

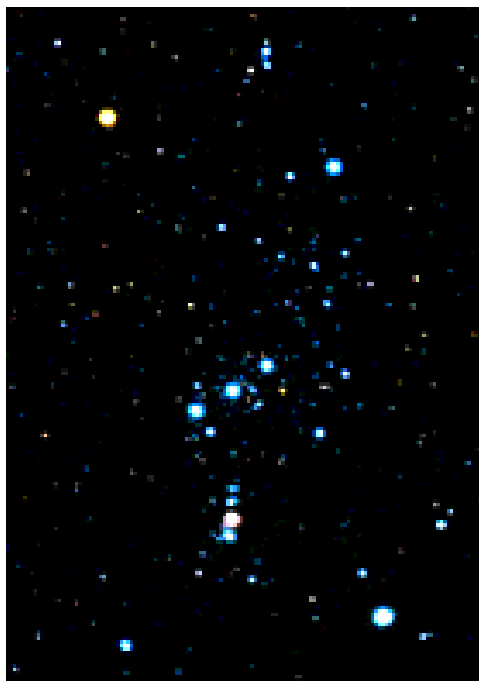
星間乱流の謎に迫る

長島雅裕(天体核) 犬塚修一郎、井上剛(天体核)、小山洋(神戸大)

あらすじ

- ・星間分子雲は乱流状態にある(と考えられている)
- ・どうやって維持しているのか、長年の謎
- ・説はいくつかあるけれども、混迷状態
- ・もしかしたら自然に説明できるかもしれない
シナリオと、その物理過程について、紹介します。
- ・さらに、乱流をドライブする物理が、
銀河の定性的な理解を大きく変える可能性も。

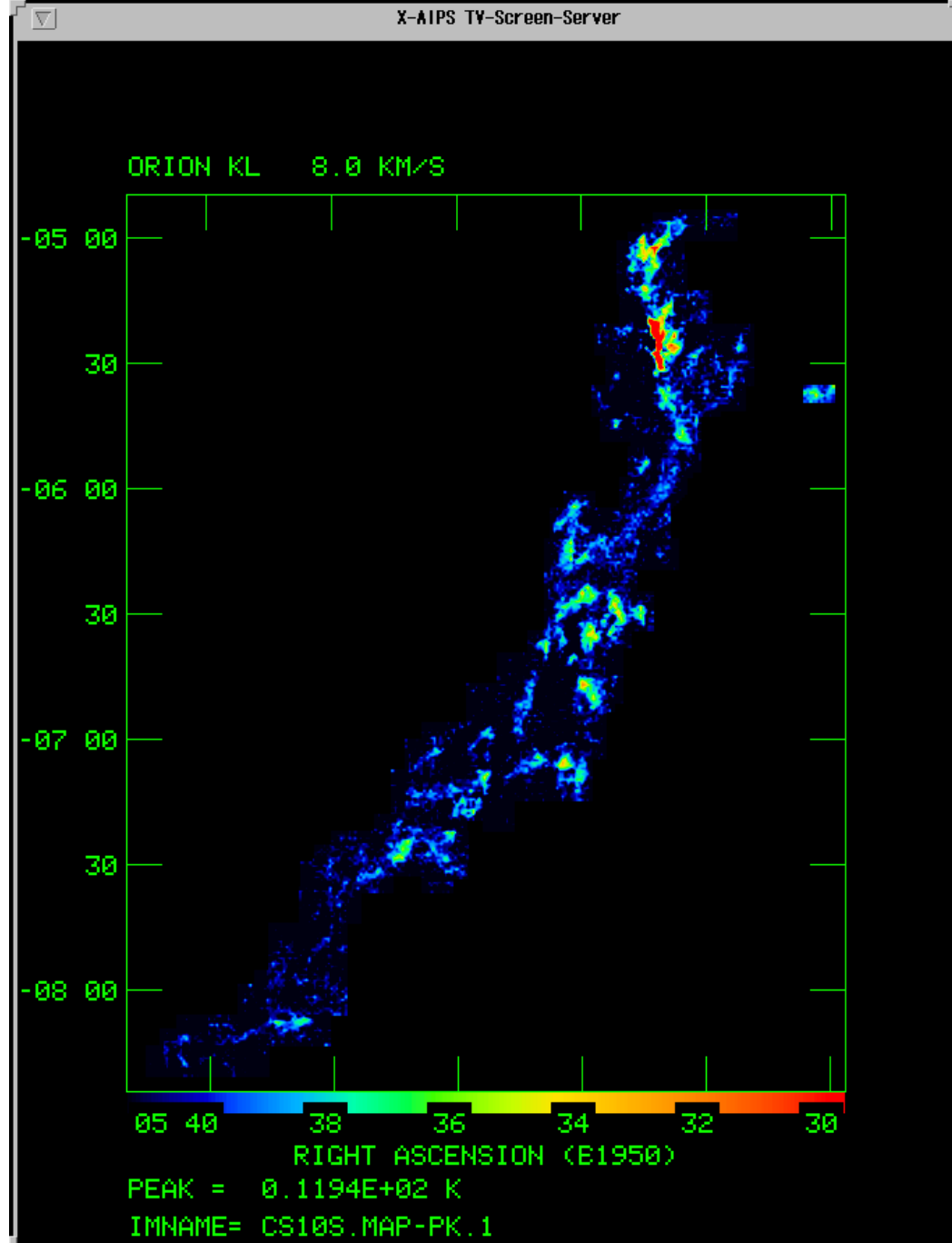
分子雲



(野辺山のwebより)

野辺山45m
(立松さんのwebより)

2006/3/7

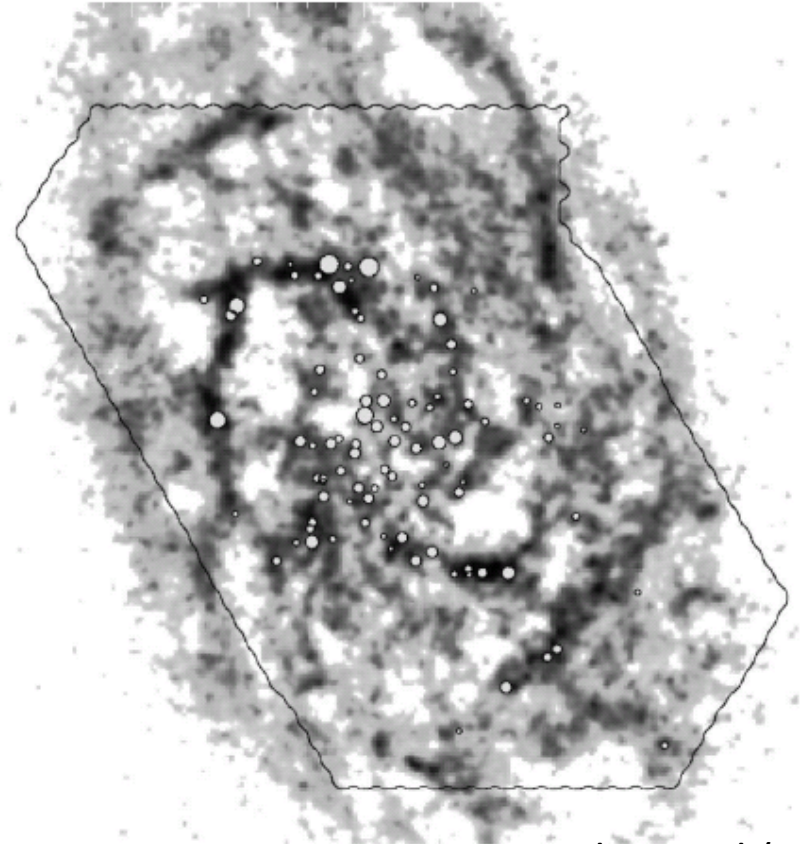


中性水素原子とCO分子 in M33



2006/3/7

水素の濃いところにCO分子

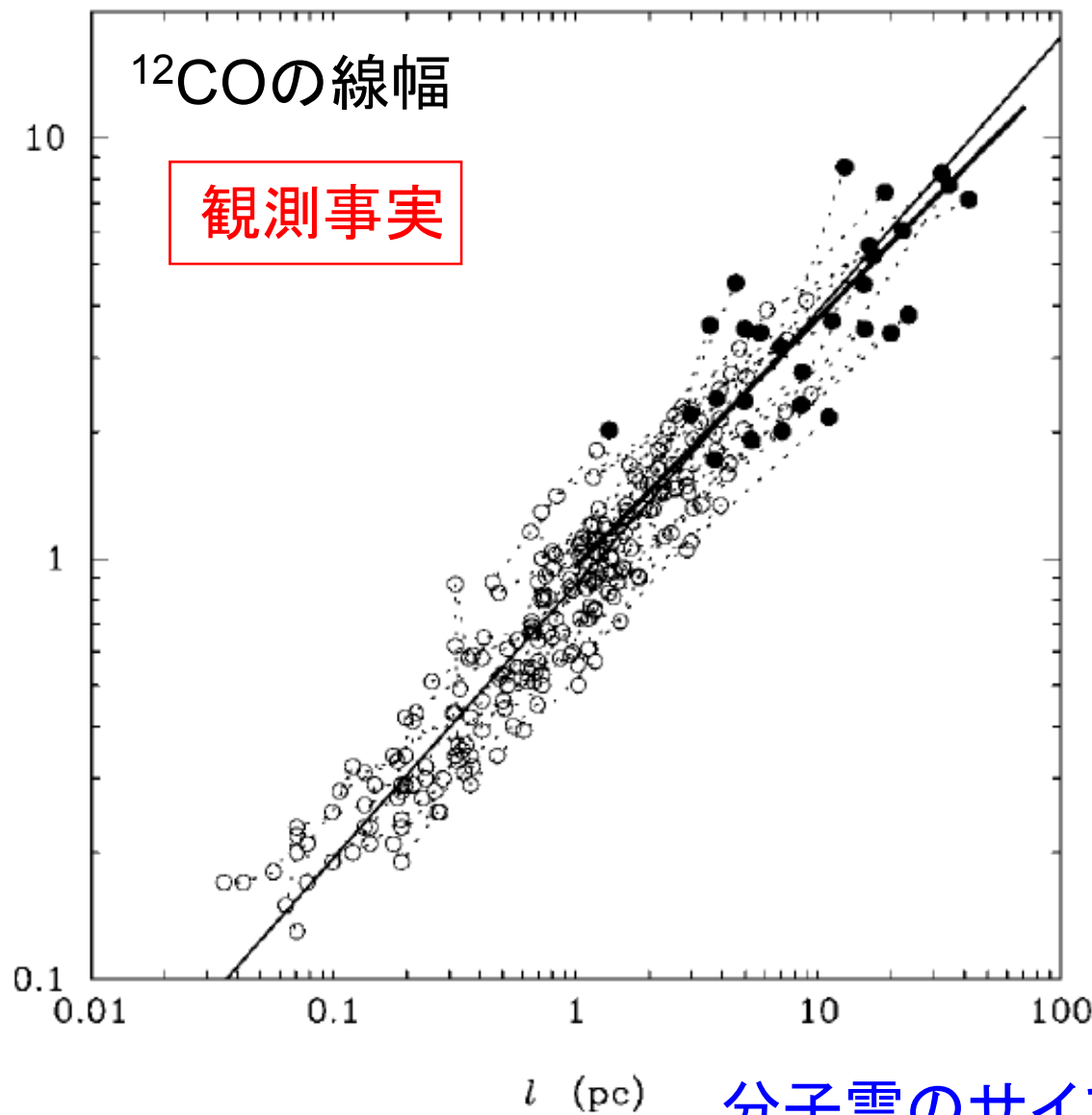


Blitz et al.(2006)

温度10Kぐらまで冷え、密度が高くなると、分子が形成される

サイズー線幅関係(Larson's law)

輝線幅 δv [km/s]



電波望遠鏡で
スペクトルを取ろう

観測される線幅と
雲のサイズには
良い相関がある

おおよそ、

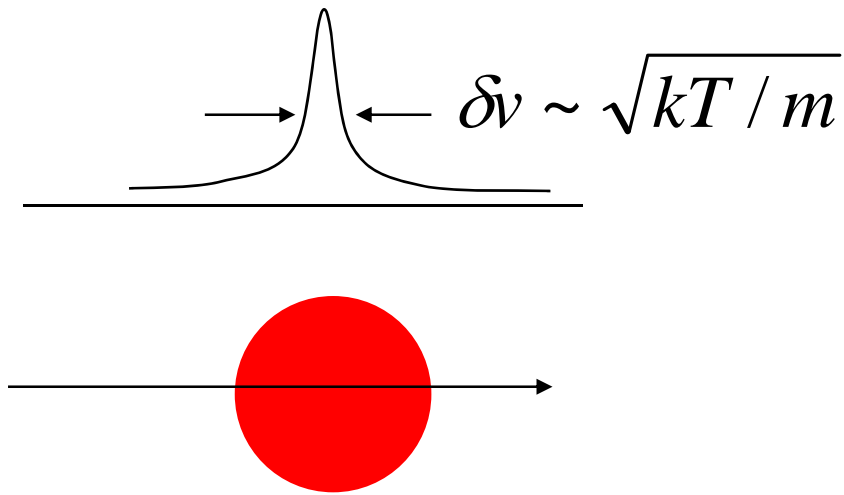
$$\delta v \propto L^{0.5}$$

Heyer & Brunt (2004)

分子雲のサイズ L [pc]

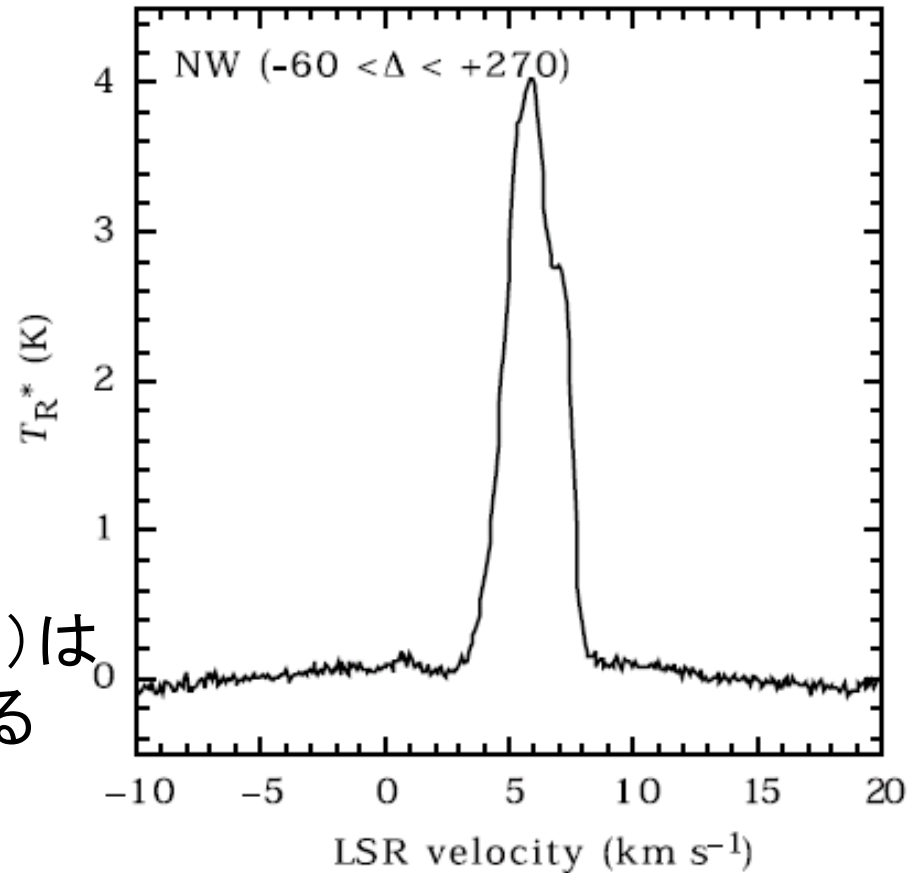
輝線幅の起源？

- ナイーブには温度による幅



雲は静止していても、構成原子(分子)は温度に相当する乱雑な運動をしている

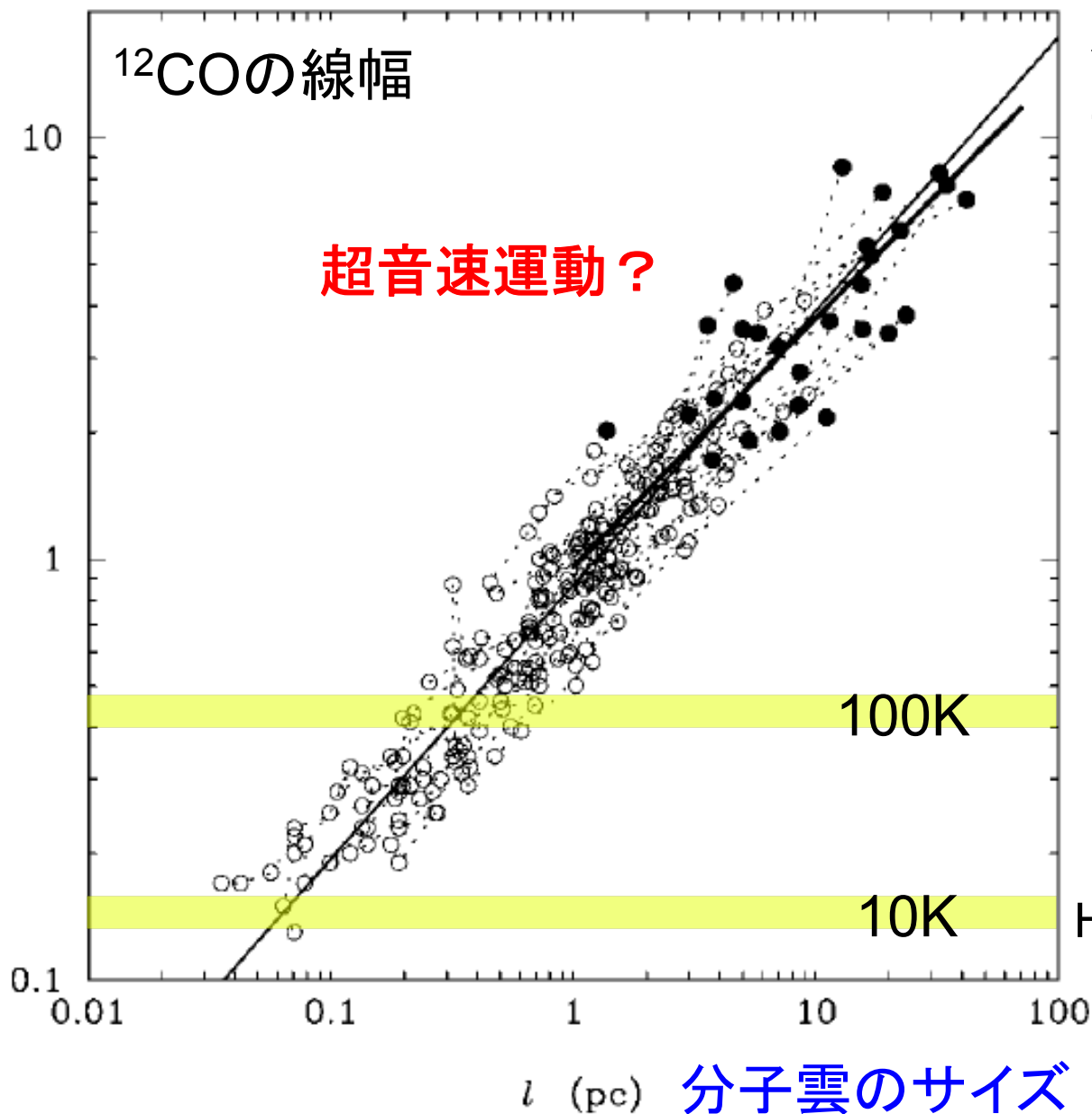
しかし、観測される輝線幅は、それ($\sim 10\text{K}$)よりずっと広い



Sakamoto & Sunada (2003)

サイズー線幅関係(Larson's law)

輝線幅 δv [km/s]



観測される線幅と雲のサイズには良い相関がある

$$\delta v \propto L^{0.5}$$

ところが、分子があるような場所のガスの温度は高々数10K程度

Heyer & Brunt (2004)

線幅の起源：乱流？

観測されている分子の温度は高々数10K

→線幅は $\Delta v < 1\text{km/s}$ となるはず

しかし、観測されている線幅はずっと大きい

もし、分子雲内部がすべて分子になっているなら

→線幅は thermal ではなく、kinetic なもの(バルクな運動)

→超音速乱流状態

とこるが

線幅の起源：乱流？

困 **あつた**。

超音速乱流は、

→あちこちで衝撃波発生

→効率的なエネルギー散逸、**あつ**というまに乱流は decay

$$t_s \approx \frac{L}{C_s} \approx 1\text{Myr} \left(\frac{L}{1\text{pc}} \right) \left(\frac{C_s}{1\text{km/s}} \right)^{-1} \ll \text{銀河回転} \sim 100\text{Myr}$$

→しかし乱流はuniversalなので、維持したい

乱流の維持機構

普通に考えると、何らかのエネルギーを注入し、
乱流を維持しなければならない

→超新星爆発？ 原始星からのoutflow？

いずれにしても、なんらかのチューニングが必要

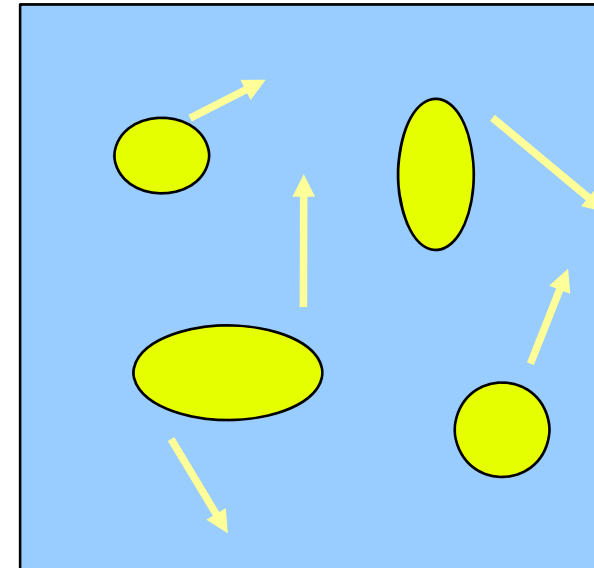
ここで、まったく別の考え方をしてみよう。

- ・暖かいガスに、ランダムに運動する冷たい($\sim 10\text{K}$)クランプが
浮かんでいる

- ・観測は冷たいクランプからの輻射
(暖かいガスは希薄なので観測不可能)

- ・クランプの運動は、
暖かいガスの音速よりは遅く(sub-sonic)
冷たいガスの音速より速い(super-sonic)

→衝撃波生じず、乱流が維持される？



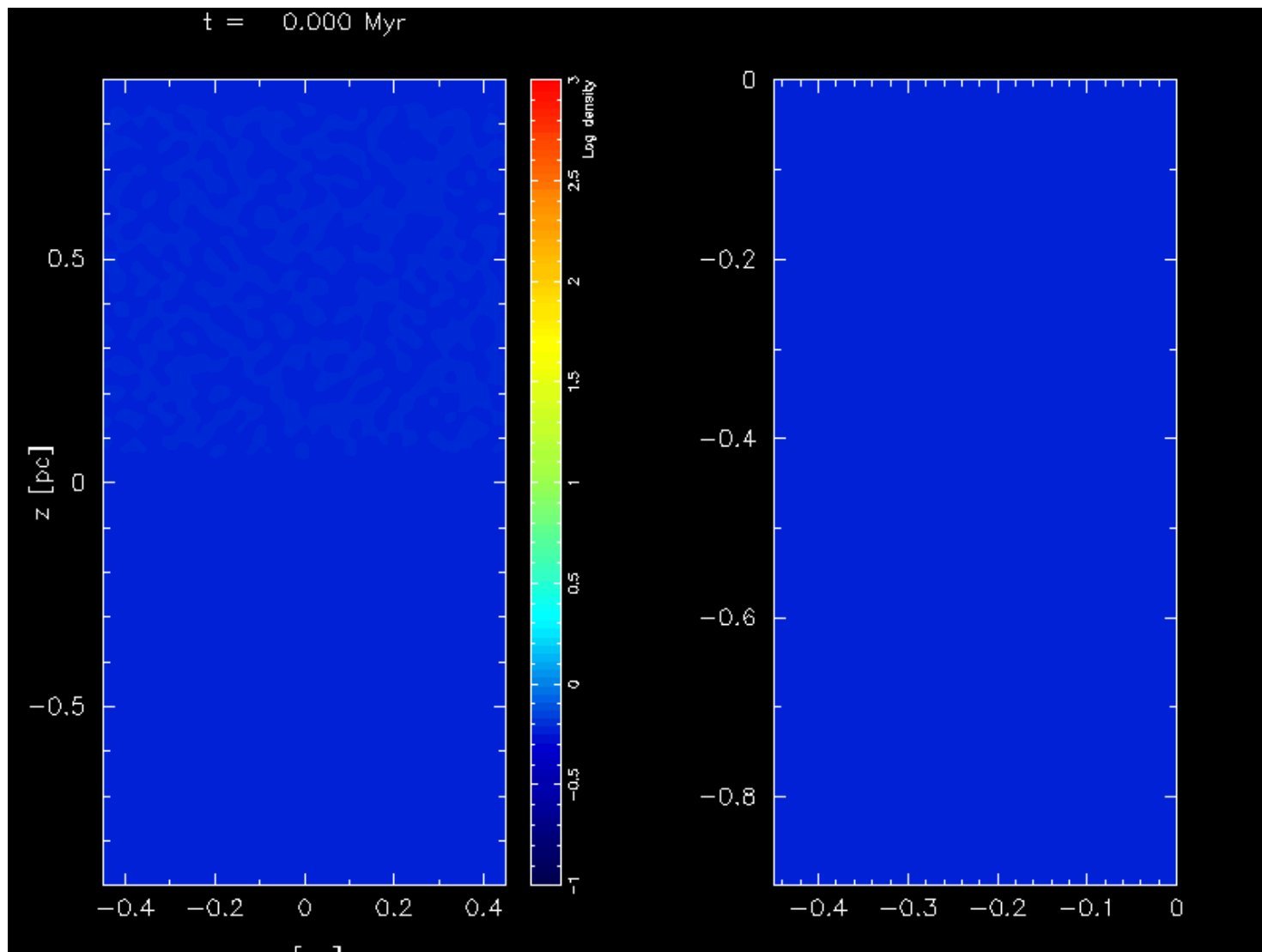
星間ガスを、超新星爆発による衝撃波が通過 →ショック背後に二相構造、乱流生成

黄色：
低温高密度

青色：
高温低密度

乱流が維持

分子雲でも
同じことが？



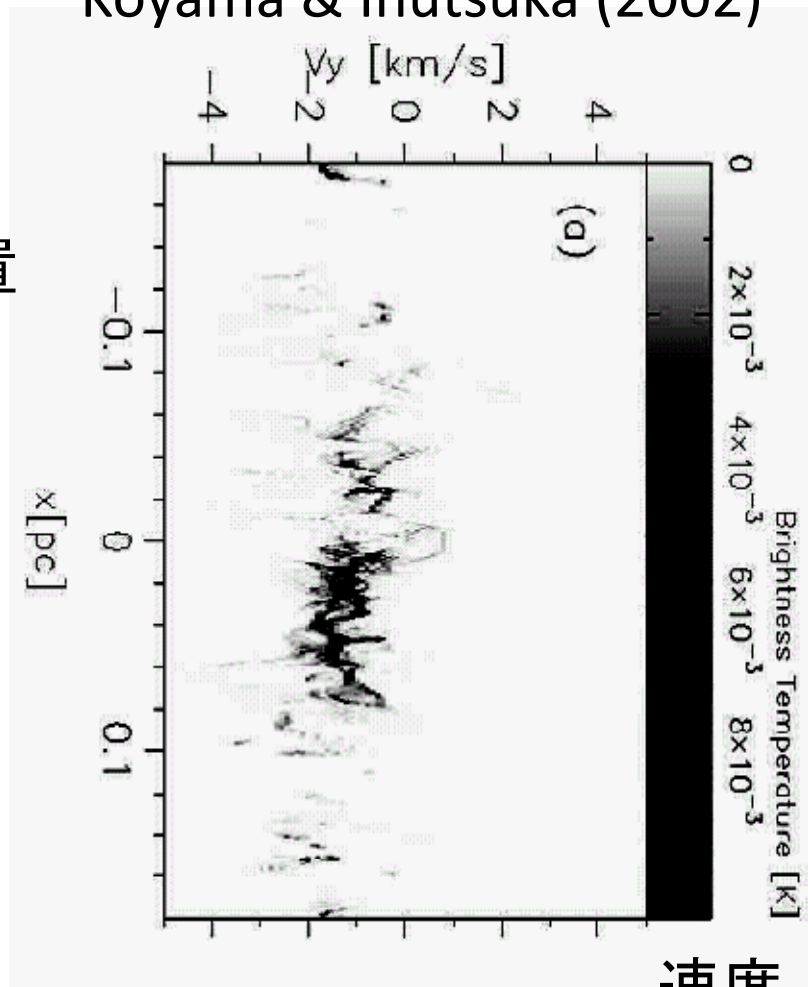
提供： 小山洋氏@神戸大

位置-速度(PV)図

シミュレーション

Koyama & Inutsuka (2002)

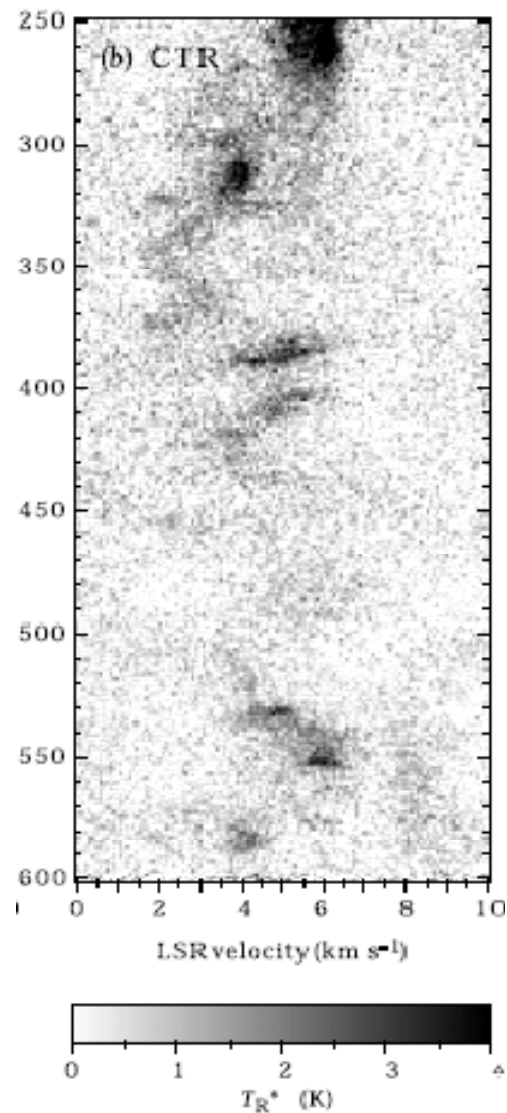
位置



そもそも、どうして
二相に分離するのだろうか？

観測

Sakamoto & Sunada (2003)



二相構造の熱的起源

加熱源

UV/X-ray,
Cosmic ray など

低密度なので、
光学的には薄い

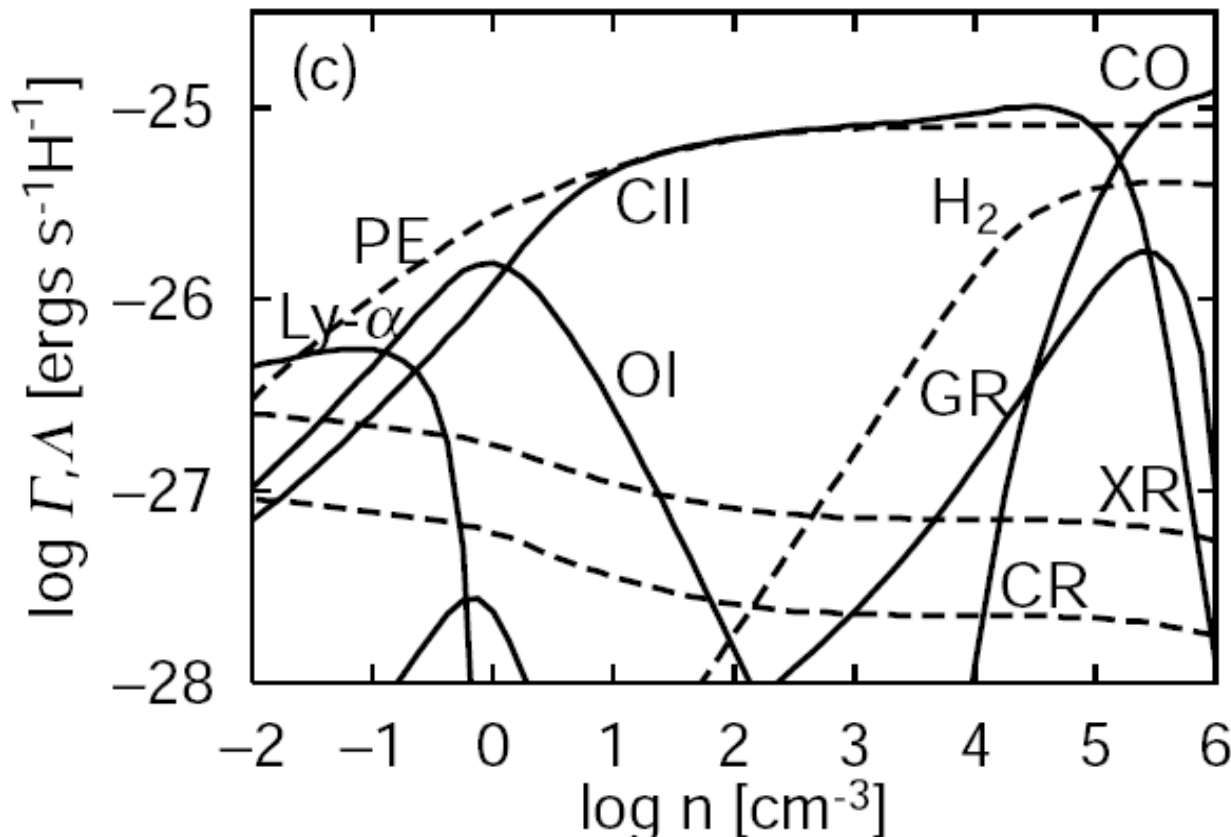
冷却

原子・分子の衝突励起
+ 自発放射

(運動エネルギー → 輻射)



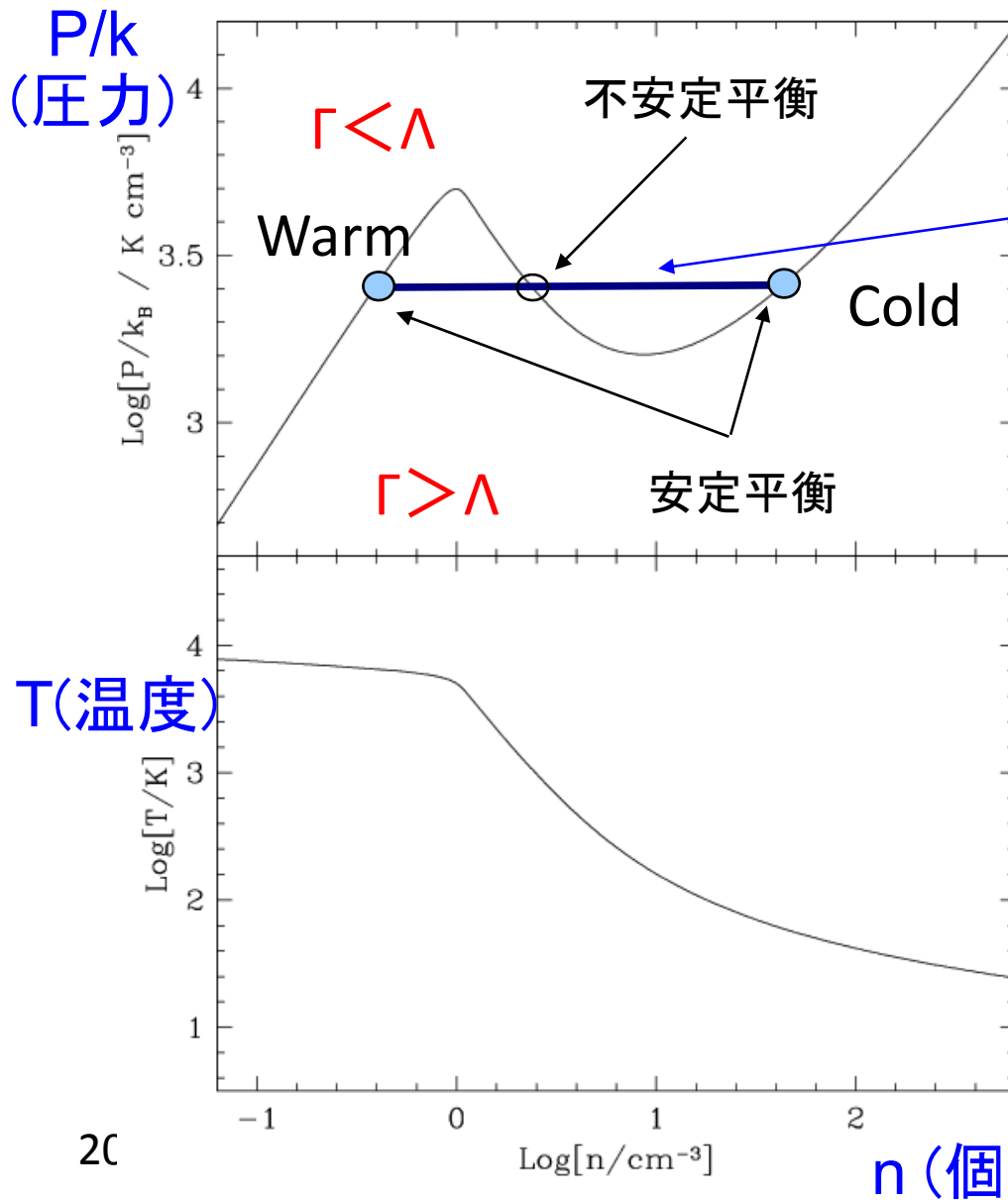
加熱率、冷却率



色々なプロセスが
あって、ややこしいが、
まとめると、
要するに...

Koyama & Inutsuka (2000)

熱不安定(thermal instability)



全加熱率 Γ 、全冷却率 Λ 、
 $\Gamma = \Lambda$ の系列をプロット
 (+理想気体の状態方程式)

圧力はほぼ一定

星間ガスの状態は、
 WarmガスとColdガスへの
 相分離状態 → 一種の相転移
 (密度比約 10^3)

高压:

冷却が卓越 → condensation

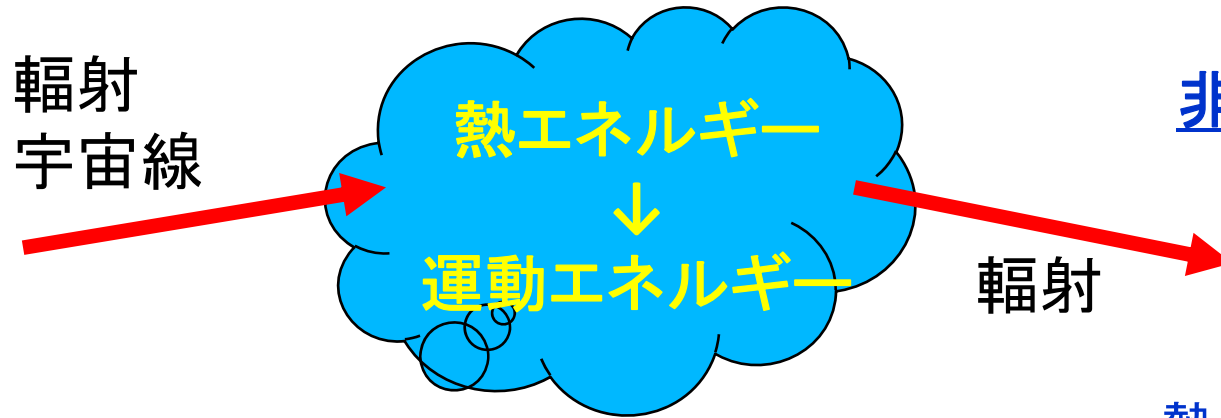
低压:

加熱が卓越 → evaporation

釣り合う圧力が飽和圧

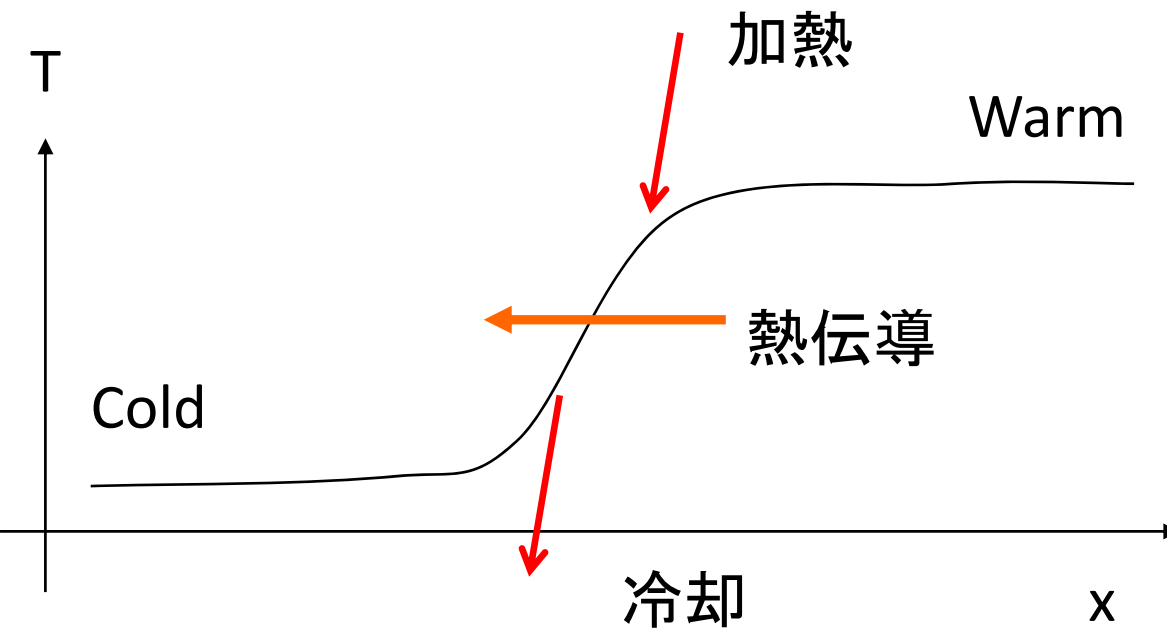
Koyama & Inutsuka's cooling function used

熱エネルギー→運動エネルギーへの変換



非平衡開放系そのもの

- ・熱伝導が運動を駆動している
- ・圧力の大きさで、運動の向きが決まる



しかし、実際にどう乱流になるかは、二次元以上で界面がどうなるかしらべないといけない。

パターン形成理論の応用：界面の運動

エネルギー方程式：

$$\left[\rho T \frac{ds}{dt} = \right] \frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot \rho e v + p \nabla \cdot v = -(n^2 \Lambda - n \Gamma) + \nabla \cdot \kappa(T) \nabla T$$

ρ : 密度、 e : specific energy, p : 圧力

(冷却-加熱)
3次関数的

(熱伝導)

以下の仮定をすると、界面方程式を得る：

- ・球対称 (界面の位置 R)
- ・ほぼ等圧に進化 (流体の運動が遅い)
- ・界面の構造が次元に依らない (plane-parallelでも球対称でも同じ)
- ・温度 (密度) の空間微分は界面でのみ non-zero

$$\frac{dR}{dt} \approx c(p) - \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{m}{k_B} \frac{2}{R} \frac{\kappa_R}{\rho_{\text{cold}}} \equiv c(p) \left(1 - \frac{R_{\text{crit}}}{R} \right)$$

(界面の速度) = (圧力のみで決まる速度) + (曲率に比例する項)

曲がった界面のダイナミクス (1)

界面に垂直なnormal vector \mathbf{g} を定義
温度微分は

$$\nabla T = \mathbf{g} \partial_g T$$

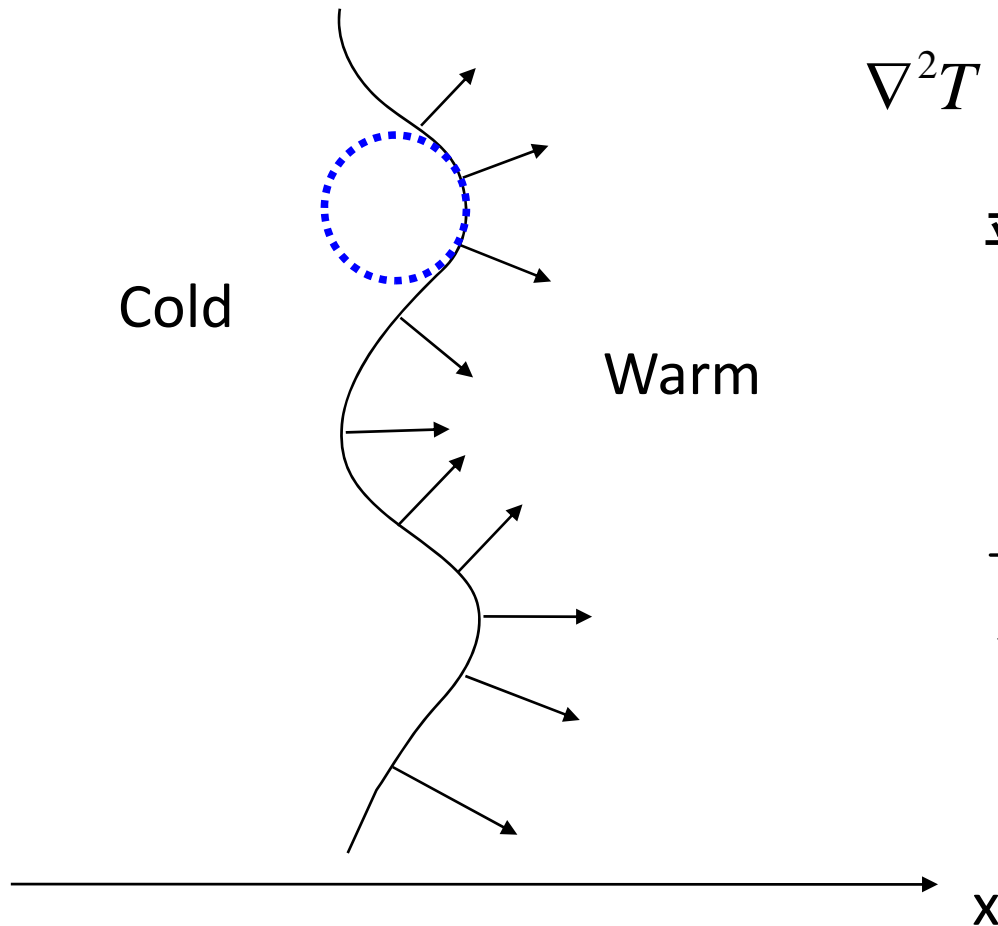
$$\nabla^2 T = \partial_g^2 T + (\partial_g T) \nabla \cdot \mathbf{g}$$

平均曲率は

$$K = \nabla \cdot \mathbf{g}$$

$\frac{2}{R}$ をKで置き換える

(一般にd次元なら $\frac{d-1}{R}$)



曲がった界面のダイナミクス (2)

熱フラックスが
曲率の影響で
集中／拡散するため

方向余弦に注意して、x軸方向の界面の速度

$$V_d = c(p) [1 - KR_{\text{crit}}] \cos \theta$$

V小 for $K > 0$ region

V大 for $K < 0$ region

→ 界面はまっすぐになりたい

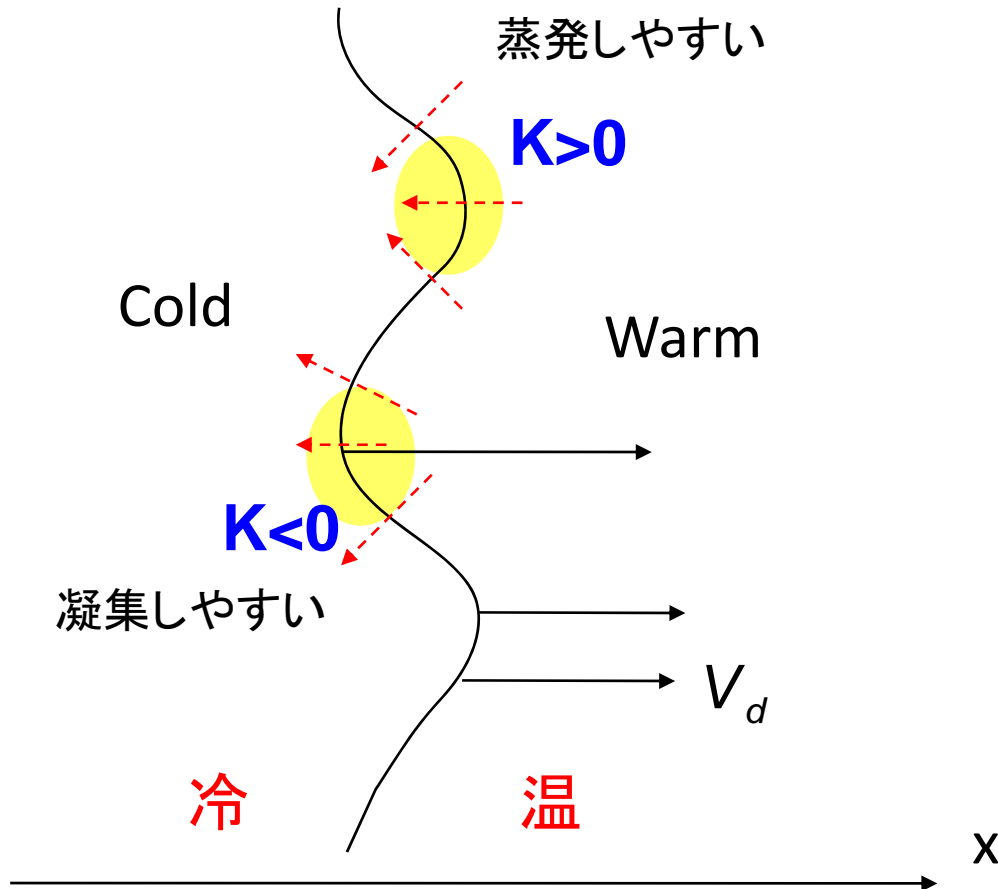
→ 安定

→ 曲率項は安定化に寄与する

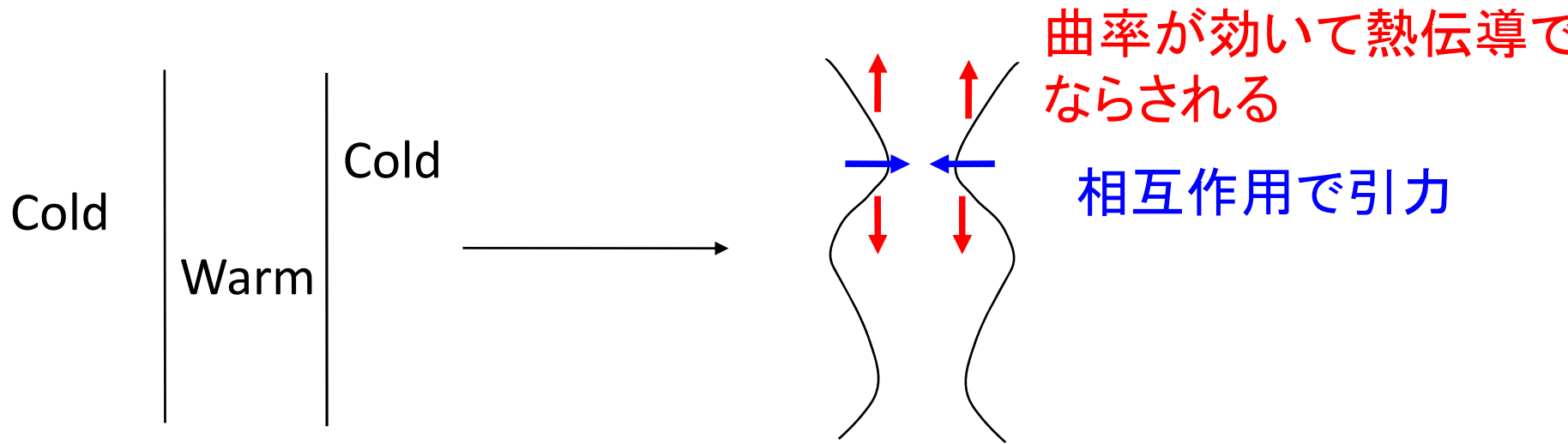
ただし、圧力変動等の効果も
効く可能性がある(線形摂動)
(井上 & 犬塚、準備中)

→ 燃焼波面の

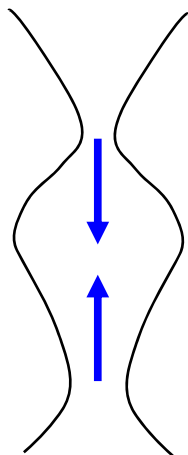
Darrieus-Landau不安定



乱流を駆動するメカニズムは何か？



- ・接近した部分は、より強く引かれあうようになる
 - ・しかし、凸の部分は蒸発しやすくなって、まっすぐに戻そうとする
- この二つの兼ね合い



ある程度近づくと、一気に cold になる
密度が3桁高いので、急激にガスが
流れ込む

inertia で運動が生じる？

(2Dと3Dでも違うかも)

理論の検証？

今まではすべて純理論的

実際に分子雲内部でどうなっているかは、
(とりあえずは) 今後の高精度観測を待つしかない

都合のいいことに、最近(去年5月)、
熱伝導が直接影響を及ぼしそうな、微小な雲が見つかった。

→ tiny HI clouds

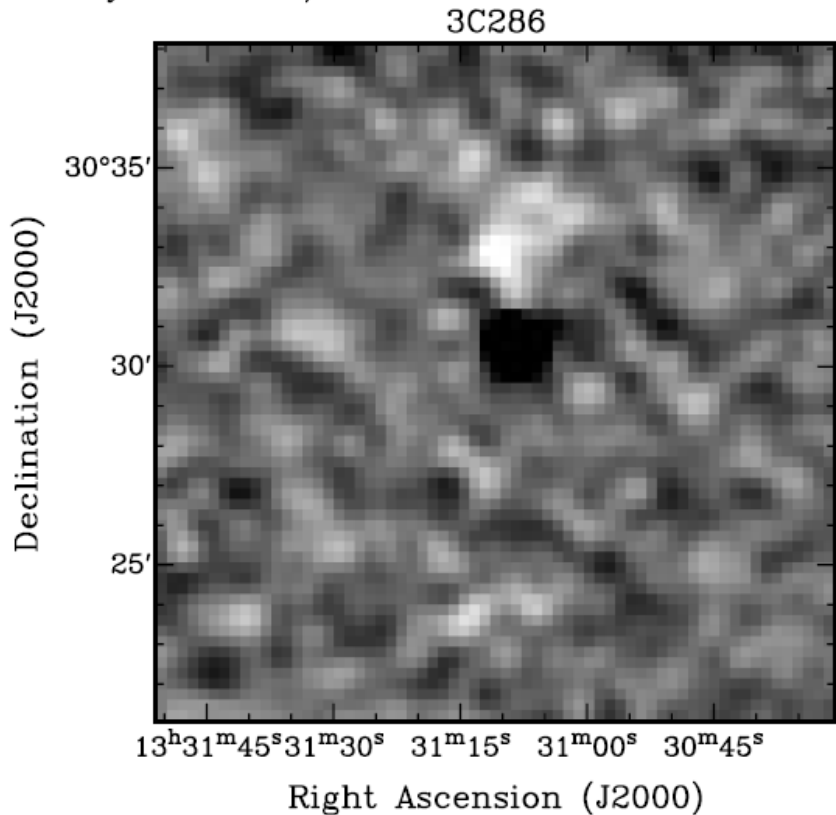
まだ数例しか発見されていないが、今後統計が増えれば、
進化について観測から制限がつく

理論的に進化を求めよう

Tiny HI clouds

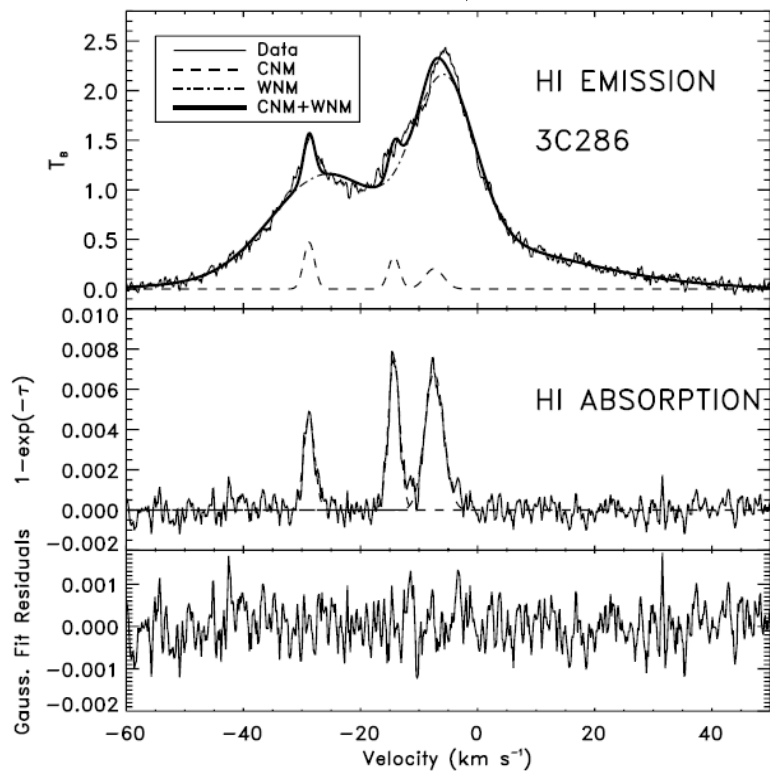
電波干渉計によるマップ(21cm線)

Velocity: -28.90 km/s



0.15pc@100pc

Braun & Kanekar (2005)
Stanimirovic & Heiles (2005)



$$R \sim 0.01 \text{pc} (\sim 3 \times 10^{16} \text{cm}),$$

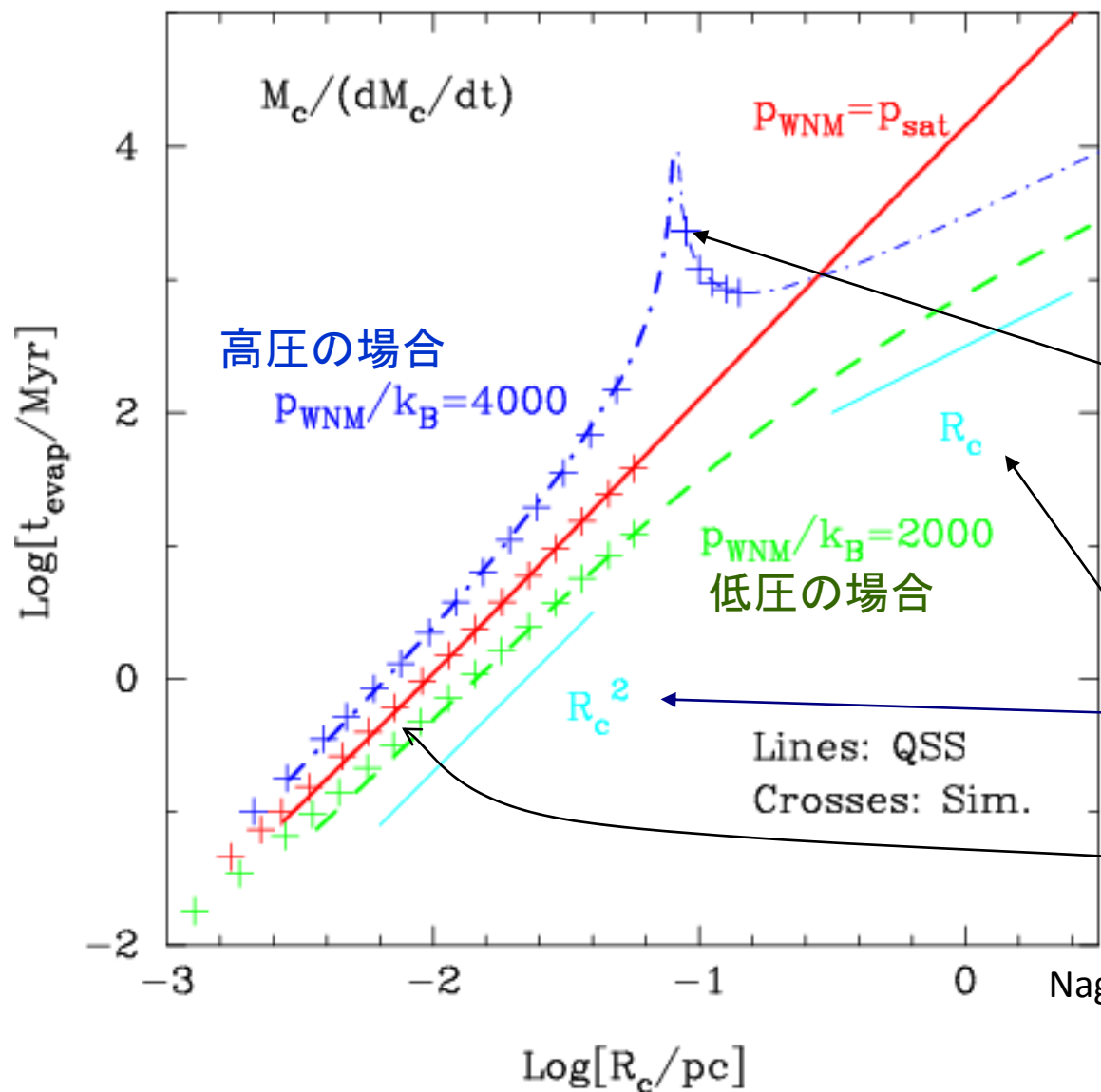
$$N \sim 10^{18} \text{cm}^{-2} \quad \leftarrow \text{観測限界ギリギリ}$$

電波銀河に対する吸収線

蒸発の Timescale

折角球対称雲の進化を求めたのだから、蒸発率を求めてみよう

$R \sim 0.01 \text{ pc}$ の雲は、1 Myr 程度で蒸発してしまう



Myr 程度で常に作り続けなければならない

それとも、銀河の物理状態の我々の知識は間違っている？ (実は物凄い高圧?)

condensation

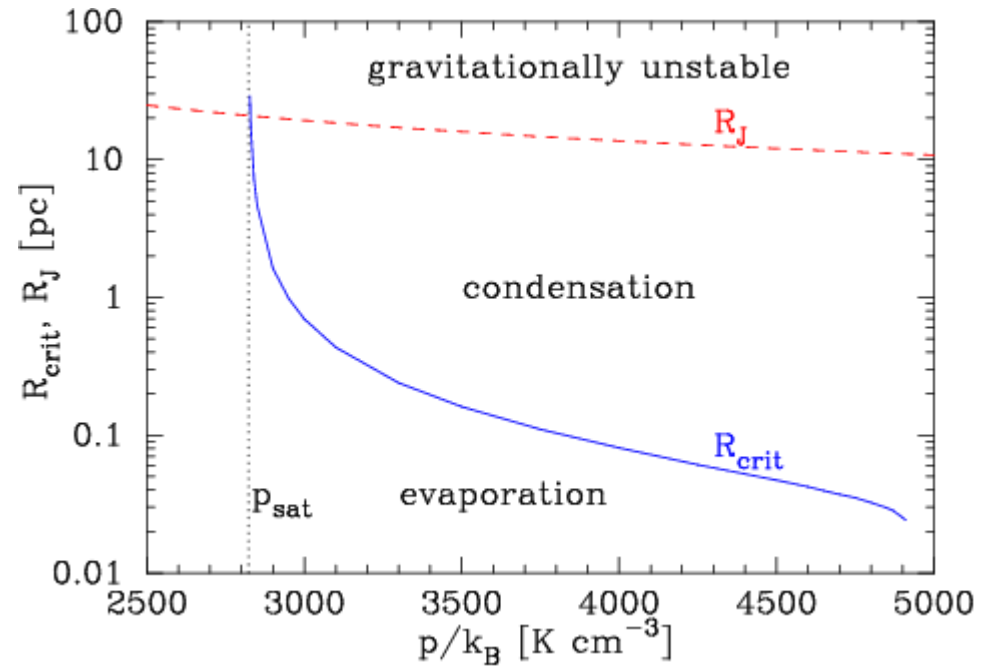
$$\frac{dR}{dt} \approx c(p) \left(1 - \frac{R_{\text{crit}}}{R} \right)$$

解析近似解の予想

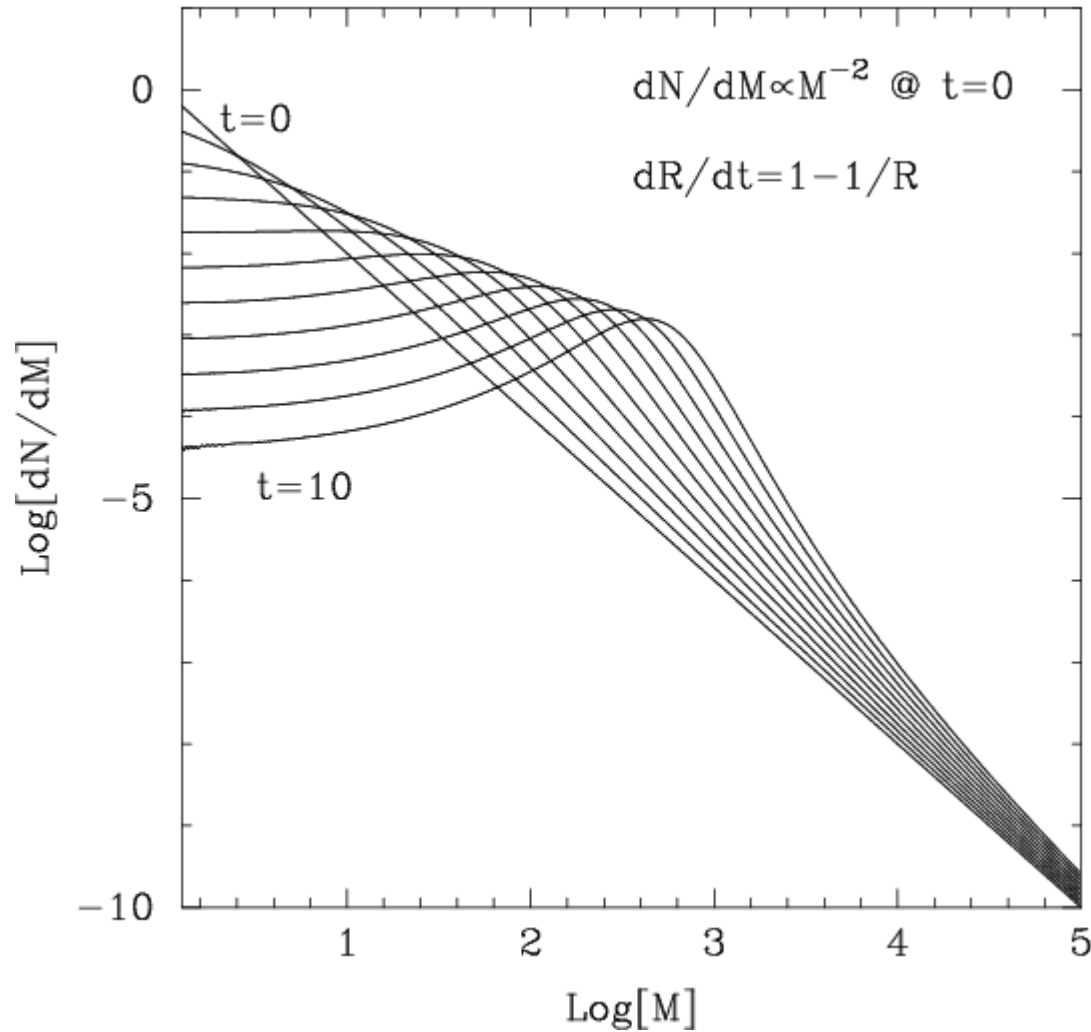
動径方向のみを解いたシミュレーション結果

Nagashima, Inutsuka & Koyama, in prep.

臨界半徑



質量スペクトル



個々の雲の進化が求められたので、統計の進化も計算できる

→将来の観測でチェックできる

まとめ

- ・星間分子雲は乱流状態と思われる。
- ・universal なスケーリング則がある。
- ・星間ガスは二相構造を取り得る。
- ・熱伝導により、乱流が自発的に維持される。
- ・熱伝導の役割は、微小な中性水素雲を調べることで、明らかになると期待される。
- ・より大きな数値実験
- ・より現実的な観測との比較 (輻射輸送; 国立天文台グループが開始)
- ・非平衡系の物理学の方法論が有効
- ・微小な中性水素雲の統計から、銀河ガスディスクについて新たな知見が得られると期待
 - ガス相にある baryonic dark matter? (baryon budget)