

星形成

ver. 1

1 はじめに

このモデルパッケージは星形成 (球対称自己重力収縮) をシミュレーションするためのものである。星は一酸化炭素などの分子輝線によって観測されるガス雲 (分子雲) の中で、星間ガスが自己重力収縮することによって形成され则认为られている。おうし座やオリオン座で観測される分子雲がそのような天体の代表例である。分子雲の中にある密度の濃い塊は分子雲コアと呼ばれる。一酸化炭素の同位体 C^{18}O 分子で観測されるおうし座の分子雲コアの典型的な大きさは半径 ~ 0.2 pc、密度は $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ である。温度は ~ 10 K とほぼ一定である。分子雲コアにはしばしば若い星 (Young Stellar Objects) が付随している。

本コードでは、球対称の一様密度の分子雲が、重力収縮によって中心の密度が高くなり、高密度の分子雲コアを形成し、若い星が生まれる直前の状態にいたるまでをシミュレートする。星形成の現象の時間は自由落下時間 (free-fall time) で記述され、 C^{18}O 分子で観測される分子雲コアから星が形成されるまでの時間はおよそ $\sim 10^6 \text{ yr}$ である。

2 仮定と基礎方程式

計算領域は $r \in [0, r_{out}]$ で、 $r = 0$ が球対称の原点である。仮定は以下の通りである。(1) 1次元の HD 方程式系を解く。(2) 流路は断面積変化。(3) 等温流体として扱う。(4) 重力は球対称の自己重力を解く。基礎方程式は

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho V^2)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g \quad (2)$$

である。圧力は等温の式

$$p = \rho c_s^2 \quad (3)$$

とする。ここで、 c_s は音速であり、一定値である。重力加速度は Poisson 方程式

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho, \quad (4)$$

より、 $g = -\partial \Phi / \partial r$ であるから、

$$g = -\frac{4\pi G}{r^2} \int_0^r \rho r'^2 dr' \quad (5)$$

と積分して求める。

3 無次元化

数値計算では、変数は次のように無次元化する (表 1 参照)。長さ、速度、時間の単位をそれぞれ H , c_s , $t_{ff} = 1/\sqrt{G\rho_0}$ とする。ここで、 ρ_0 は $r = 0$ での平衡解での密度とする。

ここで用いた単位時間は $t_{ff} \propto \rho^{-1/2}$ と密度だけの依存性を持っている。この時間は自由落下時間と呼ばれ、流体が自己重力によって収縮する典型的な時間である (※形状によりその前にかかる factor は異なる)。

4 初期条件と境界条件

初期の密度分布は平衡状態を求め、その密度を α 倍した。平衡状態は

$$\frac{\partial(\rho c_s^2)}{\partial r} = \rho g \quad (6)$$

$$\frac{\partial(r^2 g)}{\partial r} = -4\pi G \rho r^2 \quad (7)$$

から中心値を $\rho(r = 0) = 1$, $g(r = 0) = 0$ として求めた。初期の速度 V は領域に渡って 0 である。密度を上げたことにより、系は重力的に不安定になり流れが生じ、自己重力によって収縮を始める。

5 パラメータ

パラメータ	変数	無次元値	有次元値
平衡解中心密度	ρ_0	1	10^4 cm^{-3}
音速	c_s	1	0.19 km s^{-1}
単位長さ	H	1	0.12 pc
単位時間	t_{ff}	1	$6.25 \times 10^5 \text{ yr}$
温度	T		10 K
大きさ	r_{out}	1.82	0.22 pc
密度パラメータ	α	4	

表 1: パラメータと無次元化単位

表で密度は個数密度であるが、単位質量 μm_H をかけることにより、単位体積あたりの質量がもとまる。ここで平均分子量 $\mu = 2.3$ とした。

6 計算結果

計算結果は自己相似解となる (図 1 を参照)。

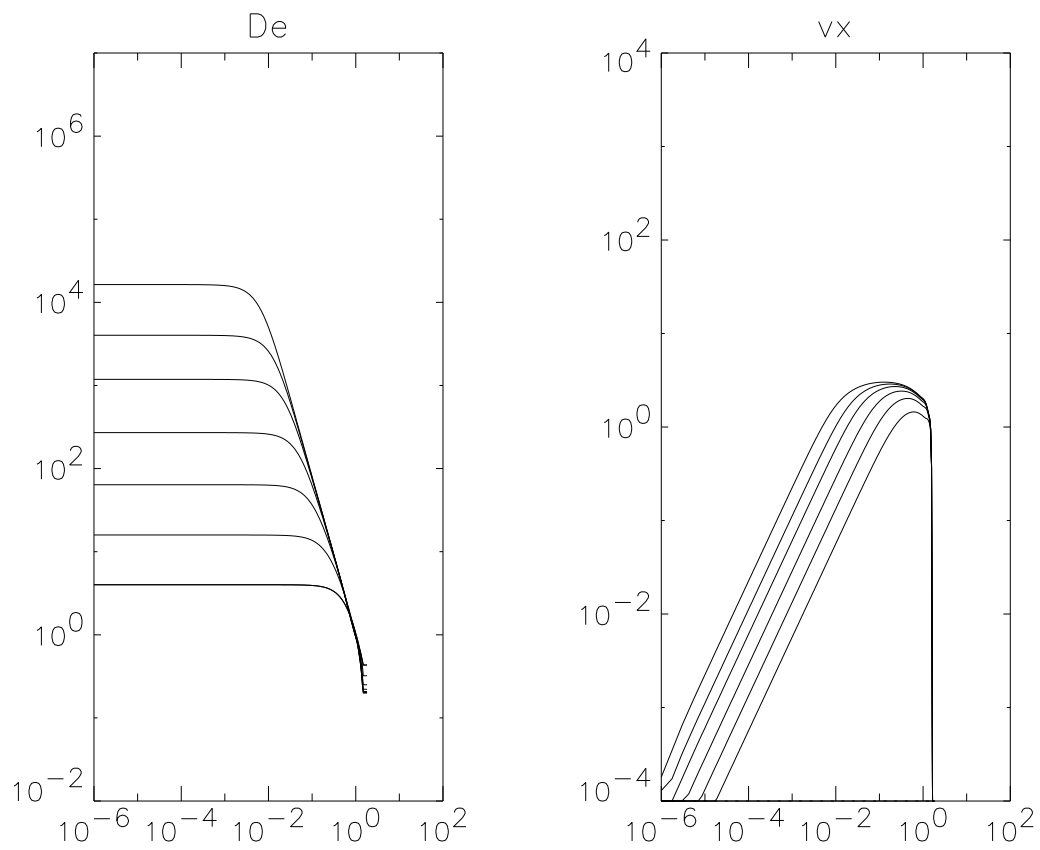


図 1: 計算結果.

7 参考文献

Ogino, S., Tomisaka, S., & Nakamura, F. 1999, PASJ, 51, 637

(福田尚也)