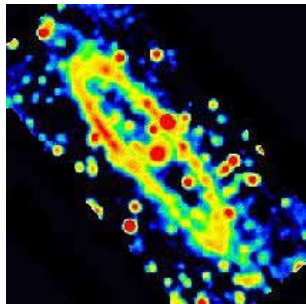


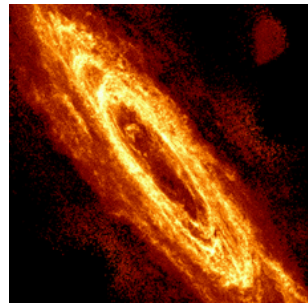
# 電波でさぐる銀河・銀河形成

阪本成一 (国立天文台)

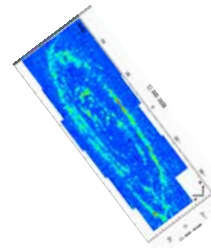
# さまざまな波長で見たM31



6cm電波 (Effelsberg)



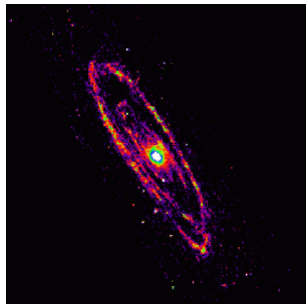
HI (WSRT)



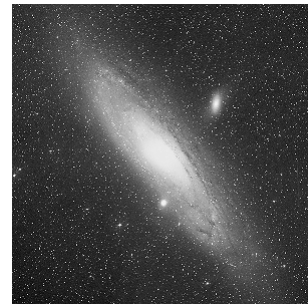
CO J=1-0 (IRAM)



175um遠赤外線 (ISO)



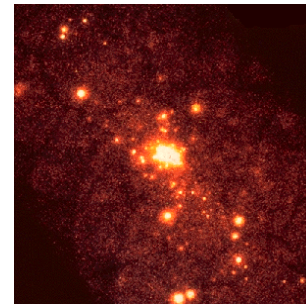
8.3um中間赤外線 (MSX)



可視光 (DSS)



紫外線 (GALEX)



0.4-1.6keV X線 (ROSAT)

# 電波観測で使用するプローブ

- |                                     |          |        |
|-------------------------------------|----------|--------|
| ● 熱的自由-自由放射 (e; 熱的)                 | 電離ガス     |        |
| ● 再結合線 (HII; unobscured)            | 電離ガス     |        |
| ● 21cm線 (HI)                        | 原子ガス     | SKA    |
| ● Faraday回転 (B)                     | 磁場       |        |
| ● シンクロトロン放射 (B × e; 相対論的)           | 磁場       |        |
| ● メーザ (H <sub>2</sub> O, SiO, etc.) | 分子ガス     | VSOP-2 |
| ● ミリ波分子線 (CO, etc. H <sub>2</sub> ) | 分子ガス     |        |
| ● ミリ波サブミリ波連続波 (低温ダスト)               | 固体微粒子    | ALMA   |
| ● [CI] 492GHz線 (CI)                 | 原子-分子    |        |
| -----                               |          |        |
| ● [CII] 157um線 (CII)                | 原子-分子    |        |
| ● HD 112um線 (HD)                    | 分子 (始原的) |        |

# 銀河物理学の諸問題

- 原初(に近い)天体
- 宇宙の再電離
- 形成中の銀河
- 宇宙の星形成史
- 形態分化
- 銀河構造
- 星間物質の進化

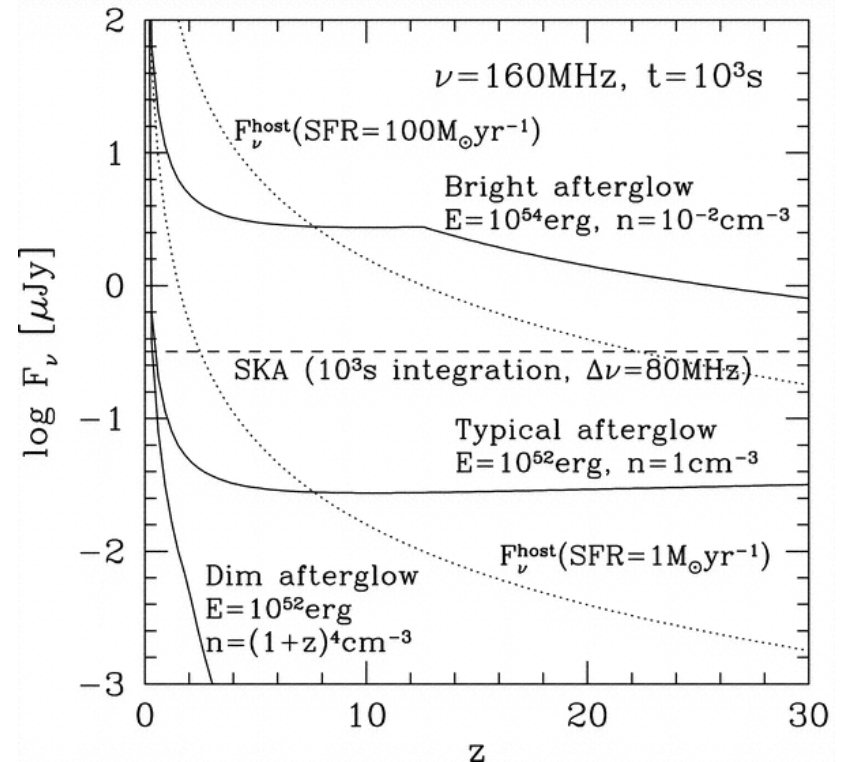
# 原初(に近い)天体

## ● 原始銀河雲

- HI (1.42GHz) SKAとて簡単ではない
- LiH (444GHz) 存在量の不定性大
- HD (2675GHz) ALMAとて大変困難
- H<sub>2</sub> 上に同じ

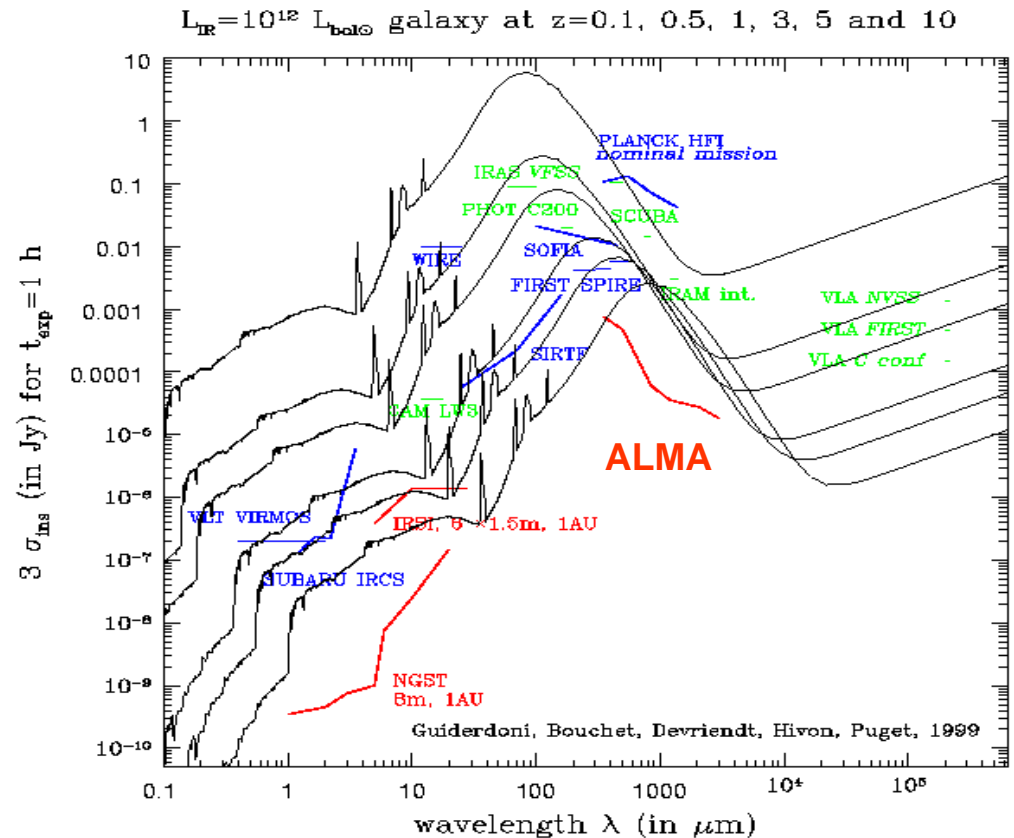
# 宇宙の再電離

- センチ波帯におけるGRB残光
- DMの測定で電離ガスの柱密度を推定



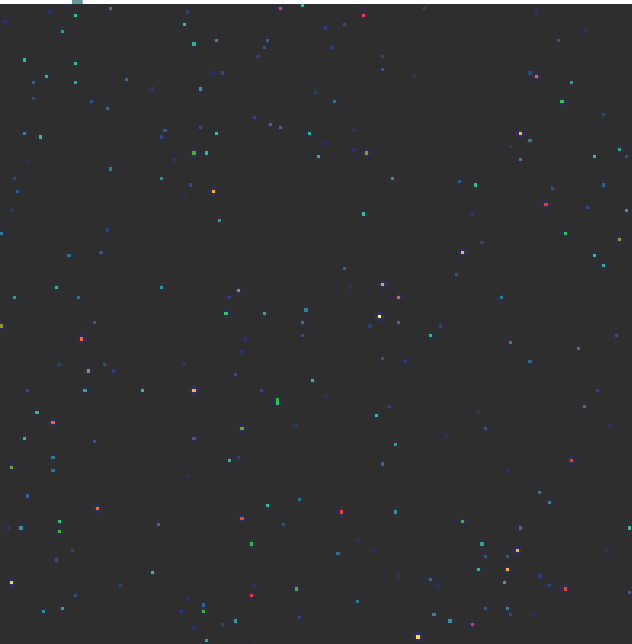
# 形成中の銀河：遠方銀河の探査

- 光では見えない原始銀河をミリ波サブミリ波で効率よくとらえる。
  - 減光は小さい。
  - ダスト放射のピーク。
  - 遠くのもののほどよく写る (負のK-補正)。

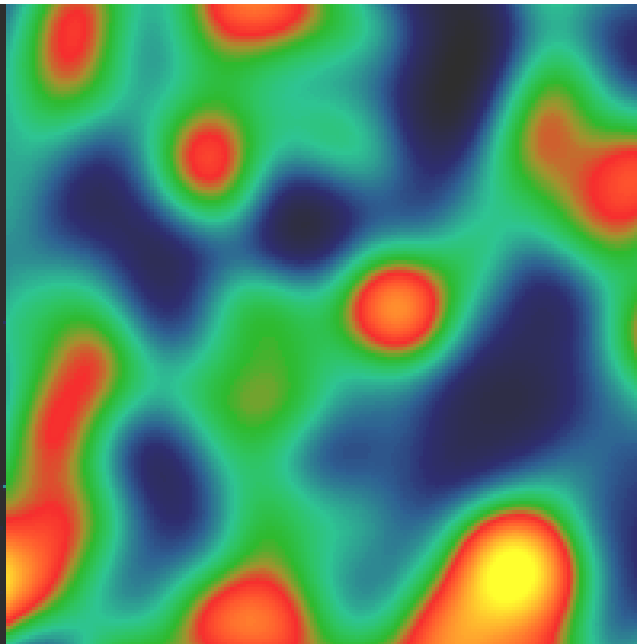


# 高分解能観測の利点

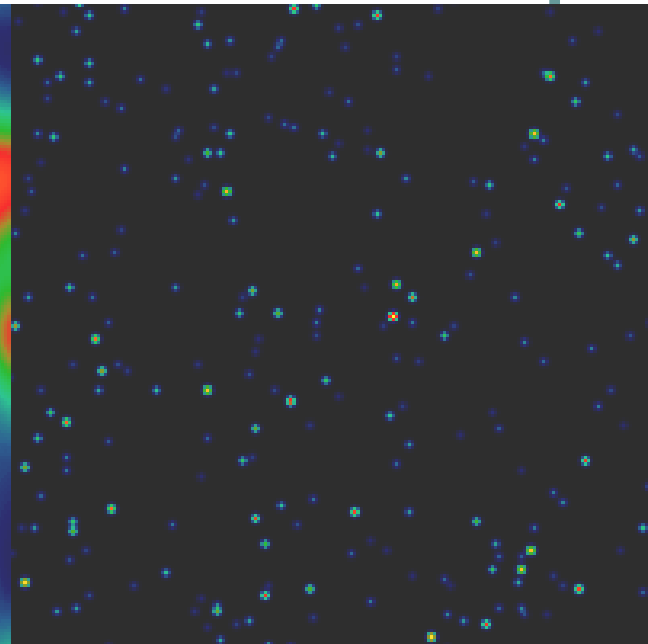
model



single dish



ALMA

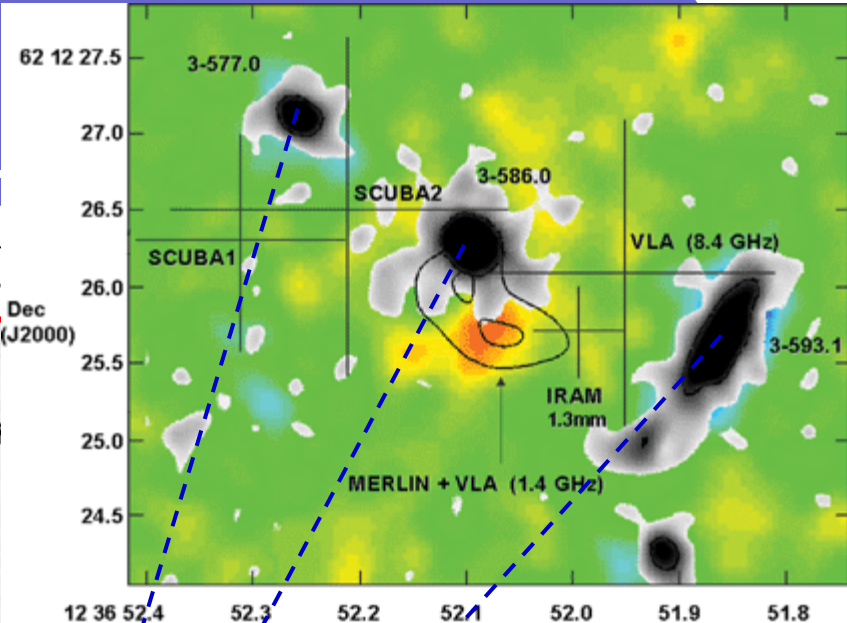
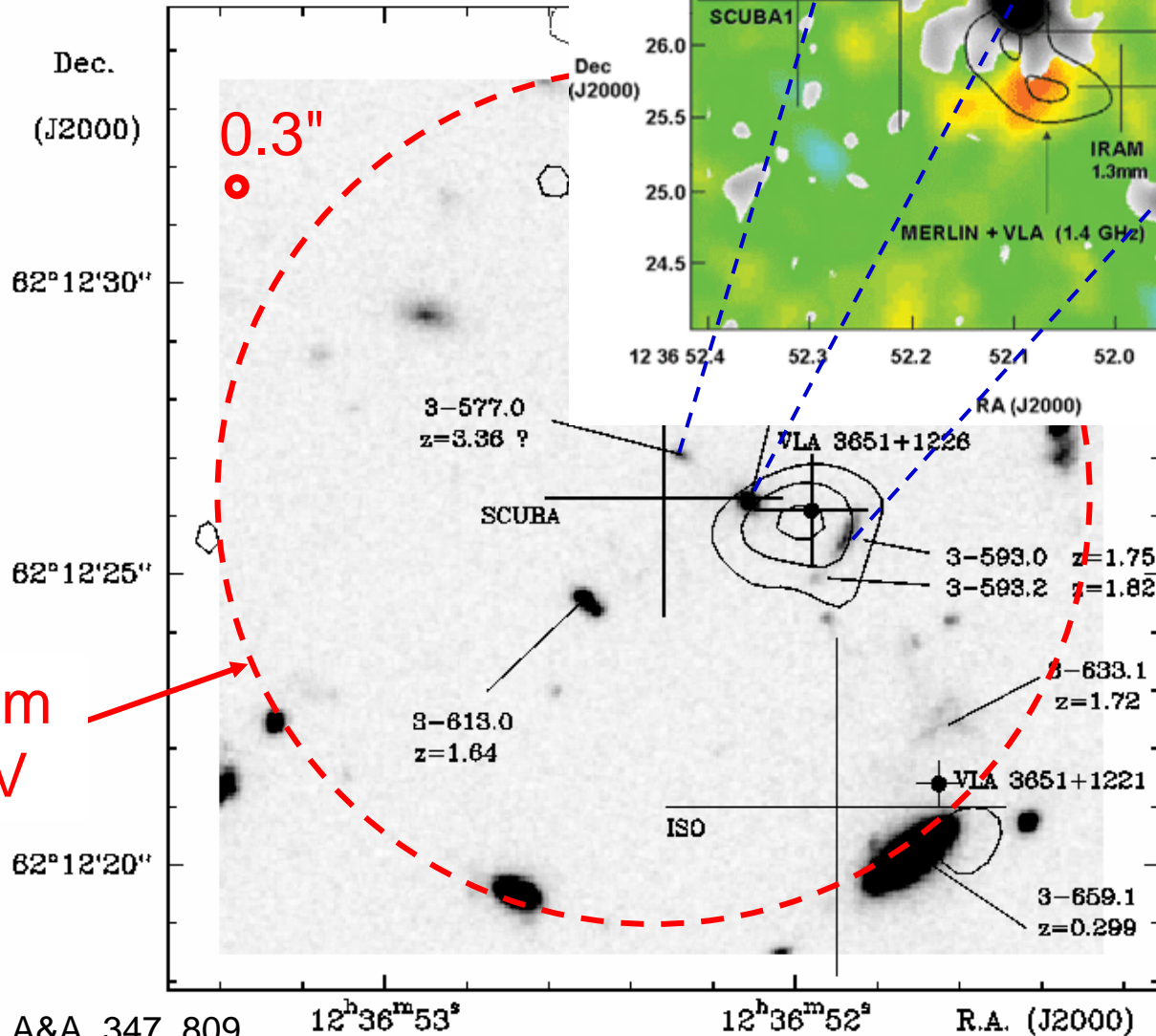




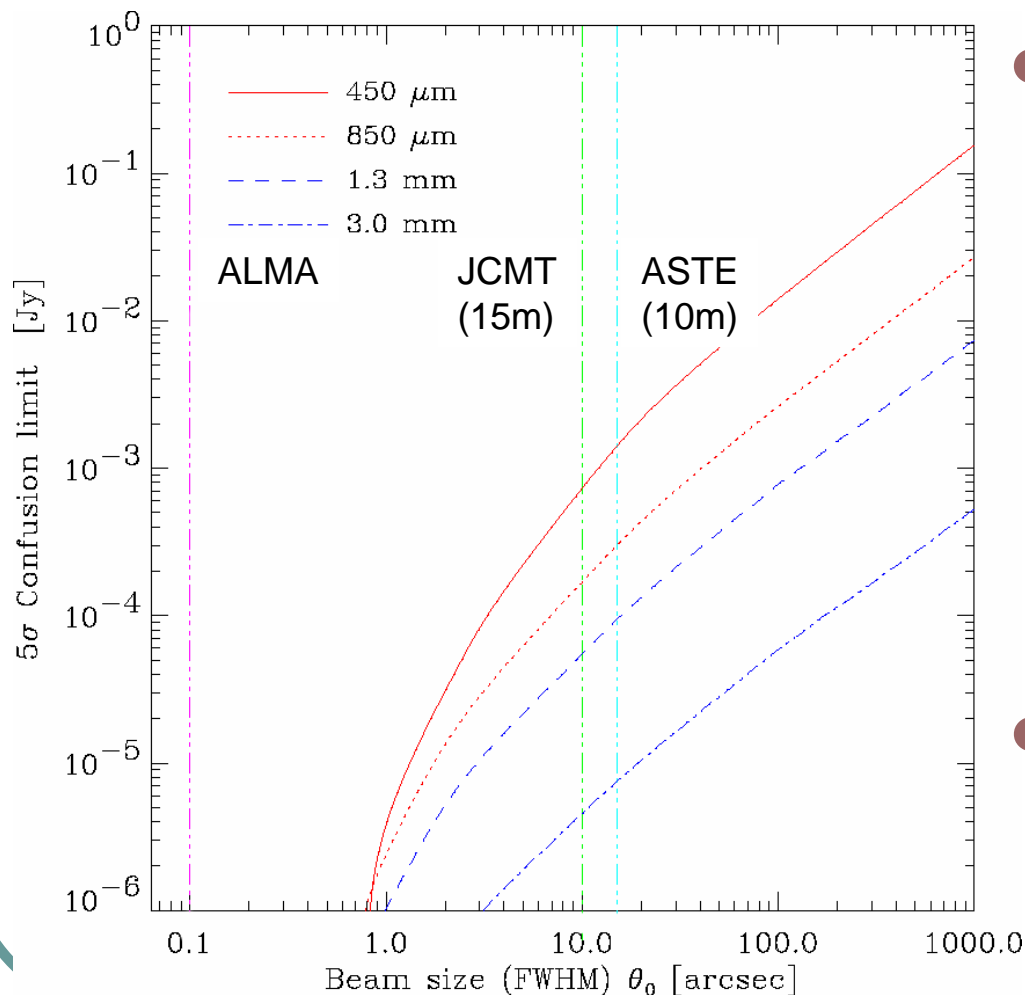
# 高分解能観測の利点

HDF 850.1

SCUBA beam  
ALMA FoV

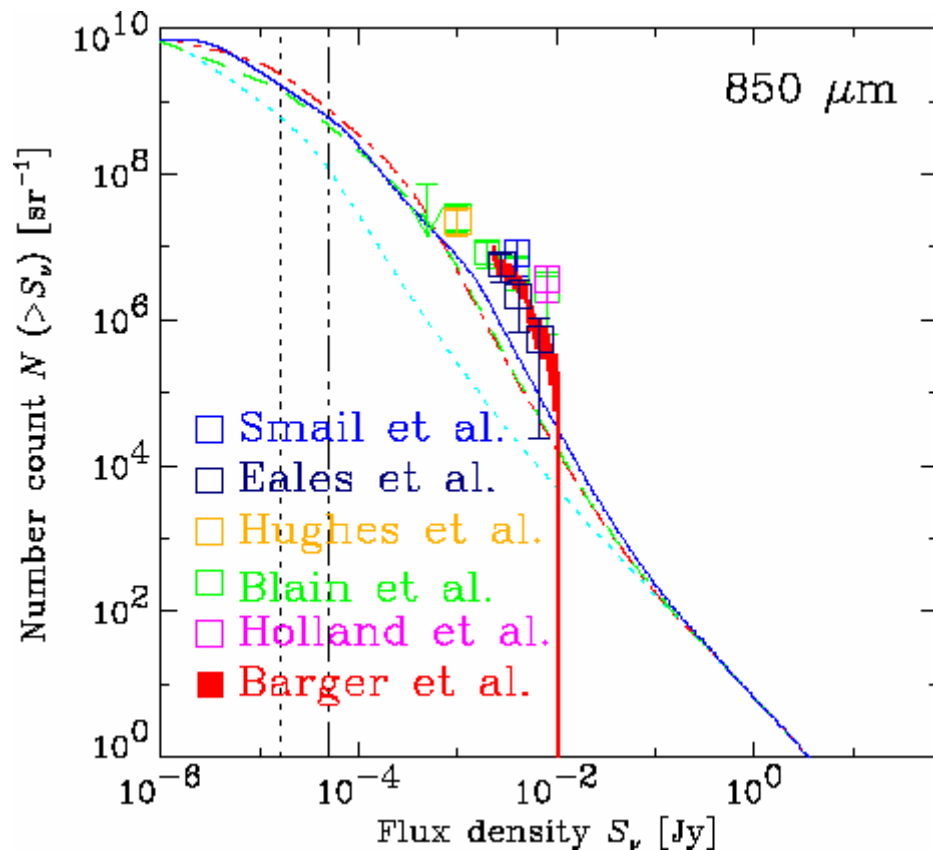


# 高分解能観測の利点：検出限界



- 解像度  $< 1''$  ならばコンフュージョンによる検出限界が SCUBA よりも 3桁程度以上低い。感度が許せばサブ  $\mu\text{Jy}$  の世界へ。
- 裏を返せば、数  $\text{mJy}$  レベルの浅いサーベイは無駄？

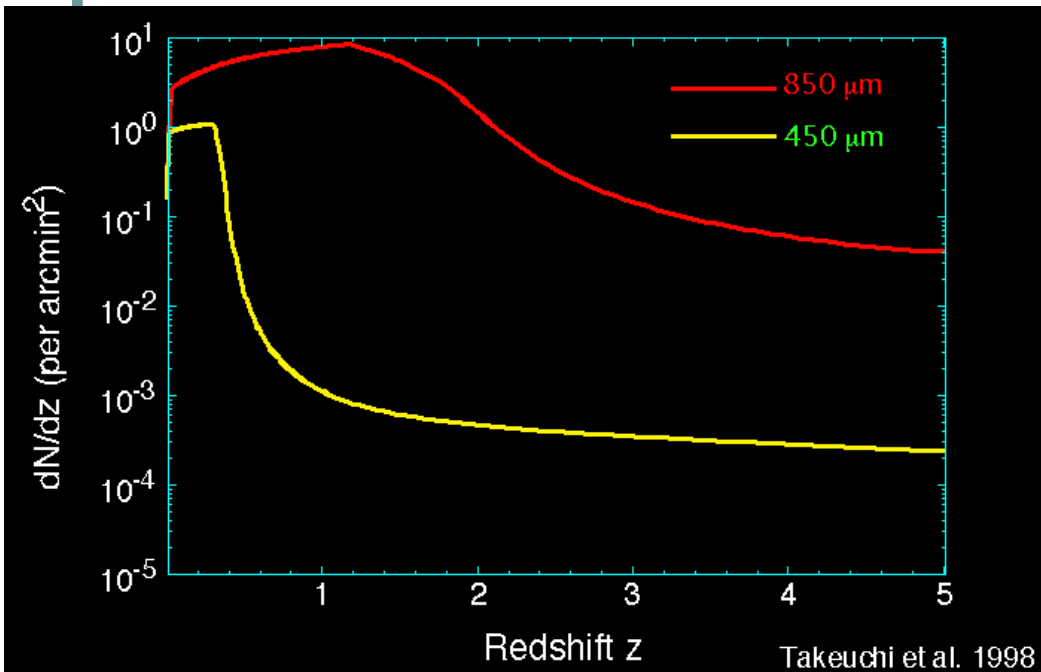
# 銀河計数



- ALMAで銀河計数のfaint endへ。
  - on-source積分8時間で  
~20  $\mu\text{Jy}$ に到達。
- bright endはBLASTなど小口径でOK。

The galaxy number count at 350 GHz expected by ALMA

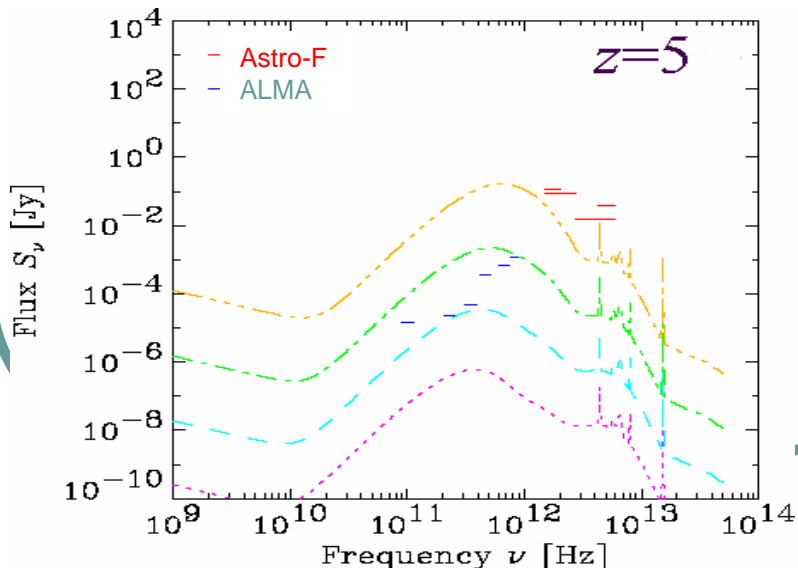
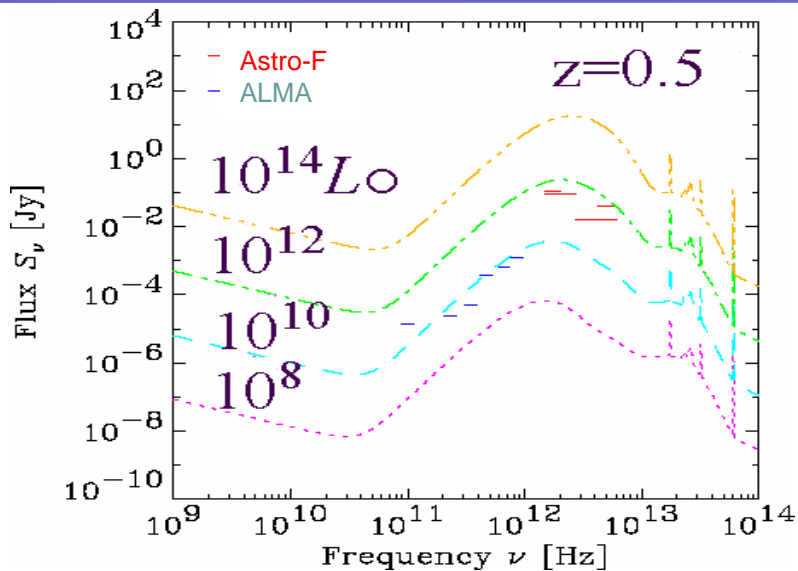
# 期待される赤方偏移の分布



- 850  $\mu\text{m}$ 天体の約半数は $z > 1$ 。
- 極めて多数のhigh- $z$ 天体。
- 比較的一様なサンプルを構築。

The number (per unit  $z$ ) of detectable objects with ALMA Deep Field as function of redshift ( $5\sigma$  sensitivity = 100  $\mu\text{Jy}$  @ 850  $\mu\text{m}$ )

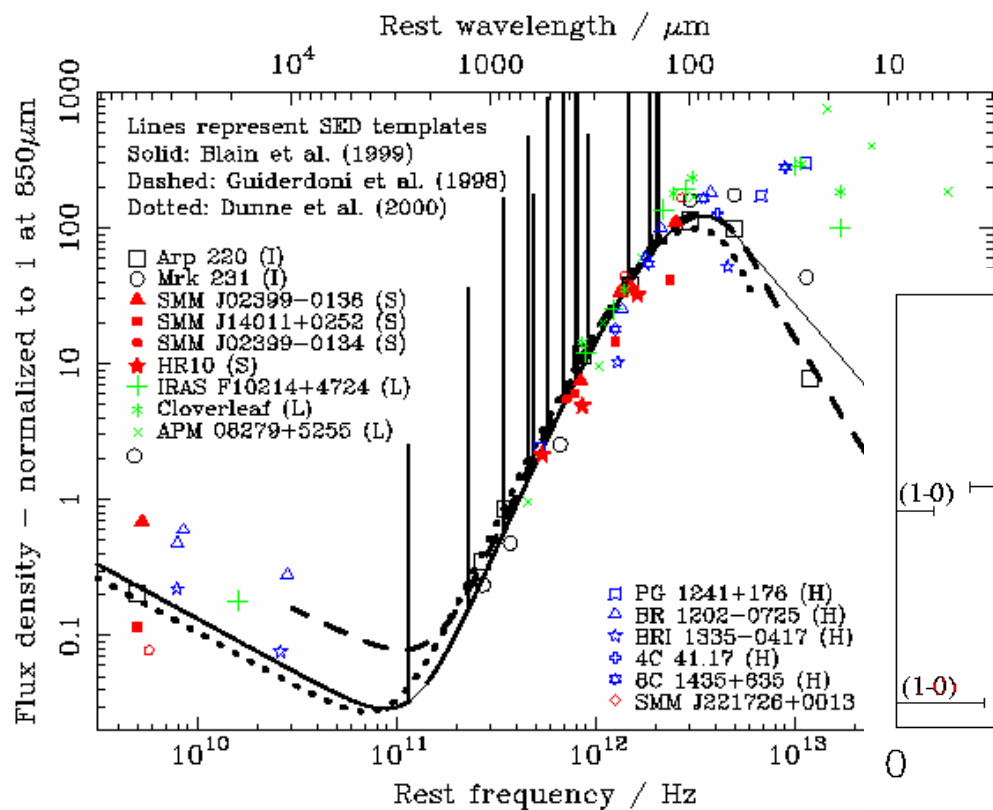
# 赤方偏移の推定



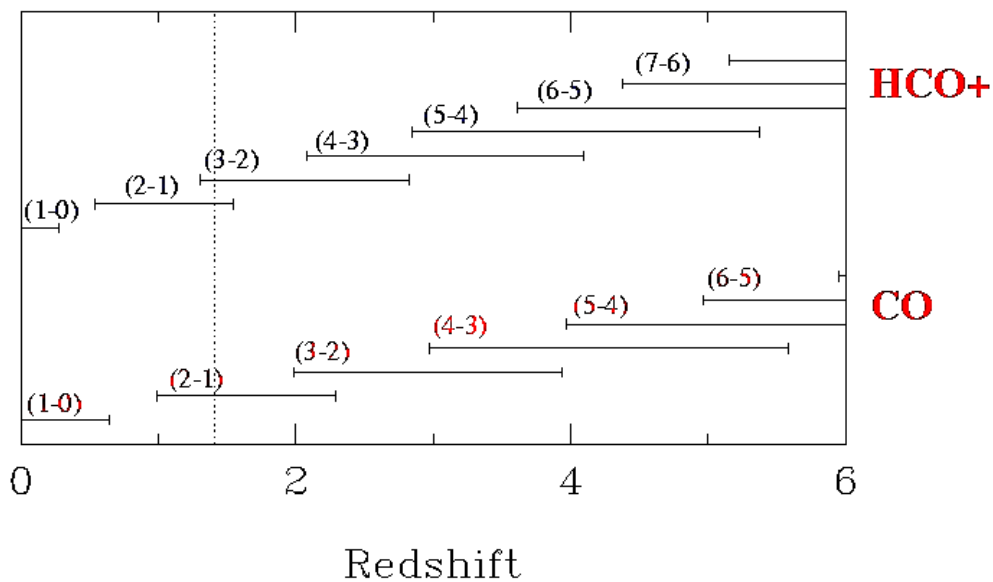
- high- $z$ 天体 ( $z > 3-5$ ) と low- $z$ 天体 ( $z < 0.5-1$ ) は遠赤外からミリ波に至るSEDで容易に区別できる。
- このような“dust- $z$ “は、そこそこ機能する。
- 明るい天体は輝線観測でフォローアップ。

Sensitivities of ALMA (blue) and Astro-F (red) with model SEDs

# 赤方偏移の決定



Frequency coverage of  
 CO and HCO<sup>+</sup> over the  
 3 mm band (70-116 GHz)



# 形成中の銀河：分子吸収線系

- 質量の定量化が困難 (CO  $J=1-0$ はALMAでは観測不能)
- 活動性が低い領域は背景放射と熱平衡になり見えなくなる

銀河系 @ high-z は  
銀河中心だけが  
光って見える？

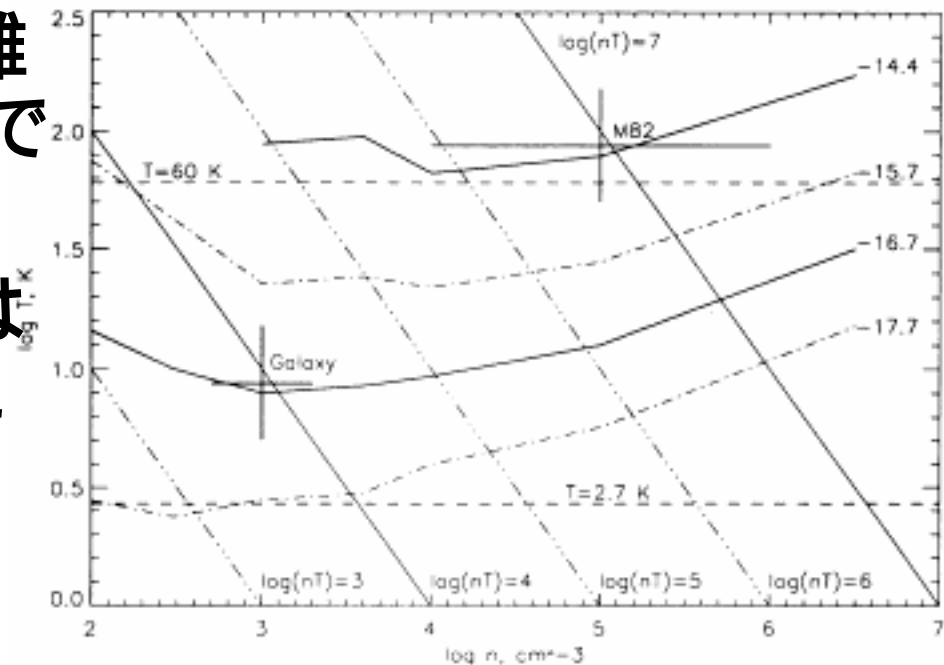
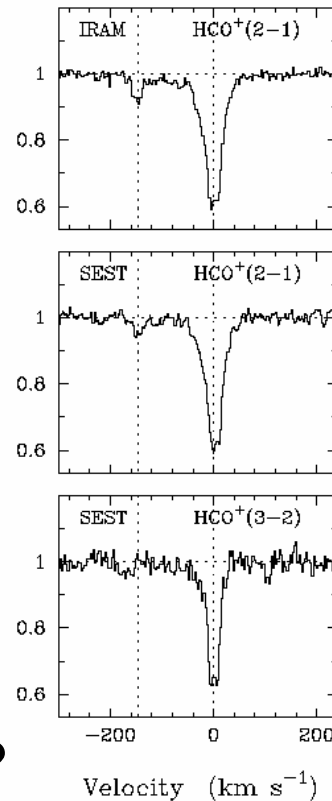


FIG. 1.—Temperature of molecular gas which is heated by cosmic rays and cooled by molecular-line emission (*curved lines*). The lines are labeled by the values of  $\log \zeta, s^{-1}$ , for which the equation of thermal balance has been solved. Emphasized are the lines  $\log \zeta = -16.7$  and  $\log \zeta = -14.4$  (*solid*) which correspond to the primary ionization rate in the Galaxy and M82, respectively. Also emphasized are two lines of constant pressure,  $nT = 10^4$  and  $10^7 \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ , for the general ISM pressure in the Galaxy and in the center of M82, respectively (the pressure in the Galactic GMCs is probably  $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ ; see Blitz 1992). Crosses display the range of estimates of density and temperature of molecular “clumps” within GMCs in the Galaxy (e.g., Blitz 1992) and molecular gas in M82 (see text for details). Indicated in the maximal temperature,  $T = 60 \text{ K}$ , for which molecular-line cooling was calculated by Goldsmith & Langer (1978).

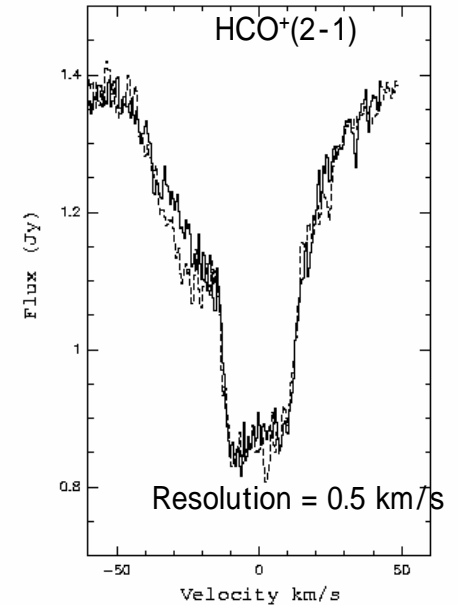
# 分子吸収線系の観測例

- 輝線で検出されない「準熱平衡」のガス雲の検出
- 化学的な進化
- 銀河中心核トーラスの検出
- 高空間分解能でのガス雲の運動の調査
- その他
  - CBRの温度の時間変化
  - 微細構造係数の時間変化?



PKS 1830-211

$$Z_{\text{abs}} = 0.886$$



Wiklind & Combes (1997)

CS(3-2), CS(4-3), HCN(2-1), HCN(3-2), HCO<sup>+</sup>(2-1),  
HCO<sup>+</sup>(3-2), HNC(2-1), HNC(3-2), N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(2-1),  
N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(3-2), H<sub>2</sub>CO(2<sub>11</sub>-1<sub>10</sub>), H<sup>13</sup>CN(2-1), H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>(2-1),  
H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>(3-2), H<sub>2</sub>CO(2<sub>11</sub>-2<sub>12</sub>), HC<sub>3</sub>N(3-2), HC<sub>3</sub>N(5-4),  
C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>(2<sub>12</sub>-1<sub>01</sub>), H<sup>13</sup>CN(1-0), H<sup>13</sup>CN<sup>+</sup>(1-0), HN<sup>13</sup>C(1-0),  
C<sub>2</sub>H(1-0), HCN(1-0), HCO<sup>+</sup>(1-0), HNC(1-0)



# 分子吸収線系のトレーサとは

## ● 分子種の選定基準

- 存在量が豊富なこと
- 存在量が安定していること
- 臨界密度・臨界温度が高いこと

OH, CH

Note. — (1): Parameters are tabulated only for the main isotopes consisting of  $^1\text{H}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{19}\text{F}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{35}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{K}$ , and  $^{40}\text{Ca}$ , except for HD.

(2): Permanent dipole moment from Pickett et al. (1992) and references therein, except for MgH (Meyer & Rosmus 1975).

(3): Total absorption cross section  $8\pi^3\mu^2/3h$ .

(4): Critical temperature of  $J + 1 \rightarrow J$  transition calculated from the rotational constant from Pickett et al. (1992) and references therein.

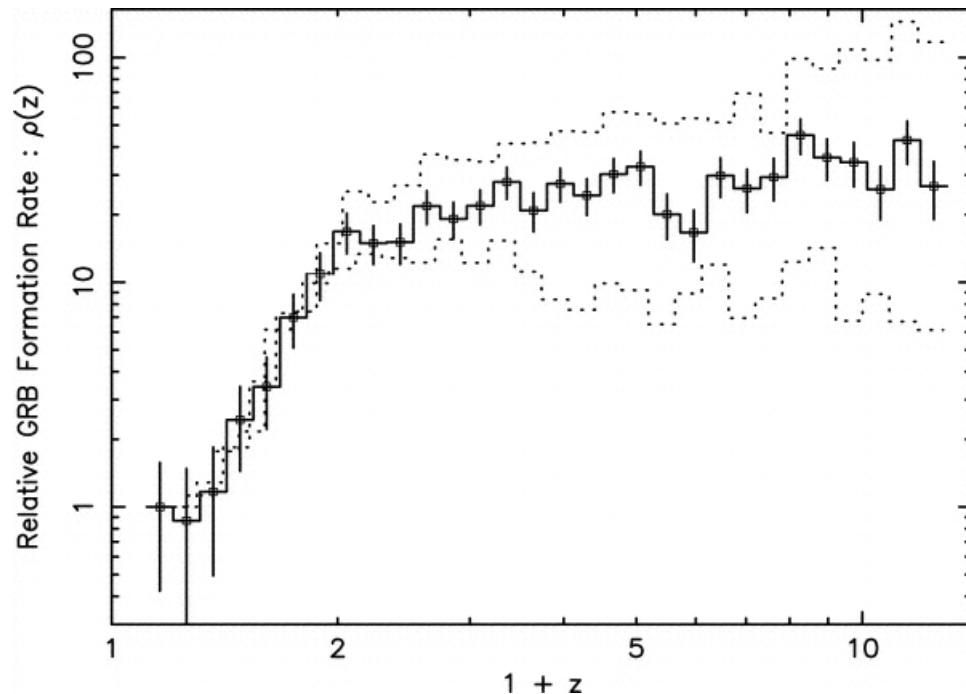
(5): Dissociation energy from Huber & Herzberg (1979).

(6): Fractional abundance in interstellar clouds.

Species	$\mu$ (Debye)	$\log \sigma_{\text{tot}}$ ( $\text{cm}^2$ )	$2hB/k$ (K)	$D_0^{\dagger}$ (eV)	$\log Z_{\text{PQ}}$	Refs
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
H <sub>2</sub>	...	...	...	4.48	0.00	
HC <sub>5</sub> N	4.330	-6.63	0.13		-9.89	1
HC <sub>3</sub> N	3.724	-6.76	0.44		-9.89	1
OCS	0.715	-8.20	0.58		-7.28	2
SO	1.55	-7.52	2.07	5.36	-6.28	2
SiO	3.098	-6.92	2.08	8.26	-7.55	2
CS	1.957	-7.32	2.35	7.36	-8.60	1
HCN	2.984	-6.95	4.25		-8.30	1
HCO <sup>+</sup>	3.30	-6.87	4.28		-8.64	1
HNC	3.05	-6.94	4.35		-8.30	1
NO	0.15872	-9.50	4.88	6.50	<-7.3	1
CN	1.45	-7.58	5.44	7.76	-8.48	1
CO	0.1098	-9.82	5.53	11.09	-4.30	1
KH	8.136	-6.08	9.71	1.86		
CaH	1.07	-7.97	12.17	<1.70		
NaH	6.7	-6.25	13.91	1.88		
MgH	1.28	-		1.34		
AlH		-		<3.06		
SiH		-		<3.06		
PH		-		3.02		
NH		-		<3.47		
LiH	5.882	-6.36	21.31	2.43	-10.0	5
HCl	1.109	-7.81	30.04	4.43	-8.0	4
CH	1.46	-7.58	40.84	3.47	-7.7	3
OH	1.667	-7.46	53.38	4.39	-6.5	3
HF	1.826526	-7.38	59.16	5.87		
HD	0.000585	-14.37	128.53	4.51	<-4.1	6

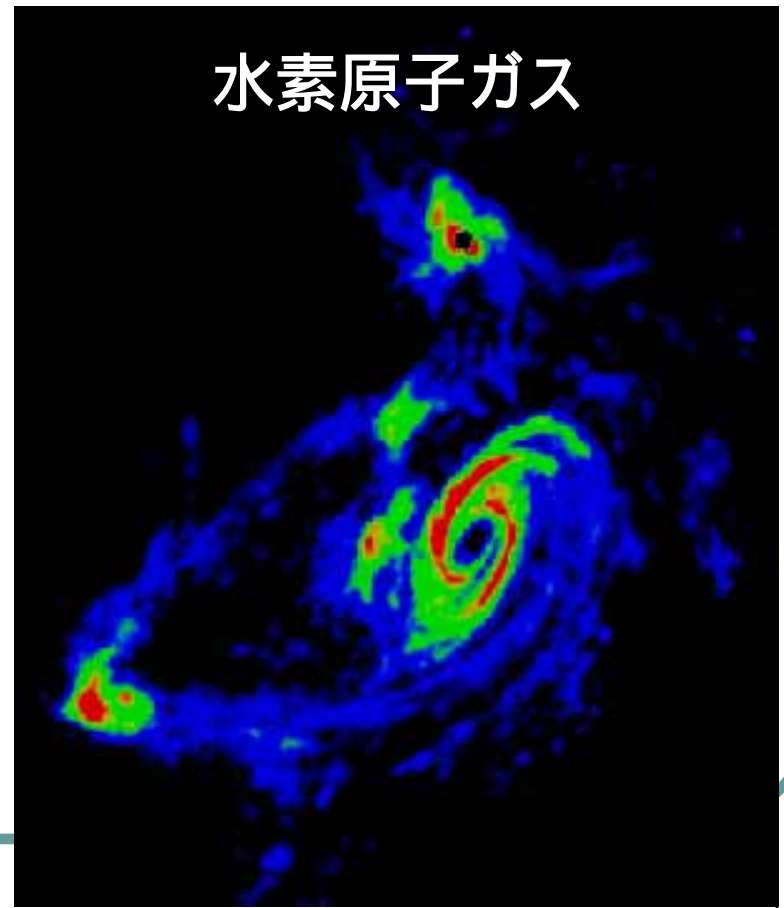
# 宇宙の星形成史

- Madau以来、上方修正中。
- ダスト吸収の影響は本当に補正できているのか？
- Extinction-freeな世界へようこそ



# 形態分化

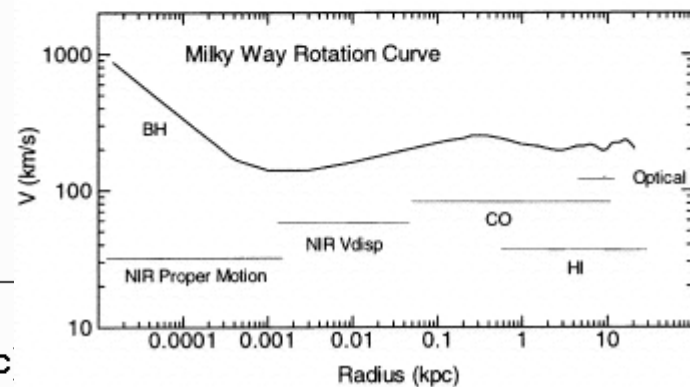
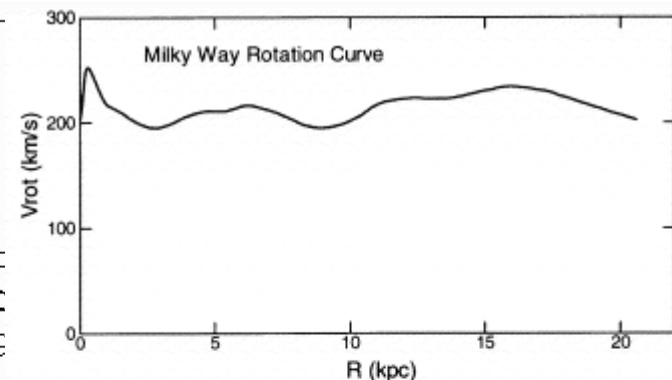
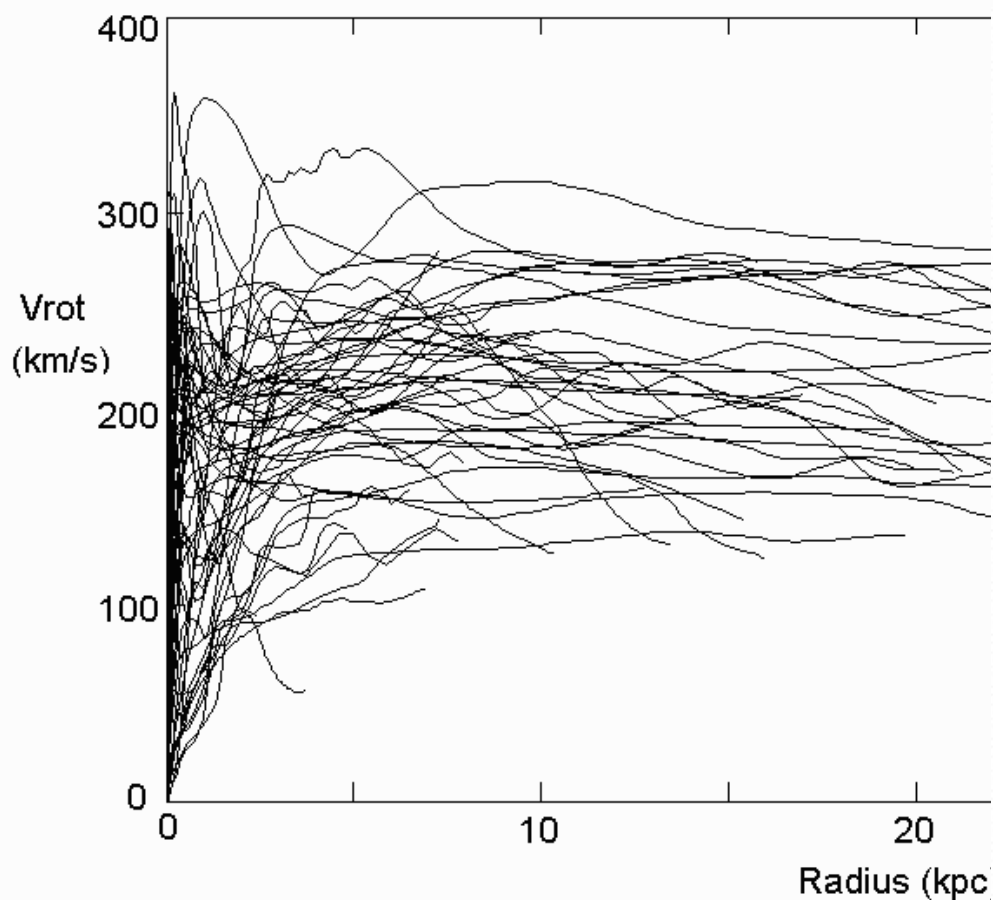
- 星間物質で探るmerging history



# 銀河構造

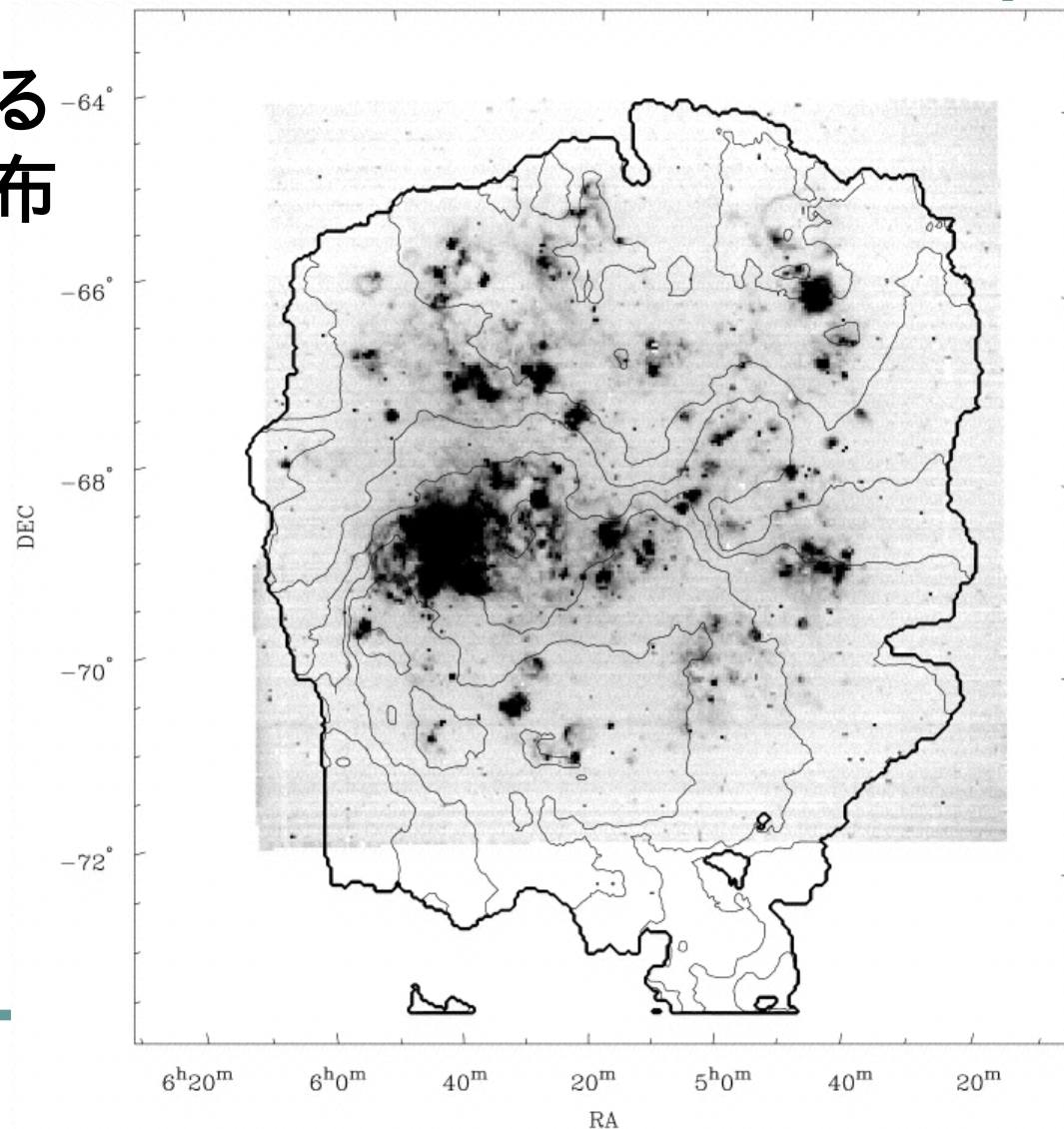
- 回転曲線を利用した質量マッピング
    - HI / CO / maser
  - 銀河の3次元構造
    - 空間構造
    - 速度構造
- 位置天文学的アプローチ含む

# 回転曲線による質量マッピング



# DMの分布

- 不規則銀河における力学中心と星の分布の不一致
- DMの構造形成



# 星間物質の進化

- 関与する多様なプロセス
  - 収縮・圧縮・膨張・散逸  
自己重力、銀河衝撃波(動圧、分子雲衝突)、SNR、磁場、潮汐力、、、
  - 冷却  
金属量、組成、、、
  - 加熱  
UV、宇宙線、、、

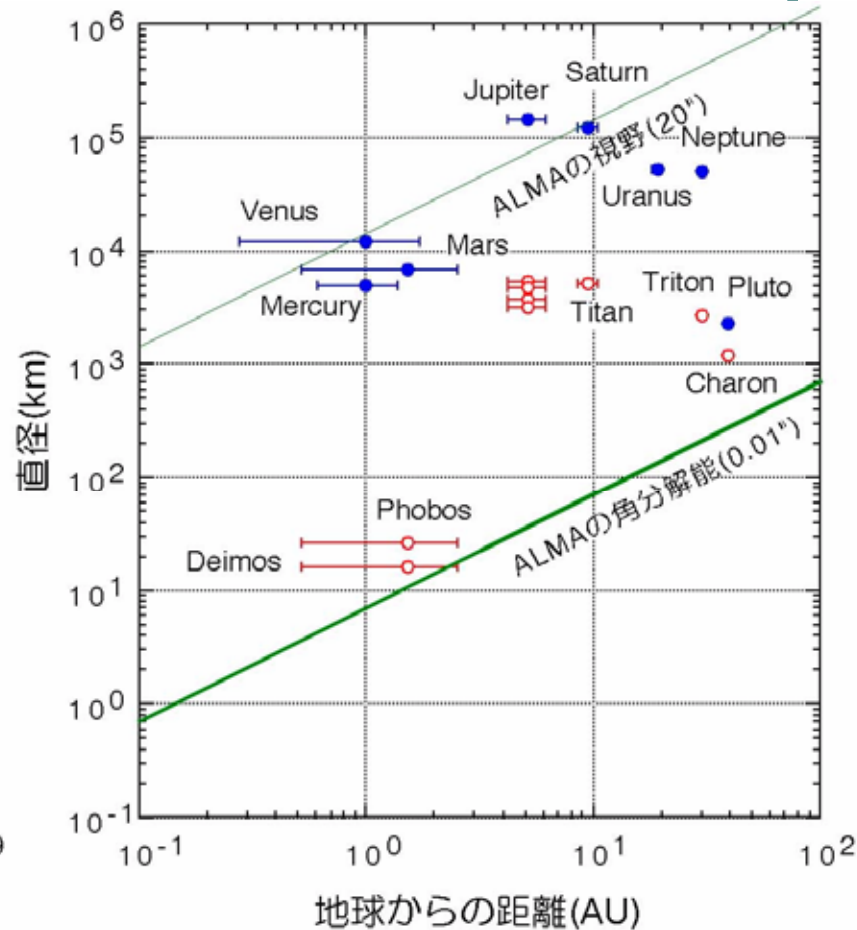
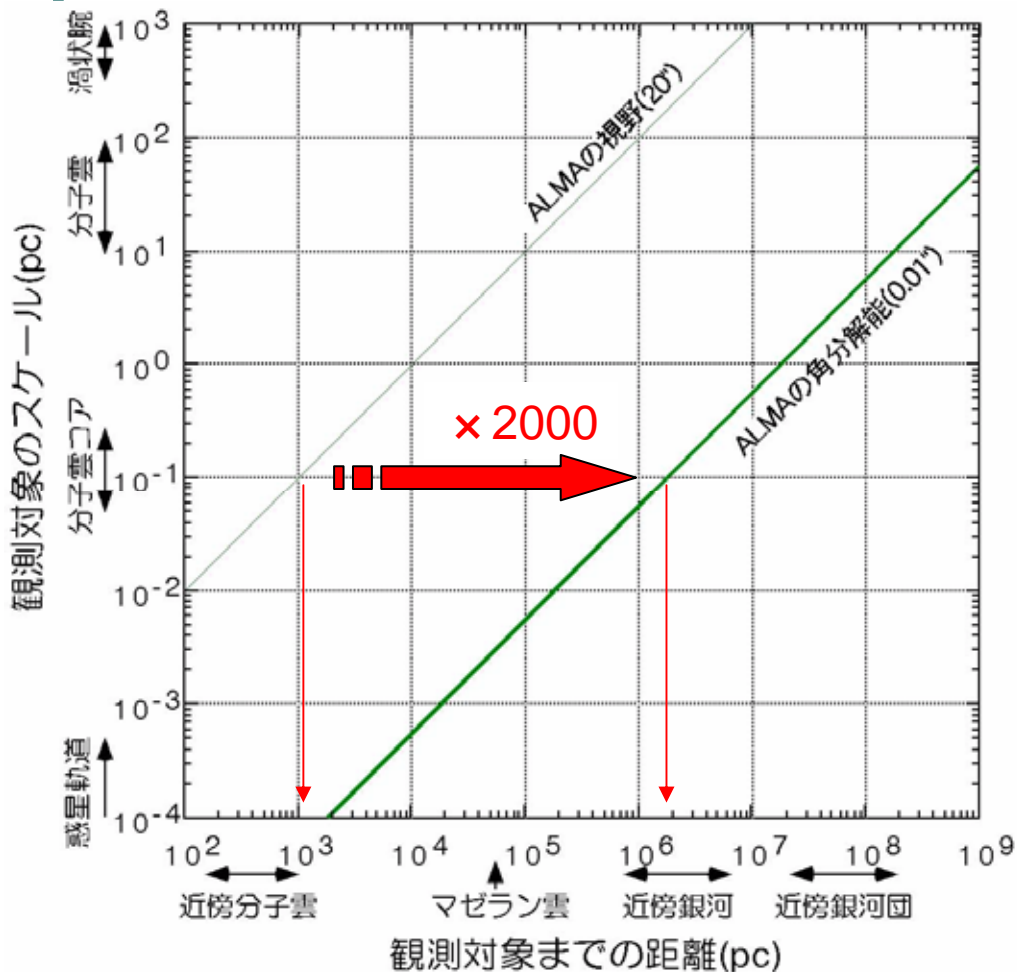
- 多様な空間スケール
- 多様な時間スケール
- それぞれが複雑に関与

宇宙物理だけの特殊事情ではない(ホリスティックアプローチ)

数値シミュレーションへのフィードバック



# 解像度の向上 系外銀河へ





# まとめ: SKAにどう取り組むか

- 熱的自由-自由放射 (e; 熱的)
  - 再結合線 (HII; unobscured)
  - 21cm線 (HI)
  - Faraday回転 (B)
  - シンクロトロン放射 ( $B \times e$ ; 相対論的)
  - メーザ ( $H_2O$ ,  $SiO$ , etc.)
  - ミリ波分子線 ( $CO$ , etc.  $H_2$ )
  - ミリ波サブミリ波連続波 (低温ダスト)
  - [CI] 492GHz線 (CI)
  - 
  - [CII] 157um線 (CII)
  - HD 112um線 (HD)
- |          |        |
|----------|--------|
| 電離ガス     |        |
| 電離ガス     |        |
| 原子ガス     | SKA    |
| 磁場       |        |
| 磁場       |        |
| 分子ガス     | VSOP-2 |
| 分子ガス     |        |
| 固体微粒子    | ALMA   |
| 原子-分子    |        |
| 原子-分子    |        |
| 分子 (始原的) |        |

# 21世紀の憂鬱

# 星間物質のトレーサについて

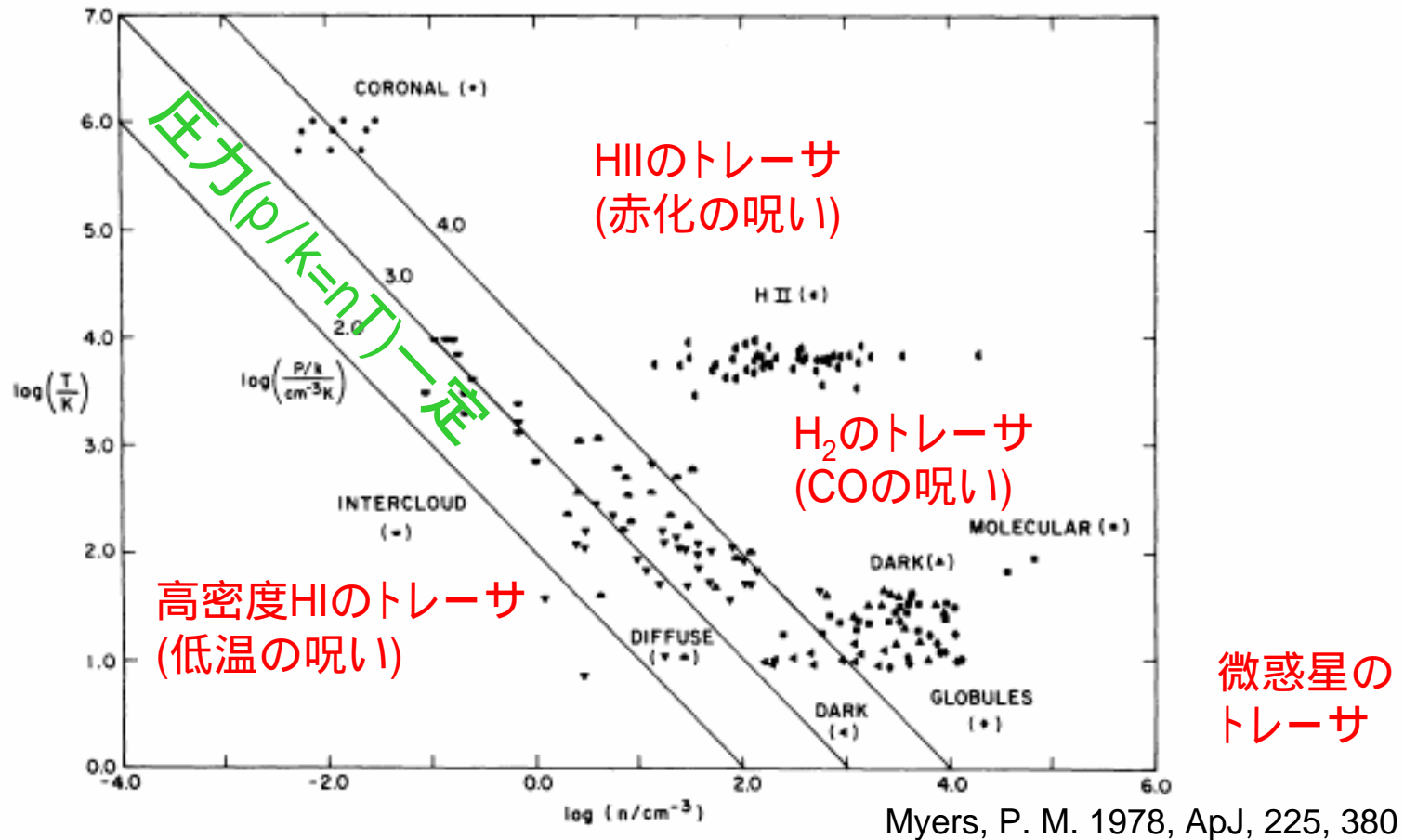


FIG. 1.—Interstellar gas temperature, density, and pressure, based on seven galactic spectral line surveys. Circles, representative points for coronal gas observed in 1032 Å O vi line, based on filling factor  $f_c = 0.1, 0.2,$  and  $0.4,$  and on  $n(T)$  power-law exponent  $\eta = 0.0, 0.5,$  and  $1.0;$  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 $\alpha$  line and 6 cm continuum.

# いつまで続くか「COの呪い」

- 発見後30年を経てなお健在
- CO-to-H<sub>2</sub> conversion
  - for high-J?
  - for high-z?
  - CO abundance? metalicity/fractionation/depletion
- dust-gas conversionとて同じ穴

宇宙年齢は有効数字3桁で決まったが、  
ガス質量には相変わらずファクター3の誤差があり、  
先(将来・high-z)の見通しもよくない。

# High- $J$ では状況は悪化

- high- $J$ 輝線の  $N(\text{H}_2)/I(\text{CO})$  変換係数は金属量だけでなく温度・密度に非常に敏感

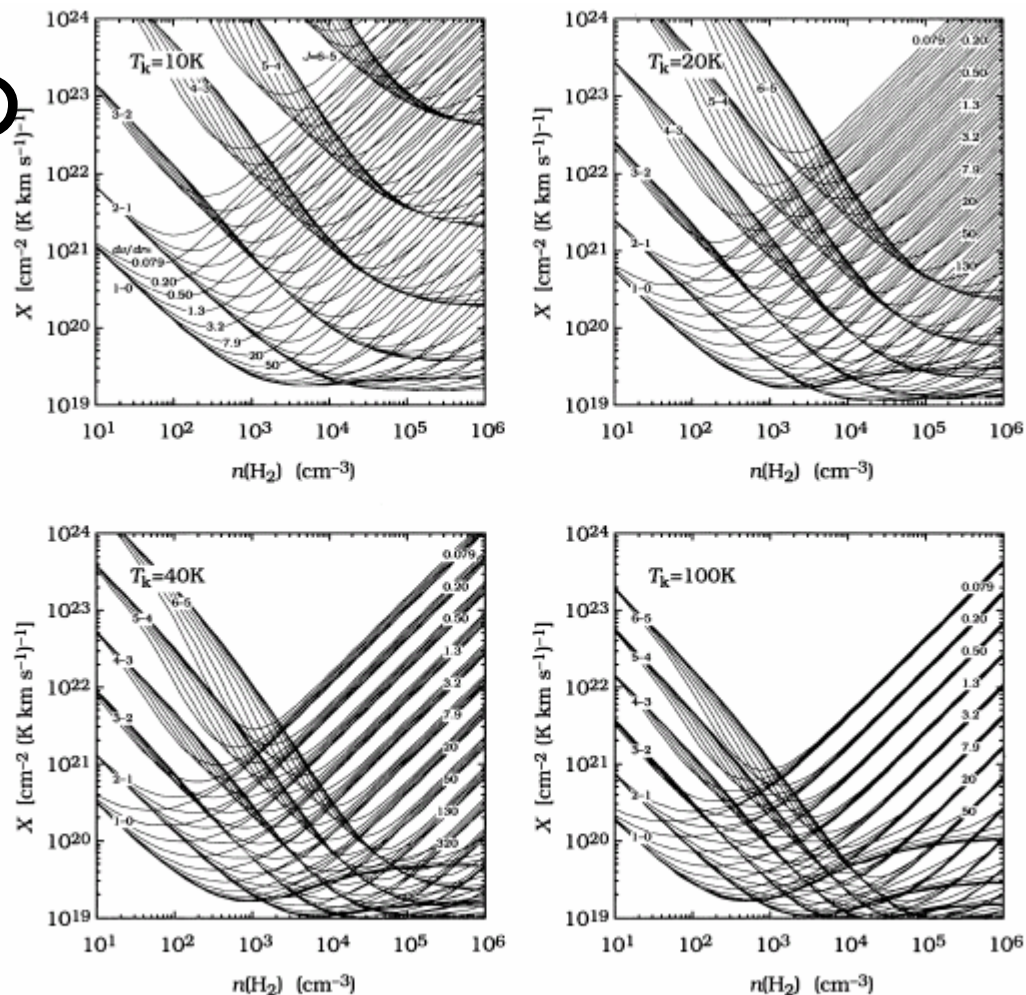


FIG. 2.—Density dependences of the CO-to-H<sub>2</sub> conversion factors for different values of the kinetic temperature and the velocity gradient at  $z = 0$ . Units of the velocity gradient are km s<sup>-1</sup> pc<sup>-1</sup>. The CO abundance and the cosmic background radiation temperature were set to be  $5 \times 10^{-5}$  and 2.726 K, respectively.

# おぼれるものはわらをもつかむ

- Toomre's Q
- Schmidt Law
- Cloud mass function