

# 天体核物理学II

細川 隆史 (天体核 5号館536)

hosokawa@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp

2021.10.10

# 天体核物理学I(前期): 星の進化

by 井岡さん(基研)

1. 宇宙の階層構造
2. 自己重力系の力学平衡
3. ビリアル定理
4. 自由落下時間と  
Kelvin-Helmholtz 時間
5. 核融合
6. 元素合成
7. エネルギー保存
8. 放射輸送
9. 対流
10. 状態方程式
11. Opacity
12. ポリトロープ
13. 主系列星
14. 数値計算
15. 太陽ニュートリノ
16. ヘリウム燃焼
17. 林トラック
18. チャンドラセカール質量
19. 白色矮星
20. 中性子星
21. ブラックホール

# 天体核物理学II (後期): 星間物理学と星形成

+ 星=もっとも基本的な天体

いかに形成されるのか、現在の標準的な理解を学ぶ

+ 星間物質(ISM: interstellar medium)=星形成の舞台

星間物質の構造、進化(循環)は星形成過程を制御している。  
これらの性質、標準的描像を学ぶ

+ 星形成 = あらゆる天体形成論の基本

銀河形成、惑星形成、BH形成 etc....

星形成・星間物理学を学ぶことにより、これらに共通して  
現れる放射過程、化学過程、gas/dust dynamics等を学ぶ

# 天体核物理学?



星・惑星形成は林忠四郎研  
(1957~)以来の主テーマの一つ

- + 林トラック (前主系列段階)
- + 惑星形成の京都モデル

日本のこの分野の研究者  
(孫弟子以下を含)も数多く輩出

# 天体核物理学II(後期): 星間物理学と星形成

❖ 全12回(予定)

60~70%: ISM、30~40%: 星形成

時間があれば:

初期宇宙での星(+ブラックホール)形成、惑星形成など

❖ 成績

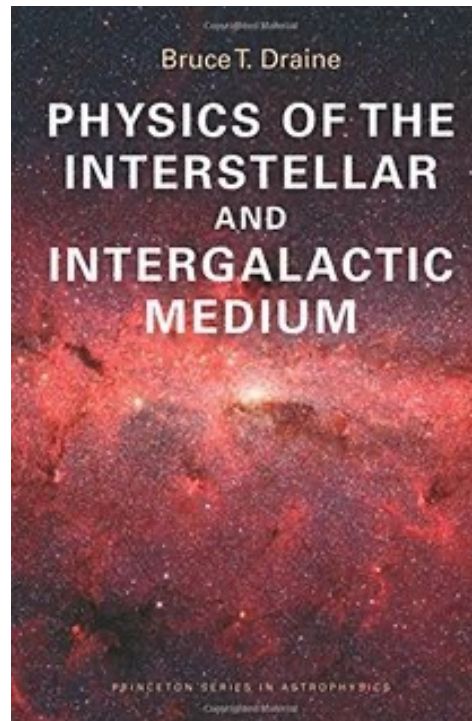
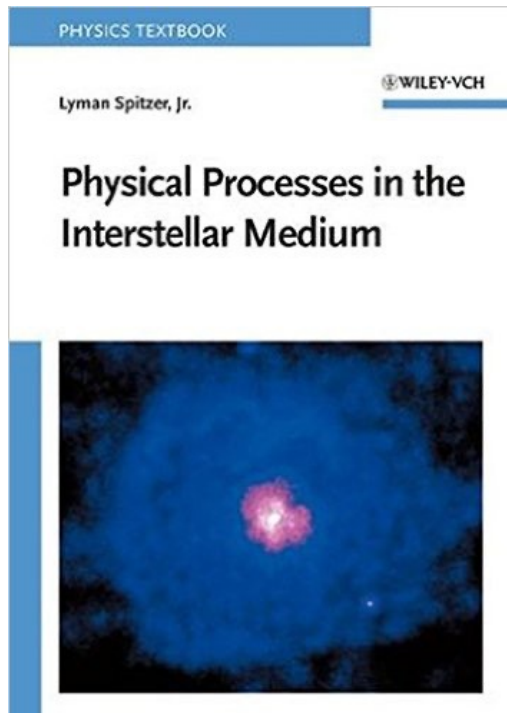
出席: 20%、授業中の質問: 40%、レポート: 40%

❖ スライド: ~30% + 板書: ~70%

# 1. ISM: Overview

# 参考文献 (ISM中心)

- + L. Spitzer Jr. “Physical Processes in the Interstellar Medium” (1978)
- + B. Draine “Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium” (2011)
- + シリーズ現代の天文学6 “星間物質と星形成” (2008) など



# 銀河系 “The Milky way”

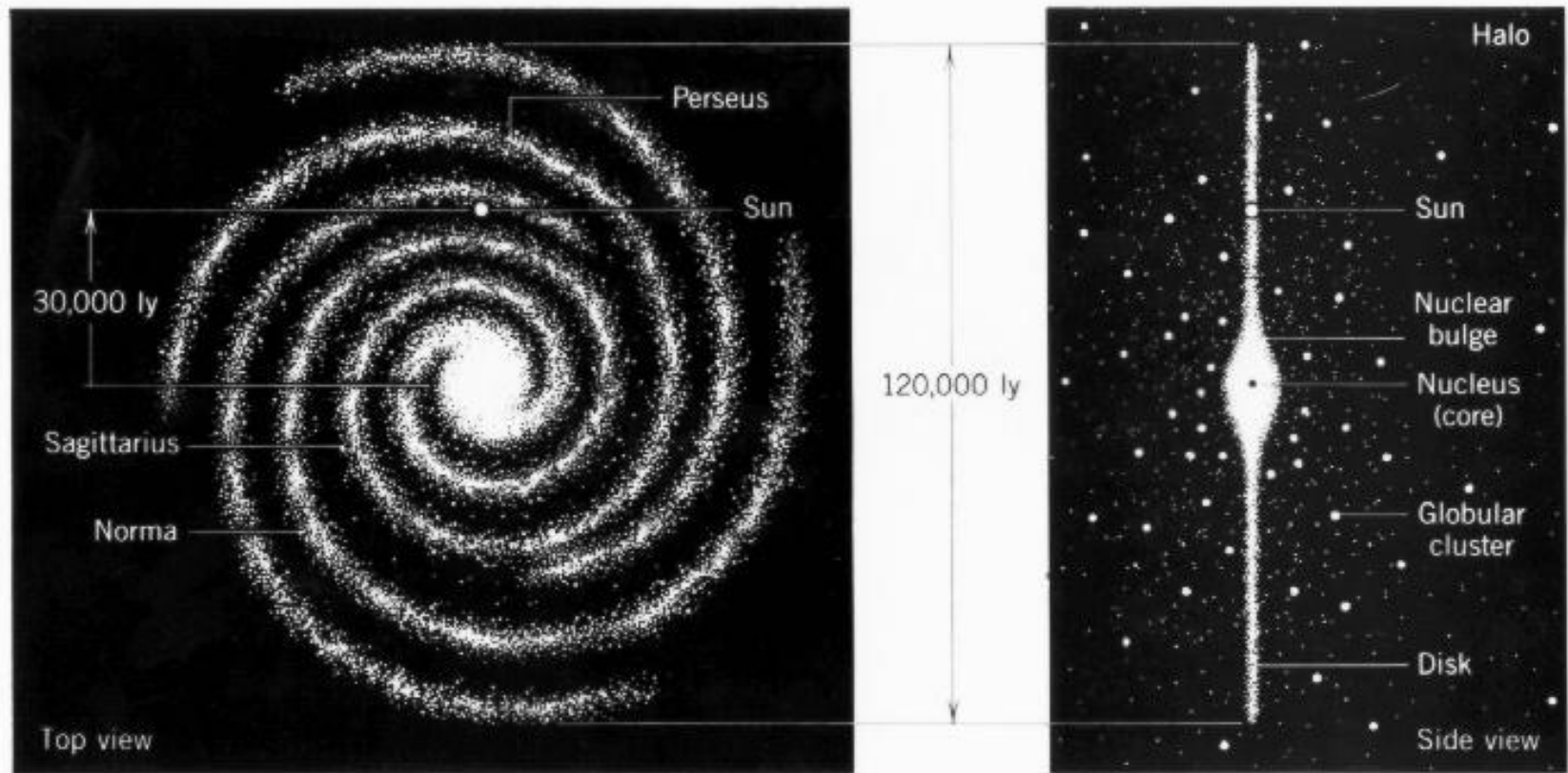


星形成・星間物質の観測研究はこれまでほぼ銀河系を対象にしてきた



# The Structure of Milky way (星の分布)

Copyright © 1991 by John Wiley & Sons, Inc. — Zeilik/Astronomy 6E Fig 18-2



Schematic model of the Milky Way Galaxy showing its main features: nucleus, halo, and disk.

銀河円盤半径 ~ 10 kpc

# 恒星の数と質量

## 初期星質量関数 (Initial Mass Function)

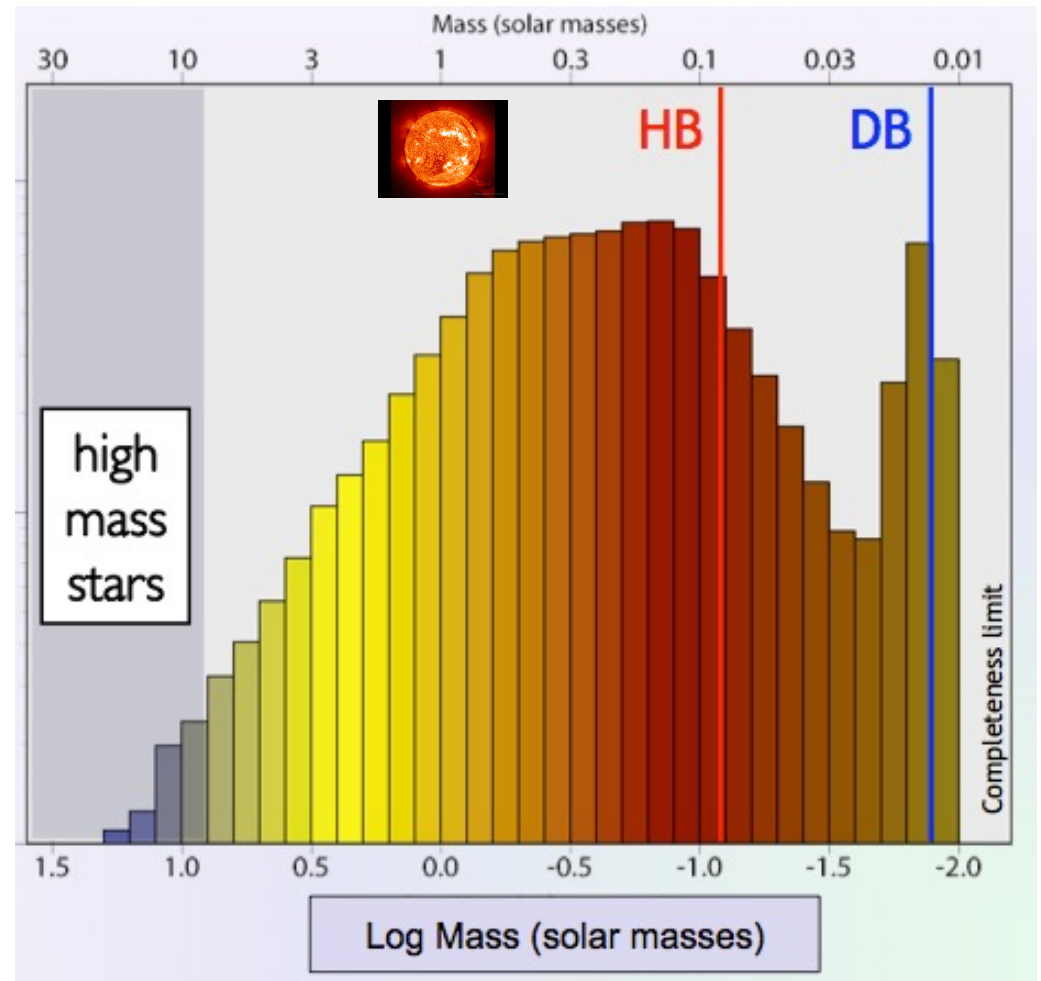
$M > 1M_{\odot}$  の分布

$$dN/dM \propto M^{-2.35}$$

$M \sim 1M_{\odot}$  : 低質量星

$M > \sim 10M_{\odot}$  : 大質量星

いろいろな質量の星があるが、  
大半の星は低質量星



(Muench+01)

IMFの起源はこの分野の最大の未解決問題のひとつ

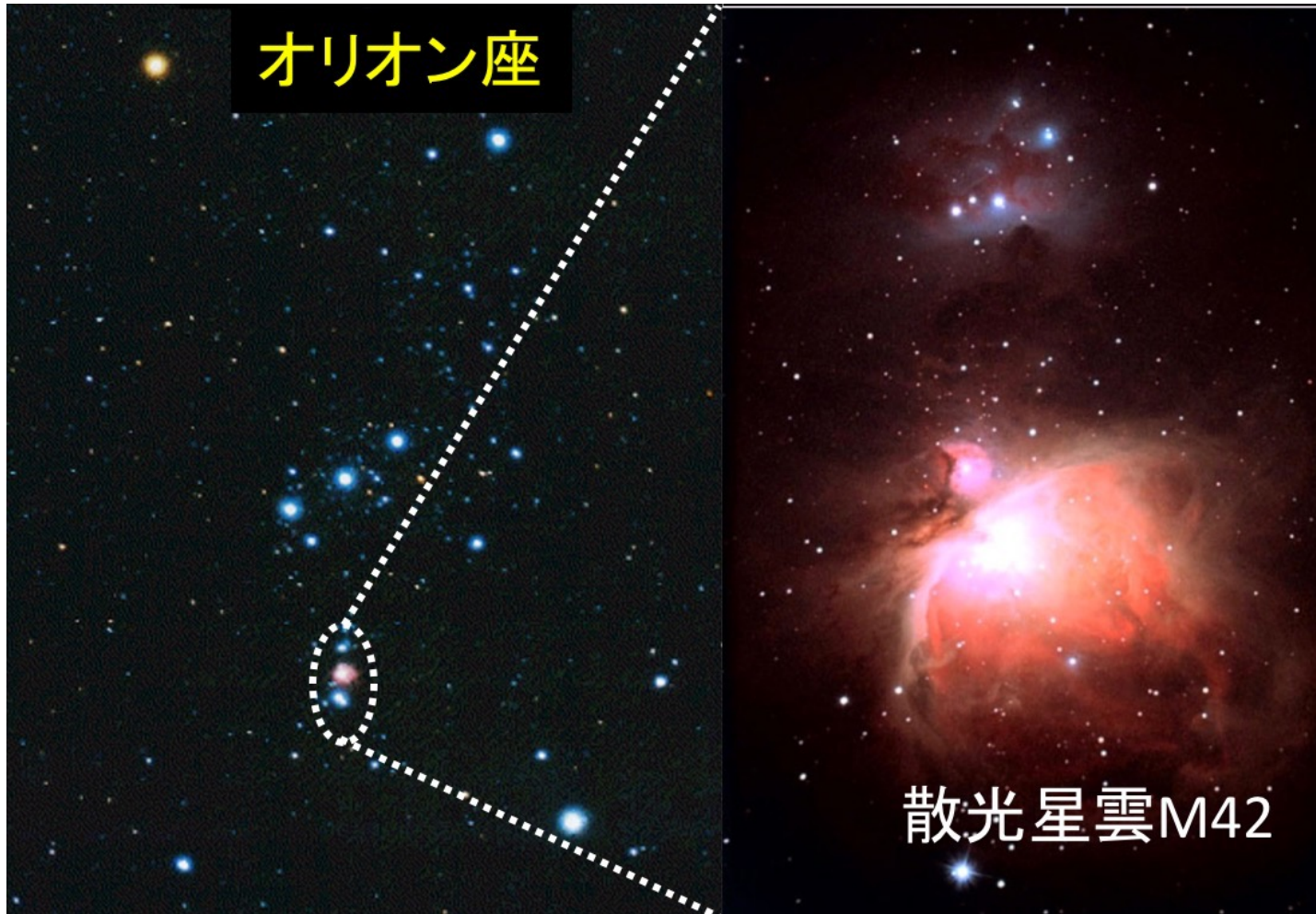
# 低質量星 v.s. 大質量星

| Mass Range  |     |
|-------------|-----|
| $M_{\odot}$ | 個数比 |
| 0.5 - 1     | 700 |
| 1 - 2       | 274 |
| 2 - 4       | 108 |
| 4 - 8       | 42  |
| 8 - 16      | 17  |
| 16 - 32     | 6.5 |
| 32 - 64     | 2.5 |
| 64 - 128    | 1   |

だいたい $1M_{\odot}$ くらいの星1000個に対して、 $100M_{\odot}$ の星1個の割合

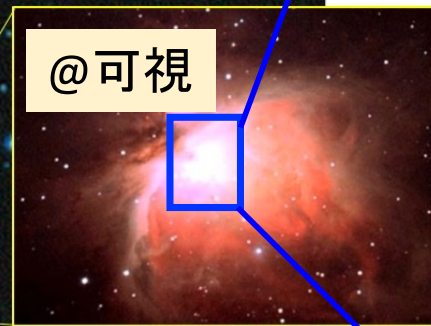
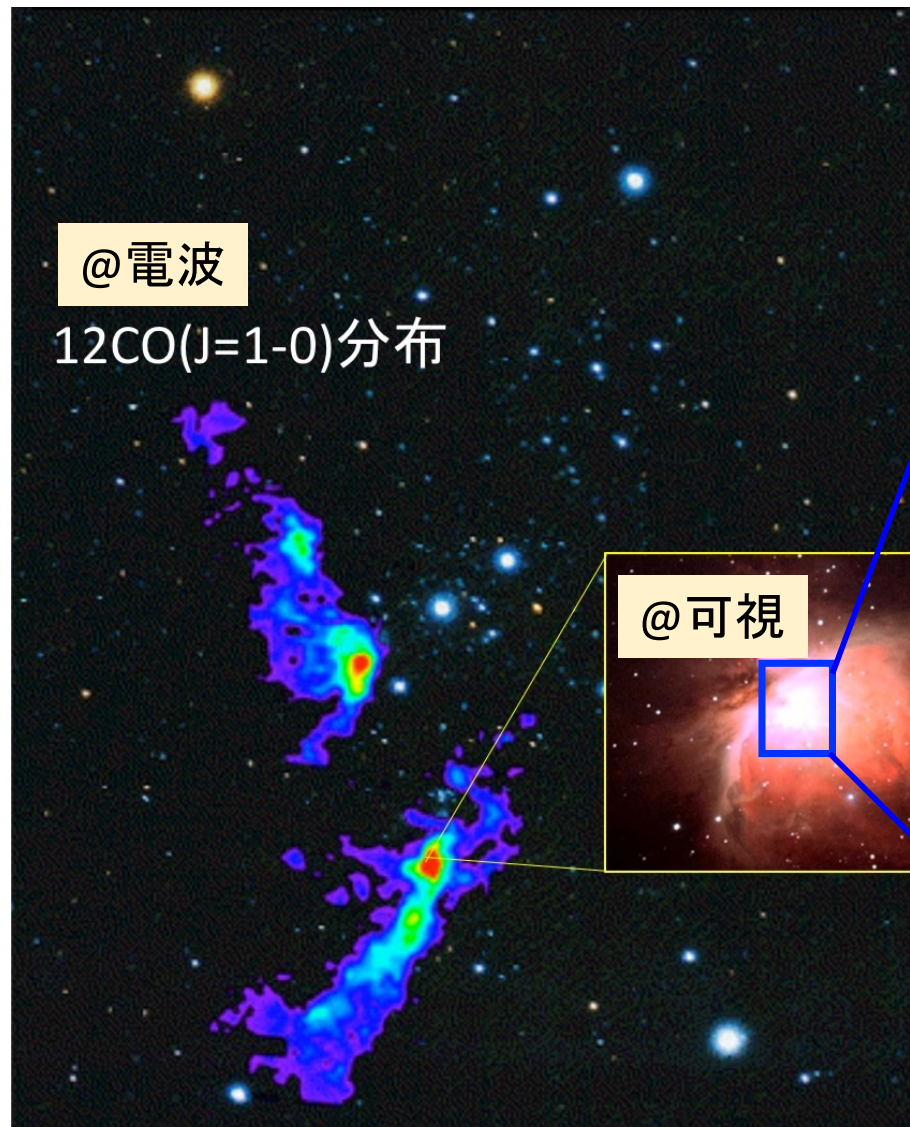
# 星はどこから来たのか？

太陽のような星も、その周りの惑星も、どこかで今日も生まれている



このもやっと光っている部分は何？

# オリオン座：隠された姿



生まれたばかりの星の集団が  
まわりのガスを照らしている

星の材料になる低温希薄ガス

# 目で見える星間ガス

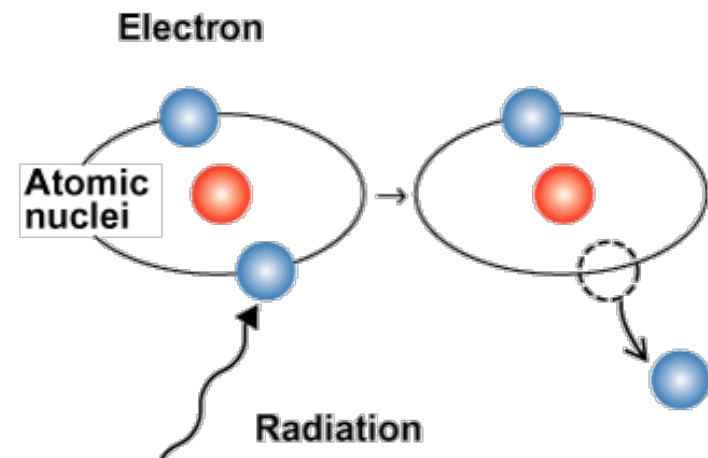
+ 例) メシエ・カタログ (1787)  
彗星と紛らわしい可視天体。  
(※系外銀河なども含む)

+ ガスがちょうど可視光で光るには  
→ 例えば近くの光源により加熱

星からの紫外光(>13.6eV)によって、  
水素ガスが電離： $H + \gamma(\text{光子}) \rightarrow H^+ + e$

これによって光電離領域ができる。  
電離ガス温度： $T \sim 10^4\text{K}$

再結合放射の一部が可視へ(e.g.,  $H\alpha$ )



(光子のエネルギー) - (結合エネルギー)  
の余りがガスの運動エネルギーとなって加熱

# 電離ガスの呼び方

中性ガスにI、一階電離ガスにII、二階電離ガスにIII...をつけて呼ぶ

例) 中性水素ガス: HI (エイチワン)、

電離水素ガス: HII (エイチツー)、水素電離領域=HII領域

HeIII(ヘリウムスリー)、CII (シーツー) ...etc.

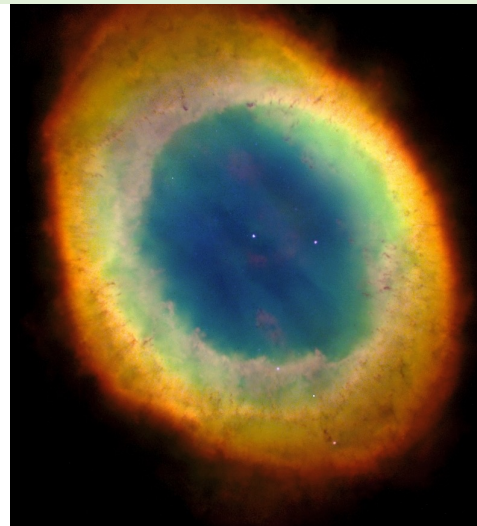
+ 電離光子を大量に放射する大質量星のまわりには孤立したHII領域  
(古典的HII領域:  $\sim$  pc scale)

+ 進化の進んだ低質量星(white dwarf)周囲にもHII領域 ← 惑星状星雲

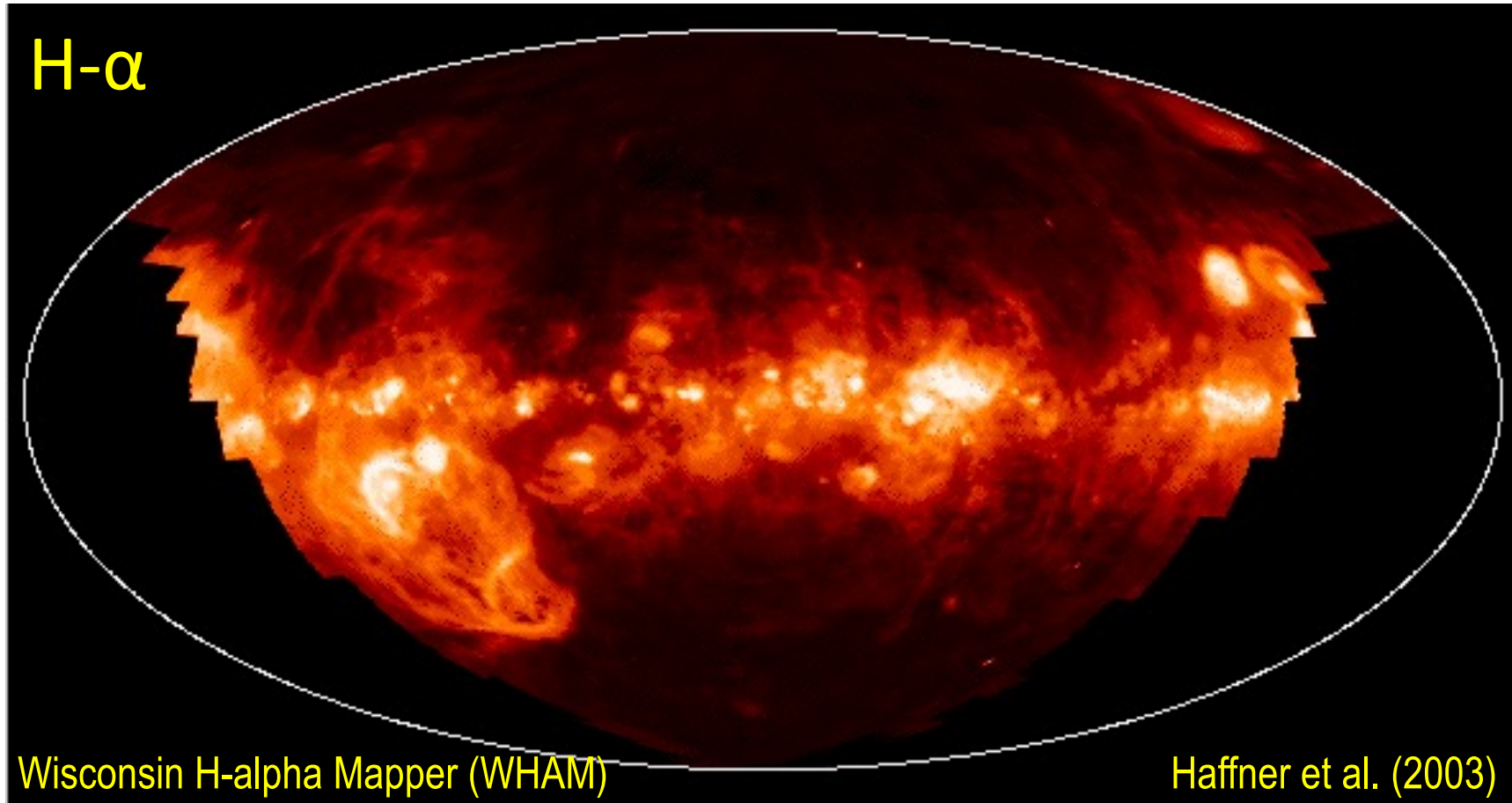
三裂星雲 M20 (around O-star)



Ring nebula M57 (around WD)



# Warm Ionized Medium (WIM)

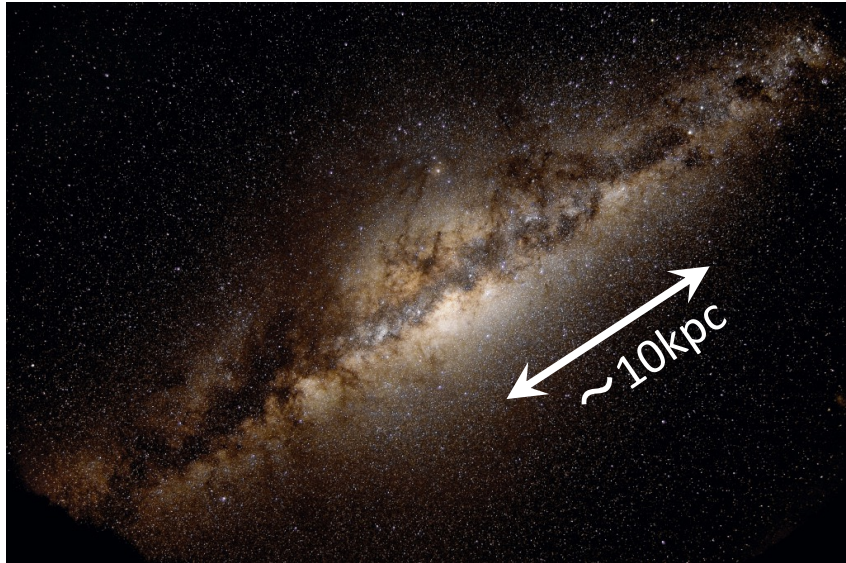


電離ガス(H<sup>+</sup>)の90%以上は孤立した電離領域ではなく、銀河面に広がって分布。

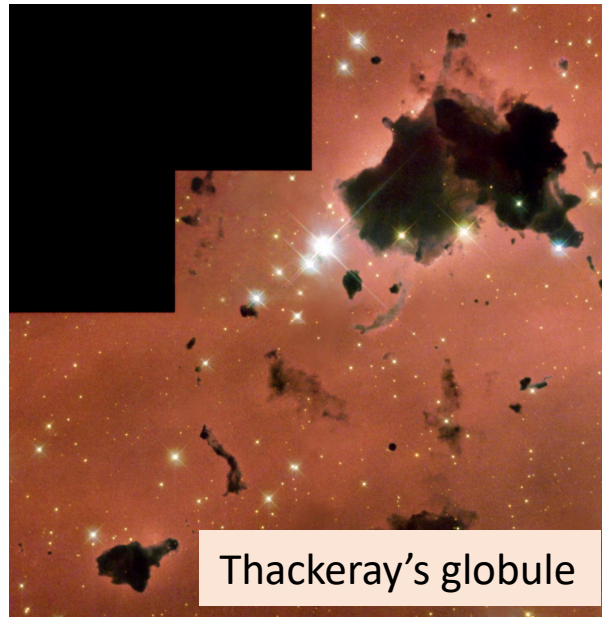
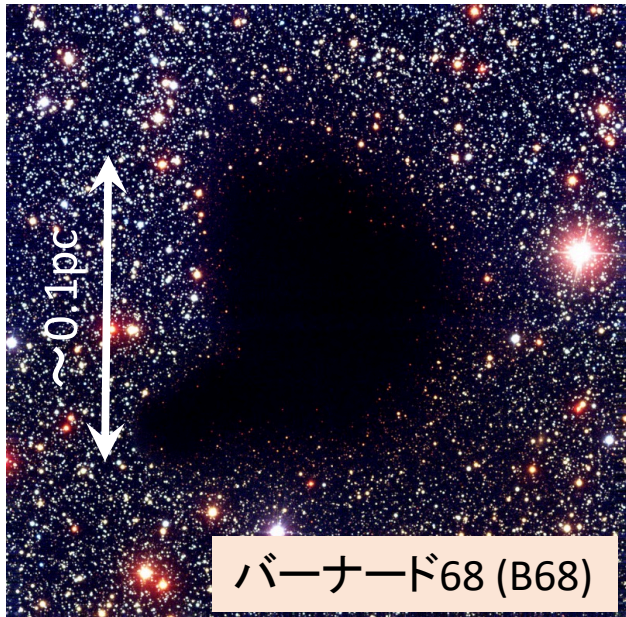
密度 :  $n \sim 0.1/\text{cc}$ 、温度 :  $T \sim 10000\text{K}$



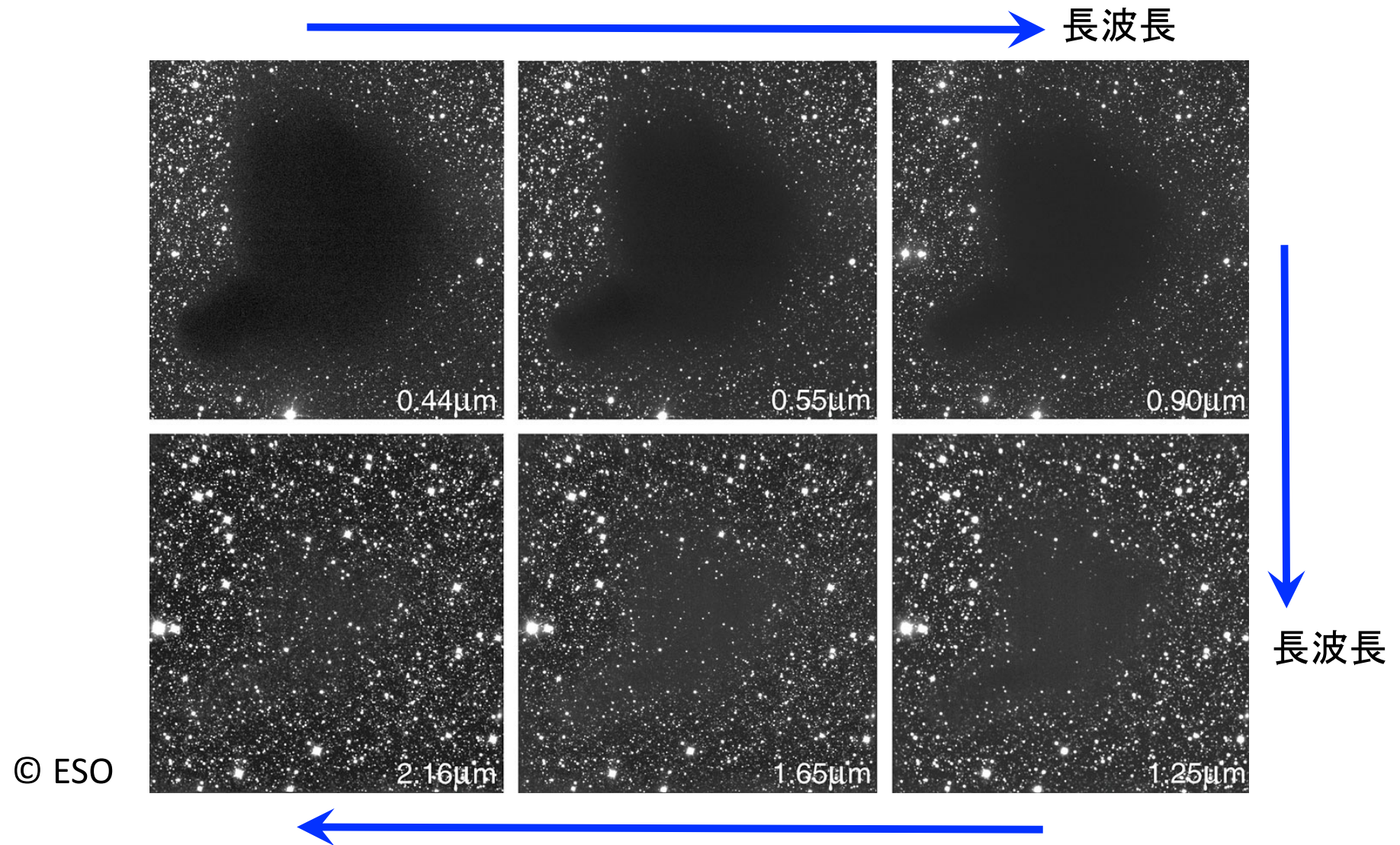
# Dark Nebula



- + 銀河面には星の数が周囲より少なく、黒い”穴”のように見える領域がある
- + カタログ: Barnard (20C初頭), Bok (20C半ば)
- + 小スケール( $\sim 0.1\text{pc}$ )の構造はglobuleと呼ばれ、明るいHII領域を背後にしばしば観測される



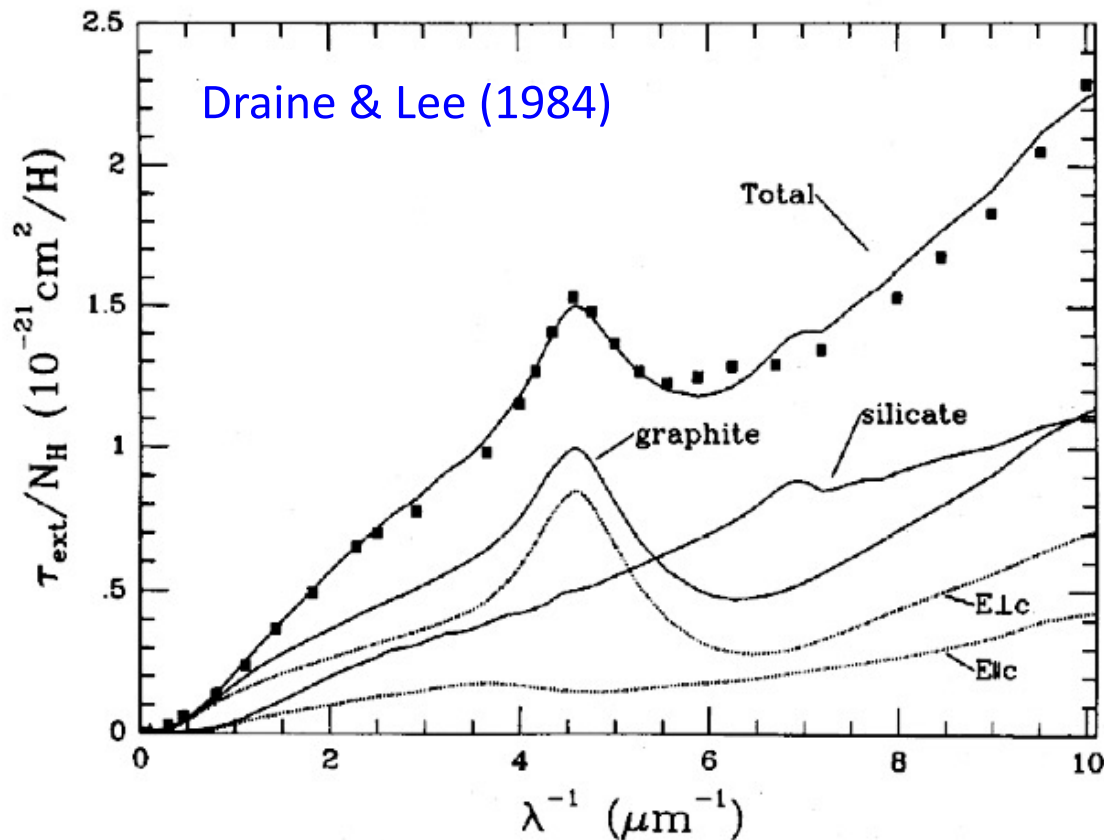
# 星間減光の波長依存性



波長が長くなるほど減光が弱まり、背後の星が現れることが分かる

# 星間ダスト

ガス中に含まれる $\mu\text{m}$ サイズの固体微粒子(ダスト)が星間減光を引き起こしている



短波長ほど大きな減光  
(赤化)

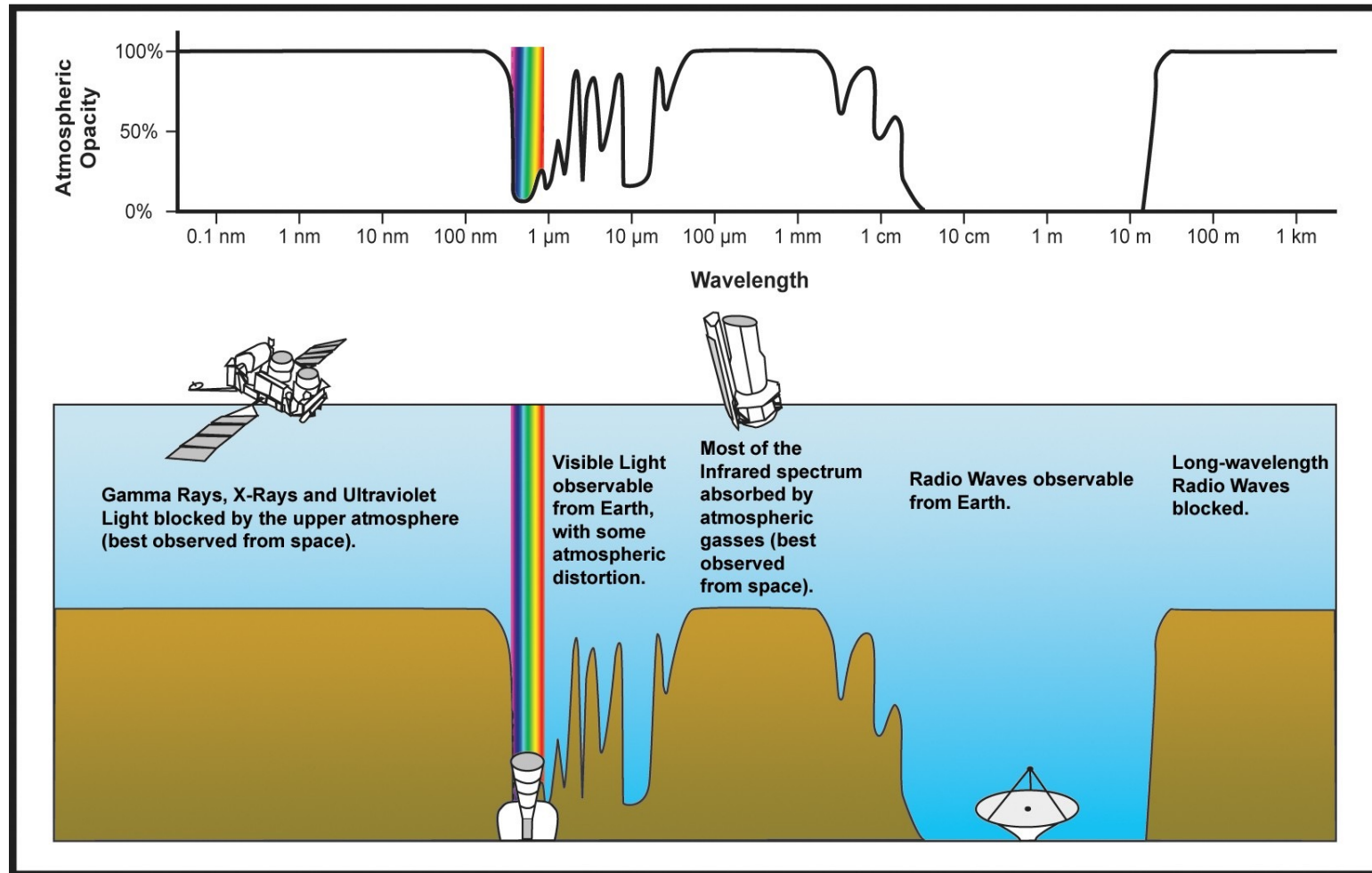
組成・サイズの異なるダスト粒子が  
寄与して減光曲線の波長依存性  
が生じている

サイズ分布:  $dN/da \propto a^{-3.5}$

ダスト/ガス質量比 $\sim 1/100$

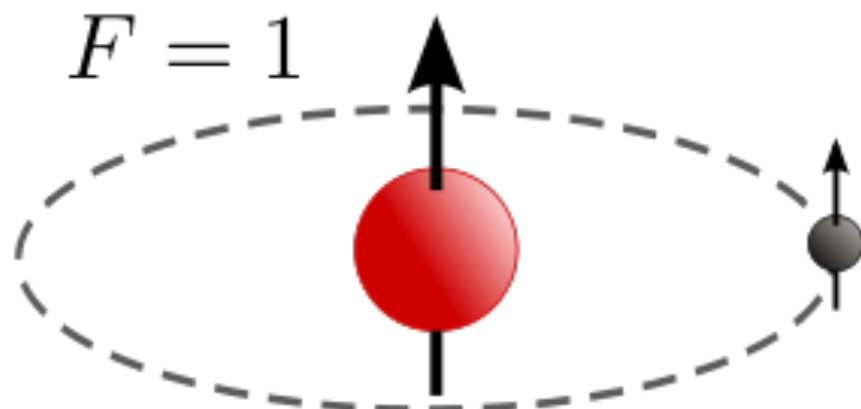
ダストは星形成・星間現象の様々な局面で重要な役割を果たす

# Atmospheric Transparency



可視以外では、電波域(特にcm波以上)に地上観測の窓が開いている

# HI 21cm emission



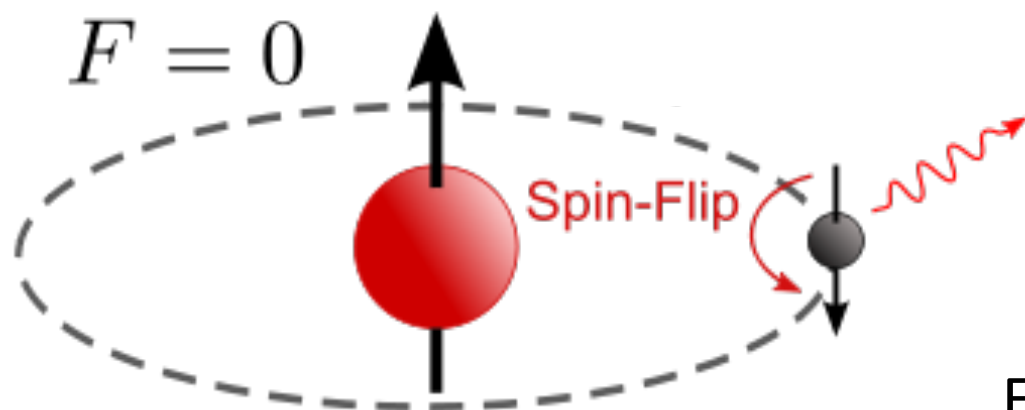
陽子、電子スピン

同じ向き (励起)

反対向き(基底)

波長 : 21.1061 cm

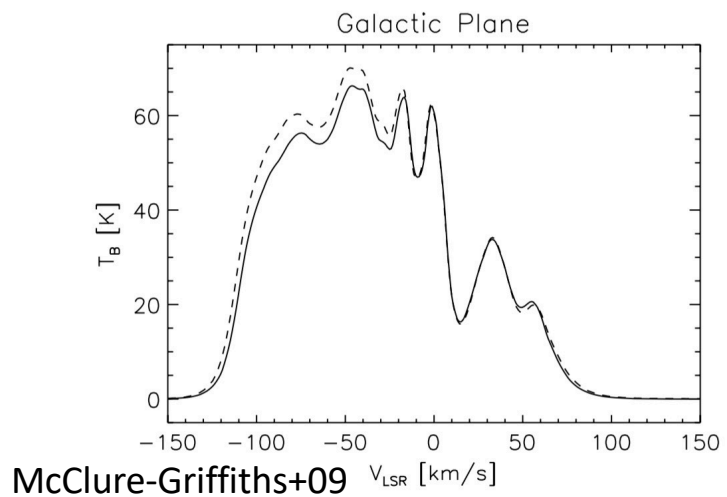
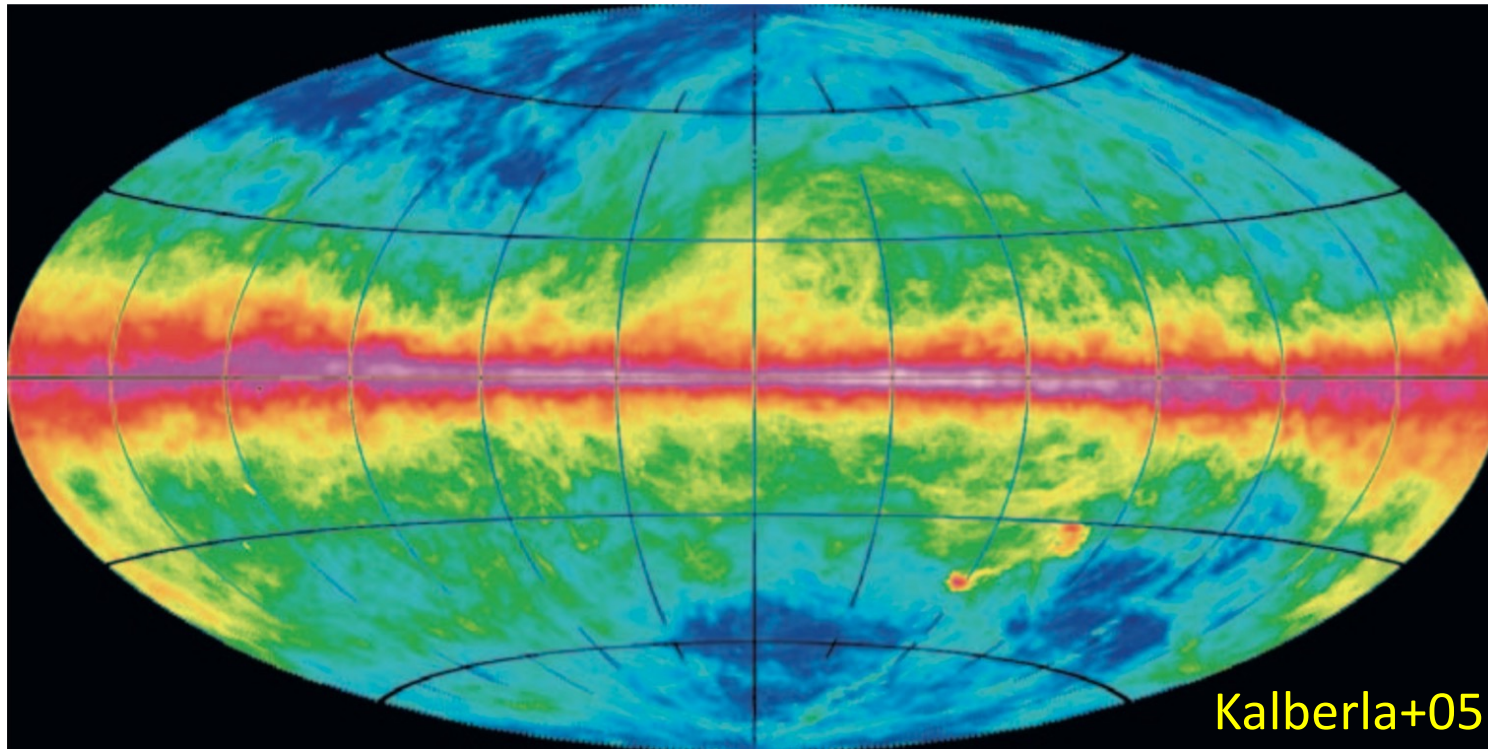
振動数 : 1420.4056 MHz



電波域の観測によって  
宇宙にある中性水素ガス  
を探查できる

Ewen & Purcell, Muller & Oort  
(1951)によって初観測

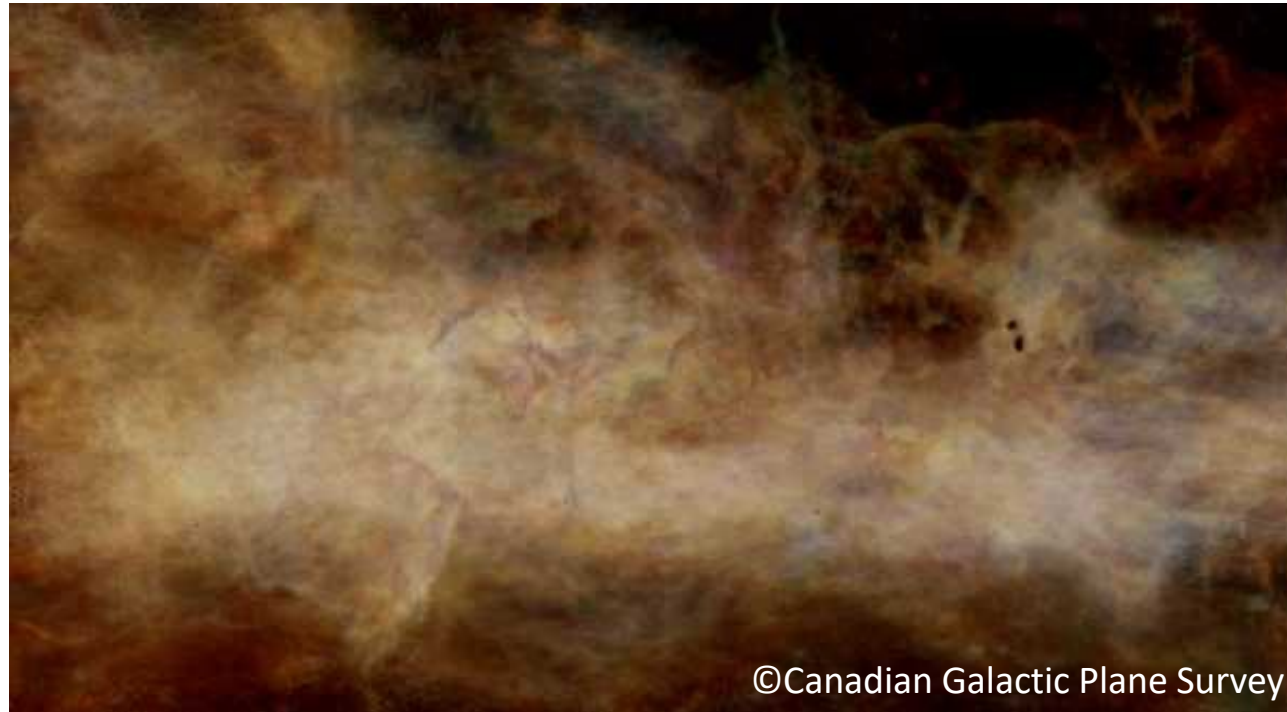
# HI全天MAP



- + 輝線なのでガスの視線速度に応じて左図のようにDoppler shiftしたものが観測される
- + 上図では $-400\text{km/s} < v < 400\text{km/s}$ の速度域で積分

# 2-phase HI Medium

21cm emission 銀河面channel map(ある速度でのsnapshot)

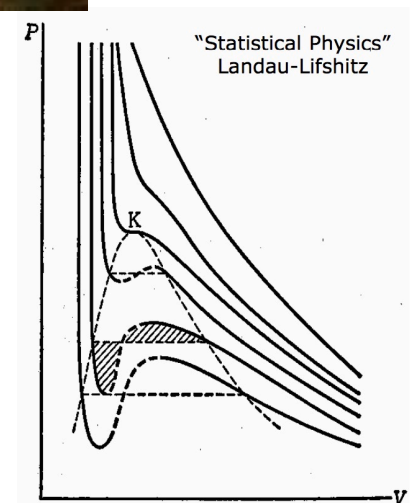


+ 温度、密度は一様でない。大まかに

Cold Neutral Medium (CNM) ;  $n \sim 10/\text{cc}$ 、 $T \sim 100\text{K}$

Warm Neutral Medium (WNM) ;  $n \sim 0.1/\text{cc}$ 、 $T \sim 10000\text{K}$

の2相に分かれている。ほぼ同圧力下にある。



# Where are colder gases?

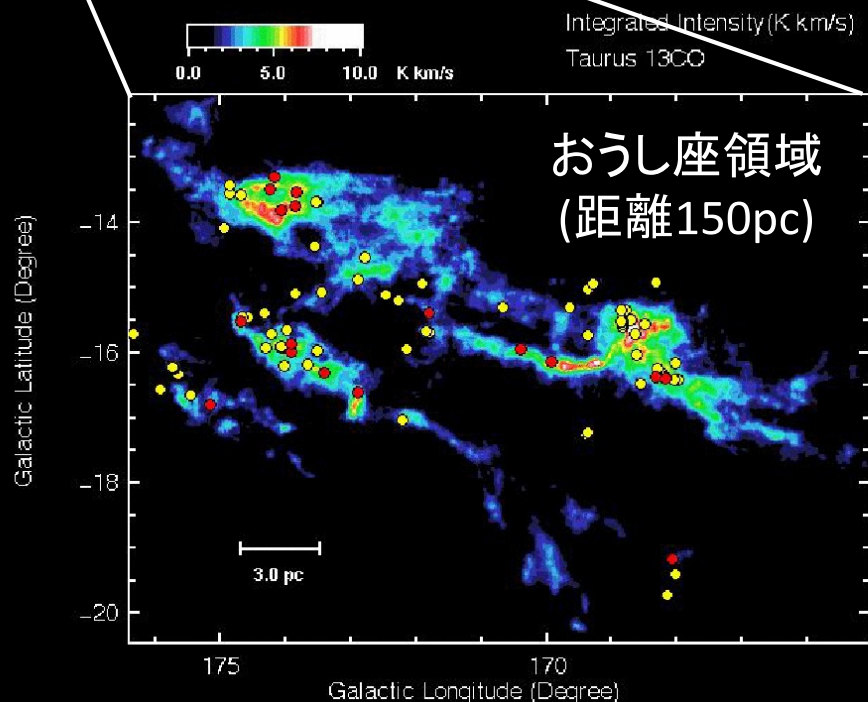
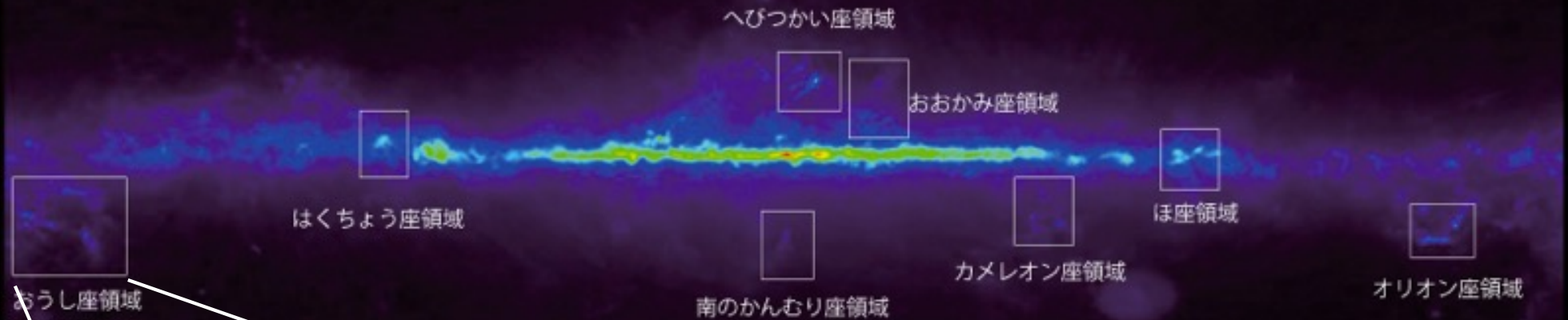
Milky Way@optical

ダスト減光の強い部分には星形成の材料となる  
低温分子ガスが存在している

減光量分布



# 星形成領域



© Tokyo Gakugei Univ. Astro Laboratory

低温(10 K), 高密度 (>100/cc) ガス  
(分子雲) から星が生まれる

CO分子輝線 (電波) によって観測

# Solar Abundances (数比)

| Element | Abundance            | Element | Abundance            |
|---------|----------------------|---------|----------------------|
| H       | 1.00                 | Mg      | $3.4 \times 10^{-5}$ |
| He      | 0.085                | Al      | $2.3 \times 10^{-6}$ |
| C       | $2.5 \times 10^{-4}$ | Si      | $3.2 \times 10^{-5}$ |
| N       | $6.0 \times 10^{-5}$ | S       | $1.4 \times 10^{-5}$ |
| O       | $4.6 \times 10^{-4}$ | Ca      | $2.0 \times 10^{-6}$ |
| Na      | $1.5 \times 10^{-6}$ | Fe      | $2.8 \times 10^{-5}$ |

Asplund et al., ASP Conf Ser, 336, 25, 2005

質量比にすると  $X=0.738$  (H),  $Y=0.25$  (He),  $Z=0.012$  (重元素)

数の多い元素からなるCOは最もよく使われる分子線トレーサー

# H<sub>2</sub>: Dark Molecules

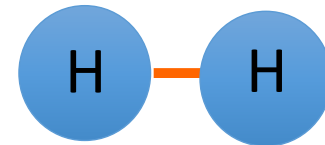
※ガスの大半を占めるH<sub>2</sub>分子輝線は使えない (=見えない)

+ rotational energy levels:  $E_{\text{rot}} = \frac{\hbar^2}{2I} J(J + 1)$

inertia momentの小さい水素分子は順位間のエネルギー差が大きい。

+ 等核分子: no-dipole moment。このため  $\Delta J = 2$  の遷移しか許されず、遷移確率も小さい(only quadrupole)

最低エネルギー遷移:  $\Delta E(J=2 \rightarrow 0, v=0) = 510\text{K}$   
これより低温ガスでは励起できない

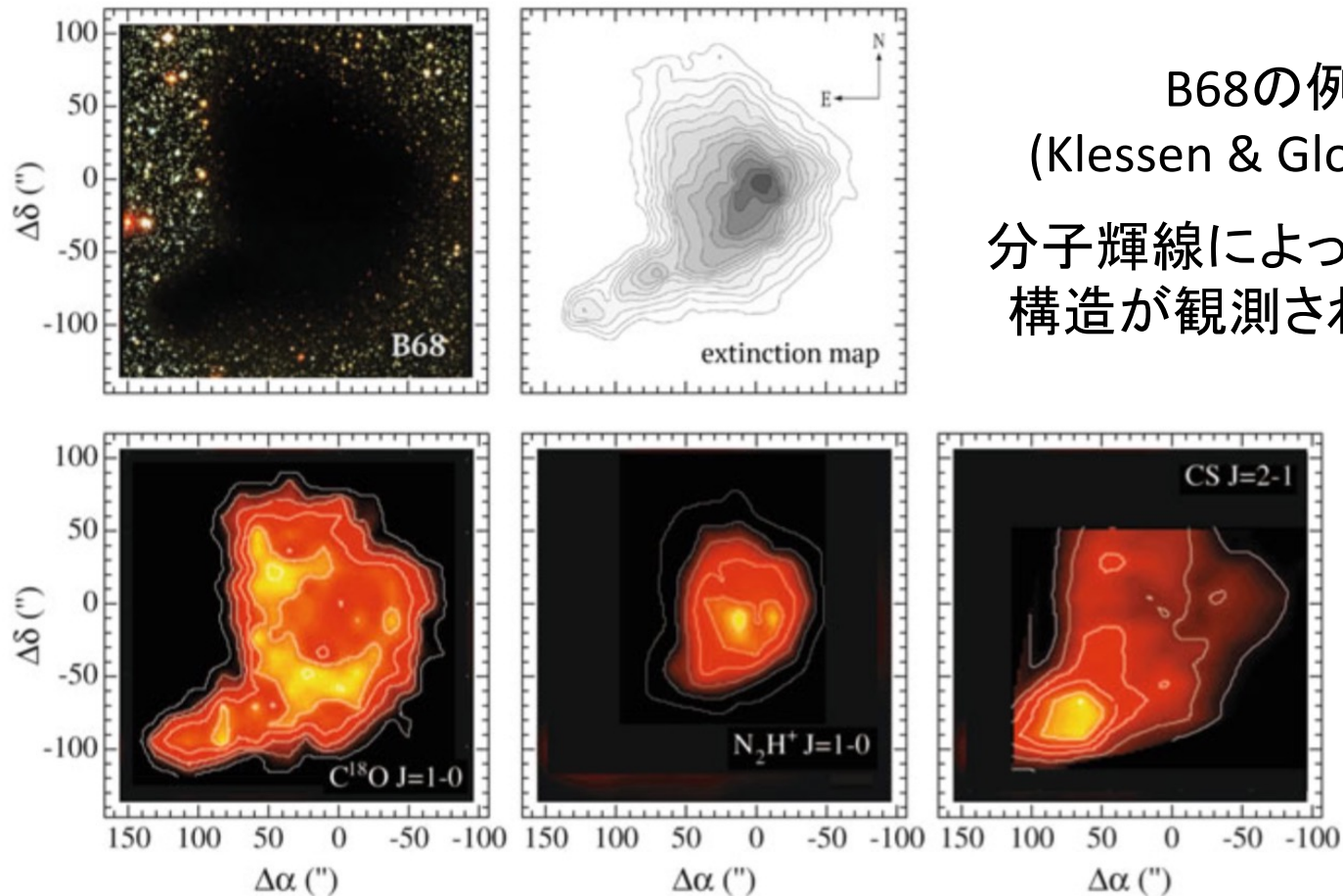


# Molecular Lines

分子雲( $T \sim 10\text{K}$ )の観測には様々な分子輝線が用いられる

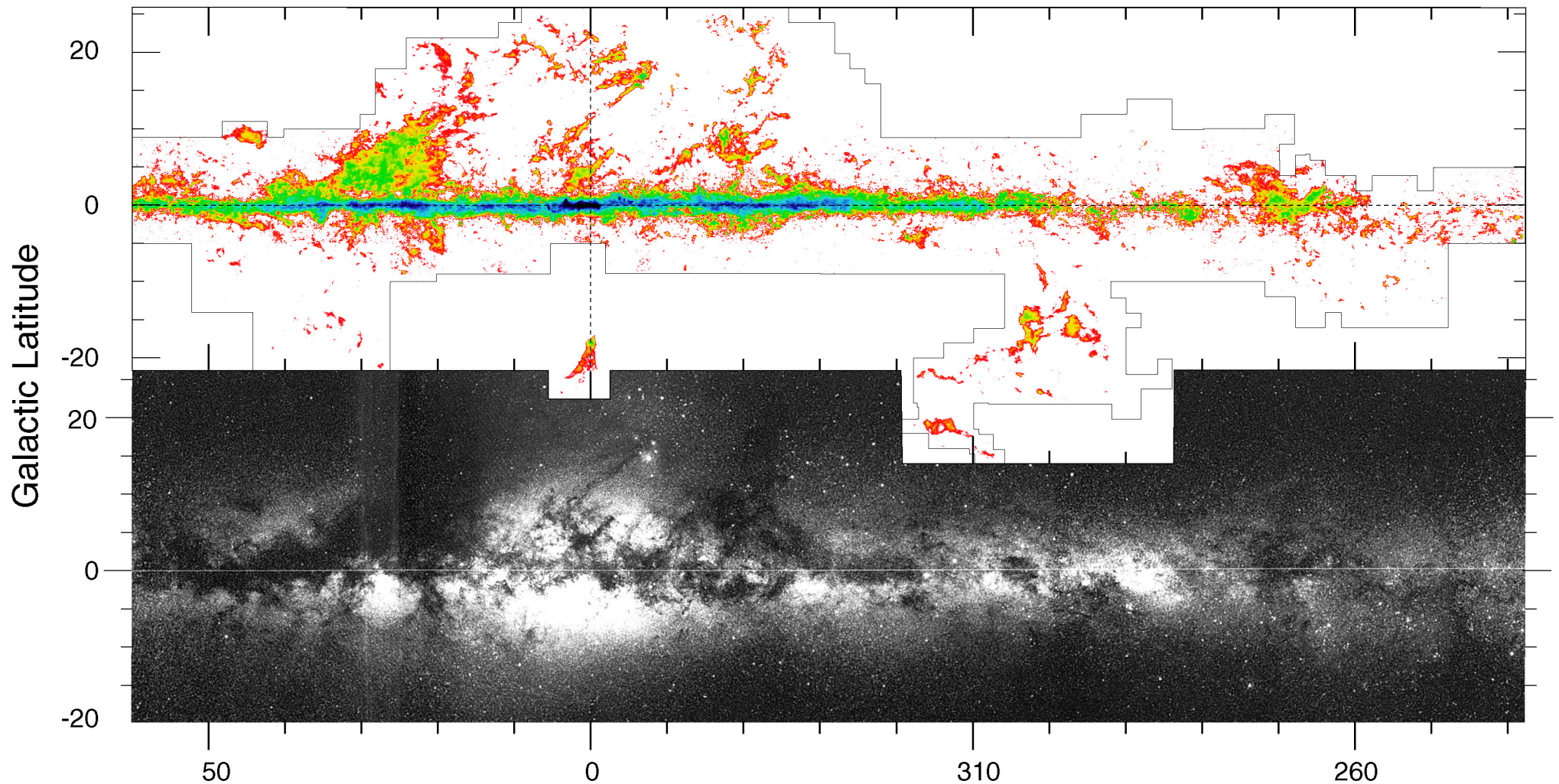
例) CO分子の回転準位間遷移は $\Delta E(J=1 \rightarrow 0)=5.5\text{K}$ ,  
 $\Delta E(J=2 \rightarrow 0)=16\text{K}$ で電波域(2.6mm)

CO first detected by Wilson, Jefferts & Penzias (1970)



# 銀河系の分子雲分布

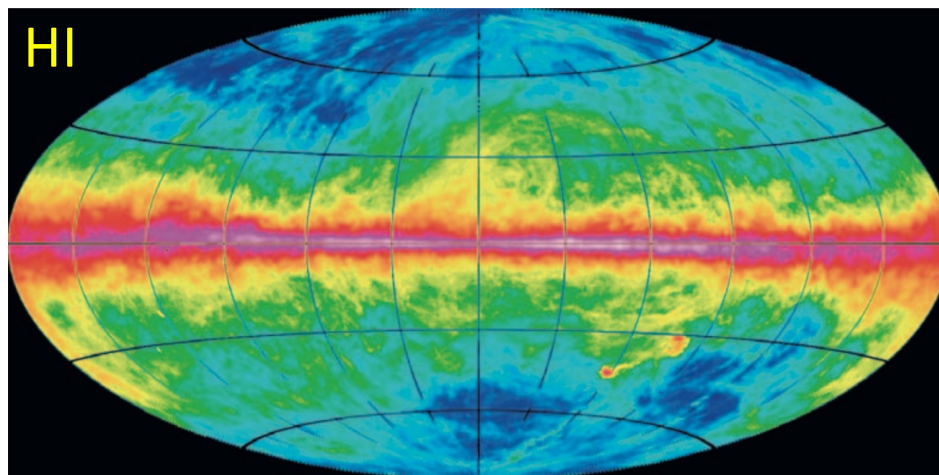
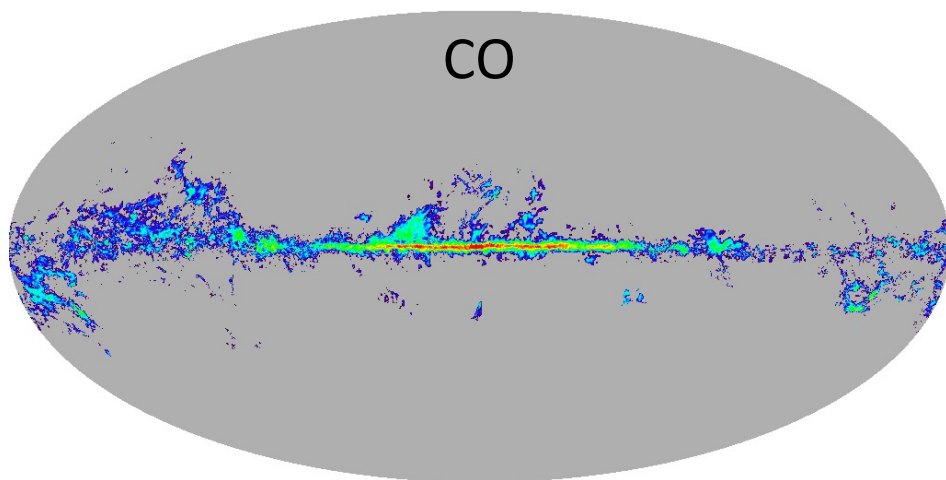
$^{12}\text{CO}(J=1-0)$ , by Nanten telescope



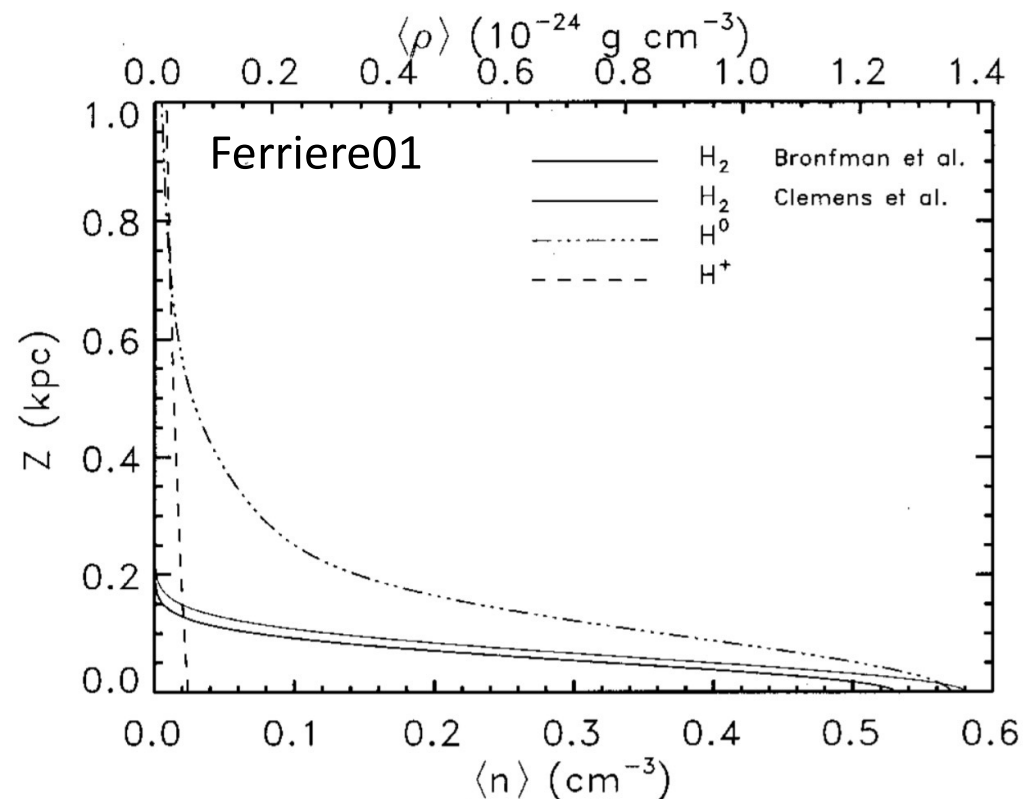
減光量の分布とよく一致している

XPLORING THE SOUTHERN SKY (1988)

# 銀河円盤の厚み



Solar circleでの各ガス相のz方向分布

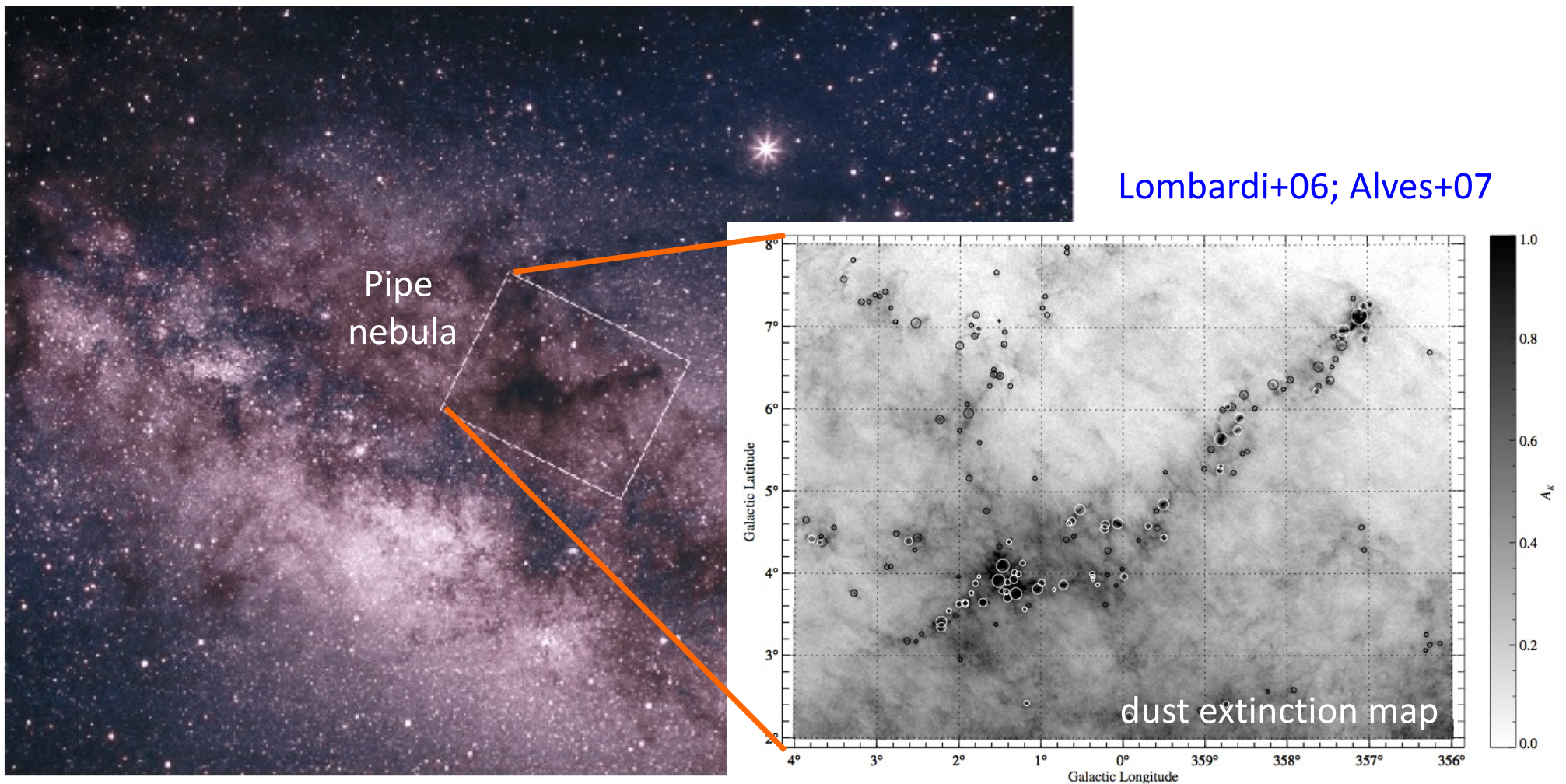


- + 温度の低い分子ガスはHIよりうすく分布している (圧力勾配と重力釣合)
- + scale height  $\sim 0.1 \text{ kpc}$  (c.f. 円盤サイズ  $\sim 10 \text{ kpc}$ ); very thin disk!

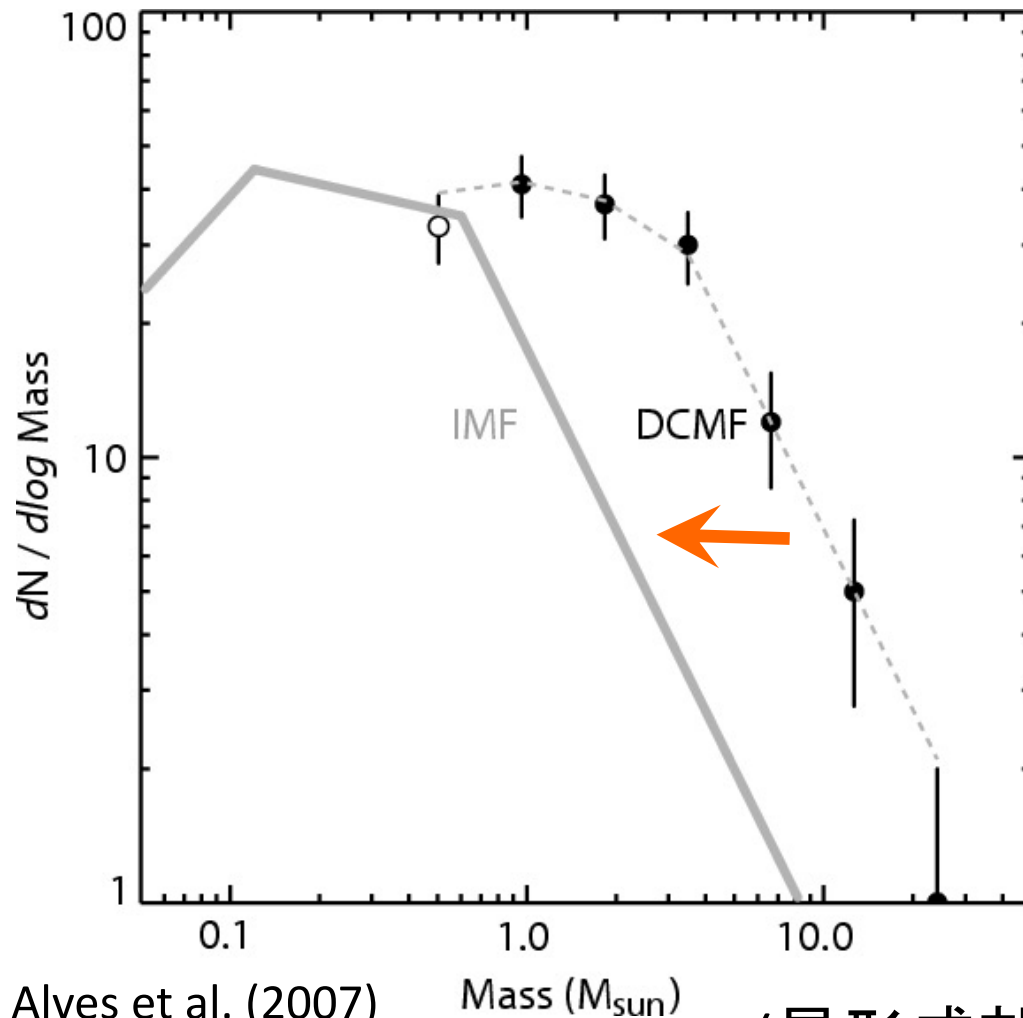
# 星形成の最小単位

分子雲自体は10pc以上の長さスケール。

分子雲内の高密度部分( $\sim 0.1$ pc): **分子雲コア**から個々の星が誕生



# IMF v.s. Core Mass Func.



分子雲コアの質量関数  
(Core Mass Function):  
星のIMFとほぼ同じ形

分子雲の内部構造がIMF概形  
を決めているようだ

コアから個々の星が生まれる  
と考えるとよいように見える

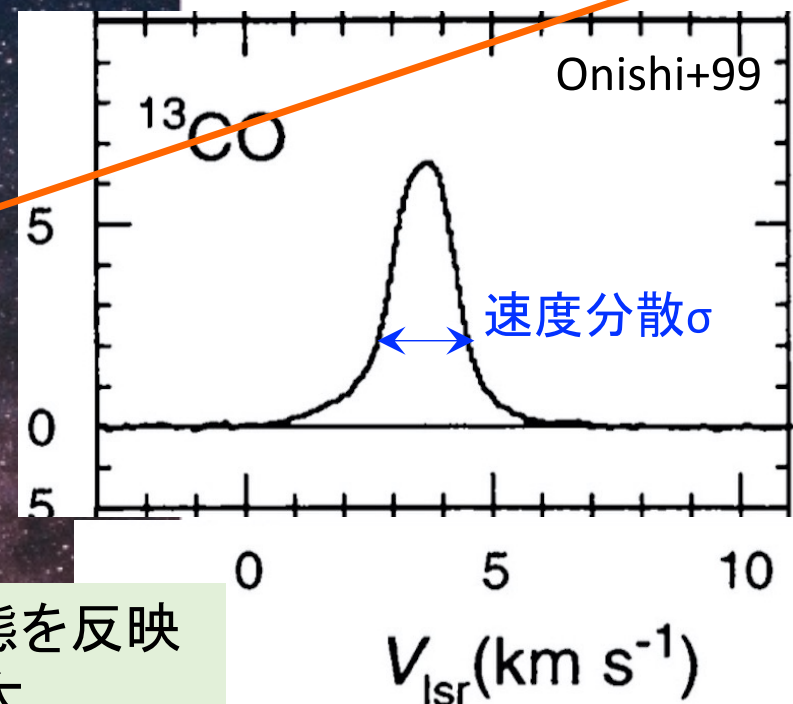
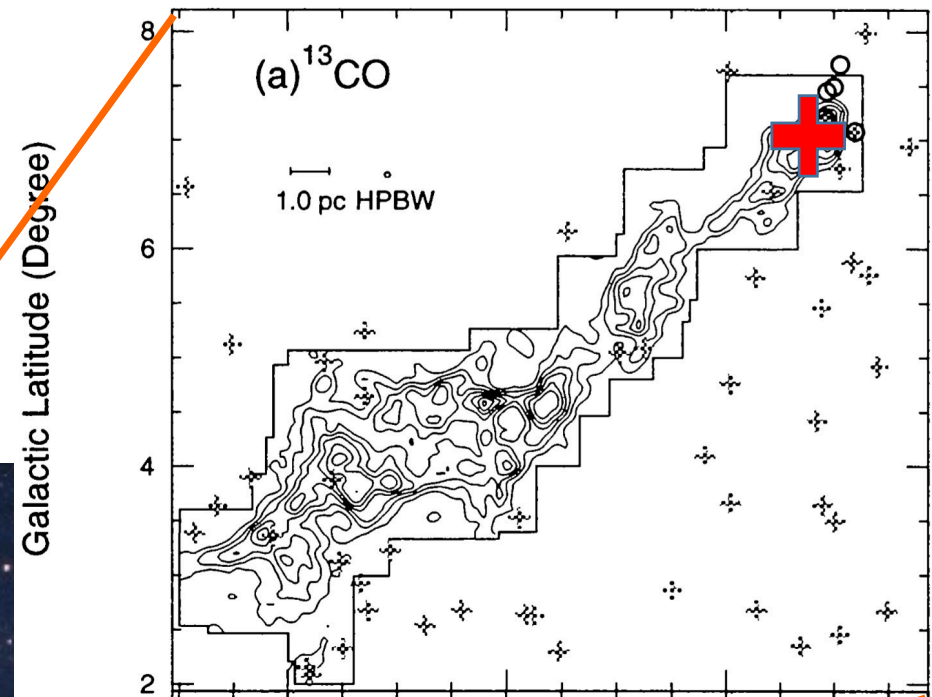
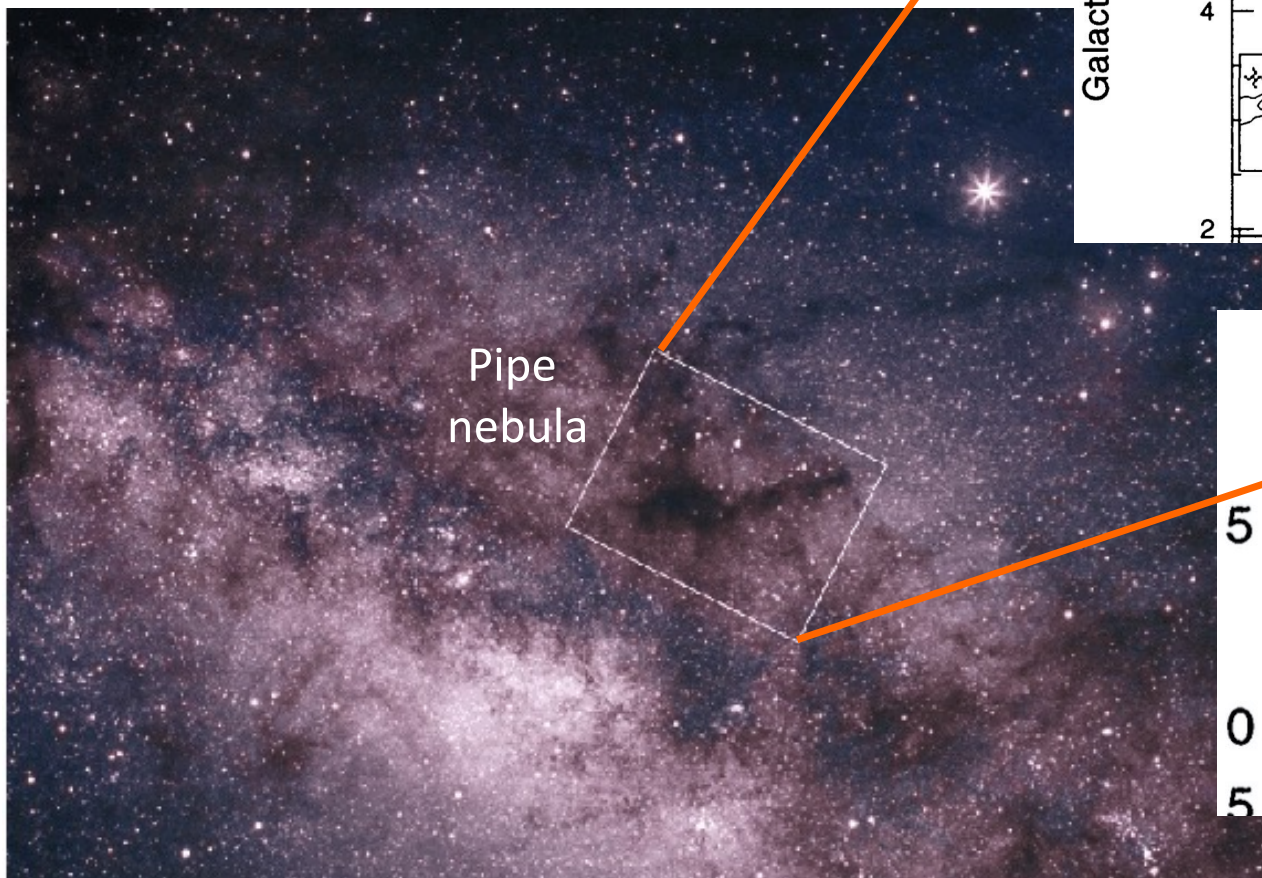
Alves et al. (2007)

Mass ( $M_{\text{sun}}$ )

(星形成効率) = (星質量) / (コア質量) = 数十%



# CO line profile と雲内部運動



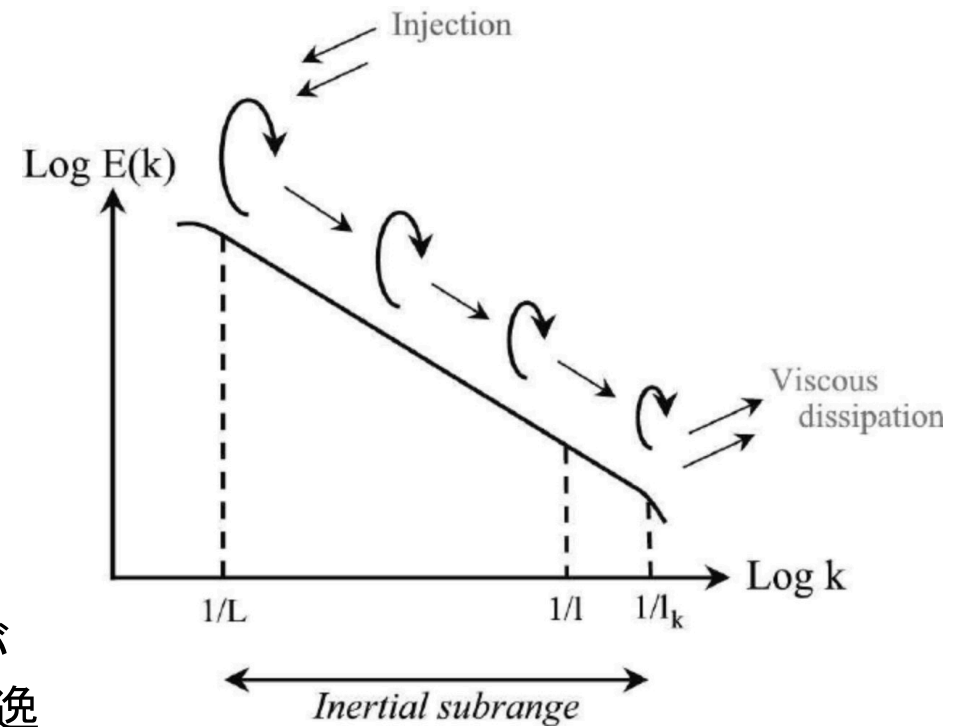
輝線幅はDoppler効果により、放射ガスの運動状態を反映  
しかし、なぜか $T=10\text{K}$ の音速 $\sim 0.1\text{km/s}$ よりつねに大。

# 分子雲中の“乱流”

分子雲内部はなぜか常に“超音速乱流”で満たされていると考えられている。



大→小スケールの乱れへエネルギーが流れる(cascade)。十分小スケールで散逸



散逸するまでの中間域ではスケール則(冪則)がしばしば成立

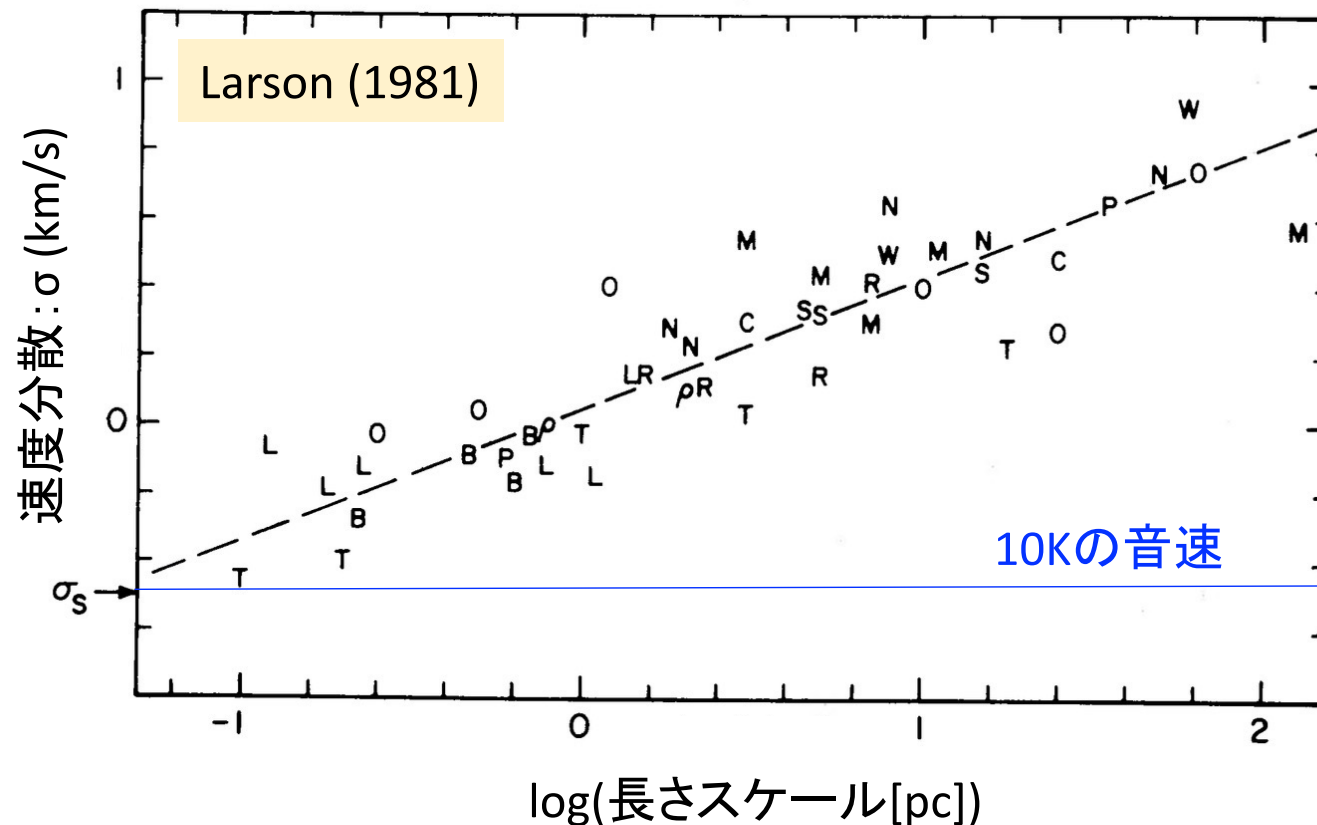
例) Kolmogorov則(非圧縮): エネルギースペクトル  $E(k) \propto k^{-5/3}$

# The Larson's Law



Richard Larson

+他にもLarson-Penston解  
など多くの著名な業績

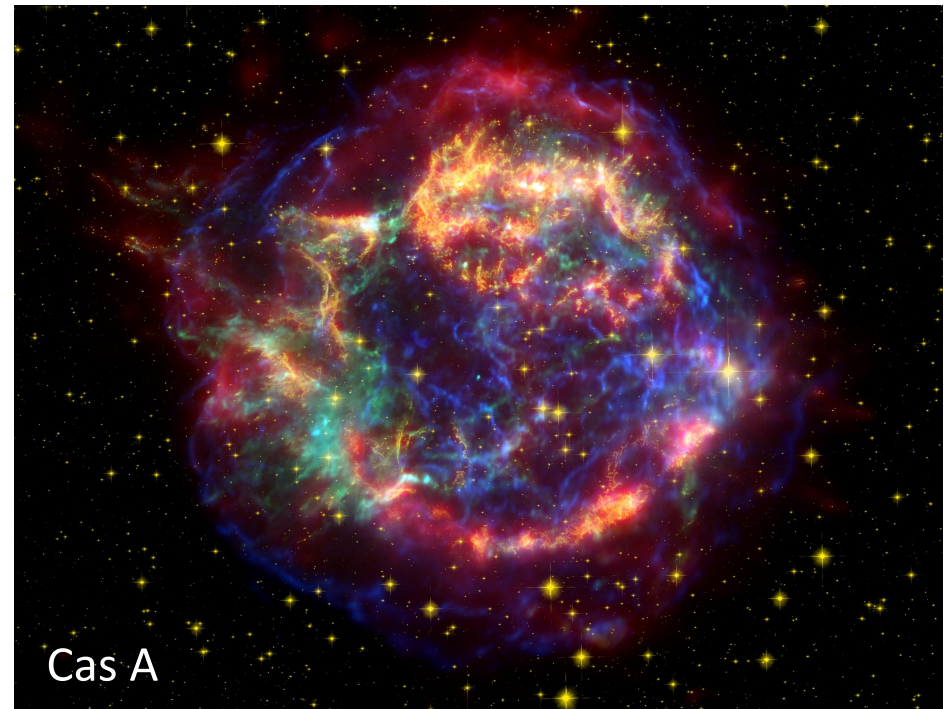


- + (速度分散)  $\propto$  (サイズ)<sup>0.5</sup> の関係が長さスケール3桁に渡って成立
- + 乱流スケール則との関係と考えられる  $\Rightarrow$  IMF?
- + 乱流のinjection機構は何か?

# Impact of Supernovae

Q) 超新星爆発が起きると残骸が衝撃波とともに  
星間物質中を膨張する。  
銀河円盤のガスがどのくらいこの影響を受けるか  
オーダー評価で見積もろう

Hint) 銀河系の星形成率 $\sim 1M_{\odot}/\text{yr}$   
バブル膨張のサイズ $\sim 100\text{pc}$   
時間スケール $\sim 1\text{Myr}$



# Impact of Supernovae

超新星爆発の頻度:  $\sim 1$ 個/100年

周囲のガスに広がる時間:  $\sim 10^6$ 年

→ 銀河系内を膨張中の超新星バブル数:

$$10^6 \text{年} \div 100 \text{年} = 10^4 \text{個}$$

バブル一個あたりのサイズ:  $\sim 100 \text{pc}$

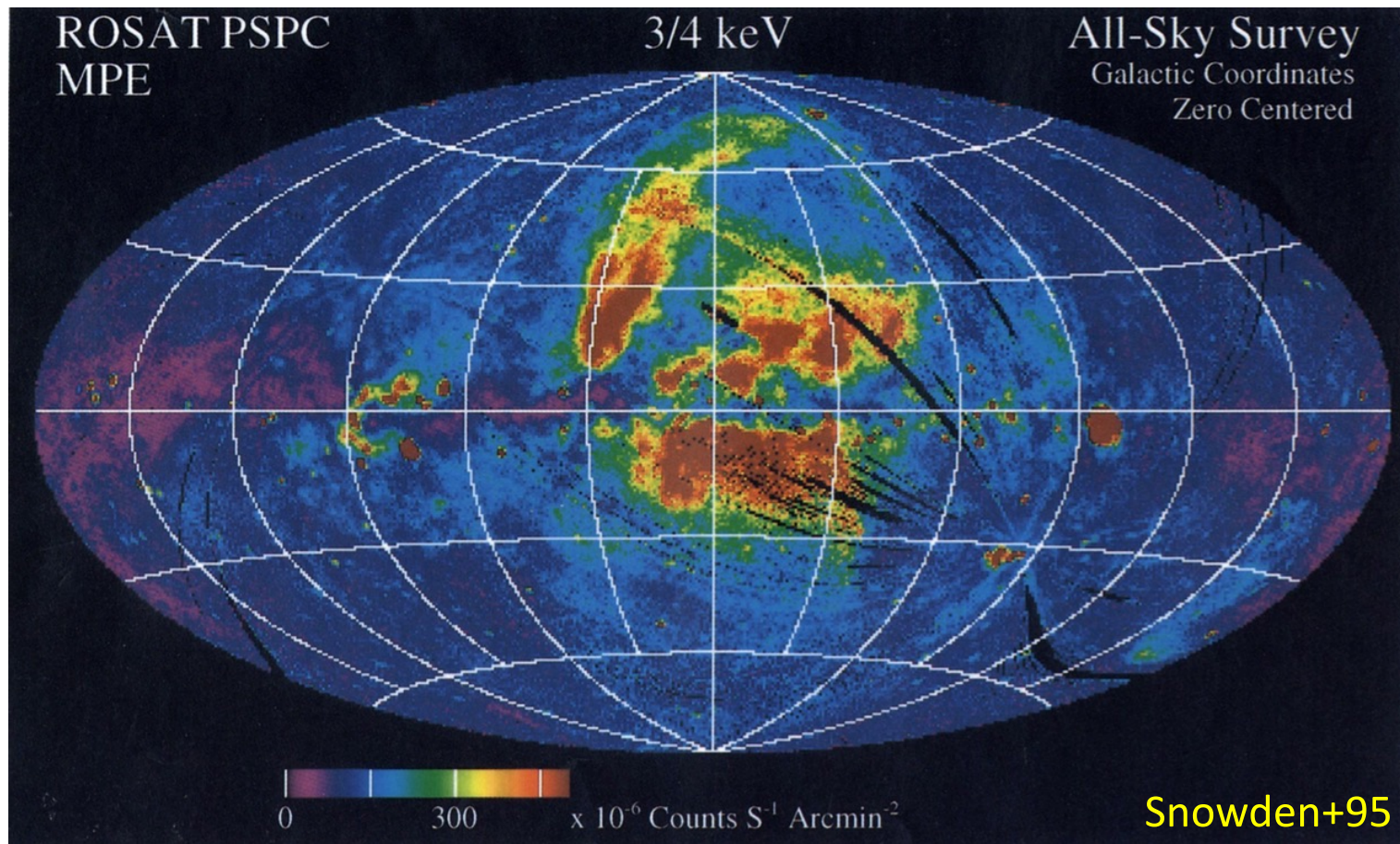
バブル全部が占める体積:  $10^4 \text{個} \times (100 \text{pc})^3 = 10^{10} \text{pc}^3$

銀河円盤体積:  $(10 \text{kpc})^2 \times 0.1 \text{kpc} (\text{厚み}) \sim 10^{10} \text{pc}^3$

同程度

銀河のガスはつねに超新星爆発の影響下にさらされている  
星からの"feedback" → 乱流駆動源?

# Hot Ionized Gas (HIM)



- + 非常に高温( $\sim 10^6$ K)、低密度( $\sim 0.01/\text{cc}$ )の電離ガス。X線放射
- + ( $10^6$ Kの音速)  $\sim 100\text{km/s} \sim$  (SN remnant膨張速度); shock加熱
- + 上図arc状構造は近傍( $<150\text{pc}$ 内)のSN bubble (Loop I bubble)

# ISM諸相まとめ

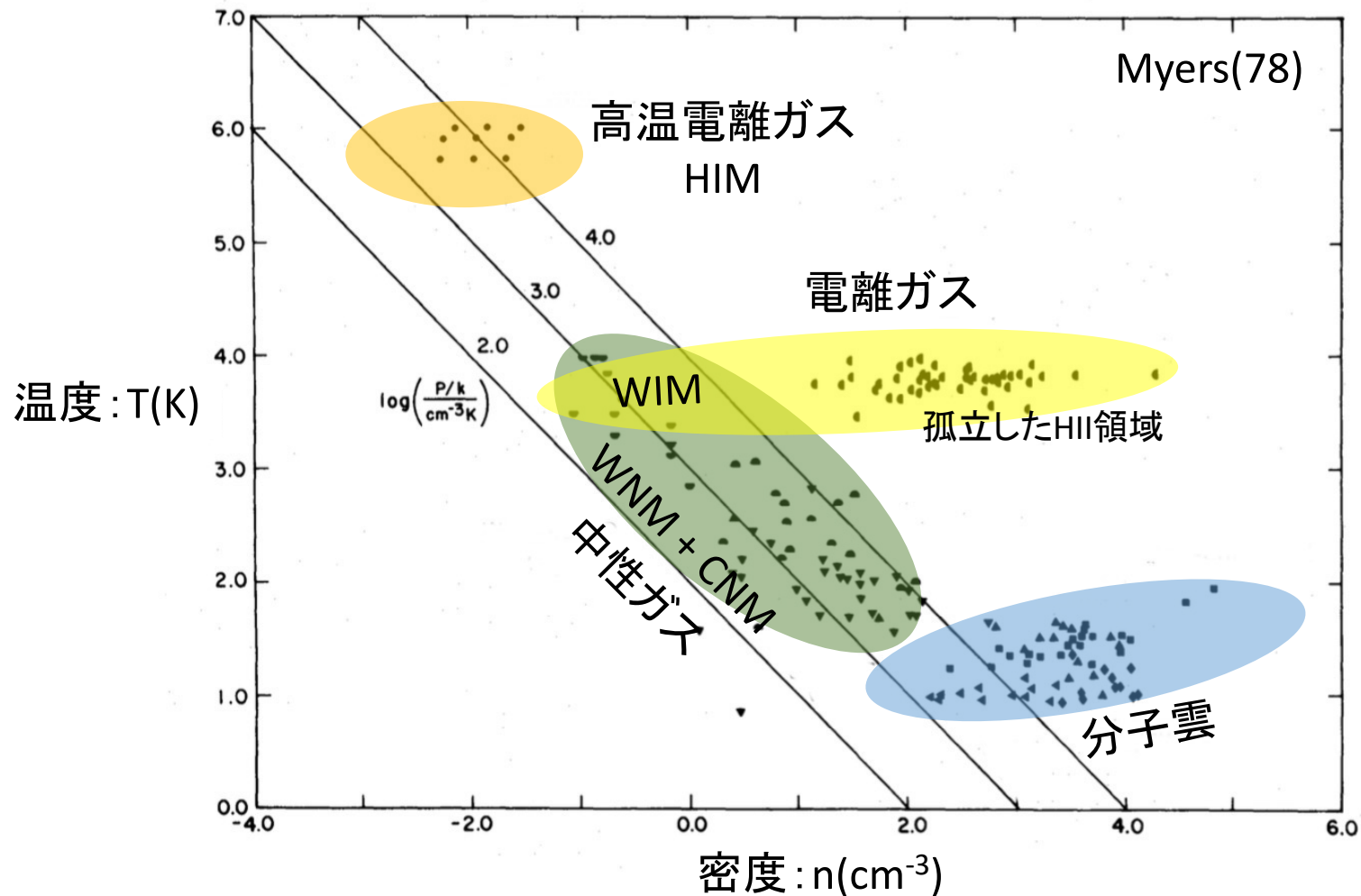
| Component                 | Temperature (K) | Density ( $\text{cm}^{-3}$ ) | Fractional ionization |
|---------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------|
| Molecular gas             | 10–20           | $>10^2$                      | $<10^{-6}$            |
| Cold neutral medium (CNM) | 50–100          | 20–50                        | $\sim 10^{-4}$        |
| Warm neutral medium (WNM) | 6000–10000      | 0.2–0.5                      | $\sim 0.1$            |
| Warm ionized medium (WIM) | $\sim 8000$     | 0.2–0.5                      | 1.0                   |
| Hot ionized medium (HIM)  | $\sim 10^6$     | $\sim 10^{-2}$               | 1.0                   |

Adapted from Ferrière (2001); Caselli et al. (1998); Wolfire et al. (2003), and Jenkins (2013)

(上:Klessen & Glover 16; 下:Draine教科書より)

| Phase   | $M(10^9 M_{\odot})$ | fraction |
|---|---------------------|----------|
| Total H II (not including He)                               | 1.12                | 23%      |
| Total H I (not including He)                                | 2.9                 | 60%      |
| Total H <sub>2</sub> (not including He)                     | 0.84                | 17%      |
| <b>Total H II, H I and H<sub>2</sub> (not including He)</b> | <b>4.9</b>          |          |
| <b>Total gas (including He)</b>                             | <b>6.7</b>          |          |

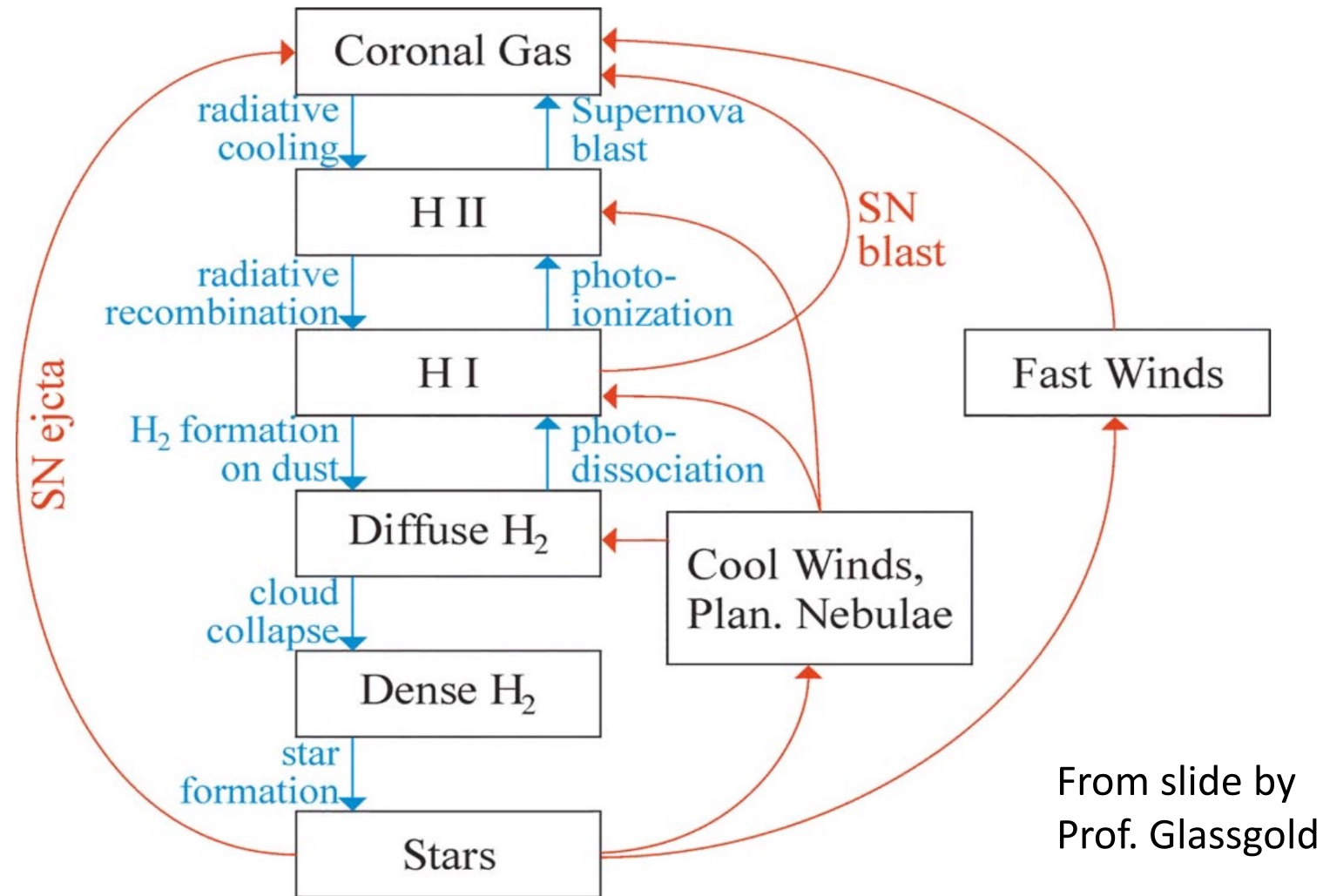
# ISM n-T図



- + 密度 $10/\text{cc}$ 以下のガスはほぼ同圧力下にある
- + 星形成の前後である分子雲、孤立電離領域は圧力が高い ← 重力



# ISM cycle



ISM各相間で常にmass, momentum, energyのexchangeがある

# ISM → 星への変換効率

仮に、全部の分子雲がfree-fall timeぐらいでcollapseして星に変換される場合を考える。

$$\begin{aligned}\text{星形成率: } \dot{M}_* &= \frac{M_{\text{GMC}}}{t_{\text{ff}} (\sim 100 \text{cm}^{-3})} \\ &\sim \frac{10^9 M_{\odot}}{4 \times 10^6 \text{yr}} = 250 M_{\odot}/\text{yr}\end{aligned}$$

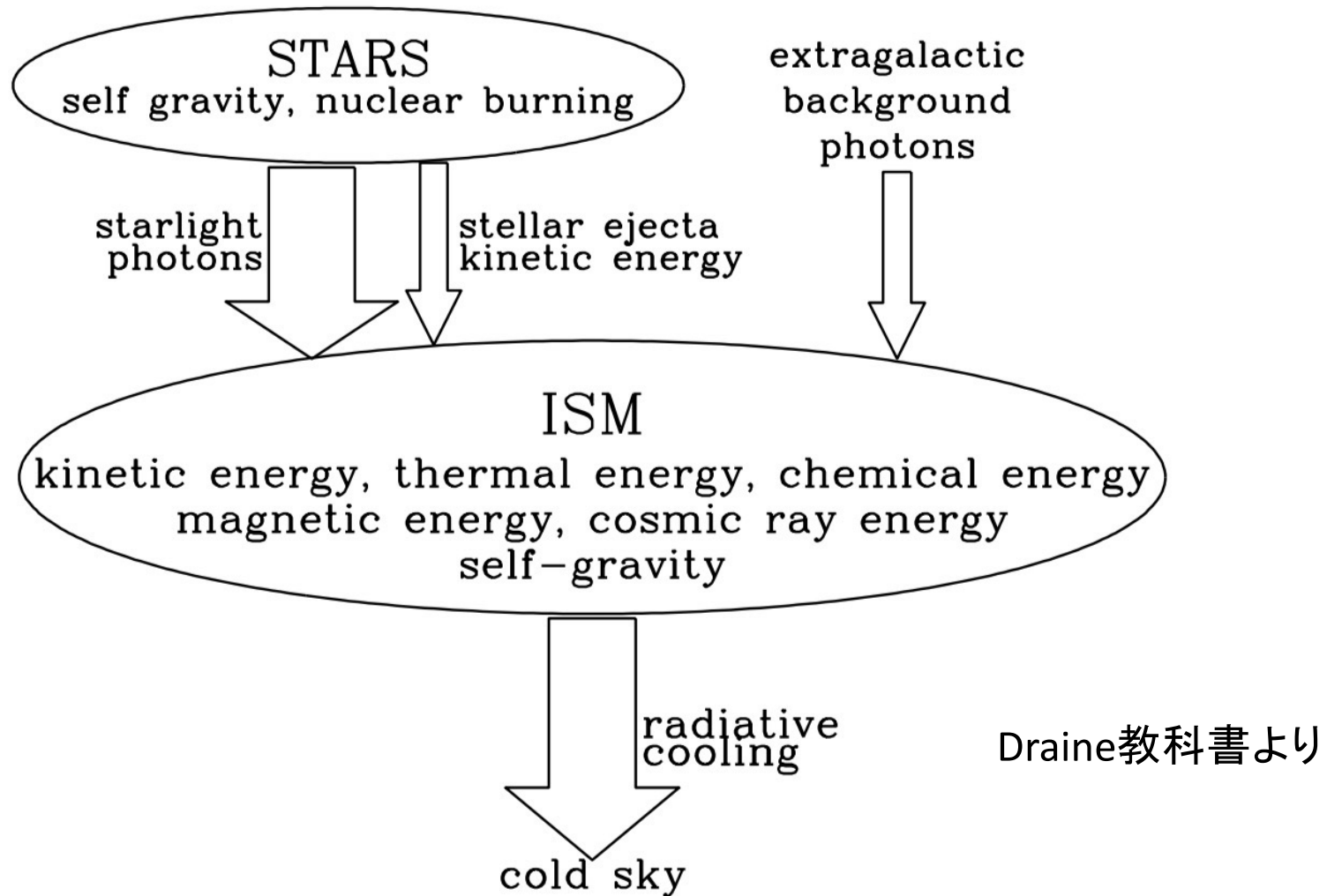
しかし、実際の星形成率:  $\sim 1 M_{\odot}/\text{yr}$

なぜか実際に実現している星形成率は非常に小さい。

**”star formation is very slow”**

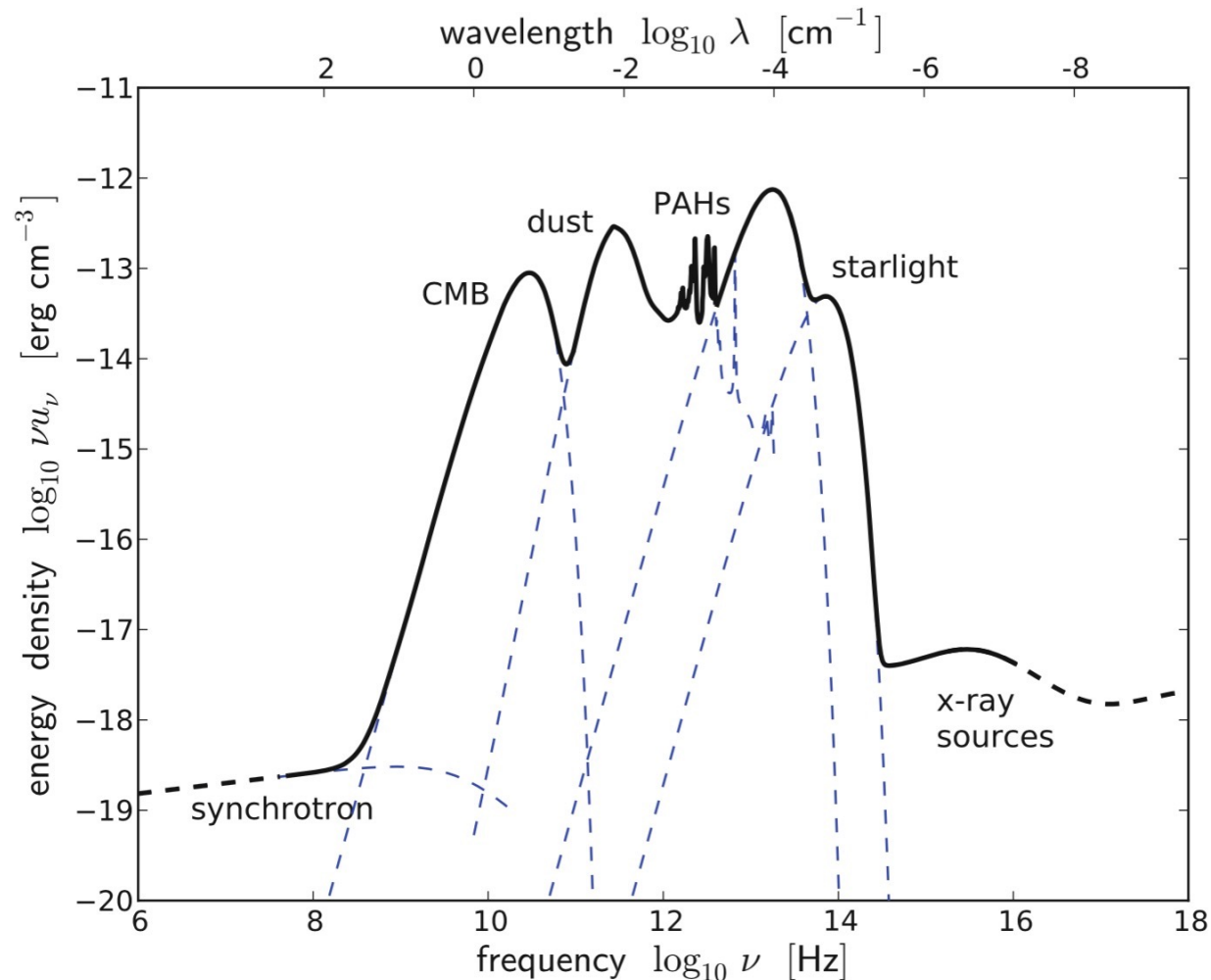
星間物質循環の結果、なぜこの星形成率が実現するのか。

# Energy Flow through ISM



ISMはぜんぜん熱平衡状態にない。ISMを通じて常にenergyのflowがあり、系が閉じていない。

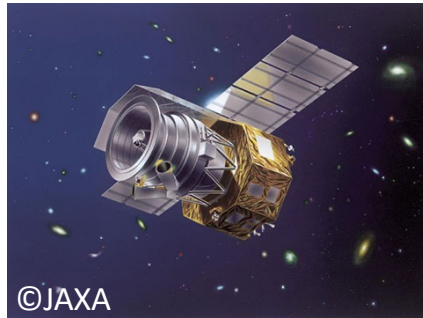
# Radiation Fields



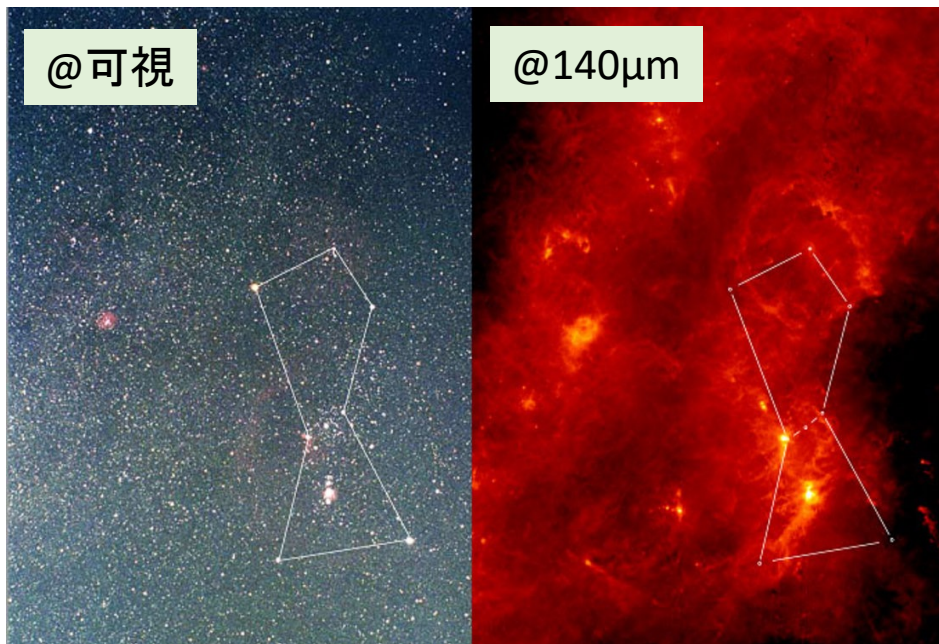
- + 赤外-UV間がエネルギー的に支配的。ISM熱・化学状態を左右
- + 赤外: ダスト放射(ISMのcooling)、可視-UV: 星の放射(ISMのheating)
- + UV: 光電離(e.g.,  $H+\gamma \rightarrow H^+ + e$ )、光解離(e.g.,  $H_2+\gamma \rightarrow H+H$ )

# Thermal dust emission

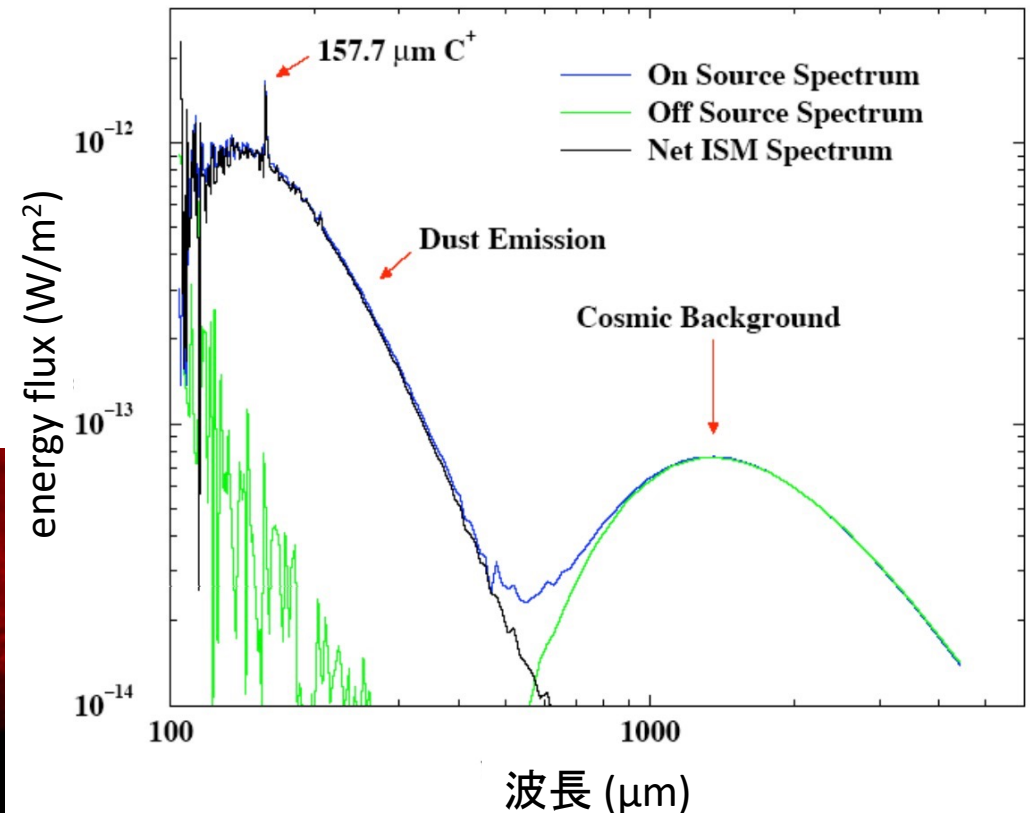
70年代後半になると衛星観測により、赤外線やX- $\gamma$ 線にも窓が開かれてきた



あかり衛星  
(2006-2011)



COBE衛星による銀河面放射スペクトル

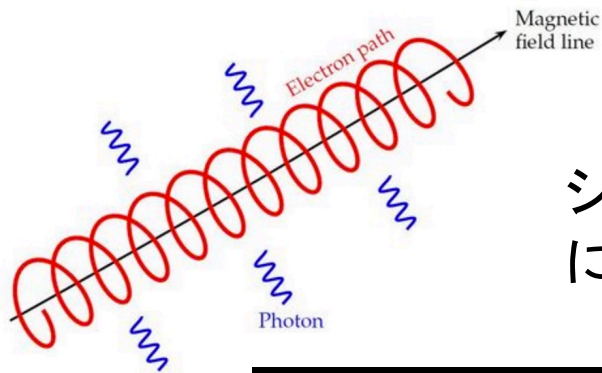


遠赤外域ではダスト放射とCMBの2成分

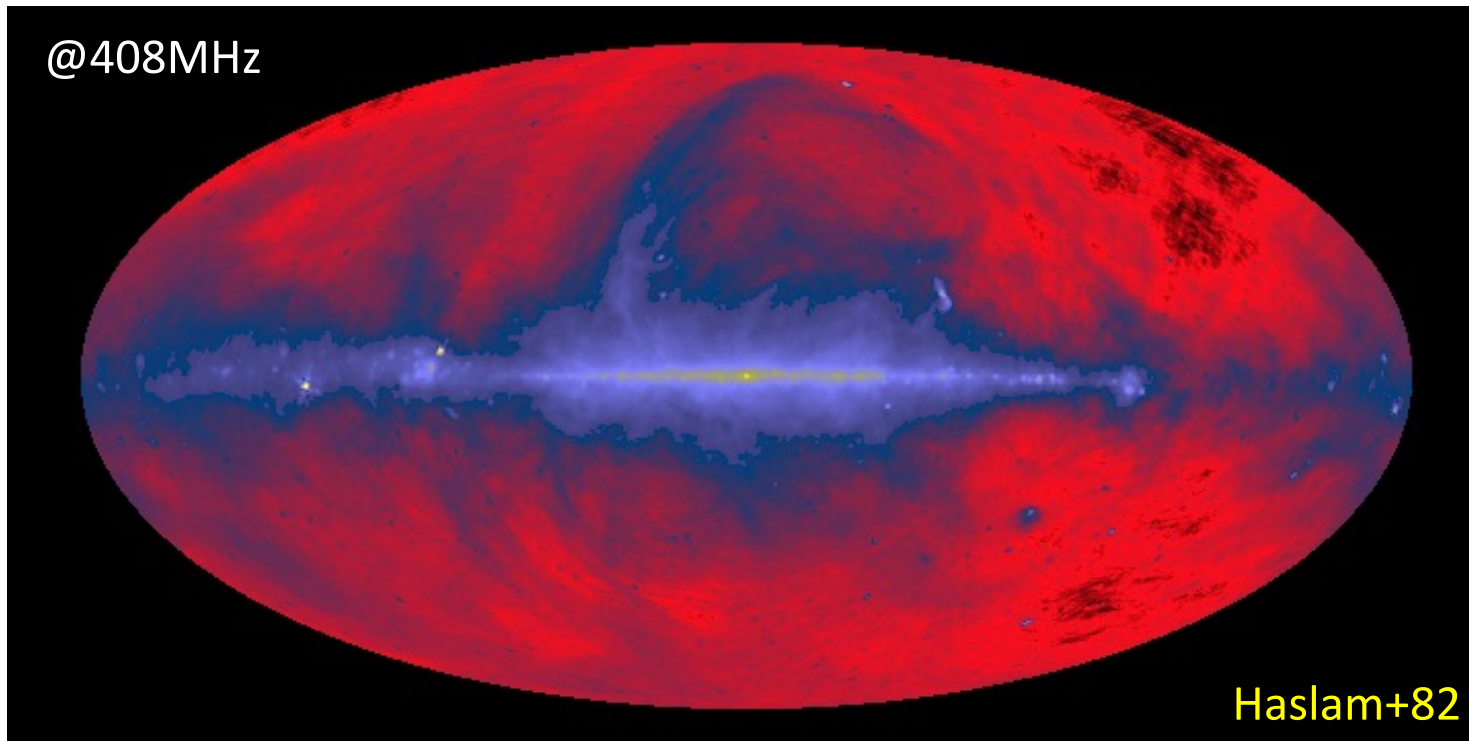
ダスト成分は140 $\mu\text{m}$ にピーク。温度20Kの熱放射に相当 (←ダスト温度)

Shell-like structure around the Orion's head is seen @140 $\mu\text{m}$

# 星間磁場



シンクロトロン放射: 高エネルギー電子が磁力線に沿ってLorentz力によりジャイロ運動するときの放射



星間空間には平均で数 $\mu\text{G}$ の磁場が存在。  
星形成・星間現象の様々な局面で重要な役割をはたす

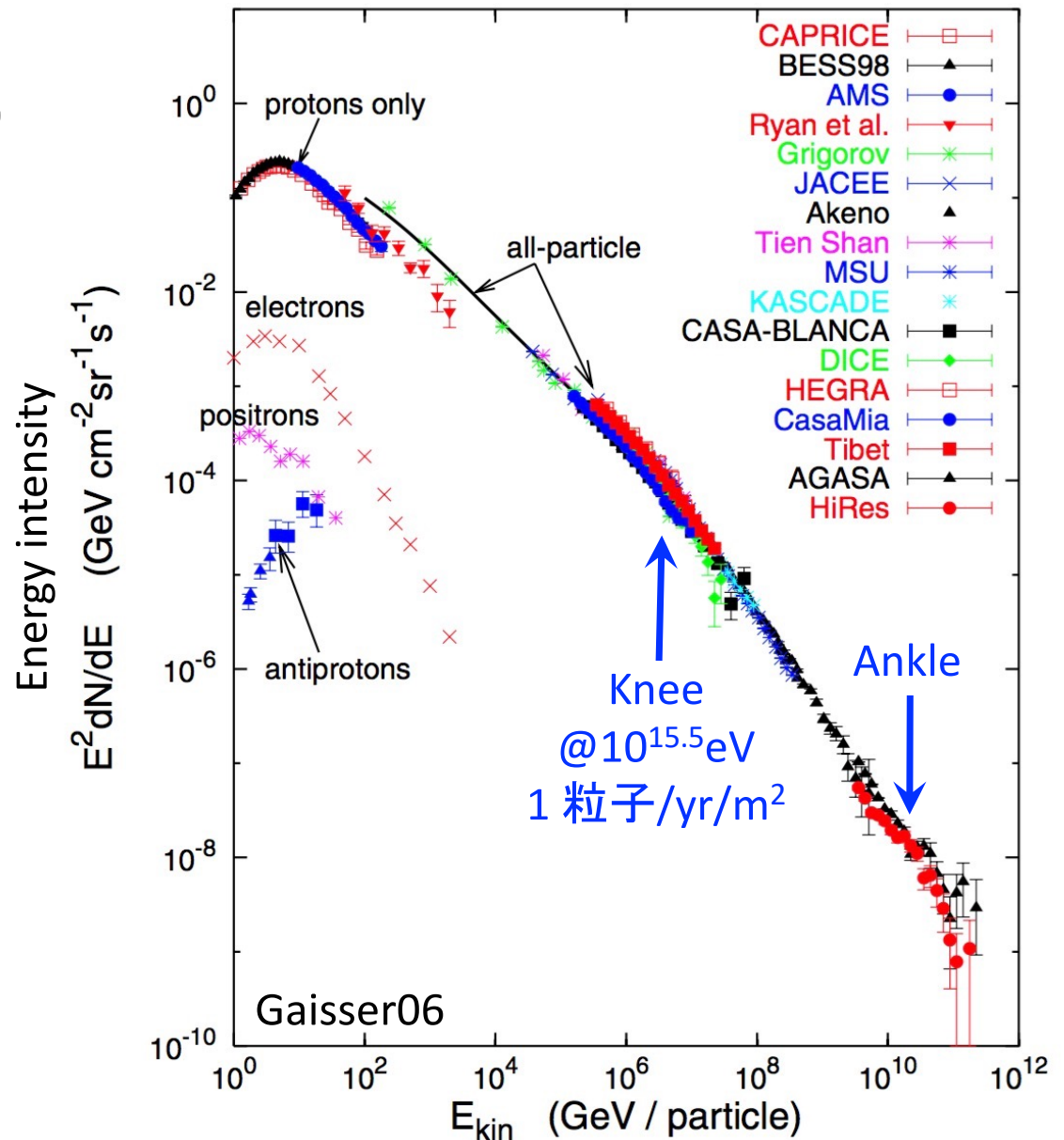
# 宇宙線

高エネルギー粒子 (主に陽子)

少なくともknee以下は系内の  
超新星残骸衝撃波で加速され  
ていると考えられている。  
(いわゆるFermi加速)

このため、分子雲奥深くでも  
電離度はわずかにある。

↓  
磁場とのcoupling



# エネルギーバランス

| Component  | $u(\text{eV cm}^{-3})$ | Note     |
|--|------------------------|----------|
| Cosmic microwave background ( $T_{\text{CMB}} = 2.725 \text{ K}$ ) | 0.265                  | <i>a</i> |
| Far-infrared radiation from dust                                   | 0.31                   | <i>b</i> |
| Starlight ( $h\nu < 13.6 \text{ eV}$ )                             | 0.54                   | <i>c</i> |
| Thermal kinetic energy $(3/2)n kT$                                 | 0.49                   | <i>d</i> |
| Turbulent kinetic energy $(1/2)\rho v^2$                           | 0.22                   | <i>e</i> |
| Magnetic energy $B^2/8\pi$   | 0.89                   | <i>f</i> |
| Cosmic rays  | 1.39                   | <i>g</i> |

*a* Fixsen & Mather (2002).

*b* Chapter 12.

*c* Chapter 12.

*d* For  $nT = 3800 \text{ cm}^{-3} \text{ K}$  (see §17.7).

*e* For  $n_{\text{H}} = 30 \text{ cm}^{-3}$ ,  $v = 1 \text{ km s}^{-1}$ , or  $\langle n_{\text{H}} \rangle = 1 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\langle v^2 \rangle^{1/2} = 5.5 \text{ km s}^{-1}$ .

*f* For median  $B_{\text{tot}} \approx 6.0 \mu\text{G}$  (Heiles & Crutcher 2005).

*g* For cosmic ray spectrum X3 in Fig. 13.5.

(from Draine's textbook)

全ての成分がほぼ同程度のエネルギー密度を持っている  
各相間のcouplingを示唆

複雑だが、多様な物理が登場し相互作用しあう



# まとめ

- + 星間空間は多相のガスに加えて輻射、乱流、磁場、ダストがお互いに相互作用しあう系
- + 多相ガス間の物質循環の結果、あるペースで星の材料となる分子ガスが供給され、それをもとに星が生まれている
- + 星(惑星)形成の初期条件はこの過程によって定まる