

Early Black Hole Formation by Accretion of Gas and Dark Matter

梅田秀之、吉田直紀、佐々木明、他^(*)
(東京大学)

(*) K. Nomoto, T. Ohkubo, S. Tsuruta, M.J. Rees

H. Umeda et al. : Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 08, 024 (2009)

T. Ohkubo et al.: ApJ accepted (2009), arXiv0902.4573

2009年10月15日(木)~17日(土) SWANS

イントロ

- $z \sim 6$ のクエーサー(SMBH $\sim 10^9 M_{\odot}$)の存在 (Fan et al. 2003)
- このSMBHがどのように作られたのか謎
- 一つの有力なシナリオ (e.g. Li et al. 2007; Tanaka & Haiman 2008)
 - Pop III ($z \sim 30$) のseed BH $\sim 100 M_{\odot}$ にBondi 降着
 - 比較的すぐにEddington 降着率に達し、そのまま Eddington rate で成長
 - 何度かBHどうしの合体を繰り返せば、かろうじて説明できる。
 - もしくは Super Eddington 降着か？
- 他にもPop III から $\sim 10^{4-5} M_{\odot}$ seed BH を作る案なども提案されている (Begelman et al. 2006)
 - しかし特殊な条件(ダストがある等)が無いとできそうにない (Omukai et al. 2008)

Bondi 降着

$$\dot{m}(r, v) = \frac{4\pi G^2 \rho_b(r)}{(c_s^2 + v^2)^{3/2}} m^2 \quad (1)$$

$$m_{\text{Edd}} = \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \frac{c_s^3}{4\pi G^2 \rho_b \tau_{\text{Edd}}} \approx 3500 \left(\frac{c_s}{4 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \left(\frac{\rho_b}{M_\odot \text{ pc}^{-3}} \right)^{-1} M_\odot$$

- Bondi 降着率(1)は中心天体の質量Mの2乗で増える
⇒ seed BH mass が重いほど有利 (速く成長)
- BH 質量が $M_{\text{edd}} \sim 10^{3-4} M_\odot$ に達した後はEddington rate で成長

The virial temperature is given by

$$T_{\text{vir}} \approx 380(1+z) \left(\frac{M}{10^7 M_\odot} \right)^{2/3} \left(\frac{\Omega_0 h^2}{0.14} \right)^{1/3} \text{ K},$$

the isothermal sound speed is

$$c_s \approx 1.8 (1+z)^{1/2} \left(\frac{M}{10^7 M_\odot} \right)^{1/3} \left(\frac{\Omega_0 h^2}{0.14} \right)^{1/6} \text{ km s}^{-1}$$

Pop III BH $\geq 100M_{\odot}$ は本当にあったのか？

- 星の質量と運命 (Mass-lossの無い場合)
 - $\sim 8-140M_{\odot}$: Fe Core collapse (SNe)
 - $\sim 140-280M_{\odot}$: e^+e^- Pair Instability SNe
 - $> \sim 280M_{\odot}$: Fe core collapse
- 過去にはしばしば大半のPopIIIはPISNになると言われていた。
 - PISNはBHにならない
 - しかし金属欠乏星の組成にその兆候が全く無い
(e.g., Umeda & Nomoto 2002)
 - 鉄を作りすぎるので、相当数が少なくないと銀河の化学進化と矛盾する

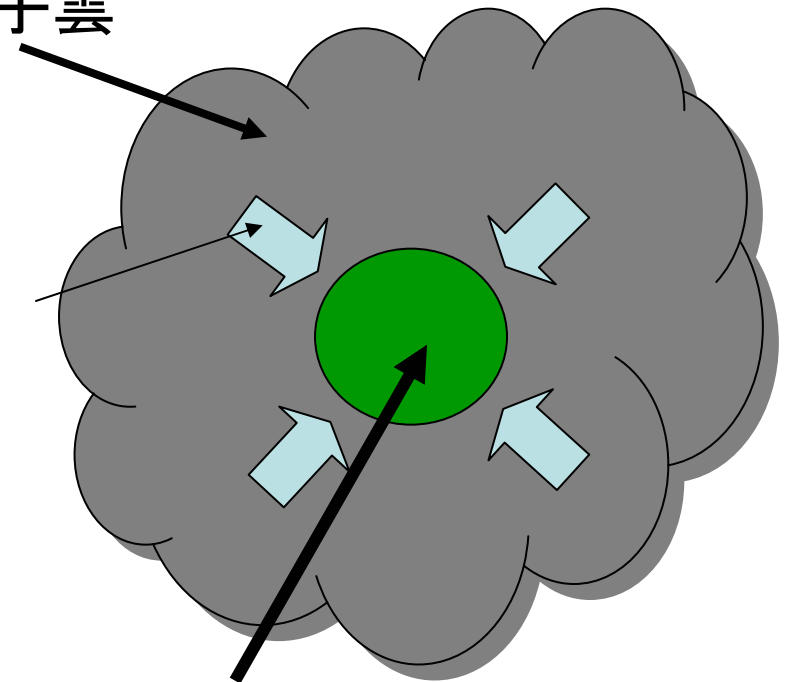
初代星の進化：質量降着が止まらない(？)

($\sim 10^6 M_{\odot}$ のダークハローの中に作られる)
 $\sim 1000 M_{\odot}$ 程度の分子雲

金属のない状況下では放射圧が小さい



質量降着



proto star core

原始星のコアが大きく成長できる
先行研究：

[Omukai & Palla 2003]

[Tan & McKee 2004]

very-massive (over 100 or even $300 M_{\odot}$) ?

本研究の目的と手法

- BH $\geq 100M_{\odot}$ は本当にあったのか？
 - 第一世代星の質量とその運命
- 質量降着している星の進化計算
 - 現実的な質量降着率
 - 形成されるブラックホールの質量
- ダークマター対消滅の効果
- 論文：
 - H. Umeda et al. : Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 08, 024 (2009)
 - T. Ohkubo et al.: ApJ accepted (2009), arXiv0902.4573

先行研究:

一定降着率での質量増加: Omukai & Palla 2003

質量降着率

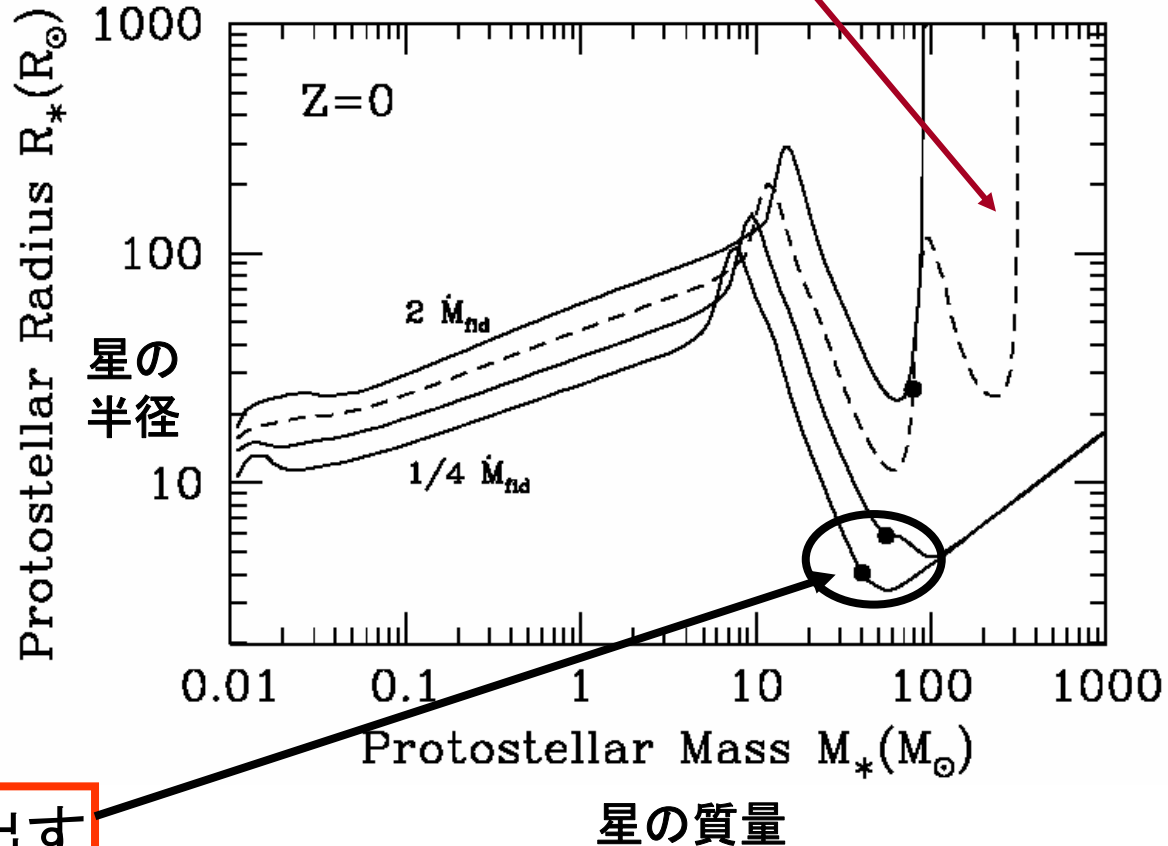
$$\sim 1 - 4 \times 10^{-3} M_{\odot} / \text{yr}$$

$$dM/dt = 4 \times 10^{-3} M_{\odot} / \text{yr} \\ = \text{Critical } dM/dt$$

その後の進化?

PISN or Core Collapse

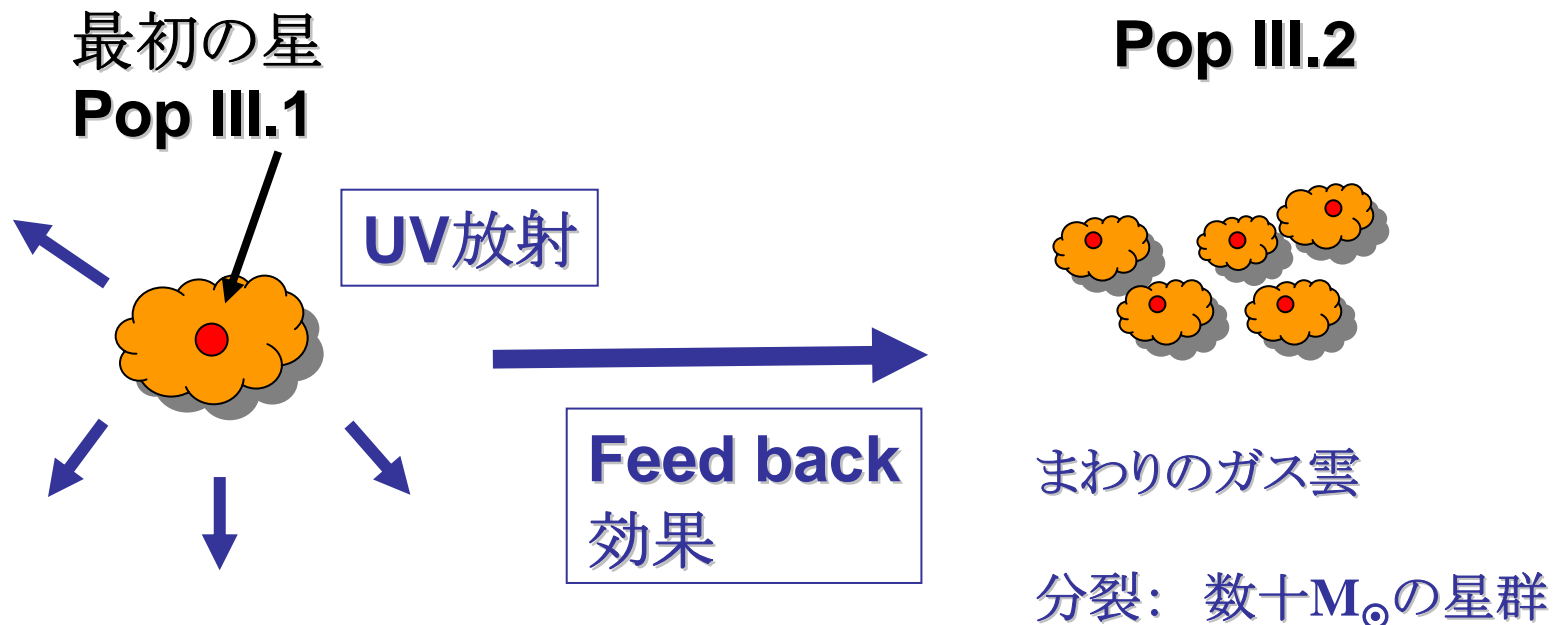
$dM/dt > \text{Critical rate}$ だと外層が
膨張して成長が止まる



CNOサイクルが回り出す

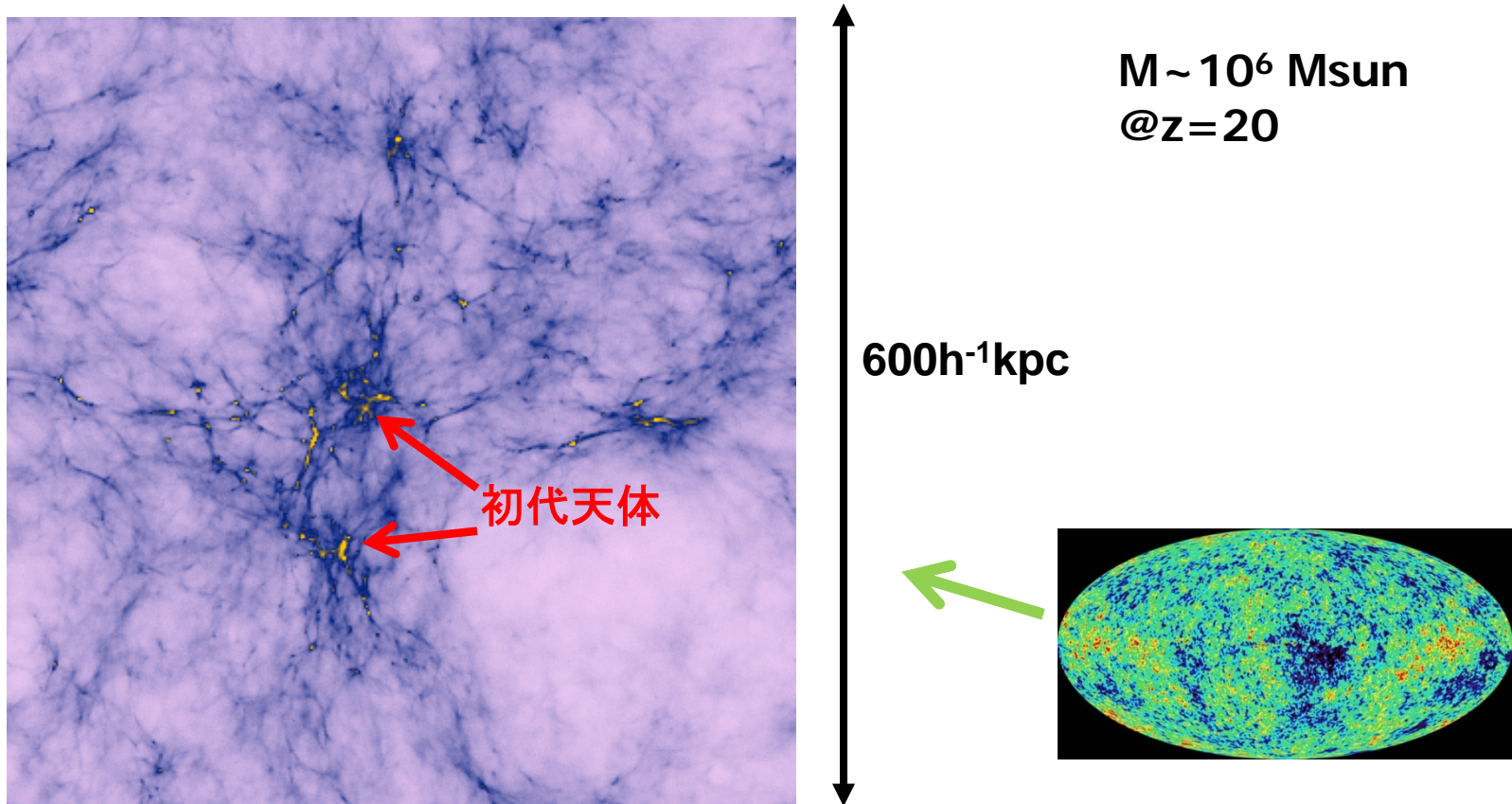
Ohkubo et al. (2009, ApJ accepted)

- 質量降着を取り入れた詳細なPopIII星進化計算
 - 宇宙論的シミュレーション(Yoshida et al. 2006)に基づく現実的な質量降着を取り入れた
 - **重要な特徴:** $M \gtrsim 100M_{\odot}$ では dM/dt がCritical rate より少ない
⇒ 質量が増え易い
- 形成時期は典型的に **$z \sim 10$**



初代天体の形成までシミュレーション

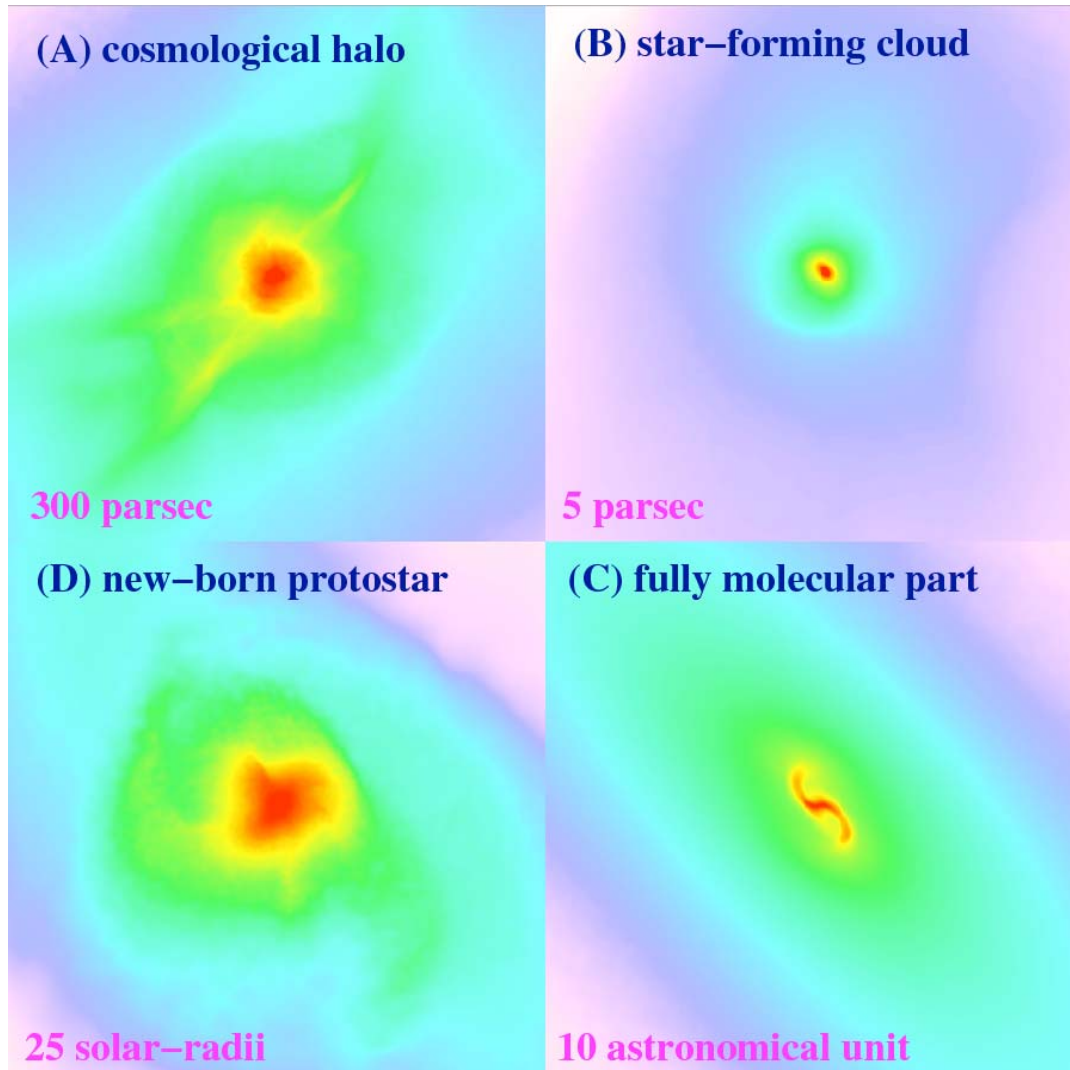
標準宇宙モデル： 暗黒エネルギー、暗黒物質入り



Yoshida, Abel, Hernquist & Sugiyama (2003)

3次元宇宙論的星形成シミュレーション

(Yoshida et al. 2006, 2007, 2008)



$z \sim 20$ で $10^6 M_{\odot}$ くらいの DM halo



ビリアル温度 1000K くらいで不安定ガス雲が収縮

(化学反応を伴う)



中心部に $0.01 M_{\odot}$ くらいの原始星コア

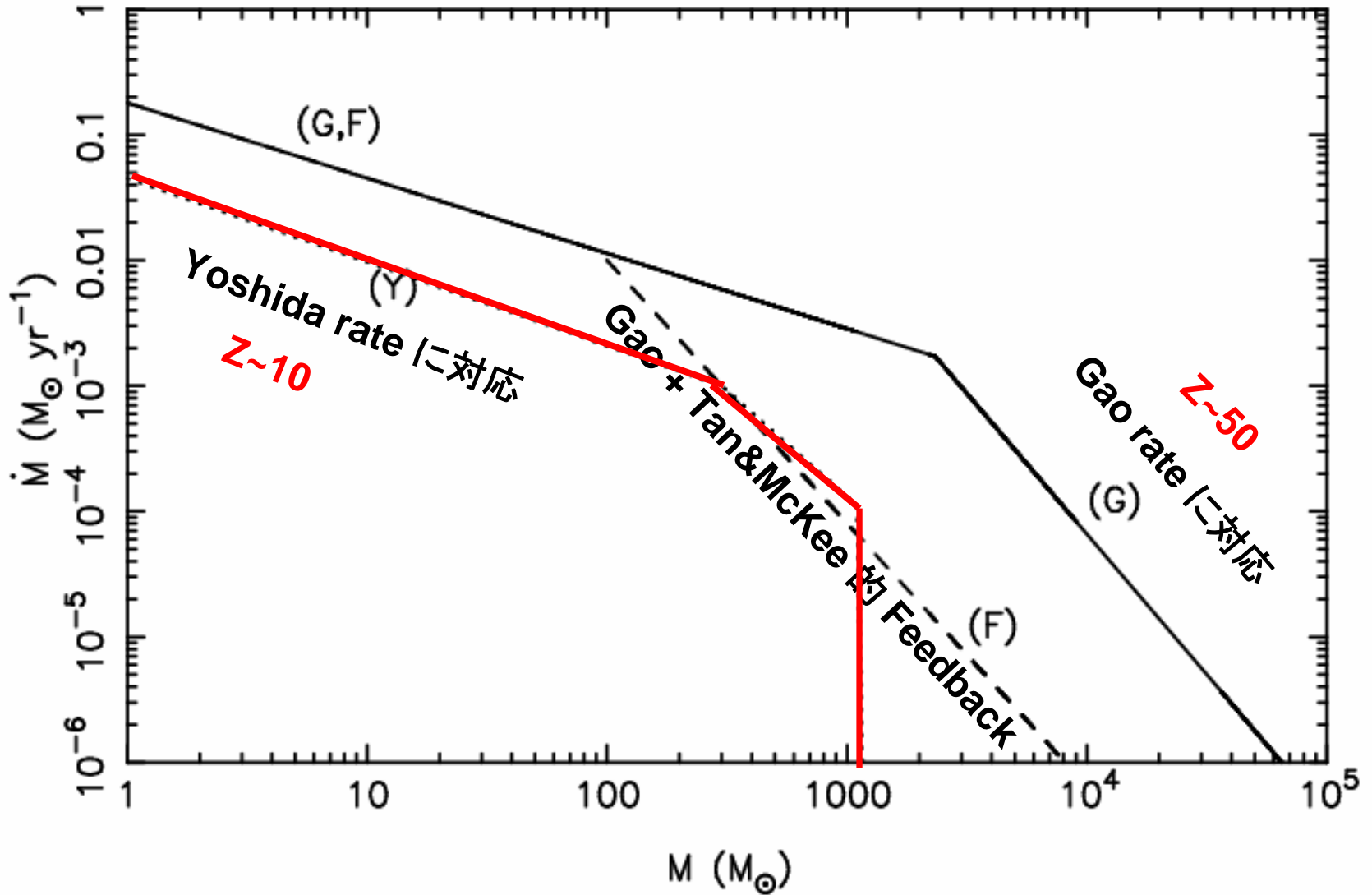


外から継続的に質量降着



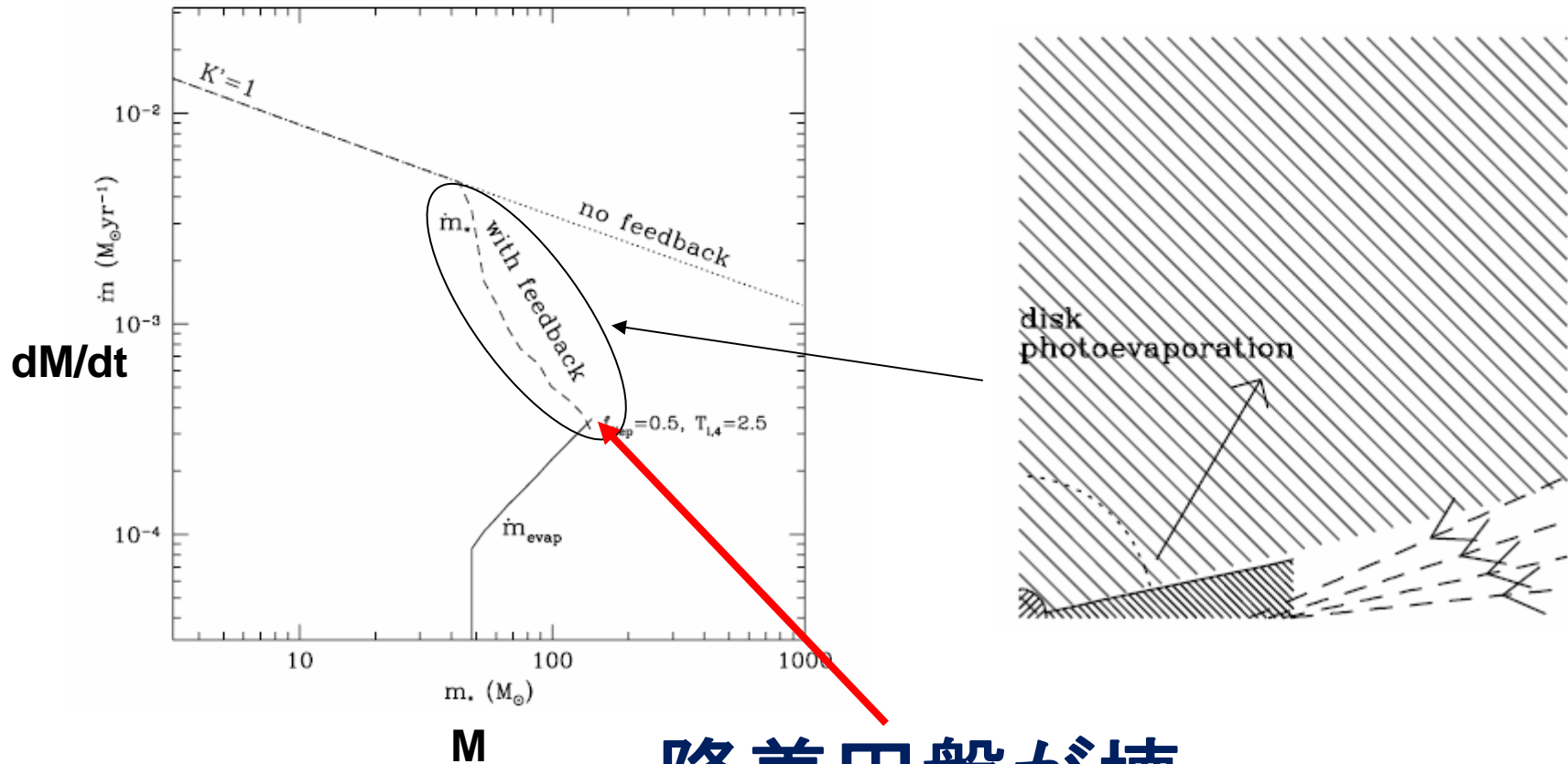
中心温度上昇、主系列に達するころには $100 M_{\odot}$ くらいに

質量降着率



Radiative Feedback

McKee & Tan 2008 (速い回転でaccretion diskを形成)



降着円盤が壊され降着停止

ただしモデルに不定性があり、降着が完全に止まるかどうか不明

Yoshida et al と Gao et al.

- 大久保 et al. (2009): Yoshida et al. 2006に基づく質量降着
 - Feed back が無ければ最大 $M \sim 1000M_{\odot}$ のBH (Pop III.1)
 - Feedback があると $M \lesssim 200M_{\odot}$ かも
 - Pop III.2 は $M \sim$ 数十 M_{\odot} (極超新星に)
 - 形成時期は典型的に $z \sim 10$
 - $Z \sim 6$ クエーサーを説明するには遅すぎる(数も多すぎる)
- Gao et al. 2007 (model R5wt) : 宇宙で最初にできる星($z \sim 50$)に基づく質量降着を考える
 - $Z \sim 10$ でできる星よりも
 - より高密のハローの中におり、分子雲の温度が少し高い
 - ⇒ 質量降着率が大きい ⇒ より重い星ができ易い
 - 数が少ない (多すぎるという問題が解決できる)

質量降着率

- Order-of-magnitude estimate $\dot{M} \sim c_s^3 / G$

The virial temperature is given by

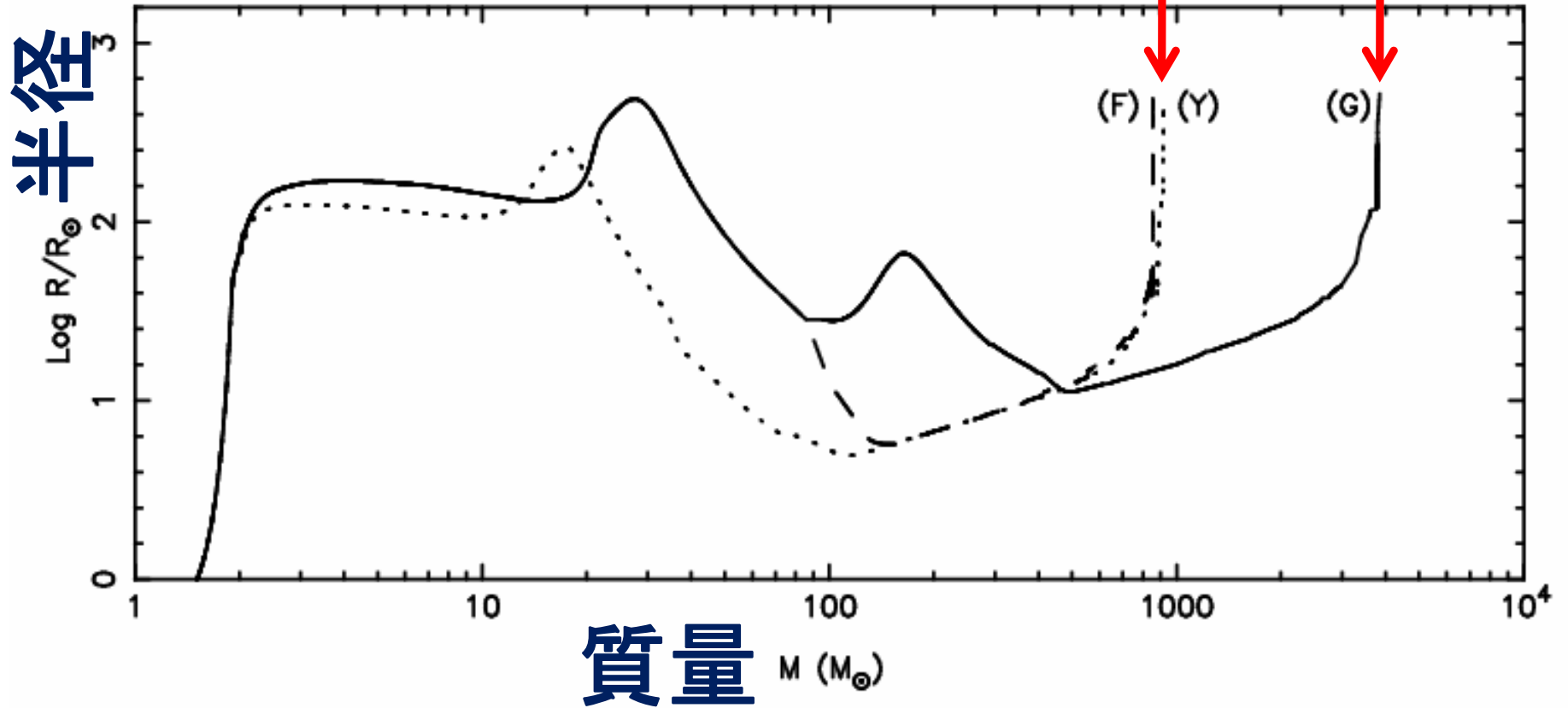
$$T_{\text{vir}} \approx 380(1+z) \left(\frac{M}{10^7 M_{\odot}} \right)^{2/3} \left(\frac{\Omega_0 h^2}{0.14} \right)^{1/3} \text{ K},$$

the isothermal sound speed is

$$c_s \approx 1.8 (1+z)^{1/2} \left(\frac{M}{10^7 M_{\odot}} \right)^{1/3} \left(\frac{\Omega_0 h^2}{0.14} \right)^{1/6} \text{ km s}^{-1}$$

- Typical $z \sim 10$ dark halo of $M \sim 10^6 M_{\odot}$:
 - T $\sim 1000\text{K}$ and $dM/dt \sim 10^{-3} M_{\odot} / \text{yr}$
- $Z \sim 50$ ではこれより少し温度が高く、降着率も数倍
- 数倍の差でもFinal Massは大きく変わる

結果(1)



- どのモデルもFe核形成(重力崩壊)まで進む
 - 最終質量: $916 M_{\odot}$ (Y), $3901 M_{\odot}$ (G), $856 M_{\odot}$ (F)
 - 寿命は数百万年
- (Gao+Feedback)

DM対消滅の効果：イントロ

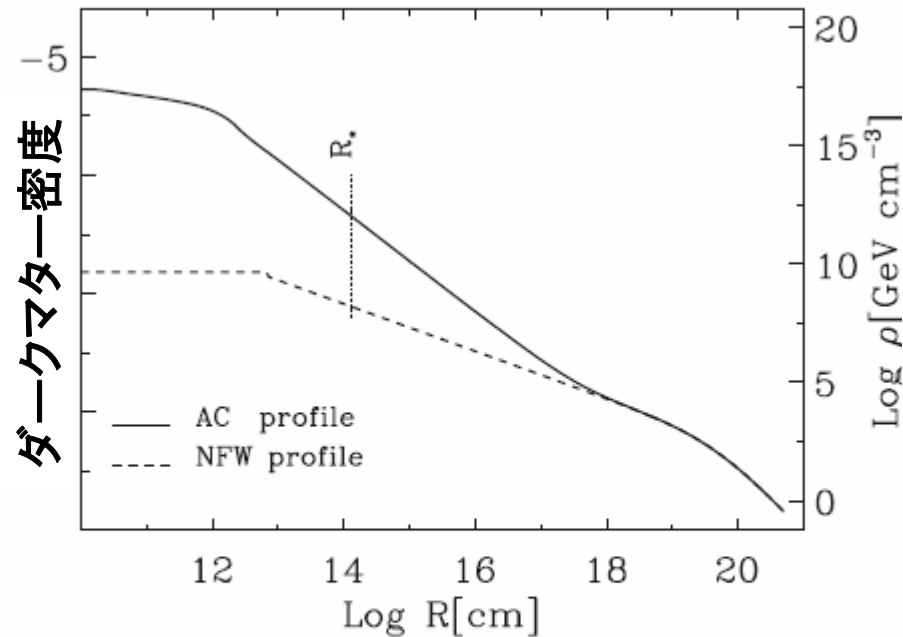
- ダークマター(DM)の正体は依然謎である。
- 素粒子論的に最も有力である候補の一つは自己対消滅をする (self-annihilating) WIMP (weakly interacting massive particle) である (例、ニュートラリーノ)。
- self-annihilating WIMPが実在しているという幾つかの示唆
 - 銀河中心からの511keV X線 (Jean et al. 2006; Weidenspointer et al. 2006)
 - CMBのGeV photon 超過 (Hooper et al. 2007), positron 超過 (Cirelli et al. 2008)
 - 1-20 GeV in Extragalactic gamma-ray background (Ahn et al. 2005)
 - FERMI 衛星によって明らかになるかもしれない。
- このようなWIMPの対消滅のエネルギーはPop III 星の進化にも影響を及ぼす
 - Spolyar et al. (2008), Freese et al. (2008), Iocco et al. (2008), Taoso et al. (2008), Yoon et al. (2008) など

Dark stars

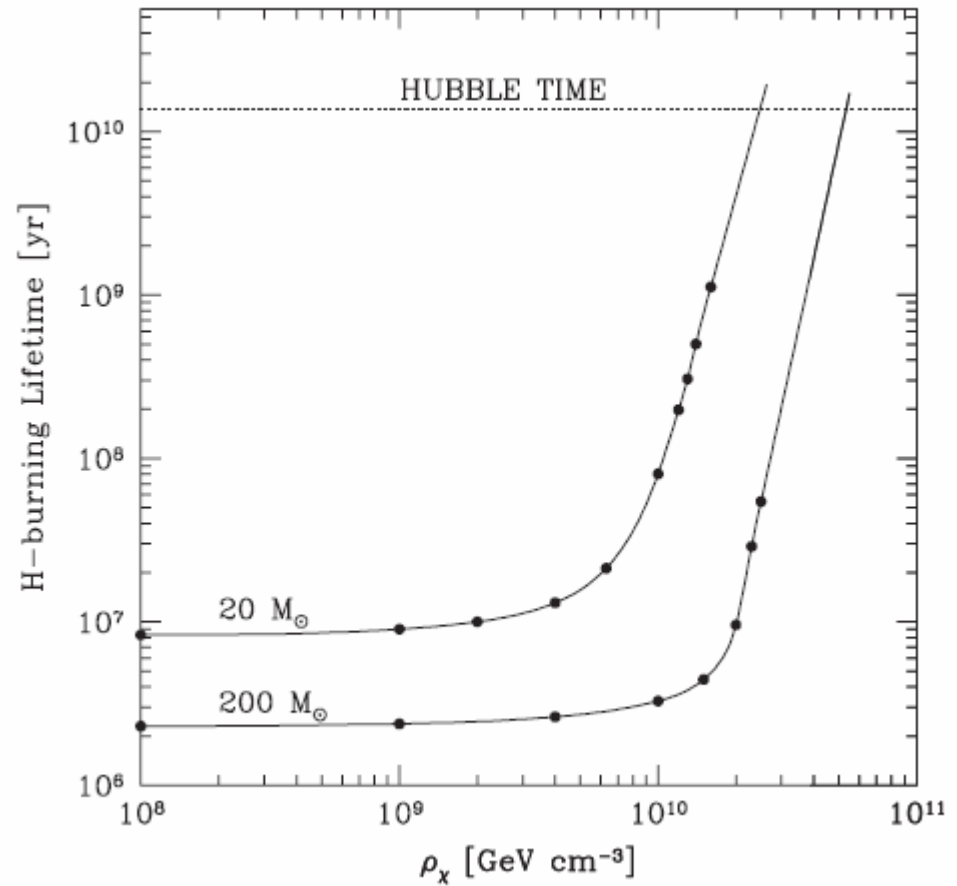
- 典型的WIMP mass $\sim 100\text{GeV}$, 対消滅断面積 $\langle \sigma v \rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$ を採ると、DM密度が充分濃い ($\rho_x \sim 10^{11} \text{ GeV}/\text{cm}^3$ など) 場合には DM annihilation energy が核燃焼によるエネルギー生成を卓越する (e.g., Spolyar et al. 2008)
 - ⇒ 星がDM対消滅によって支えられる
 - ⇒ このような星を Dark stars と呼ぶ(人がいる
(ちなみに見た目は暗くない— 宇宙で最も明るいかも
- これまでの研究の多くは一定の星質量の場合:
DMが濃い場合 ($\rho_x \sigma m_x^{-1}$ が大きい) 星の進化はDMが消費され尽くすまで事実上停止する。

ダークマター密度とダークスター進化

Taoso et al. 2008



Initial NFW DM density profile of adopted $M = 10^6 M_\odot$ (dashed line) and adiabatically contracted DM profile at the time of protostellar phase for the fiducial $100 M_\odot$ star. The vertical dashed line marks the radius of the star at the beginning of the computation.



ダークマター密度

Spolyar et al. 2008, locco et al. 2008,
Freese et al. 2009

本研究 (Umeda et al. 2009, JCAP)

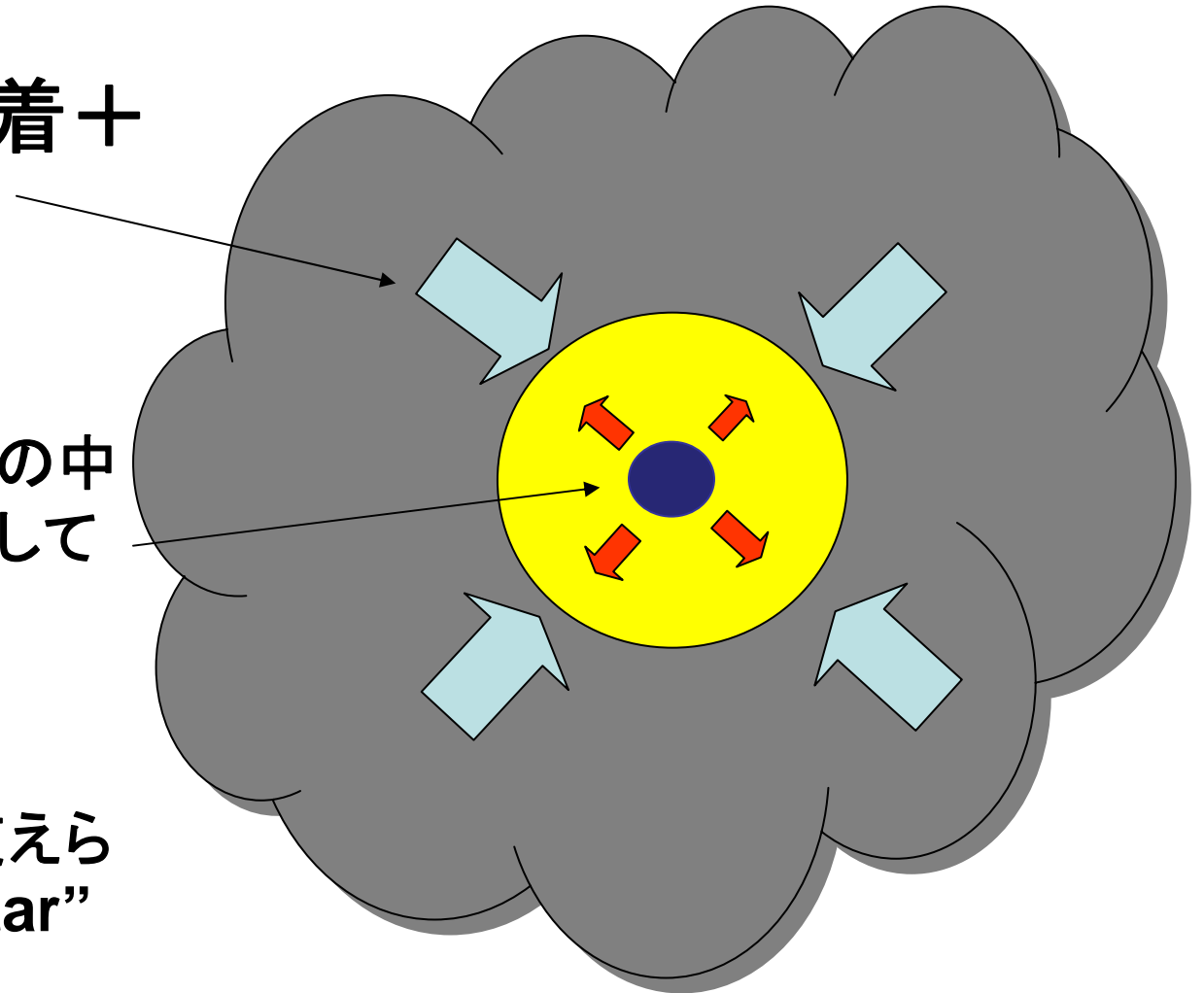
- 本研究では、これまでに詳しく調べられていなかった、質量降着のある場合のDark starの性質を、 $z \sim 50$ で形成される星のモデル等に適用して詳しく調べた。
- 質量降着効果を調べた仕事もあるが(Freese et al. 2008など)、星の進化を近似的な手法で計算しているため、今回の結果とは結果が大きく異なっている。

質量降着のある初代星

バリオンの降着 +
DMの捕獲

捕獲されたDMは星の中心に溜まり、対消滅してエネルギー発生

このエネルギーで支えられた星 : “Dark Star”



DM捕獲率とエネルギー生成率

$$C = 4\pi \int_0^{R_*} dR R^2 \frac{dC(R)}{dV}, \quad \text{(capture rate)}$$

where

$$\begin{aligned} \frac{dC(R)}{dV} &= \left(\frac{6}{\pi}\right)^{1/2} \sigma_0 A_n^4 \frac{\rho_*}{M_n} \frac{\rho}{m_\chi} \frac{v^2(R)}{\bar{v}^2} \frac{\bar{v}}{2\eta A^2} \\ &\times \left\{ \left(A_+ A_- - \frac{1}{2} \right) [\chi(-\eta, \eta) - \chi(A_-, A_+)] \right. \\ &\left. + \frac{1}{2} A_+ e^{-A_-^2} - \frac{1}{2} A_- e^{-A_+^2} - \eta e^{-\eta^2} \right\}, \end{aligned}$$

$$A^2 = \frac{3v^2(R)\mu}{2\bar{v}^2\mu_-^2}, \quad A_\pm = A \pm \eta, \quad \eta = \sqrt{\frac{3v_*^2}{2\bar{v}^2}},$$

$$\chi(a, b) = \int_a^b dy e^{-y^2} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} [\text{erf}(b) - \text{erf}(a)],$$

$$n_\chi(R) = n_\chi^c \exp(-R^2/R_\chi^2), \quad n_\chi^c = \frac{C\tau_\chi}{\pi^{3/2}R_\chi^3};$$

Maxwell-Boltzman 分布
(熱平衡)

$$\epsilon_\chi(r) = \frac{2}{3} \langle \sigma v \rangle n_\chi^2(r) m_\chi \quad [\text{erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}]$$

Energy generation rate

Luminosity (近似的に)

$$L_{\text{DM}} = 1.4 \times 10^{47} \frac{\text{erg}}{\text{s}} \frac{M_*^2}{R_*} \frac{\rho_{11} \sigma_{38}}{m_{100}}.$$

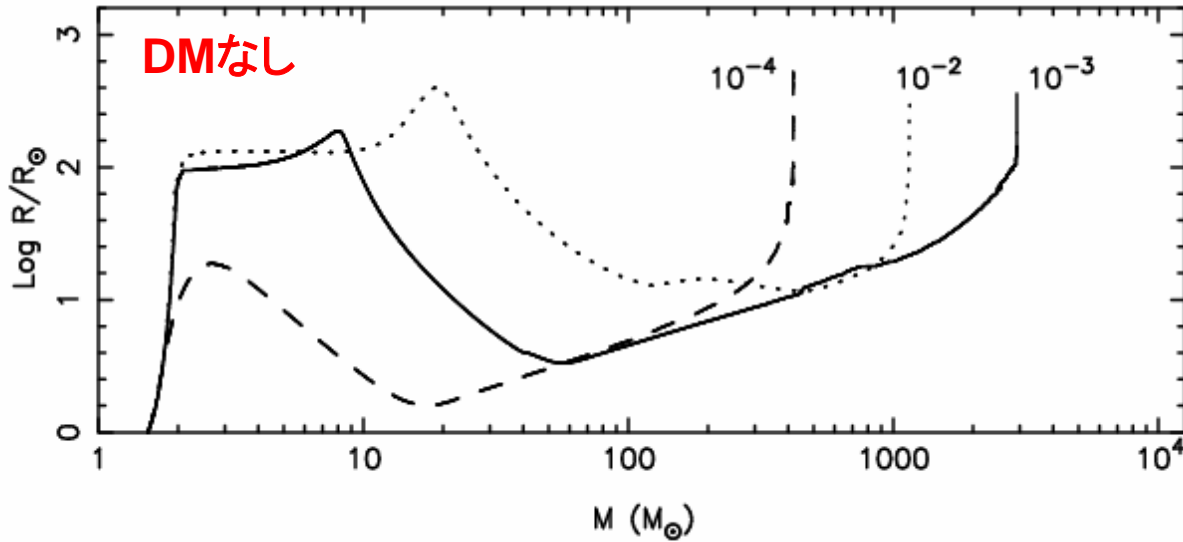
$$\propto \rho_\chi \sigma m_\chi^{-1}$$

σ : DM-baryon elastic scattering
Cross-section
 M_χ : DM mass

計算

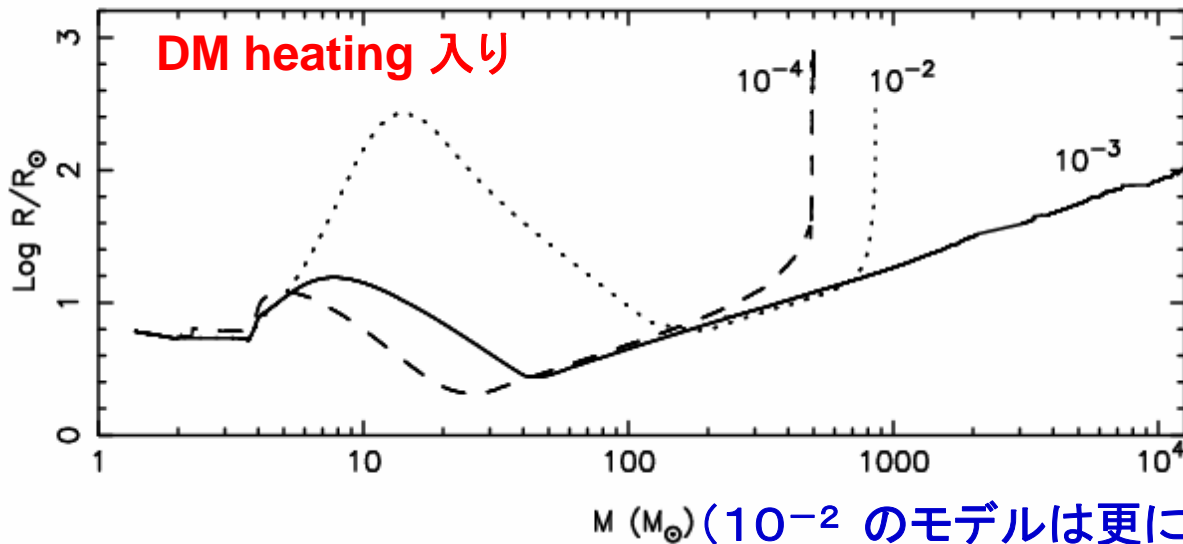
- 典型的値としてWIMP mass = 100GeV, 対消滅断面積 $\langle \sigma v \rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$ 、DM密度 $\rho_x = 10^{11} \text{ GeV}/\text{cm}^3$ とする
- DMが集まる原因として、
 - (i) DarkハローがNFW profile からadiabatic contraction
 - (ii) それとは別に星が捕獲したもの
が考えられているが、(i)は使い尽くすと無くなるため進化の初期段階にしか効かない。そこで本研究では(ii)のみ考える。
- DM Capture rate は Iocco et al. 2008 などに従う。
- バリオン質量降着率は一定のもの
 $dM/dt = 10^{-2, -3, -4} M_{\odot} / \text{yr}$
と、前述のGao+Feedbackモデルなどのものについて計算。

結果（一定のdM/dt）



$dM/dt=10^{-2} M_{\odot} / \text{yr}$
> critical rate
の場合はDMあり、無し
ともに水素燃焼の段階
で外層が膨らんだ。

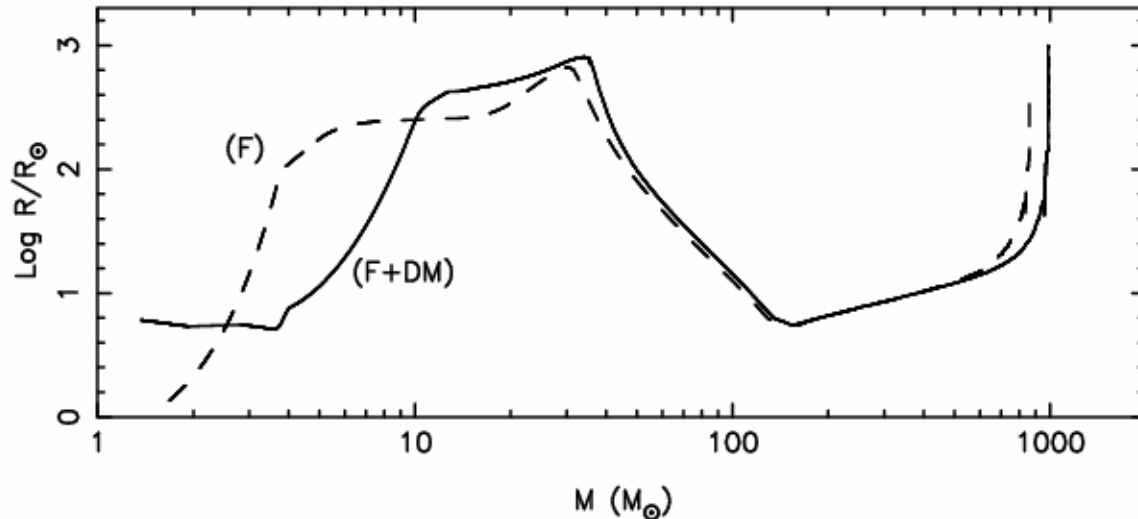
$dM/dt=10^{-4} M_{\odot} / \text{yr}$
の場合はDMの効果は
小さく、どちらも鉄核の
形成まで進化が進む。



$dM/dt=10^{-3} M_{\odot} / \text{yr}$
の場合はDMあり、なし
で結果が大きく異なる。

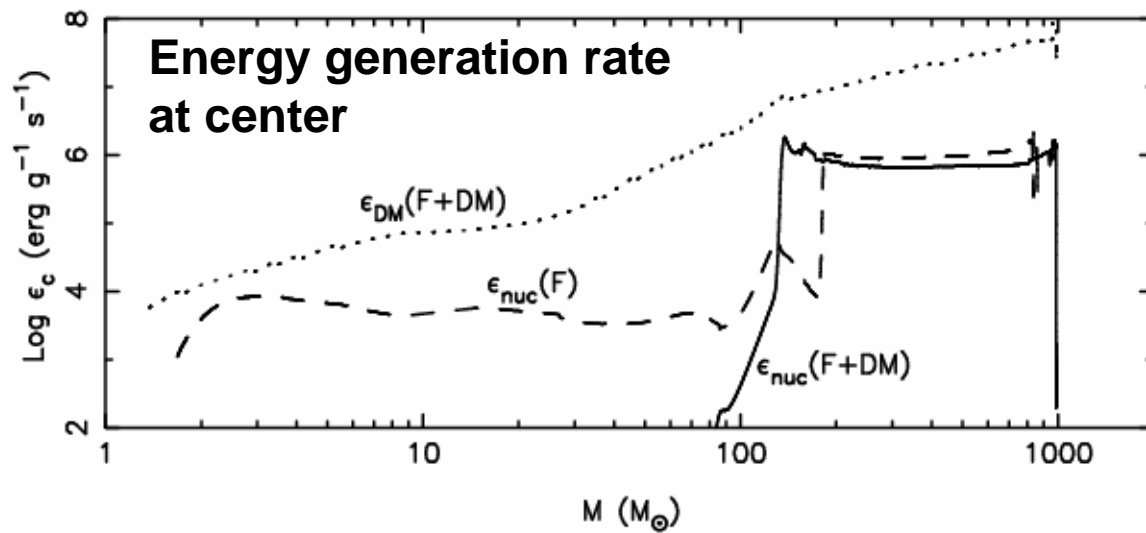
$M (M_{\odot})$ (10^{-2} のモデルは更に質量が増える可能性はある)

結果 (Gao+Feedbackモデル (F))



F+DM model はほぼ
DM heating で支え
られている

しかし外から見た半径や
温度は $M > 50$ では意外と
変わらない



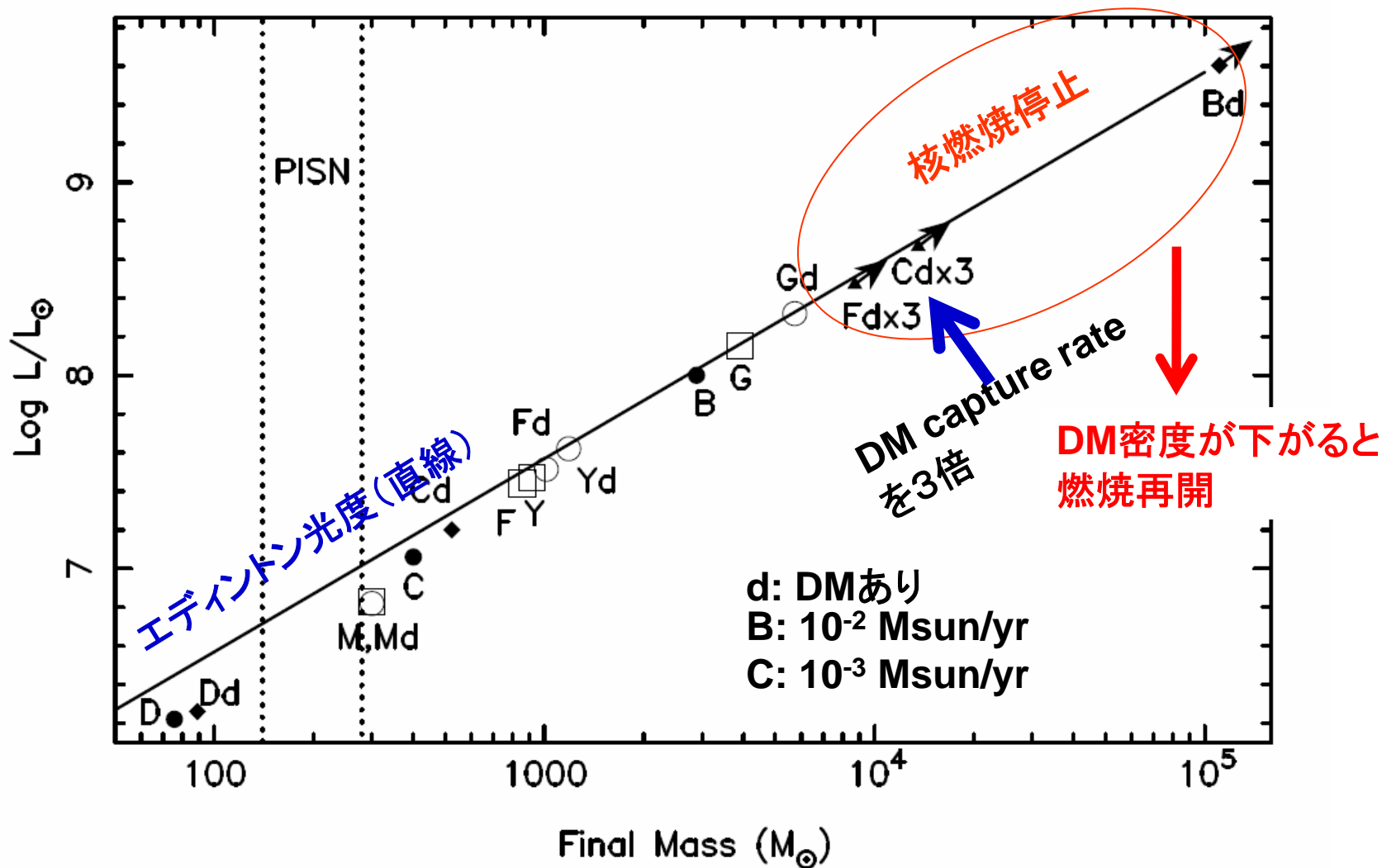
結果

model	dM/dt = 10^{-2}	dM/dt = 10^{-3}	dM/dt = 10^{-4}	Gao+ Feedback(F)
Final mass (DM なし)	>1150 M_{\odot} X(H)=0.72	2920 M_{\odot}	418 M_{\odot}	860 M_{\odot}
Final Mass (DMあり)	>850 M_{\odot} X(H)=0.72	> 10^5 M_{\odot}	515 M_{\odot}	988 M_{\odot}

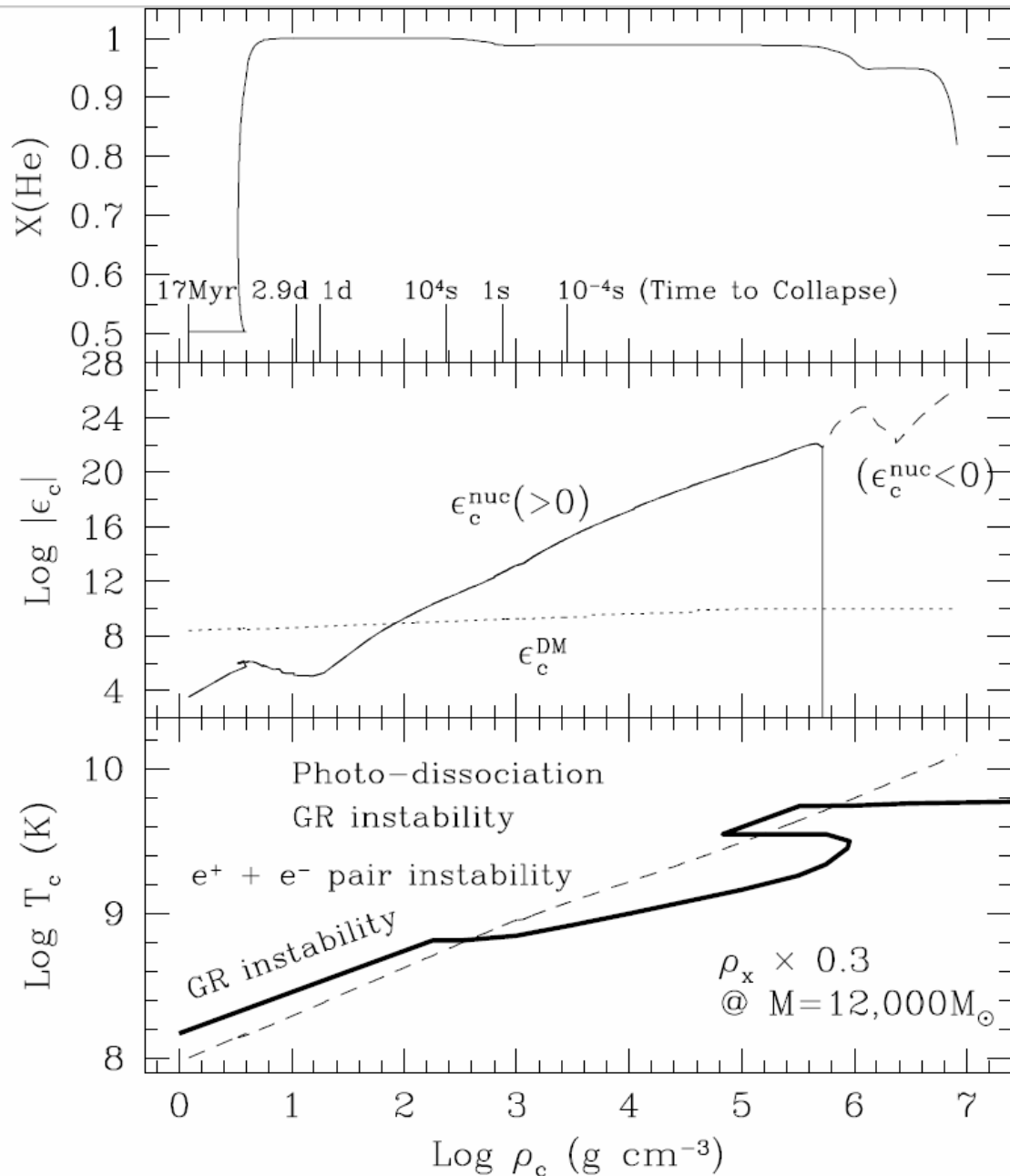
(10^{-2} のモデルは更に質量が増える可能性がある)

X(H) initial =0.753

様々な降着モデル: 解の性質は大きく2つに分かれる
 DMがあっても無くても L はほぼエディントン光度



M=1.2万Msun (Model Bd) のPopIII Dark starの重力崩壊



Model Bd
(dotM=1e-2) :
DM密度が濃いと
水素燃焼で進化停止

(左図) M=1.2万でDM
密度が 1/3 になった場合
のその後の進化。

⇒急速にH燃焼再開

中心He燃焼時に
不安定領域に入り
数秒で崩壊

今後の課題

- 中心星からのRadiationなどによる質量降着へのFeedback
効果： 比較的小質量で降着が止まってしまうのかどうか
- 巨大PopIII(又は崩壊後のBH)を実際に観測できるのか
- DM関係
 - WIMPが実在するなら対消滅反応断面積はここで仮定している程度のはず(と考えられている、が、
 - 核子との散乱断面積が、ここで仮定しているほど大きいかどうかはわからない
 - 素粒子実験
 - ダークスターの発見
 - PopIII星の周りのダークマター密度がどの程度の期間高く保たれるのか明らかでない
 - 降着星が存在するばあいのDM精密シミュレーション (計画進行中)