

# Does the CO-to-H<sub>2</sub> conversion factor depend on the star formation rate?

Clark, P. C., and Glover, S. C. O. 2015, MNRAS, 452, 2057  
(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2015MNRAS.452.2057C>)

Journal Club 2015. 11. 06.  
Ryo Ando (IoA)

# Abstract

## ABSTRACT

We present a series of numerical simulations that explore how the ‘X-factor’,  $X_{\text{CO}}$  – the conversion factor between the observed integrated CO emission and the column density of molecular hydrogen – varies with the environmental conditions in which a molecular cloud is placed. Our investigation is centred around two environmental conditions in particular: the cosmic ray ionization rate (CRIR) and the strength of the interstellar radiation field (ISRF). Since both these properties of the interstellar medium (ISM) have their origins in massive stars, we make the assumption in this paper that both the strength of the ISRF and the CRIR scale linearly with the local star formation rate (SFR). The cloud modelling in this study first involves running numerical simulations that capture the cloud dynamics, as well as the time-dependent chemistry, and ISM heating and cooling. These simulations are then post-processed with a line radiative transfer code to create synthetic  $^{12}\text{CO}$  (1–0) emission maps from which  $X_{\text{CO}}$  can be calculated. We find that for  $10^4 M_{\odot}$  virialized clouds with mean density  $100 \text{ cm}^{-3}$ ,  $X_{\text{CO}}$  is only weakly dependent on the local SFR, varying by a factor of a few over 2 orders of magnitude in SFR. In contrast, we find that for similar clouds but with masses of  $10^5 M_{\odot}$ , the X-factor will vary by an order of magnitude over the same range in SFR, implying that extragalactic star formation laws should be viewed with caution. However, for denser ( $10^4 \text{ cm}^{-3}$ ), supervirial clouds such as those found at the centre of the Milky Way, the X-factor is once again independent of the local SFR.

# I. Introduction

- **Conversion factor**  $X_{\text{CO}} = N_{\text{H}_2} / W_{\text{CO}} = 2 \times 10^{20} [\text{cm}^{-2} \text{K}^{-1} \text{km}^{-1} \text{s}]$  (at MW)
  - GMC 中の  $\text{H}_2$  を直接観測するのは困難 →  $\text{CO}(1-0)$  積分強度 ( $W_{\text{CO}}$ ) から  $\text{H}_2$  柱密度 ( $N_{\text{H}_2}$ ) に変換
  - Galactic ISM と異なる環境で一定の  $X_{\text{CO}}$  を用いるのは適切なのか？
- $W_{\text{CO}}$  は**ガスの速度分散**・**ガスの温度**・**明るいCO放射**の filling factor の各パラメータに敏感  
(注：それぞれ独立ではない)
- **local GMC で  $X_{\text{CO}}$  がほぼ一定**な理由：
  - $N_{\text{H}_2}$  が小さい cloud は dust shielding が効かない → COが十分生成されず分子雲として認識されない
  - $N_{\text{H}_2}$  が大きい cloud では急速な星形成 → stellar feedback によりCO柱密度は増えすぎない
- **強いUVや cosmic ray**がある場合、 **$X_{\text{CO}}$ の振る舞いは自明でない**
  - COの光解離がより進む → COの線幅・filling factorの減少 →  $X_{\text{CO}}$ の増加？
  - $\text{H}_2$ の解離・cloudの温度上昇 (photoelectric/cosmic ray heating による) →  $X_{\text{CO}}$ の減少？
- 異なる環境下で model cloud の化学・熱・力学進化をシミュレーションした
  - 変数 (環境) : **UV輻射強度 (ISRF)**・**宇宙線電離率 (CRIR)** — **星形成率 (SFR)** に対応
  - 同じ質量・空間密度の cloud で、環境の関数としての  $X_{\text{CO}}$  がどう変化するか？

# 2. Numerical Method

## 2.1. Details of the algorithms

- **SPH** code GADGET-2 を用いたシミュレーション
  - shock や断熱圧縮による dynamical heating ・ 断熱膨張による cooling
  - ISM中の radiative/chemical heating/cooling
    - fine structure cooling ( $C^+$ , C, O), molecular line cooling ( $H_2$ , CO), photoelectric heating, cosmic ray heating
  - ガス粒子とダスト微粒子の collision — 両者の熱バランスを保つ
  - cloud は均一な星間輻射場 (**ISRF**) にさらされる
  - cosmic ray によるCの電離 ( $C + c.r. \rightarrow C^+ + e^-$ ) ・ C, COの光解離 ( $CO + \gamma_{cr} \rightarrow C + O$ )
    - 反応率は  $\zeta_H$  (中性水素の宇宙線電離率 (**CRIR**)) に比例すると仮定
  - CO(I-0) emission map — 輻射輸送コード RADMC-3D で作成
    - non-LTEでの level population — LVG近似を使用
    - CO回転準位の励起は $H_2$ との collision が dominant と仮定

# 2. Numerical Method

## 2.2. Cloud Properties

- cloudの初期条件：均一なガス球 + 3次元乱流
  - low-mass cloud ( $10^4 M_{\odot}$ ), high-mass cloud ( $10^5 M_{\odot}$ ) の2通りを設定
  - ガス密度が  $10^6 \text{ cm}^{-3}$  に達するまで cloud の collapse を追える
  - virial parameter  $\alpha_{\text{vir}} = E_{\text{kin}}/E_{\text{grav}}$  (= 0.5: ビリアル平衡, = 2: gravitationally unbound)
  - 水素 :  $\text{H}_2$ , 炭素 :  $\text{C}^+$ , 酸素 :  $\text{O}$  で全て存在 — local ISM と同様の total abundance を仮定
  - dust/gas = 0.01 — local ISM と consistent
- PPV map → z軸方向の放射を積分 → CO(1-0) 積分強度 ( $W_{\text{CO}(1-0)}$ ) map を作成

	Low-mass cloud	High-mass cloud
Mass	$10^4 M_{\odot}$	$10^5 M_{\odot}$
Initial hydrogen nuclei number density $n_0$	$100 \text{ cm}^{-3}$	$100 \text{ cm}^{-3}$ or $10^4 \text{ cm}^{-3}$
Initial radius	8.8 pc	19 pc
Initial turbulent velocity $v_{\text{rms}}$	2.4 km/s	5.2 km/s
Virial parameter $\alpha_{\text{vir}}$	0.5	0.5 or 2
SPH particle mass	$0.005 M_{\odot}$	$0.005 M_{\odot}$
SPH particle number	$2 \times 10^6$	$2 \times 10^7$

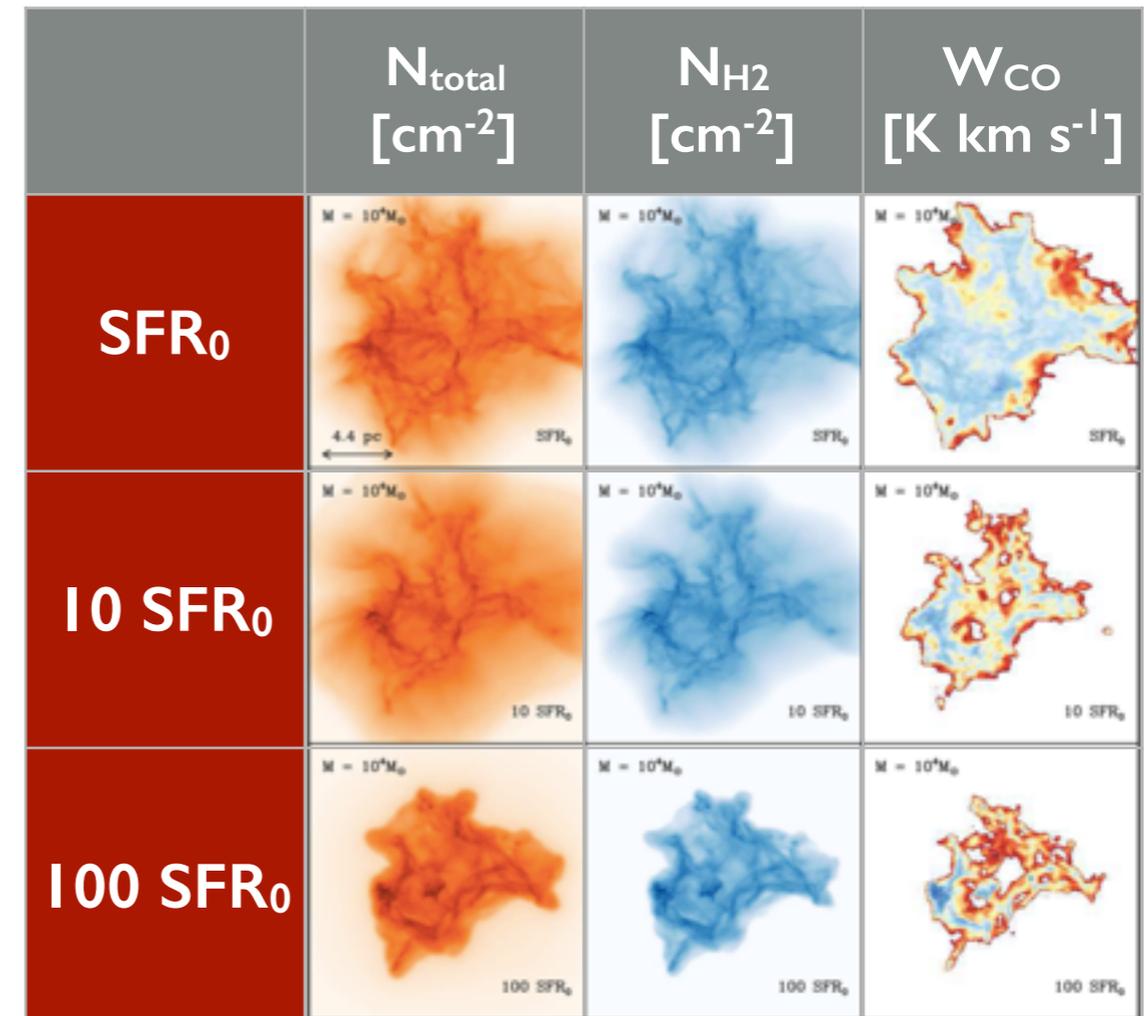
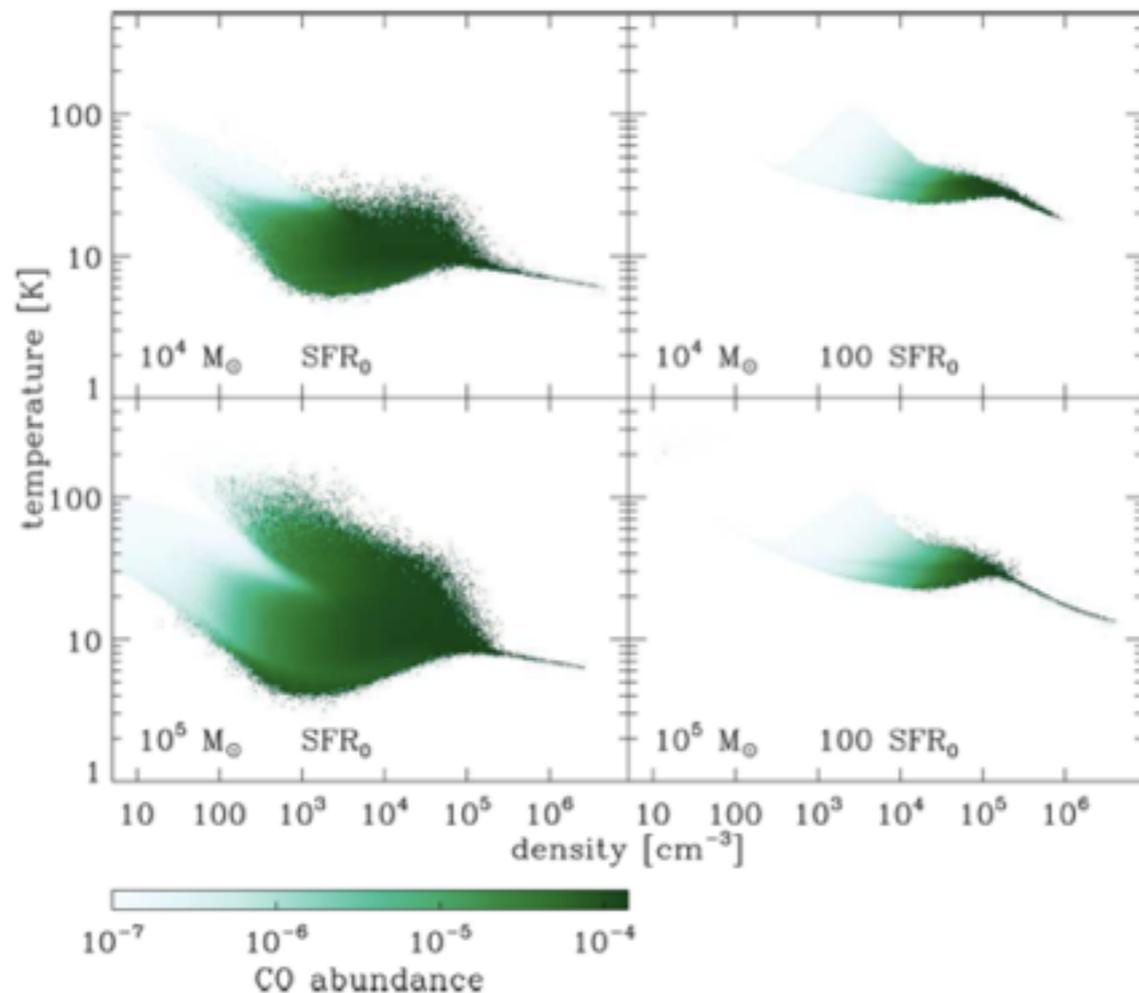
# 2. Numerical Method

## 2.3. The 'star formation rate'

- 変数：星間輻射場 (ISRF) 強度・宇宙線電離率 (CRIR)
  - 星形成率 (local SFR) とともに変化 — SFRに代わるパラメータとして使用
  - $SFR = SFR_0$  (local ISM value),  $10 SFR_0$ ,  $100 SFR_0$  でシミュレーション
- **ISRF**  $\propto$  **SFR** を仮定 ← heating を起こす光子の大部分は大質量星由来であるため
  - 6 eV 以上 — photoelectric heating (dominant @ low  $A_V$ ) に寄与
  - 11.2 - 11.5 eV —  $H_2$ とCOの解離に寄与
  - 長波長側では仮定が成り立たないが、ガスの温度・化学状態への影響は小さい
- **CRIR**  $\propto$  **SFR** を仮定 ← cosmic ray energy density が SFR をよくトレースする
  - Galactic ISM では超新星残骸が cosmic ray source
  - cosmic ray の寿命  $\sim 15$  Myr

# 3. General Cloud Structure

- $t_{\text{end}} \sim 1 - 2 \text{ Myr}$  時点でのシミュレーション結果
- フィラメント構造はSFRの増加に伴い弱まる
  - photoelectric emission と CRIR により、ガス温度が上昇するため
  - 高いSFRでは systematic に温度が高い (下図)

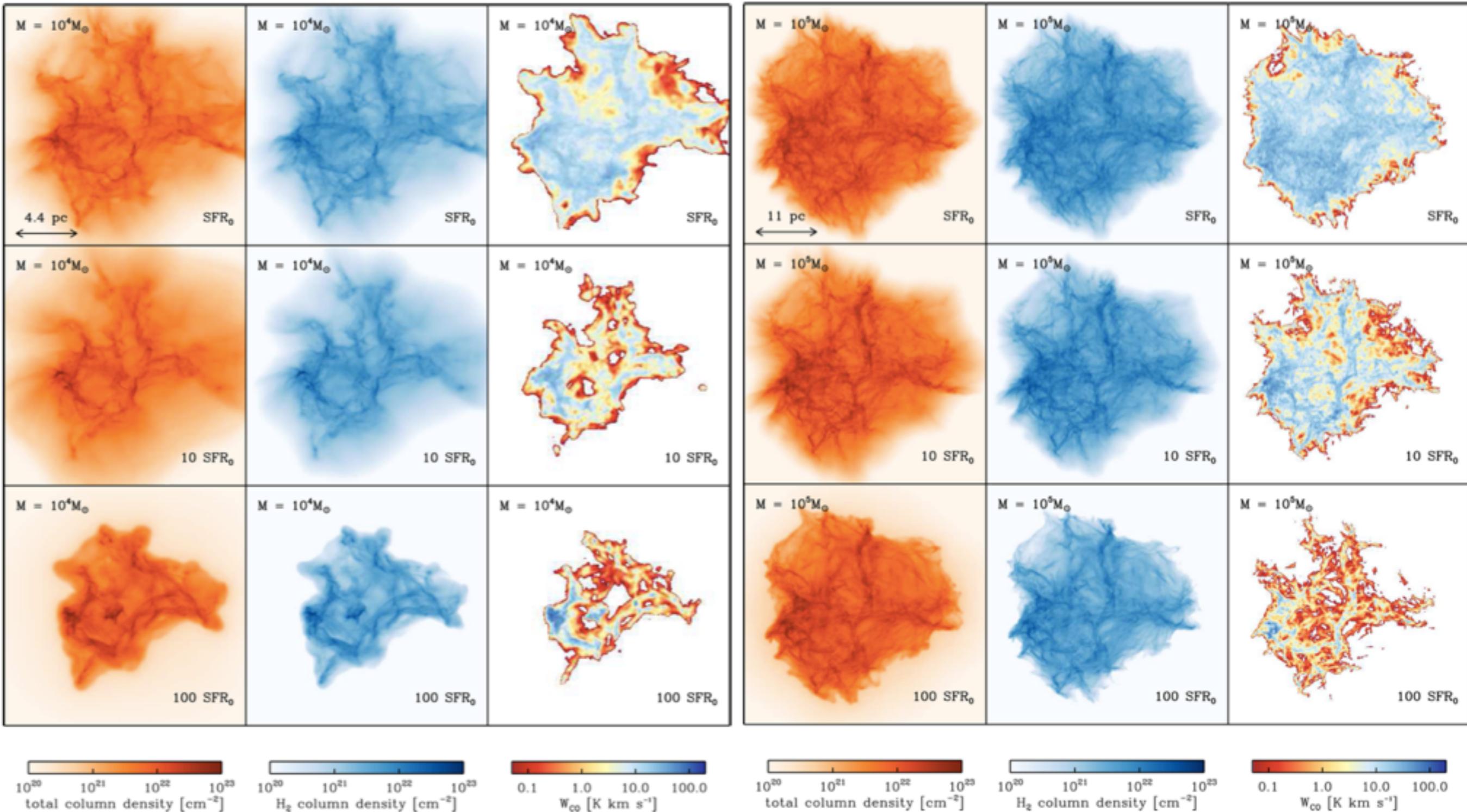


Mass ( $M_{\odot}$ )	$n_0$ (cm $^{-3}$ )	$\alpha_{\text{vir}}$	SFR ( $SFR_0$ )	Notes	$t_{\text{end}}$ (Myr)
$10^4$	100	0.5	1		1.83
$10^4$	100	0.5	10		2.09
$10^4$	100	0.5	100		1.91
$10^4$	100	0.5	100	Different seed	2.18
$10^5$	100	0.5	1		1.17
$10^5$	100	0.5	10		1.52
$10^5$	100	0.5	100		1.39
$10^5$	100	0.5	1	Atomic ICs	1.31
$10^5$	100	0.5	100	Atomic ICs	1.26
$10^5$	$10^4$	0.5	100	Galactic Centre style cloud	0.1
$10^5$	$10^4$	2	100	Galactic Centre style cloud	0.1

# 3. General Cloud Structure

Low-mass cloud ( $10^4 M_{\odot}$ )

High-mass cloud ( $10^5 M_{\odot}$ )



# 3. General Cloud Structure

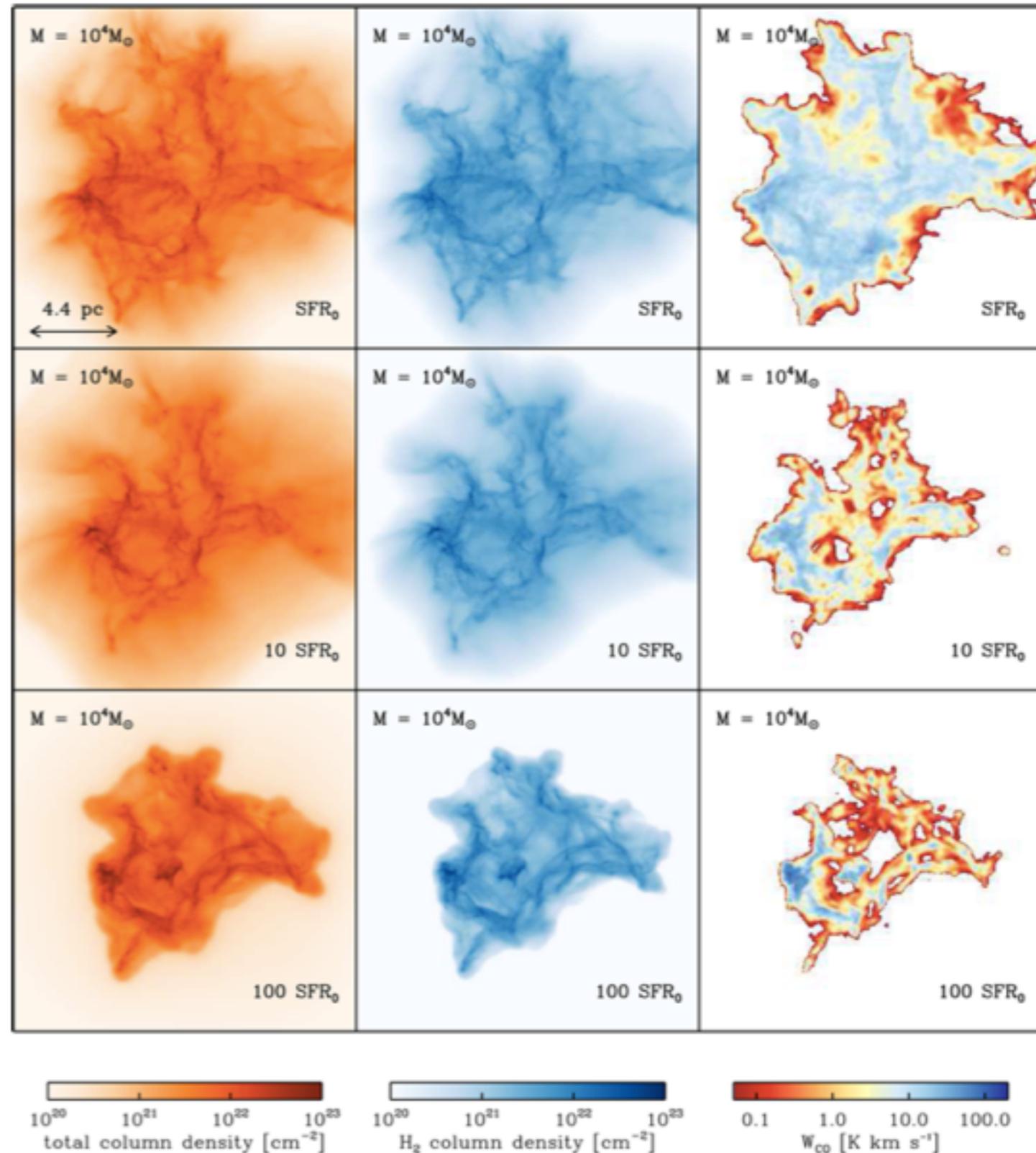
SFRの増加に伴い...

- **高密度のフィラメント構造が限定的に**

- ガス形成に対して heating がより効くようになり、乱流・重力によってガスが中心集中する

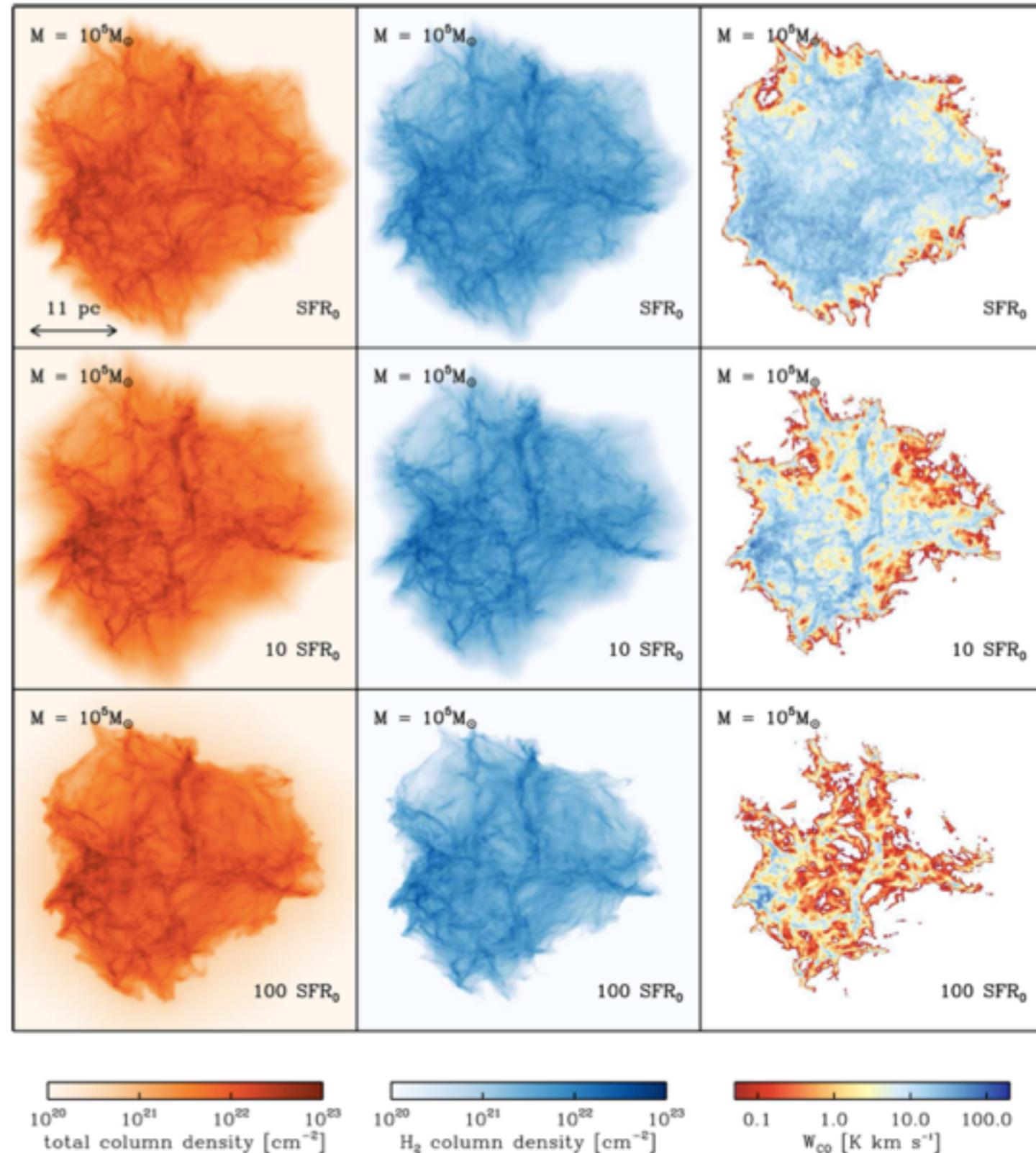
- **cloud envelope が明確に**

- ISRFが強いほど cloud の表面が加熱され、周囲の領域へ広がって halo を形成
- さらにISRFが強いと、halo が十分に加熱されて cloud へと押し戻され、境界が明確になる



# 3. General Cloud Structure

- H<sub>2</sub> 柱密度は全柱密度をよくトレースしている
  - 初期条件 (水素は全て H<sub>2</sub>とした) からは自然な結果
- outer envelope での H<sub>2</sub> はISRFが光解離 — 周囲の低密度領域をトレースできていない
- H<sub>2</sub> が生じ始める柱密度は、SFRとともに増加 ( $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3} \rightarrow \sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ )
- ISRFが大きく変化しても、H<sub>2</sub> を shield するのに必要なガス柱密度はあまり変化しない — dust shielding  $\propto \exp(n_{\text{total}})$



# 3. General Cloud Structure

$W_{\text{CO}}$  はSFRによって大きく変化

— cloudの構造の良いトレーサーではない

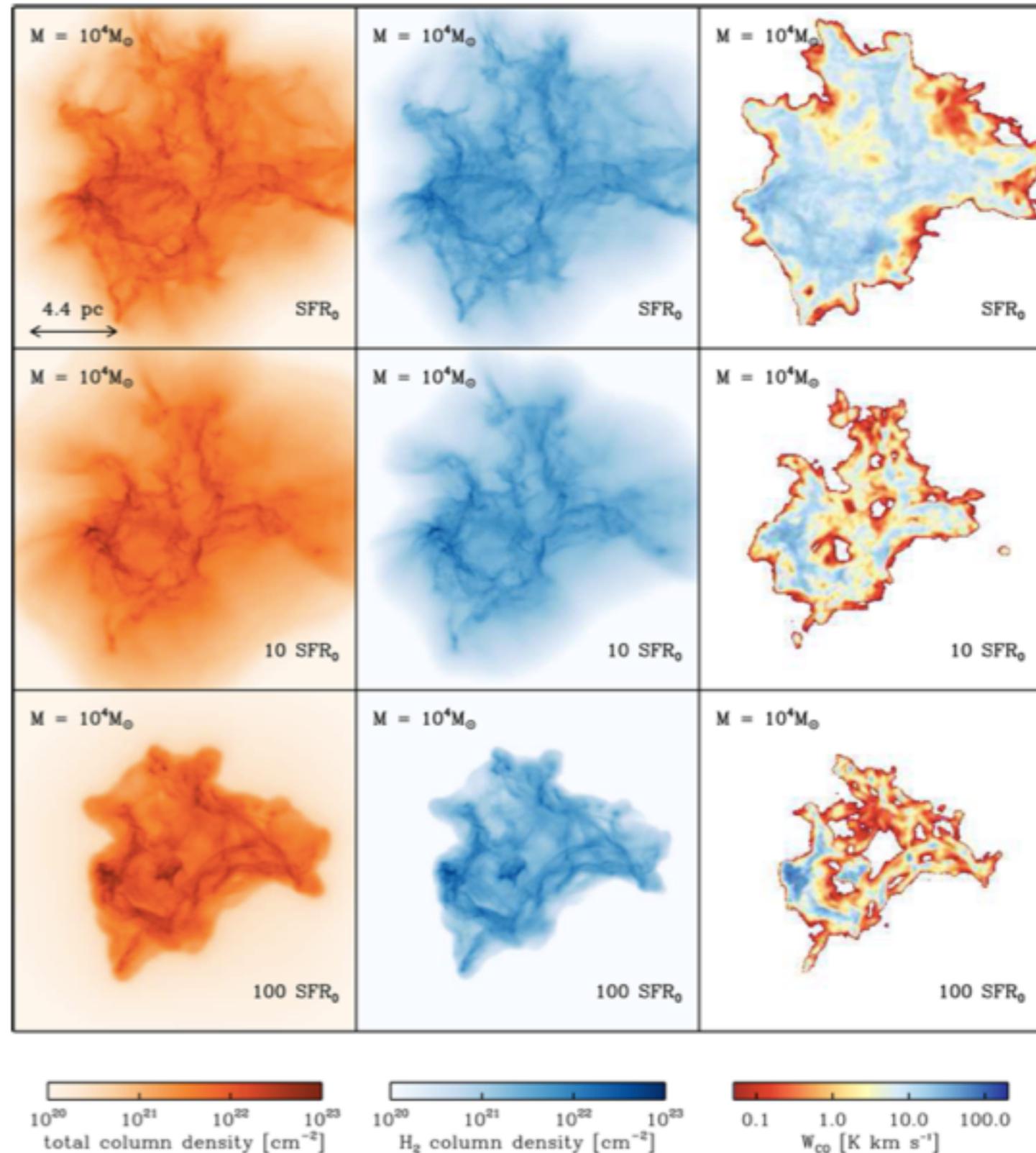
## • 低SFR (上段)

- $\text{H}_2$  分布中の feature はCO分布ではぼやける・消失している

- large optical depth のため  
(観測するのは  $\tau \sim 1$  の表面)

## • 高SFR (下段)

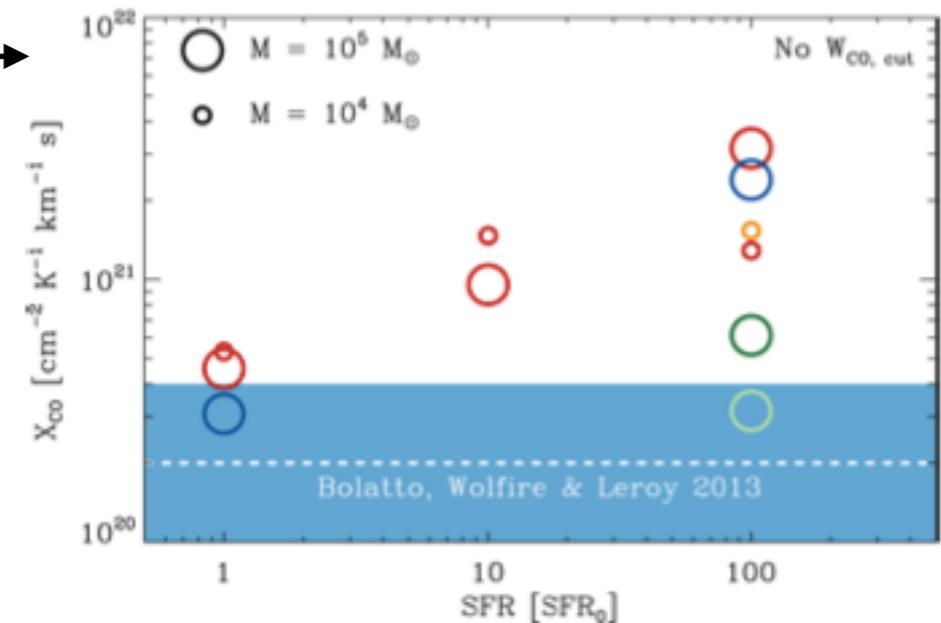
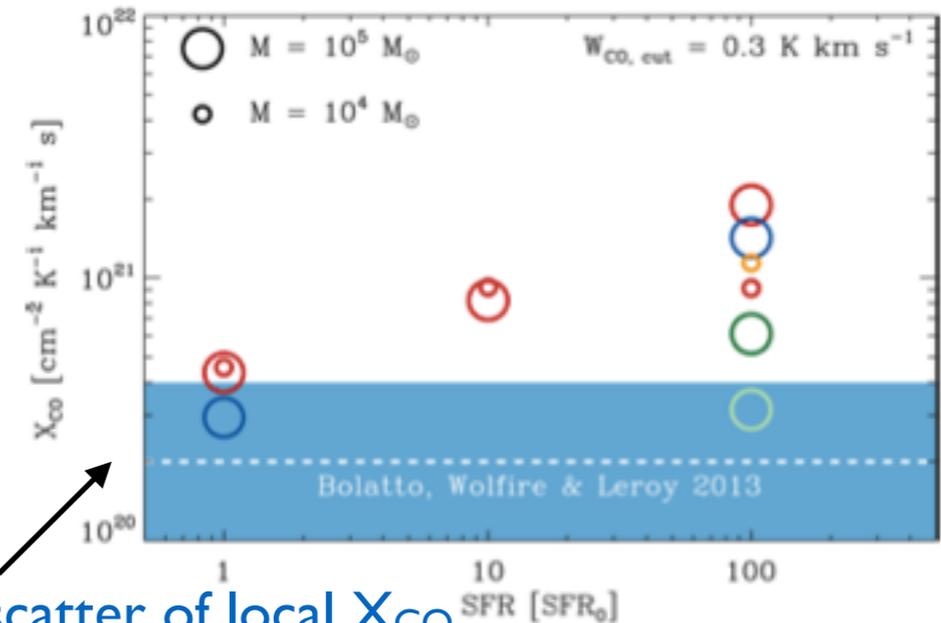
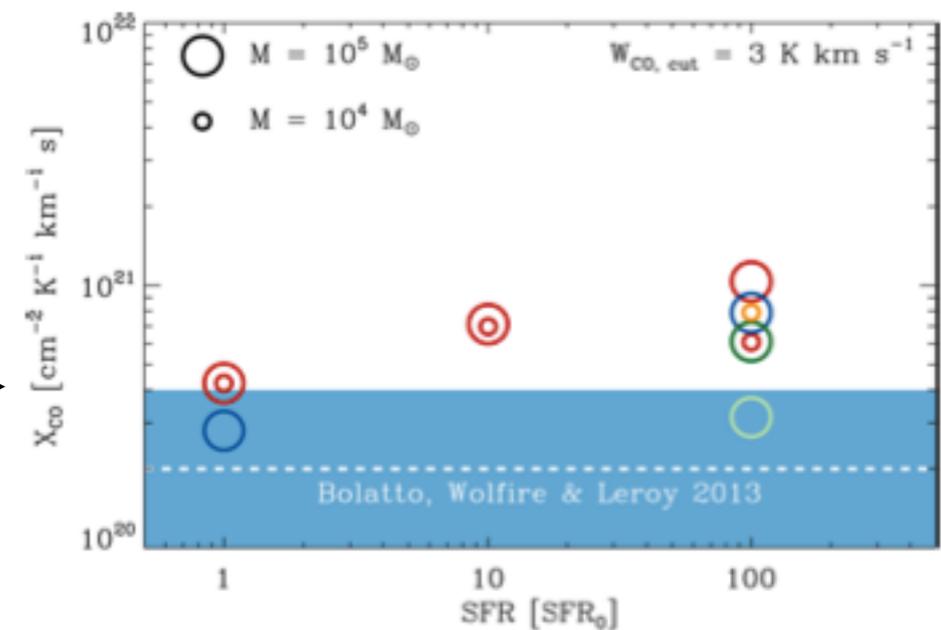
- CO の surface filling factor が減少
- 大部分の cloud で  $W_{\text{CO}} < 1 \text{ K km s}^{-3}$   
(検出限界以下)
- COのピークは高密度領域でより明るく
  - cloud の heating とCOの高い励起温度による



# 4. X-factor Variations

## 4.1. Computing the X-factor

- cloud の SFR が高くなると、CO が H<sub>2</sub> をよくトレースしない一方、ピークは強くなる
  - 両者が打ち消し合って X<sub>CO</sub> はあまり変化しない？
  - 大部分の cloud は CO を出さない (光解離されている) ？
- X<sub>CO</sub> =  $\langle N_{H_2} \rangle / \langle W_{CO} \rangle$  として、以下の2通りで導出
  - CO強度が threshold ( $W_{CO, cut}$ ) より強いピクセルでの平均値
    - 分解された cloud のみの場合 (近傍) に適切
    - 検出できない cloud は無視
  - 全ピクセルでの平均値
    - 分解されない cloud がある場合 (系外) に適切
    - COで見えない 'dark' molecular component が存在



canonical local value/scatter of local X<sub>CO</sub>

$n_0 = 100 \text{ cm}^{-3}$ , fully molecular

$n_0 = 100 \text{ cm}^{-3}$ , fully atomic

$n_0 = 100 \text{ cm}^{-3}$ , random seed for turbulent velocity field

$n_0 = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\alpha_{vir} = 0.5$

$n_0 = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\alpha_{vir} = 2.0$

# 4. X-factor Variations

## 4.2. Clouds with $SFR = SFR_0$

$SFR = SFR_0$  の場合の  $X_{CO}$  — 系内分子雲と近い値

- 質量  $\cdot W_{CO, cut}$  にあまり依存しない (先行研究と consistent)
  - CO は全  $H_2$  の良い指標
- 系内の標準的な  $X_{CO}$  より systematic に約2倍大きい
  - self-shielding を過大評価 — (CO 以上に)  $H_2$  が多くなる方向に影響
  - fully molecular の初期条件 (本来は必ず atomic hydrogen が存在)
    - $H_2$  を 10 - 20% 過大評価
      - fully atomic の初期条件では  $X_{CO}$  が減少
  - $\alpha_{vir} = 0.5$  の仮定 — gravitationally unbound ( $\alpha_{vir} > 1$ ) cloud が多く存在
    - $\alpha_{vir}$  が大きい cloud ほど長く維持され多くの CO を生成 ( $X_{CO}$  小)

canonical local value/scatter of  $X_{CO}$

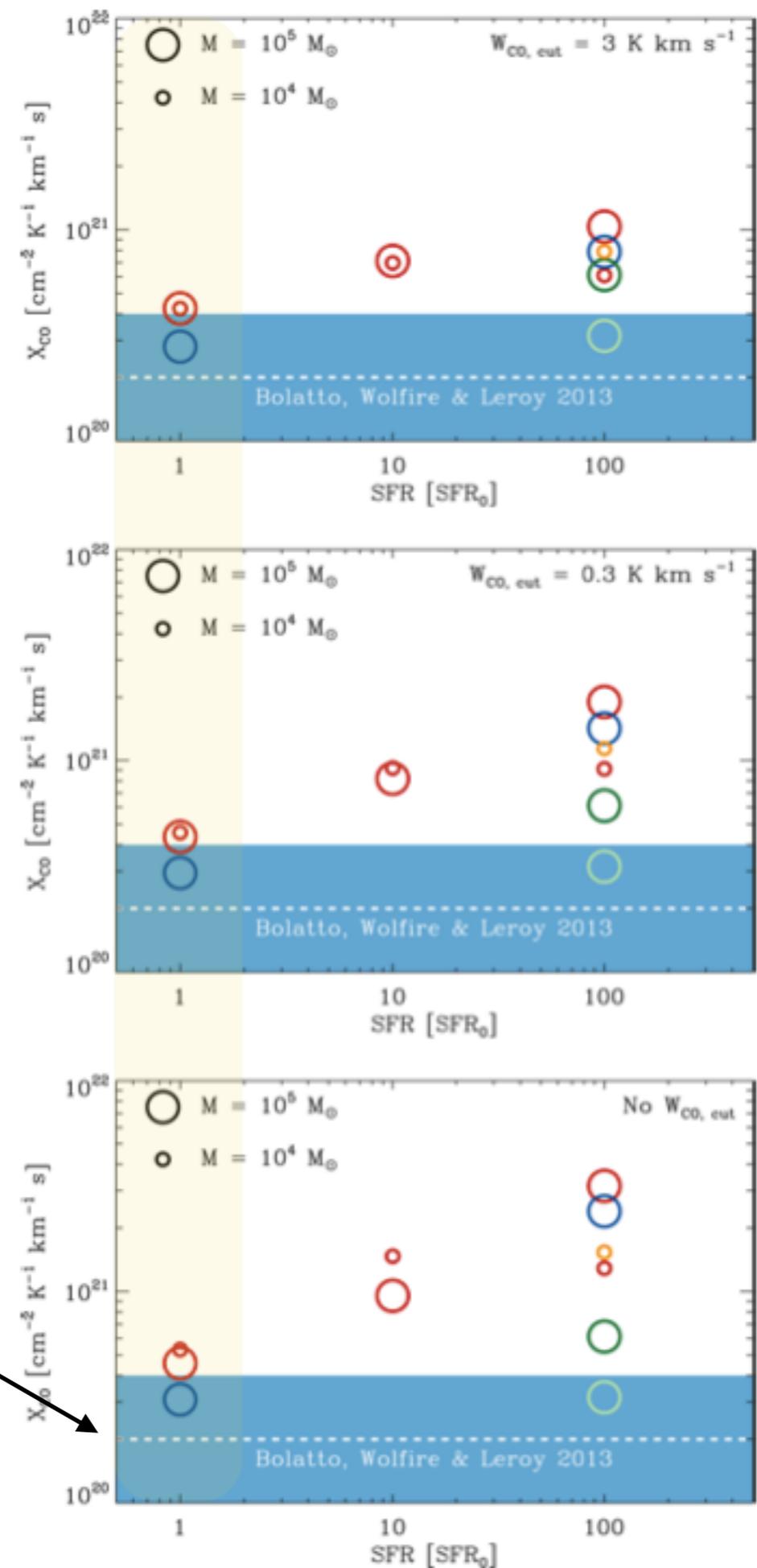
$n_0 = 100 \text{ cm}^{-3}$ , fully molecular

$n_0 = 100 \text{ cm}^{-3}$ , fully atomic

$n_0 = 100 \text{ cm}^{-3}$ , random seed for turbulent velocity field

$n_0 = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\alpha_{vir} = 0.5$

$n_0 = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\alpha_{vir} = 2.0$



# 4. X-factor Variations

## 4.3. Dependence on the SFR

- SFRが大きくなると  $X_{CO}$  も増加

- COが  $H_2$  より光解離されやすい
- high-mass cloud の方が傾向が強い (→ 次頁)

canonical local value/scatter of  $X_{CO}$

- 高密度 cloud ( $n_0 = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ , all molecular) では

- $X_{CO}$  が MW での値と近くなる
- 乱流力学エネルギーが高い (gravitationally unbound) 方が  $X_{CO}$  が低い

- CO detection threshold ( $W_{CO, cut}$ ) がない (小さい) 場合

- $X_{CO}$  のSFR依存性が大きくなる
- ‘CO-dark’ molecular gas (COが検出できないが  $H_2$  は存在する領域) の増加による

- CO-bright cloudに限れば、環境に依らず  $X_{CO}$  のSFR依存性は小さい

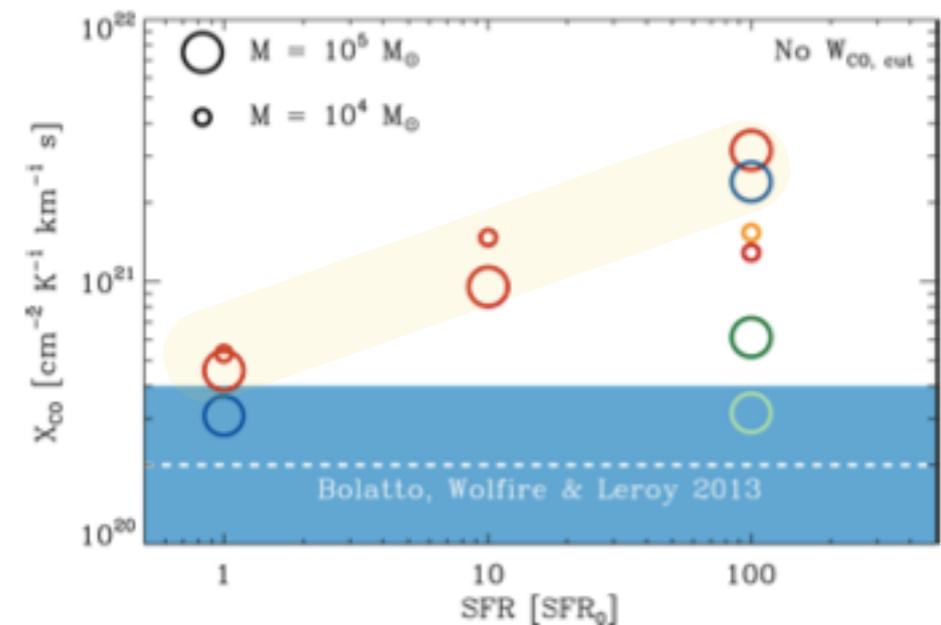
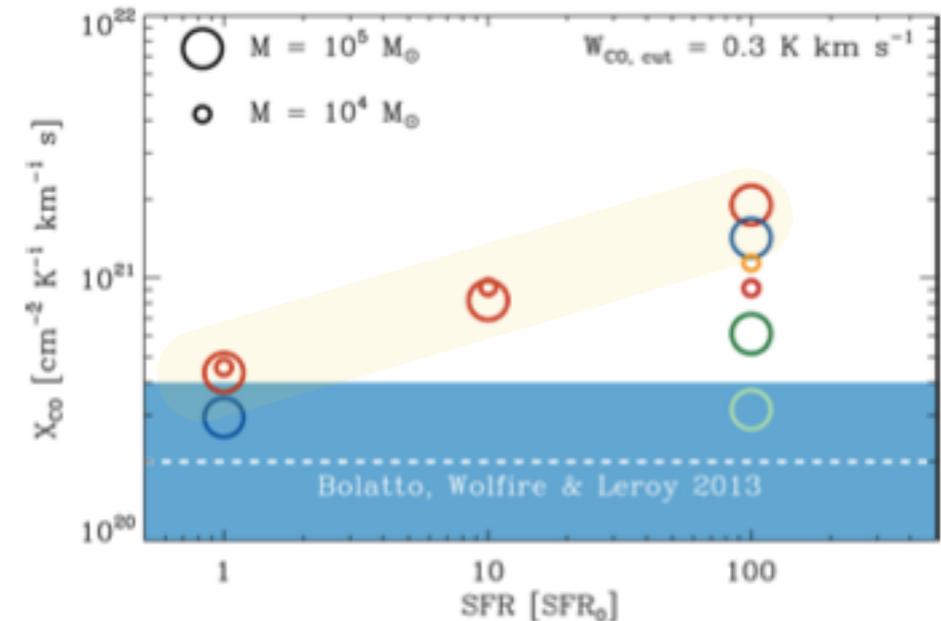
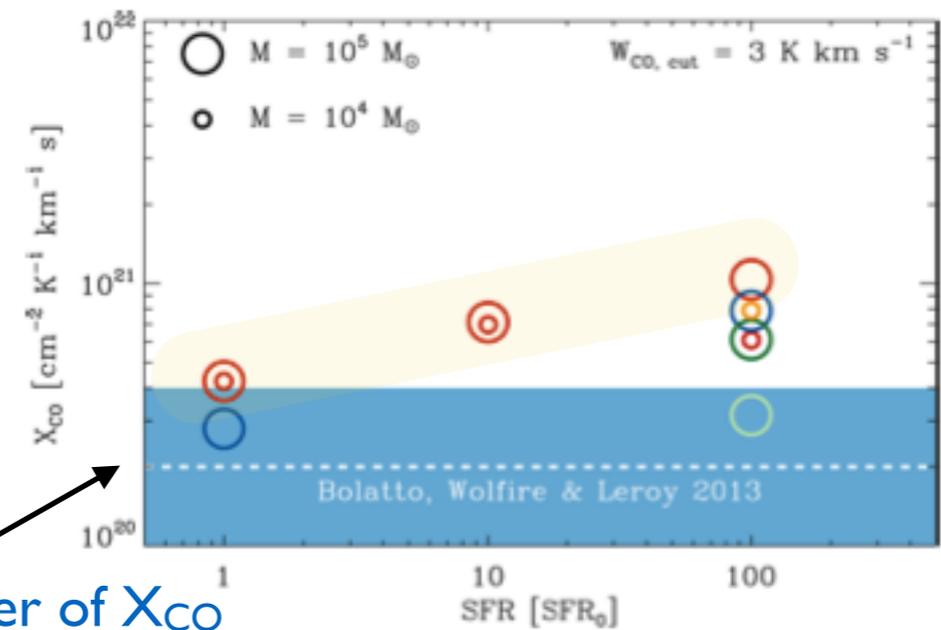
$n_0 = 100 \text{ cm}^{-3}$ , fully molecular

$n_0 = 100 \text{ cm}^{-3}$ , fully atomic

$n_0 = 100 \text{ cm}^{-3}$ , random seed for turbulent velocity field

$n_0 = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\alpha_{vir} = 0.5$

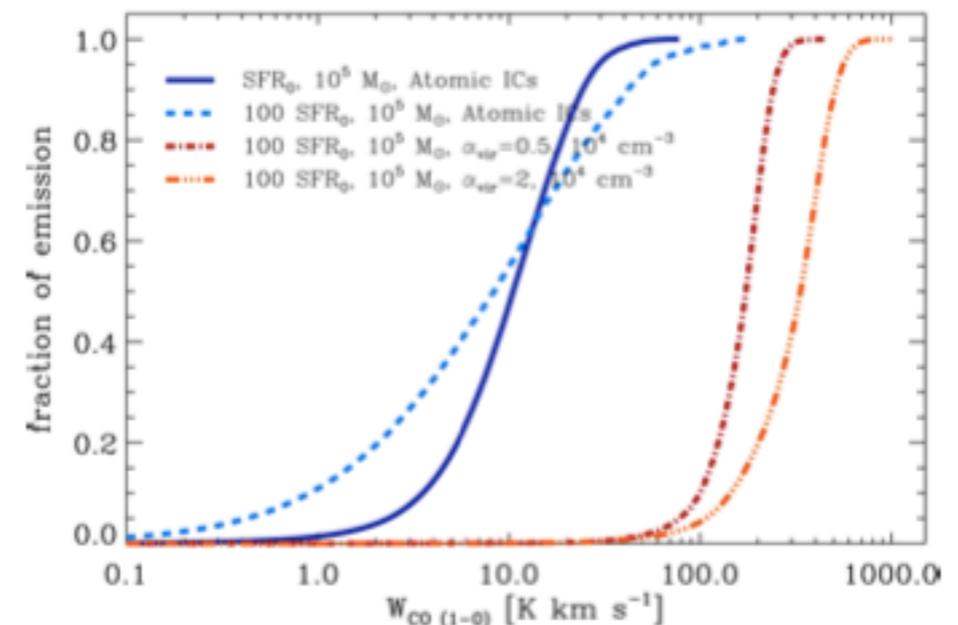
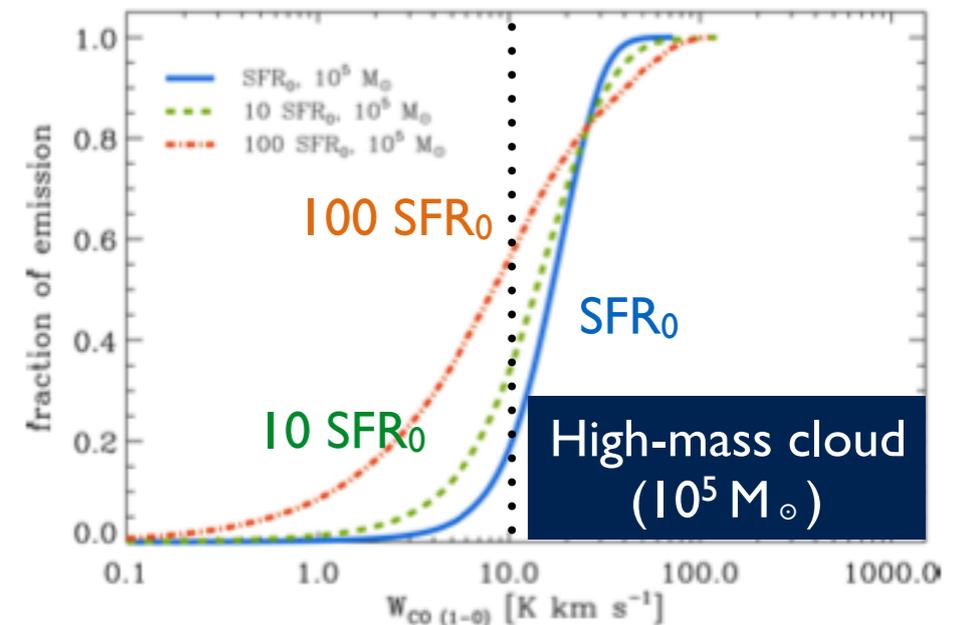
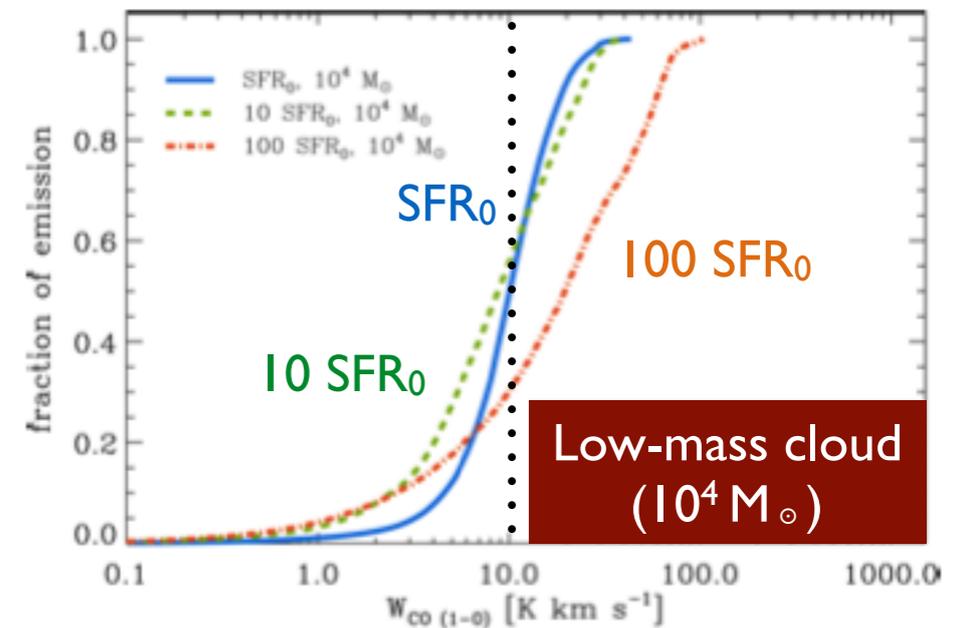
$n_0 = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\alpha_{vir} = 2.0$



# 4. X-factor Variations

## 4.3. Dependence on the SFR

- ある  $W_{\text{CO}}$  以下のピクセルから全CO放射のうちどれだけが出ているか (右図)
- **Low-mass cloud + high SFR**
  - 大部分の放射が  $W_{\text{CO}} > 10 \text{ K km s}^{-1}$  から
  - 平均的に低柱密度
    - SFRの増加に伴いCOが効率的に光解離
    - COが残るのは shielding が効く高密度領域 (高励起温度)に限られる
- **High-mass cloud + high SFR**
  - 大部分の放射が  $W_{\text{CO}} < 10 \text{ K km s}^{-1}$  から
  - 平均的に高柱密度
    - COの光解離があまり効かない
    - 低密度領域にもCOが存在し、filling factor が大きくなる



# 5. Discussion

## 5.1. Consequences for the Kennicutt-Schmidt relation

- $W_{\text{CO, cut}} = 0$  の場合、 $X_{\text{CO}}$  が SFR に対して大きく変化 → cloud の環境・SFR に対する依存性を知る必要性
- **Kennicutt-Schmidt relation の再検討**
  - CO luminosity に対して high-mass cloud が dominant とすると、近似的に  $X_{\text{CO}} \propto \text{SFR}^{1/2} \propto \Sigma_{\text{SFR}}^{1/2}$
  - **K-S relation:**  $\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{mol}}^{\text{Nobs}} \rightarrow \Sigma_{\text{SFR}} \propto (\Sigma_{\text{CO, em}} X_{\text{CO, gal}})^{\text{Nobs}}$  —  $X_{\text{CO}}$  が SFR に依存することから修正
  - 上の2式から、 $\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{mol}}^{\text{Nobs}} \Sigma_{\text{SFR}}^{-\text{Nobs}/2} \rightarrow \Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{mol}}^{\text{Nact}}$  ( $N_{\text{act}} = 2N_{\text{obs}} / (2 + N_{\text{obs}})$ )
  - 近傍銀河で  $N_{\text{obs}} \leq 1 \rightarrow N_{\text{act}} \leq 2/3$  — 活動的環境下では CO は SFR の良いトレーサーではなくなる
- 上記議論は、cloud の環境が SFR に大きく依存しないという仮定の下のもの
  - 「強い ISRF, CRIR による  $X_{\text{CO}}$  増加 < 高密度・乱流による  $X_{\text{CO}}$  の減少」の可能性
    - 近傍渦巻銀河の中心部、ULIRG、high-z 星形成領域では  $X_{\text{CO}}$  が小さい
- **結論:** 「CO emission の解釈をする前に、cloud の環境・性質を理解する必要がある」
  - さもないと、SFR の増加に対する  $X_{\text{CO}}$  の振る舞い (増加 or 減少 or 一定) が分からない
    - ⇒ CO は cloud の性質を知る重要な手段 — dust emission など別の手法を用いないと循環論法に

# 5. Discussion

## 5.2. Comparison with previous work

先行研究	内容	本研究との整合性
Bell et al. 2006	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>X_{CO}</math> を <math>A_V</math> の関数として、無数の gas slab 内でシミュレーション</li> <li>• <math>A_V</math> がある値以下だと <math>X_{CO}</math> が ISRF に強く依存</li> <li>• ISRF が強いほど高い <math>A_V</math> で遷移</li> </ul>	<p>本研究 (↓) と <b>consistent</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• CO-bright region で <math>X_{CO}</math> は SFR にあまり依存しない</li> <li>• CO-faint region を含めると SFR に強く依存</li> </ul>
Feldmann et al. 2012	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>X_{CO}</math> を <math>A_V</math> と ISRF の関数として、<math>L^*</math> galaxy の流体シミュレーション</li> <li>• <math>A_V \leq 6</math> では <math>X_{CO}</math> が ISRF に強く依存するが、<math>A_V &gt; 6</math> では ISRF と独立に</li> <li>• 全体で平均すると <math>X_{CO}</math> の ISRF 依存性は弱い</li> </ul>	<p>以下の理由で本研究と <b>inconsistent?</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• CRIR による CO の破壊が含まれていない</li> <li>• シミュレーションの分解能が 60 pc しかなく、大きな高密度 cloud にのみ敏感</li> </ul>
Narayanan et al. 2012	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 孤立・衝突銀河の SPH シミュレーション</li> <li>• <math>X_{CO} \propto \Sigma_{H_2}^{-1/2} \propto \Sigma_{SFR}^{-1/3}</math></li> <li>• SFR が大きいほど <math>X_{CO}</math> が低下</li> </ul>	<p>本研究と <b>inconsistent</b></p> <p>(高 SFR の cloud の平均的な性質が、低 SFR の場合とは同等でないので比較は困難)</p>
Lagos et al. 2012	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISRF と CRIR を変えたときの <math>X_{CO}</math> をセミアナで計算</li> <li>• <math>X_{CO}</math> に対する ISRF の影響は小さい</li> <li>• CRIR の上昇に伴い <math>X_{CO}</math> はやや増加</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISRF — <b>inconsistent</b>: 高い <math>A_V (= 8)</math> を仮定しているため、低密度ガスの寄与が無視されている</li> <li>• CRIR — <b>consistent</b></li> </ul>
Offner et al. 2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>• UV 強度を変えながらシミュレーション</li> <li>• <math>X_{CO} = 1.5 X_{CO,gal} (G_0 = 1.7), X_{CO} = 2.15 X_{CO,gal} (G_0 = 17)</math></li> </ul>	<p>傾向は <b>consistent</b> だが依存性はやや弱い</p> <p>CRIR の効果が入っていない分 CO の破壊が少ない</p>
Bisbas et al. 2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GMC での CO abundance を CRIR の関数として計算</li> <li>• 強い CRIR の下では、CO の破壊により SFR が上昇</li> </ul>	<p><math>X_{CO}</math> の SFR 依存性は計算していない</p>

# 5. Discussion

## 5.3. Caveats

本研究の結果を考える上での**注意点**

- **視線速度勾配**を考慮していない
  - $\text{H}_2$  の self-shielding の効果 •  $\text{H}_2$  柱密度を過大評価
- cloud 中で **CRIR** を均一と仮定している
  - 高密度領域では宇宙線が吸収を受け、CRIRが低下する可能性
  - 高密度ガスの heating rate • COの解離率を過大評価
- $\text{SFR} \propto \text{ISRF}$ , **CRIR** の仮定は単純すぎる？

※いずれも「SFRの上昇とともに  $X_{\text{CO}}$  も増加する」という傾向を大きく変えるほどではない

Does the CO-to- $\text{H}_2$  conversion factor depend on the star formation rate? → **YES!**

- **SFRの上昇に伴い、 $X_{\text{CO}}$  は大きくなる**
- 特に '**CO-dark**' gas が多い (cloud を分解できない) 場合、 $X_{\text{CO}}$  の変化は大きく**注意が必要**
- CO emission を**解釈する前に**、dust emission などから **cloud の環境・性質を知ることが重要**

# 6. Conclusion

- 分子雲進化の数値シミュレーション
  - ISRF・CRIR ( $\propto$  SFR) を変えたとき、CO emission の強度分布を計算
  - CO-to-H<sub>2</sub> conversion factor ( $X_{\text{CO}}$ ) のSFR依存性を探る
- 結果：SFRが高くなると  $X_{\text{CO}}$  は増加する
  - SFRの上昇によって shield されない低密度領域でCOが光解離
    - bright-CO の filling factor が減少 — cloud 全体のCO光度も低下
  - ‘CO-dark’ cloud を含む全領域を含めると、およそ  $X_{\text{CO}} \propto \text{SFR}^{1/2}$
  - CO強度の threshold をかけると、 $X_{\text{CO}}$  のSFR依存性は小さくなる
  - 初期条件を高密度・gravitationally unbound にすると、 $X_{\text{CO}}$  は Galactic value と近くなる (弱いながらSFRとの正の相関はある)
  - 星形成領域では cloud の環境が local ISM とは大きく異なり、 $X_{\text{CO}}$  も大きく変わりうる
    - 低密度・ビリアル平衡にある cloud などとはとりわけ注意が必要
    - CO emission を解釈する前に、cloud の性質を理解する必要がある