

研究課題名

大規模シミュレーションで見る宇宙初期から現在に至る星形成史の変遷



INTRODUCTION

CMFとIMFの関係

-> IMF/CMF = 0.3 - 0.5 (Andre et al. 2010)

現在、天の川銀河

原始星アウトフローの観測例多数

-> アウトフローの星形成への影響大(理論研究)

-> 50% - 70% の分子雲コアガスを外部に輸送可能?

現在、天の川銀河以外

アウトフローの観測例なし

-> 数値シミュレーションなし

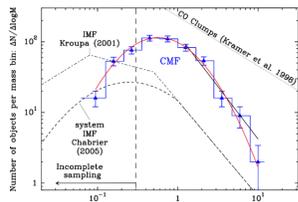


図1. IMF (Andre et al. 2010)

MODEL & NUMERICAL METHOD

表1の28通りのBonner-Ebert sphereを設定し、3次元Non-ideal MHD Nested grid codeを用いてシミュレーションを行った。ガス雲から原始星形成( $n \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )まで計算を行った。

表1 初期パラメータ

Model	$C_\zeta$	$Z/Z_{\text{sun}}$	$\mu$	$\omega$	$B_0(\mu\text{G})$	$M_{\text{cl}}(M_\odot)$	$T_{\text{cl}}(\text{K})$	$r_{\text{cl}}(\text{AU})$	$c_s(\text{km s}^{-1})$
I0ZPM3	0	0			34.1	$1.08 \times 10^4$	198	$4.91 \times 10^5$	1.49
I0Z5M3	$10^{-5}$				33.8	$1.05 \times 10^4$	194	$4.87 \times 10^5$	1.48
I0Z4M3	$10^{-4}$				31.9	$8.75 \times 10^3$	172	$4.59 \times 10^5$	1.39
I0Z3M3	$10^{-3}$	3	0.1		24.6	$3.98 \times 10^3$	103	$3.52 \times 10^5$	1.07
I0Z2M3	$10^{-2}$				9.83	$2.27 \times 10^2$	16.4	$1.33 \times 10^5$	0.42
I0Z1M3	$10^{-1}$				10.3	$1.26 \times 10^2$	18.1	$9.67 \times 10^4$	0.36
I0Z0M3	1				5.76	15.2	5.65	$4.49 \times 10^4$	0.19
I001ZPM3	0				28.4	$6.20 \times 10^3$	140	$4.09 \times 10^5$	1.24
I001Z5M3	$10^{-5}$				25.1	$6.03 \times 10^3$	136	$4.05 \times 10^5$	1.23
I001Z4M3	$10^{-4}$				26.2	$4.88 \times 10^3$	117	$3.77 \times 10^5$	1.15
I001Z3M3	$10^{-3}$	3	0.1		20.0	$2.15 \times 10^3$	68.0	$2.87 \times 10^5$	0.87
I001Z2M3	$10^{-2}$				9.85	$2.30 \times 10^2$	16.5	$1.34 \times 10^5$	0.42
I001Z1M3	$10^{-1}$				10.4	$1.28 \times 10^2$	18.2	$9.72 \times 10^4$	0.37
I001Z0M3	1				5.76	15.2	5.64	$4.49 \times 10^4$	0.19
I1ZPM3	0				12.1	$4.79 \times 10^2$	24.9	$1.74 \times 10^5$	0.53
I1Z5M3	$10^{-5}$				12.1	$4.82 \times 10^2$	25.1	$1.74 \times 10^5$	0.53
I1Z4M3	$10^{-4}$				12.4	$5.09 \times 10^2$	26.0	$1.77 \times 10^5$	0.54
I1Z3M3	$10^{-3}$	3	0.1		12.7	$5.43 \times 10^2$	27.3	$1.81 \times 10^5$	0.55
I1Z2M3	$10^{-2}$				12.1	$4.39 \times 10^2$	25.0	$1.66 \times 10^5$	0.52
I1Z1M3	$10^{-1}$				10.9	$1.58 \times 10^2$	20.1	$1.06 \times 10^5$	0.39
I1Z0M3	1				6.11	18.0	6.34	$4.75 \times 10^4$	0.20
I10ZPM3	0				13.5	$6.56 \times 10^2$	31.0	$1.93 \times 10^5$	0.59
I10Z5M3	$10^{-5}$				13.6	$6.64 \times 10^2$	31.2	$1.94 \times 10^5$	0.59
I10Z4M3	$10^{-4}$				14.0	$7.25 \times 10^2$	33.1	$1.99 \times 10^5$	0.61
I10Z3M3	$10^{-3}$	3	0.1		15.3	$9.39 \times 10^2$	39.6	$2.17 \times 10^5$	0.66
I10Z2M3	$10^{-2}$				15.3	$8.67 \times 10^2$	39.6	$2.09 \times 10^5$	0.65
I10Z1M3	$10^{-1}$				12.6	$2.74 \times 10^2$	26.8	$1.29 \times 10^5$	0.46
I10Z0M3	1				8.03	40.1	11.0	$6.24 \times 10^4$	0.26

Non-ideal MHD equations

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P - \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B}) - \rho \nabla \phi$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \left[ \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{\eta_{\text{AD}}}{|\mathbf{B}|^2} [(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}] \times \mathbf{B} - \eta_{\text{OD}} \nabla \times \mathbf{B} \right]$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho$$

$$P = P(\rho) \quad \text{※4}$$

※4 化学進化、熱進化は1 zone計算をしたものを用いる

表1の左から順にイオン化パラメータ※1、金属量、Mass-to-Flux Ratios※2、回転パラメータ※3、磁場強度、ガス雲の質量、温度、半径、音速。

※1 イオン化パラメータはガス雲のイオン化度を修正するパラメータ。今回、宇宙線と放射性元素の崩壊によるイオン化を考慮した。 $C_\zeta$ が0の場合、イオン化源がない始源的環境に対応し、 $C_\zeta$ が0.01の場合、天の川銀河環境のイオン化度の0.01倍に対応し、 $C_\zeta$ が1の場合、天の川銀河の値に対応し、 $C_\zeta$ が10の場合、スターバースト銀河に対応する。

※2 Mass-to-Flux Ratiosの定義は以下。

$$\mu \equiv \left( \frac{M/\Phi}{(M/\Phi)_{\text{cri}}} \right) \quad (M/\Phi)_{\text{cri}} = (2\pi G^{1/2})^{-1}$$

※3 回転パラメータ $\omega$ の定義は以下。

$$\omega \equiv \Omega_0 t_{\text{ff}}$$

$\Omega_0$ は角速度、 $t_{\text{ff}}$ は自由落下時間である。

RESULTS

28通りの星形成過程でのアウトフローの駆動の有無(図2)とそれらのアウトフローのもつ運動量(図3)を示した。

図2. 28通りの星形成過程におけるアウトフローの駆動の有無

それぞれのパネルは、アウトフローが駆動したモデルはその時点の、アウトフローが駆動しなかったモデルはシミュレーション終了時のx-z平面でのスナップショットである。カラーコントアは数密度、白線内はアウトフロー領域を示す。高密度でアウトフロー駆動(赤枠)、低密度でアウトフロー駆動(緑枠)、アウトフロー駆動なし(青枠)、トランジェントなアウトフロー駆動(桃枠)。

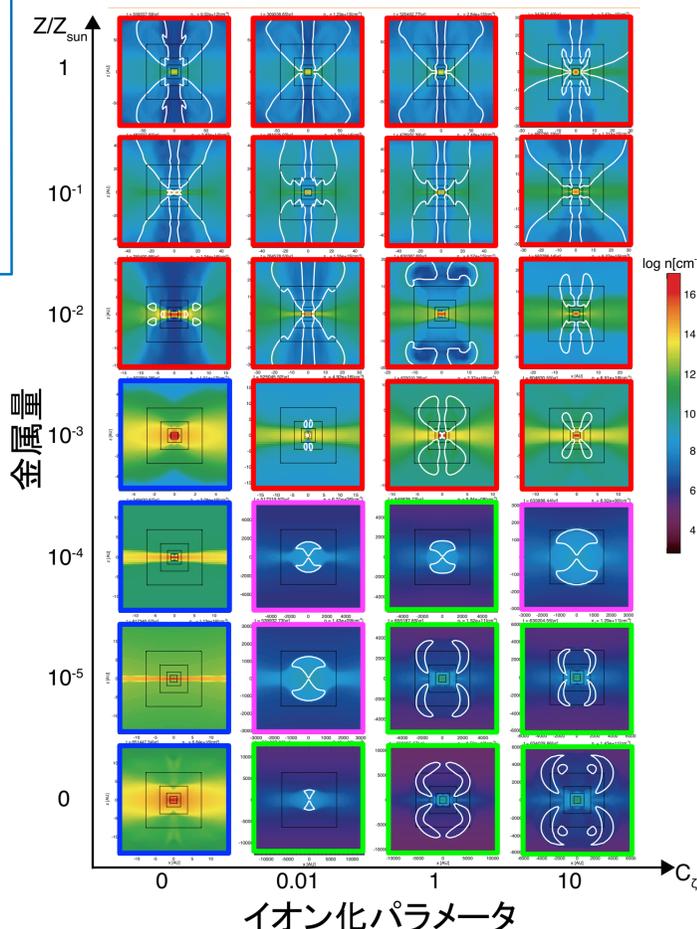
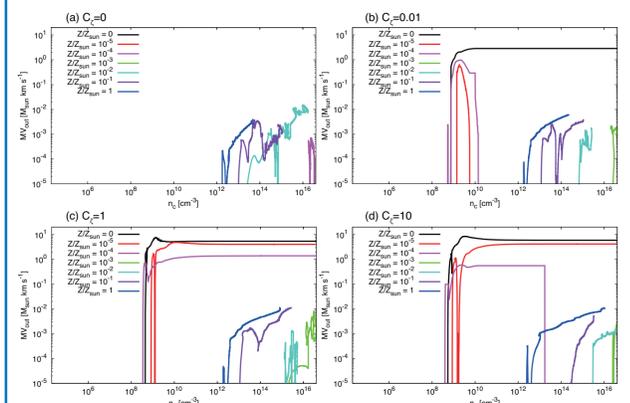


図3. アウトフロー運動量の時間進化



それぞれのパネルは (a)  $C_\zeta = 0$ 、(b)  $C_\zeta = 0.01$ 、(c)  $C_\zeta = 1$ 、(d)  $C_\zeta = 10$  の場合である。

アウトフロー運動量は、高密度( $n_c \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )で駆動するアウトフローよりも、低密度( $n_c \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$ )で駆動するアウトフローの方が3桁程度大きい。

DISCUSSION & CONCLUSIONS

- ・アウトフロー駆動の有無から、星形成環境が異なれば、星形成過程が変化することを示唆。
- ・低密度領域で駆動されるアウトフローの存在(thermal pressureの急激な増加によって一時的に収縮が止まったために駆動)
- > 大きな運動量を持っており、星形成過程に影響大?(長時間シミュレーション必要)