

国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト
成果報告書 (平成18年度)

提出期限：平成19年4月6日(金)17:00 必着

応募カテゴリ (いずれかを選択) B

システム (いずれかを選択) VPP

プロジェクト ID:whk13b

研究代表者 (現在のユーザ ID : koyamahr)

氏名	小山 洋		
所属機関名	メリーランド大		
連絡先住所	Department of Astronomy, The University of Maryland College Park, MD 20742, USA		
電話番号	301-405-6854		
E-mail	hkoyama@astro.umd.edu		
職または学年	postdoc		
研究代表者が学生の場合には指導教官の氏名			

研究課題名

(和文)	分子雲乱流の擬似観測
(英文)	Synthetic Observations of Turbulent Molecular Clouds

研究分担者

氏名	所属機関名	E-mail	ユーザ ID
山田雅子	国立天文台	yamasako@th.nao.ac.jp	yamadask

成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

(1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

評価資料として利用いたしますので、様式・順序は任意ですが、学術論文については題名、著者、発行年月、雑誌名、巻、ページが記載されていること。

- “Synthetic Observations of Carbon Lines of Turbulent Flows in the Diffuse Multi-phase Interstellar Medium” Yamada, M., Koyama, H., Omukai, K., & Inutsuka, S. *The Astrophysical Journal*, Volume 657, Issue 2, pp. 849-859 (2007)
- “Synthetic observations of turbulent flows in diffuse multiphase interstellar medium” Yamada, Masako, Koyama, H., Omukai, K., & Inutsuka, S. *Triggered Star Formation in a Turbulent ISM*, Edited by B. G. Elmegreen and J. Palous. *Proceedings of the International Astronomical Union 2, IAU Symposium #237*, held 14-18 August, 2006 in Prague, Czech Republic. Cambridge: Cambridge University Press, 2007., pp.499-499

成果の概要

近年の星間ガス、分子雲の研究は乱流に重きを置かれている。その根拠となっているのがスペクトル観測による大きな輝線幅である。この特徴を理論的に説明しようとこれまで様々な解析的・数値的な研究が行われてきた（例えば Stone et al. 1998; Mac Low et al. 1998; Mac Low & Klessen 2004）。しかしその多くは速度分散の大きさとしての乱流がどれだけ維持されるかに着目しているに過ぎず、その質まで言及したものはほとんど無かった。

一方で観測によって得られる情報は、電波の輝線（又は吸収線）スペクトルに限れば空間2次元、速度1次元と限られている。特に視線方向の速度成分は、仮に光学的に薄いとしても、重ね合わさった積分値としてしか知りえることが出来ない。しかも観測の空間分解能は速度のそれに比べて劣っているのが現在の技術の限界である。ここで発想を変えて、逆にこの輻射の観測量からモデルの違いを探ることによって、どの数値モデルがより現実の観測を反映しているか診断しようと言うのがこの研究の意図である。

そこで我々は、乱流モデルとして二相モデルと等温モデルを数値流体シミュレーションから用意し、輻射計算による擬似観測からの診断を試みた。二相モデルは等温モデルのより詳細なものという位置づけではないことについて言及しておく。それは一相と二相の違いは星間雲の隙間がどれだけ埋められているか、すなわち volume filling factor の違いと言うことも出来るからである。現実がより隙間を埋め尽くした一相であれば、等温モデルは良い近似だったと確かめられるからである。見方を変えれば、乱流モデルの特徴を現す統計量として、観測量を用いたとも言えよう。

二相モデル vs 等温モデル

我々は星間ガスの暖かい ($T \sim 8000\text{K}$) 弱電離状態のガスと冷たい ($T \sim 50\text{K}$) 中性水素ガスからなる二相モデルに着目している。このモデルでは二相の間に熱的不安定な相が存在することが知られ、この不安定性によって乱流が生成されることが知られている (Koyama & Inutsuka 2000, 2002, 2004; Krotsuk & Norman 2002a, 2002b; Audit & Hennebelle 2005; Heitsch et al 2005)。このモデルをシミュレートする最小限のモデル方程式は以下のように表される。

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

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\nabla P}{\rho}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{v}) + P \nabla \cdot \mathbf{v} = n\Gamma - n^2 \Lambda(T) + \nabla \cdot (K \nabla T). \quad (3)$$

ここで冷却関数 $\Lambda(T)$ はより厳密には冷却源となる分子種や電子の abundance に依存するが、ここでは簡単のため化学平衡を仮定する。この仮定は化学反応のタイムスケール (典型的には 10^5 年) よりも長いスケールで良い近似になっている。化学組成は、平衡を仮定したとしても局所的には決めることが出来ない。なぜなら、化学組成を決める輻射が星間雲の空間構造に依存するからである。従って、化学平衡という仮定をもったとしても、厳密には輻射の輸送 (あるいは単に遮蔽だけであっても) を解く必要がある。この困難は星間雲が光学的に薄い場合に限り回避することが出来る。本研究では減光量 $A_v < 1$ の星間雲に焦点を当てることによってこの近似を採用することにする。

この二相モデルには熱的に決まる長さスケールが存在する。

$$\lambda_F = \sqrt{\frac{KT}{n^2 \Lambda}} \quad (4)$$

Field length と呼ばれるこのスケールは輻射冷却のタイムスケールで成長する不安定性に熱伝導による妨げが有効になるスケールである (Begelman & McKee 1990)。我々はこのスケールを分解する為に一辺が 2.4pc からなる正方形の計算領域に対して 2048^2 メッシュを費やした。これは 1 メッシュが 0.0012pc に相当している。

乱流の起源に関しては天体現象に起因するもの (Supernova, Stellar Wind, Jet or Outflow from young stars, Strong UV field form HII region, Galactic Rotation) や物理過程に起因するもの (Thermal Instability, Magneto Rotational Instability) があり様々な議論が行われているがここではその源を指定すること無しに人工的に乱流を与えることにする。但し、乱流は初期条件として与え、その後は一切計算領域を汚染することはせず、流体の基礎方程式に沿ってのみ運動を許すことにした。初期に与えた乱流は平均のマッハ数を 10、パワースペクトル $P(k) \propto k^{-6}$ を波数 $1 \leq k/2\pi \leq 4$ の範囲で与えた。すなわち大きなスケールの速度摂動を初期条件として与えたことになる。

乱流は外から与え続けられない限り時間と共に減衰する (例えば Stone et al 1998)。我々は十分発達した乱流場のサンプルが必要であるので乱流の起源は問わず適当な初期条件のもとで作られた乱流場のスナップショットを解析に用いることにする。図 1 はその位置-速度図 (PV 図) である。速度成分の分散幅はおおよそ 5km/s である。このようにして作られた乱流場からどのような輝線の特徴が現れるかを調べるのが本研究の主題である。

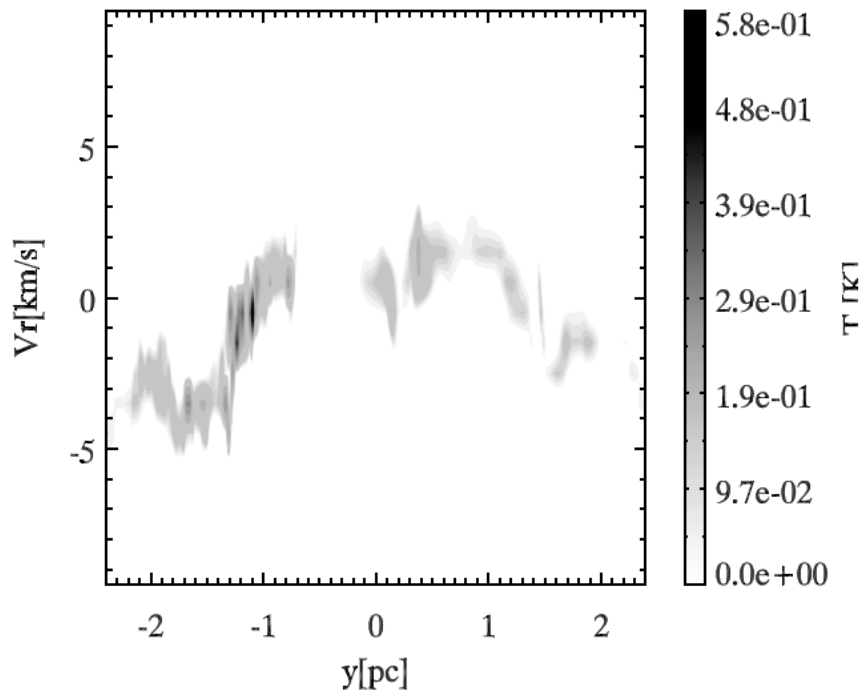


図 1: シミュレーションで求めた位置-速度図 (PV 図) CO(1-0) 輝線強度として計算した

輻射の計算の前に空間構造をしてみる (図 2)。温度、密度と共に非常に小さなスケールまで乱流が発達していることが分かる。この最小スケールは先に示した Field length に相当する。

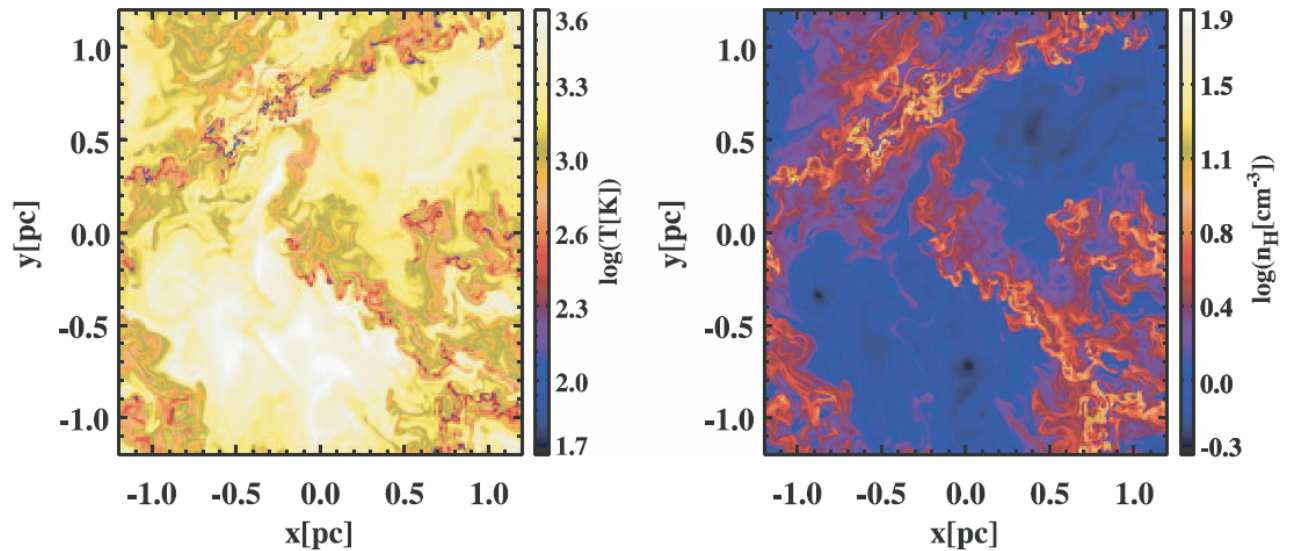


図 2: 二相モデルの温度 (左) と密度 (右) 分布

比較の為に等温モデルも同じスケール、メッシュ数で計算した。このモデルではエネルギー方程式 (3) を解かない代わりに圧力 $P = c_s^2 \rho$ を仮定する。温度は 10K を採用した。図 3 が等温モデルのスナップショットである。シャープな衝撃波面が領域を埋め尽くしているものの二相モデルで見られたような小さな構造や大きな密度コントラストは見られない。この理由のひとつは乱流が十分に発達していないことが上げられるだろう。逆に言うと、より継続的な乱流の供給が無いと等温モデルでは乱流のカスケードが起きないということなのかもしれない。以上の乱流理論に関する点は本研究の主題ではないのでここでは考察だけに留めて置く。

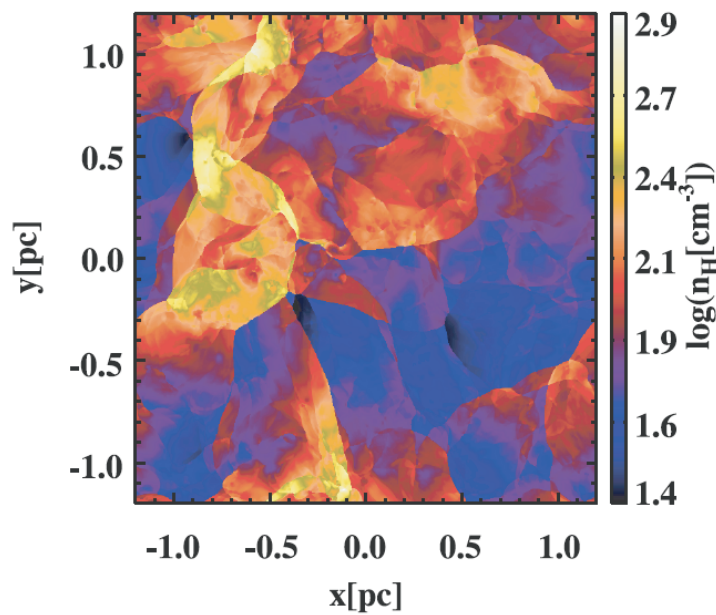


図 3: 等温モデルの密度分布

以上、二相モデルと等温モデルのモロロジーに関して簡単に述べておいたがこれはこの研究の主題ではない。繰り替えずが、このような乱流場が与えられたときにどのような輻射場の性質を返すかを調べるのが本研究の目的であった。これは輻射場の観測によってのみ我々は星間雲の性質を知ることが出来ないからである。

ライン比によるモデルの比較

輝線強度は視線方向の積分によって行われる、すなわち

$$I(L) = \frac{1}{4\pi} \sum_{v_x} \sum_x \frac{d\Lambda_L}{dv_x} \Delta x \Delta v_x, \quad (5)$$

ここで視線方向として x - 軸を選んだ。観測量 $I(L)$ は空間成分 y 方向に関しても積分する。これは実際の観測による空間分解能 (ビームサイズ) が高くない場合を想定している。以降、この統計量について検討する。 Λ_L を求める際に化学組成比の情報が必要になる。こ

ここでは簡単のため $y(e) = 10^{-2}$, $y(C^+) = 10^{-3}$, $y(C^0) = y(CO) = 3 \times 10^{-7}$ を採用したこれらの値は Koyama & Inutsuka (2000) 及び Wolfire et al. (1995) の詳細な化学モデルから引用した。但し C^0 に関しては詳細な計算が無いため単純化から CO と同じくした。

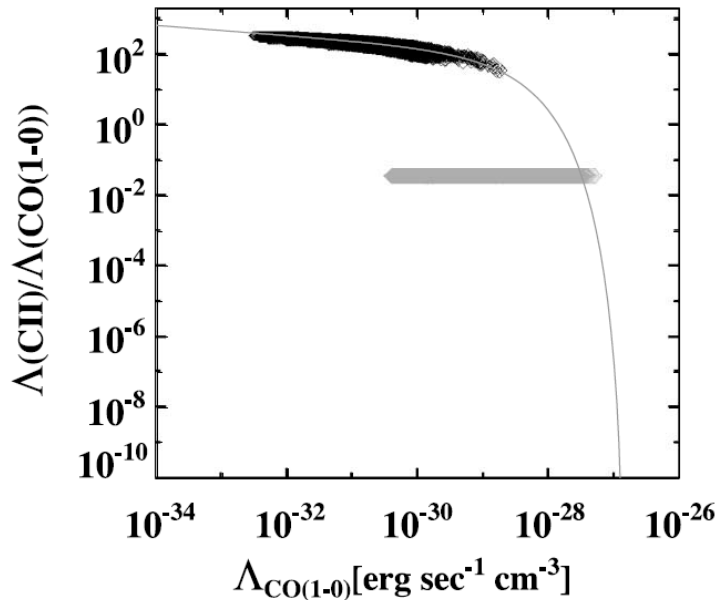


図 4: CII / CO(1-0) ライン比

図 4 は CII/CO(1-0) ライン比をプロットしたものである。グレーの水平に直線状に並んだのが等温モデルで、黒くカーブを描くように分布しているのが二相モデルである。abundance 比を空間一様で仮定しているのが等温モデルではライン比は一定値をとる。一方、二相モデルでは温度の違いによってライン比が変化している。図中に引いた実線は圧力 $P/k_B = 10^{3.4}$ K cm $^{-3}$ の元でのライン比である。高密度で低温になると CII は急激に励起されにくくなる為 (励起温度 92K) 図中の右側ではライン比は急激に減少している。

次に CO の回転励起順位による輝線比を見てみよう (図 5)。ここでも高い回転順位輝線は高い温度で強い強度を示すことがモデルに違いをもたらしてくれる。図中 (2-1)/(1-0) 比が黒、(3-2)/(1-0) 比が赤、(4-3)/(1-0) 比が緑で表されている。右側の綺麗に水平を保った 3 本が等温モデルで、左側が二相モデルである。このように励起による輝線強度比が逆転していることが分かる。

最後に CI の ($^3P_2 - ^3P_1$)/($^3P_1 - ^3P_0$) 輝線比を見てみる (図 6)。ここにグレーが等温モデルで黒が二相モデルを示している。2-1 の励起温度は 39K であるので、二相モデルではそれよりも高温だったために LTE が成り立ち、ライン比が一定を示している。これに対し等温モデルでは non-LTE の population の為ライン比の分散が見られる。

以上のように異なる分子種や励起状態の異なるライン比を見ることによって乱流モデルの違いを示すことが出来た。本研究では簡略化のための仮定を多く必要としたが、より現実の観測に近づくためには詳細な解析、例えば A_v が 1mag を超える領域での輻射の輸送などから、より具体的な診断法が見つかるだろう。

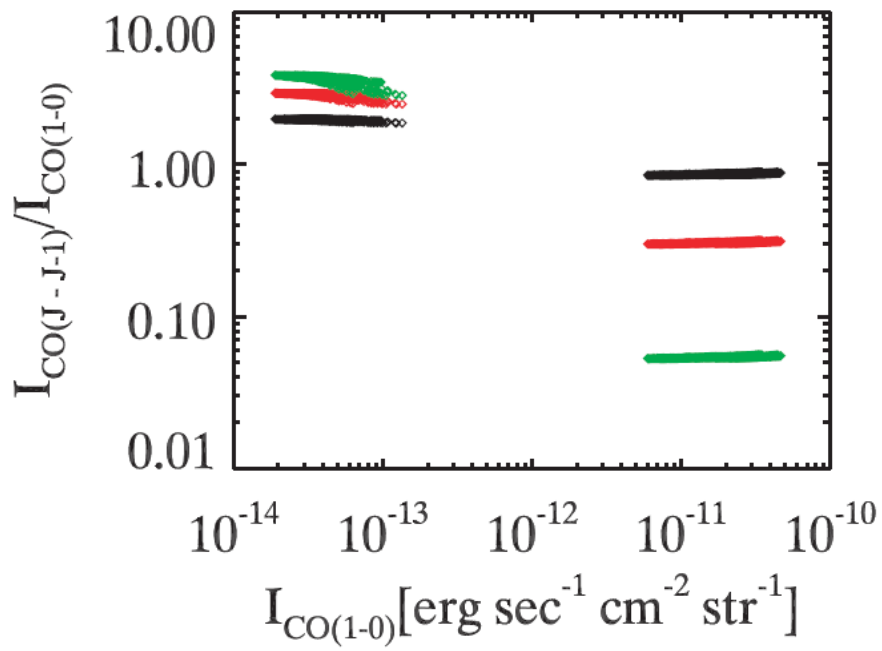


図 5: CO 回転励起輝線比

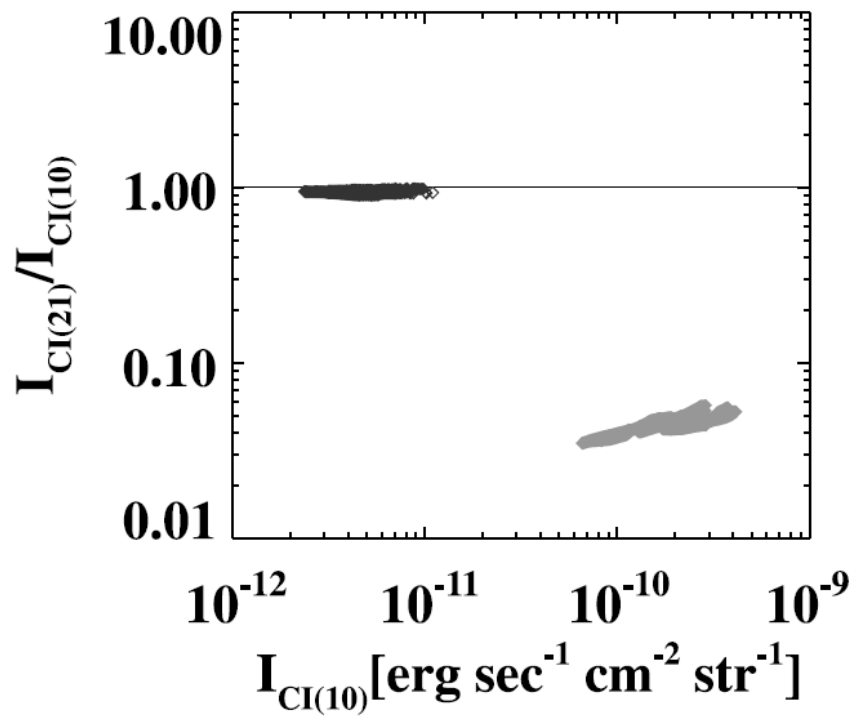


図 6: CI ライン比