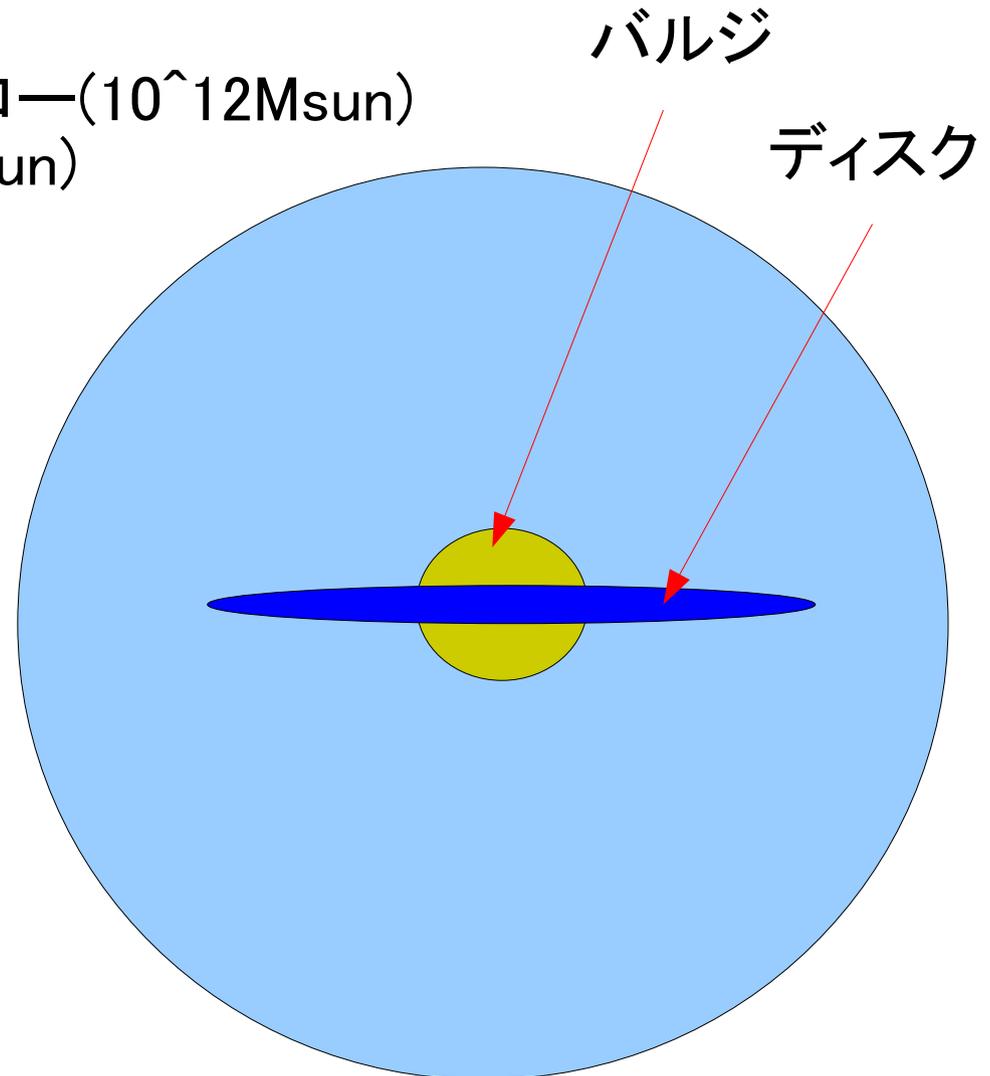


銀河に関する空間スケール

| | |
|----------|---|
| 4Gpc | 宇宙の horizon ($10^{22}M_{\text{sun}}$) |
| 6Mpc | 銀河の”相関長” |
| 1.5Mpc | 銀河団($10^{15}M_{\text{sun}}$) |
| 100kpc | 銀河を含むダークハロー($10^{12}M_{\text{sun}}$) |
| 10kpc | 銀河ディスク($10^{10}M_{\text{sun}}$) |
| 0.3-1kpc | ディスクの厚み |
| 1-10pc | 分子雲($10^{(1-6)}M_{\text{sun}}$) |

1pc=3.26光年= 3.1×10^{16} m
年周視差が1秒角になる距離

ダークハロー
ダークマターの
自己重力で結合
した天体



様々な星雲

- ここでは「系内星雲」のみ考える
 - 「系外星雲」(例: アンドロメダ星雲)は「銀河」と呼ぶ
 - the Hubble Heritage Project Website に沢山の画像がある
 - <http://heritage.stsci.edu/>
- 星の「もと」…**暗黒星雲**
 - 濃いガスの集まり
- 星になりそこねたガス雲…**散光星雲**
 - 生まれたばかりの星が出す紫外線を吸収して光っている
- 太陽程度の軽い星が最後に放出するガス…**惑星状星雲**
 - 「白色矮星」からの紫外線で光っている
- 超新星爆発で吹き飛ばされたガス…**超新星残骸**
 - 高速でひろがっている

暗黒星雲

- ガスが集められると、自己重力により収縮する
- 密度が高くなり、背後の光をさえぎるようになる
 - 「暗黒」星雲の形成
 - ガスにふくまれる「ちり(ダスト)」が主に光を散乱する
- 密度が高いので原子同士の衝突が頻繁になり、分子がつくられる
 - 「分子雲」
- ガスの冷却が分子により効率よく進み、圧力が低いまま、どんどん収縮
 - やがて星を作る
 - 冷却については後述します
- 「暗黒星雲博物館」東京学芸大学内のウェブサイト
 - <http://astro.u-gakugei.ac.jp/~tenmon/DCM/>

暗黒星雲の例

Horsehead Nebula



Hubble
Heritage

NASA, NOAO, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC01-12

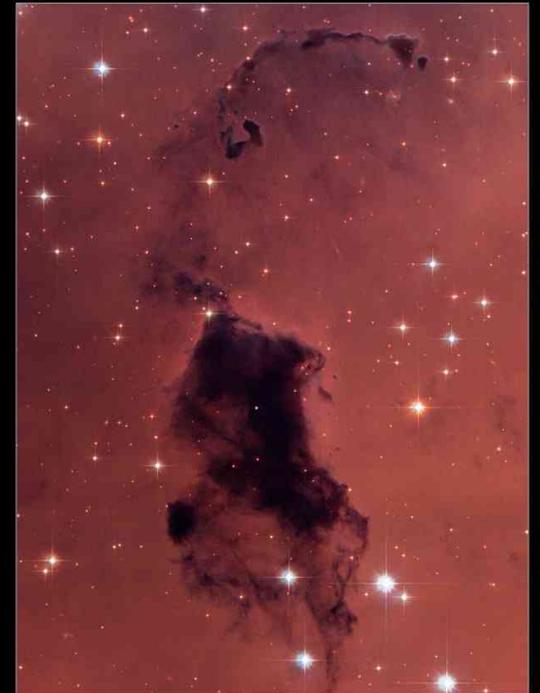
Thackeray's Globules in IC 2944



Hubble
Heritage

NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC02-01

Bok Globules in NGC 281



Hubble
Heritage

NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Hubble Space Telescope ACS • STScI-PRC06-13

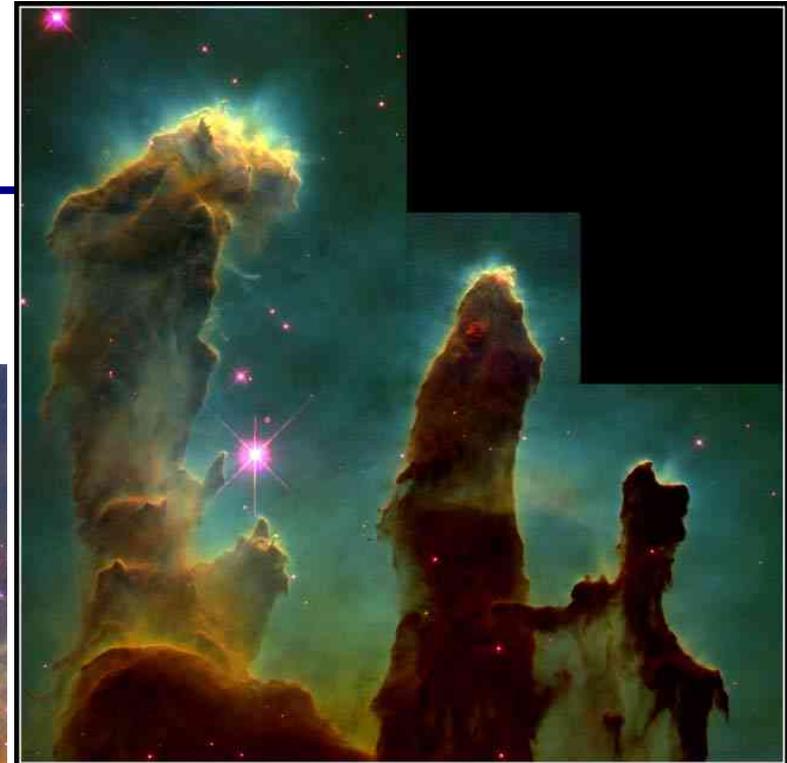
わし星雲 (M16, Eagle Nebula)



わし星雲



Photo Credit: T. Rector (University of Alaska)



Gaseous Pillars · M16 HST · WFC2
PRC95-44a · ST Sci OPO · November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

Eagle Nebula
M16



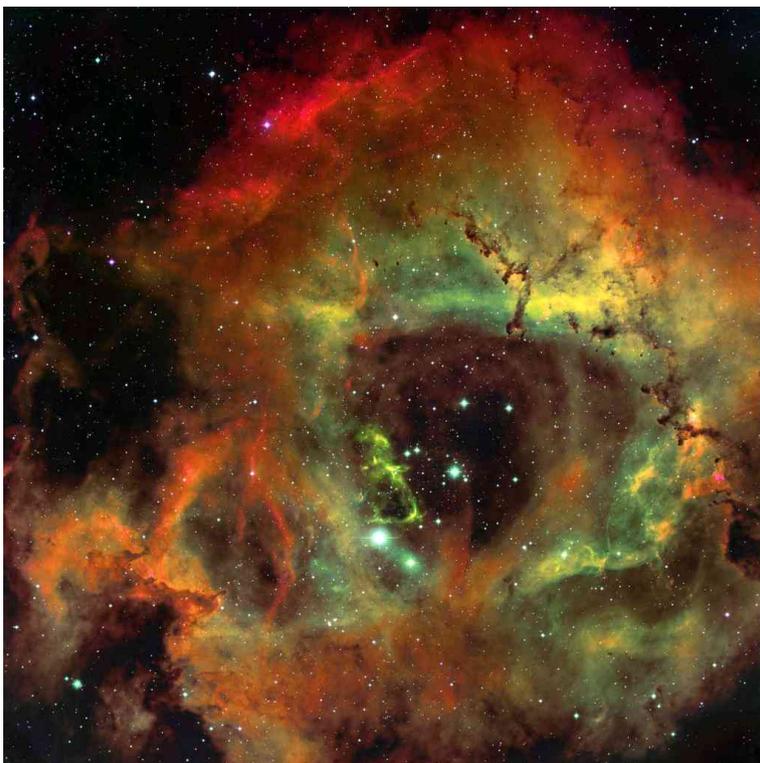
Hubble
Heritage

NASA, ESA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) · Hubble Space Telescope ACS · STScI-PRC05-12b

<http://heritage.stsci.edu/2005/12b/supplemental.html>

散光星雲の例

<http://home.u05.itscom.net/apodjpn/apodj/2000/200001/fb000111.htm>



暗黒星雲で生まれた
若い星が紫外線を出し、
ガスを光らせる

M20 (いて座にある散光星雲／三裂星雲) 1997年 6月29日, 23時30分 (JST)



口径60cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12), 液体窒素式冷却CCDカメラ (Astromed 3200シリーズ)
露出時間: 赤40秒×8, 緑40秒×8, 青60秒×8, フィルタ: R-60, G-533, B-460

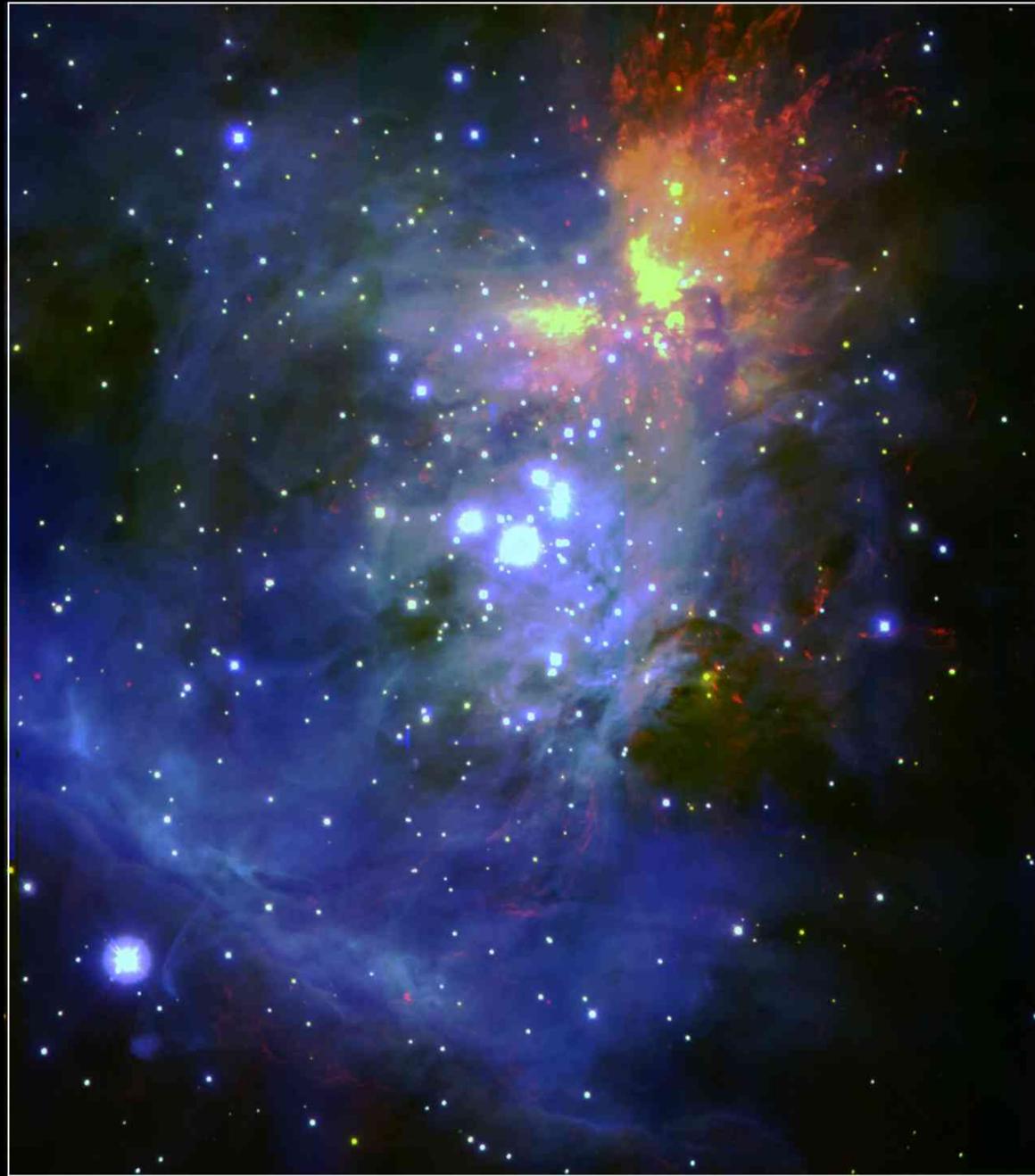
M8 (いて座にある散光星雲／干潟星雲)

1997年 9月10日, 20時26分 (JST) 台 広報普及室



焦点距離300mm望遠レンズ (タムロン300mm F2.8LD/絞りF5.6), 冷却CCDカメラ (MUTOH CV-16)
露出時間: 2分×8, フィルタ: R-60, 疑似カラー処理, 画像範囲: 2.63×1.75
観測場所: 乗鞍コロナ観測所

H. Fukushima 国立天文台 広報普及室



Orion Nebula

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J, K' & H₂ (v=1-0 S(1)))

January 28, 1999

Orion Nebula • M42

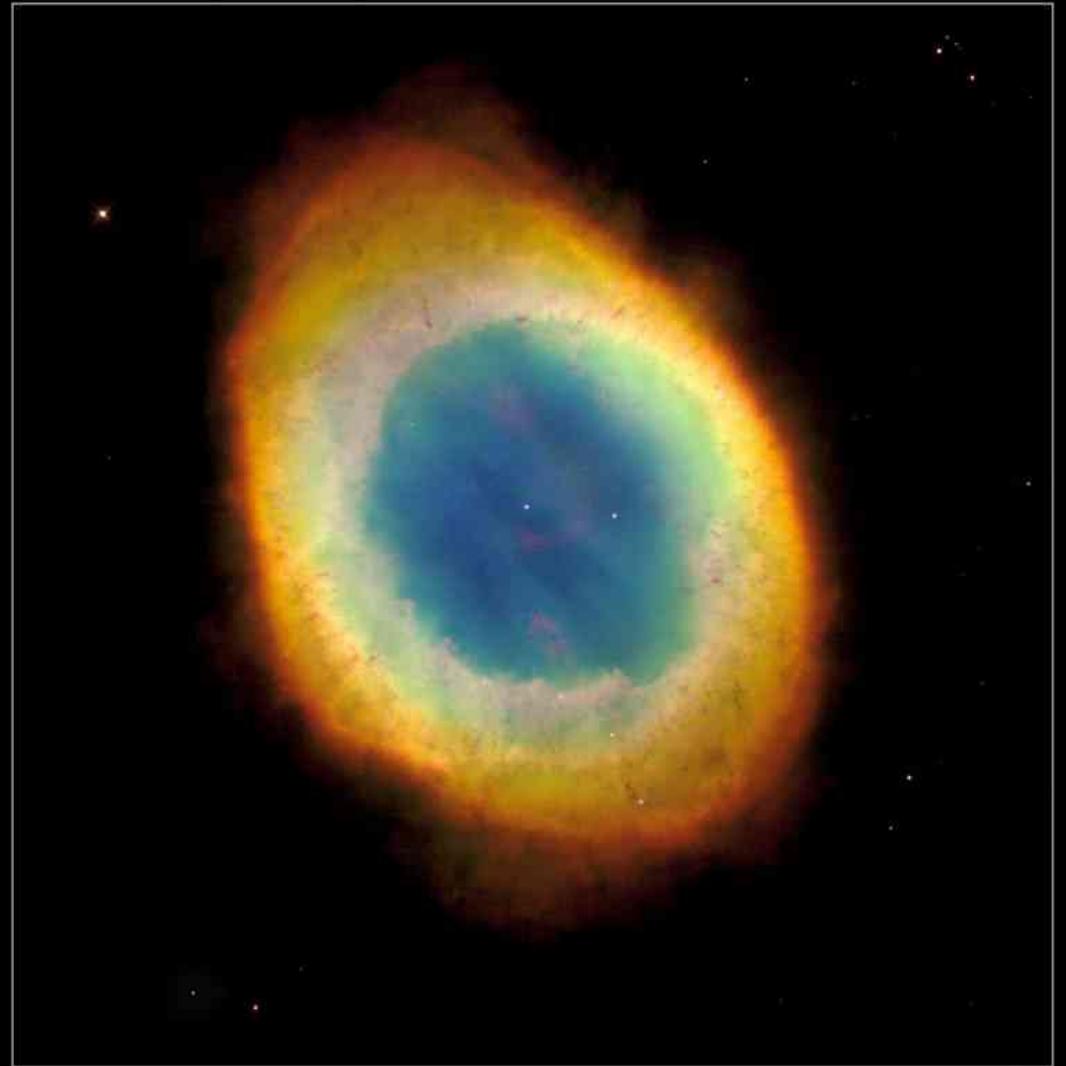


Hubble
Heritage

惑星状星雲

- 太陽程度の星は、いずれ赤色巨星になり、最後に外側の水素ガスを周囲に吹き飛ばし、中心は高温の白色矮星になる
- 高温になると紫外線を出し、自らが放出したガスを照らす。

Ring Nebula



Hubble
Heritage

惑星状星雲

M97 (ふくろう星雲)



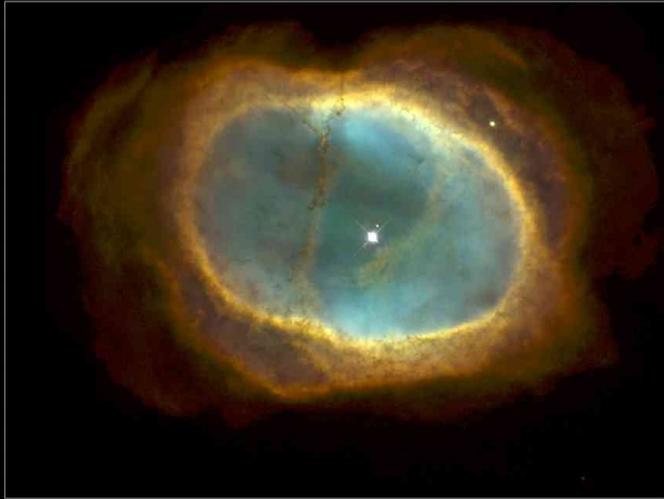
Jan. 6, 1996, 23h56m~27h18m (JST)

口径50cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12), 液体窒素冷却CCDカメラ (Astromed 3200シリーズ)
露出時間: R 4分×9, G 4分×8, B 4分×3, フィルタ: Rバンド, Vバンド, B-460
3色分解撮像カラー合成画像

H. Fukushima

国立天文台 広報普及室

Planetary Nebula NGC 3132



PRC98-39 • Space Telescope Science Institute • Hubble Heritage Team

Hubble
Heritage

中心が連星

NGC 2346



PRC99-37 • Space Telescope Science Institute • Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA)

Hubble
Heritage

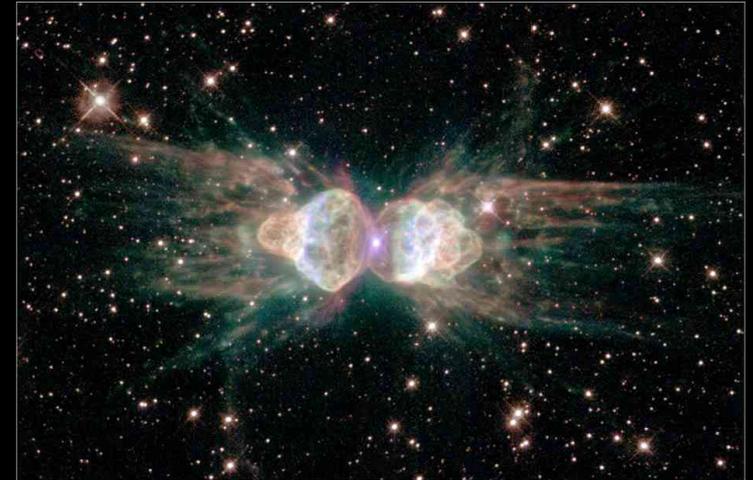
Planetary Nebula IC 418



PRC00-28 • NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • HST/WFPC2

Hubble
Heritage

Planetary Nebula Mz 3



NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC01-05

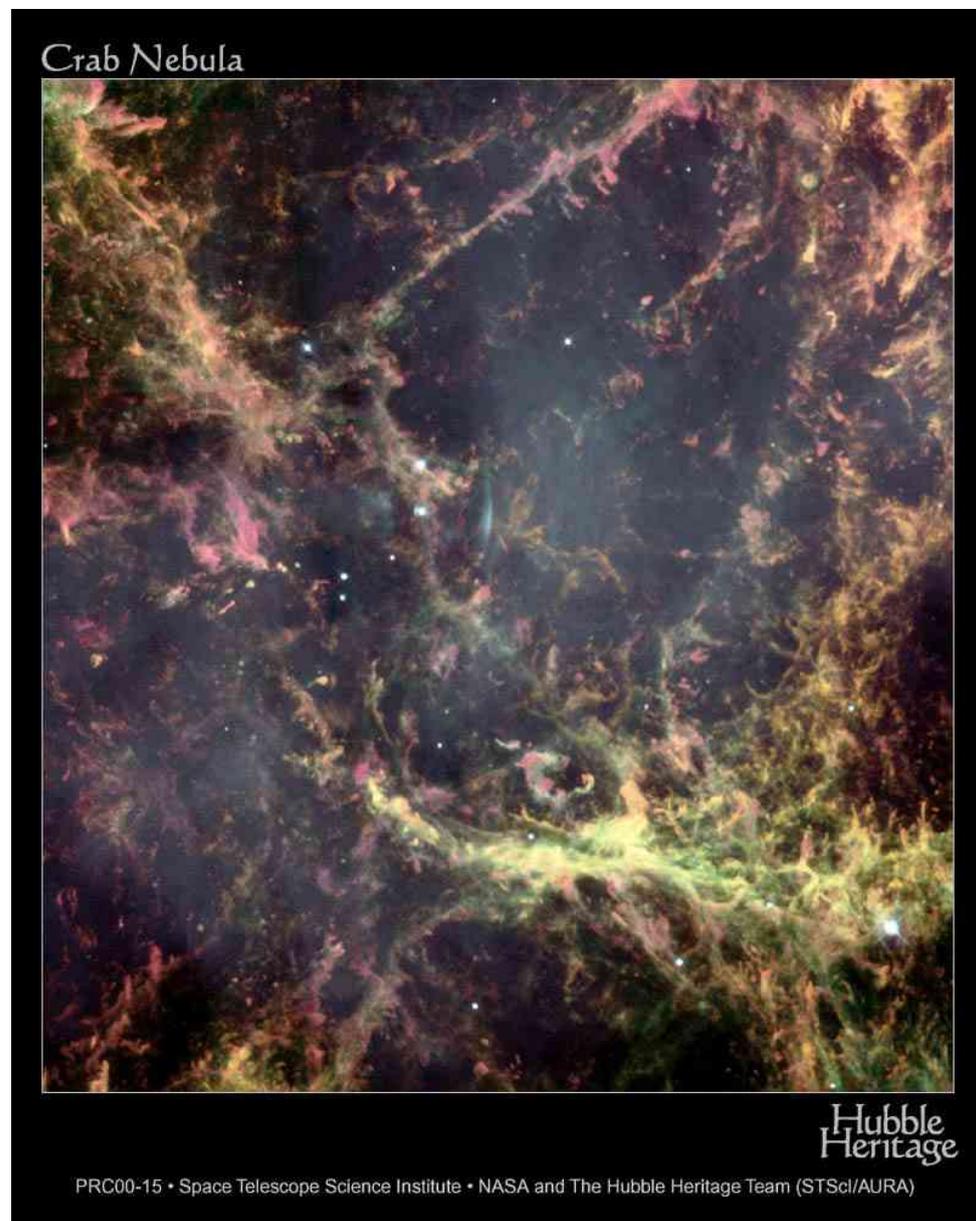
Hubble
Heritage

超新星残骸

- 太陽の8倍を越える大質量の星は、一生の最後に大爆発を起こす→超新星爆発
- 地球から見ると、急に明るい天体が出現したように見えるので、「超新星」と呼ばれる
 - 「新星」もある。星の表面での爆発
- このとき、鉄より重い元素が合成されたと考えられている
 - 超新星抜きに地球・生命の誕生は考えられない

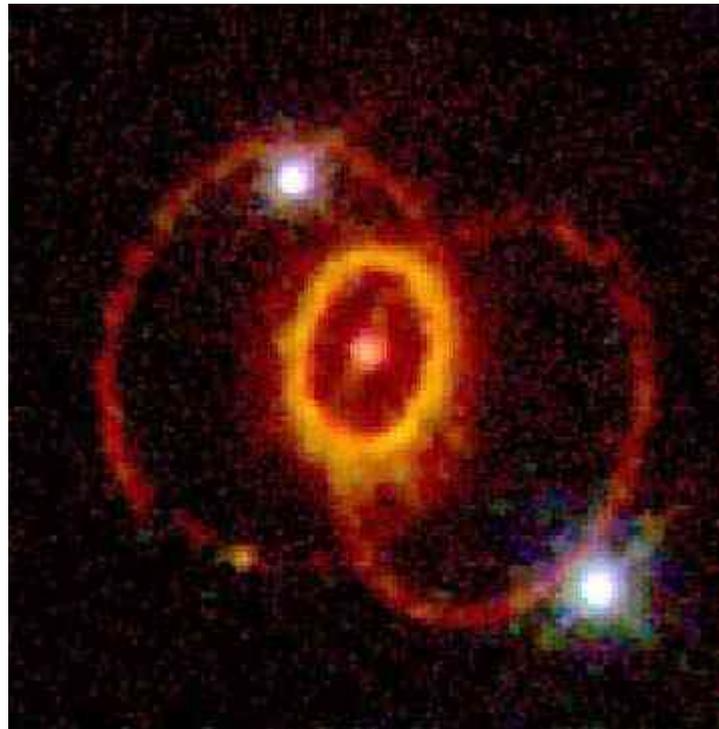
かに星雲

- 1054年に出現した超新星の名残
- 藤原定家「名月記」にも記載



SN1987A

- マゼラン雲(おとなりの銀河)に1987年に出現した超新星
- 現在も、その残骸が広がっていつている
- 爆発の際に放出されたニュートリノをスーパーカミオカンデが検出し、小柴さんがノーベル賞を獲得した



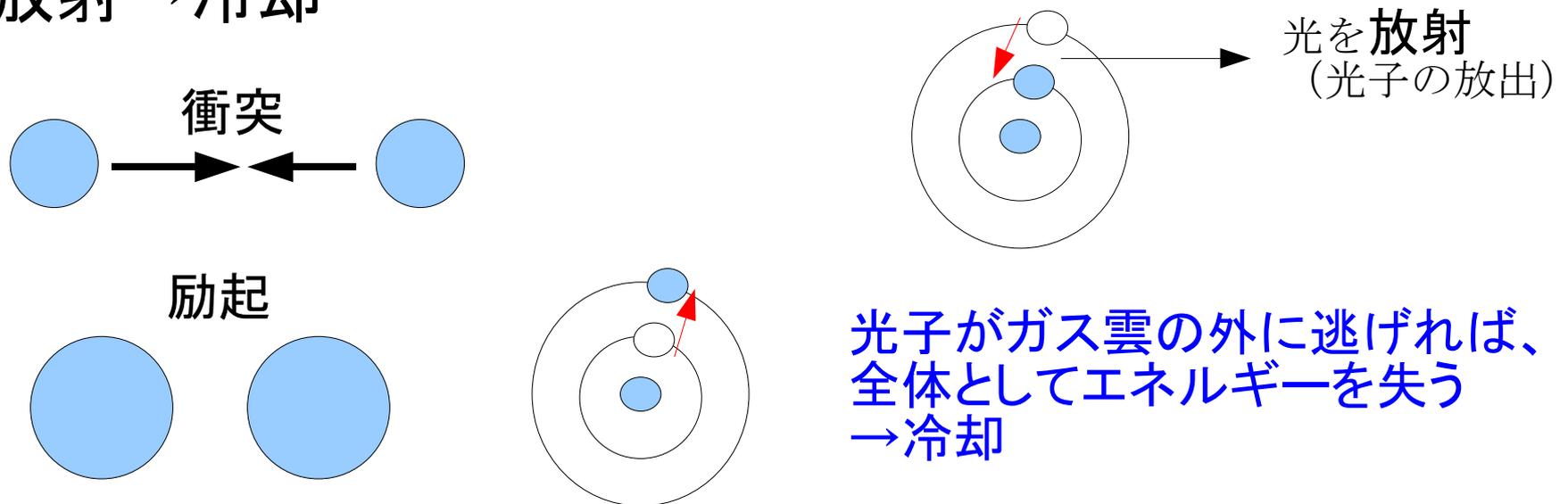
http://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/rel_stars.html

分子雲の謎 (ここから少し専門的になります)

- ガスは自分の重力で収縮する
- エネルギーを保存したまま収縮すると、ガスの温度は上昇する
 - 断熱圧縮
 - 外部からの仕事が、内部エネルギーに変わる
- 温度が上がると圧力も上がるので、やがて重力と圧力が釣り合い、収縮はストップしてしまう(例: 星)
 - $PV=nRT$, (圧力) \propto (密度) \times (温度)
- 実際はガスが冷却してどんどん収縮する
- 収縮して密度が上がると、原子同士の衝突回数が増え、分子ができやすくなる
- 分子によって、ますます冷えやすくなる

冷却とは何か

- 温度：分子の乱雑な運動の度合い
 - 温度は平均の運動エネルギーと比例する
 - 激しく動き回っていれば高温、静かにしていれば低温
- ミクロに考えると、個々の分子の運動エネルギーを減らすことが「冷却」になる。
- 運動エネルギー → 分子同士の衝突 → 分子の「励起」 → 自発放射 → 冷却



光子がガス雲の外に逃げれば、
全体としてエネルギーを失う
→ 冷却

励起の一例(電子の軌道が叩き上げられる)

冷却率の詳細な計算

Koyama & Inutsuka (2000)

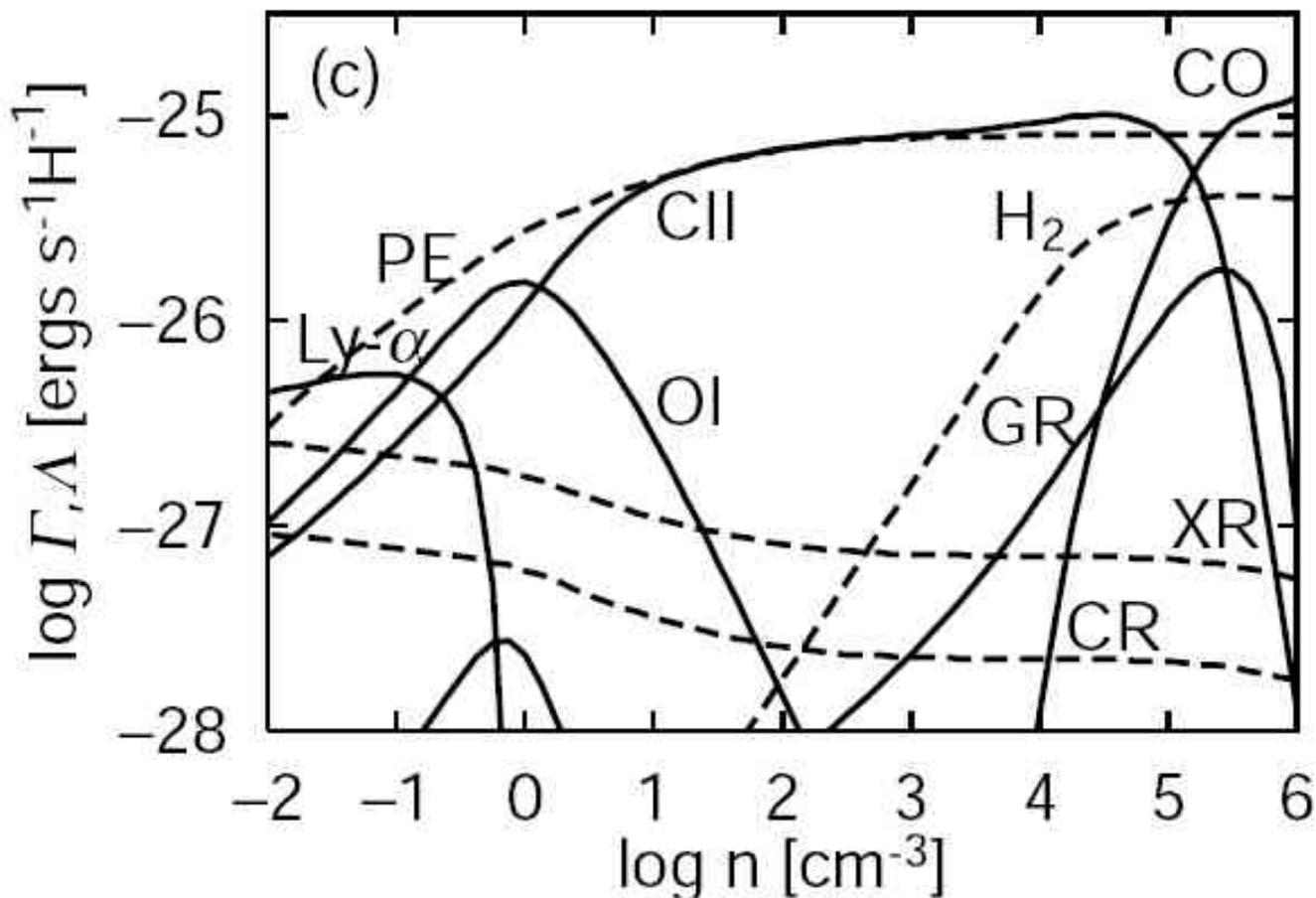
単位時間当たり、
水素原子一個当たり、
失うエネルギーの量

n が 10^5 個/ccを越える
ようになると、分子が
形成されてくる

→分子雲

ちなみに1気圧下では、
1モルの気体が占める
体積は22.4L。つまり、
22400cc中に 6×10^{23} 個。

※天文学では、いまでも
cgs単位系を使うことが多い



ガス内の分子の個数密度
(1cc当たりの分子個数)

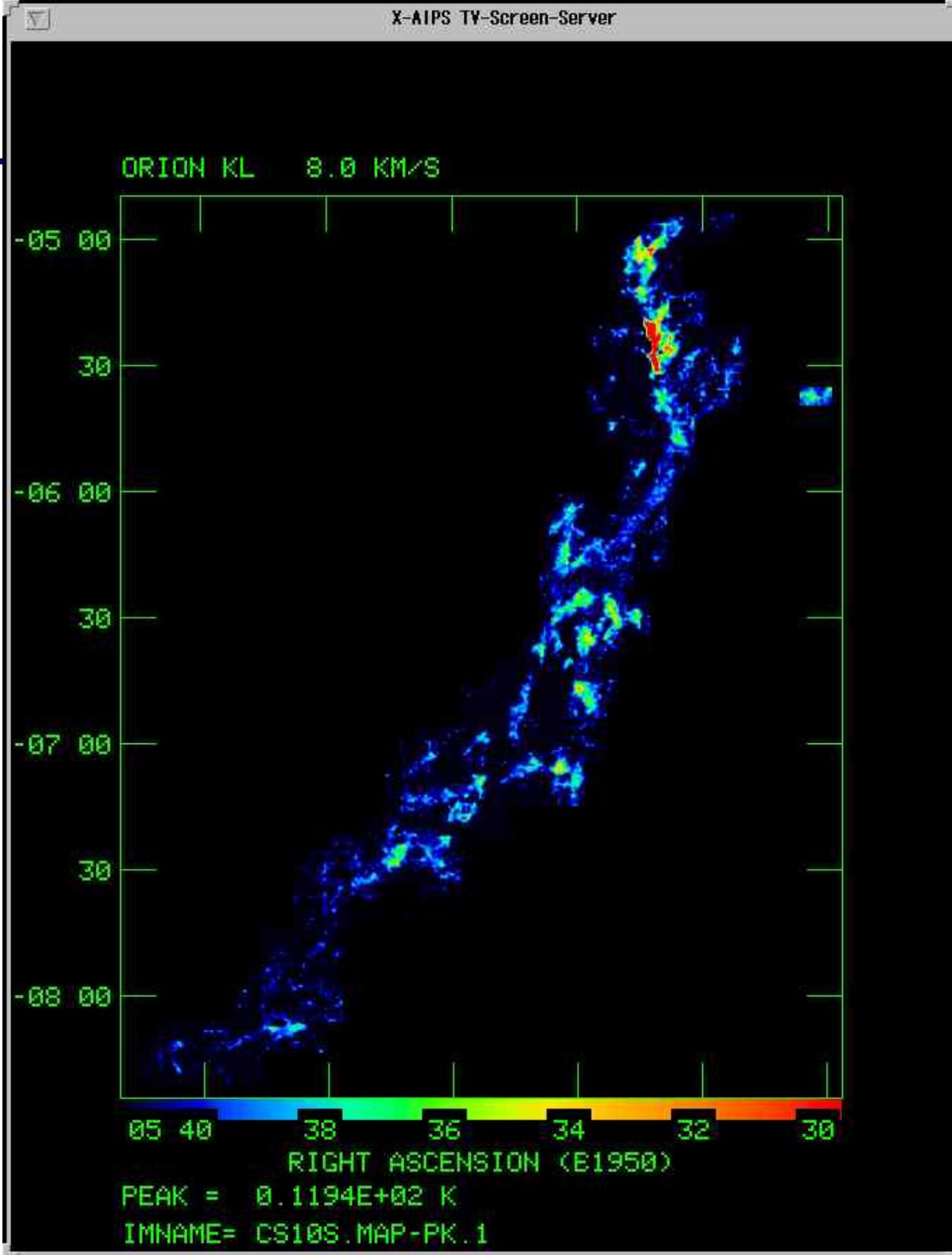
分子雲



(野辺山のwebより)

野辺山45m

(立松さんのwebより)



様々な星間ガス雲

H II領域

大質量星からのUV輻射により
イオン化された領域

分子雲
星形成の現場
自己重力が効きだす

超新星爆発

UV

星形成

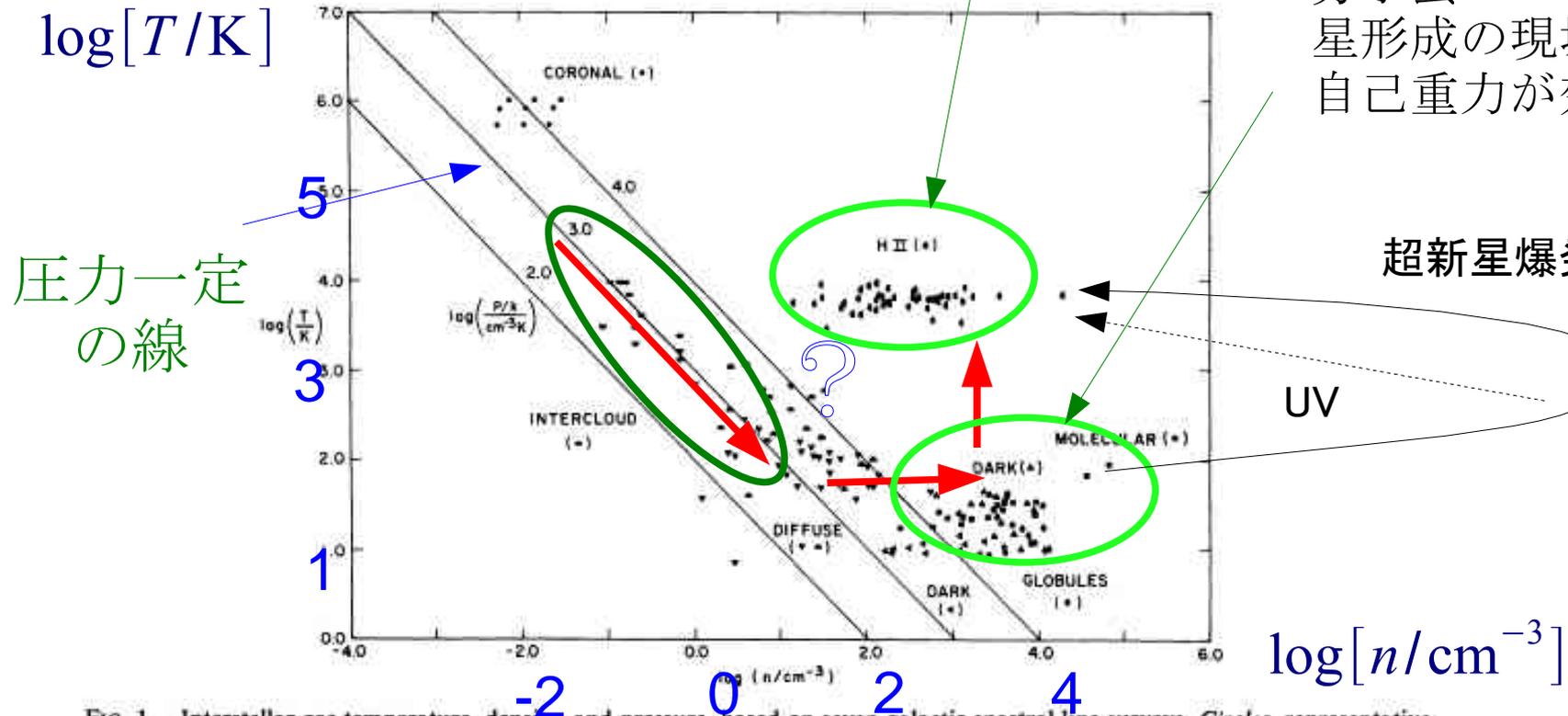


FIG. 1.—Interstellar gas temperature, density, and pressure, based on seven galactic spectral line surveys. Circles, representative points for coronal gas observed in 1032 Å O VI line, based on filling factor $f_c = 0.1, 0.2, \text{ and } 0.4$, and on $n(T)$ power-law exponent $\eta = 0.0, 0.5, \text{ and } 1.0$; semicircles pointing down, intercloud gas observed in 21 cm H I line; semicircles pointing up and triangles pointing down, diffuse clouds observed in 21 cm H I line; triangles pointing up, dark clouds observed in 21 cm H I line; triangles pointing left, dark clouds observed in 2.6 mm CO lines; diamonds, Bok globules observed in 2.6 mm CO lines; squares, molecular clouds associated with nebulosity, observed in 2.6 mm CO lines; semicircles pointing left, H II regions observed in 6 cm H109 α line and 6 cm continuum.

Myers (1978)

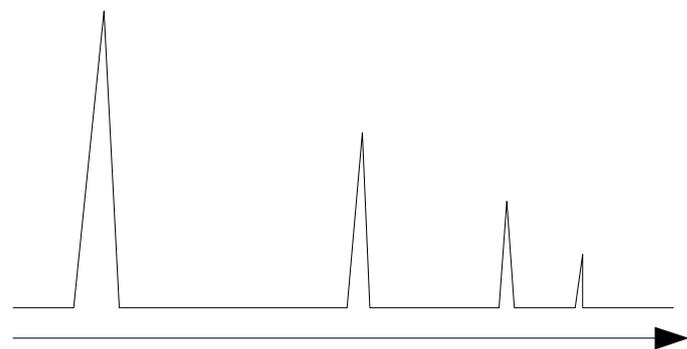
ガス雲の物理状態の観測

- 温度

- 様々な原子・分子輝線の相対強度を求める
- 高温なほど、高い励起状態から落ちる際に放出される波長の光が強くなる

- 速度

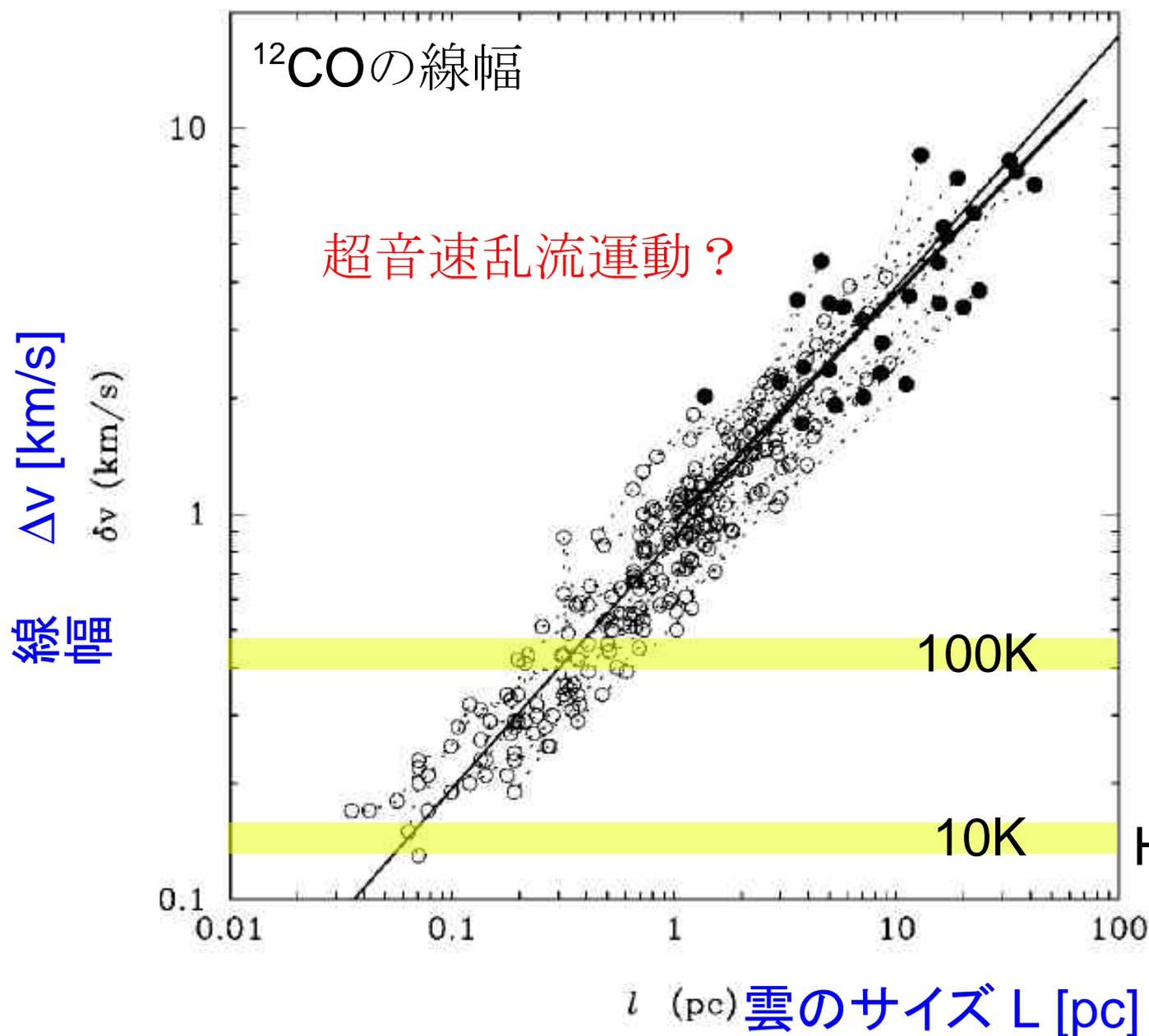
- 個々の輝線の幅を見る(本来は量子力学的に決まった特定の波長の光が放出されるはずだが、ランダムに動き回っていると、ドップラー効果によって、少しズレが生じる)



波長
短いほどエネルギーが高い

系が乱流状態になれば、
温度によるランダム運動が
作るドップラー効果で
線幅は決まる。
もし乱流があると、その運動
も加味した線幅が出る。

サイズー線幅関係(Larson's law)



観測される線幅と雲のサイズには良い相関がある

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
(高温では分子は形成されない)

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

→ 線幅は温度ではなく、乱流による

→ しかも、超音速

しかし、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状態でなくなる

→ しかし乱流はどの分子雲にも見られる

困った。

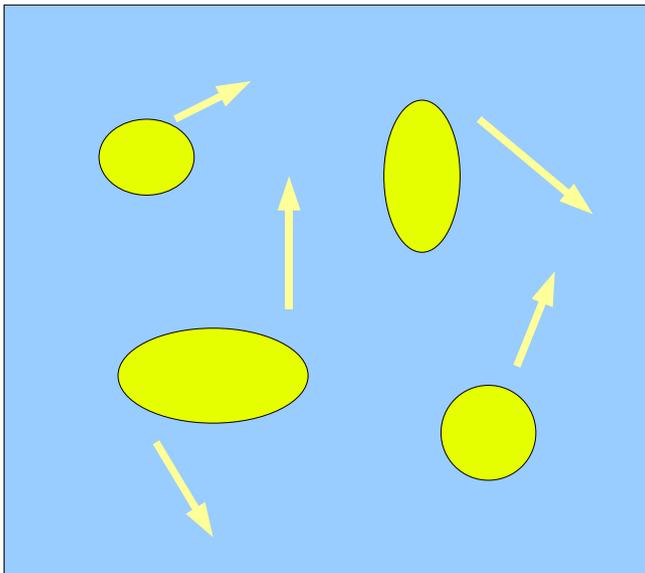
$$t_s \sim L/C_s \sim 1 \text{ Myr} \left(\frac{L}{1 \text{ pc}} \right) \left(\frac{C_s}{1 \text{ km/s}} \right)^{-1}$$

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

- ・近傍大質量星からの紫外線輻射
 - ・超新星爆発
 - ・生まれたての星からの質量放出(ジェット)
 - ・磁場
- などなど。

しかし、「分子雲中のガスのすべてが分子になっている」という仮定を外すと、面白い現象が現れる可能性がある



- ・暖かいガスに、ランダムに運動する冷たいクラumpが浮かんでいる
- ・観測は冷たいクラumpからの輻射
- ・クラumpの運動は、
暖かいガスの音速よりは遅く(亜音速)
冷たいガスの音速より速い(超音速)
→衝撃波生じず、乱流が維持される？

希薄なガス雲の場合

- 分子雲の内部はまだよくわかっていない(観測が難しい)
- 似たような状況は他にないか？
- ある！希薄なガス雲
- ここで何が起きているかを詳細に調べれば、ヒントが見えてくるのではないか？

星間ガスの物理(熱力学的)状態

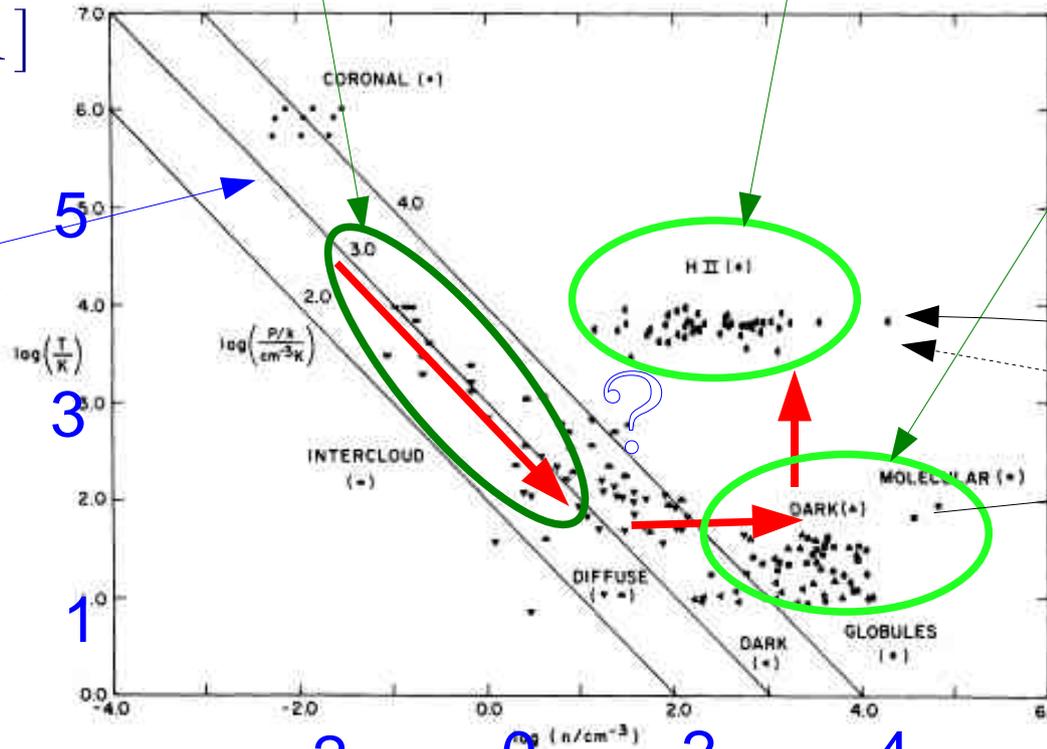
今回はここに注目
分子雲形成のスタート地点？

H II領域
大質量星からのUV輻射により
イオン化された領域

分子雲
星形成の現場
自己重力が効きだす

$\log[T/K]$

圧力一定
の線



超新星爆発

UV

星形成

$\log[n/cm^{-3}]$

FIG. 1.—Interstellar gas temperature, density, and pressure, based on seven galactic spectral line surveys. Circles, representative points for coronal gas observed in 1032 Å O VI line, based on filling factor $f_c = 0.1, 0.2, \text{ and } 0.4$, and on $n(T)$ power-law exponent $\eta = 0.0, 0.5, \text{ and } 1.0$; semicircles pointing down, intercloud gas observed in 21 cm H I line; semicircles pointing up and triangles pointing down, diffuse clouds observed in 21 cm H I line; triangles pointing up, dark clouds observed in 21 cm H I line; triangles pointing left, dark clouds observed in 2.6 mm CO lines; diamonds, Bok globules observed in 2.6 mm CO lines; squares, molecular clouds associated with nebulosity, observed in 2.6 mm CO lines; semicircles pointing left, H II regions observed in 6 cm H109 α line and 6 cm continuum.

Myers (1978)

加熱・冷却の過程(主要なもの)

- ガスは薄い(輻射がほぼ一様に入る)
- 衝突のタイムスケールが長い→(自発放射が効く)

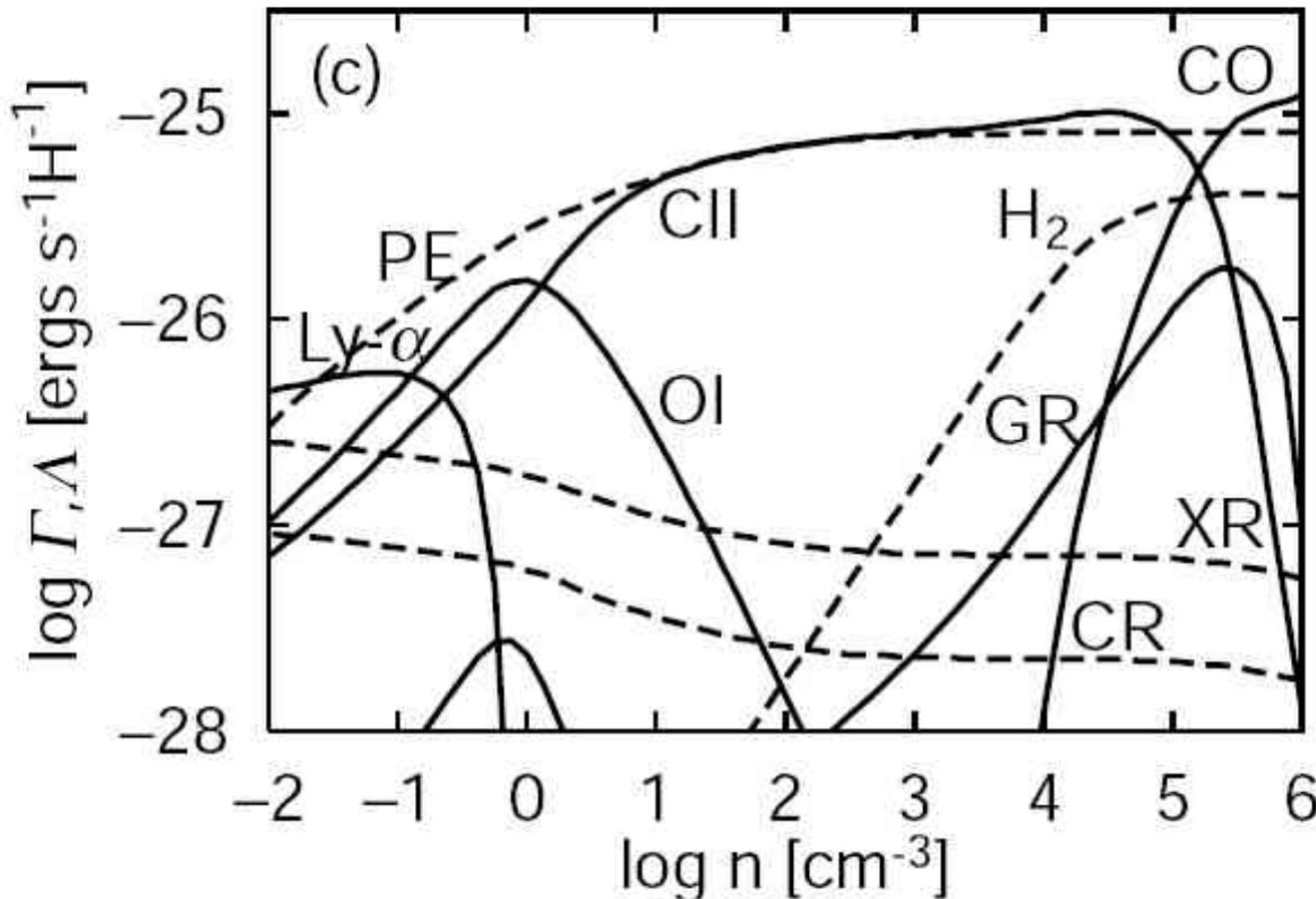
・加熱(Γ)

- ダスト(星間塵)の光電効果による加熱
ダストに紫外線が当たり、電子を放出
- 低エネルギーX線, 宇宙線による原子の電離

・冷却(Λ)

- 粒子同士が衝突、原子(分子)が励起状態に
→自発放射
結果的に、運動エネルギーが輻射として逃げる

加熱/冷却率 (atomic processes)



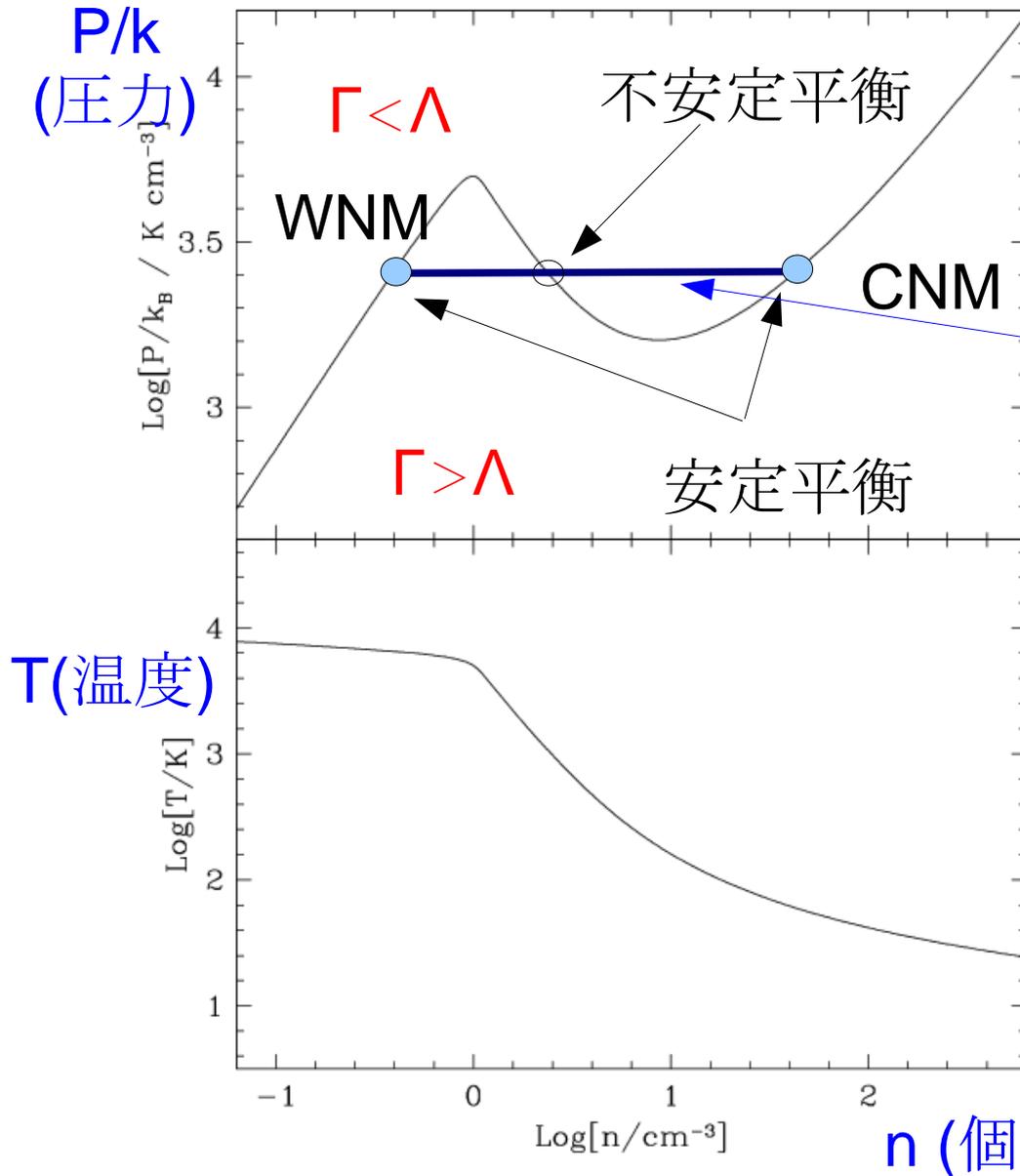
Koyama & Inutsuka (2000)

密度低いので、どこでも
加熱・冷却が起こる

しかし、乱流の普遍性を考えると、
原子物理の詳細によらない、定性的な理解が必要であろう
(無論、定量的には正しい値が必要だが)

熱不安定(thermal instability)

加熱(Γ) = 冷却(Λ)の系列をプロット



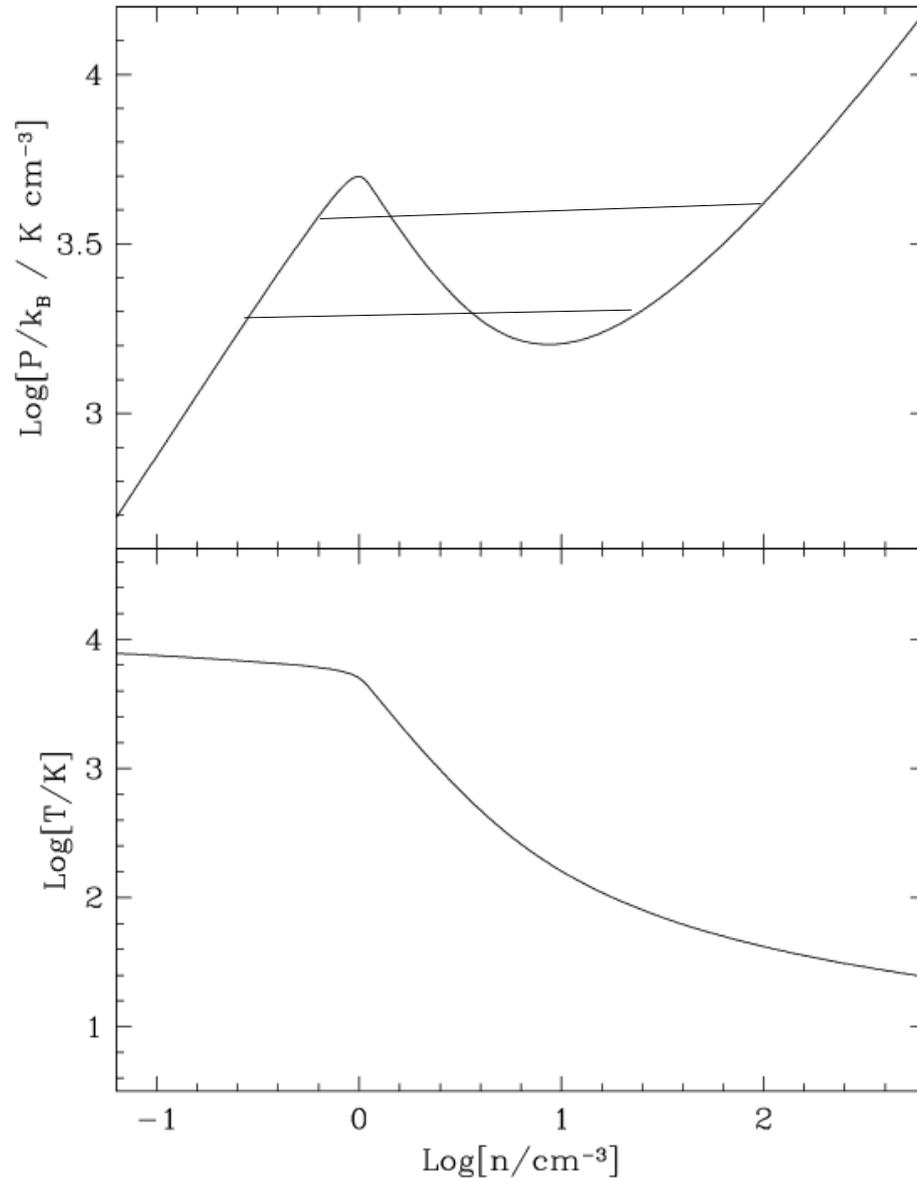
星間ガスの状態は、
WNM (Warm Neutral Medium) と
CNM (Cold Neutral Medium)
への相分離状態
→ 一種の相転移

∵ 圧力ほぼ一定

相間の界面の運動解き、
CNMドメインの成長を調べる

→ 反応拡散系のパターン形成問題
→ 結晶の成長過程と似ている

Koyama & Inutsuka's cooling function used

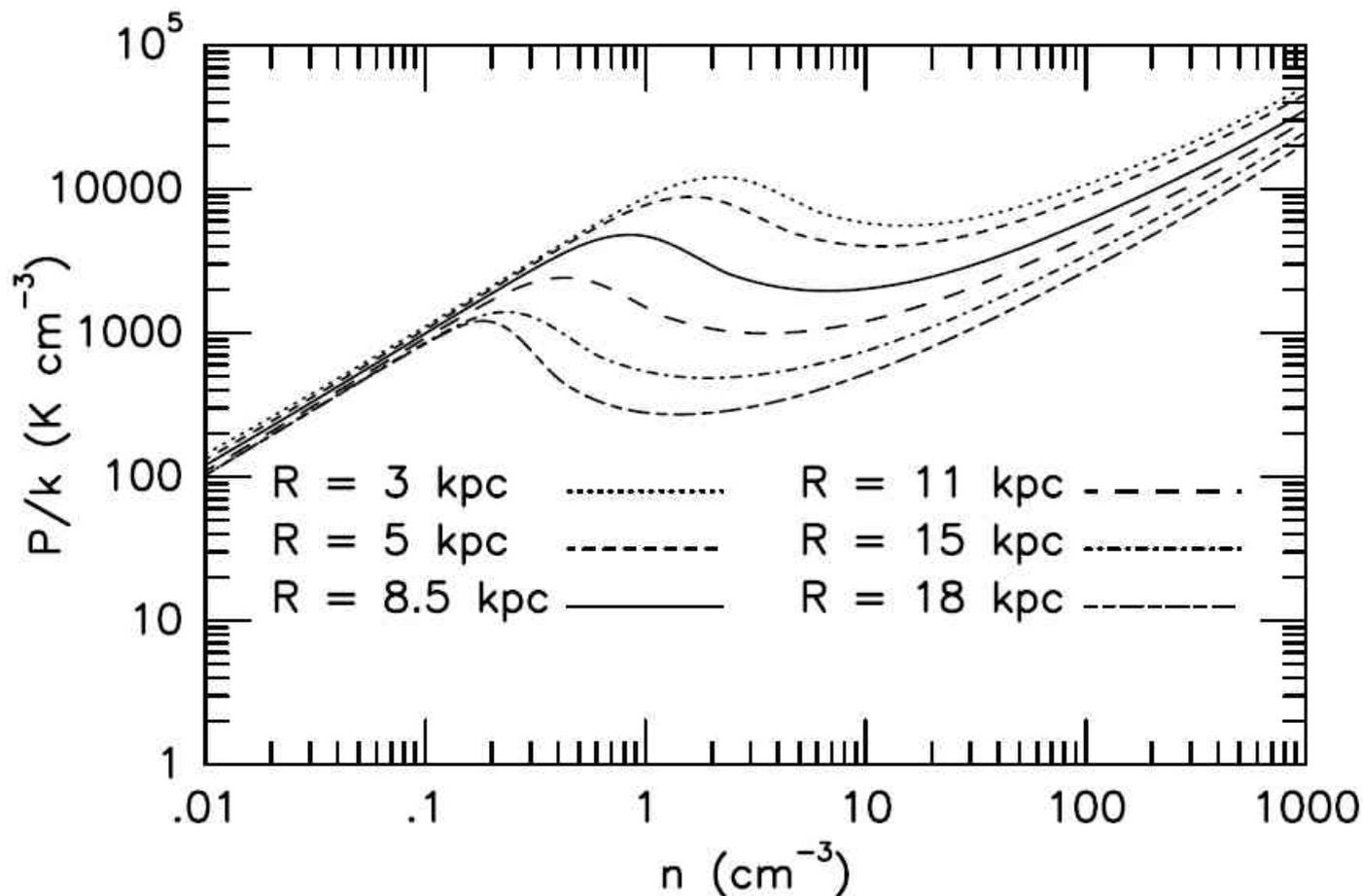


圧力が高いと冷却が勝つ
圧力が低いと加熱が勝つ

周囲の圧力により、
界面の運動が決まる

詳細な計算(Wolfire et al. 2003)

UV輻射強度やダスト、重元素量などによりカーブは変わる



薄いISMの物理状態

- 二相共存

 - Warm Neutral Medium

 - WNM ($T \sim 10^4 K$, $n \sim 10^{-1} cc$)

 - Cold Neutral Medium

 - CNM ($T \sim 10^2 K$, $n \sim 10^1 cc$)

- pressure balance

- optically thin

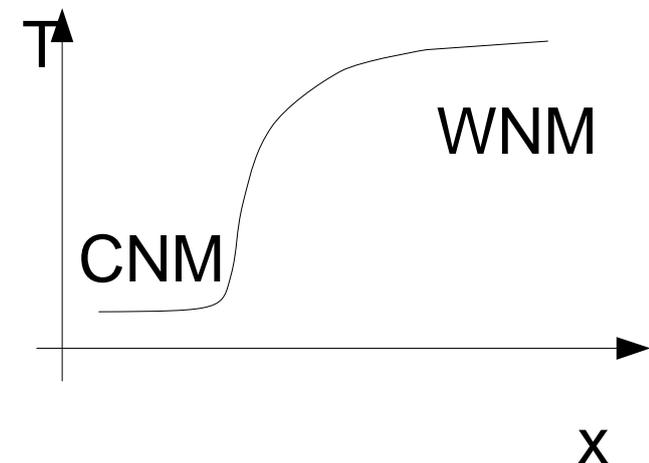
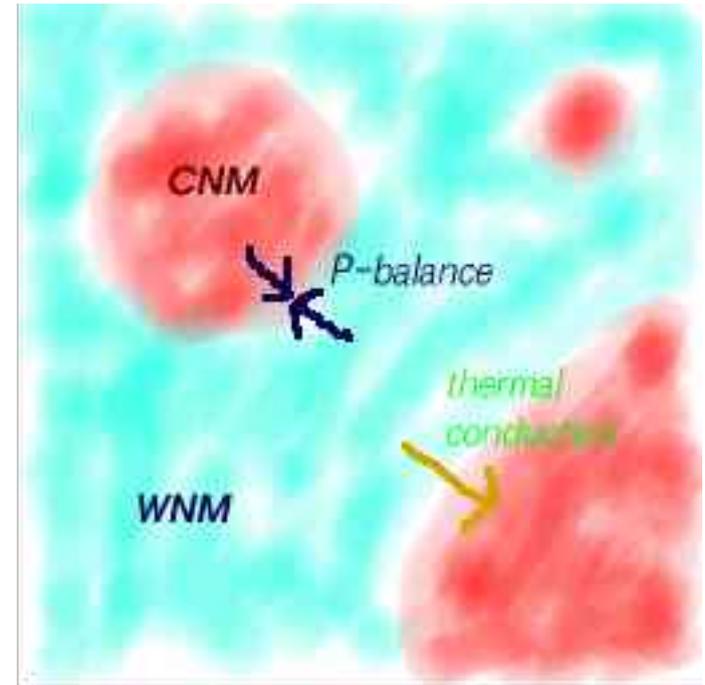
 - 外部と輻射を通じて
エネルギー散逸

- 自己重力は効かない

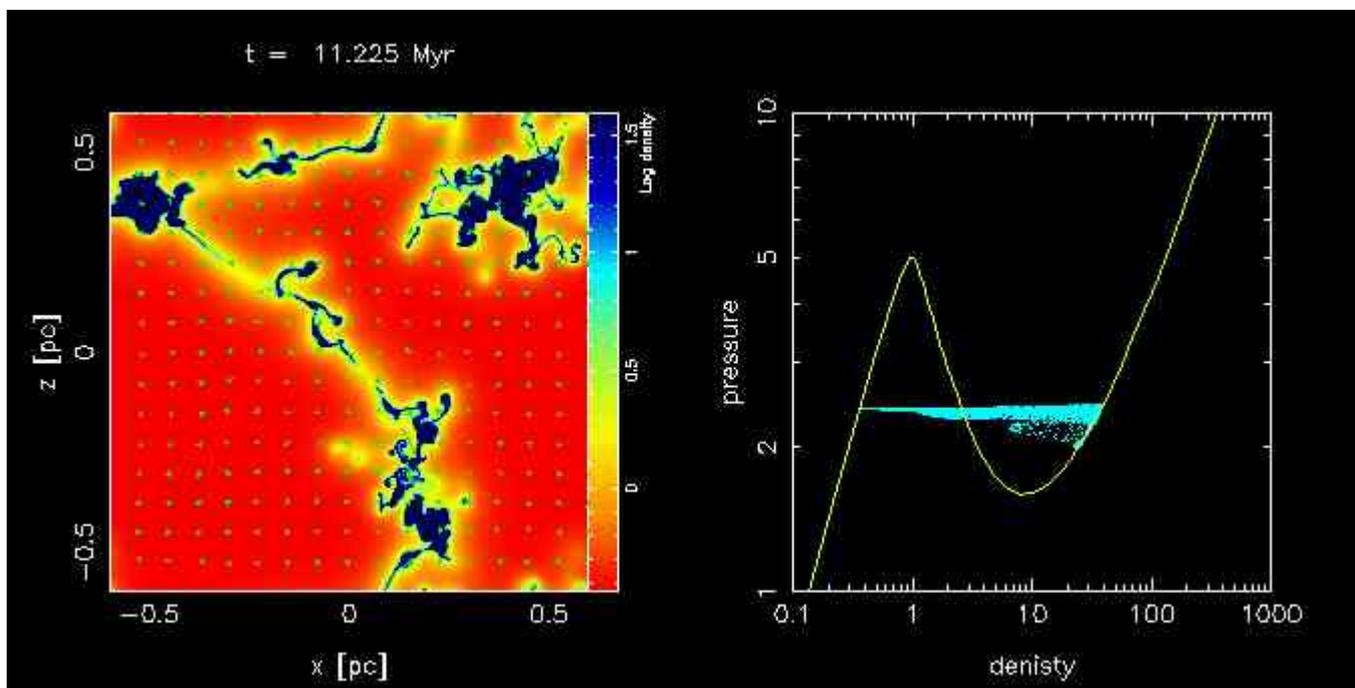
 - 自己重力のtime/length scales

$$\tau \sim 1/\sqrt{G\rho} \sim 1.2 \times 10^8 \left(\frac{n}{cc} \right)^{-1/2} yr \quad \sim \text{銀河回転}$$

$$l \sim 2 \times 10^3 \left(\frac{T}{10^2 K} \right)^{1/2} \left(\frac{n}{cc} \right)^{-1/2} pc \quad \text{銀河サイズ}$$



相分離を起こし、自発的乱流状態へ

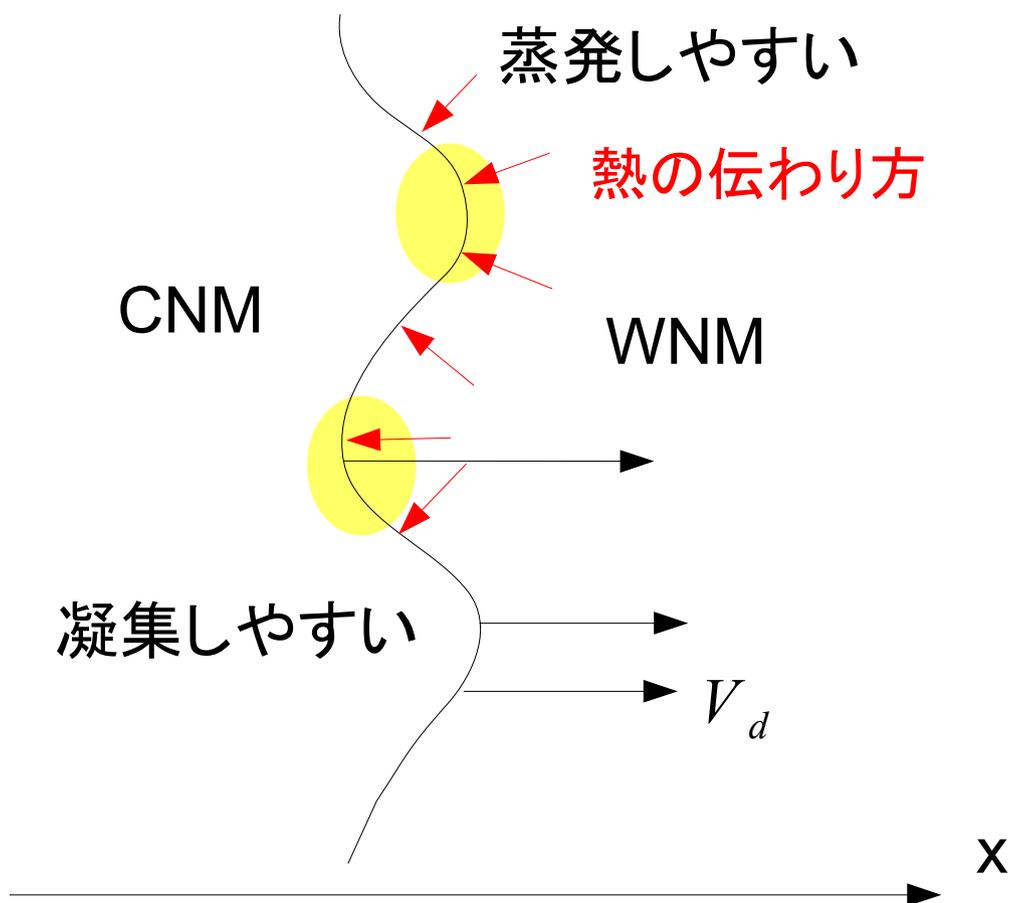


小山洋氏提供(現・Maryland大)

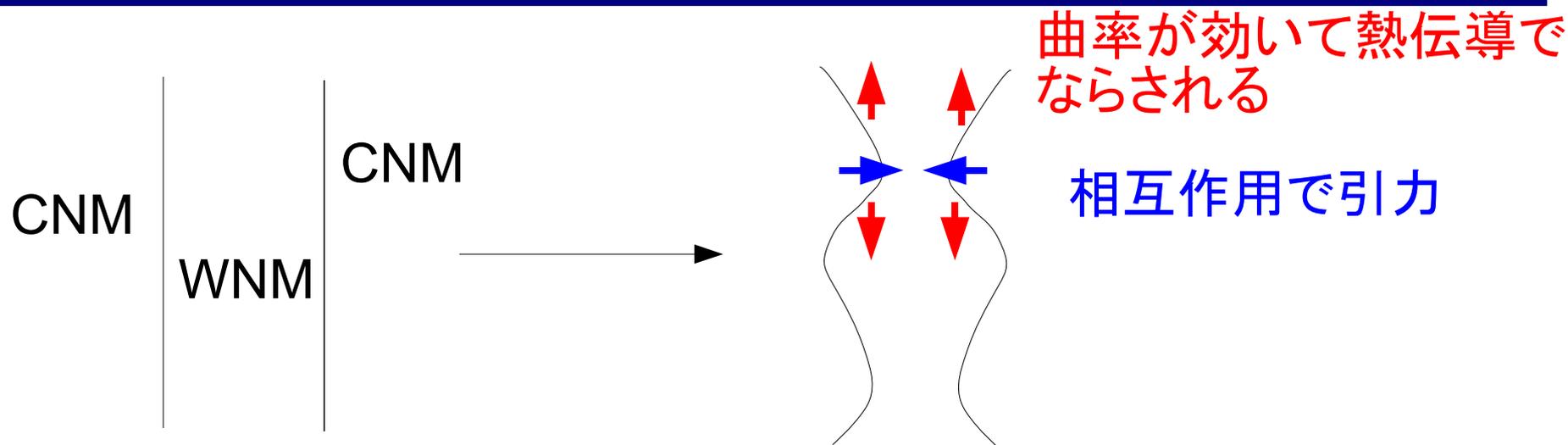
2次元以上でシミュレーションをやってみると、
どうも話はそう単純ではない

曲がった界面のダイナミクス

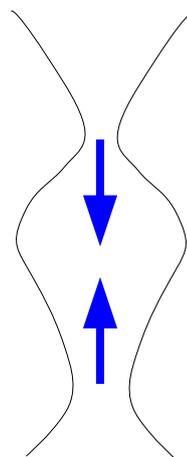
界面はまっすぐになろうとする



多次元の場合



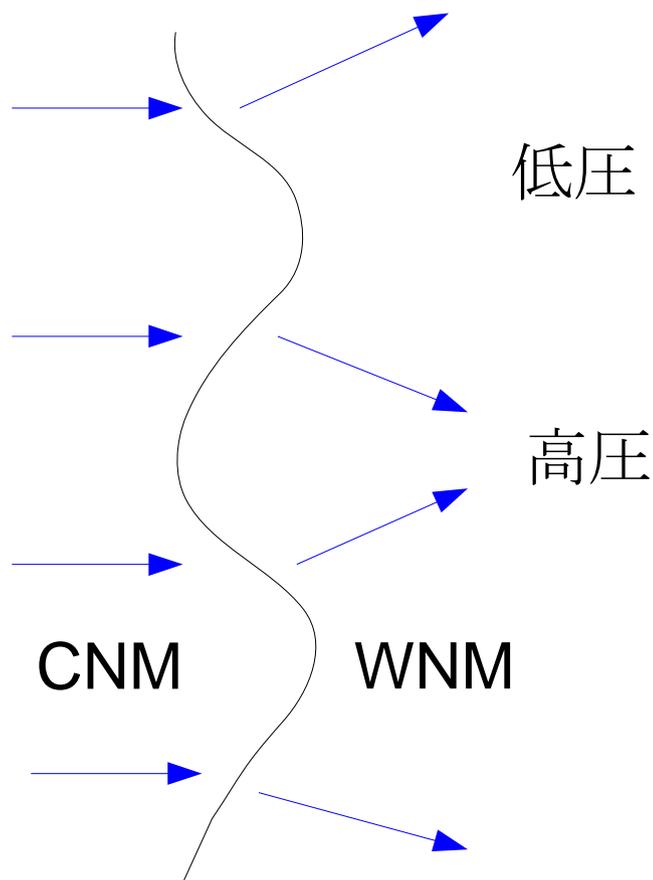
- ・接近した部分は、より強く引かれあうようになる
 - ・しかし、凸の部分は蒸発しやすくなって、まっすぐに戻そうとする
- この二つの兼ね合い



ある程度近づくと、一気に CNM になる
密度が3桁高いので、急激にガスが
流れ込む
慣性で運動が生じる？
(2Dと3Dでも違うかも)

※まだ個人的仮説の段階

燃焼波面の不安定性と同じ？



あるいは、もしかしたら、「燃焼波面」と似たプロセスかも？

→ ロウソクの炎が揺らめくのと同じ

数値解析は結構大変

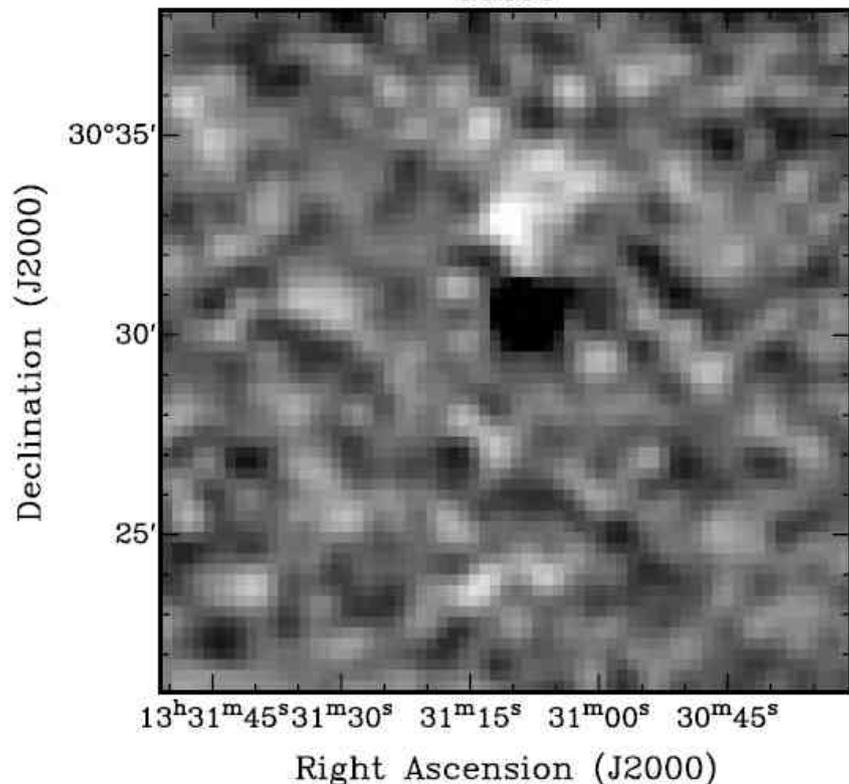
(Inoue, Inutsuka & Koyama 2006)

観測によるチェック？

今までの計算は純粋に理論的：どこかでチェックできないか？
→ 最近発見された“Tiny HI Clouds”が使える

Velocity: -28.90 km/s

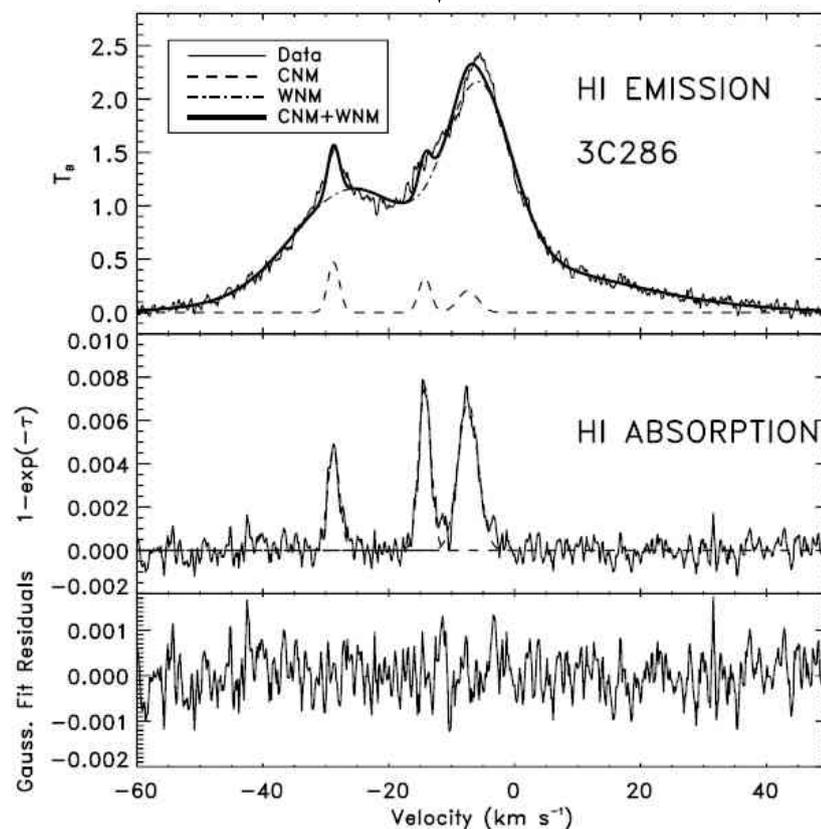
3C286



sub-pc ($\sim 0.01 \text{ pc}$)の構造、
 $N \sim 10^{18} / \text{cm}^2$

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

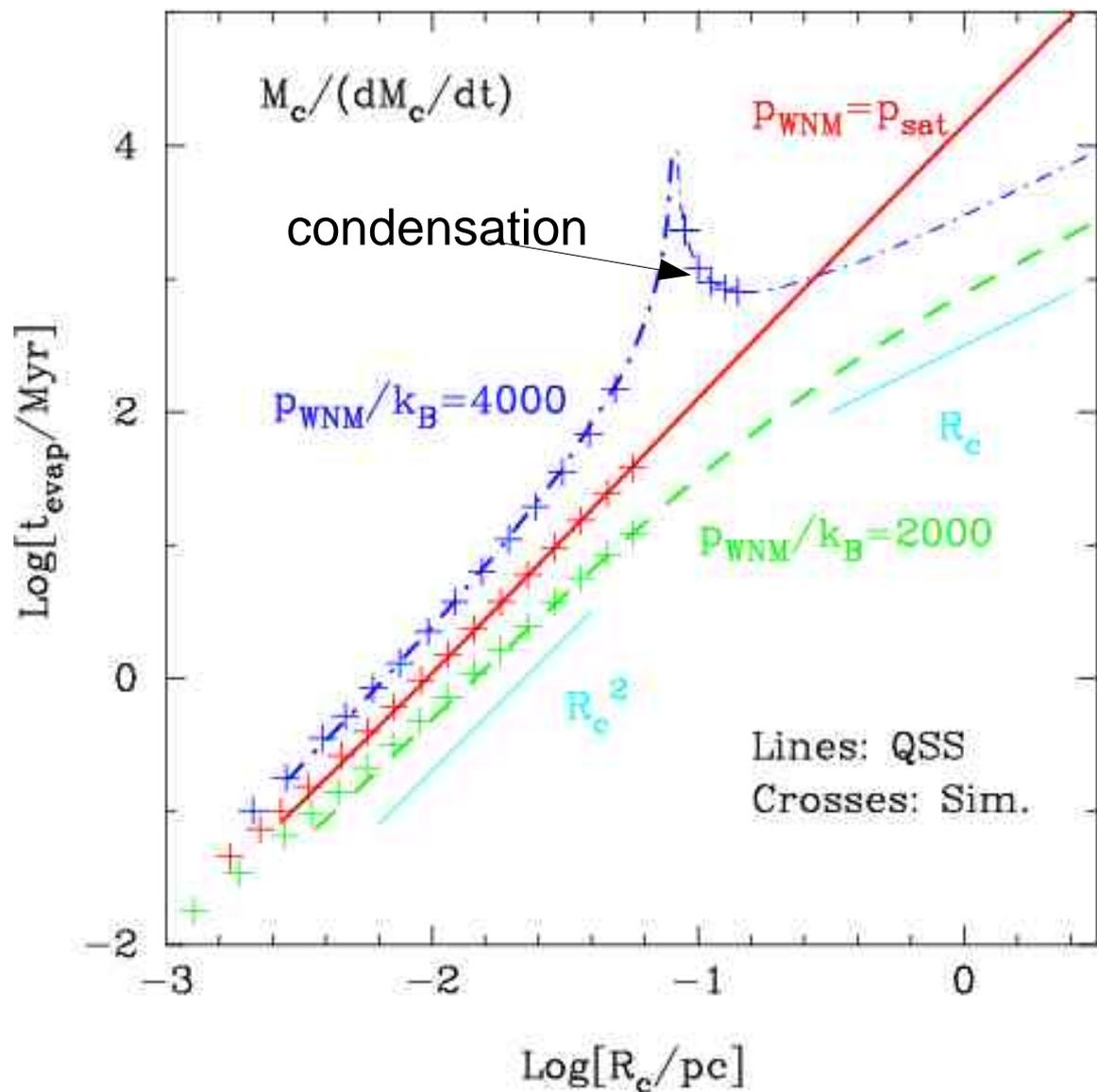
0.15pc@100pc



今後観測が増えれば、希薄なガスの
状態を理解する手がかりになる
→ 分子雲形成のスタート地点としても重要

蒸発のタイムスケール

$R \sim 0.01 \text{ pc}$ の雲は100万年程度で蒸発する



もしこのような雲が普遍的に存在するなら、100万年程度で常に作り続けなければならないことを意味する

Nagashima, Inutsuka & Koyama (2006)

星間ガス雲についてのまとめ

- 星間ガスは、星の誕生と終末に関わっている
- 次の世代の星への架け橋である
- しかし、まだまだ謎なことが多い
 - 今回ご紹介したのも、まだまだ仮説の段階。今後、じっくり検証していく必要がある