



上山田戸倉温泉
7月28日(2014)

宇宙初期の星形成



大向一行

(東北大 天文)



目次

1. 現在の星形成 概観

2. 宇宙初期の星形成

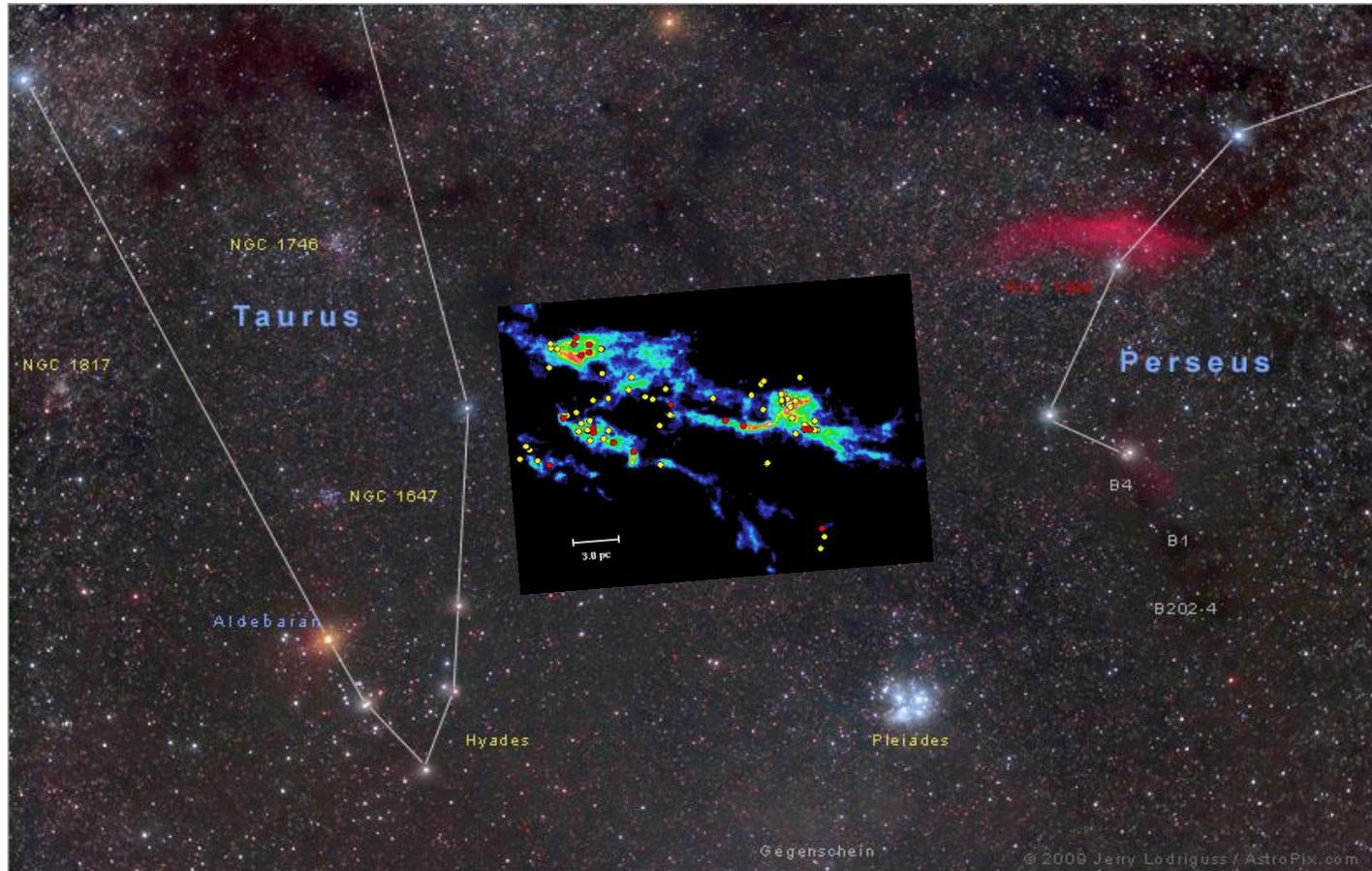
- 初代星形成

- 重元素の影響

- 超大質量星形成の可能性

I. 現在の星形成 概観

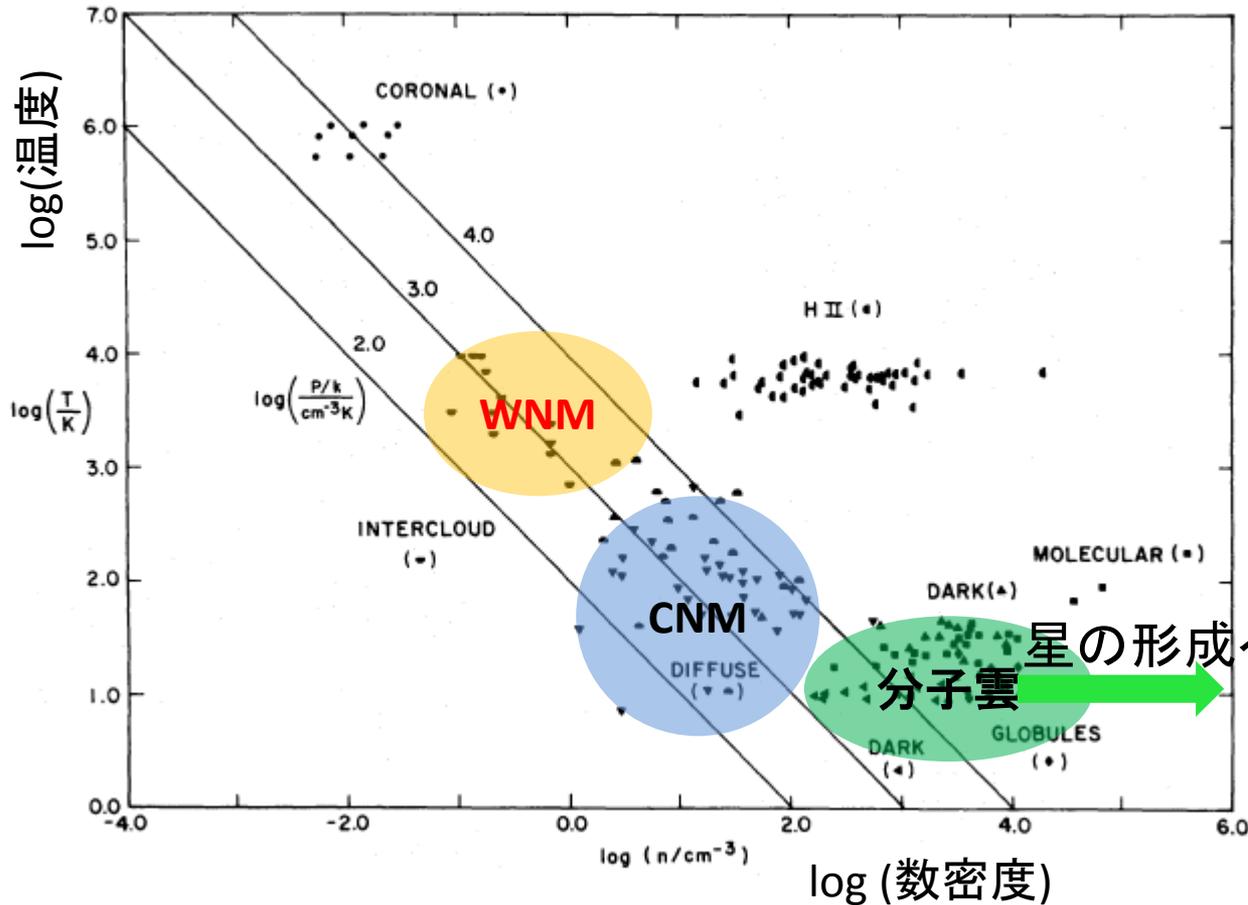
星の故郷 分子雲



© SciencePhotoLibrary,
Mizuno et al.1995

質量 $\sim 10^3\text{-}10^6 M_{\text{sun}}$;
密度 $\sim 100\text{cm}^{-3}$; 温度 $\sim 10\text{K}$

星間ガスの各フェイズ



• 希薄な中性ガス
(Warm Neutral Medium, Cold Neutral Medium) が
ほぼ圧力平衡を保っ
ている。

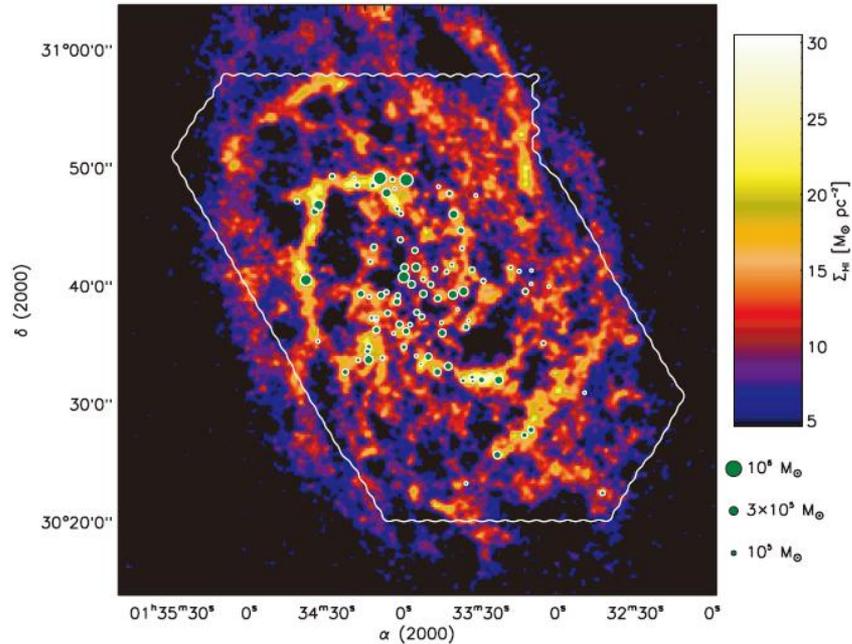
• 分子ガス中では圧力
が大きく、自己重力的
となっている。

銀河内における分子雲の分布

近傍のFace-on銀河の観測

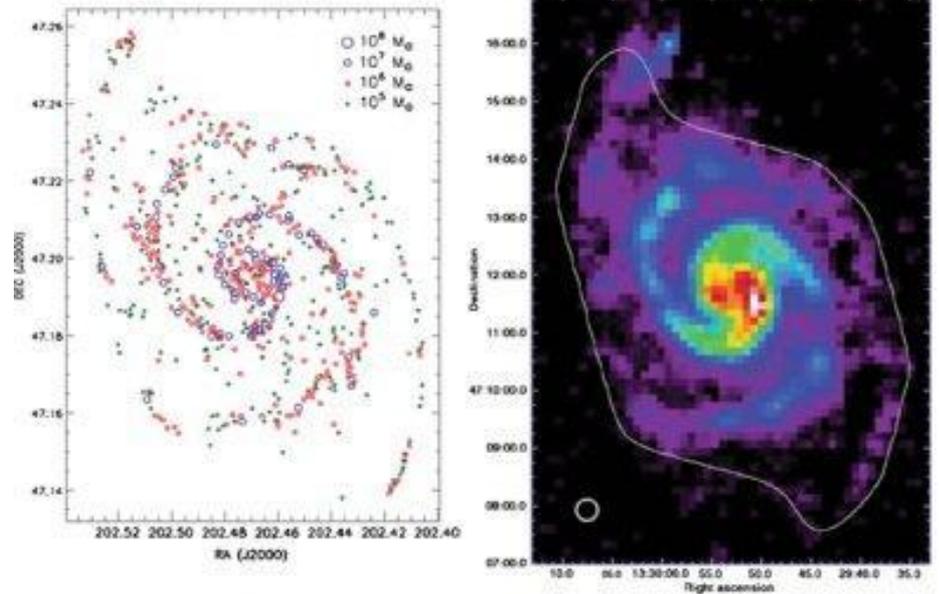
M33

Engargiola+ (2003)



M51

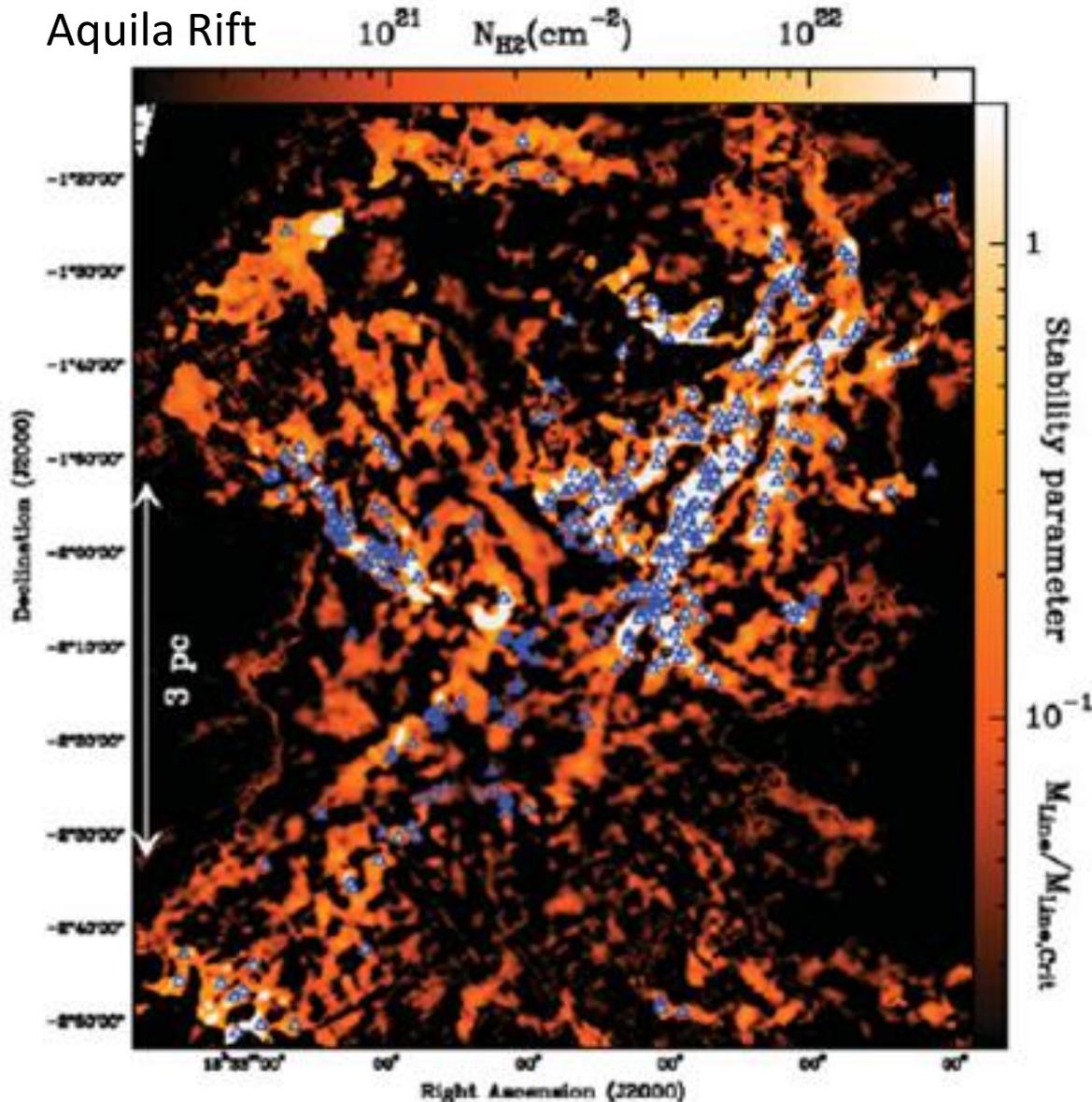
Koda+(2011)



- 分子雲はほぼ銀河の渦状腕に沿って分布している。
- 銀河衝撃波による圧縮→分子雲形成？

分子雲のフィラメント構造

Aquila Rift

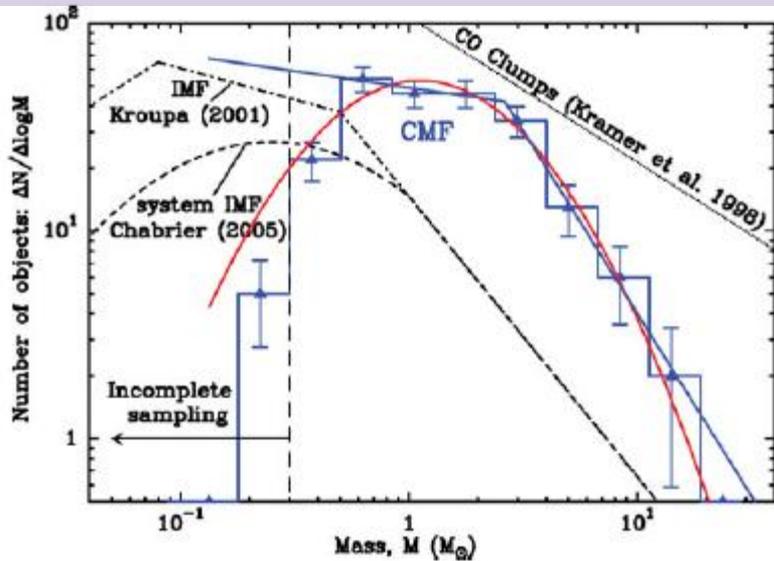


分子雲はフィラメント状雲の集合体である。

星形成コアは不安定なフィラメントで誕生。

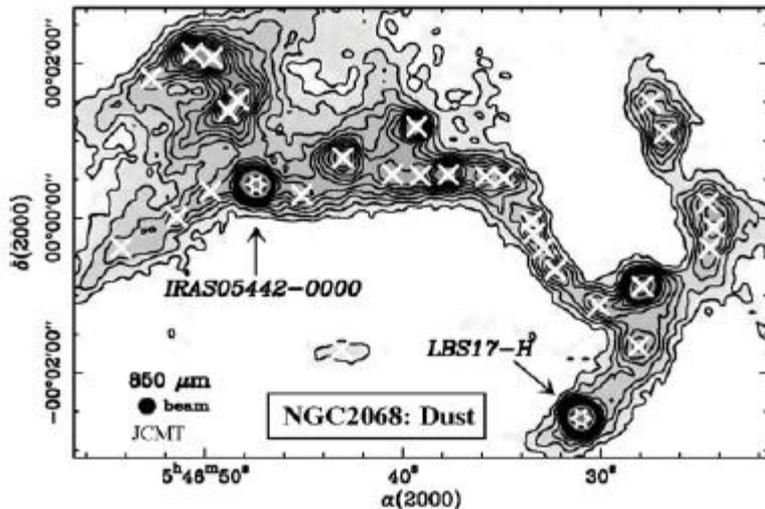
Andre et al. 2011

コア質量関数とIMF



星の初期質量関数 (IMF)

- High-mass側 $dN/dm \sim m^{-2.35}$
(いわゆる Salpeter IMF)
- Peakが $0.1-1M_{\text{sun}}$ に存在し、それ以下では分布がflatないし減少となる。



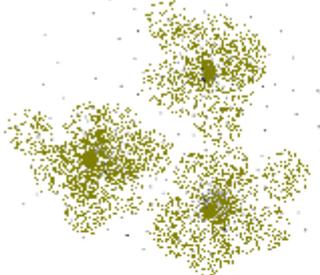
高密度コア(分子雲コア)の質量は星のIMFと良く似た分布をしている。

分子雲の分裂過程によりこれらの分布が決まっているようだ。

中小質量星形成の標準シナリオ

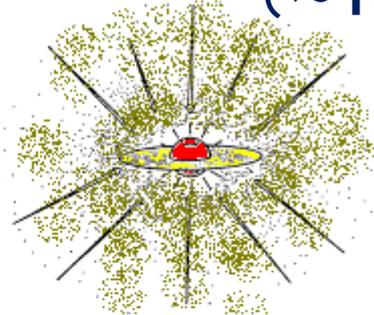
1970-80年代に確立
林忠四郎、Larson, Shuら

1. 分子雲コアの収縮 ($\sim 10^5$ - 10^6 年)

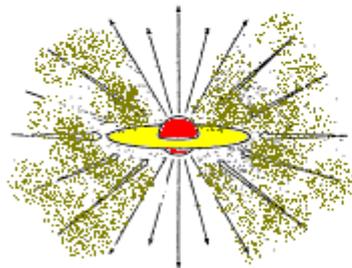


A. 分子雲中で
高密度コアが生まれる

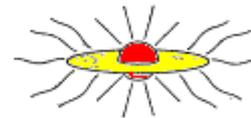
2. 原始星の進化 ($\sim 10^5$ - 10^6 年)



B. 高密度コアの中心に原始星が誕生、
外層の降着により質量が増加



C. 星風が噴き出し、
双極流を作る。



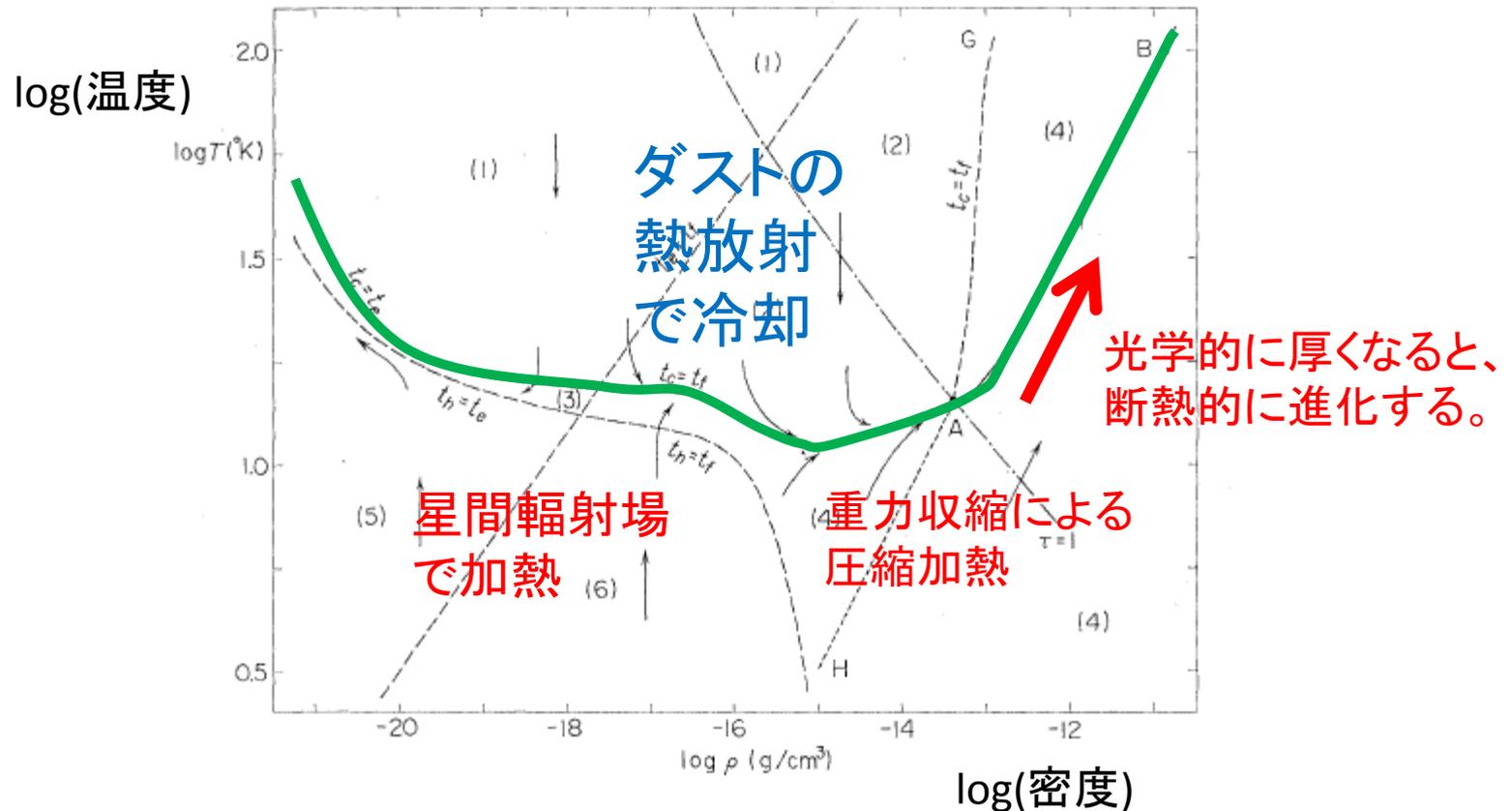
D. 質量流入が終了し、若い星とその
円盤が見えるようになる。

Shu, Adams & Lizano (1987)

3. 前主系列進化 ($\sim 10^6$ - 10^7 年)

高密度コアの熱進化

林 & 中野(1965)

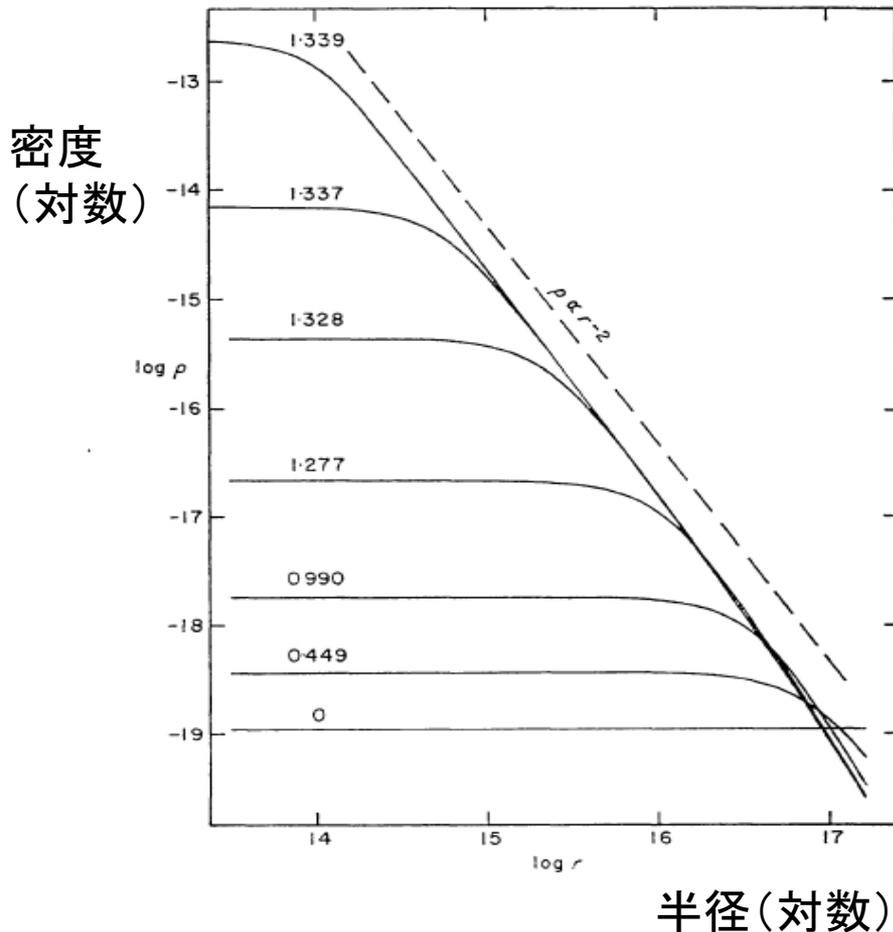


- ✓ 広い密度領域で~10Kの等温進化
- ✓ 高密度では断熱的に温度上昇。

高密度コアの動的進化

Larson 1969

密度分布の時間進化



自由落下時間 $\propto (\text{密度})^{-1/2}$

高密度部分の進化は
どんどん速くなる。

周囲を取り残して、暴走的に収縮

自己相似的収縮

✓ 中心部のサイズは
ジーンズ長さ程度

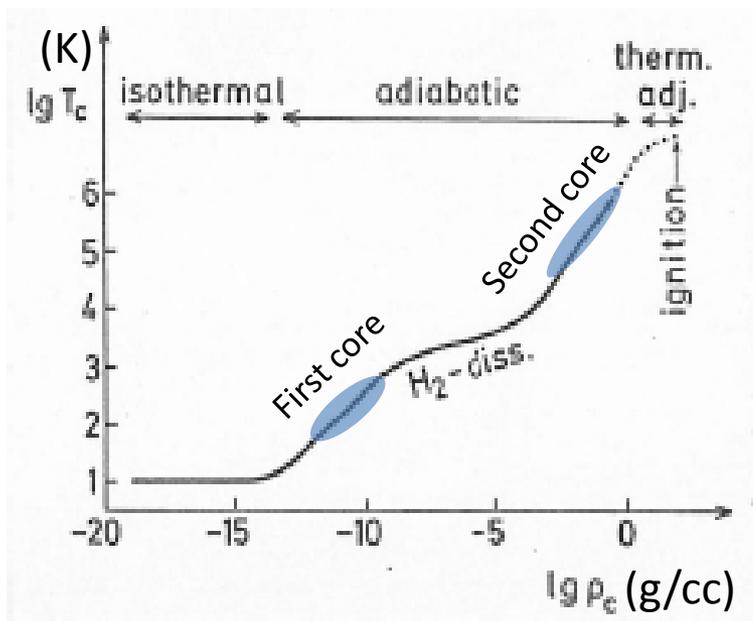
✓ 外層(エンベロープ)は
 $1/r^2$ 分布

原始星の誕生

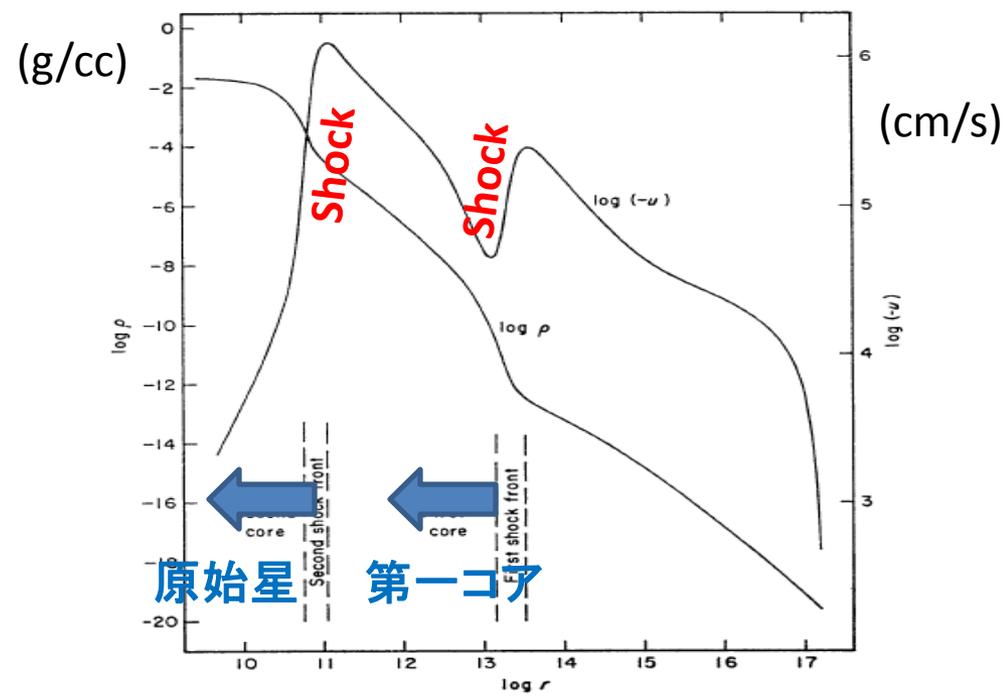
Larson 1969

原始星の形成
 2つの断熱期に対応して、
 密度 10^{-12} g/ccで**第一コア**、
 密度 10^{-2} g/ccで**原始星(第二コア)**形成

温度進化



Appenzeller & Tsarnuter (1975)

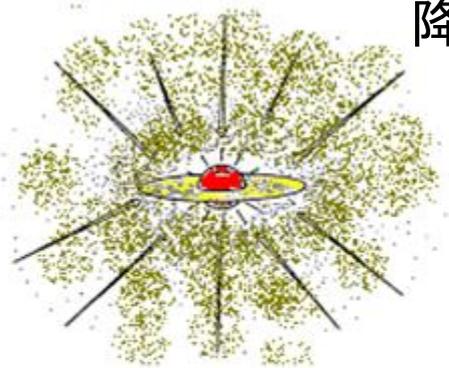


極めて小さな原始星が形成 $\sim 10^{-2}M_{\text{sun}}$

原始星から前主系列星へ

原始星 (Class 0, I)

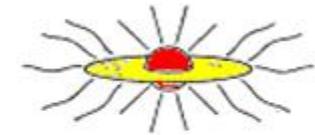
降着により成長



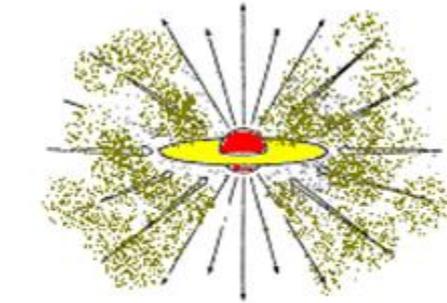
B. A protostar forms at the center of a core, growing in mass by accretion of ambient matter.

前主系列星 (Class II, III)

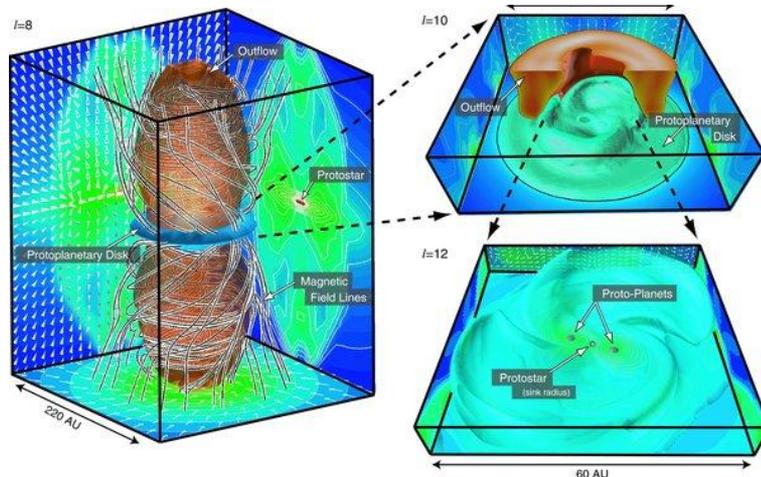
質量獲得は終了



D. The infall terminates, revealing a newly formed star with a disk.

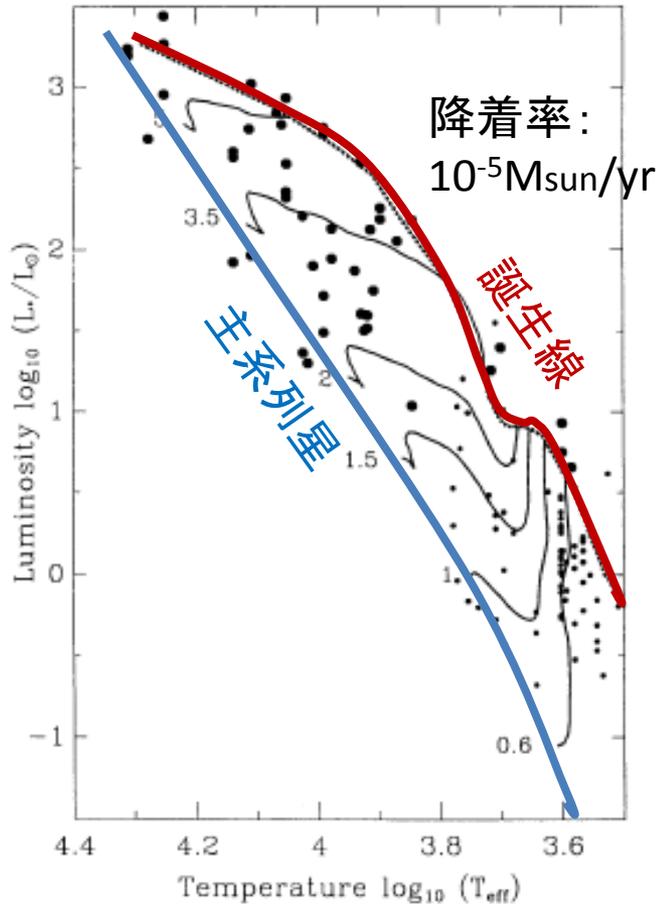


C. A stellar wind breaks out, creating a bipolar flow



- 原始星は降着で成長
- 降着終了
→星の質量決まる
- 星周円盤:
惑星形成の現場

主系列星へ: KH収縮

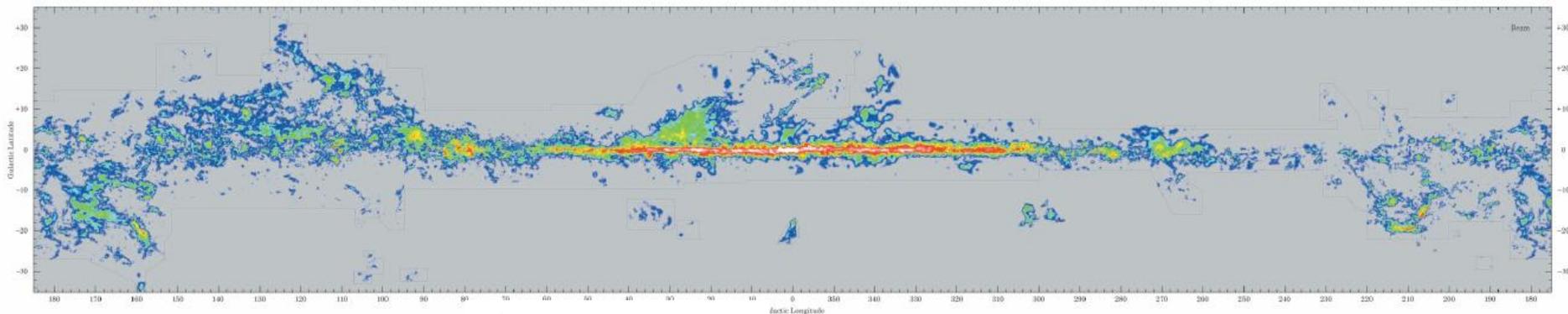


- 降着中: 原始星
 - エンベロープがあり、星表面見えない
- 降着終了: 前主系列星
 - (Tタウリ型星、ハービッグ型星)
 - 星表面が見えるようになる。
 - HR図上の位置: **誕生線(birth line)**

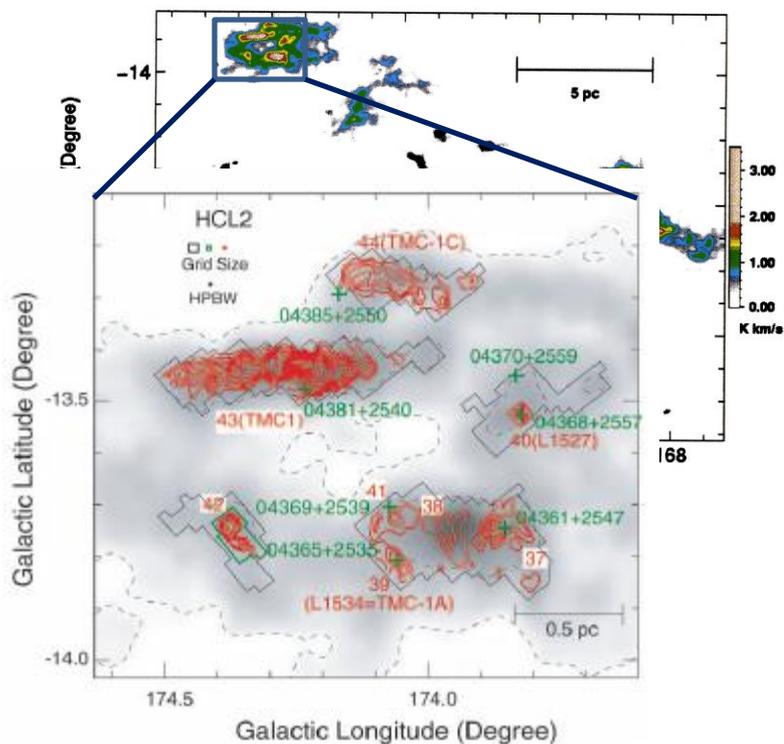
その後、
ケルビン・ヘルムホルツ収縮
により
半径が小さく(表面温度が高く)なり、
主系列星に到達。

まとめ: 星間ガスから星へ

Dame 他



大西ほか(1998)



大西ほか(2002)

HI雲(10-100/cc, 80K)

→ 分子雲(10^2 - 10^3 /cc, 10K)

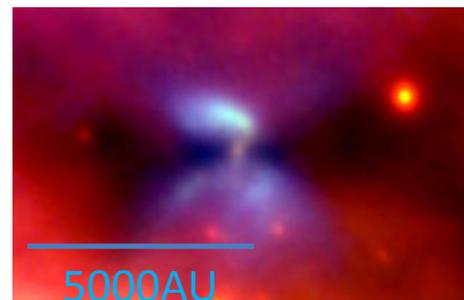
→ 分子雲コア ($>10^4$ /cc, 10K)

→ 原始星(質量獲得中)

→ 前主系列星(Tタウリ型星、Herbig Ae/Be星)

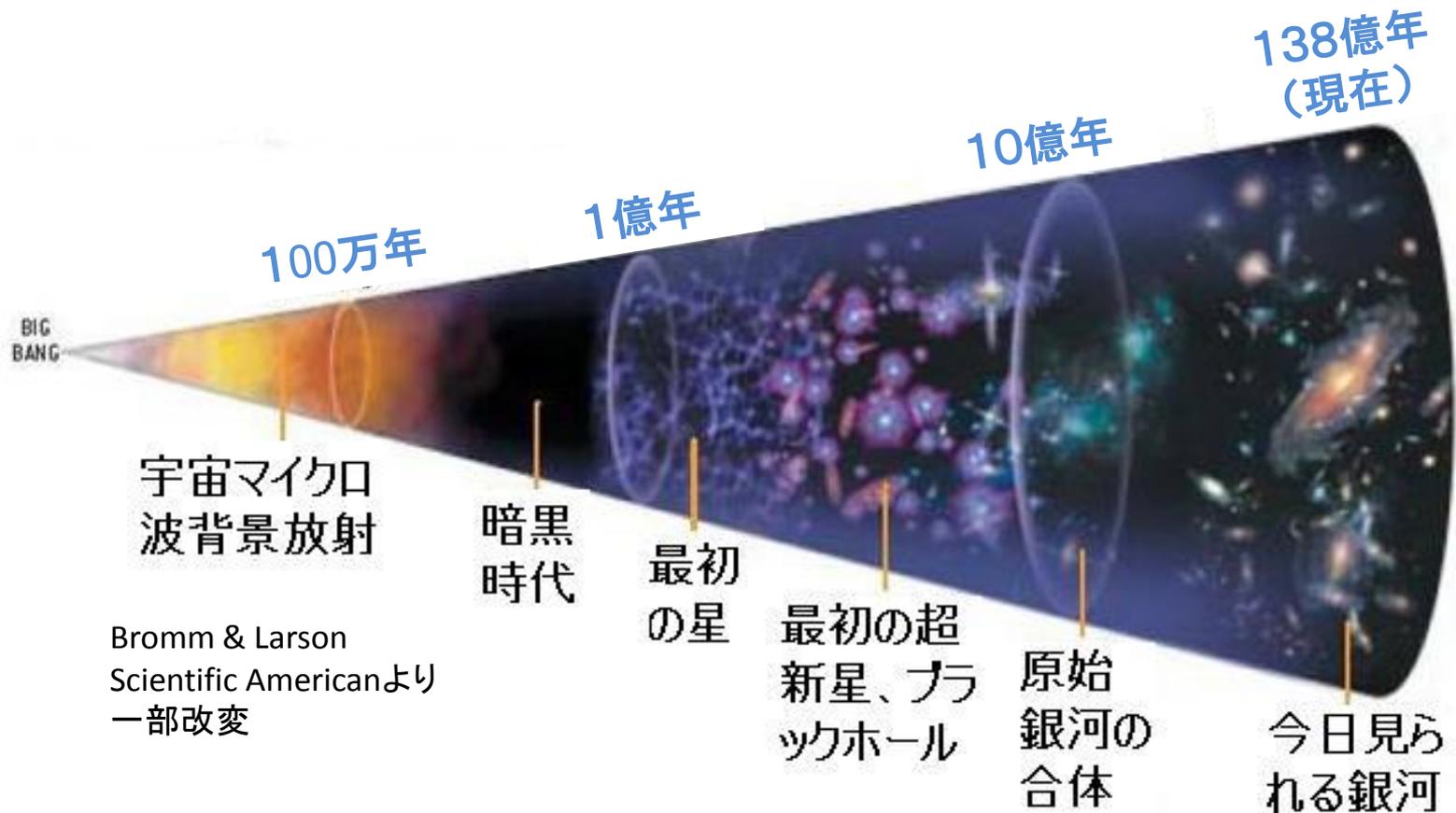
→ 主系列星

原始星 M17-SO1



酒向ほか(2005)

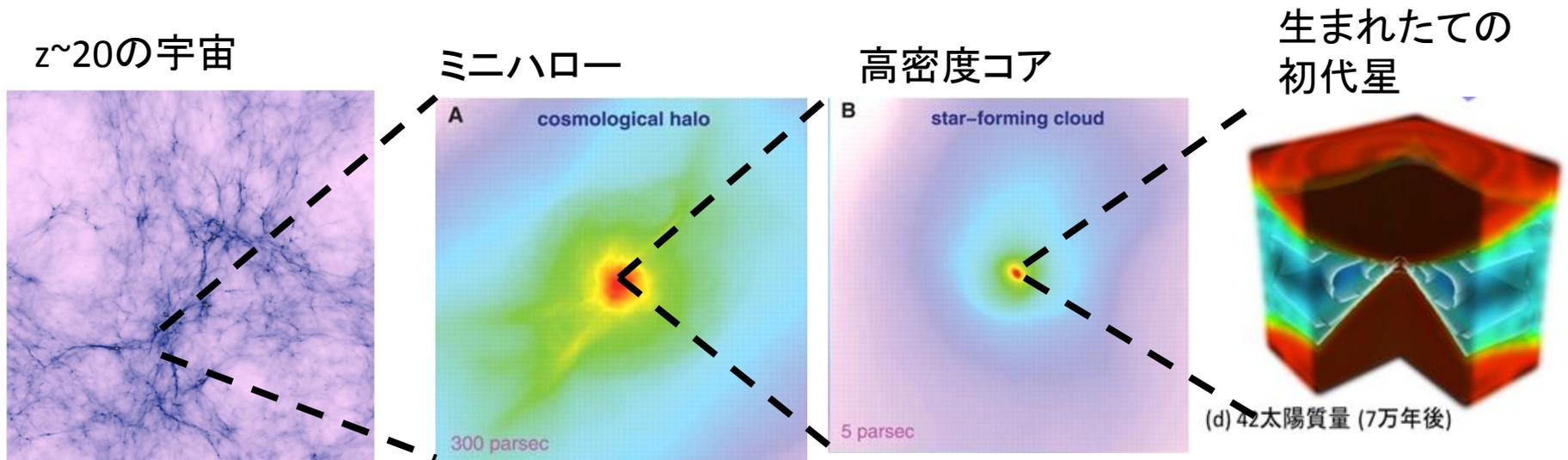
II. 宇宙初期の星形成



まとめ (その1)

II.1 宇宙最初の星＝初代星

- $z \sim 20-30$ で、
- ミニハロー ($\sim 10^6 M_{\text{sun}}$) 中の、
- 数 $100 M_{\text{sun}}$ の高密度コア中で、
- H_2 冷却により、
- 質量 $10-100 M_{\text{sun}}$ の大質量星として誕生



まとめ (その2)

II. 2 種族III/IIの遷移

- ダスト冷却により分裂、低質量の塊が形成
- 必要な金属量はごくわずか(太陽の10万分の1くらい)
→ 第二世代以後は小質量星もたくさん形成

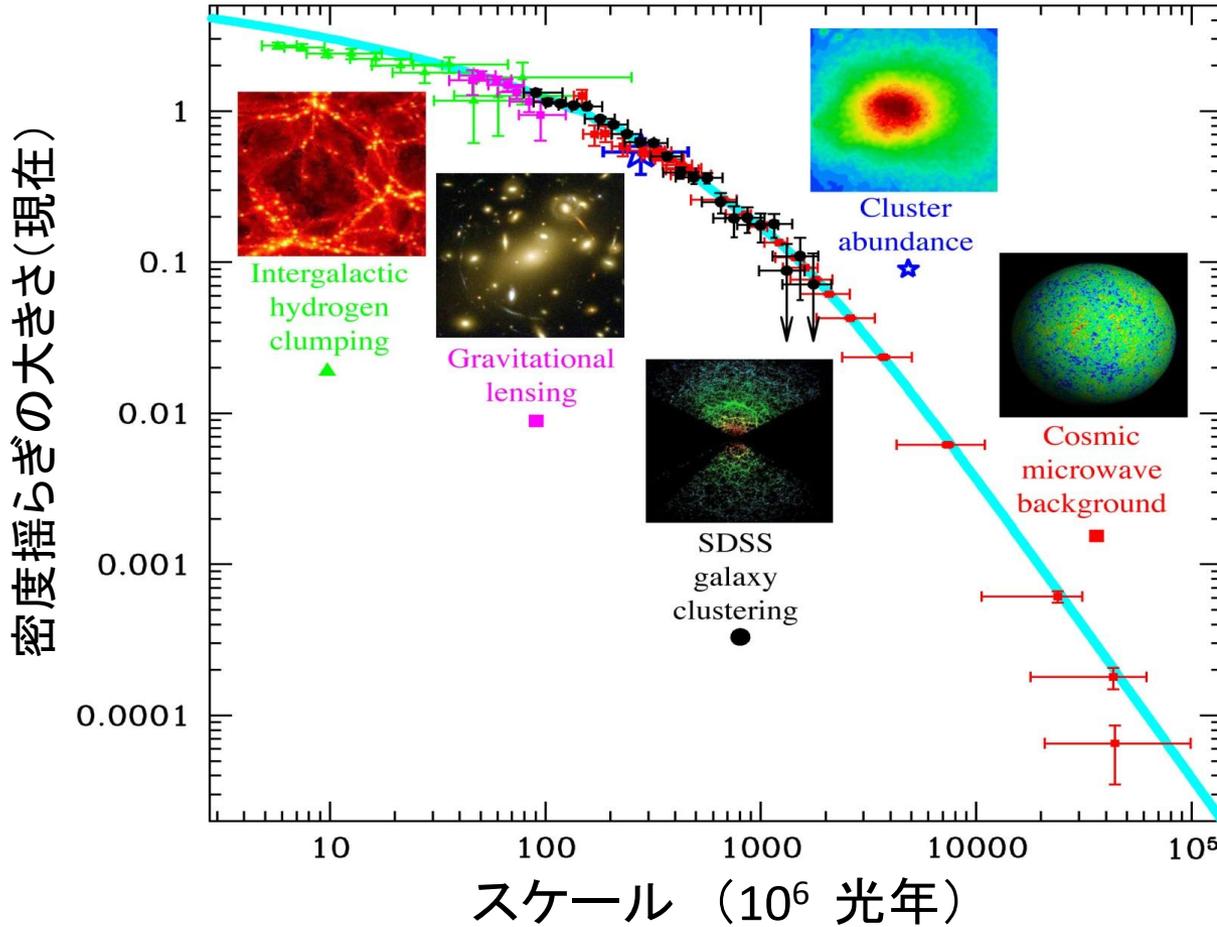
II. 3 超大質量星形成

- ゼロメタル星形成の特殊な場合
- 原子冷却により、数1000Kで収縮
- 高い降着率 $\sim 1M_{\text{sun}}/\text{yr}$
→ SMBHの種BH(質量 $\sim 10^5M_{\text{sun}}$)になりえる

II. 1 初代星形成

初期条件はよく分かっている

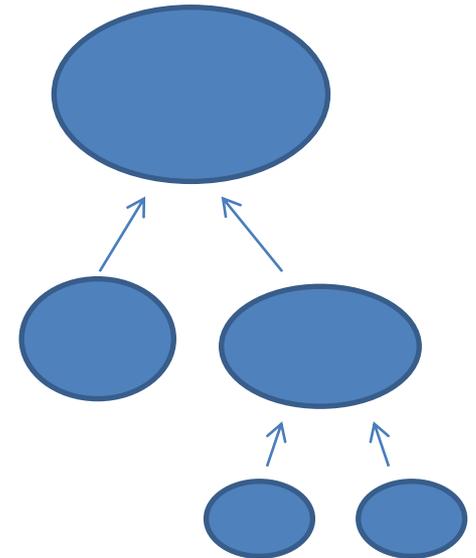
密度揺らぎスペクトル



Tegmark et al. 2004

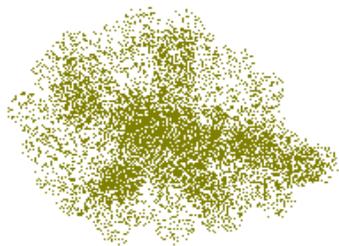
● Cold dark matterモデルでは、小スケールの揺らぎが大きい

● 階層的構造形成
小天体が最初に形成され、その合体により大天体が形成(ボトムアップシナリオ)



光る天体の形成

ダークハロー内で星が出来る条件は？



星間ガス



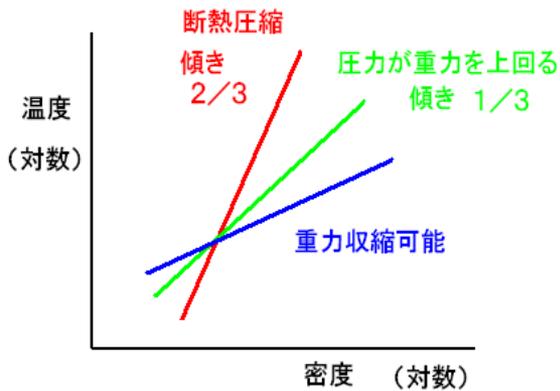
原始星

星形成過程

20桁の密度の圧縮

数密度 $\sim 1-100\text{cm}^{-3}$

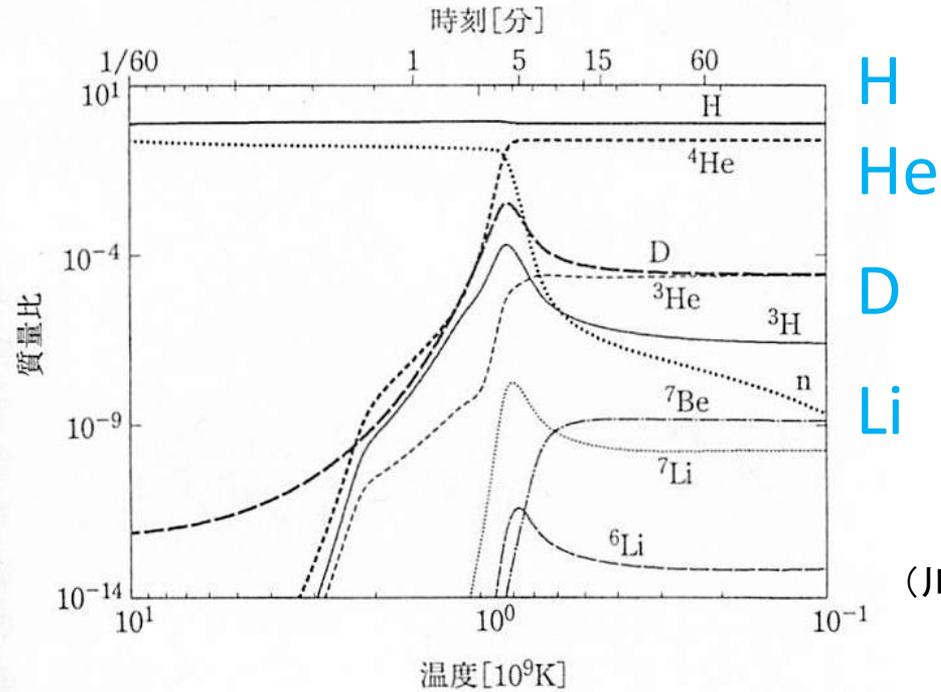
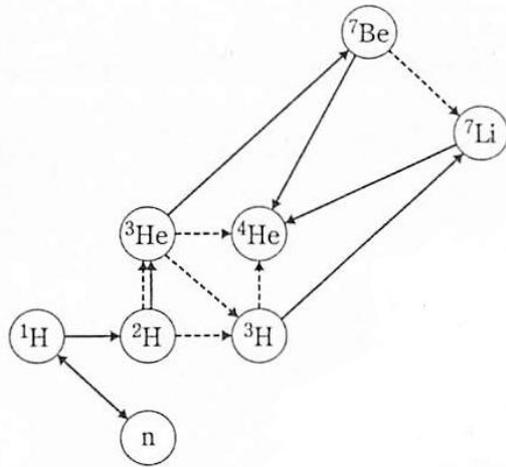
$>10^{20}\text{cm}^{-3}$



- 圧縮すると一般に温度が上昇する
- 輻射冷却が効率よく進まないと圧力が増して収縮できない。

輻射冷却が重要。

初代星の材料＝始原ガス



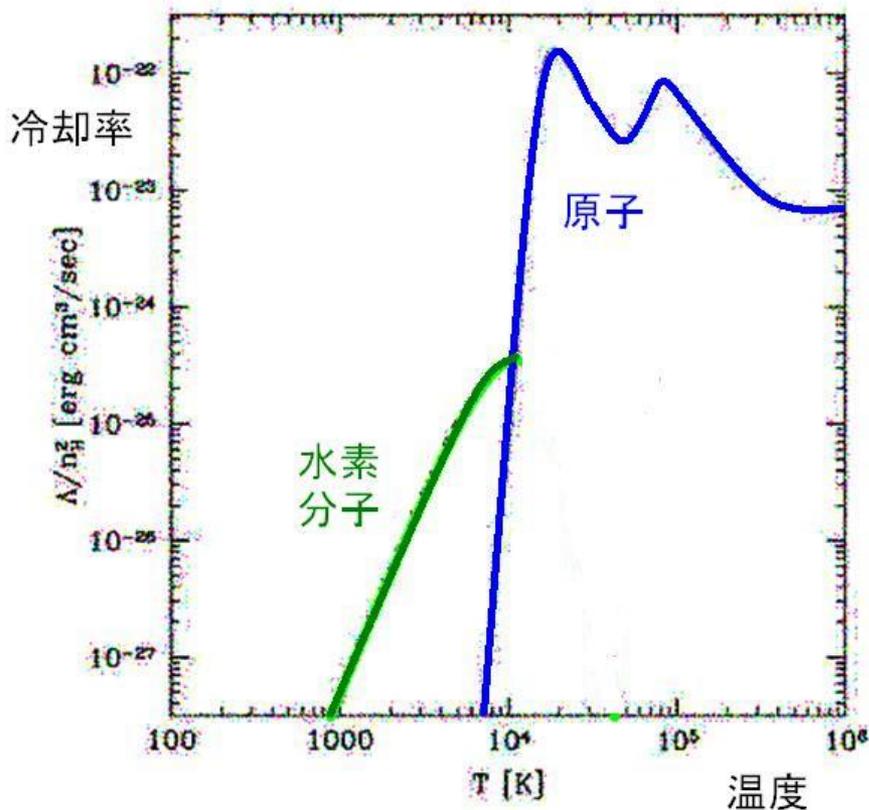
(川崎2006)より

ビッグバン元素合成で
「始原ガス」が生まれる。

- 宇宙誕生後、3, 4分 **水素、重水素、ヘリウム、リチウム**
- 周期表の炭素より重い元素(天文学では重元素と呼ぶ)は以後、星の中で生まれる。

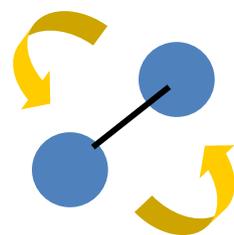
始原ガスの輻射過程

始原ガスの輻射冷却率



- 原子冷却: $T > 10^4 K$:
- H_2 冷却: それ以下

水素分子(H_2)
回転放射

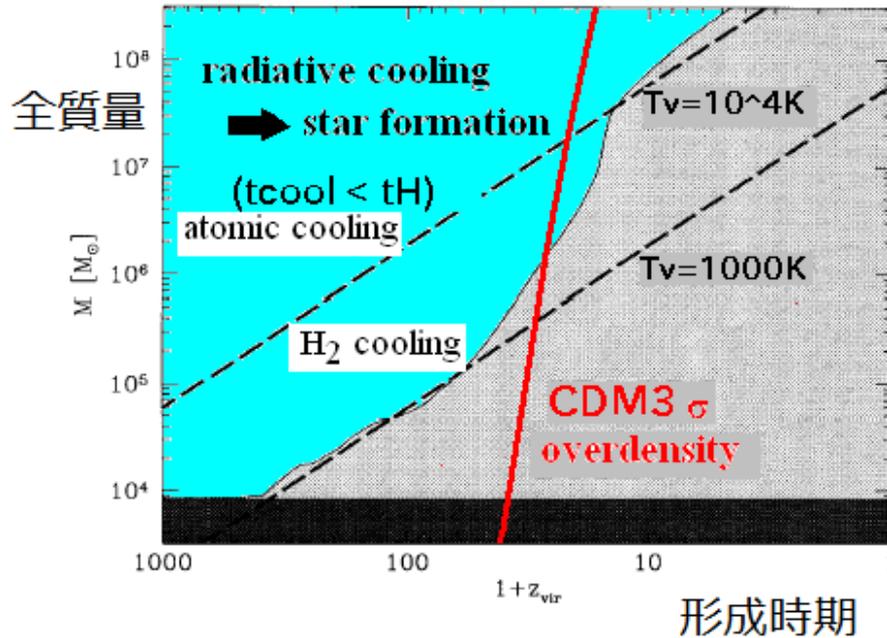


光子(赤外線)を出して
元の状態に戻る

28 μm

衝突により回転状態
が励起される
(第一励起エネルギー
0.044eV; 512K)

最初の光る天体の形成



Tegmark et al. 1996

- 階層的構造形成

小天体が最初に形成

- 星形成が起こる条件

物質が集まってショック加熱した後(ビリアル化)、さらに収縮して星になるには輻射冷却が必要



初代天体 (3σ の場合)

$z \sim 30$, $M \sim 10^6 M_{\text{sun}}$

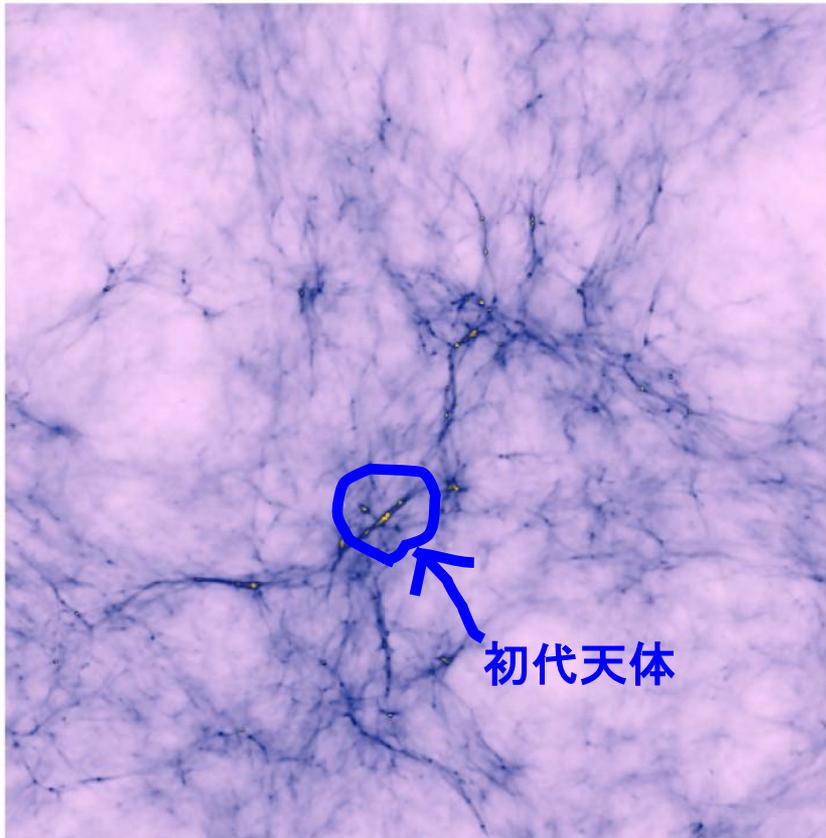
$T_{\text{vir}} \sim 3000 \text{K}$

H_2 輻射により冷却

初代天体(ミニハロー)の誕生

Λ CDMモデル

密度揺らぎから初代天体の形成までシミュレーション



初代天体

600h⁻¹kpc

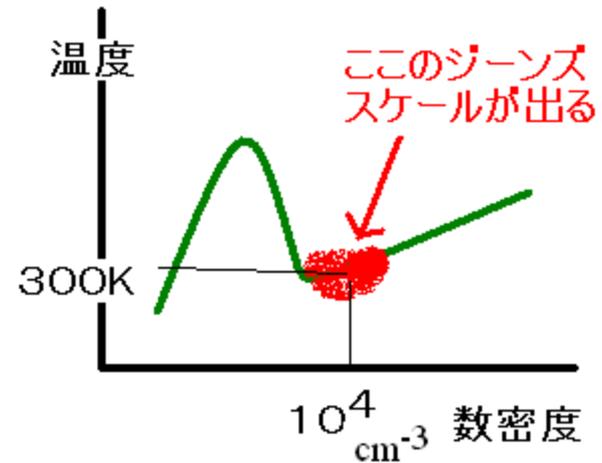
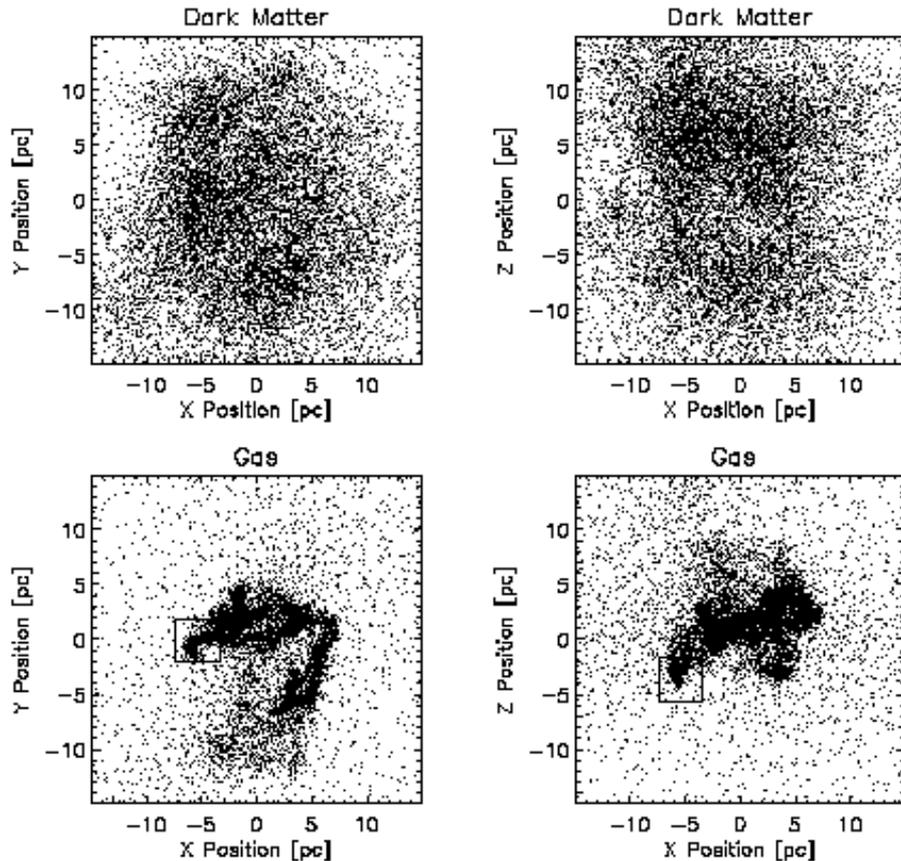
ヴィリアル温度が
1000K以上のハロー
(初代天体;
~10⁶M_{sun}, z~20-30で誕生)

水素分子の回転遷移により
冷却、より高密度に

→ 星形成

Yoshida, Abel, Hernquist & Sugiyama (2003)

始原ガス雲の分裂過程



初代天体の分裂スケール

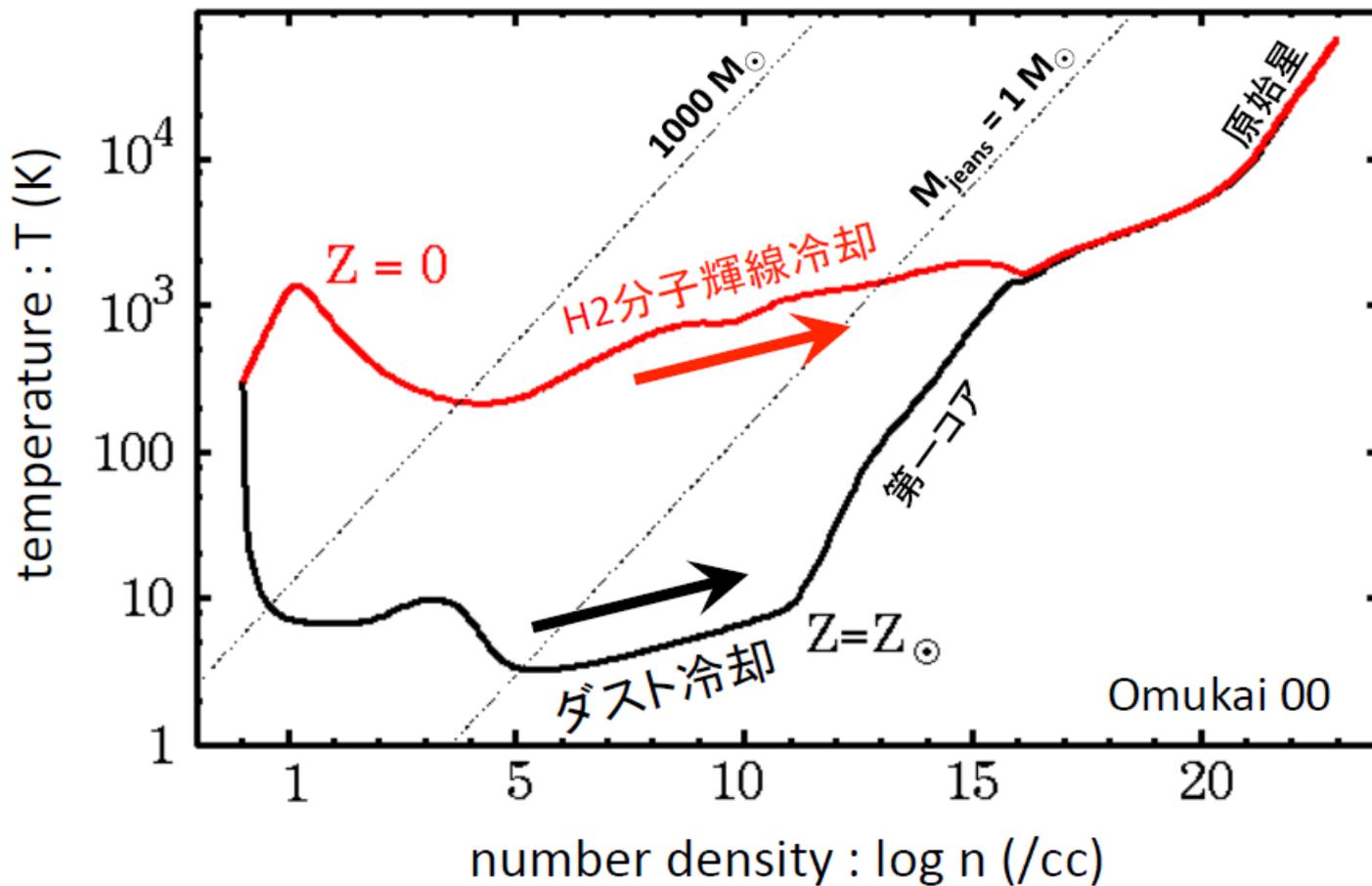
$\sim 1000 M_{\text{sun}}$

分裂片 (高密度コア:
現在の分子雲コアに対応)

=「初代星のたまご」

Bromm et al. 2001

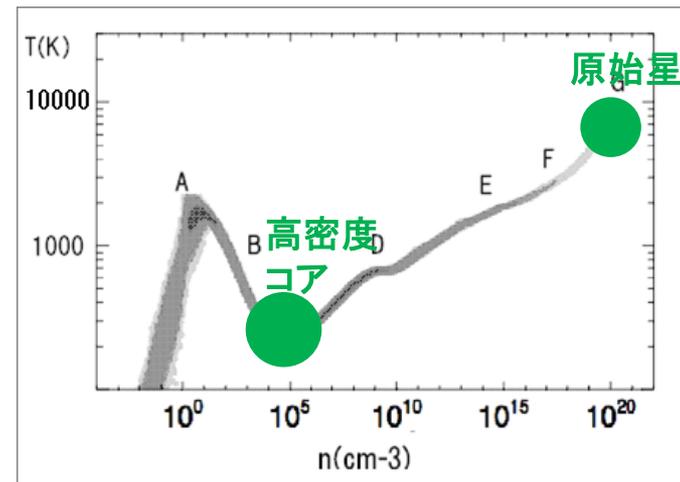
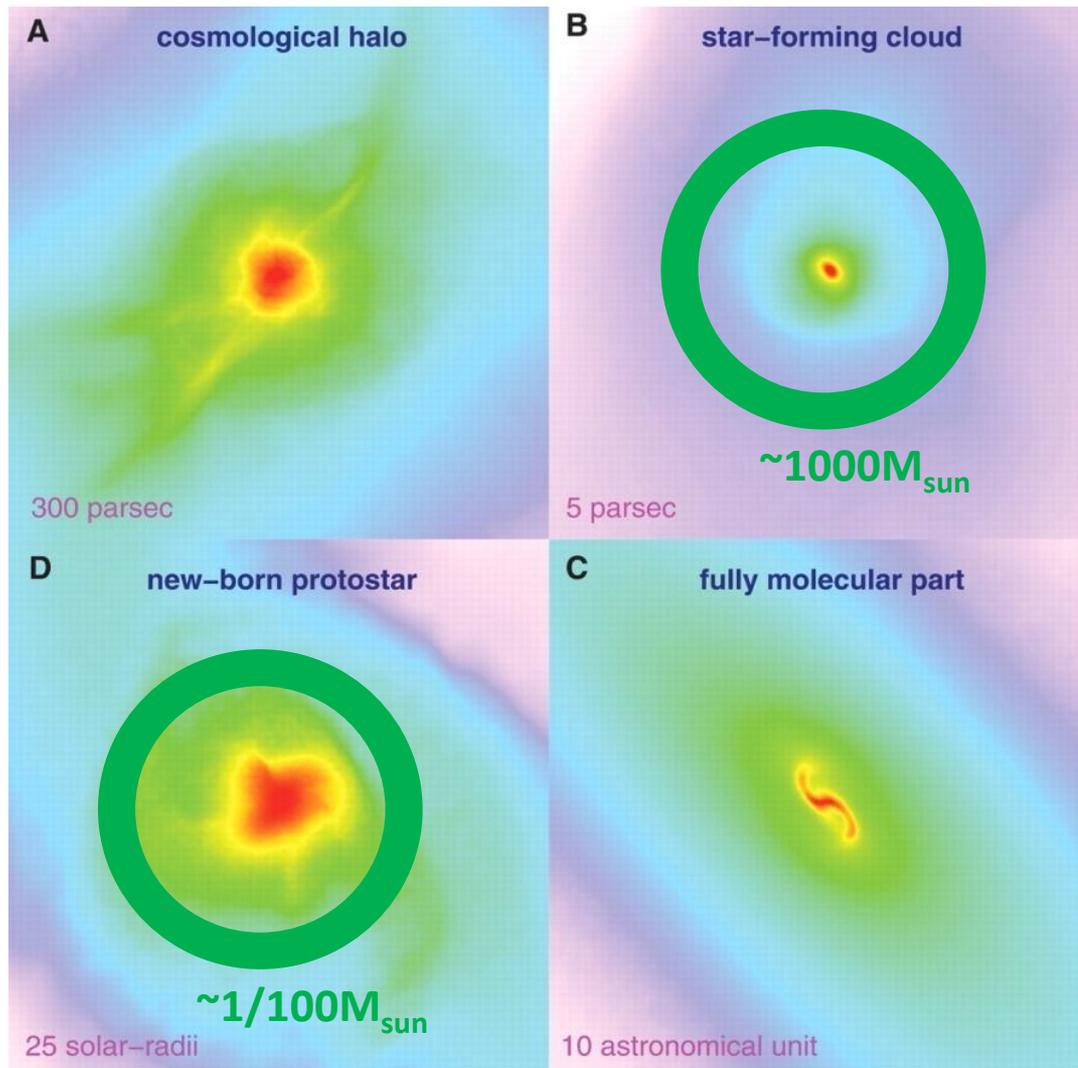
始原ガスの熱進化過程



始原ガスは高温のまま(数100K)収縮。

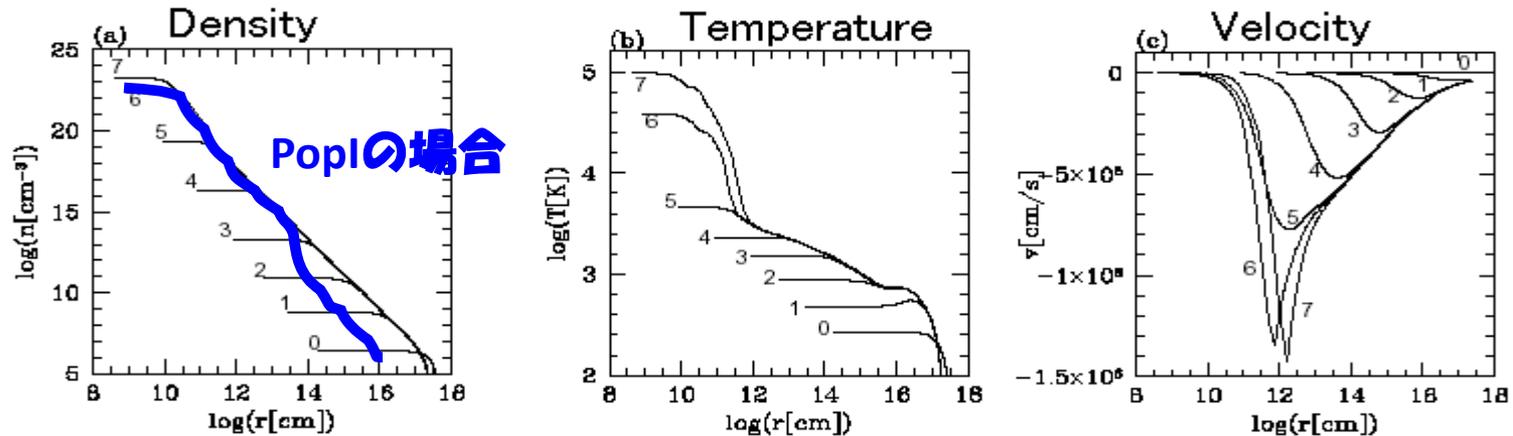
原始星が誕生

温度進化



- 水素分子冷却により数密度 $\sim 10^4 \text{cm}^{-3}$ で、質量 $\sim 1000 M_{\text{sun}}$ の高密度コアが形成。
- その中で $\sim 10^{21} \text{cm}^{-3}$ の原始星が誕生。
- 初期質量 $\sim 10^{-2} M_{\text{sun}}$

高密度コアから原始星への動的進化： 暴走的収縮



(K.O. & Nishi 1998)

自己相似的収縮
($n \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ まで)

密度、温度、速度は現在の
星形成コアと比べて高い

図の0-7は時系列

- 原始星 (= 力学平衡なコア)

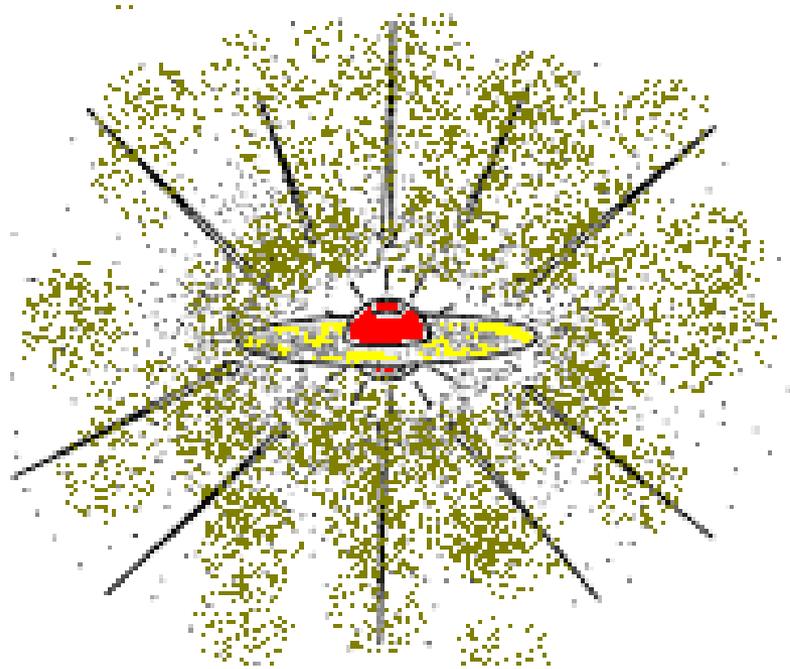
状態6; $n \sim 10^{22} \text{cm}^{-3}$, $M_{\text{star}} \sim 10^{-3} M_{\text{sun}}$

(~種族I星形成の場合と大体同じ)

- 外層の温度、密度は種族Iの場合より高い

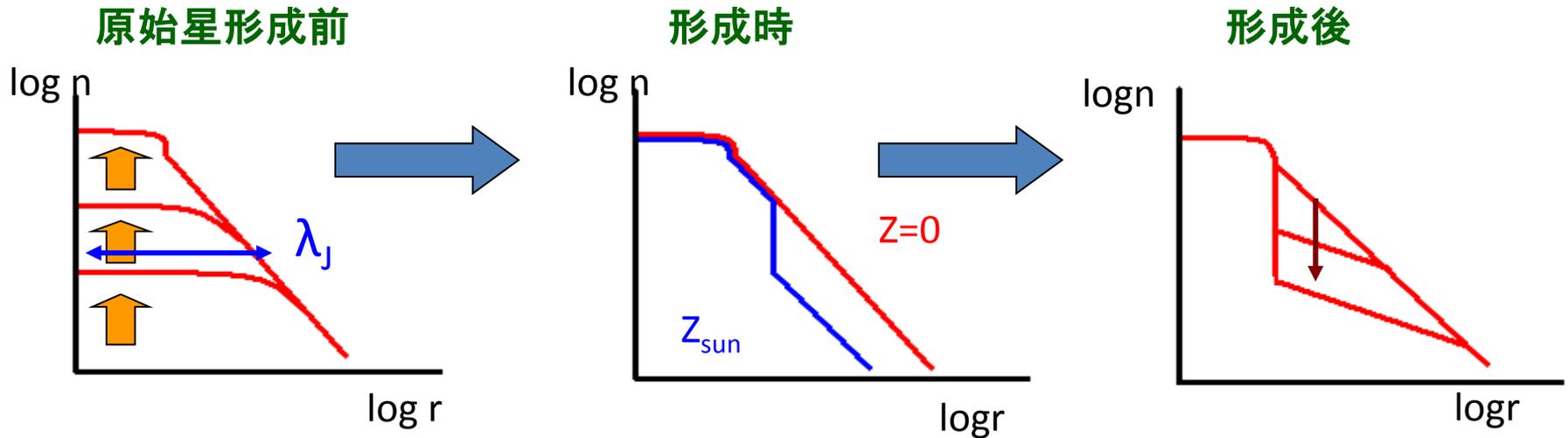
原始星形成までは分かった。 では、初代星の質量は？

Collapse終了時： $10^{-2} M_{\odot}$ の原始星
 $10^3 M_{\odot}$ のガス



**最終質量は降着が
いつ終わるかで決まる。**

原始星への質量降着率



原始星形成後、外層がほぼ自由落下で降着する時

$$\begin{aligned} \dot{M} &\cong M_J / t_{ff} \cong (c_s t_{ff})^3 \rho / t_{ff} \\ &\cong c_s^3 / G \propto T^{3/2} \end{aligned}$$

種族I (10K) で $\sim 10^{-6} M_{\text{sun}}/\text{yr}$,

種族III (1000K) では $\sim 10^{-3} M_{\text{sun}}/\text{yr}$

高温のガスによる星形成の際には降着率は大きい

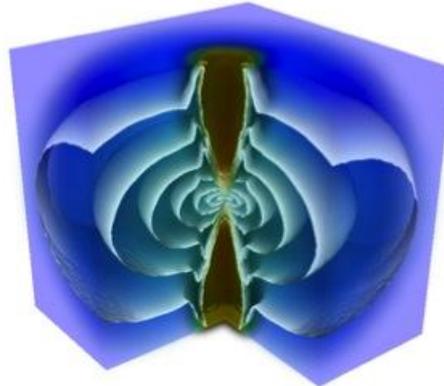
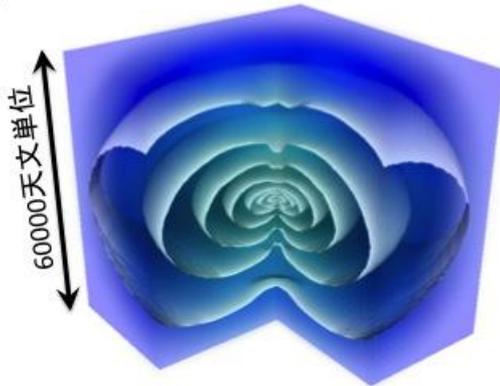
初代原始星の降着進化

降着エンベロープの構造
(密度: コントア、温度: 色)

細川、大向、吉田、Yorke
(2012)

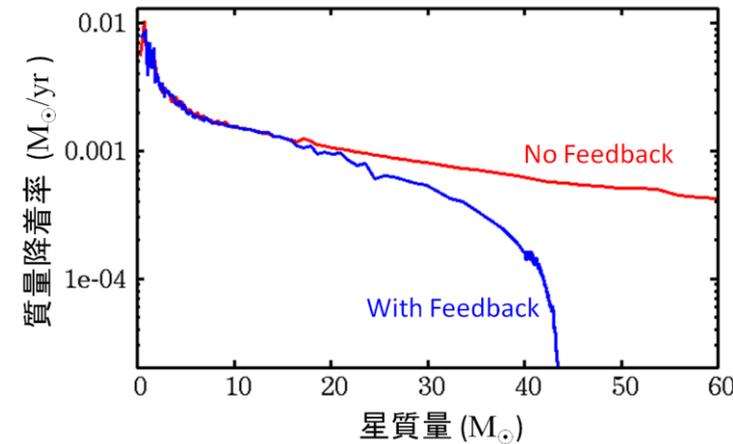
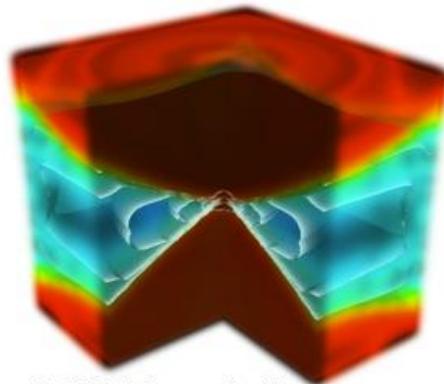
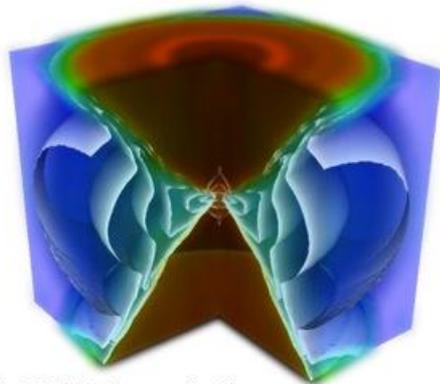
(a) 原始星形成時

(b) 25太陽質量 (2万年後)



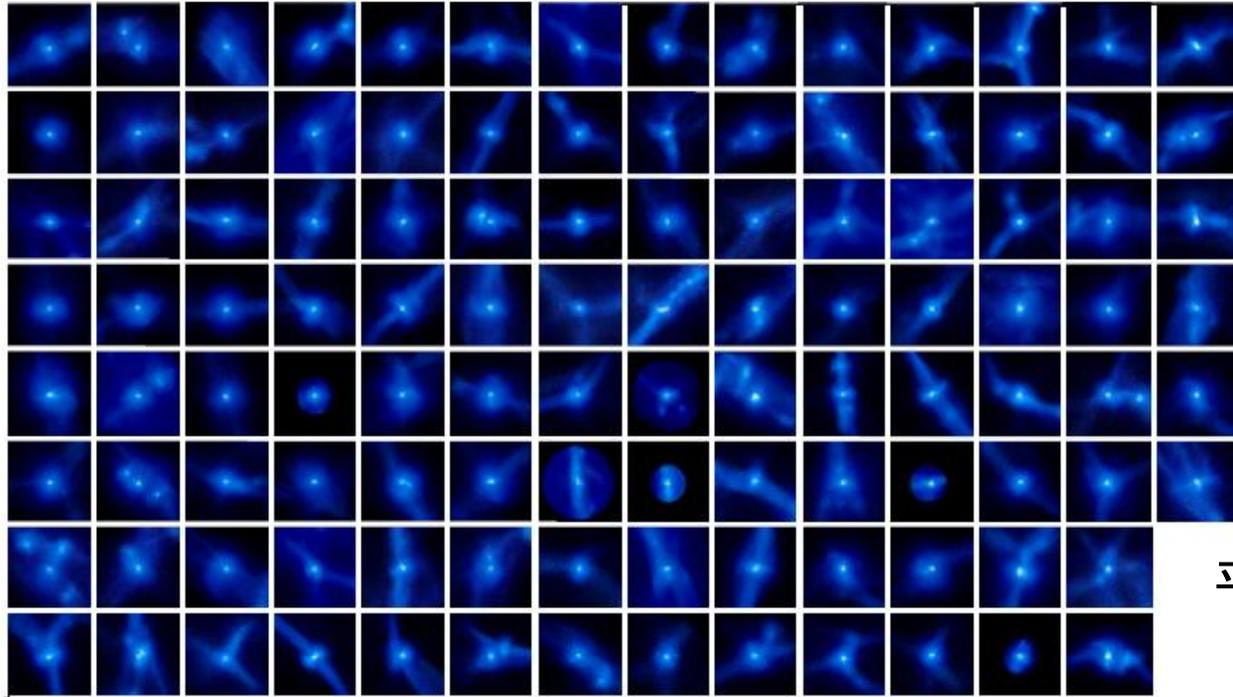
(c) 32太陽質量 (3万年後)

(d) 42太陽質量 (7万年後)

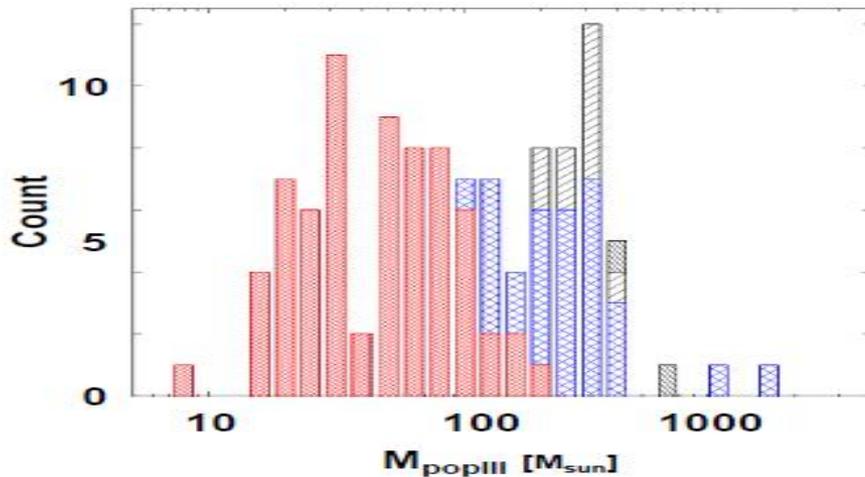


HII領域の成長により、
降着止まる。
→初代星は
約40太陽質量

Pop III IMF



平野ほか(2014)



“100 First Stars”

シミュレーション

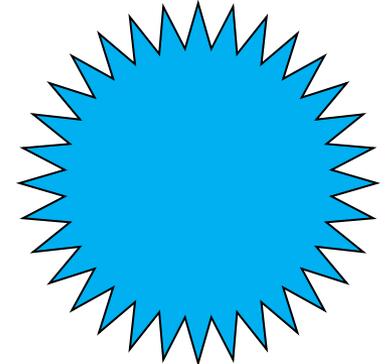
•質量は太陽の数十から数百倍に広く分布

II. 2 重元素の効果

星の種族III/II 遷移

✓ 宇宙の初代星（種族III星）

理論から典型的に大質量(太陽の数10倍)と予想されている。
(連星形成の際に小さいものも出来るかもしれない)



✓ 太陽近傍の星（種族II, I星）

典型的に低質量(太陽の0.1-1倍)



→宇宙の歴史の中で、典型的な星質量が大質量から小質量へと
遷移が起こった(種族III/II遷移)



これはどのようにして起こったのか？

星間ガス中への重元素の蓄積とそれによる冷却（たぶん）

磁場、乱流、外部輻射の効果など

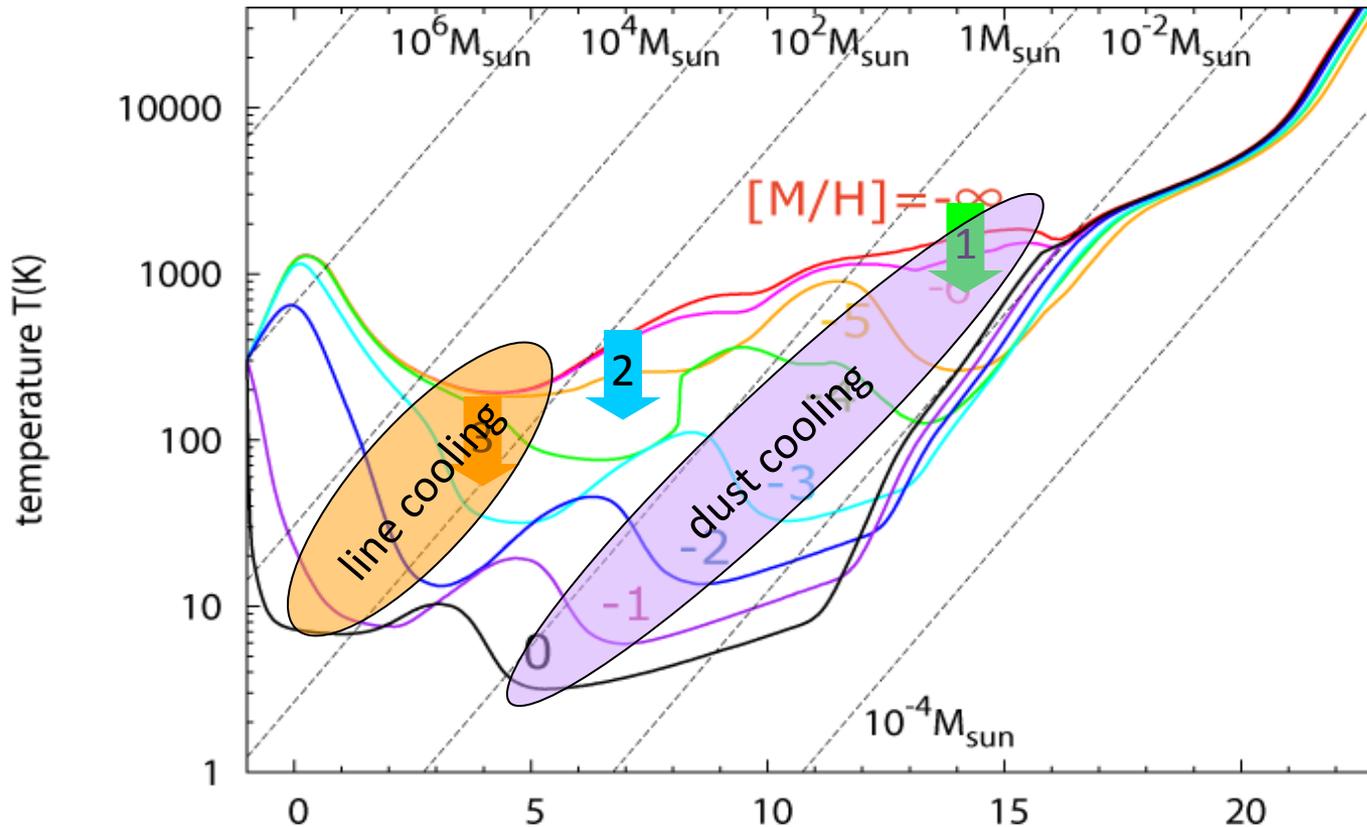
(具体的な機構は不明なのであまり真面目に考えられていない)

低金属度ガスの熱進化

- 1) ダストの熱放射による冷却: $[M/H] > -5$
- 2) ダスト表面反応による H_2 形成 & 冷却: $[M/H] > -4$
- 3) 微細構造線による冷却 (CとO): $[M/H] > -3$

$$[M/H] := \log_{10}(Z/Z_{\text{sun}})$$

KO+2005

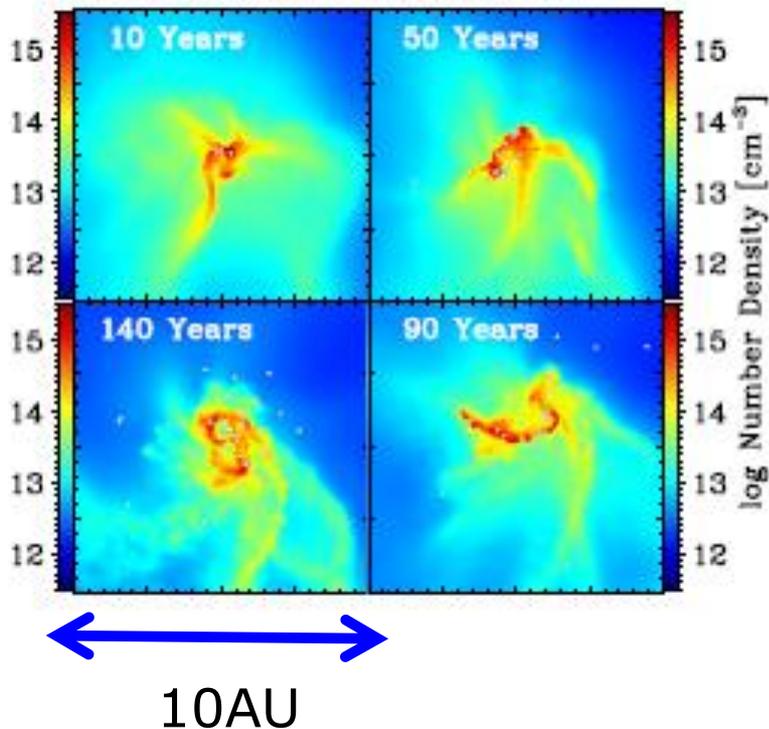


低質量 ($< 1 M_{\text{sun}}$) の分裂片は
ダスト冷却によってのみ形成される

臨界金属度:

どれくらいの重元素があればよいのか？

[M/H]=-4 Dopcke + (2012)



わずかな重元素量
 $Z > 10^{-5} - 10^{-4} Z_{\text{sun}}$
でも、

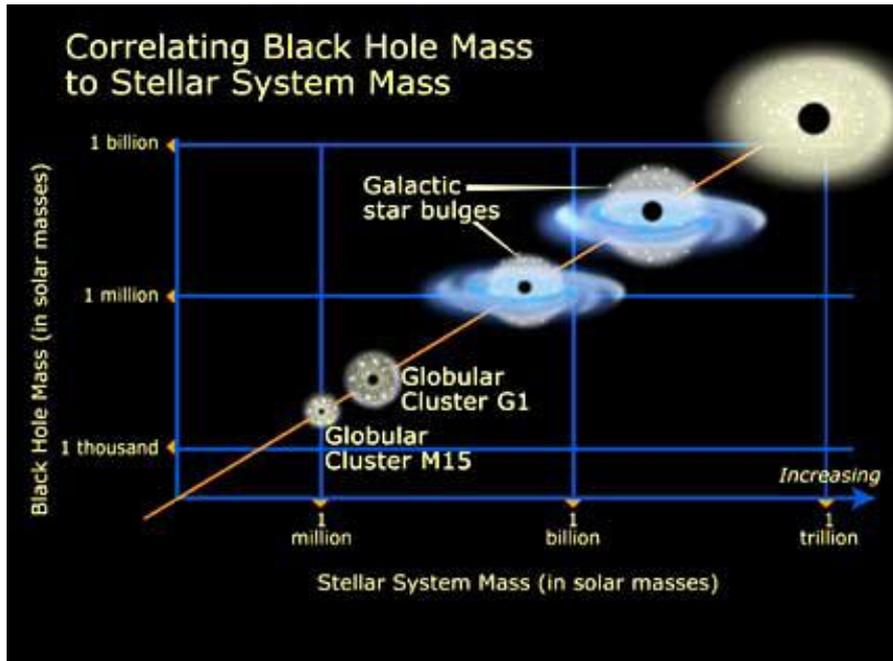


ダスト冷却により
小質量の塊
($\sim 0.1 M_{\text{sun}}$)に分裂

第二世代星以後は小質量星を多く含むだろう

II. 3 超大質量星形成

巨大ブラックホール



- 銀河中心に普遍的に存在

- BH質量はバルジ質量と相関

$$M_{\text{BH}} = 2 \times 10^{-3} M_{\text{bulge}}$$

いわば銀河の本尊といえる

銀河の本尊は 来歴不明

Rees chart (1978)

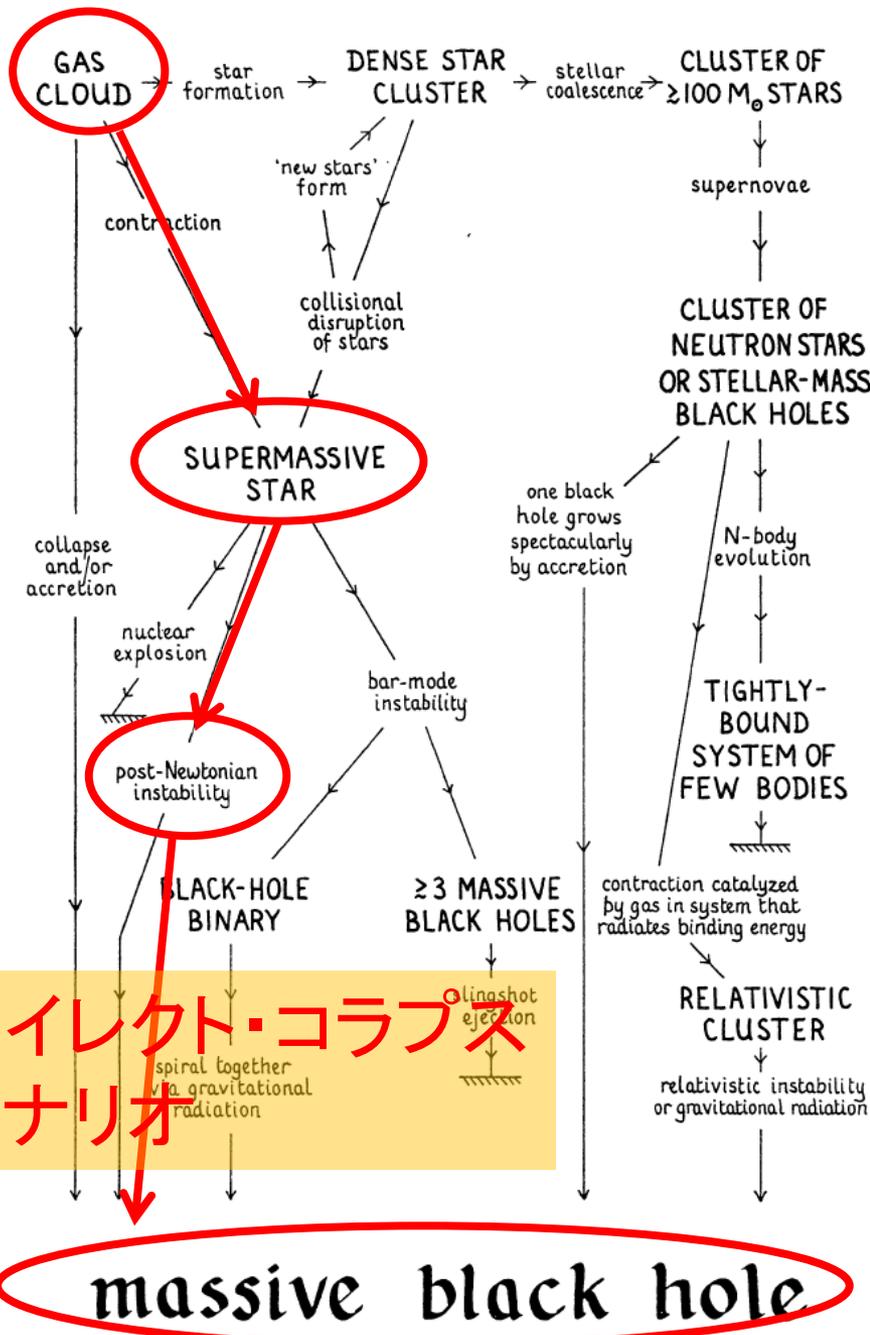


ルドロー男爵
リース卿

35年以上たった現在も
標準シナリオが存在せず。

質量増加方法

降着 か 合体



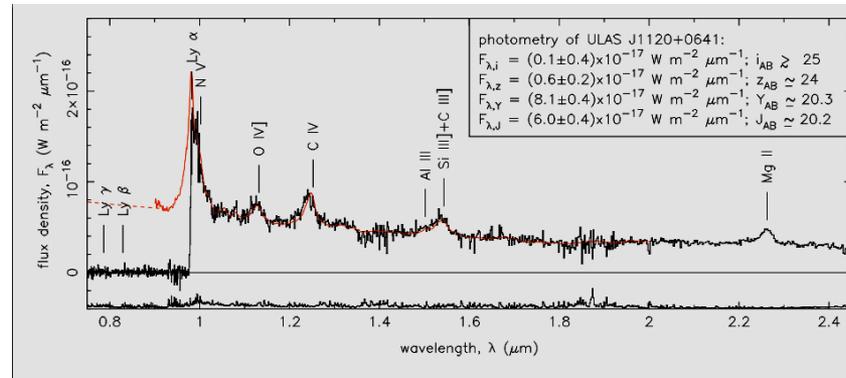
ダイレクト・コラプス
シナリオ

massive black hole

種BHの質量は？

✓ High-z SMBHの発見

Mortlock + 2011



ULAS J1120

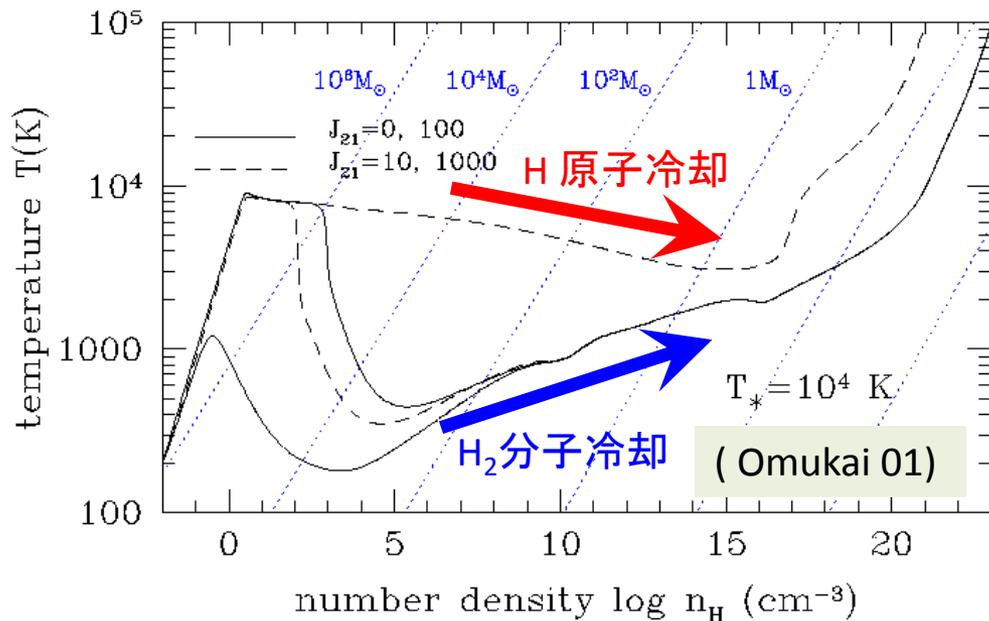
$M_{\text{BH}} = 2 \times 10^9 M_{\text{sun}}$, $z = 7.085$ (0.77 Gyr)

星質量BHからの降着では成長時間がかかりすぎる。

もっと大質量な種BHを示唆

超大質量星形成 ($\sim 10^5 M_{\odot}$)

PopIII星形成の特殊なケース



① 水素分子が破壊されたハロー
(e.g., 近くの星からの紫外光)



② H原始冷却による崩壊
(almost isothermal at $T \sim 8000\text{K}$)

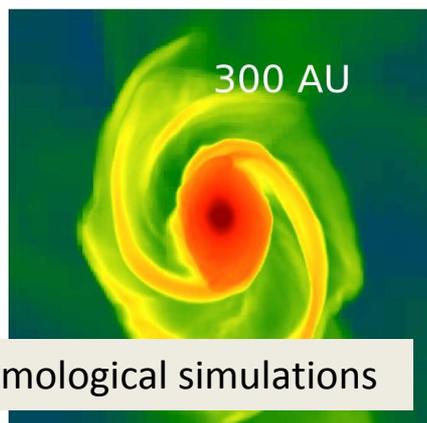
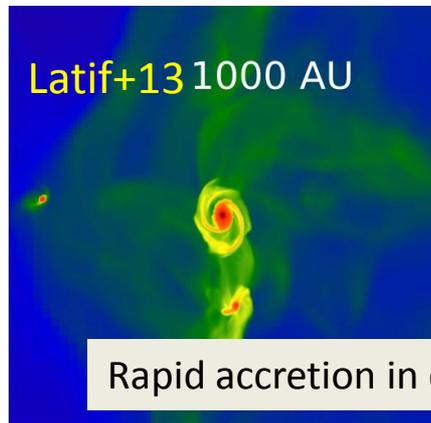


③ 急速なガス降着 ($> 0.1 M_{\odot}/\text{yr}$)
による原始星の成長

$$\dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{ff}} = \frac{c_s^3}{G} \propto T^{1.5}$$



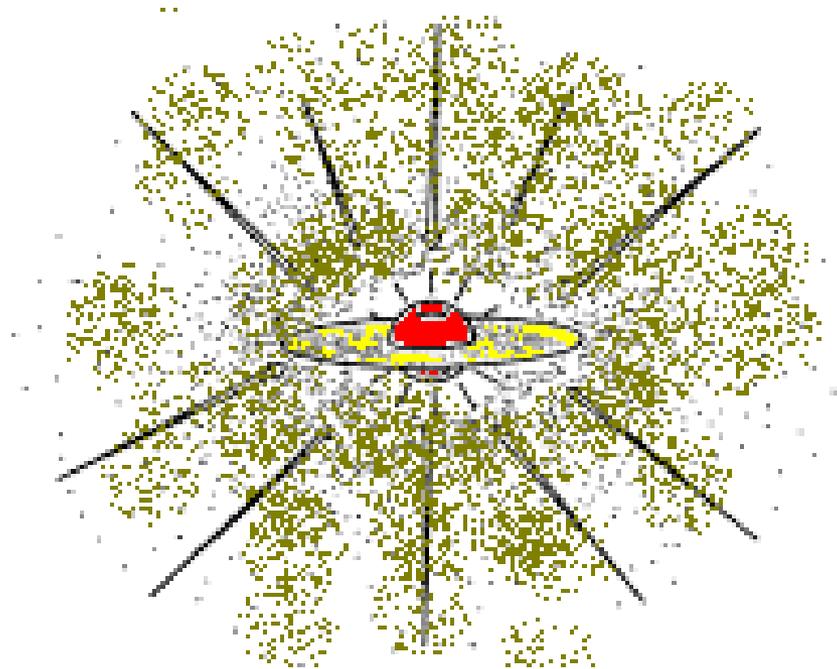
④ GR不安定による星の崩壊
 $\rightarrow 10^5 M_{\odot}$ BH



Rapid accretion in cosmological simulations

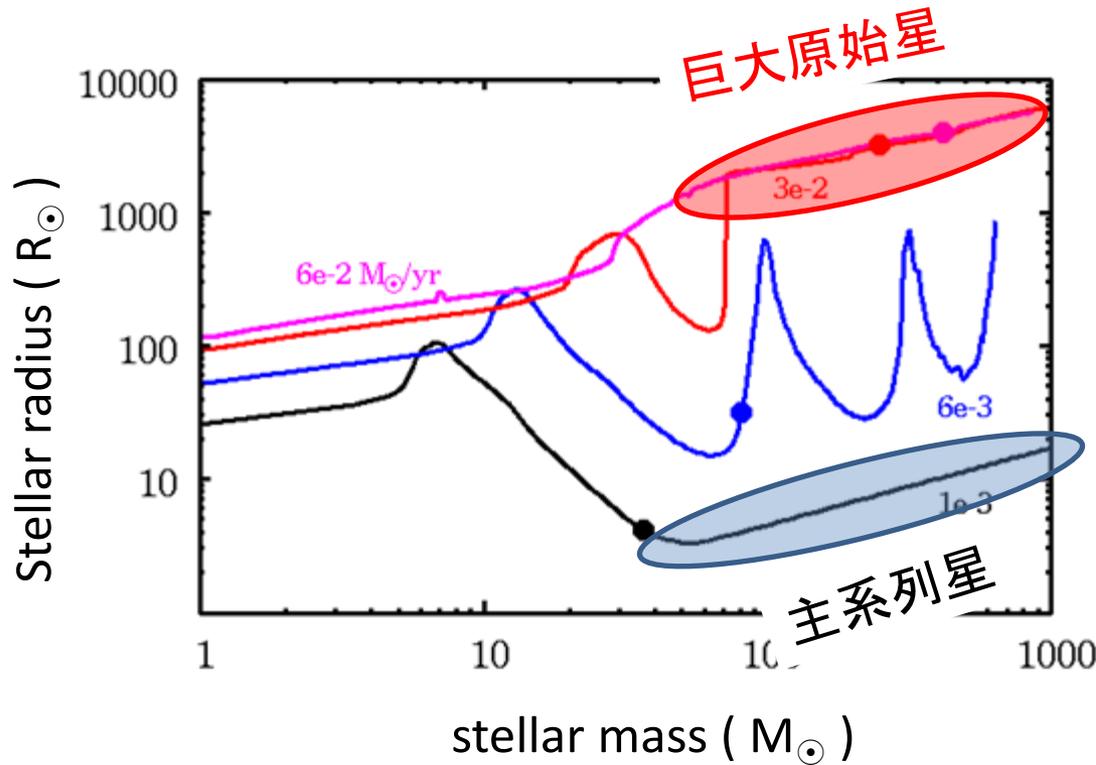
原始星は本当に 超大質量に成長できるだろうか？

コラプス終了時：
 $10^{-2} M_{\text{sun}}$ の原始星
まわりに $10^{5-6} M_{\text{sun}}$ のガス



「巨大原始星」フェイズ

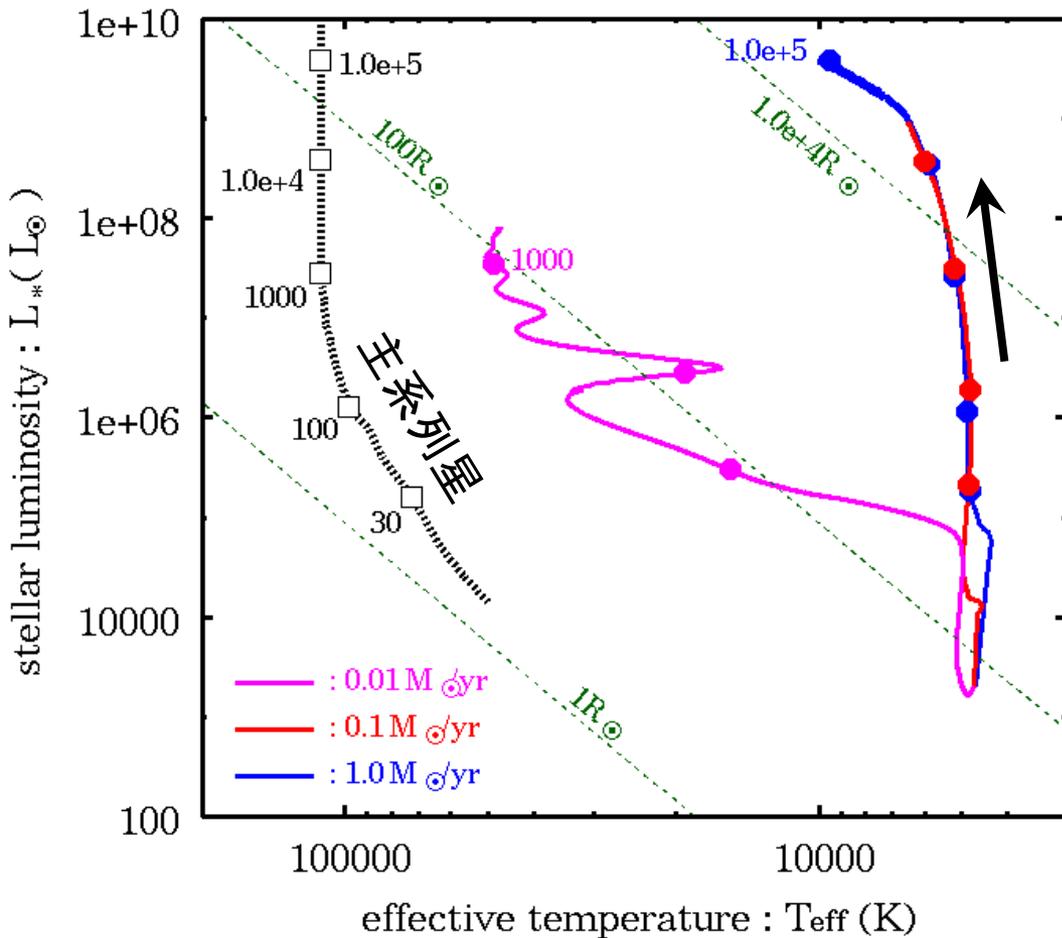
Hosokawa, Yorke, KO (2012)



降着率が大きい時
($> 0.01 M_{\text{sun}}/\text{yr}$)、
原始星は
KH収縮をせず、逆
に膨張する(半径は
 $\sim 10\text{AU}$)。

巨大原始星の HR図上での進化

Hosokawa et al.(2013)

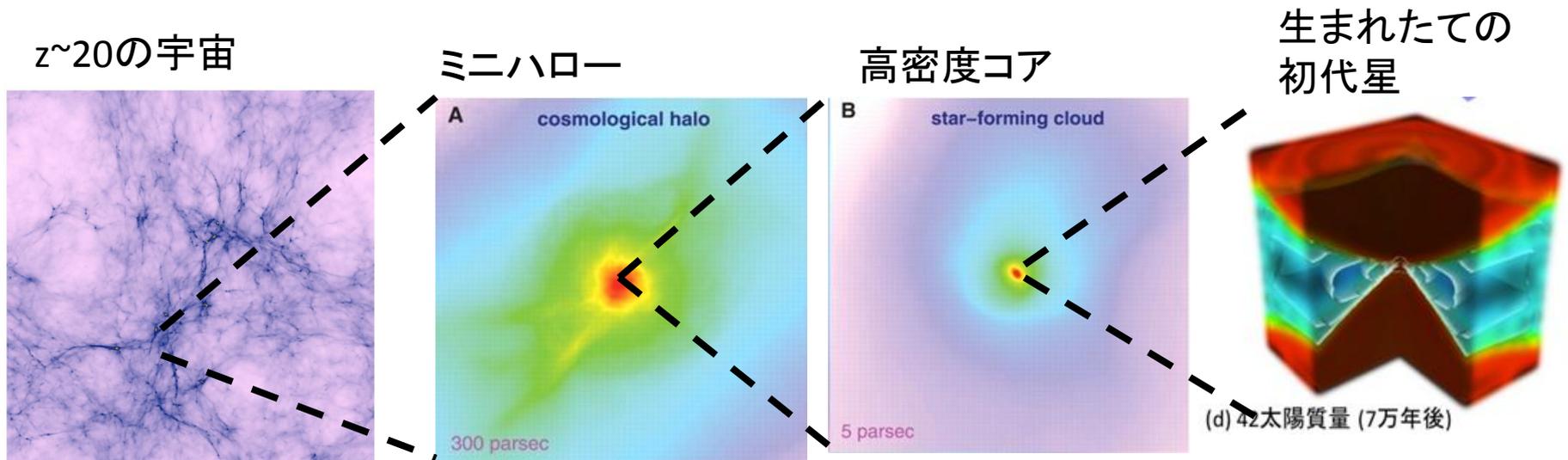


- ✓ 巨大原始星の有効温度は数千K (赤色巨星のように見える)
→ UV放射はほとんどなし
→ 降着は邪魔されずに続き、中心星は超大質量になる。
- ✓ 質量が太陽の10万倍に達すると、一般相対論的不安定性により重力崩壊、BHになる
→ **SMBHの種**

まとめ (その1)

II.1 宇宙最初の星＝初代星

- $z \sim 20-30$ で、
- ミニハロー ($\sim 10^6 M_{\text{sun}}$) 中の、
- 数 $100 M_{\text{sun}}$ の高密度コア中で、
- H_2 冷却により、
- 質量 $10-100 M_{\text{sun}}$ の大質量星として誕生



まとめ (その2)

II. 2 種族III/IIの遷移

- ダスト冷却により分裂、低質量の塊が形成
- 必要な金属量はごくわずか(太陽の10万分の1くらい)
→ 第二世代以後は小質量星もたくさん形成

II. 3 超大質量星形成

- ゼロメタル星形成の特殊な場合
- 原子冷却により、数1000Kで収縮
- 高い降着率 $\sim 1M_{\text{sun}}/\text{yr}$
→ SMBHの種BH(質量 $\sim 10^5 M_{\text{sun}}$)になりえる