



The Impact of X-ray on Direct Collapse under HERA Constraints

木村 和貴 (東北大学)

共同研究者 : Wenxiu Li, 稲吉恒平(KIAA), 大向一行 (東北大学)

初代星・初代銀河研究会2024 @ 信州大学 11/11(月)-13(水)

Outline

1. Introduction

2. Method

3. Results

4. Discussion

5. Summary

Outline

1. Introduction

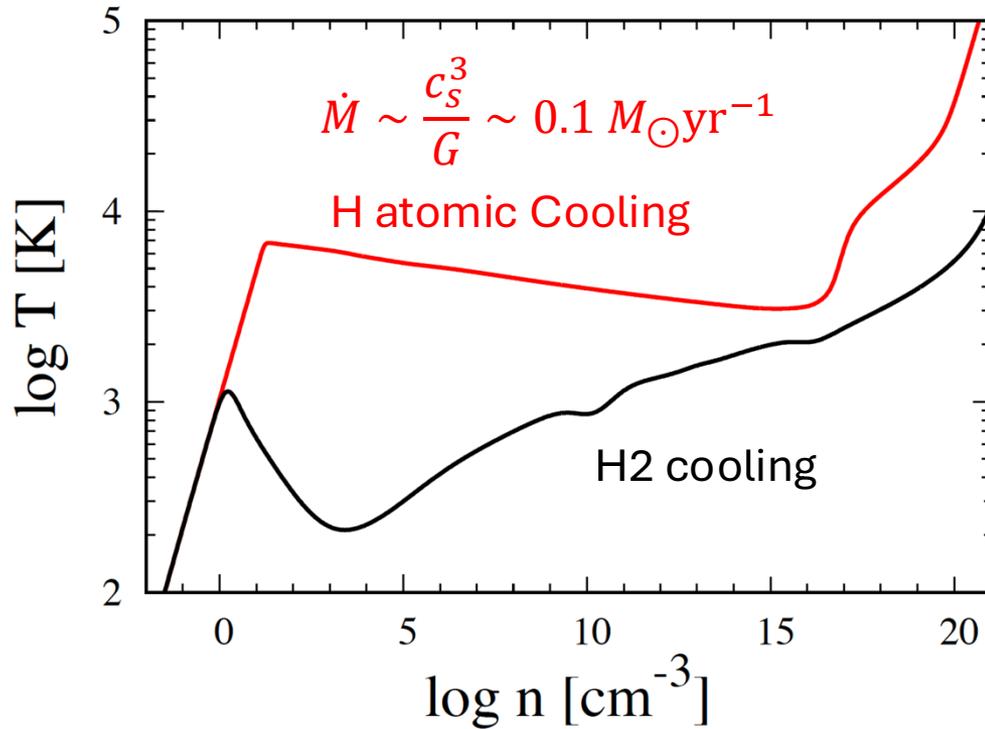
2. Method

3. Results

4. Discussion

5. Summary

Direct Collapse (DC) Scenario

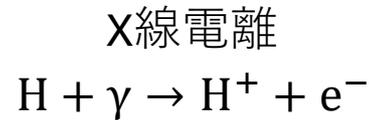


高赤方偏移($z > 6$)における超大質量ブラックホール($> 10^9 M_{\odot}$)の形成シナリオ。

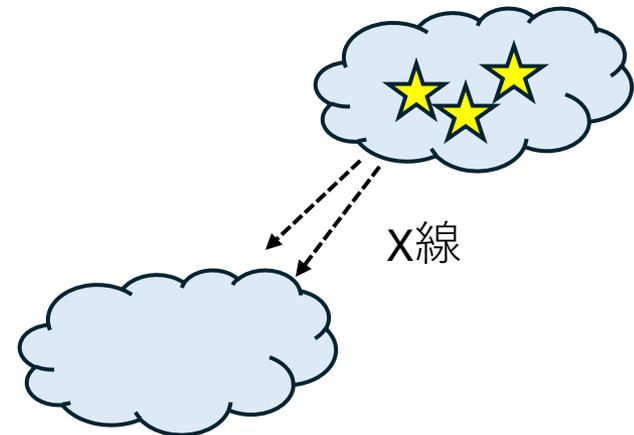
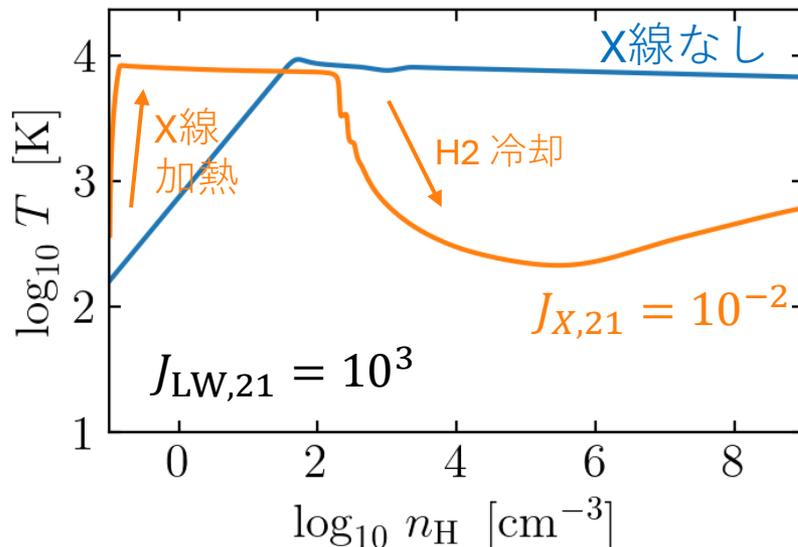
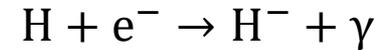
FUV radiation, dynamical heating, baryon streaming motionなどでH₂冷却が抑制されることによって実現する高温の進化path。

The Suppression of DC by X-ray

X線に照射されるとX線電離によって作られる電子が触媒としてH₂の形成を促進して、Direct Collapseを阻害する。



H⁻過程によるH₂形成



HERA Constraints

Hydrogen Epoch of Reionization Array

南アフリカ共和国に建設されている電波干渉計



Phase 1の観測でパワースペクトルが未検出。
パワースペクトルの強さに上限。



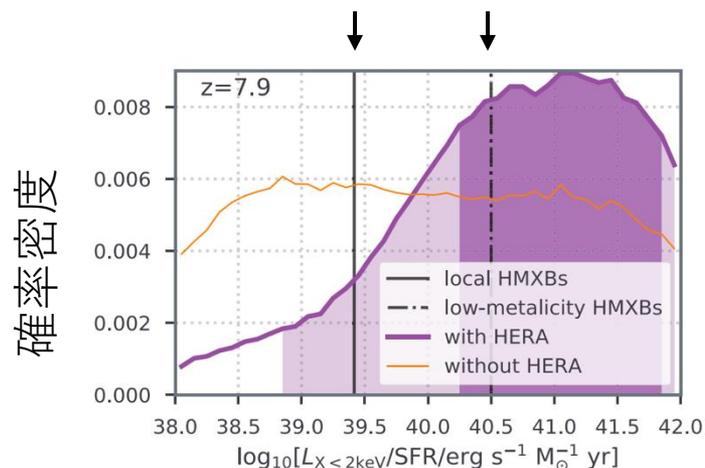
スピン温度の下限

IGMが加熱されていなければならない。



星形成率に対するX線光度が
localの観測値に比べて数十倍大きい。

localの観測値 Pop IIの理論予測



星形成率に対するX線光度

(Abdurashidova+22a,b, The HERA Collaboration 23)

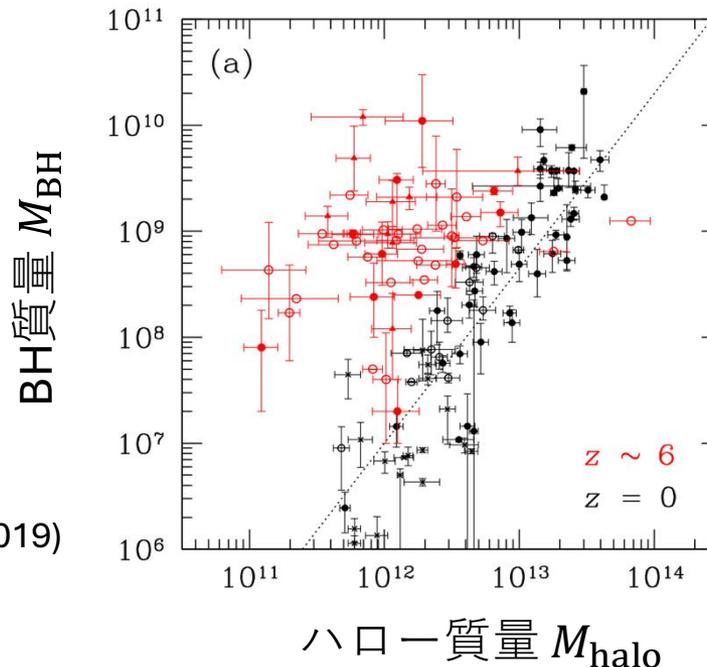
本研究の目的

HERAによって制限されたX線強度を考えると、
Direct Collapseはどれくらい阻害されるのか？
形成される種BHの質量はどれくらい変化するのか？

高赤方偏移で観測されているQuasarと同様の overdense region
($z = 6, M_{\text{halo}} = 10^{12} M_{\odot}, 5\sigma$)でのハロー進化を準解析的モデルで計算。

観測によるQuasarの
ハロー質量とBH質量

(Shimasaku & Izumi 2019)



Outline

1. Introduction

2. Method

3. Results

4. Discussion

5. Summary

準解析的モデル

- Li+21のone-zone モデルでハロー中心のガスの密度・温度進化を計算。

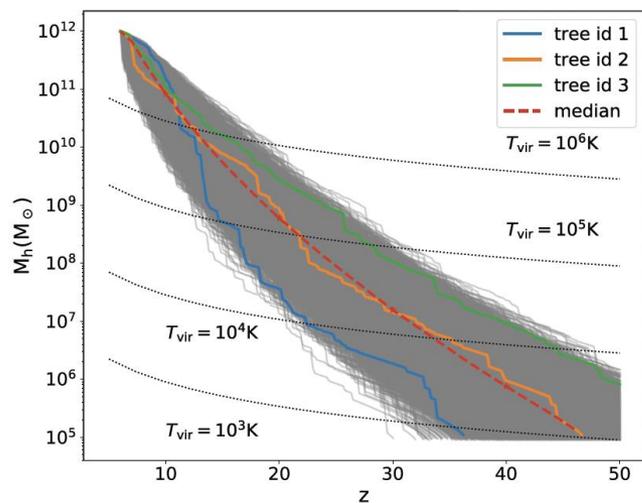
近傍銀河からのFUV照射および mergerによるdynamical heatingを含む。

X線および化学反応に関してアップデート。

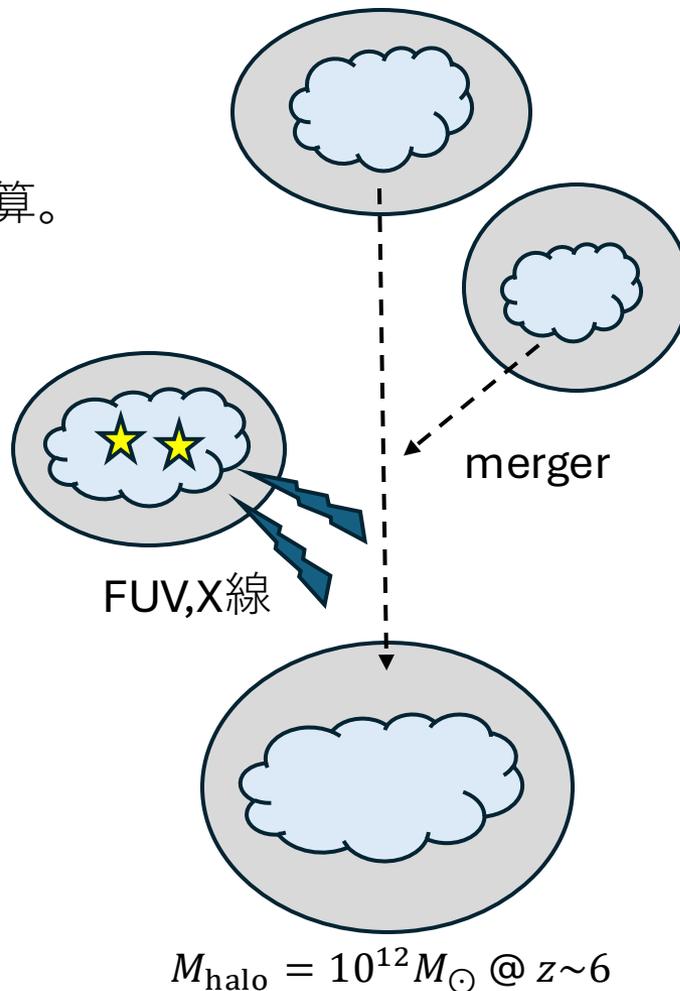
$$M_{\text{halo}} \sim 10^5 M_{\odot} @ z \sim 50$$

- $z = 6$ で $M_{\text{halo}} = 10^{12} M_{\odot}$ となるハローを計算。
1000個のrealizationに対して統計的に議論。

ハローのmerger history



(Li+21)



基礎方程式

1. 密度進化

ガスが重力不安定になる前

静水圧平衡(Lane-Emden Eq.)を解いて中心密度を求める。
ハロー内ガスのエントロピー分布などは仮定。

ガスが重力不安定になった後

$$\frac{d\rho_{\text{gas}}}{dt} = \frac{\rho_{\text{gas}}}{t_{\text{ff}}}$$

2. エネルギー進化

$$\frac{de}{dt} = \underbrace{\Gamma_{\text{mrg,th}}}_{\text{Merger}} + \underbrace{\Gamma_{\text{comp}}}_{\text{圧縮}} + \underbrace{\Gamma_{\text{X}}}_{\text{X線}} - \underbrace{\Lambda_{\text{chem}}}_{\text{化学反応}} - \underbrace{\Lambda_{\text{rad}}}_{\text{輻射}}$$

Mergerによる加熱などはシミュレーション結果からモデル化

3. 非平衡化学反応式

14個の化学種 : H, H₂, e, H⁺, H₂⁺, H⁻, He, He⁺, He⁺⁺, D, D⁺, D⁻, HD, HD⁺
FUVやX線による効果も含む。

輻射強度 : FUV

➤ スペクトル $J_{\text{FUV}}(\nu) \propto B_{\nu}(T_{\text{rad}} = 2 \times 10^4 \text{ K})$

➤ 質量 M_{halo} のハローが赤方偏移 z で受ける FUV 輻射の平均強度

$$J_{\text{FUV}} = \int_{m_{\text{min}}}^{m_{\text{max}}} \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} \frac{d^2 N(M_{\text{halo}}, m, r)}{dm dr} \cdot \frac{L_{\text{FUV}}(m)}{16\pi r^2} dm dr$$

m : 周囲のハロー質量
 r : 中心ハローからの距離

周囲のハローの個数密度。宇宙論から決まる。

周囲のハローの FUV 光度。
星形成率や IMF 等は仮定。

(SFE=5%, Salpeter, 1-100 M_{\odot} , $Z = 10^{-3} Z_{\odot}$)

個々のハローの進化を解く時はモンテカルロ的に
平均強度からのずれも考える。(Dijkstra+ 08,14)

➤ 以下、FUV 強度は $J_{\text{LW},21}$ で記述

$$J_{\text{LW},21} = \frac{J_{\text{FUV}}(h\nu = 13.6 \text{ eV})}{10^{-21} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}}$$

輻射強度：X線

➤ スペクトル

$$J_X(\nu) = J_{X,21} \times 10^{-21} \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{-1.5} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1},$$

(2 keV < $h\nu$ < 10 keV)

➤ 強度は $J_{X,21}$ で記述。

観測が示唆する星形成率に対するX線強度を
スペクトルなどを考慮してFUV強度との比に換算すると

Localの観測 ➡ $J_{X,21} \sim 10^{-6} J_{\text{LW},21}$

HERAの観測 ➡ $J_{X,21} \sim 10^{-5} - 10^{-4} J_{\text{LW},21}$

今回は以下のようにパラメータを振ってX線強度への依存性を見る。

$$J_{X,21} = 0, \quad 10^{-6} J_{\text{LW},21}, \quad 10^{-5} J_{\text{LW},21}, \quad 10^{-4} J_{\text{LW},21}$$

Outline

1. Introduction

2. Method

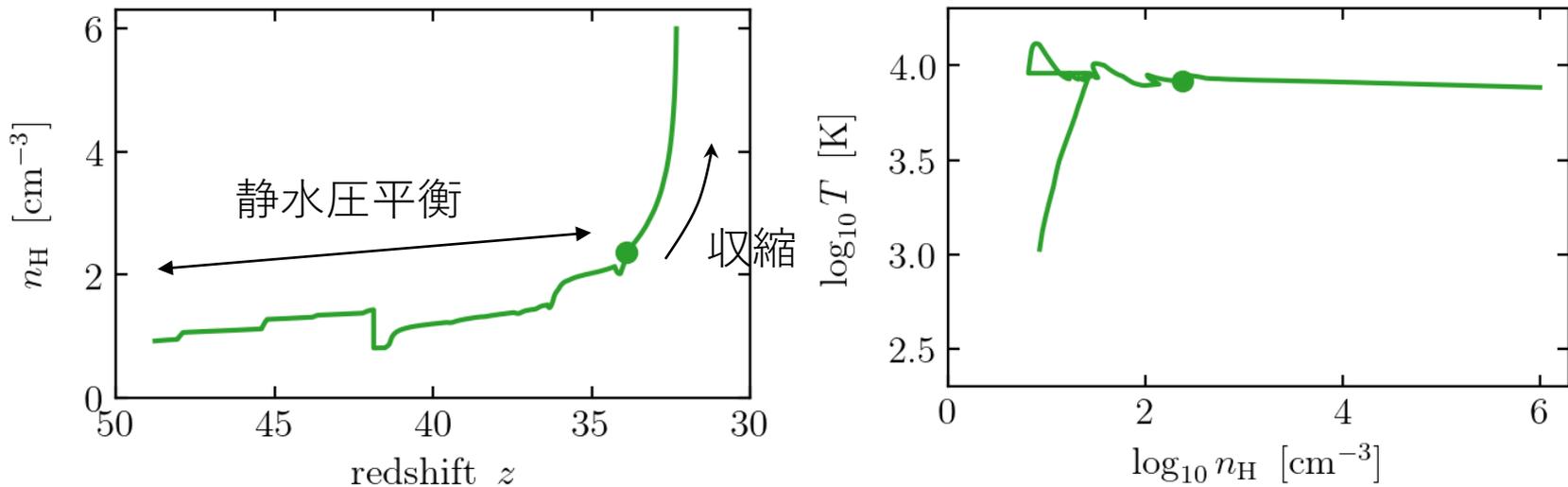
3. Results

4. Discussion

5. Summary

計算例

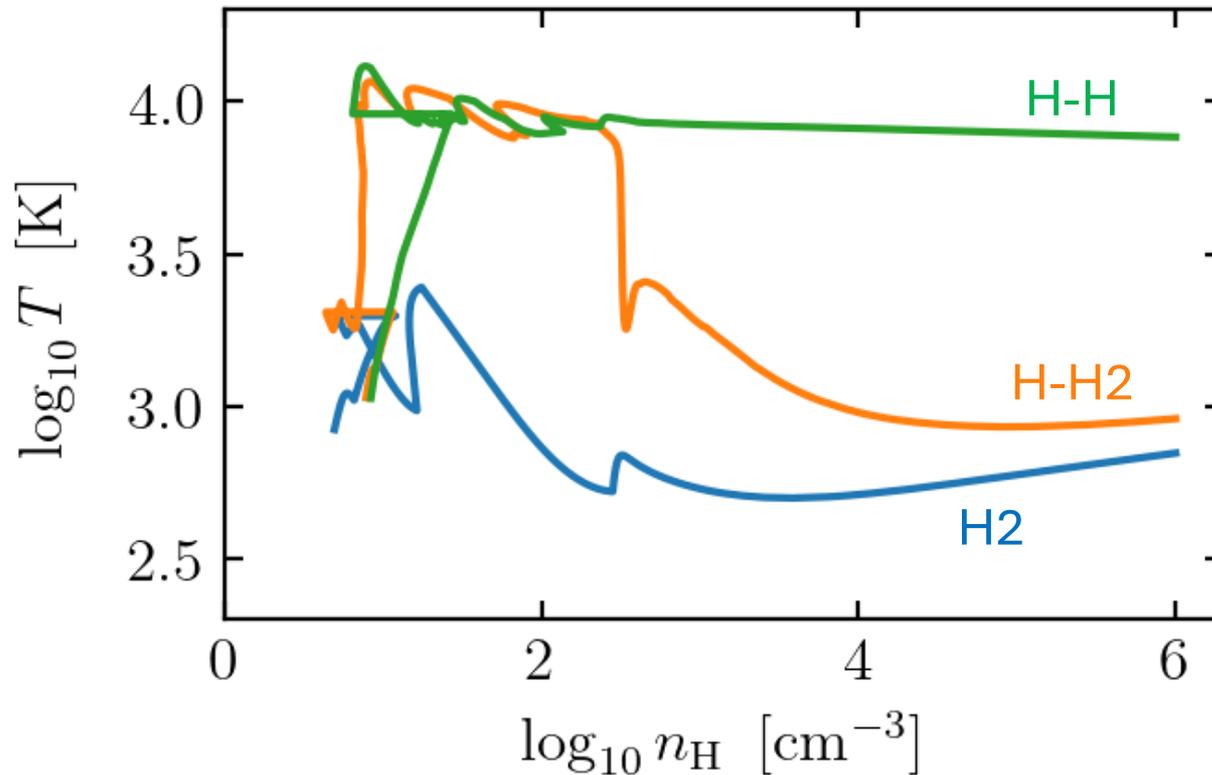
One-zoneモデルを用いて解いたハロー中心のガス進化の1例
Direct Collapseを起こす場合



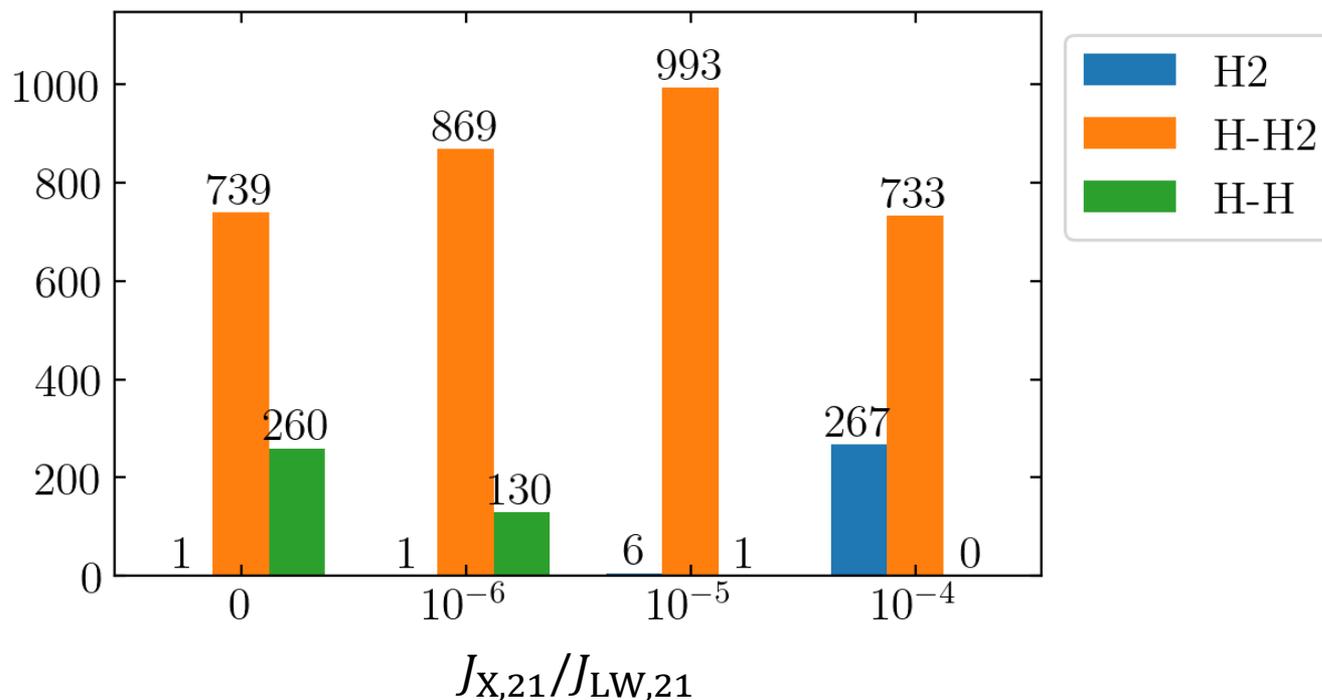
各X線強度に対し1000個のハローで上図のような進化を解いた。

進化pathの分類

計算した全てのハローに対して $\rho - T$ plane 上での進化から
H2, H-H2, H-H の3種類に分類。H-H が従来のDirect Collapseに対応。



進化pathの分布



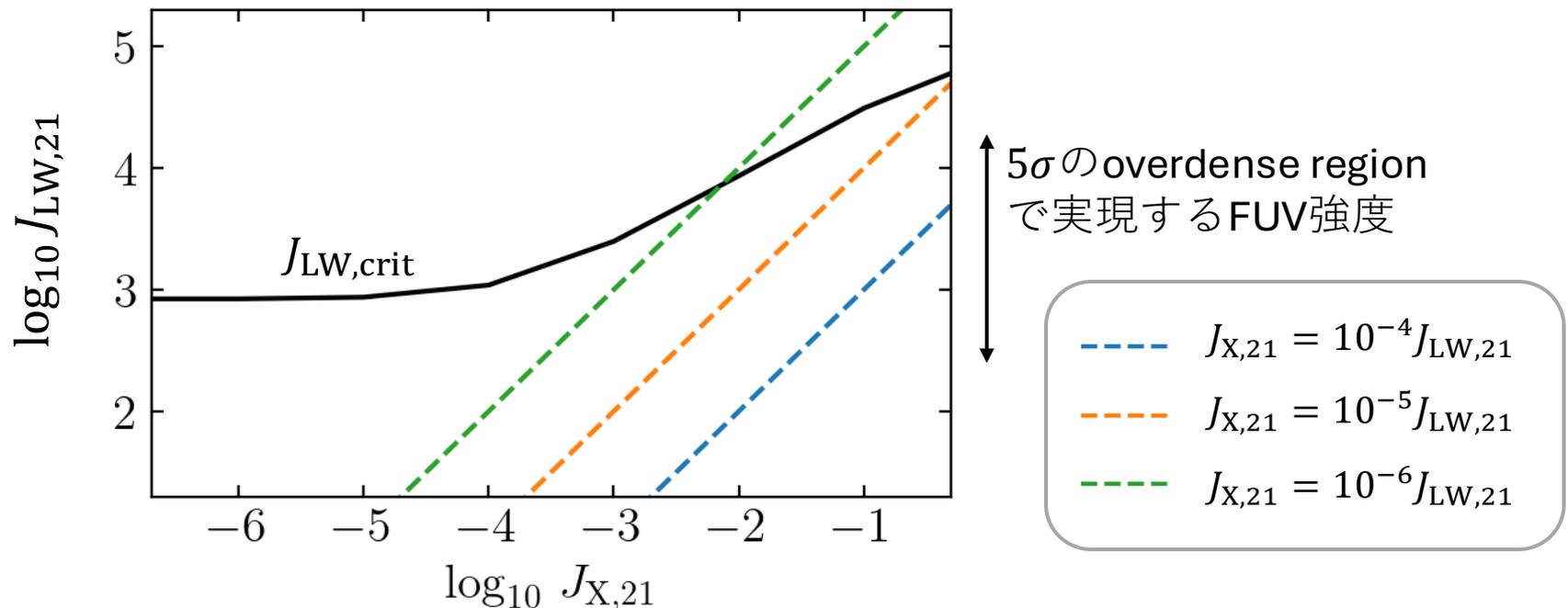
HERAによる制限が示唆する強さ

$J_{X,21} \gtrsim 10^{-5} J_{21}$ の範囲ではDirect Collapseはほぼ起こらなくなる。

Critical FUV Intensity $J_{\text{LW,crit}}$

なぜ $J_{\text{X},21} \gtrsim 10^{-5} J_{\text{LW},21}$ で Direct Collapse が起きなくなるのか？

X線強度に対する Direct Collapse を
起こすのに必要な FUV 強度 $J_{\text{LW,crit}}$



(c.f. Inayoshi & Omukai 2011)

Outline

1. Introduction

2. Method

3. Results

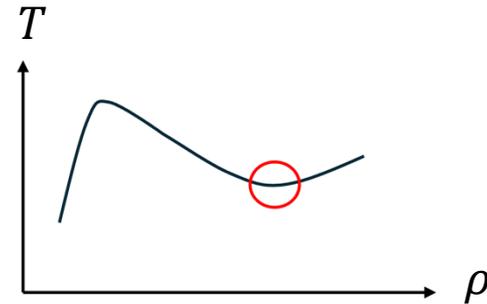
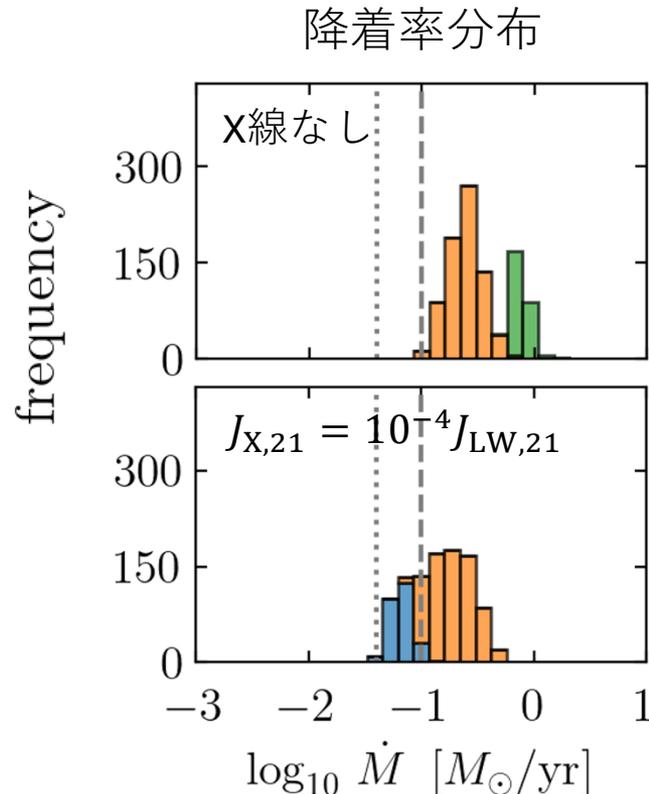
4. Discussion

5. Summary

降着率分布

Direct Collapseが起こらないならMassiveなSeedはできないのか？
ハローの熱進化から降着率と星質量の分布を見積もってみる。

$n_H > 10^3 \text{ cm}^{-3}$ で温度が最小となる点で降着率 $\dot{M} = \frac{c_{\text{eff}}^3}{G}$ を評価する。



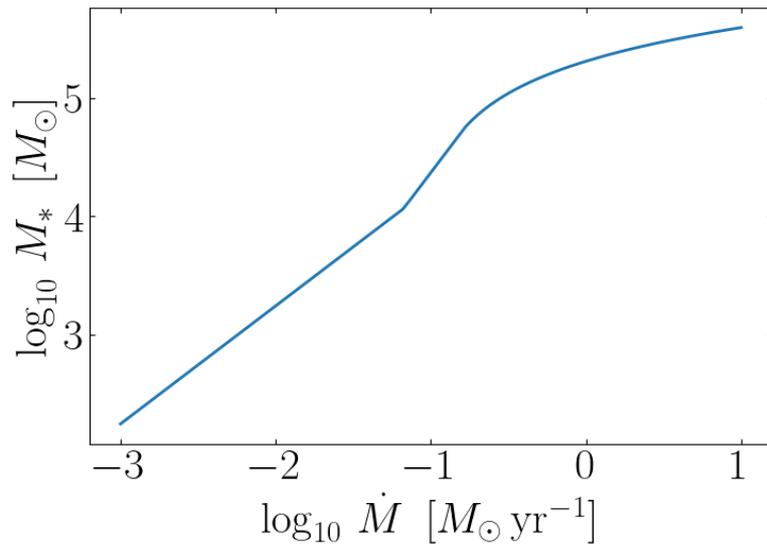
c_{eff} は乱流なども含む実効的な音速。
 H_2 冷却が効いてもoverdense regionでは
Mergerで発生する乱流によって
高い降着率($> 10^{-2} M_{\odot}/\text{yr}$)が実現される。

星質量分布

先行研究の結果を用いて降着率から星質量へ変換

H₂ 冷却が効いても $M \gtrsim 10^{-4} M_{\odot}$ のMassiveなSeedができる。

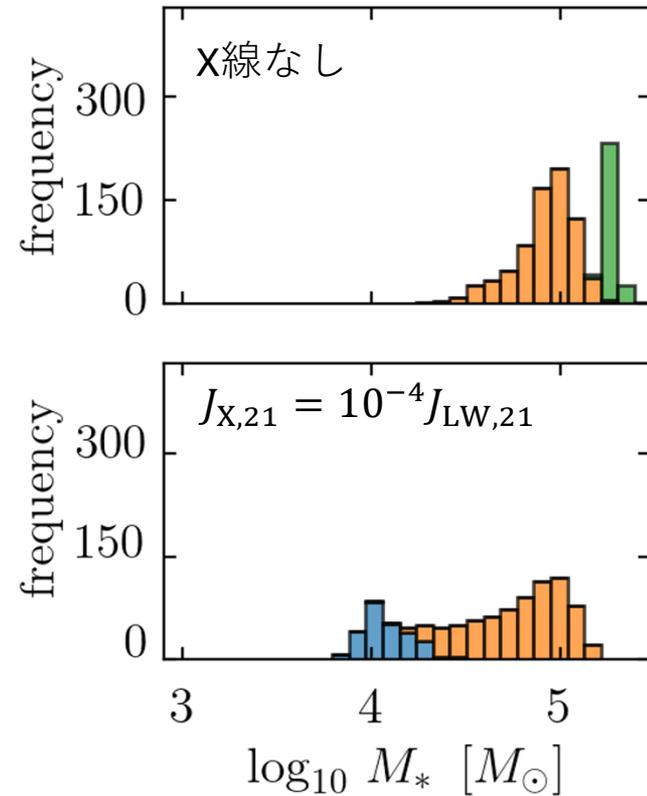
降着率と星質量の関係



←→ 光電離 フィードバック ←→ 一般相対論的 不安定性

(McKee & Tan 2008, Hosokawa et al 2011, Tanaka et al. 2013, Woods et al. 2017,)

星質量分布



Summary

- 準解析的モデルを用いてX線がoverdense regionのハロー進化に与える影響を調べた。
- HERAで示唆されるX線強度だとX線なしの場合に比べてDirect Collapseはほぼ起きなくなる。
- Direct Collapseは起きないが、Mergerで発生する乱流によってSeed Massは $M_* \gtrsim 10^4 M_\odot$ となる。
- Future Work
 - ✓ 5σ のoverdense region以外にも計算を拡張して、実際の種BHの質量に対する個数密度を計算。
 - ✓ 成長モデルと組み合わせてJWSTと比較 (c.f. Li+23)