

3:15 pm ~

宇電懇シンポジウム2017 @ 国立天文台, 2018年3月20日(火)

多相星間媒質中における

分子雲質量関数の時間発展と星形成過程

(Kobayashi+ 2017 in ApJ, 2018a PASJ in press, 2018b in progress.)

天体/手法: 巨大分子雲(の集団) / 半解析的・シミュレーション
最終目標: 銀河円盤部での過去<1Gyrに及ぶ星形成過程の理解

小林 将人 (名古屋大学 D3)

4月から大阪大学



Team BISTRO-J

<共同研究者>

犬塚修一郎, 井上剛志, 小林浩, 福井康雄, 長谷川賢二

(名古屋大学)

目次

✓ 背景

- ◆ 多相星間媒質 (multiphase ISM)

✓ 銀河スケールでのGMC集団の時間発展

- ◆ 膨脹セルのネットワーク
- ◆ GMC質量関数の時間発展方程式を定式化:
分子雲形成・進化・破壊・衝突(合体)・再生
- ◆ GMC質量関数の幕分布(とGMC再生率)

✓ 星形成の担い手

- ◆ **衝突誘起の大質量星形成**・分子雲の急速な破壊
- ◆ 星形成活動の内訳と観測可能性

✓ 多相星間媒質シミュレーション

- ◆ 多相星間媒質の1流体近似

✓ まとめ

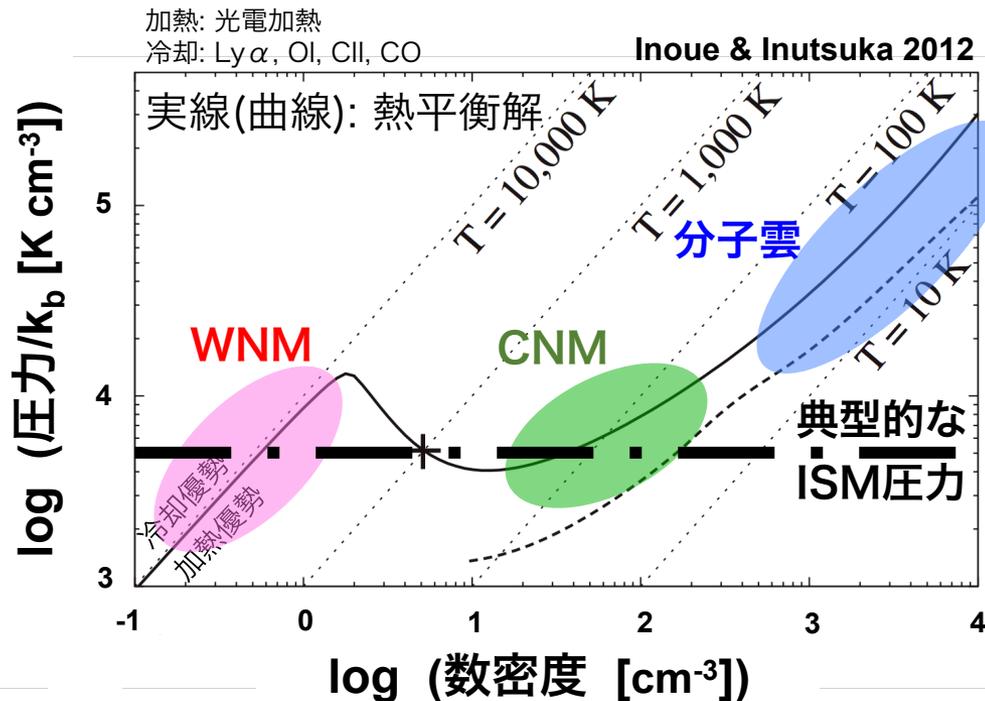
背景

- ✓ 多相星間媒質 (Multiphase ISM)

多相星間媒質 (現在の宇宙)

(c.f., Field 1965, Wolfire+ 1995)

熱平衡状態と熱不安定



1) Warm Neutral Medium (WNM)

温かい水素原子ガス
 10^{-2} 個 cm $^{-3}$, 10^4 K
 銀河円盤の体積の大半を占める

2) Cold Neutral Medium (CNM)

冷たい水素原子ガス
 10^{0-2} 個 cm $^{-3}$, 10^{1-3} K

3) Molecular Gas (分子雲)

水素分子ガス (本発表では ^{12}CO で明るい部分)
 $>10^2$ 個 cm $^{-3}$, $<10^1$ K
 星形成の母天体

WNM – CNM 中間領域は熱不安定;
 自己重力での静々とした収縮は極非効率...
 磁場による圧縮の遅滞もある...

➡ 外的要因(超音速流)でWNMを圧縮/効率良く冷却し,
 CNM/分子雲へ変換(相転移)させる。

典型的な(最大成長)波長: 音速 x 冷却時間 \sim (0.1-1) pc @ (CNM-WNM)

➡ この過程(\sim a few 0.1pc)と, 銀河円盤に広がるGMC集団の進化を理論的に接続する。

銀河スケールでの GMC集団の時間発展

(Kobayashi+ 2017 in ApJ.)

- ✓ 膨脹シェルネットワーク
- ✓ GMC質量関数の時間発展方程式を定式化
(形成・質量成長・破壊・衝突合体・再生)

多数回圧縮駆動のGMC集団分布の描像

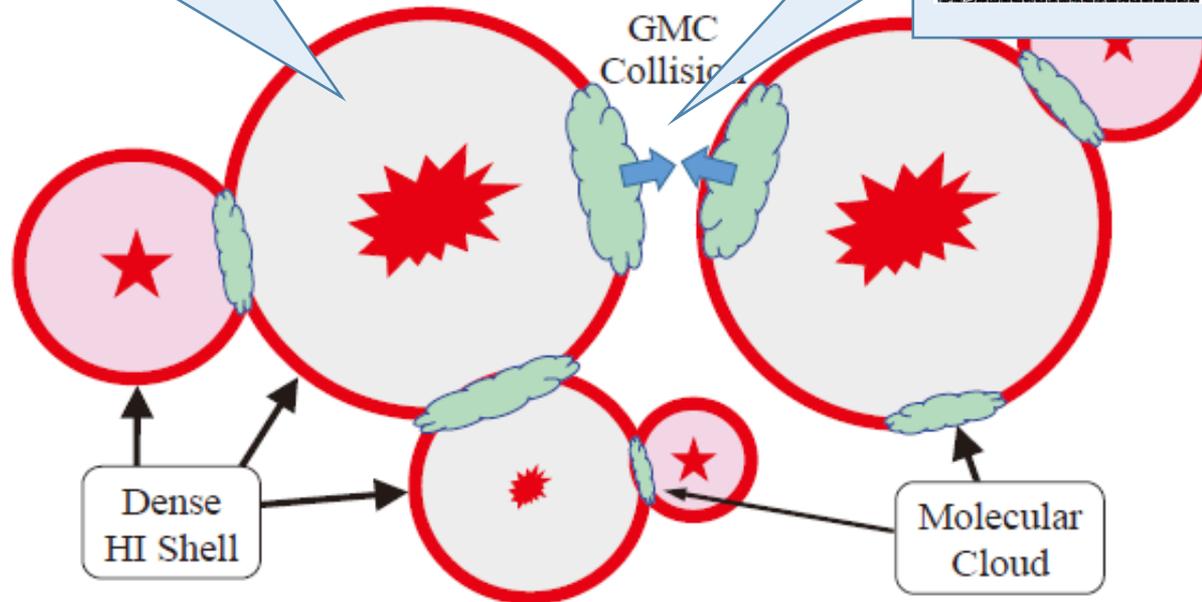
銀河スケールでの膨脹シェル
ネットワーク (Inutsuka+ 2015)

HII領域 / 超新星残骸(SNR)

分子雲衝突 (CCC)



Fukui+ 2014
Nakamura+ 2012
Torii+2015



➡ **100pcスケール (~1SNRサイズ) をワンゾーン化した, GMC質量関数の半解析的な時間発展方程式を定式化する**

時間発展方程式

(c.f., Levinson & Roberts 1981, Kwan 1979, Scoville & Hersch 1979, Cowie 1980, Tomisaka 1984)



n_{cl} : 質量 m を持ったGMCの微分数密度

$$\frac{\partial n_{cl}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial m} \left(n_{cl} \frac{m}{T_f} \right) =$$

$$-\frac{n_{cl}}{T_d}$$

大質量星からの輻射フィードバックによる**GMCの自己破壊**
($T_d \sim 14$ Myr; c.f. radiation hydrodynamics simulation: Hosokawa+ 2009, Inutsuka+ 2015)

$$+ \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^\infty K(m_1, m_2) n_{cl,1} n_{cl,2} \times \delta(m - m_1 - m_2) dm_1 dm_2$$

$$- \int_0^\infty K(m, m_2) n_{cl} n_{cl} dm_2$$

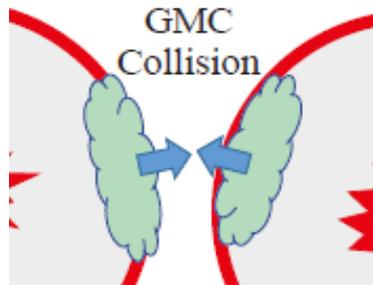
$$+ \frac{1}{m} \frac{\partial (n_{cl} m)}{\partial t} \Big|_{res}$$

GMCの再生 ϵ_{res}
(最小質量GMC集団の再充填)

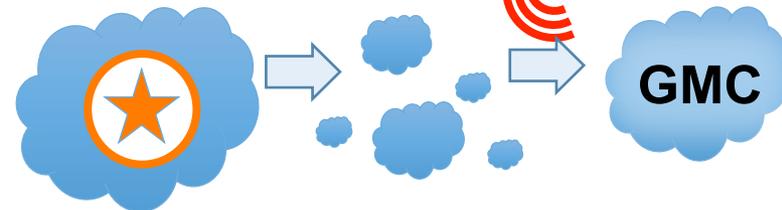
多数回圧縮による
GMC形成/質量成長

($T_f \sim 10$ Myr;
c.f. Inoue & Inutsuka 2012)

分子雲衝突(合体)
(Cloud-Cloud Collisions
(CCCs))



破壊(消失) 再圧縮



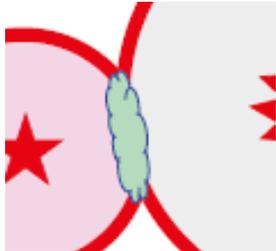
時間発展方程式

(c.f., Levinson & Roberts 1981, Kwan 1979, Scoville & Hersch 1979, Cowie 1980, Tomisaka 1984)

n_{cl} : 質量 m を持ったGMCの微分数密度

$$\frac{\partial n_{cl}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial m} \left(n_{cl} \frac{m}{T_f} \right) =$$

多数回圧縮による
GMC形成/質量成長



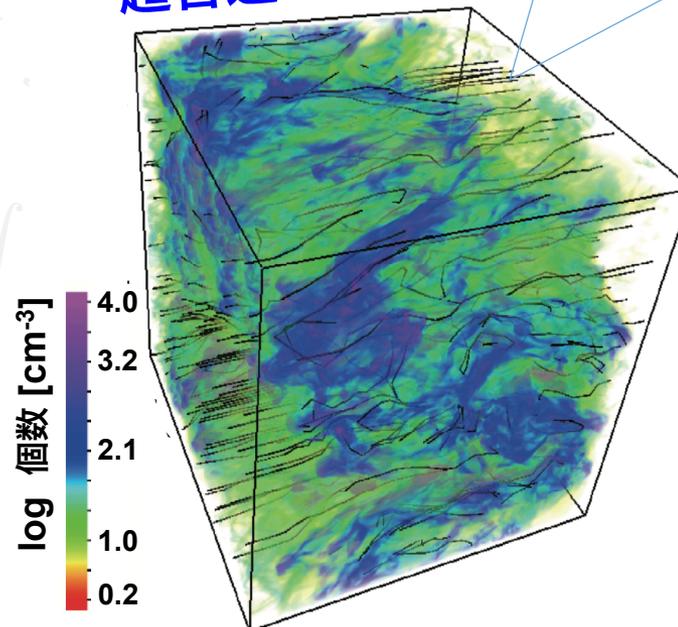
($T_f \sim 10$ Myr;
c.f. Inoue & Inutsuka
2012)

分子雲衝突(合体)
(Cloud-Cloud Collisions
(CCCs))

Inoue & Inutsuka, 2012

磁場
←
超音速HI流

磁場に沿った(<15度)
圧縮に至れば、分子雲
形成は可能.



分子雲形成に至るためには
(統計的には)多数回(10-30回)の圧縮を
経験する必要がある.

時間発展方程式

(c.f., Levinson & Roberts 1981, Kwan 1979,
Scoville & Hersch 1979, Cowie 1980, Tomisaka 1984)



n_{cl} : 質量 m を持ったGMCの微分数密度

$$\frac{\partial n_{cl}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial m} \left(n_{cl} \frac{m}{T_f} \right) =$$

$$- \frac{n_{cl}}{T_d}$$

大質量星からの輻射フィード
バックによる**GMCの自己破壊**
($T_d \sim 14$ Myr; c.f. radiation hydrodynamics
simulation: Hosokawa+ 2009, Inutsuka+ 2015)

$$+ \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^\infty K(m_1, m_2) n_{cl,1} n_{cl,2} \times \delta(m - m_1 - m_2) dm_1 dm_2$$

$$- \int_0^\infty K(m, m_2) n_{cl} n_{cl} dm_2$$

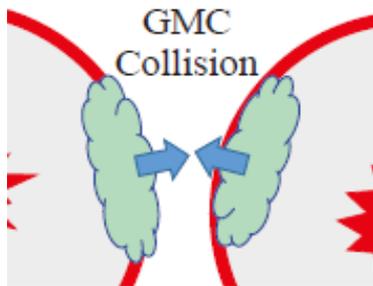
$$+ \frac{1}{m} \frac{\partial (n_{cl} m)}{\partial t} \Big|_{res}$$

GMCの再生 ϵ_{res}
(最小質量GMC集団の再充填)

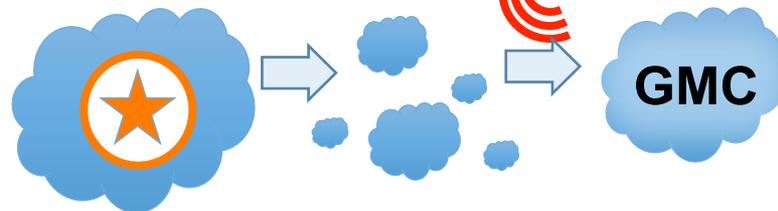
多数回圧縮による
GMC形成/質量成長

($T_f \sim 10$ Myr;
c.f. Inoue & Inutsuka
2012)

分子雲衝突(合体)
(Cloud-Cloud Collisions
(CCCs))



破壊(消失) 再圧縮



初期条件とパラメータ設定

初期には最小質量GMCのみ用意



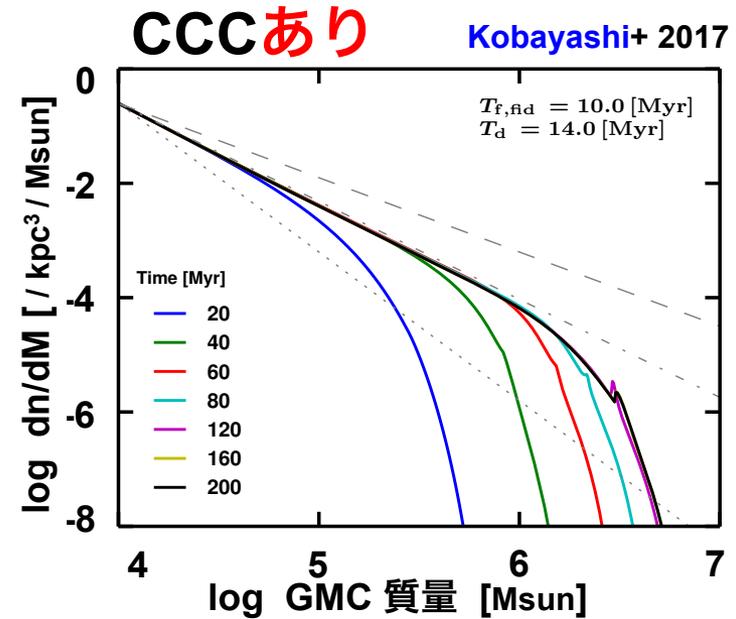
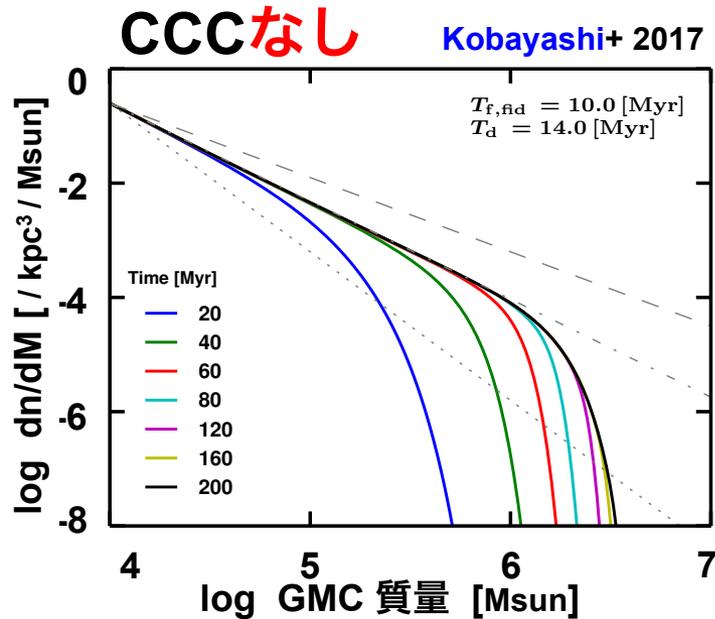
あるgiven環境下での時間発展を議論する
(T_f , T_d , ε_{res} は計算時間内で固定).

結果

- ✓ GMC質量関数の冪分布
- ✓ 再生率と冪分布の関係

質量関数の時間発展

Fiducial 計算 ($T_f = 10\text{Myr}$, $T_d = 14\text{Myr}$, $\epsilon_{\text{res}} = 0$ (手で与える))



➡ CCCの影響は、大質量エンドで顕著. (CCC に続く星・星団形成も)

冪分布 ($<10^{5.5}$ Msun) は **CCC の影響小**; T_f と T_d で決まる.

$$\frac{\partial n_{\text{cl}}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial m} \left(n_{\text{cl}} \frac{m}{T_f} \right) = -\frac{n_{\text{cl}}}{T_d} \xrightarrow{\text{準定常近似}} n_{\text{cl}}(m) = n_0 \left(\frac{m}{M_\odot} \right)^{-1 - \frac{T_f}{T_d}}$$

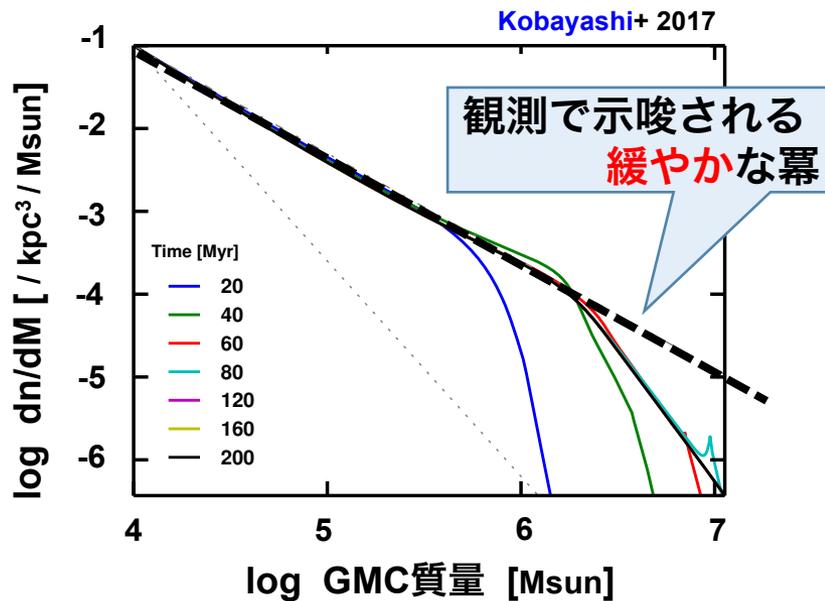
準定常系での T_f 多様性

$T_f = \text{ISMの圧縮頻度}$

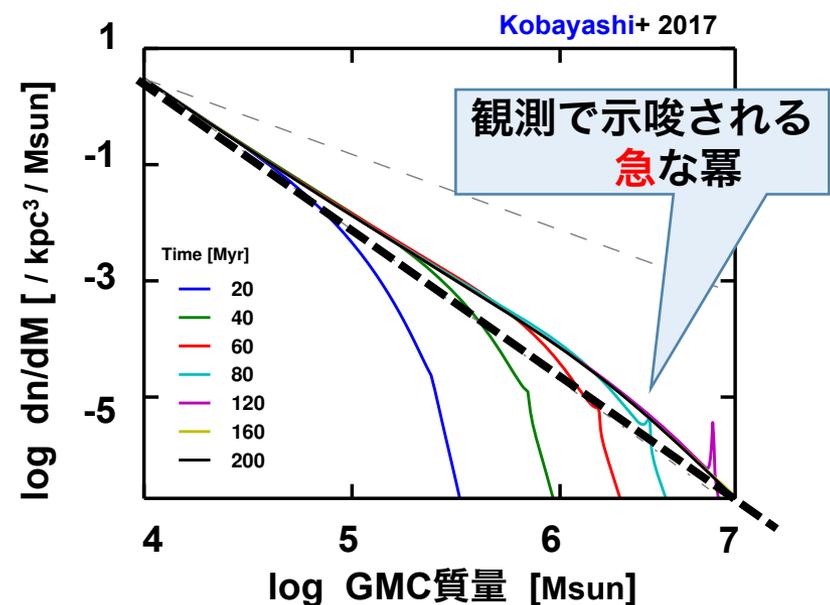
$$n_{\text{cl}}(m) = n_0 \left(\frac{m}{M_{\odot}} \right)^{-1 - \frac{T_f}{T_d}} \rightarrow \begin{array}{l} \text{高(低)星形成率} = \text{短い(長い)} T_f \\ = \text{緩やか(急な)冪分布} \end{array}$$

(M51の星形成率分布: $T_f = 4\text{-}16$ Myr 程度)

渦状腕: $T_f = 4.2$ Myr, $\epsilon_{\text{res}} = 0.012$,



渦状腕間: $T_f = 22.4$ Myr, $\epsilon_{\text{res}} = 0.45$



➡ 大規模観測による冪測定は、銀河環境ごとの T_f/T_d 評価(制限)となりうる。

星形成の担い手

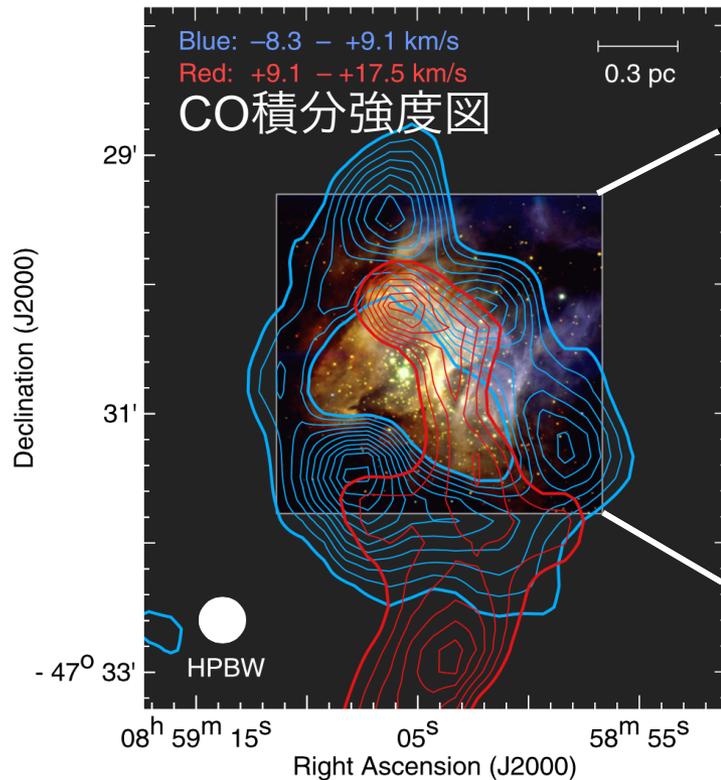
(Kobayashi+ 2018a accepted in PASJ)

- ✓ 衝突に誘起される大質量星形成
- ✓ GMCの急速な消失
- ✓ 星形成率の内訳
- ✓ 衝突天体の観測可能性

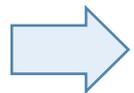
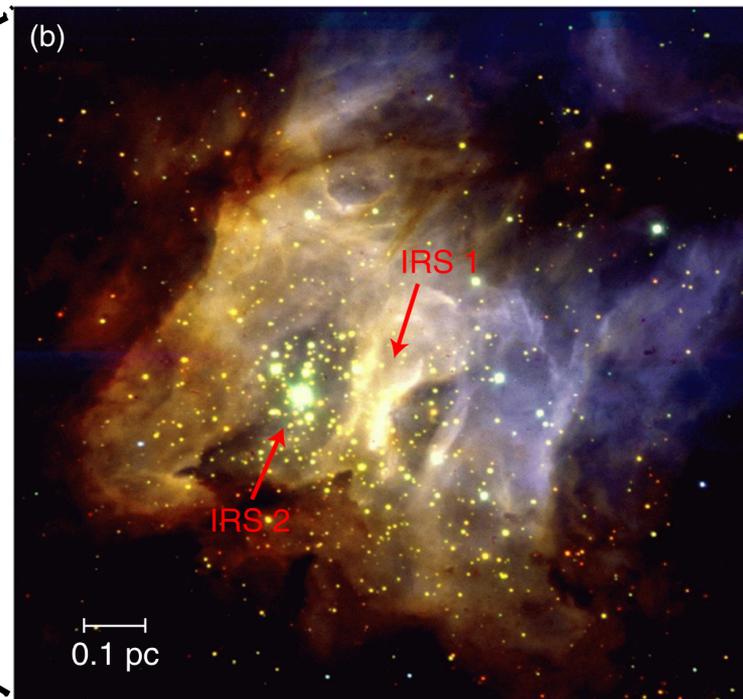
分子雲衝突現場の星形成

O(B)型星が観測される

例) RCW38 (Fukui+ 2016)



分子雲同士の接点にO(B)型星候補が分布



1) 相補的な速度構造

2) 位置速度図にブリッジ成分

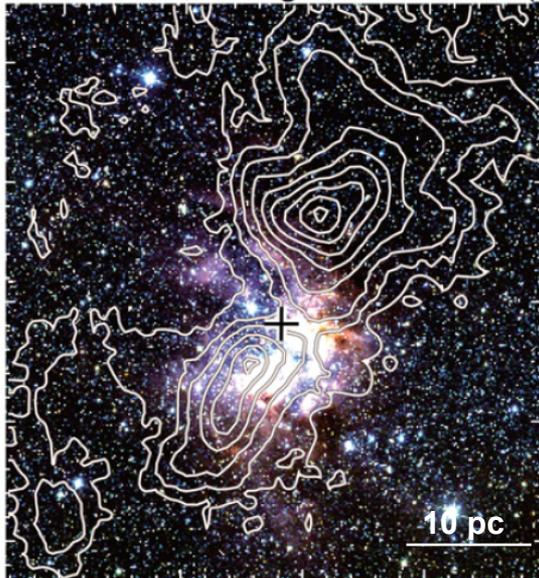
0.1 Myr 程度前の分子雲衝突誘起な星形成活動を示唆.

分子雲衝突現場の星形成

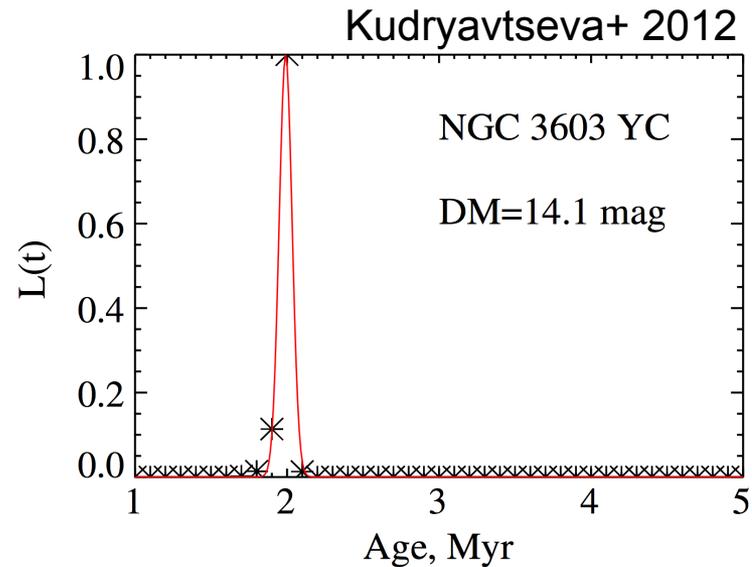
衝突による短時間の急激な星形成

例) NGC3603 同様の傾向 (Westerlund2, W51, M17, NGC6334, NGC6357, M16, W33, M42, RCW166, S116, S117, S118, M43, RCW36, M20, RCW120, NGC2024, RCW34, ... etc.)

^{12}CO 等高線 + JHKイメージ
Fukui+ 2014



星年齢の確率分布 (等時線の仮定あり)

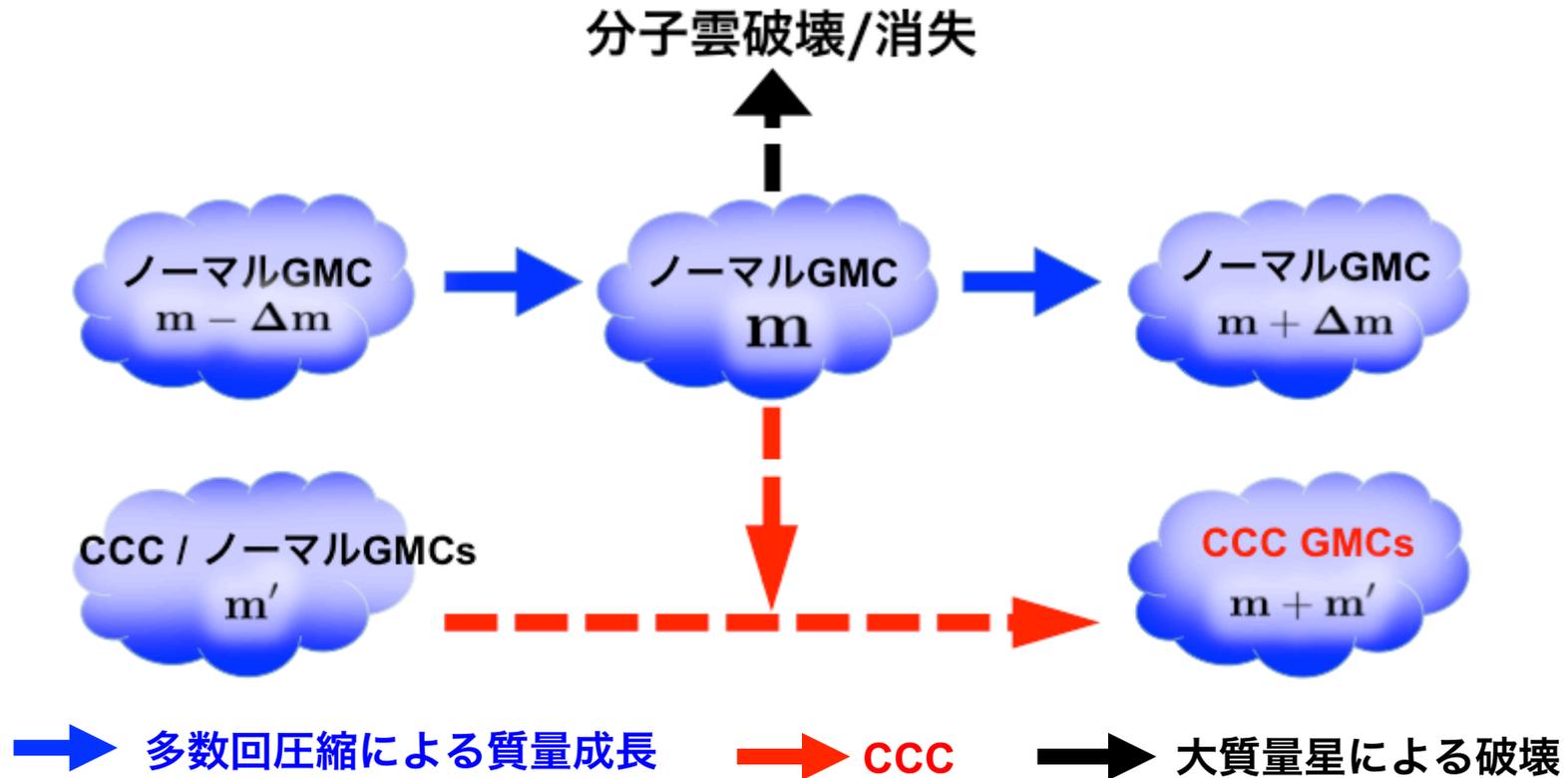


複数個の**O型星**が, 僅か**0.5pc**スケールに**1Myr**以内で形成

➡ **銀河の星形成活動にどの程度寄与しているか評価する**

2種族GMC系

CCC経験後はノーマル状態に戻らない



CCC種族は短いTdを持つ.

(CCC種族はCCCで急速に形成された大質量星のフィードバックに常に暴露される(とみなす).)

2種族GMC系

時間発展方程式と星形成率(SFR)

n_{acc} : ノーマル種族

n_{col} : CCC種族

$T_d = 14 \text{ Myr} (=10+4)$

$T_{d,\text{col}} = 5 \text{ Myr} (=1+4)$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial (n_{\text{acc,cl}} + n_{\text{col,cl}})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial m} \left((n_{\text{acc,cl}} + n_{\text{col,cl}}) \frac{m}{T_f} \right) \\
 = & -\frac{n_{\text{acc,cl}}}{T_d} - \frac{n_{\text{col,cl}}}{T_{d,\text{col}}} \\
 & + \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^\infty K(m_1, m_2) \\
 & \quad \times (n_{\text{acc,cl,1}} + n_{\text{col,cl,1}})(n_{\text{acc,cl,2}} + n_{\text{col,cl,2}}) \\
 & \quad \times \delta(m - m_1 - m_2) dm_1 dm_2 \\
 & - \int_0^\infty K(m, m_2) \\
 & \quad \times (n_{\text{acc,cl}} + n_{\text{col,cl}})(n_{\text{col,cl,2}} + n_{\text{col,cl,2}}) dm_2 \\
 & + \frac{1}{m} \frac{\partial (n_{\text{cl}} m)}{\partial t} \Big|_{\text{res}} .
 \end{aligned}$$

仮定: 種族に依らず
同じ星形成効率

$\epsilon_{\text{SFE}} = 1\%$



ノーマルな星形成 **CCC誘起の星形成**

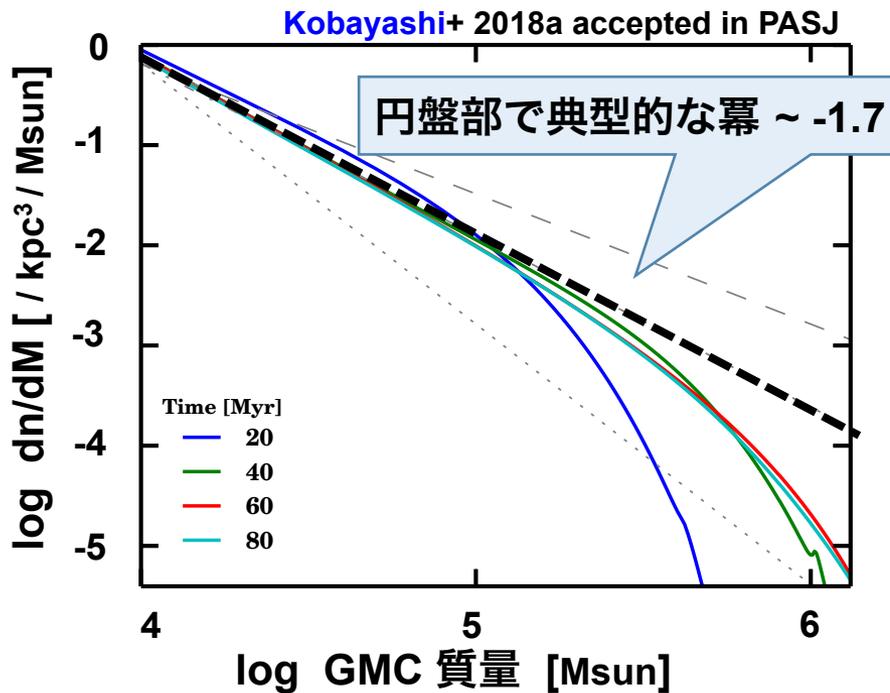
$$\text{SFR}(> m) = \epsilon_{\text{SFE}} \times \left(\int_m^\infty \frac{mn_{\text{acc,cl}}}{T_d} dm + \int_m^\infty \frac{mn_{\text{col,cl}}}{T_{d,\text{col}}} dm \right)$$

結果

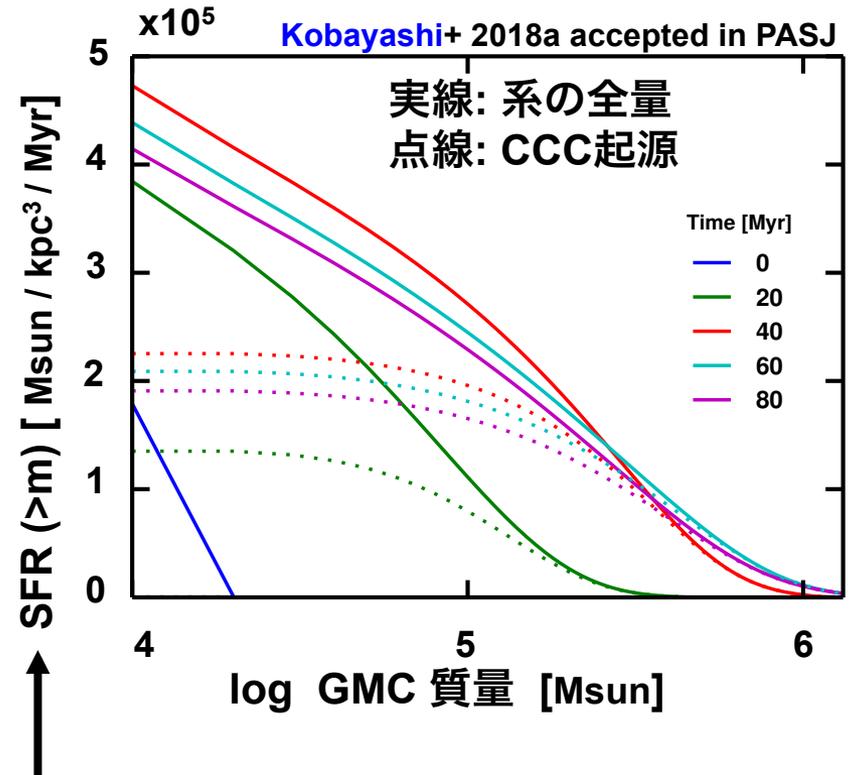
- ✓ GMC質量関数の冪分布
- ✓ 星形成率の内訳
- ✓ 観測可能性

2種族GMC系

1) GMC質量関数



2) 累積星形成率(>m)

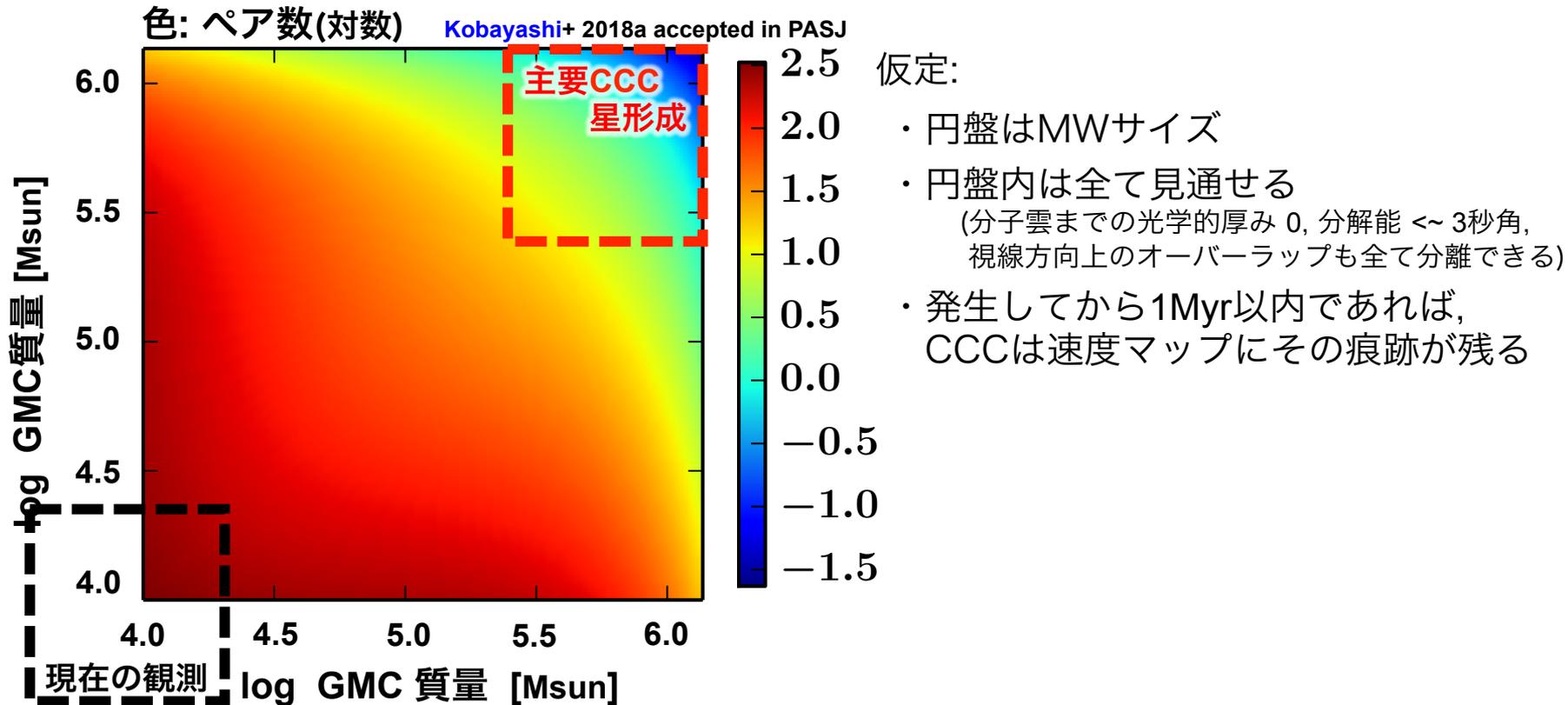


縦軸 = 数 Msun/年 相当 (in 天の川銀河サイズの円盤: 10kpc x 10kpc x 100pc)

➡ **CCC起源の星形成は、銀河(天の川や近傍)円盤全体の星形成の数10%程度に寄与. その大半は $>10^{5.5}$ Msun の GMC の CCC である.**

観測可能性

観測(でCCCと認定可能な)される衝突天体の質量ペア



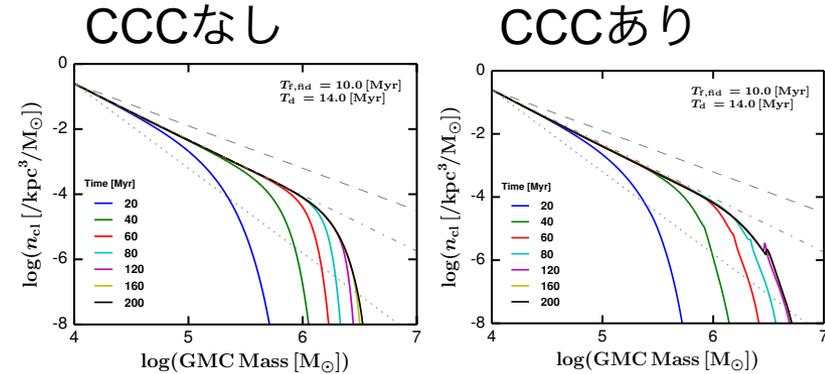
GMC数が多い低質量同士(10^4 Msun)は, 観測可能イベント数も多い (現状の観測と整合的)

➡ **大質量GMC同士($\geq 10^{5.5}$ Msun)は極めて少ない(~ 10 天体)が,**
銀河の星形成活動への寄与を評価するためにも是非観測したい。

まとめ

✓背景: ISMの多相性

- ◆ 銀河スケールでのGMC集団
- ◆ GMC質量関数の時間発展方程式
- ◆ 磁場による分子雲形成の”遅滞”



✓GMC質量関数の時間発展と衝突HI流

- ◆ 冪分布と再生率は T_f/T_d で, 大質量エンドは **CCC** で決まる.
- ◆ **CCC**誘起星形成は, 銀河円盤の星形成の数10%(要観測).

✓今後の課題(展望):

- ◆ T_f, T_d の時間変動
- ◆ 背景場(背景ISM)の時間発展
- ◆ 輻射フィードバック@衝突現場

CCC観測可能性

