

星間物理学特論 part III

今井 裕

(鹿児島大学大学院理工学研究科物理科学専攻)

第3章

宇宙メーザー励起の仕組み

- 星間空間における分子形成
— 化学進化する星間ガス雲 —
- 既知のメーザー放射
 - “Classical masers”: OH, H₂O, SiO
 - その他のメーザー:
CH₃OH, HCN, HCOH, recombination lines
- くみ上げ機構の研究の実際
 - radiative pumping, collisional pumping
 - 何を見ればくみ上げ機構が判明する？

星間空間における分子形成

- 地球上での分子間衝突：**反応熱の発生**
 - 反応熱の持ち去り：反応が次々と進む（逆反応が起こりにくい）
 - エネルギーバリアを越えられるエネルギーが供給される
- 宇宙空間での分子間衝突の問題点
 - 分子同士が遭遇する確率が低い
ただし水素分子とだけは遭遇しやすい
 - エネルギーバリアが高い：
電荷を持たない中性分子同士の反応は難しい
 - 逆反応によって分子が解離される
- 星間化学： 星間空間における化学反応の研究
 - 星間塵（**Si**, **C**などの**重元素**から成る固体粒子）上での**H₂**合成
※宇宙初期には星間塵はない⇒ H₂ではなく**H**が主成分
 - イオン-分子反応（Eバリアなし）：**A⁺ + H₂ → AH⁺ + H**
 - ※星間（背景）紫外線： 多数のOB型星からの放射、**H⁺**形成
 - ※紫外線が届かない分子雲内部：**高エネルギー宇宙線**が寄与

「化学進化」する星間ガス雲

- 元素組成の進化—「宇宙の化学進化」~ 10^9 年

- 宇宙初期: **H, He, (Li)**のみ

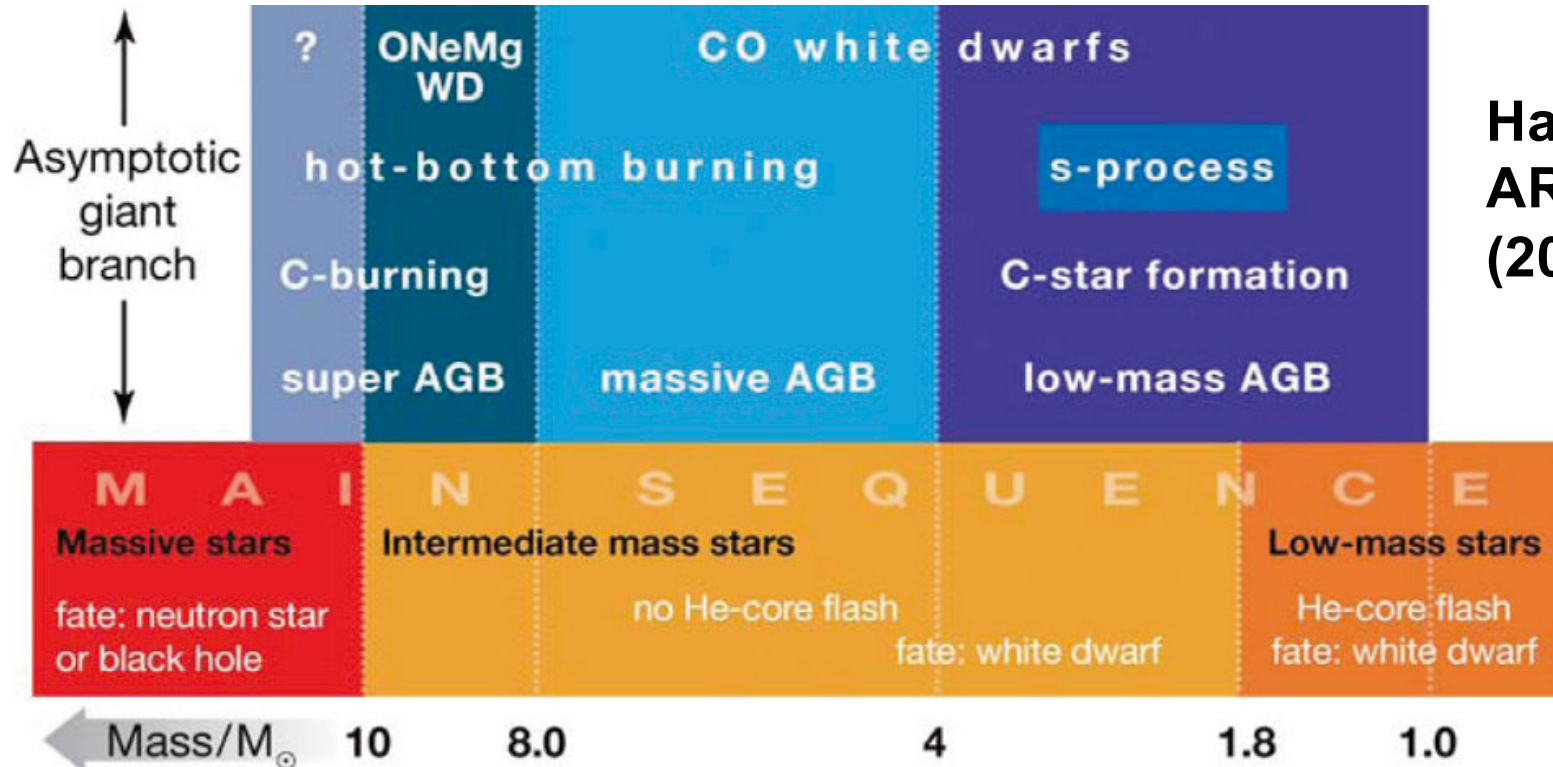
- 恒星内部での元素合成

- **C**: 小質量星 ($M_* < 1.8 M_{\text{sun}}$)

- **F, O, N, Ne, Mg**: 中質量星 ($1.8 M_{\text{sun}} \leq M_* \leq 10 M_{\text{sun}}$)

- **Si, Mn, Co, Fe, Au, ...**: 大質量星 ($M_* > 10 M_{\text{sun}}$)

水素再結合線以外は、宇宙初期ではメーザー放射は期待できない

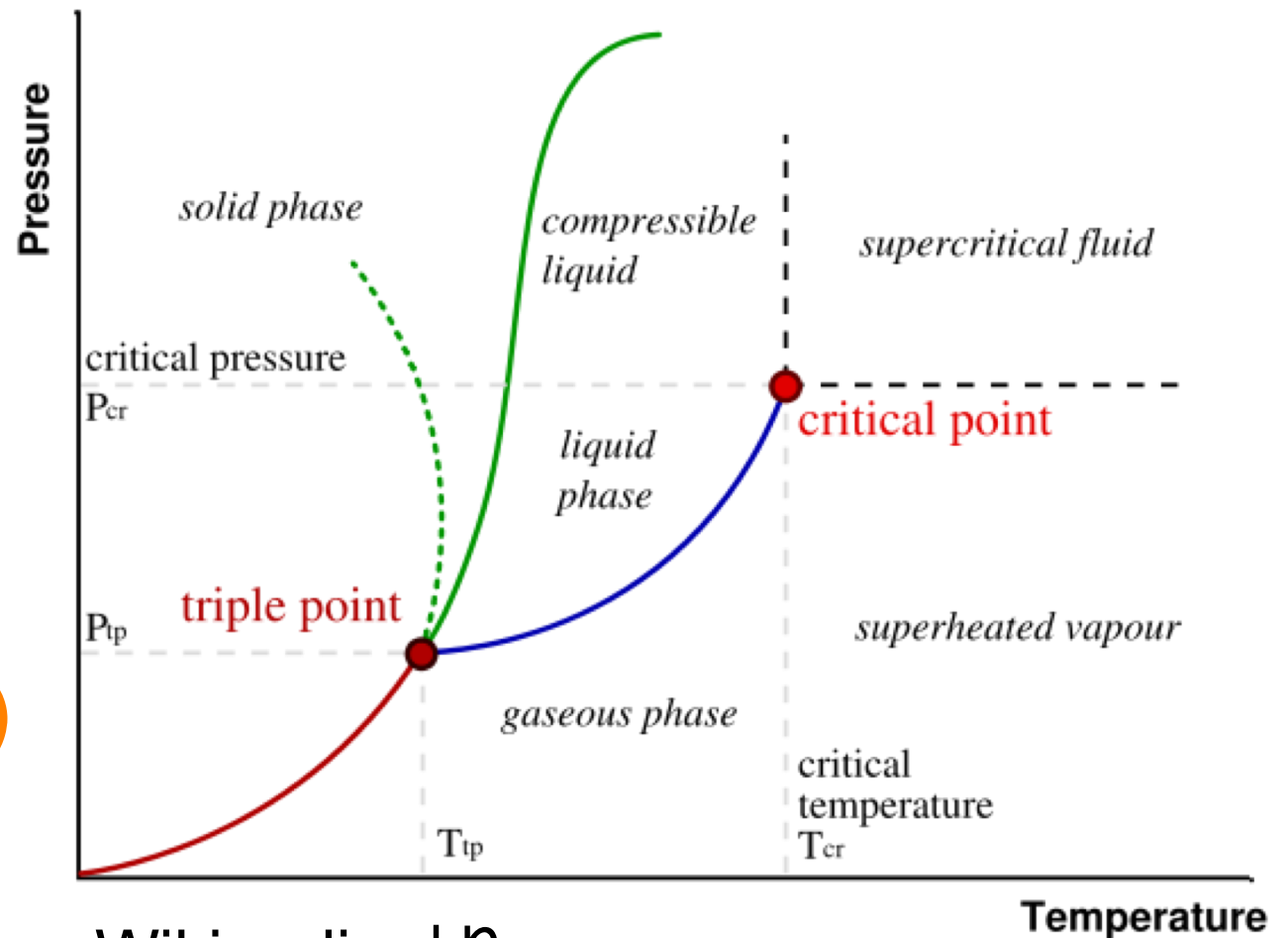


Harwig
ARA&A, 43, 435
(2005)

恒星からの
質量放出
の仕組みに
掛かっている

宇宙空間では主に気相か固相

- 三重点が高(>1000K)物質：主に金属(Si, Fe化合物等)
- 三重点が低い (<10K)物質：H₂, He等)
- あまり高温だと
普通解離
(分子が壊れる)・
電離する
- 地球大気・海は
結構高圧だが
温度は中間
(habitable zone)

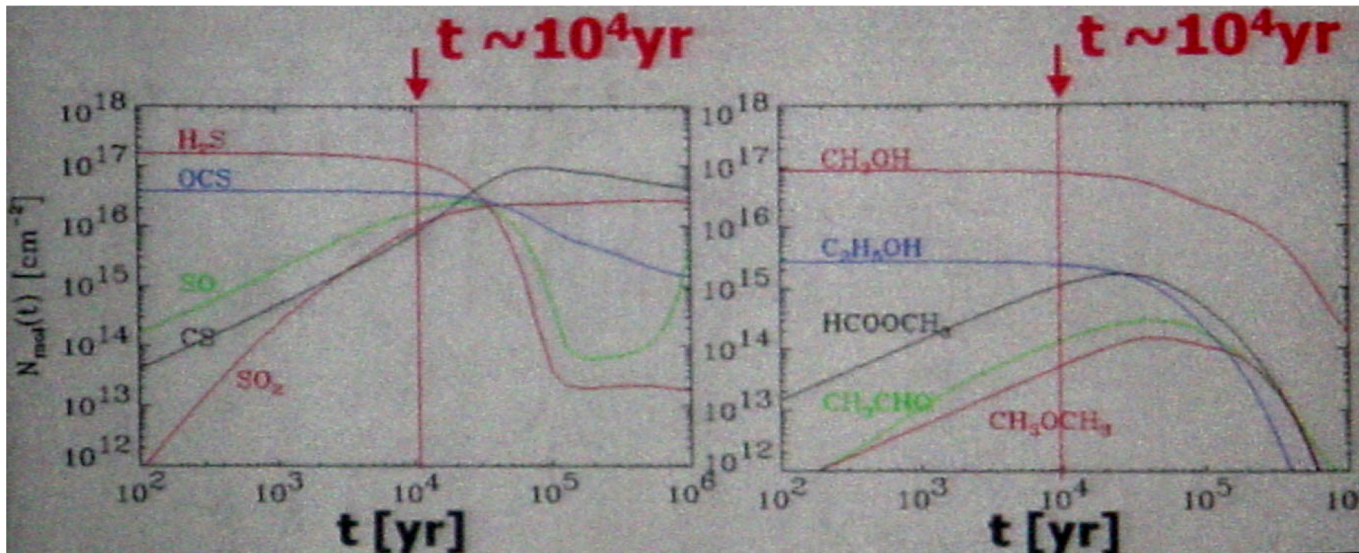


Wikipedia より

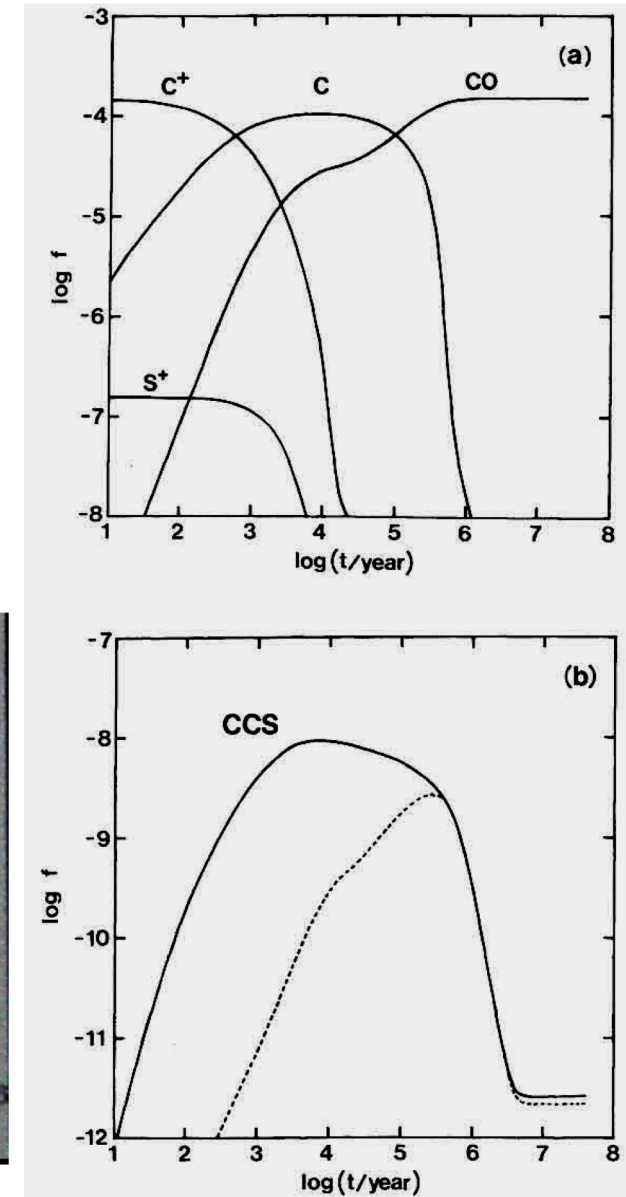
「化学進化」する星間ガス雲

- 星間分子雲中の分子合成 $\sim 10^6$ 年
 - イオン分子反応
 - 星間ガスの冷却・高密度化:
星間塵の形成、分子の塵への吸着
 - 星形成による加熱:
星間塵の蒸発(気相へ)
紫外線放射による解離

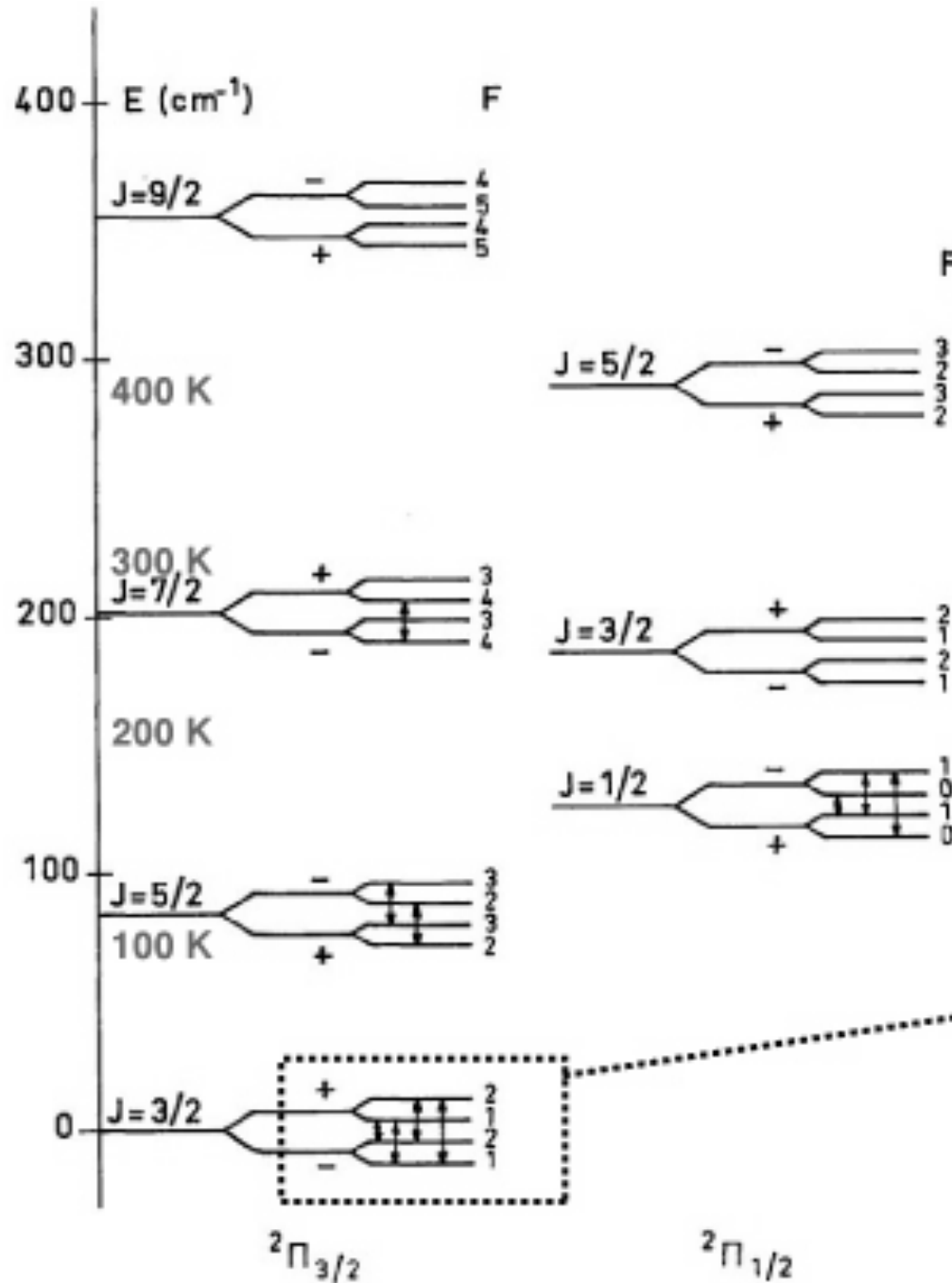
Nomura (2008) (研究奨励賞受賞記念講演)



Suzuki et al. (1992)

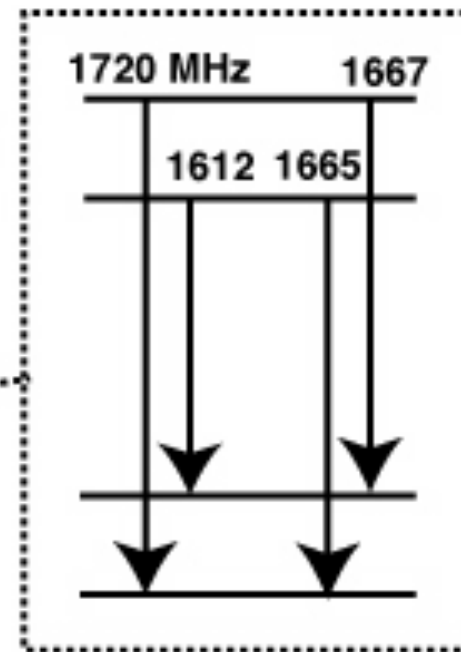


Classical masers: OH



スピンを含めた微細構造によるEレベル分裂

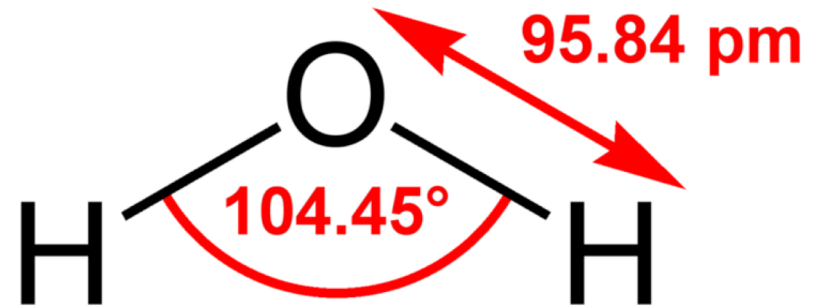
- 1.6 GHz
- 6.0 GHz
- 13.4 GHz



Classical masers: H₂O

- H₂Oの回転遷移状態

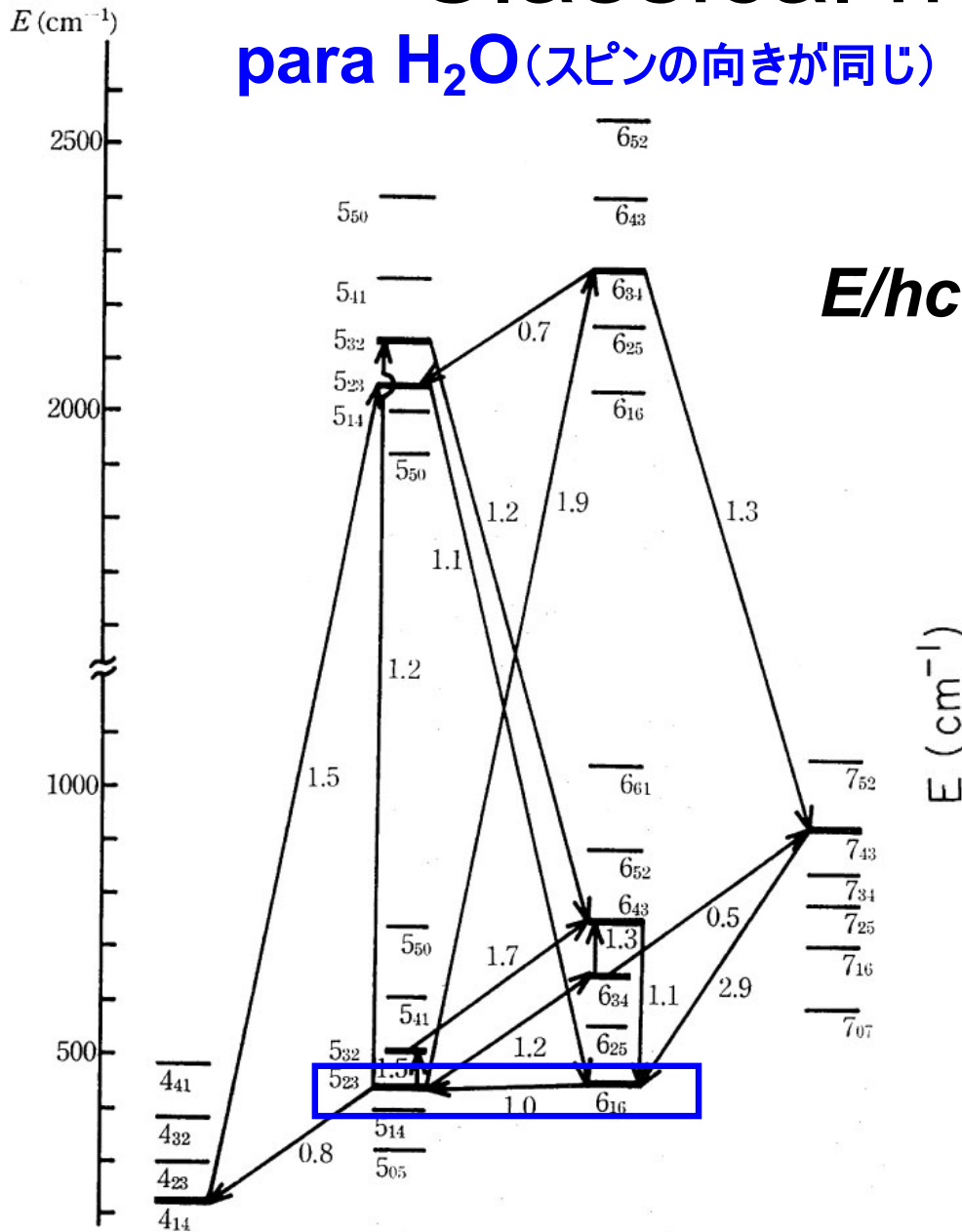
$$J_{K_- K_+}$$



- J : total angular momentum
- K_-, K_+ :
angular momentum projected on two molecular axes
- 放射遷移における選択則: $\Delta J=0, \pm 1$
- 放射遷移において全く関わらない2種の水蒸気
 - ortho-H₂O (K_-, K_+)=(奇数, 偶数) or (偶数, 奇数): 核スピン数1
 - para-H₂O (K_-, K_+)=(偶数, 偶数) or (奇数, 奇数): 各スピン数0
- 地球大気よりもずっと高いエネルギー準位における現象:
地球大気によってはほとんど吸収されない ($J>4$ の場合)

Classical masers: H₂O

para H₂O (スピンの向きが同じ)



Deguchi (1977)

E/hc

E (K)

1400

1200

1000

800

600

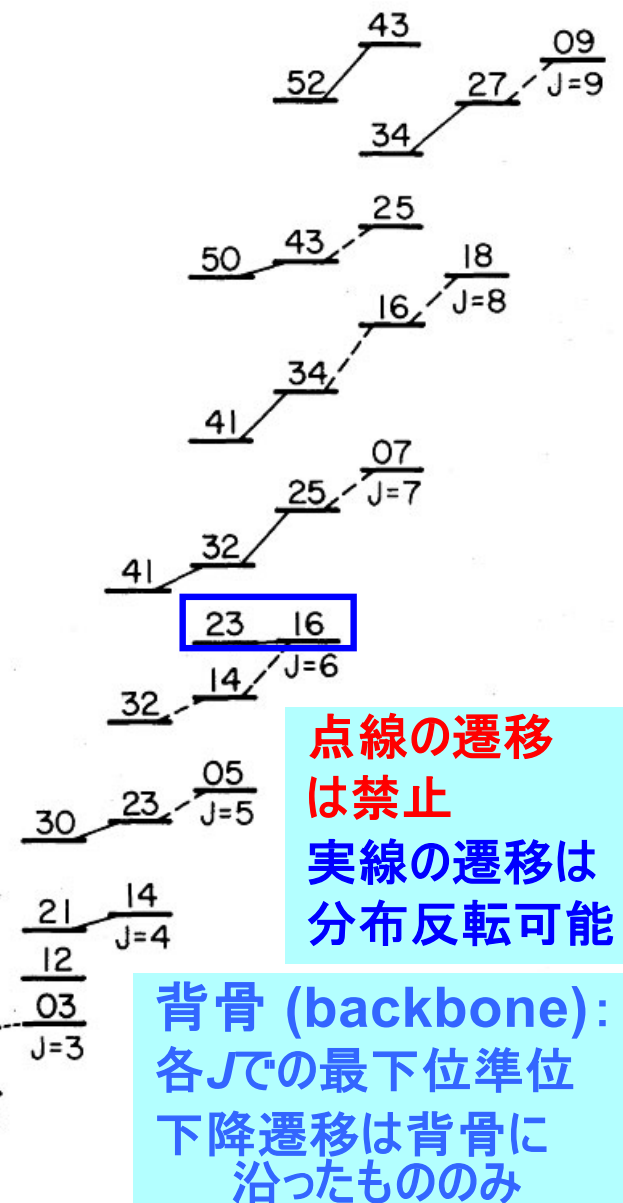
400

200

0

E (cm⁻¹)

$J_{K_1K_2}$

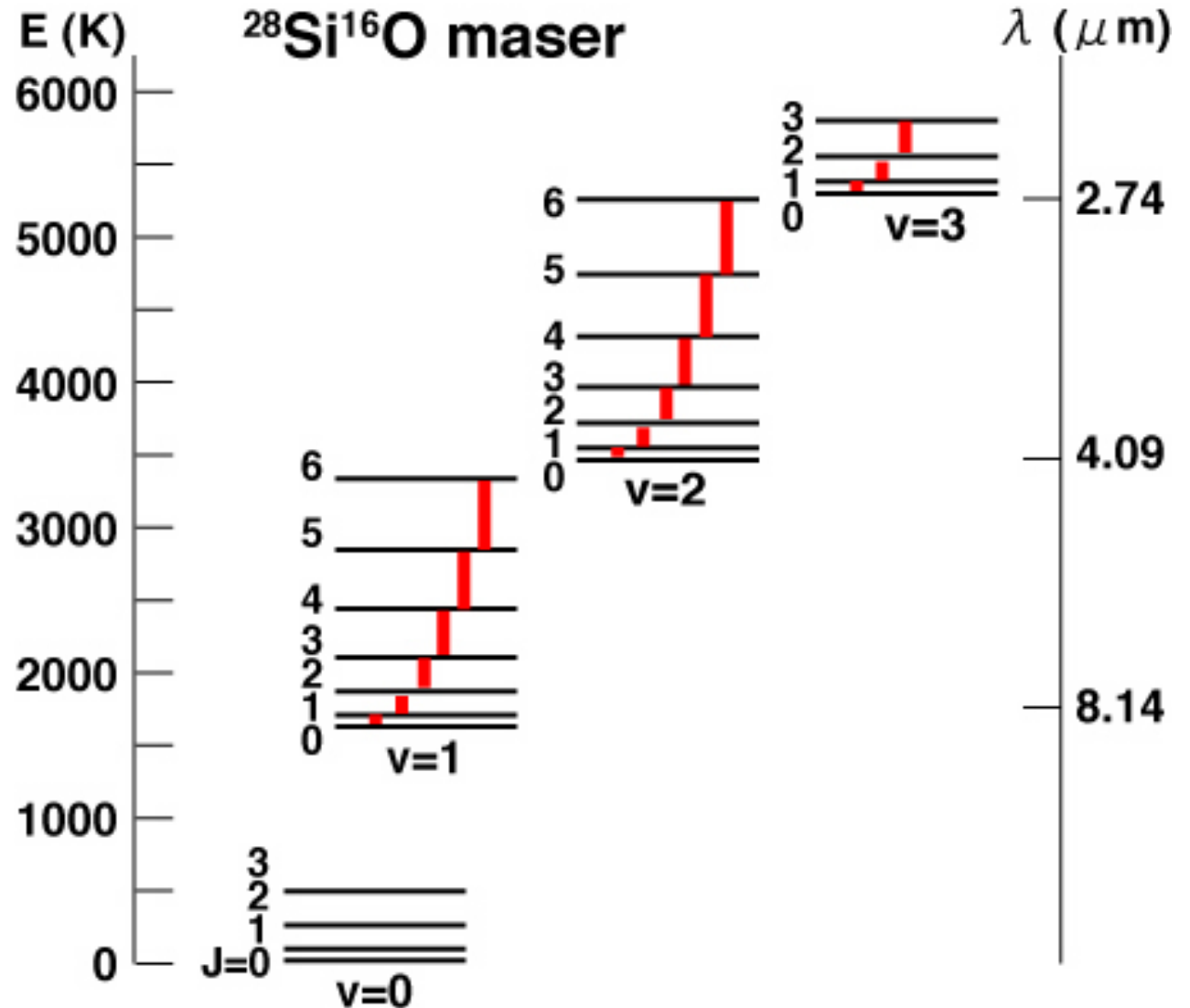


点線の遷移は禁止
 実線の遷移は分布反転可能

背骨 (backbone):
 各 J での最下位準位
 下降遷移は背骨に沿ったもののみ

Classical masers: SiO

- 異なる振動励起状態(v)のメーザーが空間的に共存
- 異なるメーザー輝線の強度比にある相関が見られる

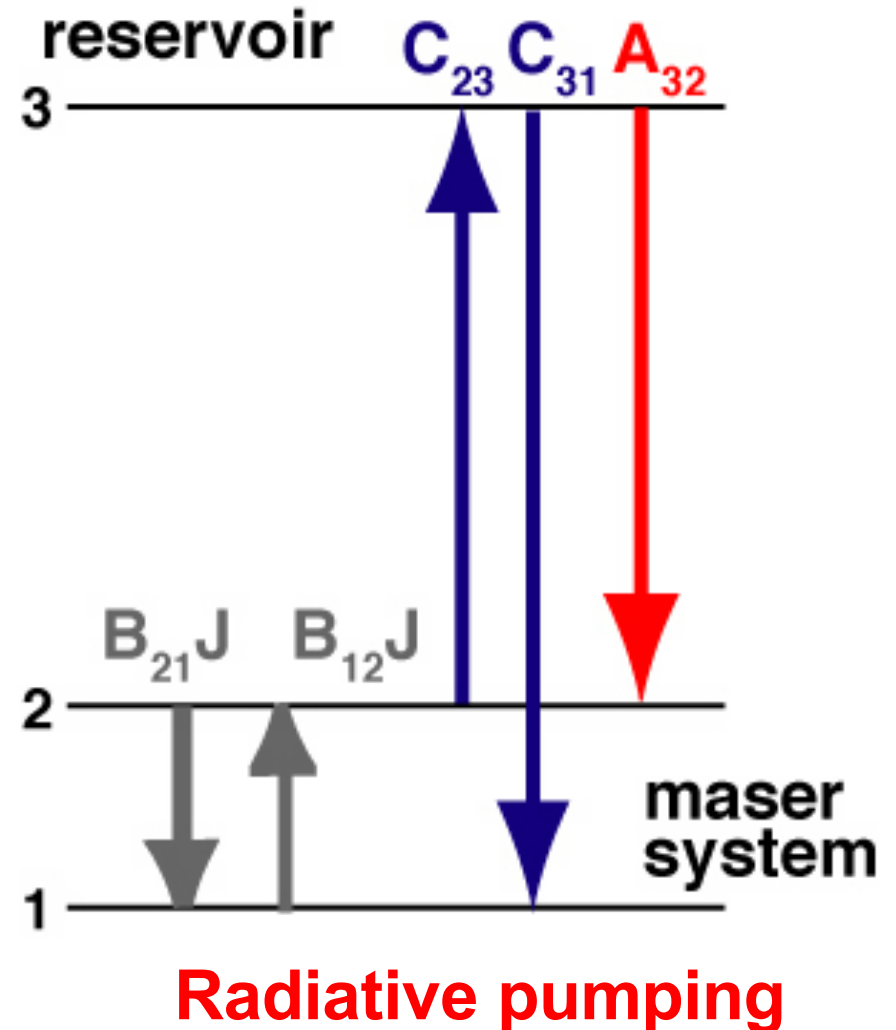
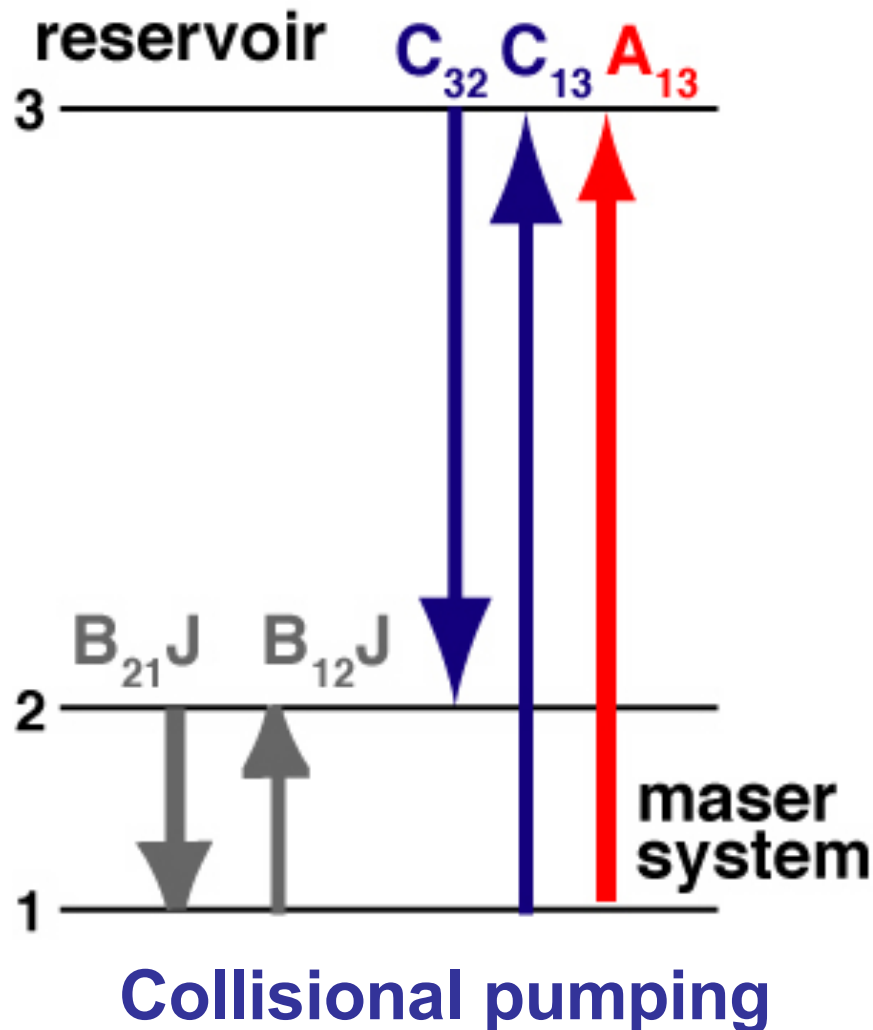


主な状態数くみ上げ機構

- 放射くみ上げ (radiative pumping)
 - 上位へのくみ上げは放射(赤外線など)が主要因
 - 下位からの開放は(水素分子との)衝突が主要因**SiO(?), OH, CH₃OH**
- 衝突くみ上げ (collisional pumping)
 - 上位へのくみ上げは(水素分子との)衝突が主要因
 - 下位からの開放は放射(赤外線など)が主要因**SiO(?), H₂O (continuous shock or C-shock)**
- 化学的くみ上げ (chemical pumping)
 - 一旦解離された分子の再合成によるくみ上げ**H₂O (jumping shock or J-shock, X-ray)**

Pump term

自然放射の遷移がメーザーの2レベルの間で不均一な効率で行われるのがポイント(遷移の選択則による)



衝突くみ上げ(collisional pumping)

衝突による粒子くみ上げの効率は、
メーザー下位準位から開放される
単位時間当たりの光子個数に等しい。

放射くみ上げ(radiative pumping)

放射による粒子くみ上げの効率は、
粒子くみ上げに関わる光子の
単位時間当たりに吸収される個数に等しい。

$$L_m \approx \beta \tau L_p \left(\frac{\nu_m}{\nu_p} \right) \quad \text{where } \beta \approx 1, \tau < 1$$

脈動変光星に付随するH₂O/OHレーザーの場合、
どれくらい明るいレーザー放射を放射くみ上げで
作り出すことができる？

$$\nu(\text{H}_2\text{O}) \approx 2.2 \times 10^{10} \text{ Hz}, \quad \nu(\text{OH}) \approx 1.6 \times 10^9 \text{ Hz}$$

$$\nu(p) \approx 3 \times 10^{13} \text{ Hz} (10 \mu\text{m for H}_2\text{O}), \quad 1 \times 10^{13} \text{ Hz} (30 \mu\text{m for OH})$$

$$L_* \sim 1000 L_{\text{sun}}, \quad L_p \sim L_* (\Delta \nu_p / \nu_p) \sim L_* (\Delta \nu_m / \nu_m) \approx 10^{-6} L_*$$

何を観測すればくみ上げ機構を判別できる？

- Maser luminosity (平均値):

$$L_{\text{maser}} = \frac{D^2 d\Omega}{4\pi} \int F_\nu dv, \quad D: \text{source distance}, \quad d\Omega: \text{maser beaming angle}$$

- 必要なパワーを供給できるエネルギー源の推定
- 供給されるパワーのうちどれだけの割合が
 メーザー放射へと変換される？

e.g. 銀河系内 H₂Oメーザーの場合： 分子流が持つ
 運動エネルギーでしか必要なパワーが供給されない

- ⇒ 衝突励起でなければならない
- ⇒ 分子ガス流の運動エネルギーがどうやって個々の分子の
 運動エネルギーへ変換される(温度上昇につながる)？
- ⇒ 分子ガス流がより低速の分子ガス塊との衝突による
 衝撃によってエネルギー変換があるらしい

何を観測すればくみ上げ機構を判別できる？

- Maser luminosity (時間変化):
 - 放射励起ならばエネルギー供給源の光度変化と連動してメーザー光度も変化するはず
 - 両者光度変化の間に時間差があった場合は？
 - $\Delta t < R/c$: 放射励起の可能性が残る
 - $\Delta t \sim R/c_s \gg R/c$: 放射励起の可能性が残る

何を観測すればくみ上げ機構を判別できる？

- Maser morphology+velocity field
(spatio-kinematics):
 - メーザースポット群が見える場所／分布の特徴
- 例：放射励起ならば放射光源に対して対称的に分布しているはず
- 視線速度分散 $\gg \gg$ 運動エネルギー
衝突励起に必要なエネルギーを供給できる？

※1種類のメーザー輝線を観測するだけでは
普通くみ上げ機構をはっきりとは判別できない

- 複数(**3種類以上!!**)メーザー輝線の同時観測を望ましい
- 異種輝線(熱的放射)マップとの重ね合わせも必要

ALMA (Atacama Large Millimeter and sub-millimeter Array)
が持つ解像度(10–100ミリ秒角)が必要