

# 第一世代天体形成の理論

西亮一(新潟大・自然科学系)



# ◆天体の形成

## ➤天体の階層構造

星・銀河・銀河団・宇宙



## ➤重力はスケールフリー

→ 重力以外の物理過程(熱的過程)が重要

→ 重力による収縮・分裂過程と

熱的過程(冷却)によるスケール決定

重力は非等方性や密度揺らぎを増大させる

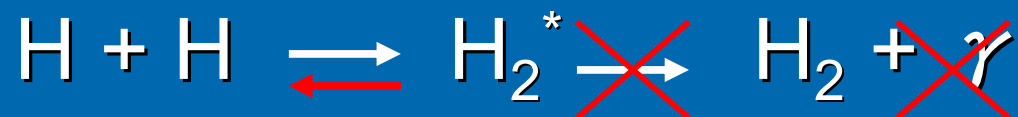
# ◆原始ガスでの冷却元

## ◆原始ガス：水素とヘリウムのみで構成

- 約 $10^6$ K以上：free-free 輻射
- 約 $10^4$ K以上、約 $10^6$ K以下：原子輝線輻射
- 約 $10^4$ K以下：水素分子輝線輻射
- 約200K以下：HD分子輝線輻射

## ◆水素分子形成過程

気相での水素原子同士の衝突では形成しない



✓反応するためには余分なエネルギーを  
すてなければならない。でも、電磁波は  
なかなか出さない。

●現在の星間物質中：

ダストの表面で形成

ダストが余分なエネルギーを吸収

## ●原始ガス中

### ◆H<sup>-</sup>過程: 電子を触媒

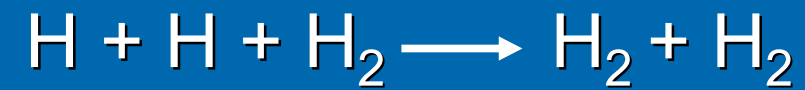


### ◆H<sub>2</sub><sup>+</sup> 過程: 水素イオンを触媒



非化学平衡過程での水素分子形成過程が重要

高密度 ( $n > 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ) では3体反応が効く



◆水素分子:

- なかなかできない
- なかなか光らない
- 励起されにくい ( $\Delta E_{\min} \sim 0.44\text{eV} \sim 500\text{K}$ )
- 壊れやすい ( $T_{\text{crit}} \sim 2000\text{K}$ )

水素分子による冷却は四重苦

でもこれしかない

# ◆原始銀河雲の進化

(Nishi and Susa 1999)

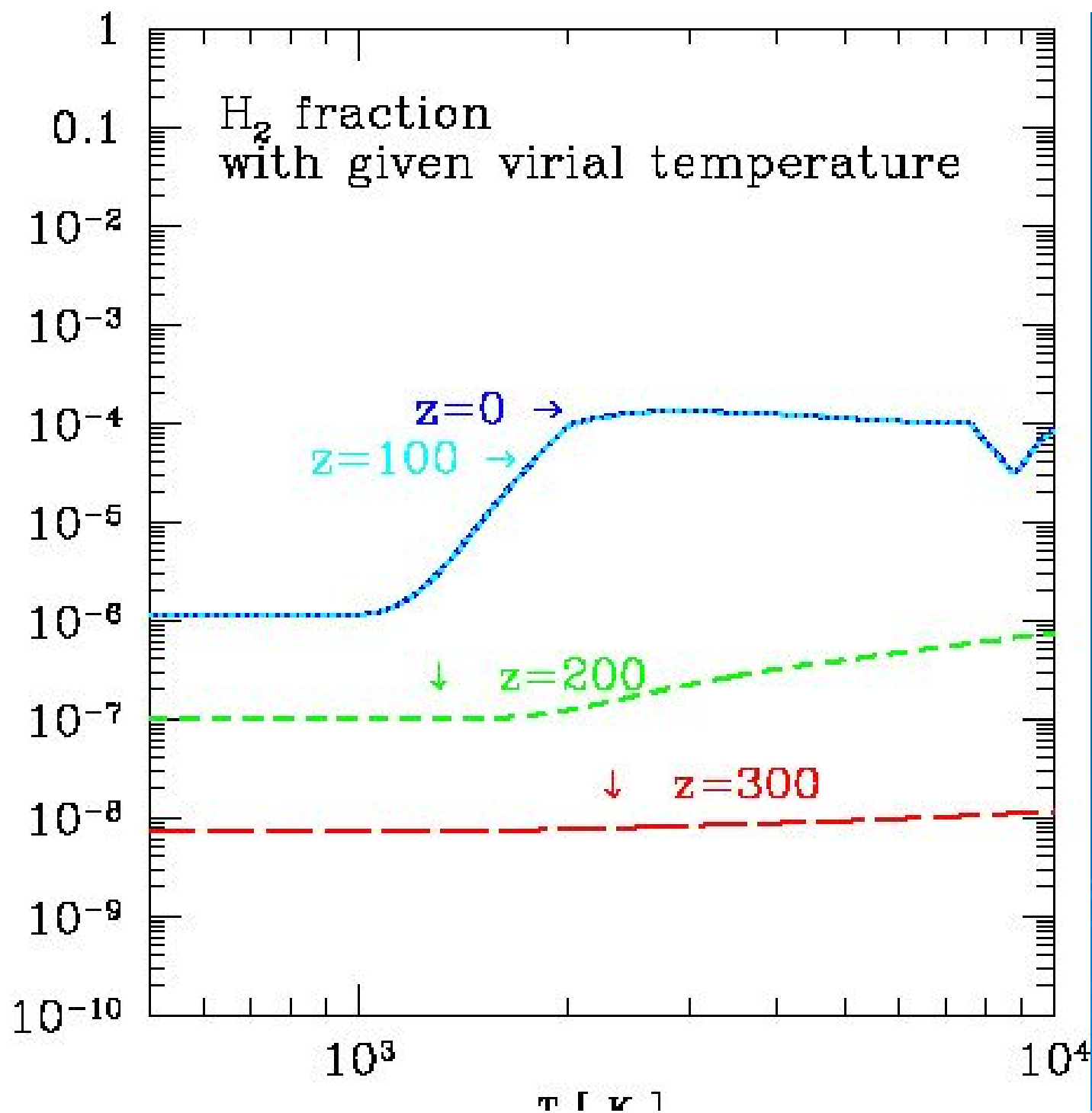
## ◆水素分子形成量の推定

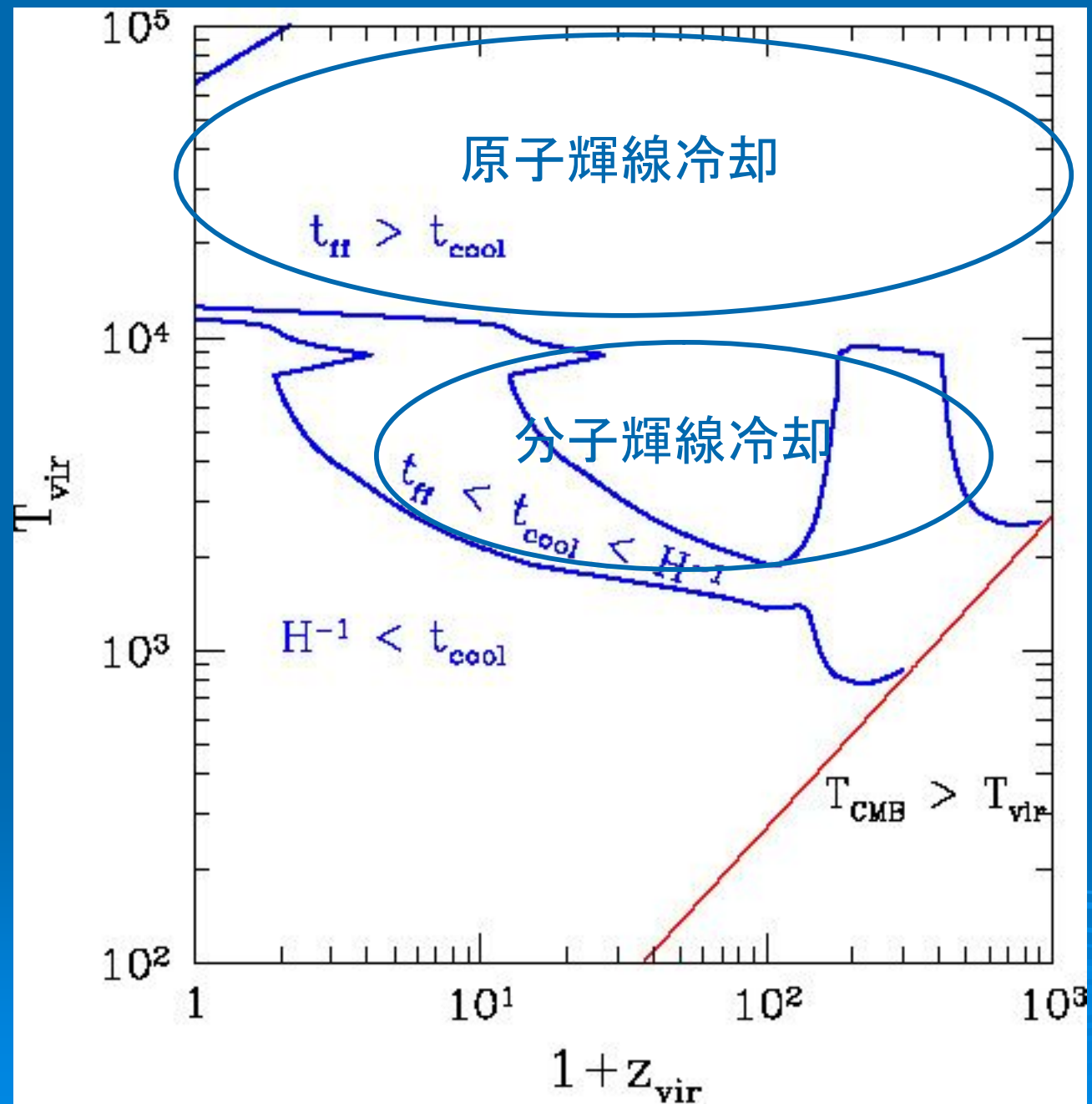
- 水素分子形成、解離、電離、ガス冷却のタイムスケールを比較
- 触媒の電子や陽子は宇宙膨張のため再結合しそこなって残ったもの(電離度 $\sim 10^{-3.5}$ )

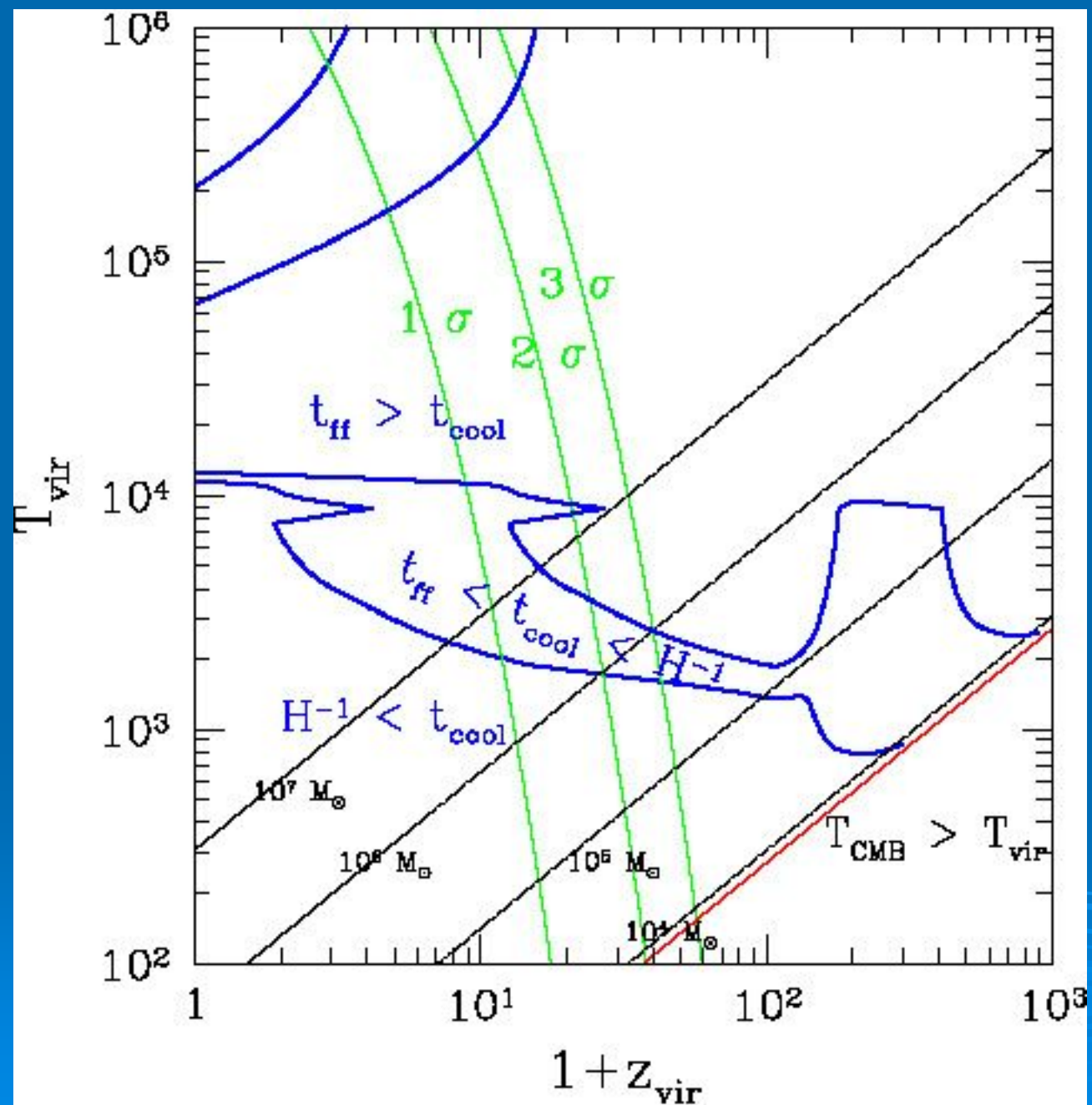
## ◆冷却時間を自由落下時間や宇宙膨張のタイムスケールと比較



水素分子フラクション







# ◆星形成過程(球対称近似)

- 収縮期(Omukai and Nishi 1998)

星形成コア(分裂片)の収縮による星形成

- ◆球対称近似

- ◆流体計算

- ◆熱的過程(化学進化、輻射輸送)

輻射輸送:

Line Profile を含めた水素分子輝線

水素分子のCollision Induced Absorption

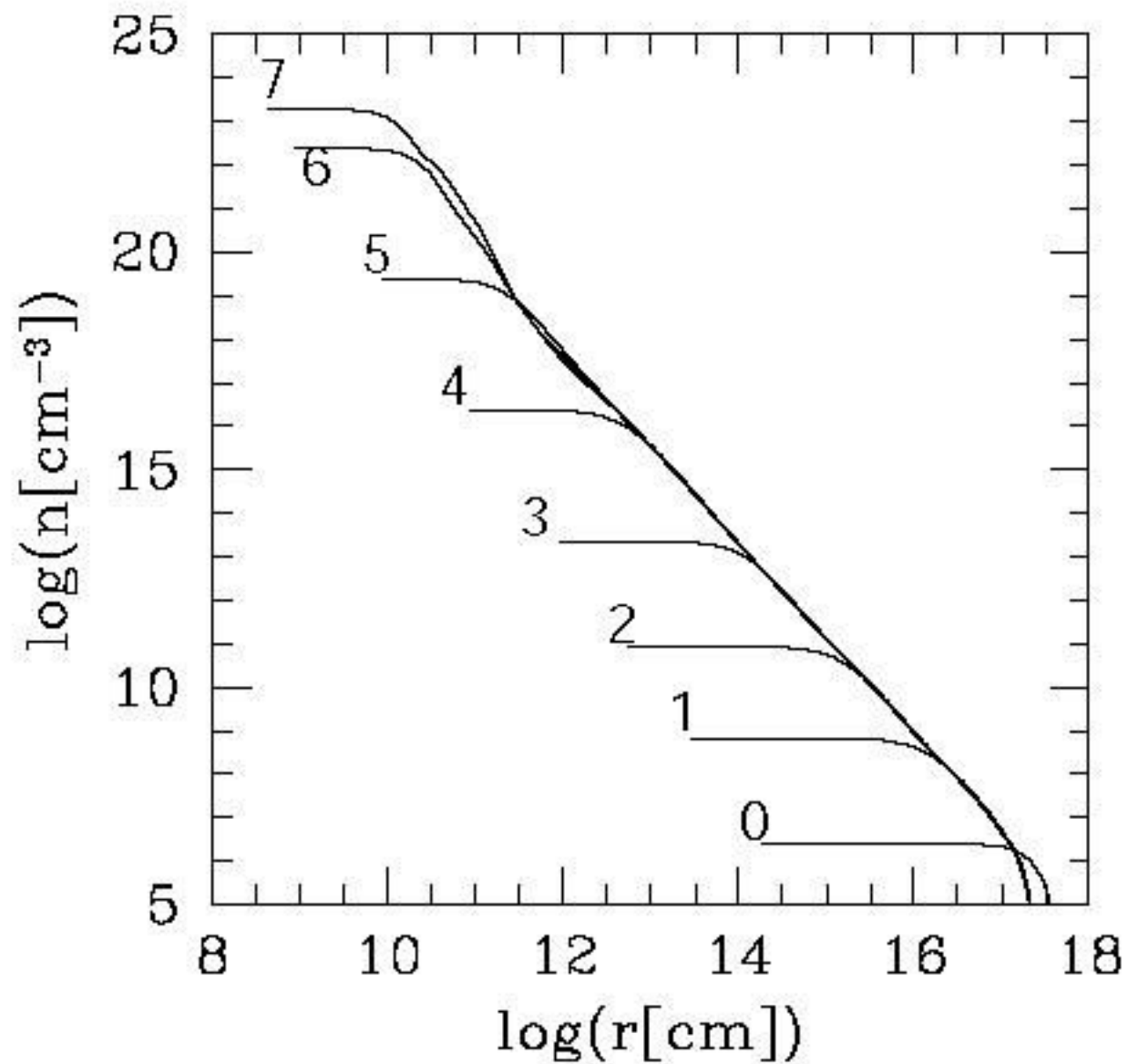
水素分子のLevel Population は Local に決まる

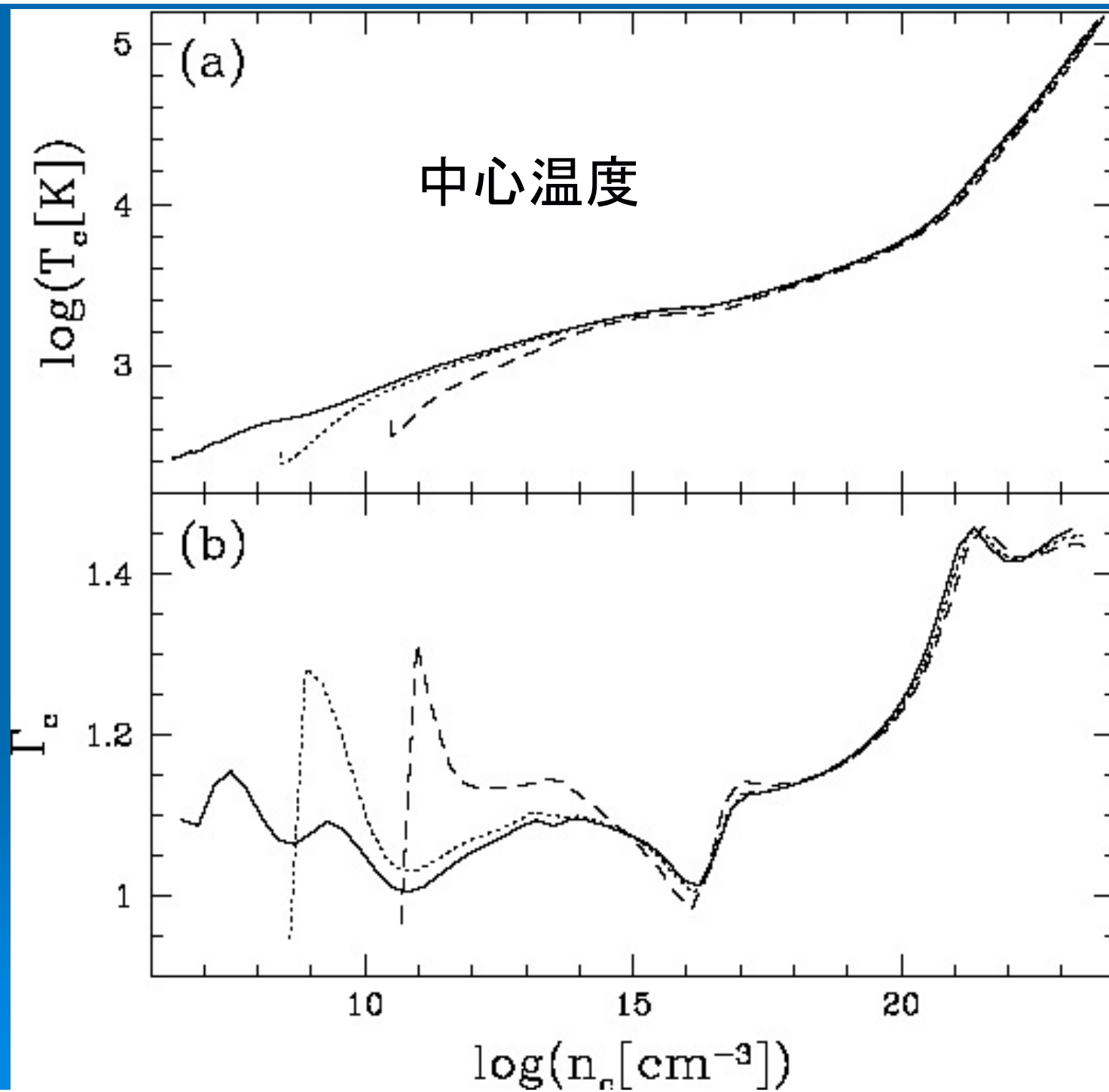
## ◆計算結果1

- ◆密度分布が自己相似的進化
  - 星形成コアの全質量はほとんど中心部の進化に影響しない
- ◆外縁部の密度分布は  $\rho \propto r^{-2.2}$
- ◆中心部の有効断熱指数  $\Gamma$  は非常に広い密度範囲で 1.1 に近い

$$\Gamma = \frac{\partial \ln P / \partial t}{\partial \ln \rho / \partial t}$$

# 密度分布の時間進化





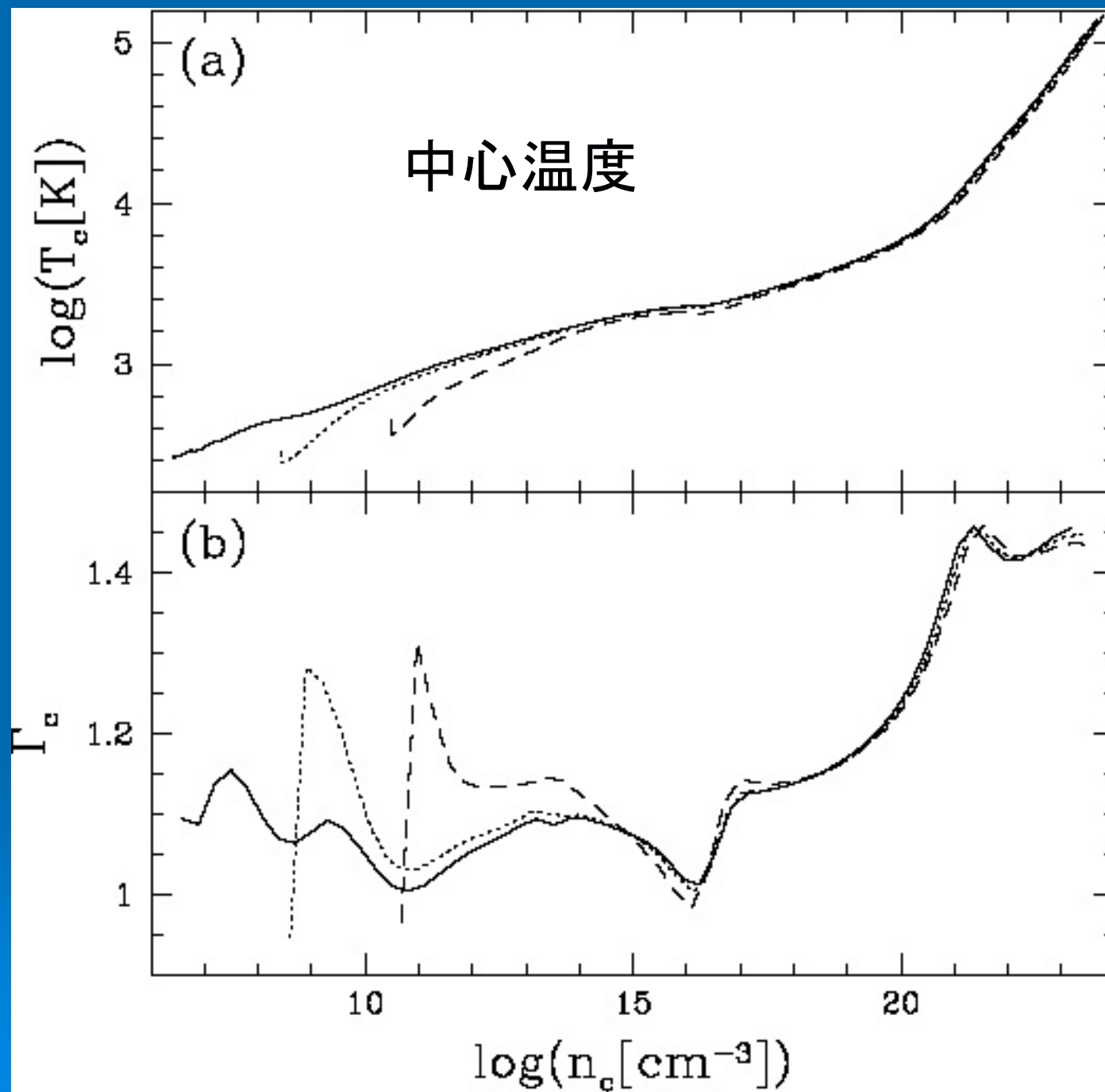
## ◆計算結果2

- ◆中心密度が  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  を超えると急速に状態方程式が硬くなり  $\Gamma$  は  $4/3$  を超える



- ◆中心でバウンスが起きて星的核心が形成
- ◆星的核心の初期質量 ( $5 \times 10^{-3} M_{\text{sun}}$ ) は現在の星形成の場合とほぼ等しい

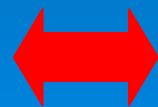




## ◆質量降着

- ◆形成時の星的核心は、核融合反応も起きないほど低質量
- ◆星の質量決定には質量降着期が重要
- ◆自己相似解を用いると

$$\begin{aligned}\dot{M} &= 8.3 \times 10^{-2} M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1} (t / 1 \text{ yr})^{-0.27} \\ &= 3.7 \times 10^{-2} M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1} (M / M_{\text{sun}})^{-0.37}\end{aligned}$$



現在の星形成:  $\dot{M} \sim 10^{-5} M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$

# ◆質量降着期の進化 (Omukai and Palla 2003)

- 非常に大きな質量降着率

温度が高い ← 冷却効率が悪い



高密度でないと収縮できない



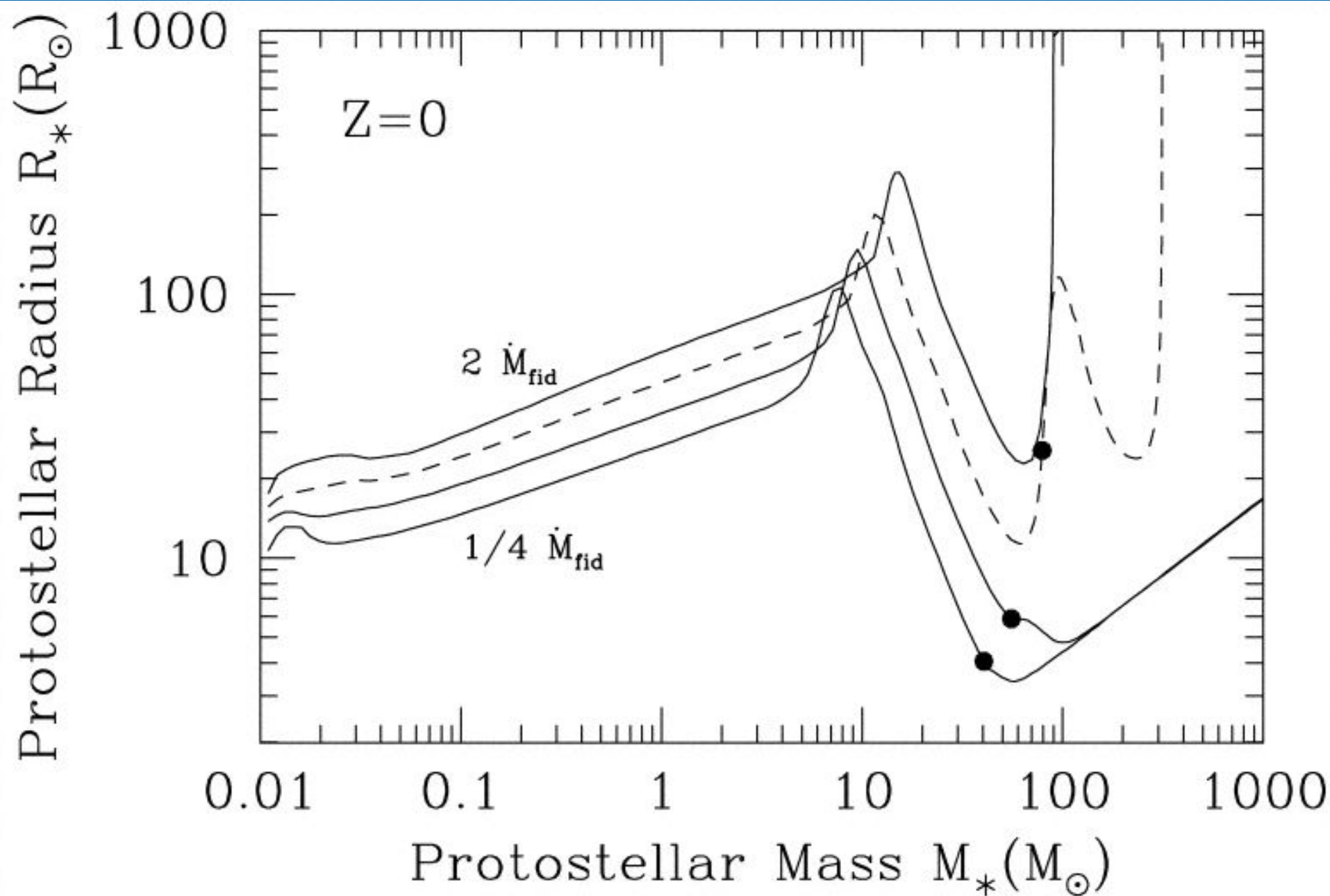
冷却による中心温度上昇が遅い

- 重元素が存在しない

CNサイクルがなかなか効かない

輻射圧による降着のストップがおきにくい

# 星の半径の進化

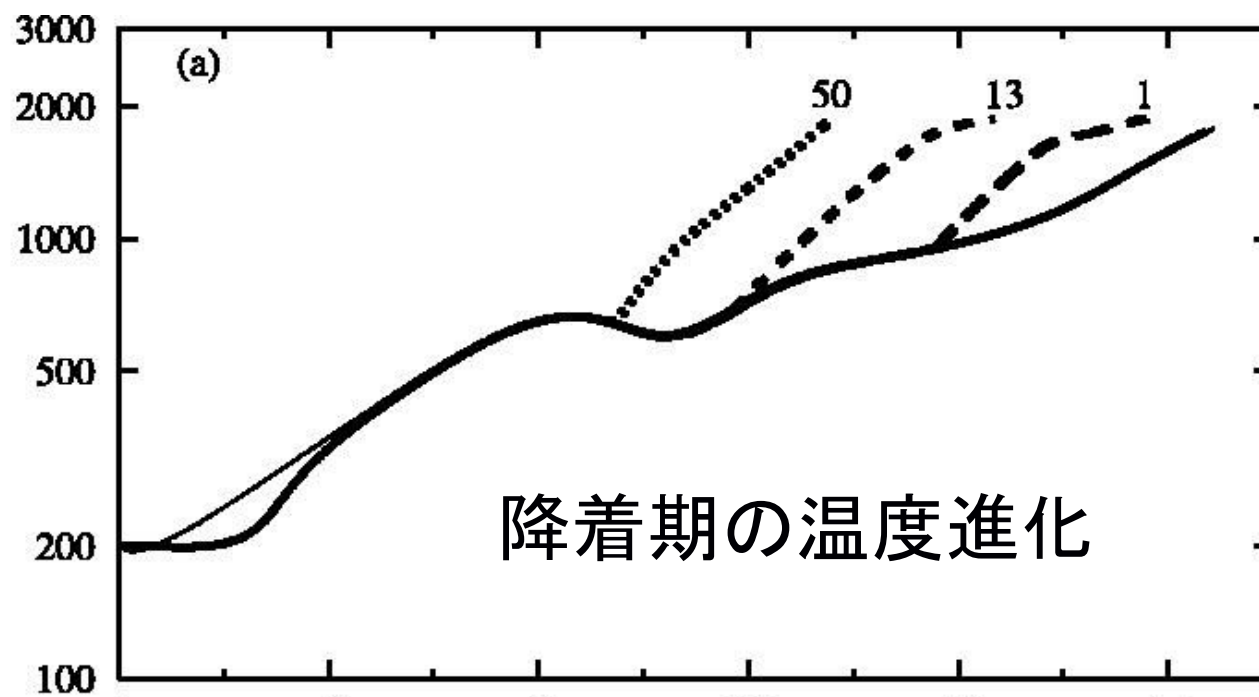


# ◆第一世代星形成の観測的直接検証

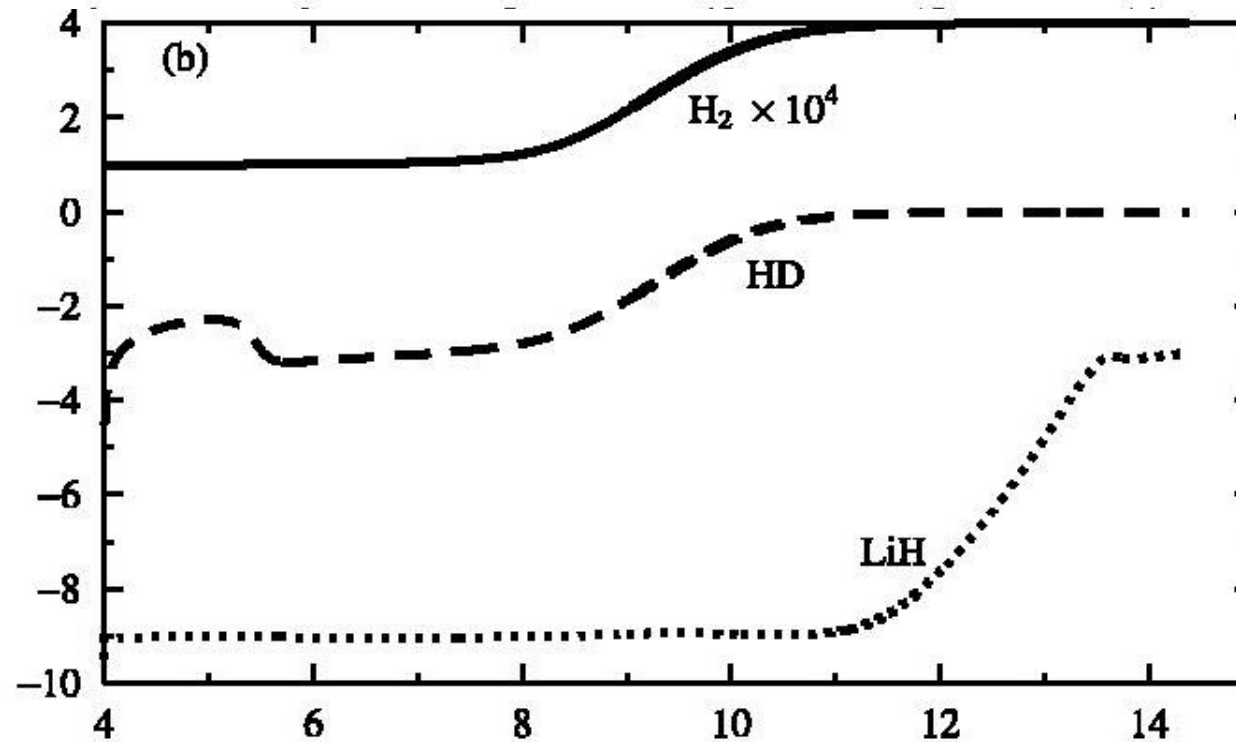
Mizusawa, Omukai and Nishi (2005)

- 第一世代星形成過程には水素分子輝線が特徴的  
場合によってはHD輝線も重要
- ダイナミクスを簡略化して輝線強度を計算
- 降着期の重要性を指摘
- SPICAなどの次世代観測装置による観測可能性  
を評価

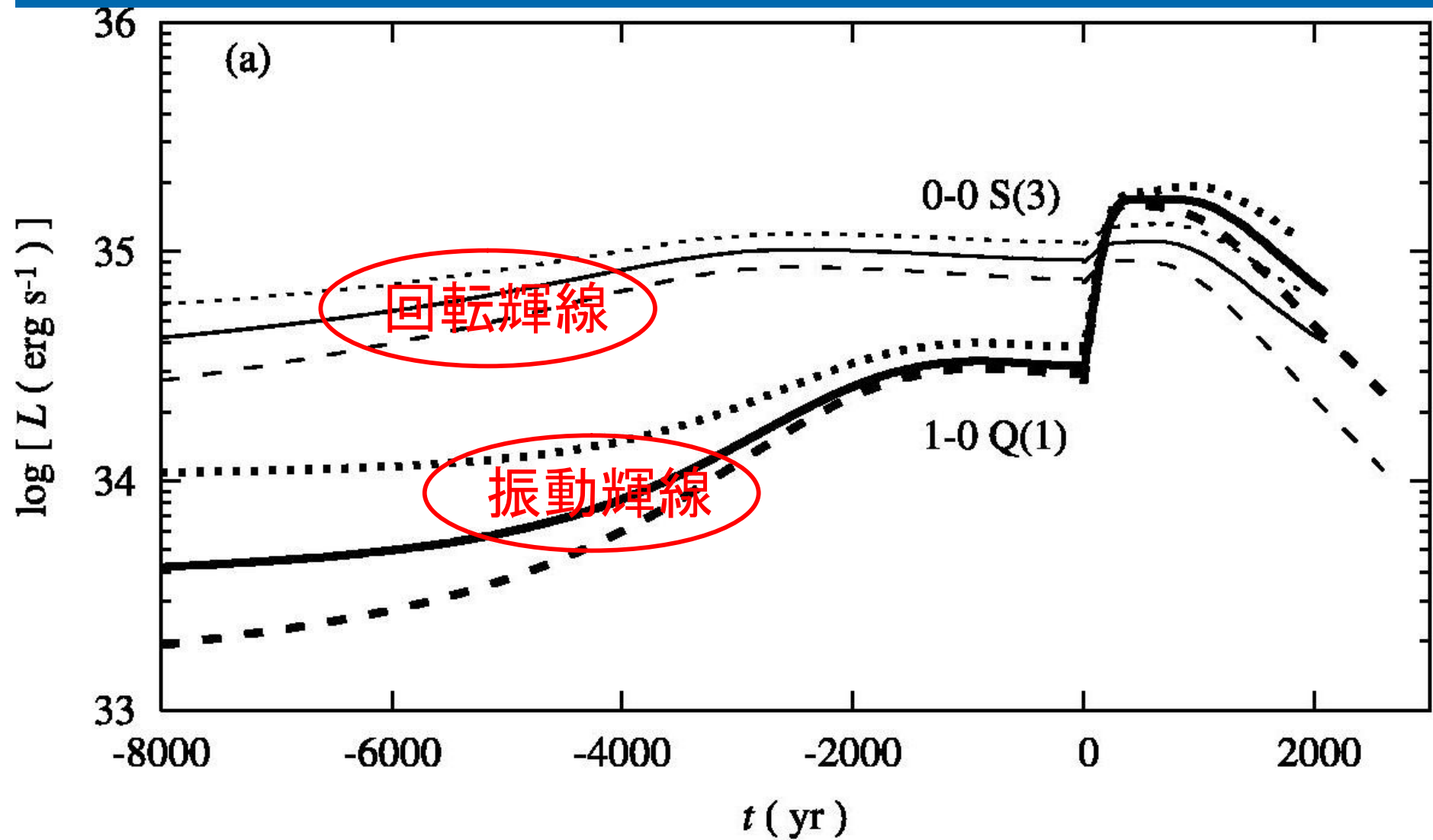
温度



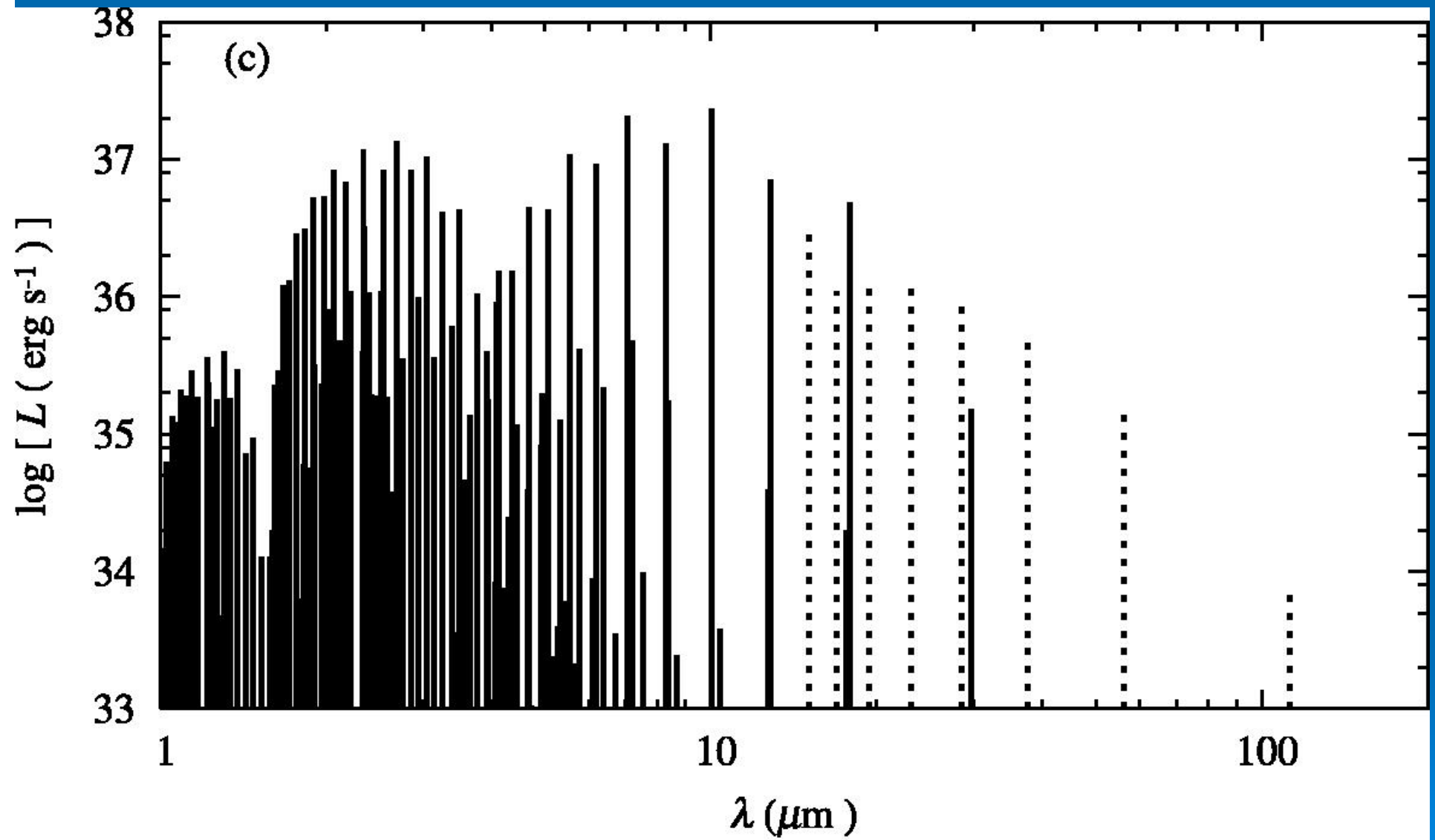
分子存在比率



# 主要な水素分子輝線強度の進化



# 種々の輝線強度

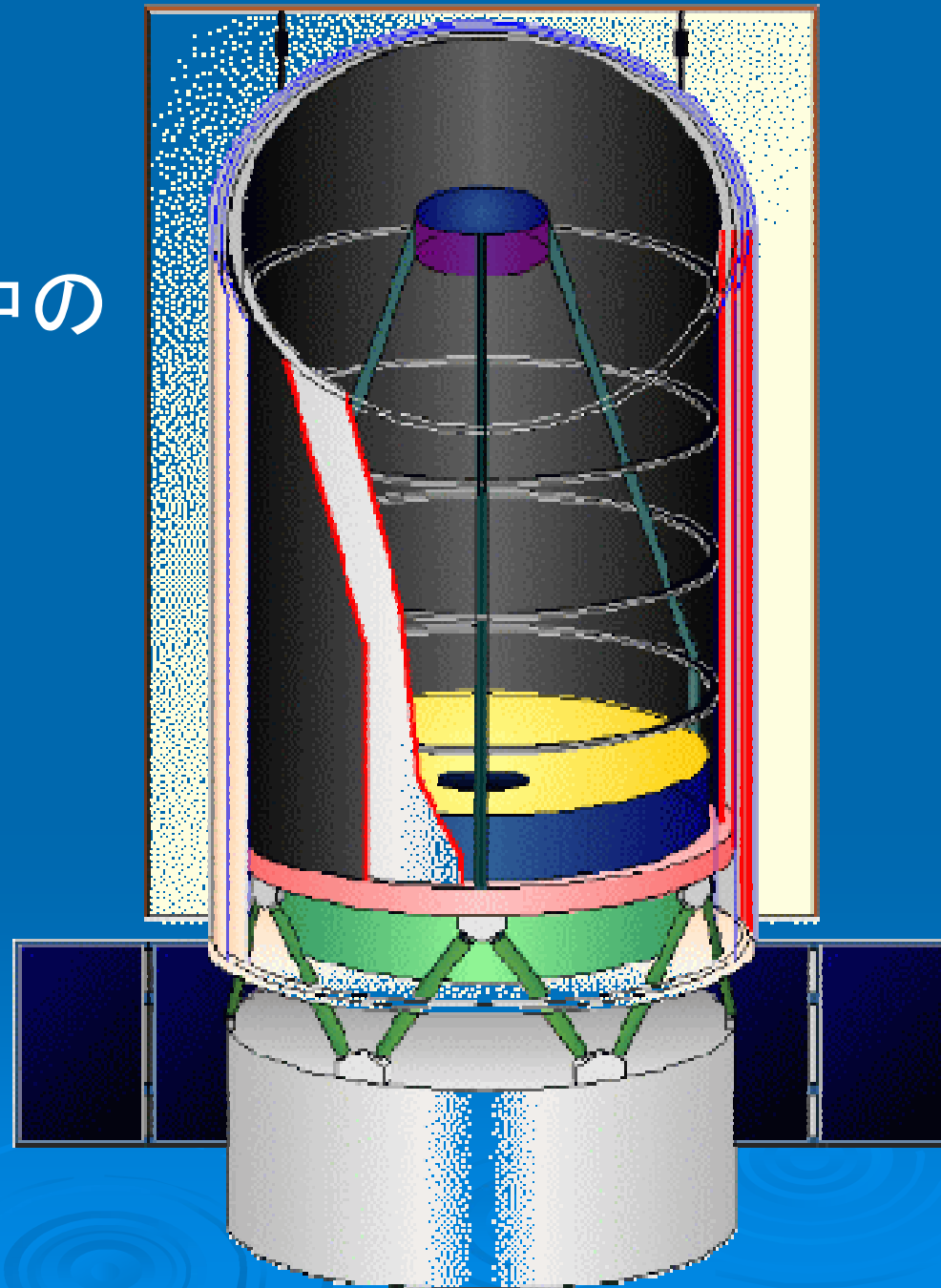




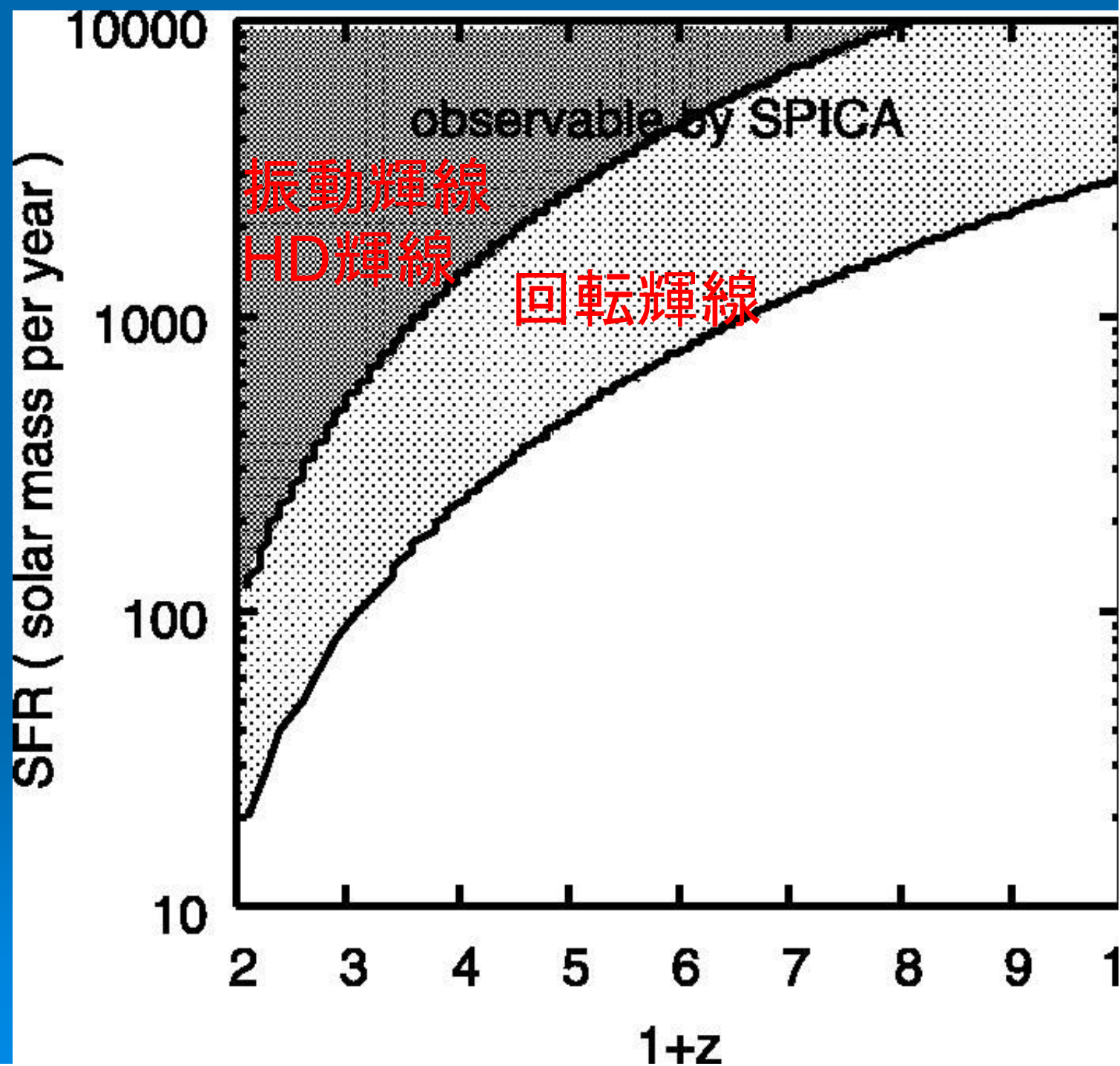
SPICA

日本が中心に計画中の  
次世代赤外線衛星：  
大口径(3.5m)  
低温(4.5k)

輝線の感度は  
 $10^{-22}$  -  $10^{-21}$  W/m<sup>2</sup>  
を期待



SPICAに  
よる  
観測可能性



# ◆第一世代星形成の観測的直接検証

Mizusawa, Omukai and Nishi (2005)

- 第一世代星形成過程には水素分子輝線が特徴的  
場合によってはHD輝線も重要
- ダイナミクスを簡略化して輝線強度を計算
- 降着期の重要性を指摘
- SPICAなどの次世代観測装置による観測可能性  
を評価



**輝線強度比から物理過程を検証**

# ◆非球対称性の影響

- 収縮期

- 重力不安定性による変形

Γ=1.1なら安定 (Tsuribe et al 2006)

- 回転

第一世代星では中心部に角運動量の  
小さい成分

3DシミュレーションでもほぼOK

(Yoshida et al 2006、Sobolev近似を使用)

- 磁場

宇宙磁場が強ければ影響、out flow?

- 降着期

- 重力不安定性による変形

全体的には重力優勢 → 不安定  
しかし角運動量がもっと重要？

- 回転

重力に勝って、角運動量バウンス

- 磁場

MRIによる増幅、初期に弱くても重要に

- 降着円盤

質量降着は降着円盤経由の可能性大

# ◆今後の課題

## ➤ 降着期(降着円盤)

降着円盤での角運動量輸送は？

重力トルク？(磁気)乱流粘性？Out flow？

降着円盤の安定性？

降着円盤からの水素分子の輝線強度？

## ➤ 質量： 基本的に大質量

$$M_{\text{star}} < M_{\text{star formation core}}$$

$$\tau_{\text{star}} < \tau_{\text{accretion}}$$

球対称計算では降着はなかなか止まらない

重元素がないため、光学的に薄い

降着円盤の分裂、連星形成は？

対生成不安定型超新星爆発？？？

## ➤ 初期質量関数

$M_{\text{star formation core}}$  の分布 + . . . .