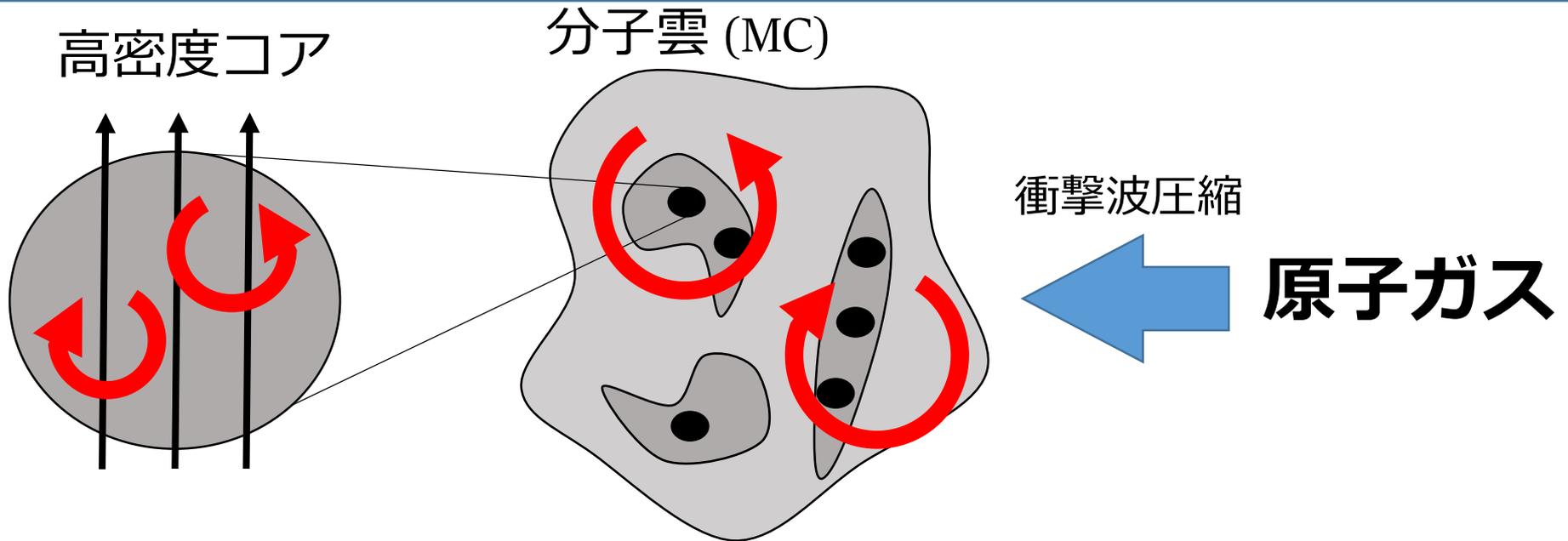


# SPICAで探る分子雲の 多層構造

**岩崎一成 (国立天文台)**

# 分子雲形成



## • 高密度コアの物理的性質

- 速度と磁場・密度構造 (星形成に影響する Machida et al. 2016)
- コア質量関数 ~ IMF (e.g., Motte+ 1998, Ikeda & Kitamura 2009, Andre+2010, Konyves+2015)

## • 星形成効率 (分子雲によって大きく異なる)

- Dense gas mass (e.g., Lada+ 2010, Heiderman+ 2010, Evans+ 2014...)

➡ 分子雲形成から星形成を理解する必要がある

# 分子雲形成シミュレーション

## 自己重力を含めた磁気流体シミュレーション with

### ✓ 化学反応

(Inoue & Inutsuka 2012, Iwasaki+2019を改善)

- 15種の化学種

implemented in  
Athena++ (Stone, Tomida+ submitted)



- FUV光子の光子追跡

### ✓ 熱過程

#### • 加熱過程

- ダストによる光電子加熱 (dust extinction)
- 宇宙線
- H<sub>2</sub>形成と解離

Inoue & Inutsuka (2012)

Valvidia+ (2016)

Iwasaki+ (2019)

Clark+ (2019)

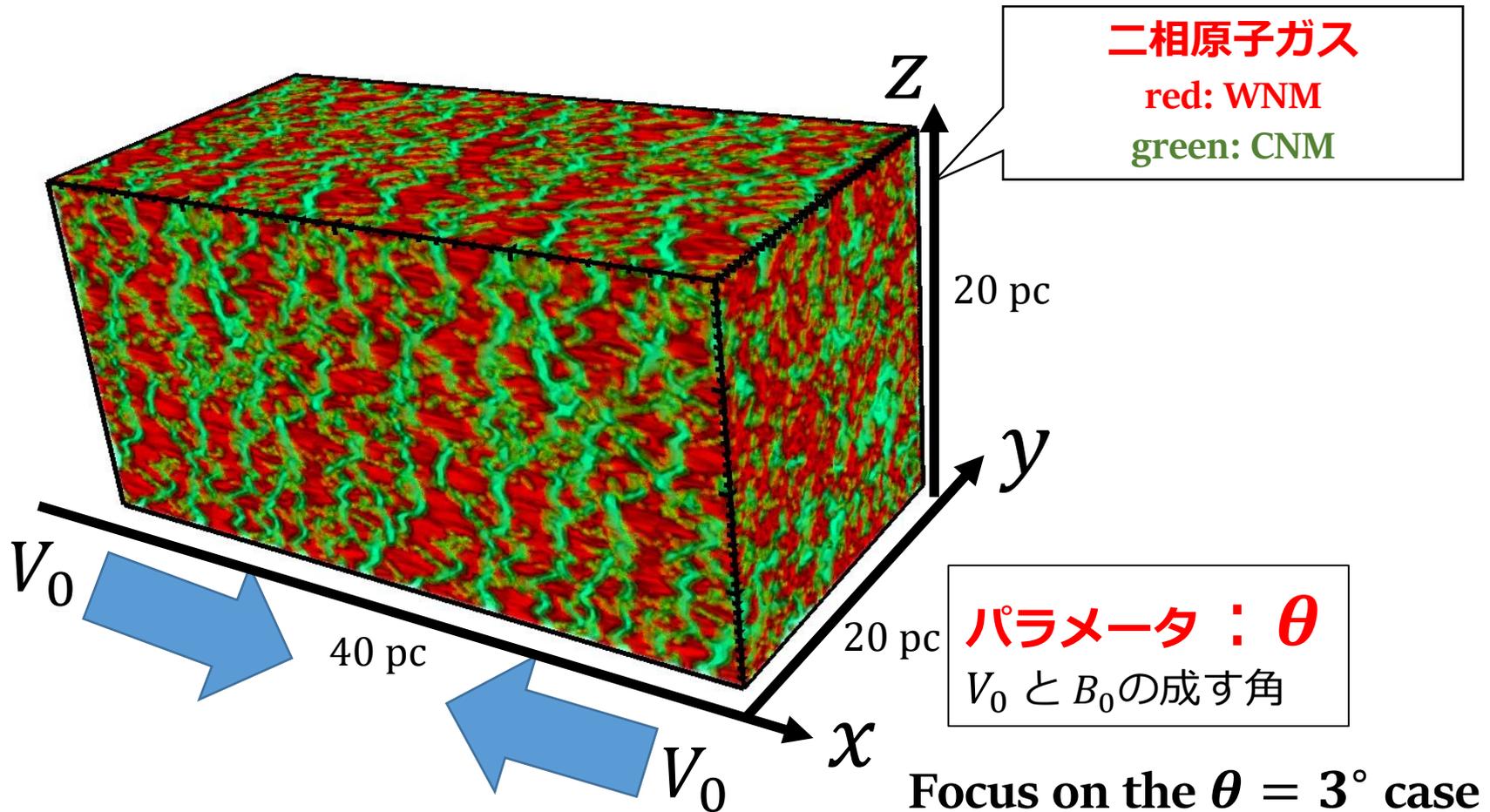
#### • 冷却過程

- ダストの再結合
- Ly $\alpha$ 遷移
- 微細構造遷移 (C<sup>+</sup>, C, O)
- 回転遷移 (H<sub>2</sub>, CO)

→ 分子雲形成を統合的に追跡できる！

# 原子ガスの集積による分子雲形成

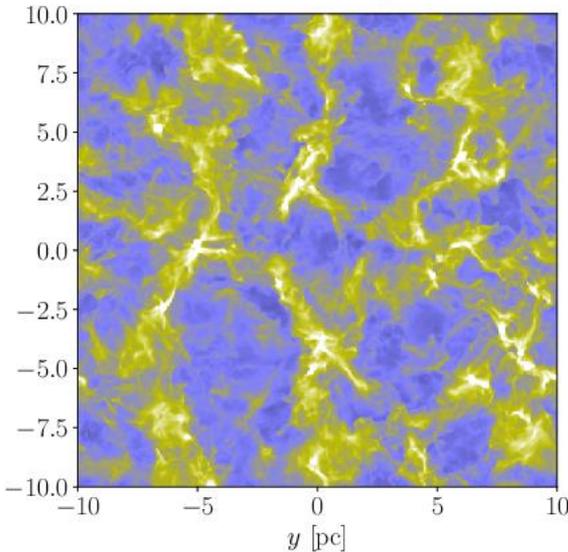
- 原子ガスの衝突流 ( $V_0 = 5 \text{ km s}^{-1}$ ,  $\langle n_0 \rangle = 10 \text{ cm}^{-3}$ ,  $B_0 = 3 \mu\text{G}$ )
- 分解能 :  $1024 \times 512^2$  ( $\Delta x = 20 \text{ pc}/512 \sim 0.04 \text{ pc}$ ).



# 面密度分布 (圧縮方向に沿った)

面密度  $N$

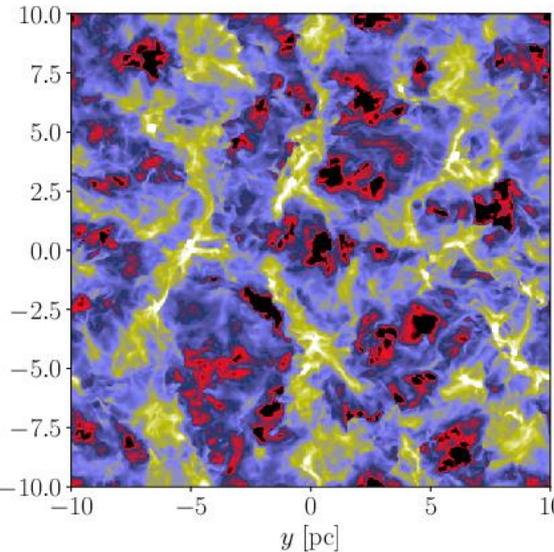
column density



H<sub>2</sub>の存在比で修正した  
面密度

$$2x_{\text{H}_2} \times N$$

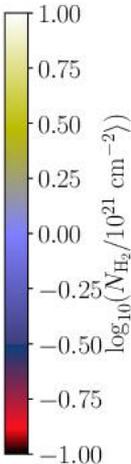
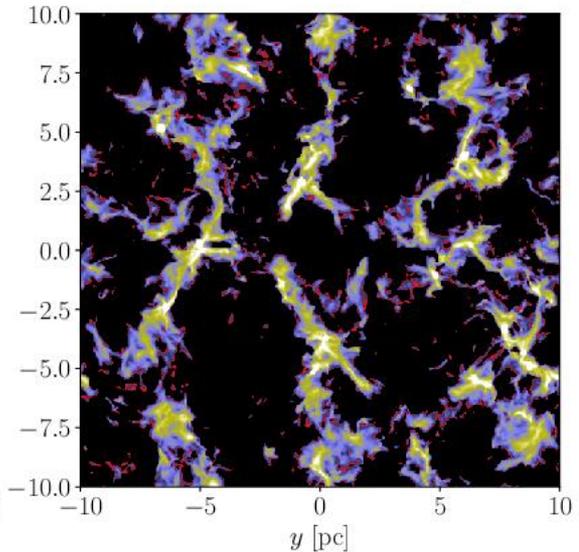
H<sub>2</sub> corrected column density



COの存在比で修正した  
面密度

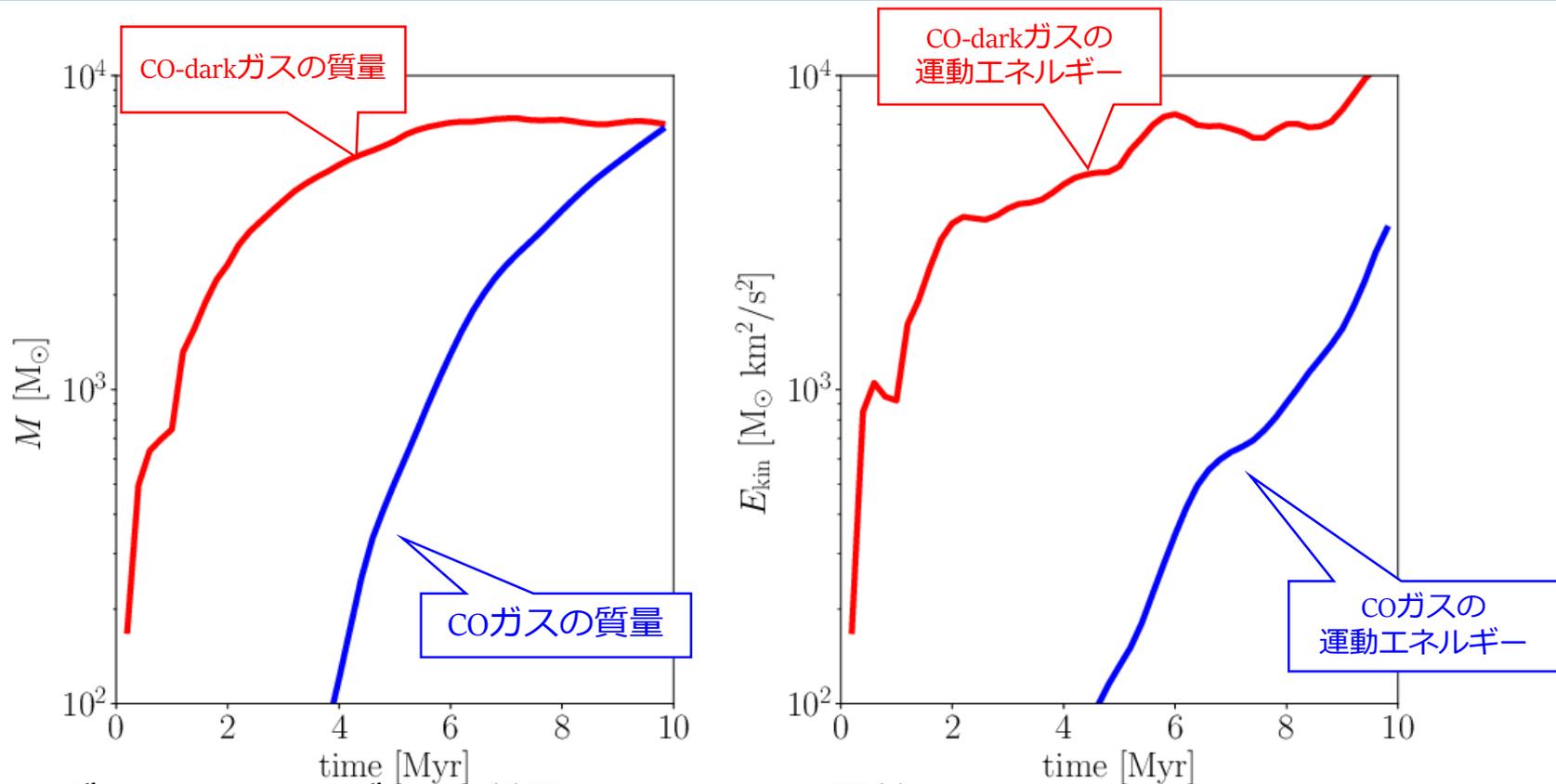
$$A_C^{-1} x_{\text{CO}} \times N$$

CO corrected column density



- ✓ FUVが遮蔽された高密度な領域でCOが形成
- ✓ よく知られているようにCOで捕獲できないガス成分(CO-darkガス)がある
- ✓ H<sub>2</sub>はCOより広い範囲に存在する

# ガス動力学における CO-darkガスの重要性

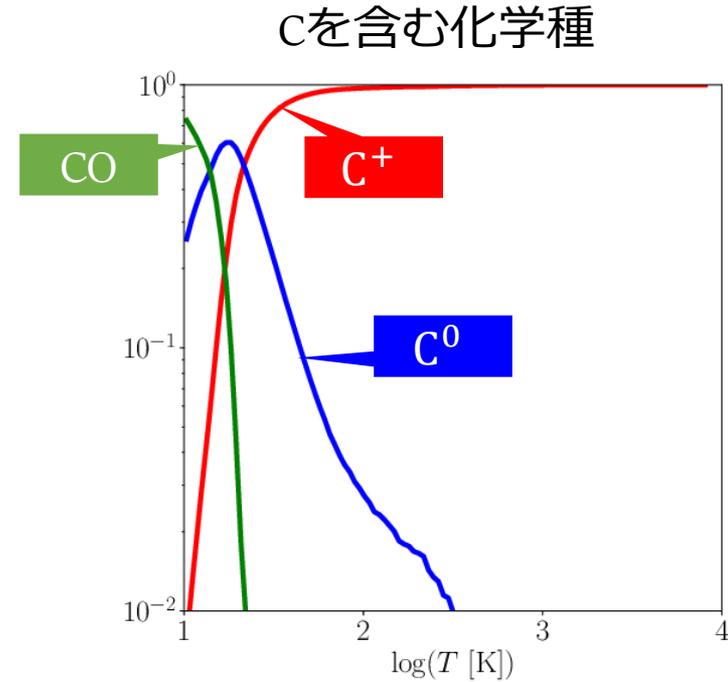
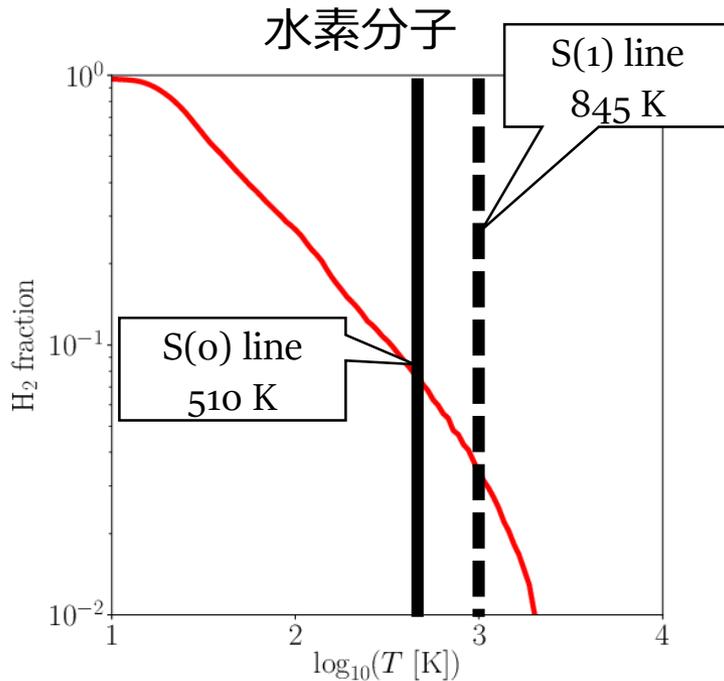


- COガスとCO-darkガスの質量は $t \sim 9$  Myrで同等
- 一方、CO-darkガスの運動エネルギーはCOガスより大きい
- CO-darkガス (低密度高温)を、分子雲の進化を考える上で考慮しなければならない

(Inoue & Inutsuka 2012, Iwasaki+2019)

# 化学組成の温度依存性

## それぞれの温度binでの平均化学組成



- ✓ 水素分子は温かいガスにも存在する。→ **回転準位を励起できる** (Valvidia+2016)
  - 乱流混合により、高密度部で形成された水素分子が高温低密度ガスへ
- ✓ **温かいガスにはCOが存在しない** (右図)

# 分子雲に付随する温かいガス成分

いくつかの観測で温かいガスの存在が示唆されている

## ✓ H<sub>2</sub>

- 紫外線領域の吸収線
  - Copernicus (Savage+1977) and FUSE (Gillmon+2006).
- H<sub>2</sub>回転輝線もSpitzerで見つかっている (Goldsmith+2010, Habart+2011)

## ✓ CO

- HerschelによってCOの高励起輝線(原始星に付随しない)(e.g., Larson+2015)

## ✓ CH<sup>+</sup>

- 吸熱反応(4300K)のできるCH<sup>+</sup> が予言よりも多い (Agundez+2010)

SPICAによる高感度観測で、分子雲の温かいガスの情報が得られないか？

- 空間分布
- 速度情報

} 分子雲の多相動力学の理解へ

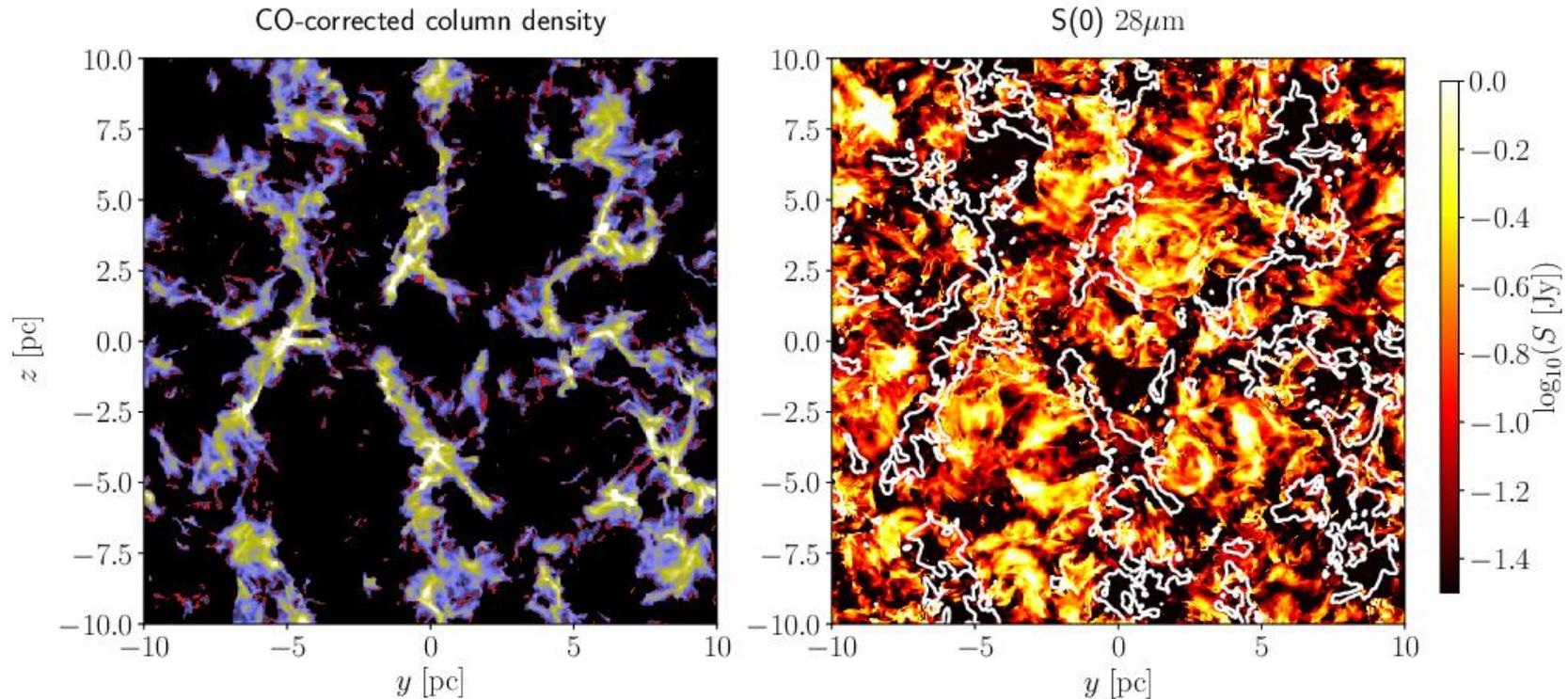
# シミュレーションから予想される S(0) 輝線 [ $J = 2 \rightarrow 0$ ] の強度

シミュレーション結果から、水素分子の回転輝線の強度を見積もる。 RADMC-3D(Dullemond 2012)を用いた

✓ 回転準位の占有率を平衡状態を仮定して決める。

- 水素分子とH, He, para-H<sub>2</sub>, ortho-H<sub>2</sub>の衝突を考慮 (Flower+ 1999), ortho-to-para比は0.7で固定

✓ 光学的に薄いとす。ダスト減光を考慮



✓ S(0)輝線は温かいガス成分から放射されるので、COの分布と逆相関する。

- シミュレーション結果から、強度は $\leq 1$  Jy程度なので検出可能である。

# まとめ

- 化学反応と熱過程・FUV光子追跡を考慮した分子雲形成シミュレーションをおこなった。
- CO-darkガスの運動エネルギー > COガスの運動エネルギー  
→ **分子雲の動力学にCO-darkな温かいガスが重要である可能性**
- **水素分子は温かいガスの中にも存在** (e.g., Valvidia+ 2016).
- 温かいガスの物理状態は、分子雲形成と進化に重要な情報を提供
- 水素分子の回転輝線は、SPICAで検出するのに十分な強度で放射されると予想される。