

Interstellar two phase medium

小山 洋

国立天文台・天文学データ解析計算センター

犬塚 修一郎

京都大学理学部物理

理論懇談会シンポジウム

2001年12月19-21日

1はじめに

希薄な星間ガスの加熱・冷却率の収支を考えると、冷たいH₁ガスと暖かい弱電離ガスの2つの異なる温度・密度状態が同じ圧力の元で共存することが知られている(Field, Goldsmith, & Habing 1969)。従って、定常状態にある静的な星間ガスは二相が共存しているものであると考えることが出来る。今、二相の境界に注目すると、熱伝導の効果により境界面の温度は連続的に接続しているはずである。従ってこの境界面内は輻射による熱収支だけでは釣り合わず、熱伝導による熱の流れによって定常状態を保つことが出来る。Zel'dovich & Pikel'ner(1969,以後ZPと記す)は平板形状を考えたときにこのような定常状態が実現する圧力は一意に決まることを示した(飽和圧力)。一方でGraham & Langer(1973)は球対称の形状を考え、飽和圧力が盤の半径に依存することを示した。このように二相構造を決定付けるのは二相境界における加熱・冷却過程及び熱伝導でこれらは空間構造に依存している。これまでの研究は単純な形状のもとで定常流を仮定した解析が主流であったが、我々は直接流体シミュレーションを行うことによって、二相の形状がどのような状態に収束するのか解析した。

2 数値計算

- 空間2次元 Eulerian grid code

- 時間・空間2次精度 Godunov法

基礎方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla(P + \rho vv) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot ((E + P)v - KVT) = \frac{\rho}{m_H} \Gamma - \left(\frac{\rho}{m_H} \right)^2 \Lambda(T). \quad (3)$$

● 加熱・冷却過程

- ダストによる光電加熱

- 宇宙線、X線による電離加熱

- 水素原子のLy_α光、CII, OI, FeII, SiIIの輝線による冷却

- H₂及びCO分子の回転・振動遷移による冷却

- ガスとダストの熱交換

(Koyama & Inutsuka 2000; Paper I) 二次元計算には上記の詳細な計算結果の fitting formula

$$\Lambda(T)/\Gamma = 10^7 \exp(-114800/(T+1000)) + 14\sqrt{T} \exp(-92/T) \text{ cm}^3, \quad (4)$$

$$\Gamma = 2 \times 10^{-26} \text{ erg/s}, \quad (5)$$

を用いた。

- 熱伝導 $K = 2.5 \times 10^3 T^{1/2} \text{ erg cm}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Parker 1953).

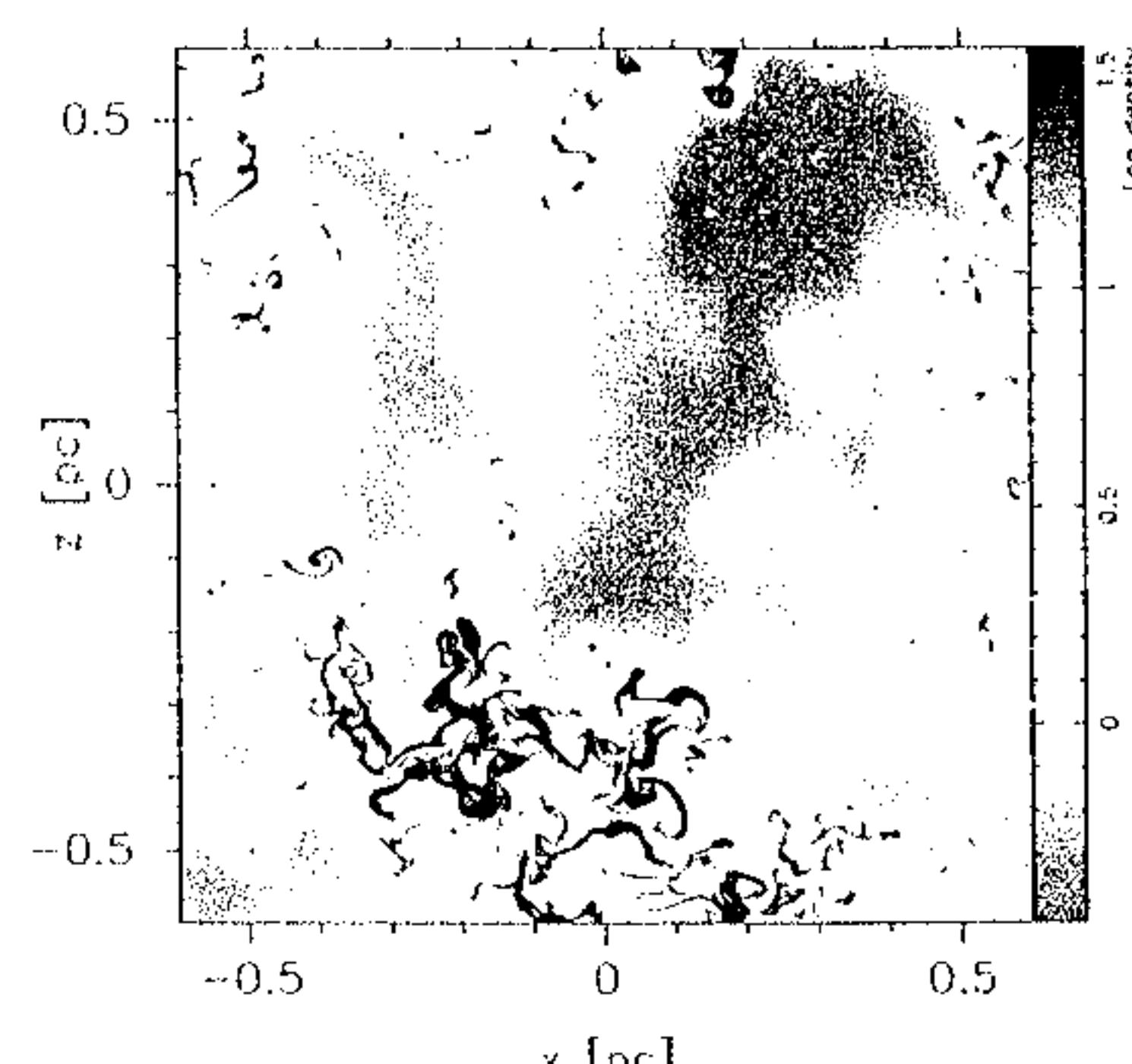
- 1024×1024 grid points

- 周期境界条件

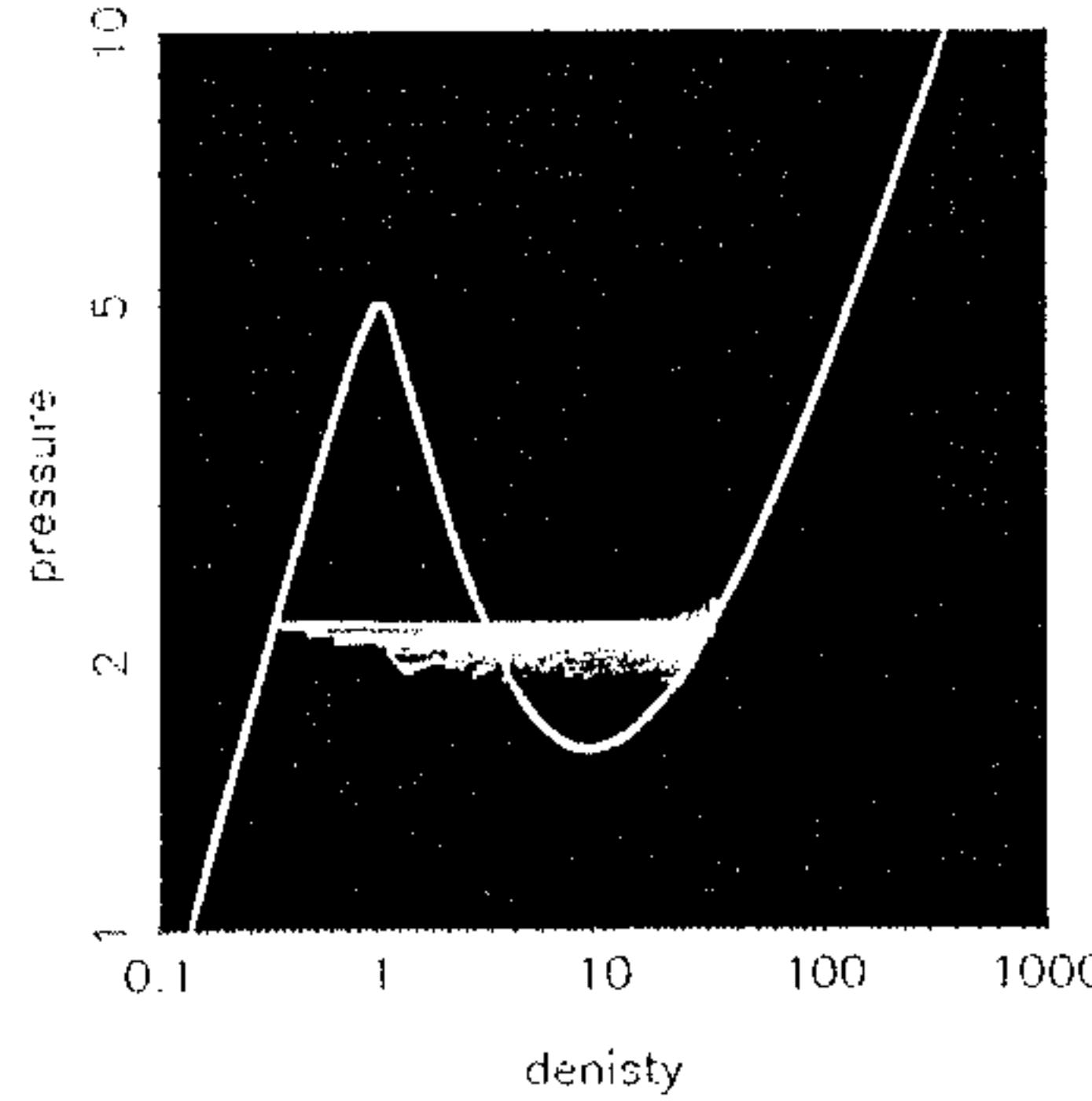
- 自己重力、磁場は無視

- 初期条件：熱的不安定平衡状態に密度の擾乱を与えた。

$t = 34.691 \text{ Myr}$



計算の終状態 (密度コントア)。希薄な空間中を微少な雲が動き回っている。



終状態の密度-圧力平面上での分布。力学的に圧力一定の定常状態を保とうとする。一方で熱伝導によって温度一定に保とうとする。

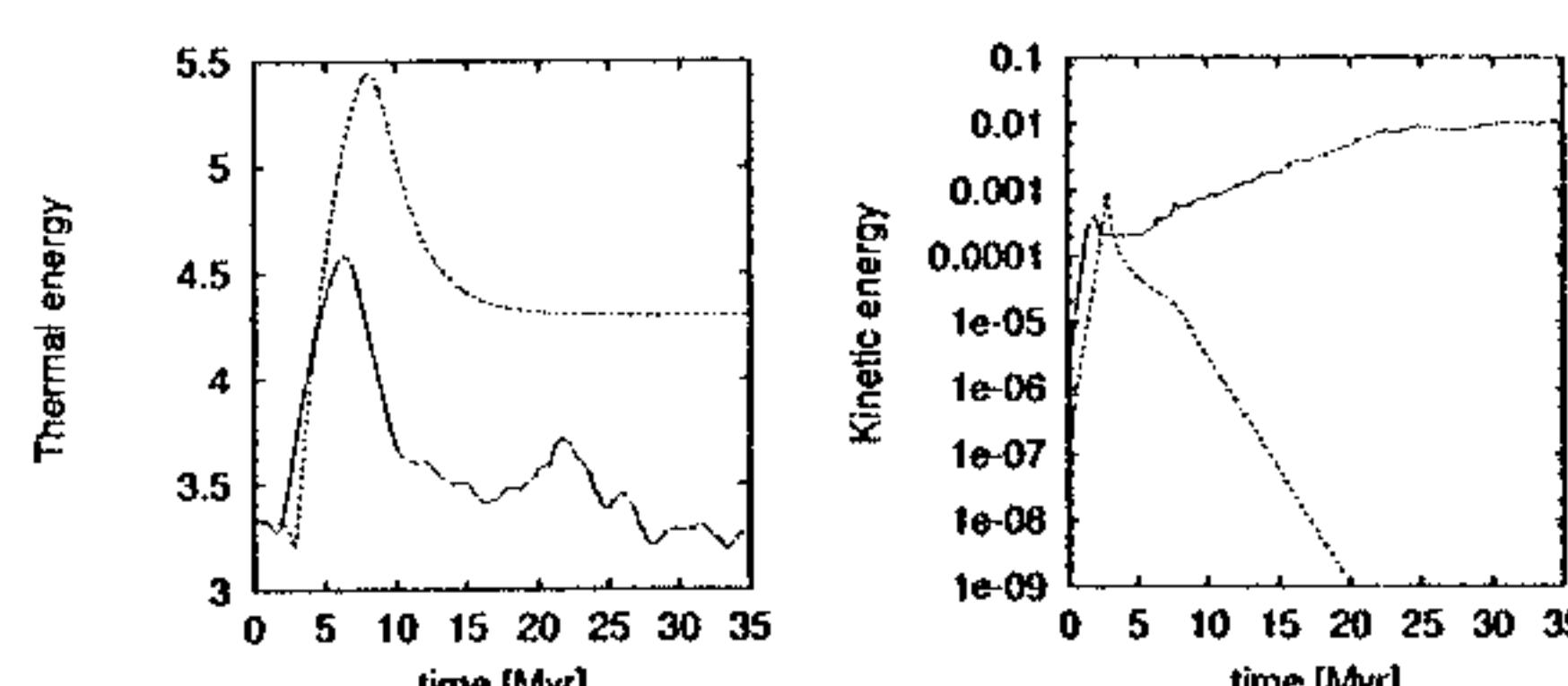
3 飽和圧力

いま、エネルギー方程式(3)を系の体積で積分すれば

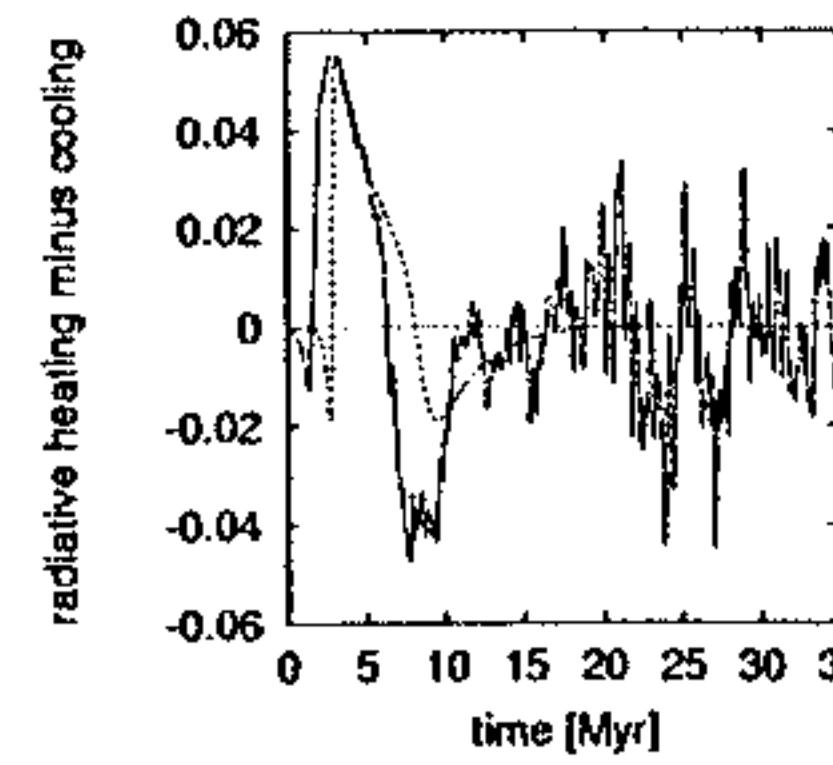
$$\frac{\partial E}{\partial t} = \int \rho \Gamma dV - \int \rho^2 \Lambda(T) dV \quad (6)$$

右辺第一項は系全体が輻射によって加熱される割合で費景が保存する周期境界条件のもとで一定である。一方第二項は温度分布、密度分布に依存するのでこれによって系全体のエネルギーは増減する。これらが相殺する定常状態が真の平衡形状である。

$$E = \int \frac{P}{\gamma-1} dV + \int \frac{\rho u^2}{2} dV \quad (7)$$



左図は系全体の熱エネルギー、右図は運動エネルギーを示す。熱エネルギーは比べて運動エネルギーは小さい。実線は二次元の計算結果で比較のため一次元の計算結果を波線で示す。一次元平板の計算では時間と共に飽和圧力に近づき、運動エネルギーは散逸していく(波線)。一方で二次元の計算では異なる圧力に収束するだけでなく運動エネルギーも増加している。



この図は系全体が正味輻射によって得る単位時間当たりのエネルギーである。一次元(波線)ではほぼ平衡状態に達したのに対して二次元(実線)では振動してなかなか収束しない。

4まとめ

我々は星間ガスの二相構造の二次元シミュレーションを行った。我々の計算した時間内では定常状態への収束は悪く、運動エネルギーは単調に増加していった。この増加が緩和するのか確かめることが今後の課題である。このような運動を引き起こしているのは雲の表面の運動なので表面の不安定性の解析も必要であろう。

References

- [1] Field, G. B., Goldsmith, D. W., & Habing, H. J. 1969, ApJL, 155, L149
- [2] Graham, R., & Langer, W. D. 1973, ApJ, 179, 469
- [3] Koyama, H., & Inutsuka, S. 2000, ApJ, 532, 980
- [4] Koyama, H., & Inutsuka, S. 2001, ApJL, in press.
- [5] Zel'dovich, Y., & Pikel'ner, S., 1969, JETP, 29, 170 (ZP)