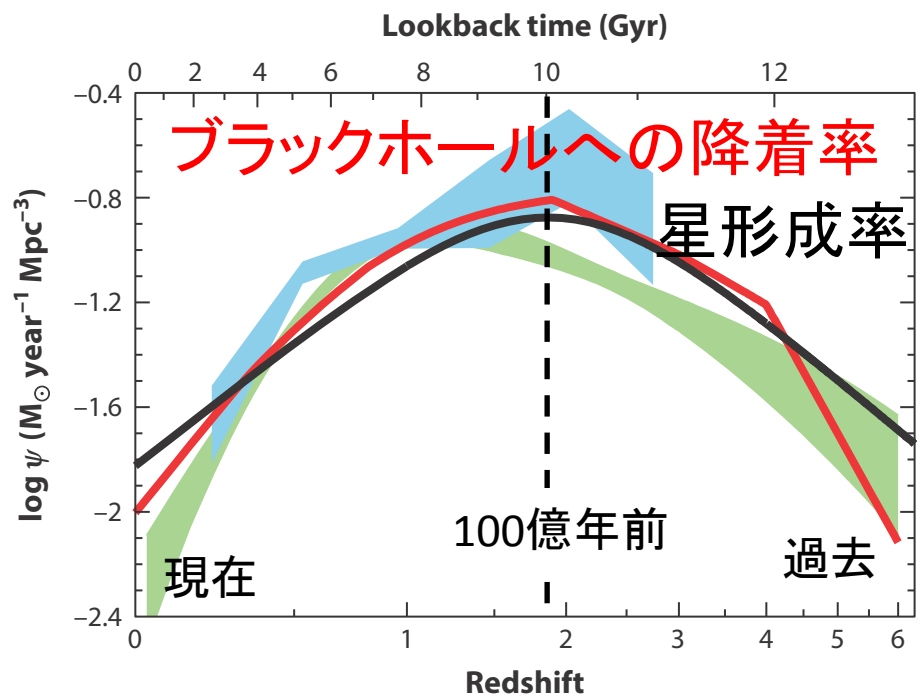
- ガスなどの質量降着
- 強い電磁波放射  
電波、可視光、X線、 $\gamma$ 線
- 特に非常に強いX線
- ジェット

AGNの模式図



(<http://wwwj.vsoop.isas.jaxa.jp>)

# AGNと銀河進化



Madau & Dickinson 2014

巨大ブラックホールは銀河と共進化

→ 星形成率

銀河の成長率

→ 質量降着率

ブラックホールの成長率

AGNの活動性

AGNの活動が星形成を抑制？

AGNは宇宙における銀河進化史の理解に重要

問題点: AGNが厚いガスや塵で覆われている

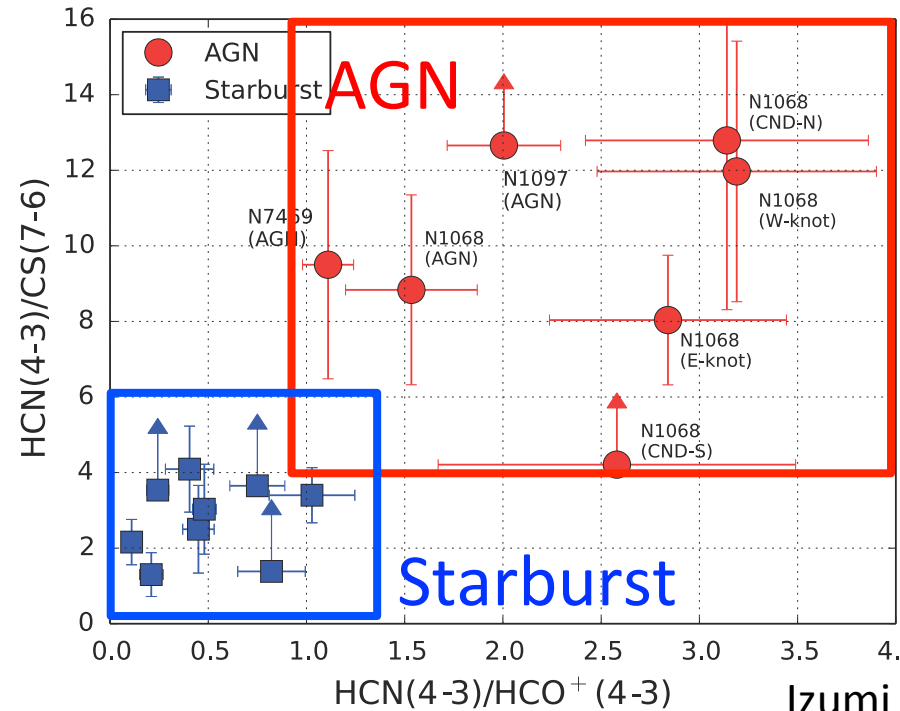
→ X線でも観測できない

→ AGNの有無の診断方法が必要

# 化学組成による埋もれたAGNの診断

AGNの特徴: 非常に強いX線放射

→ AGNを覆うガスの化学組成に影響 (X線化学)



Izumi et al. 2016

e.g.) AGNではHCNの存在量が高い (HCN > HCO<sup>+</sup>)

AGN周囲のガスの化学組成から診断できるのでは？

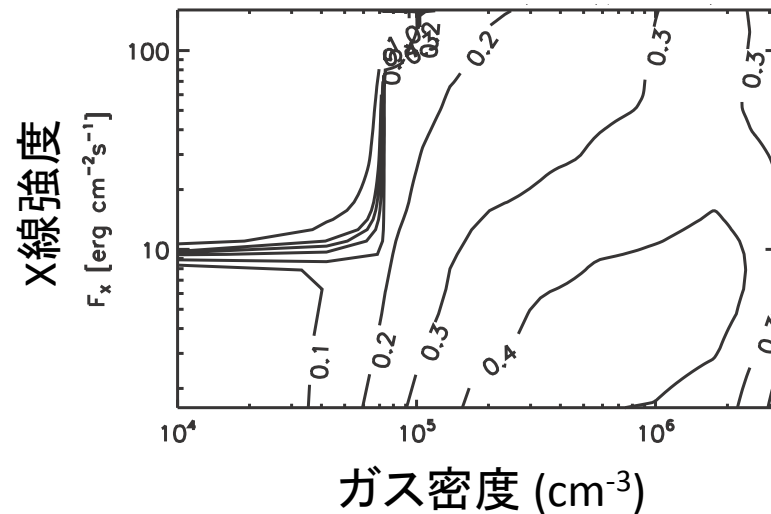
→ 南極望遠鏡での高励起の分子輝線の観測



# 観測とX線化学モデルの矛盾

HCNの存在量が多くなる現象をX線化学モデルでは説明できない

Meijerink et al. 2007 HCN(4-3)/HCO<sup>+</sup>(4-3)



HCN/HCO<sup>+</sup>比が1以下

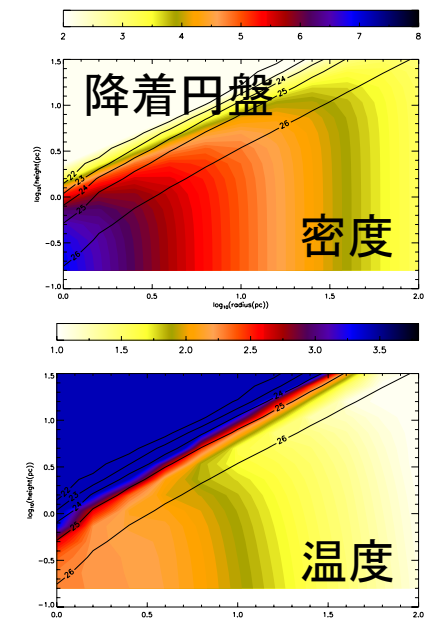
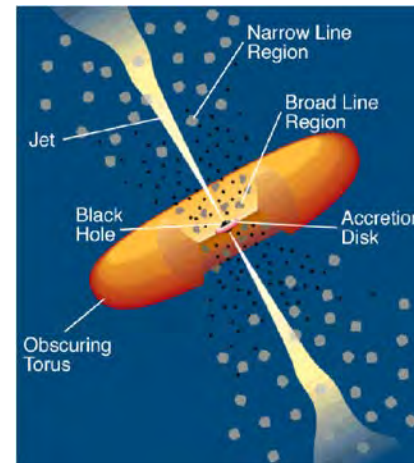
- 観測されたHCN/HCO<sup>+</sup>比: > 1
- X線光度が上がると比が下がる
- X線がガスを電離するためHCO<sup>+</sup>が増加

AGNの周辺は複雑な構造

- 降着円盤
- ジェット

高温環境下の化学反応？

より単純な系でX線化学の検証が必要



Harada et al. 2013

# ピュアなX線化学の検証

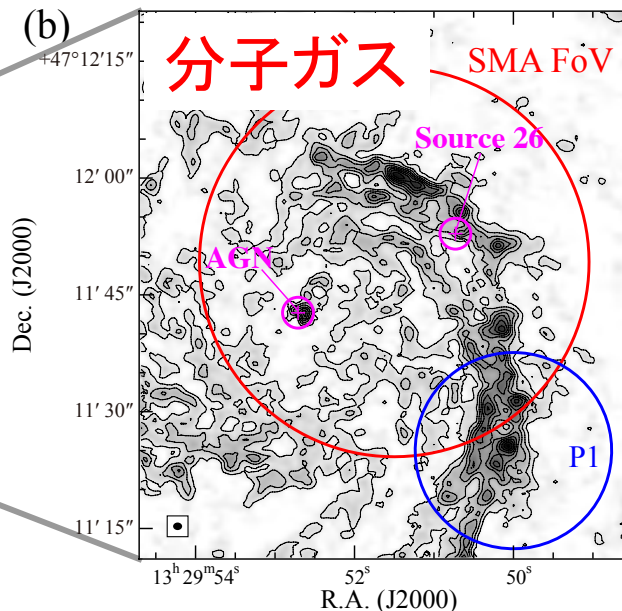
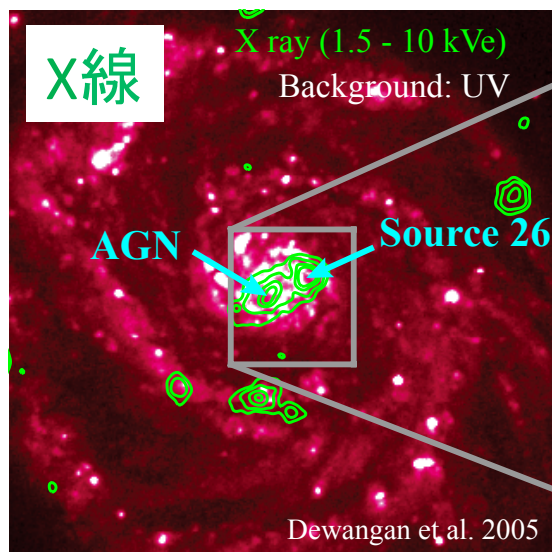
## ULX (Ultra-Luminous X-ray source)

- X線連星 (中間質量( $\sim 10^3 M_{\odot}$ )ブラックホール)
- X線光度:  $> 10^{39}$  erg/s

物理的な構造は(おそらく)単純

→ 降着円盤やジェットの影響は無視できる

## 天体(M51 ULX source 26)



- X線光度:  
 $> 2 \times 10^{40}$  erg/s
- 分子ガスに囲まれている

理想的な天体

→ SMAで観測

# SMAによるM51 ULXの観測



## SMA (SubmilliMeter Array)

ハワイ・マウナケア山 (4080 m)

アンテナ: 6 m × 8台

周波数: 209 – 273 GHz (Total 64 GHz)

設定1: 209 – 217 GHz, 225 – 233 GHz

241 – 249 GHz, 257 – 265 GHz

設定2: 217 – 225 GHz, 233 – 241 GHz

249 – 257 GHz, 265 – 273 GHz

観測の実行 (割り当て回数は2回ですが。。)

3/4 → 悪天候...

4/1 → マシントラブル...

3/25 → 悪天候...

4/2 → 悪天候...

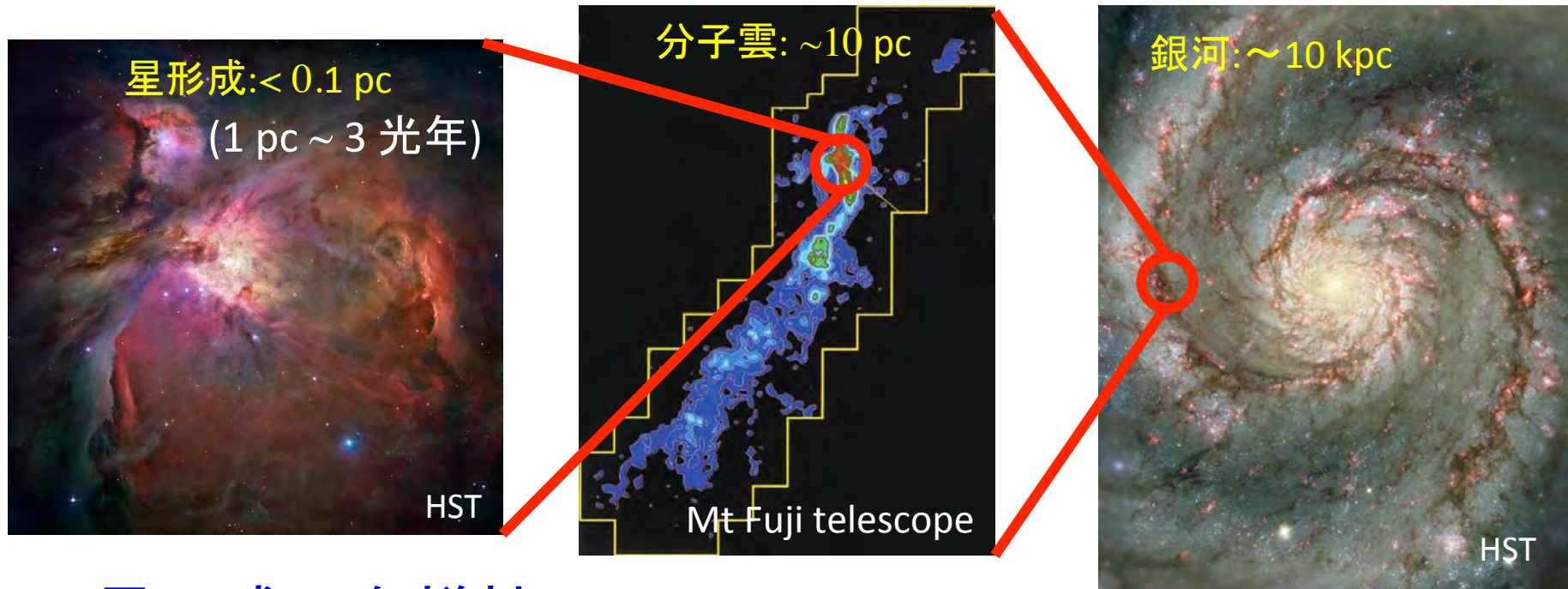
観測データは取得できず。。。

→ 今年度、再挑戦する予定

## 2. 巨大分子雲の重水素濃縮度

- テラヘルツ帯の重水素分子の観測の準備

# 銀河における分子雲と星形成



## 星形成の多様性

- 小質量星、大質量星、星団形成など
- 材料となる分子雲の性質の多様性？
- 銀河のダイナミクス？

分子雲の進化段階や星形成の良いトレーサーは何か？



# 重水素濃縮

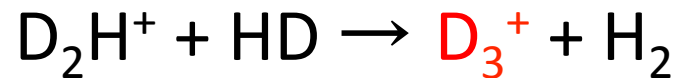
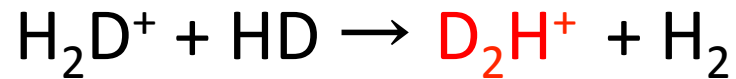
-  $\text{H}_2\text{D}^+$  is a key molecule. -

星なしコア(低温環境下)の進化トレーサー

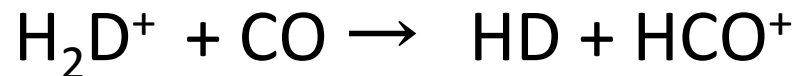


COの存在量が減少すると  $\text{H}_2\text{D}^+$ が増加

c.f. さらにCOが減ると、



星形成のトレーサー

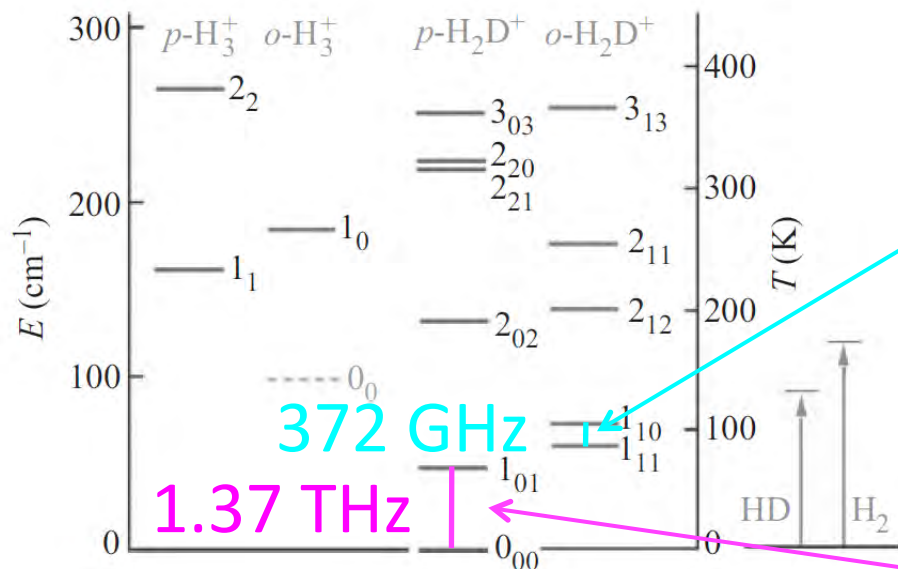


逆反応や蒸発したCOにより  $\text{H}_2\text{D}^+$ が破壊される

分子雲や星形成のよい進化トレーサーである

# SOFIAによるp-H<sub>2</sub>D<sup>+</sup>の初検出

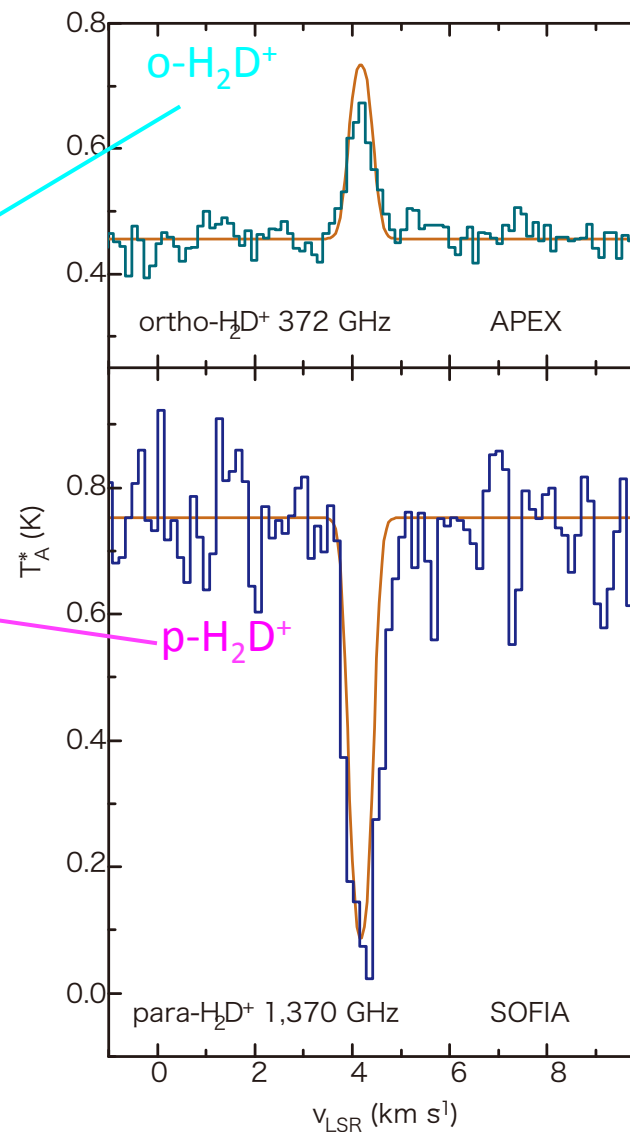
IRAS 16293-2422



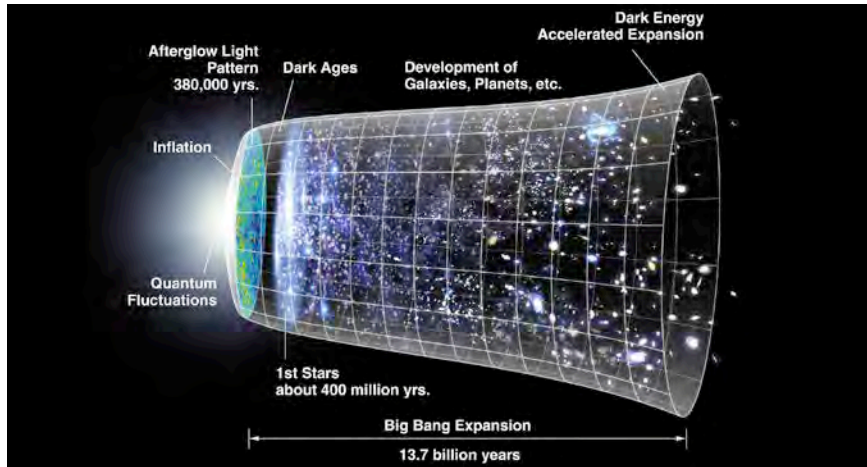
$$o\text{-H}_2\text{D}^+ / p\text{-H}_2\text{D}^+ = 0.07 \pm 0.03$$



南極望遠鏡でも観測可能！



# 重水素分子で初期宇宙の分子ガス観測？



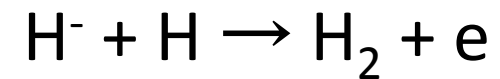
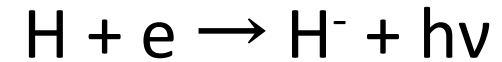
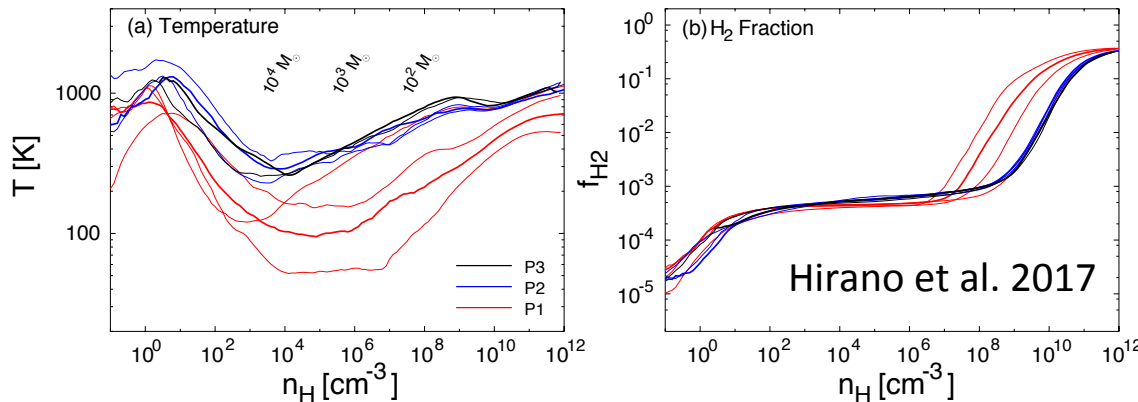
初期宇宙での元素合成

- ビッグバン

- H(D), He, Li

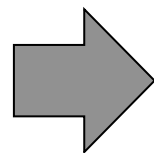
現在あるほとんどの元素  
は存在しない

## 初期宇宙でも分子ガスが星の材料



H<sub>2</sub>がガスの冷却に寄与

- HD : 2.674 THz
- p-H<sub>2</sub>D<sup>+</sup> : 1.370 THz
- o-H<sub>2</sub>D<sup>+</sup> : 0.372 THz

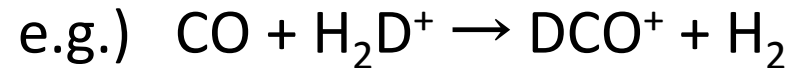
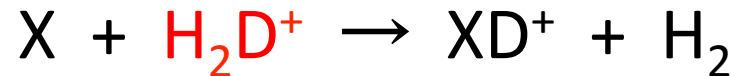
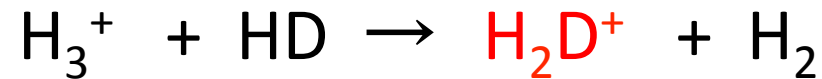


赤方偏移した輝線

宇宙最初の分子の検出？！

# 他の分子の重水素濃縮

$\text{H}_3^+$ 以外の分子も重水素濃縮する



暗黒分子雲コア (<0.1 pc) L134Nで高い重水素濃縮度

DCN:  $5 \pm 2\%$ , CCD:  $6 \pm 4\%$ , DCO<sup>+</sup>: 18%, N<sub>2</sub>D<sup>+</sup>: 35%

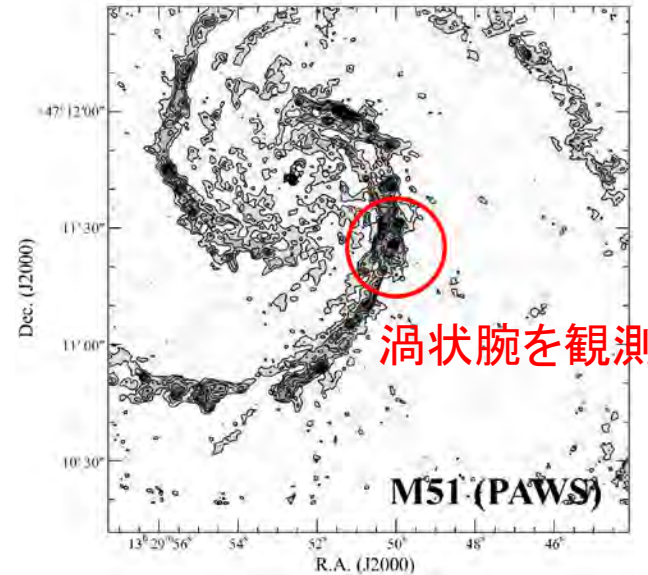
c.f.: 宇宙の平均D/H比  $\sim 10^{-3} \%$

巨大分子雲スケール(>10 pc)の重水素濃縮度は?

- 分子雲コアスケール(< 0.1 pc)では測られている
- 近傍銀河の観測例はほとんどない
- 銀河円盤内での巨大分子雲の進化?

→ IRAM 30m望遠鏡を使い重水素化合物の観測

# M51: IRAM 30 m



- M51 (距離: ~ 8.4 Mpc)

## IRAM 30m

スペイン・Pico Veleta山  
標高 2900 m

割り当て時間: 50時間  
(+30時間)

観測分子: DCO<sup>+</sup>(1-0)  
DCN (1-0)  
N<sub>2</sub>D<sup>+</sup> (1-0)



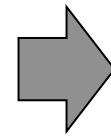
Schinnerer et al. 2010





# M51の重水素化合物

On-Source 積分時間: 26時間  
達成感度( $T_{mb}$ ):  $400\mu\text{K}$



DCO<sup>+</sup>は検出されず

DCN, N<sub>2</sub>D<sup>+</sup>も検出せず

M51 (~ 1kpc): DCO<sup>+</sup>/HCO<sup>+</sup> < 0.5 %

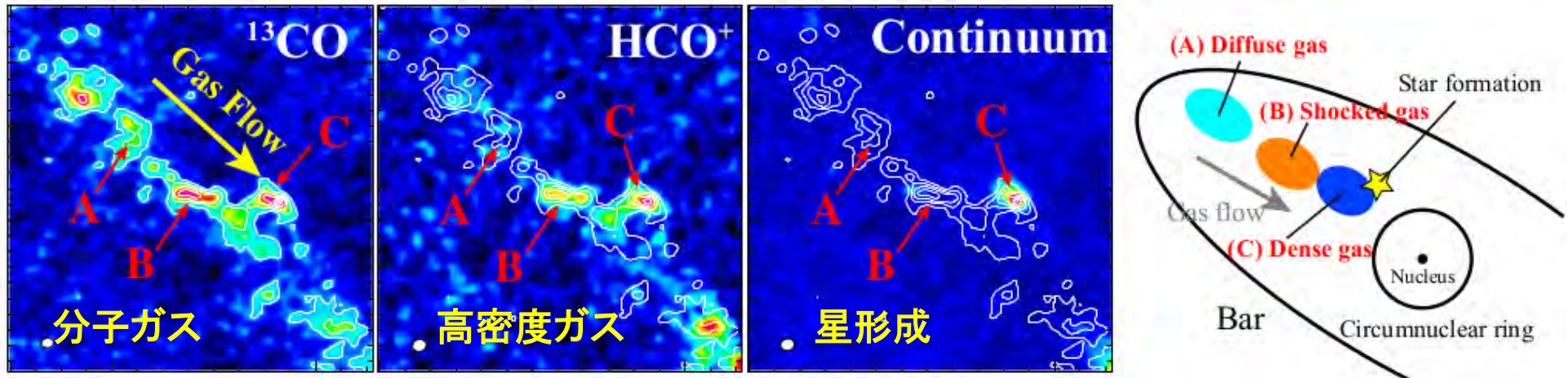
暗黒分子雲コア (~ 0.1 pc): DCO<sup>+</sup>/HCO<sup>+</sup> = 18 % (Tine et al. 2000)

大マゼラン雲 (~ 6 pc): DCO<sup>+</sup>/HCO<sup>+</sup> = 2 – 0.8 % (Chen et al. 2004)

1 kpcスケールでは顕著な重水素濃縮はない

# Future Work: 重水素化合物

## 近傍銀河の高空間分解能観測(M83)



空間的な重水素濃縮度の勾配があるか？ →ALMAに提案中

## 遠方銀河のHD、 $\text{H}_2\text{D}^+$ 観測

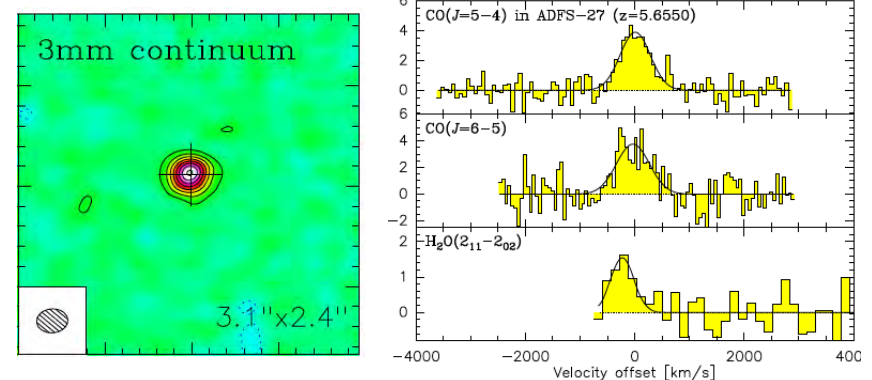
### 赤方偏移した重水素分子の観測

HD ( $1_0-0_0$ ): 2674.986 GHz  
→ 401.951 GHz

$\text{H}_2\text{D}^+$  ( $1_{01}-0_{00}$ ): 1370.085 GHz  
→ 205.873 GHz

ALMAでの観測可能な周波数！

ADS-27 ( $z=5.655$ )



# 出版論文

1. Watanabe, Yoshimasa; Nishimura, Yuri; Harada, Nanase; Sakai, Nami; Shimonishi, Takashi; Aikawa, Yuri; Kawamura, Akiko; Yamamoto, Satoshi  
“Molecular-Cloud-Sacle Chemical Composition I: Mapping Spectral Line Survey toward W51 in the 3 mm Band”  
2017, The Astrophysical Journal, 845, 116 (30 pages)
2. Watanabe, Yoshimasa; Sakai, Nami; López-Sepulcre, Ana; Sakai, Takeshi; Hirota, Tomoya; Liu, Sheng-Yuan; Su, Yu-Nung; Yamamoto, Satoshi  
“Discovery of Striking Difference of Molecular-Emission-Line Richness in the Potential Proto-Binary System NGC 2264 CMM3”  
2017, The Astrophysical Journal, 847, 108
3. Nishimura, Yuri; Watanabe, Yoshimasa; Harada, Nanase; Sakai, Nami; Shimonishi, Takashi; Aikawa, Yuri; Kawamura, Akiko; Yamamoto, Satoshi  
“Molecular-Cloud-Sacle Chemical Composition I: Mapping Spectral Line Survey toward W3(OH) in the 3 mm Band”  
2017, The Astrophysical Journal, 848, 17 (18 pages)
4. Oya, Yoko Oya; Sakai, Nami; Watanabe, Yoshimasa; Higuchi, Aya E.; Hirota, Tomoya; López-Sepulcre, Ana; Sakai, Takeshi; Aikawa, Yuri; Ceccarelli, Cecilia; Lefloch, Bertrand; Caux, Emmanuel; Vastel, Charlotte; Kahane, Claudine; Yamamoto, Satoshi  
“L483: Warm Carbon-chain Chemistry Source Harboring Hot Corino Activity”  
2017, The Astrophysical Journal, 837, 174 (15 pages)
5. Tatsuya Soma; Nami Sakai; Yoshimasa Watanabe; Satoshi Yamamoto  
“Complex Organic Molecules in Taurus Molecular Cloud-1”  
2018, The Astrophysical Journal, 854, 116