

Direct collapse BH形成に必要な 紫外線強度のスペクトル依存性



杉村 和幸(東北大)



共同研究者: 大向一行(東北大)、井上昭雄(大産大)

KS, K. Omukai and A. Inoue, 2014, MNRAS 445, 544

イントロダクション

□ Supermassive BH (SMBH)

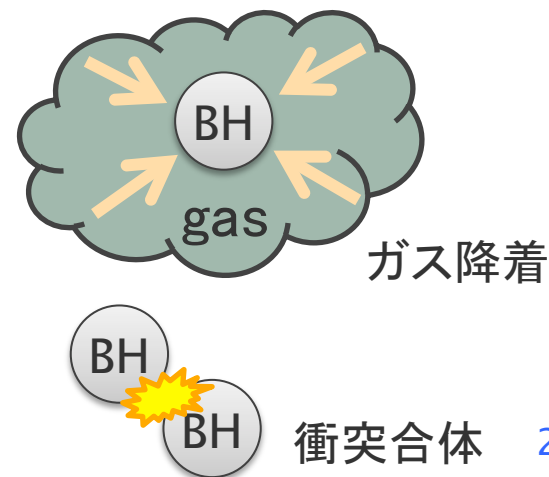
- 現在: 銀河中心に普遍的に存在
- 宇宙初期 ($z \sim 7$, 0.8Gyr):
 $M_{\text{BH}} \sim 10^9 M_{\odot}$ が存在
Mortlock + 2011
- 降着ガスからの輻射 (クエーサー、AGN)

• 宇宙初期のSMBH形成は未解決問題

- BHはガス降着・衝突合体で質量を獲得して成長
- SMBHまで成長する時間が間に合うか?
- そもそも種となる天体は?

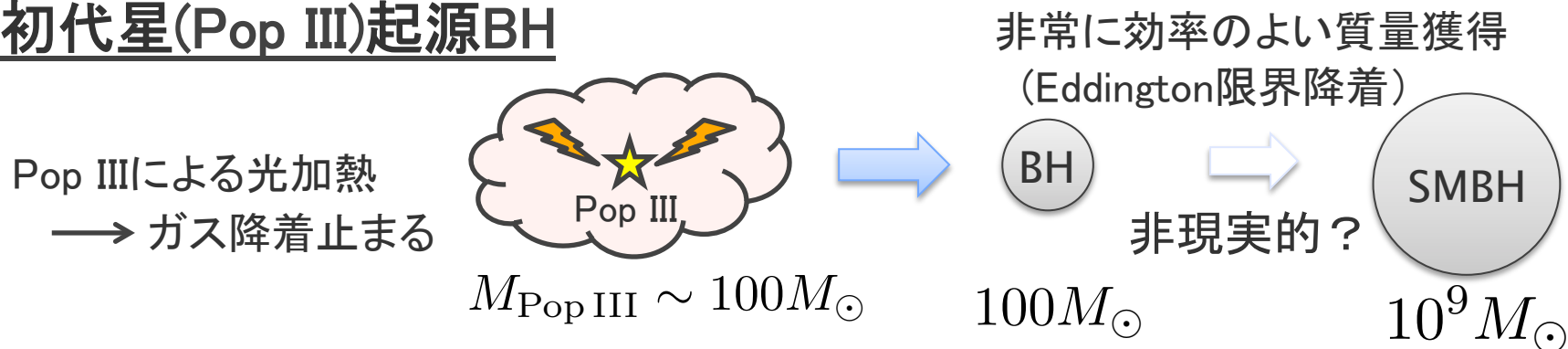


クエーサーのイメージ図
(Credit: ESO/M. Kornmesser)



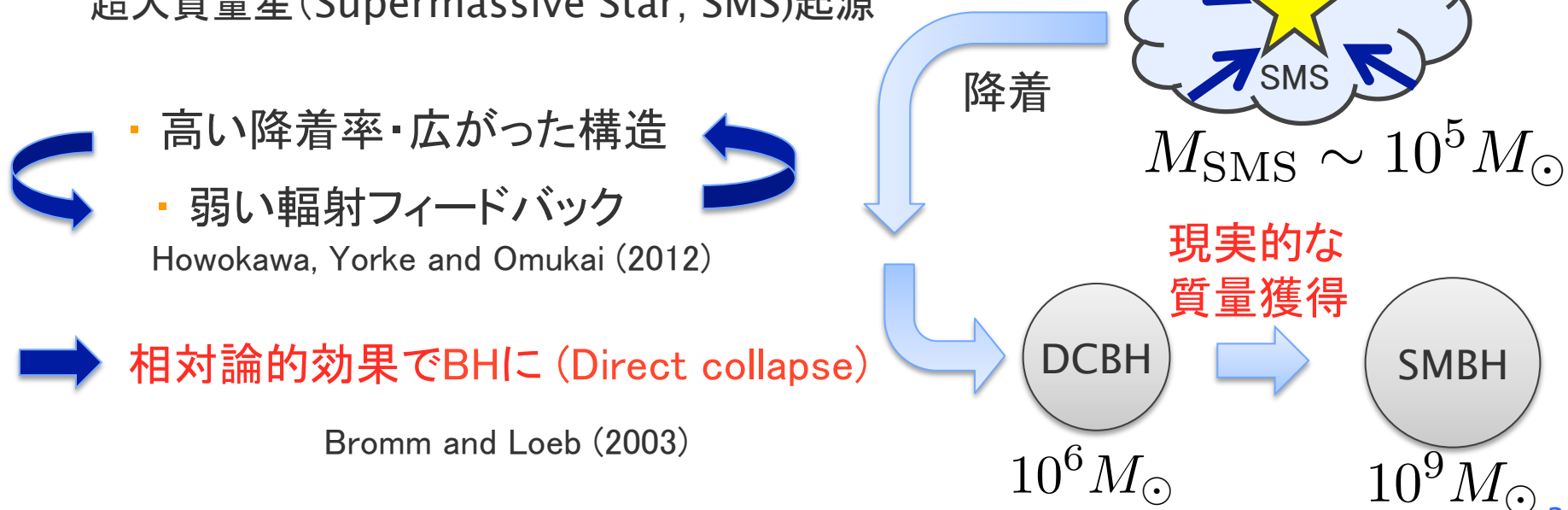
宇宙初期のSMBHの種候補

I. 初代星(Pop III)起源BH



II. Direct collapse BH

超大質量星 (Supermassive Star; SMS) 起源



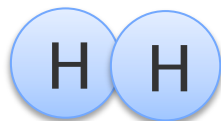


超大質量星

Pop III とSMSを分かつ物理

□ 始原ガス雲の冷却剤と形成天体

- 水素分子 (H_2)



- $T_{\text{gas}} > 300\text{K}$ で有効

- 通常の始原ガス雲

→ H_2 冷却で急激に冷却・分裂



Pop III 形成

$$M_{\text{Pop III}} \sim 100 M_{\odot}$$

- 水素原子 (H)



- $T_{\text{gas}} > 8000\text{K}$ で有効

- H_2 形成阻害された始原ガス雲

→ H冷却で等温的進化・分裂せず

Inayoshi, Omukai and Tasker (2014)



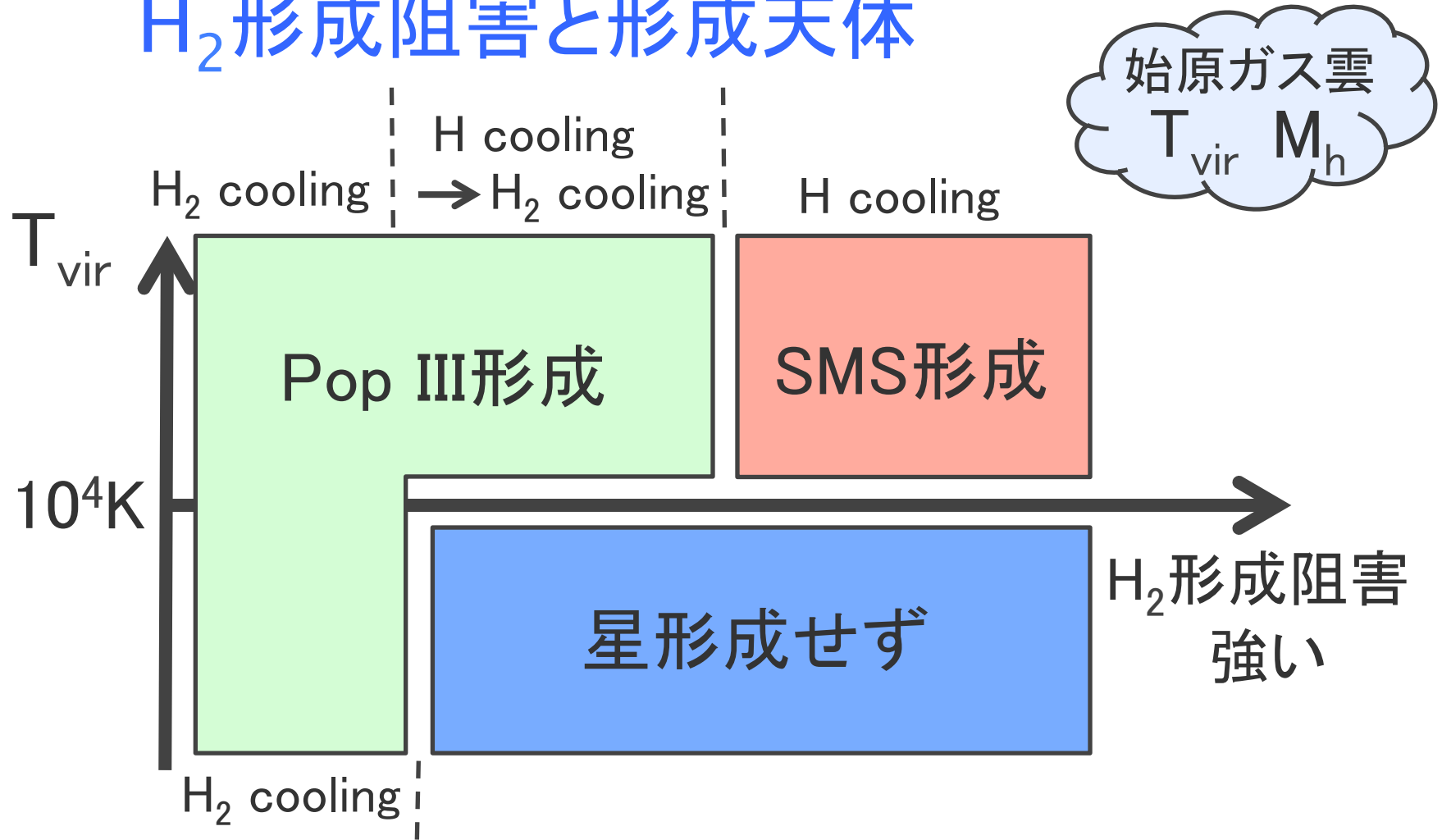
SMS形成

$$M_{\text{SMS}} \sim 10^4 M_{\odot}$$



×
イメージを表示できません。メモリ不足のためにイメージを開くことができないか、イメージが破損している可能性があります。コンピューターを再起動して再度ファイルを開いてください。それでも赤い x が表示される場合は、イメージを削除して挿入してください。

H₂形成阻害と形成天体



H₂形成が阻害された始原ガス雲 (SMS形成の可能性ある雲)
初期宇宙に存在するか？



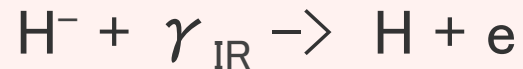
水素分子形成を阻害する反応

H₂ 光カイリ

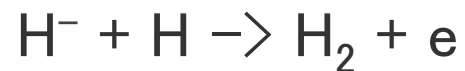


H₂を直接破壊

H⁻ 光カイリ

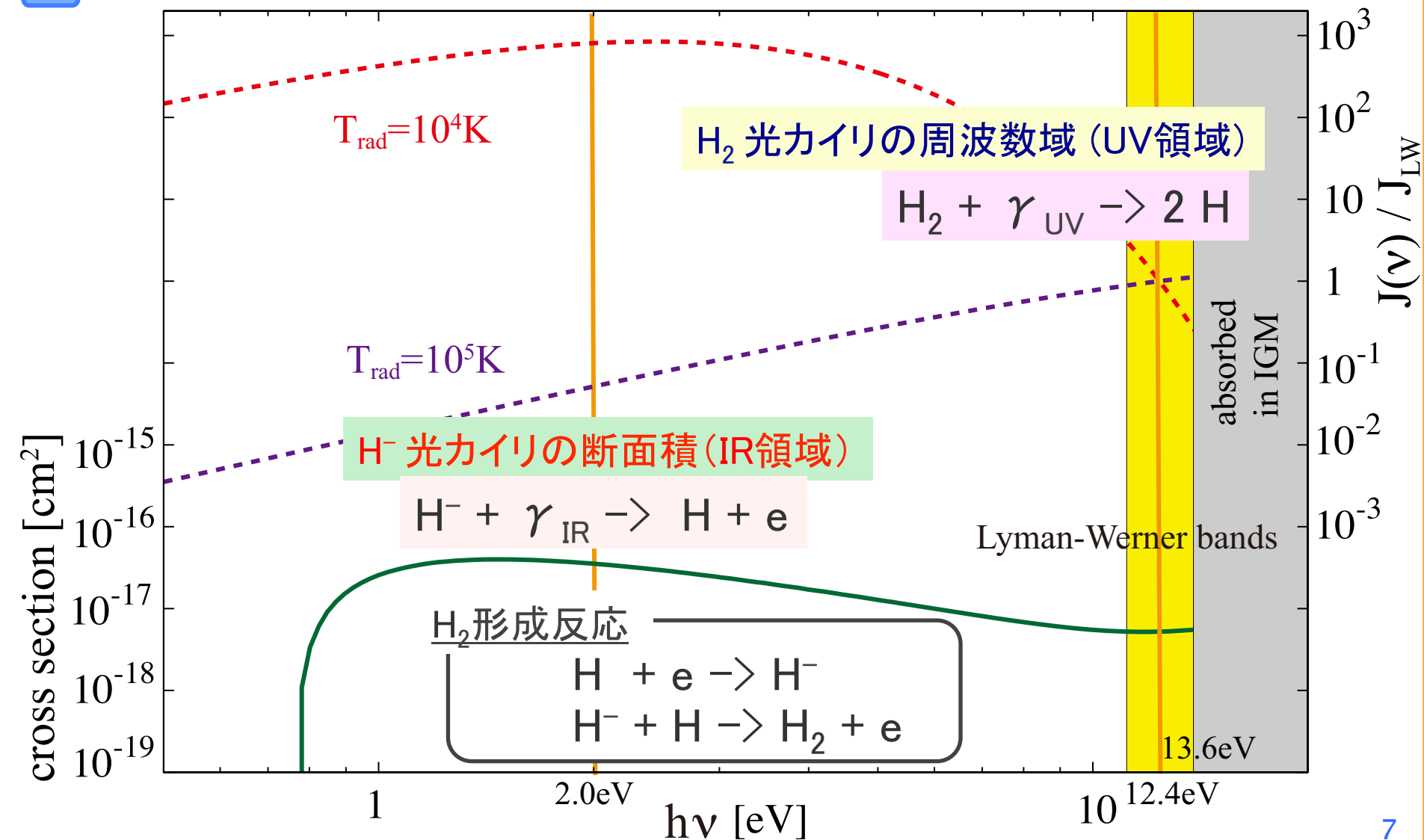


H₂形成反応



H₂形成の中間生成物を破壊

黒体輻射スペクトルと光カイリの断面積

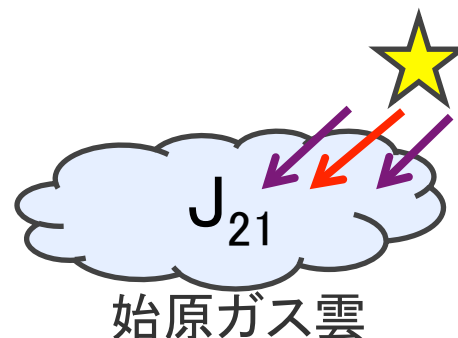


超大質量星 J_{21}^{cr} とSMSの形成確率

- 外部紫外線強度

$$J_{21} \equiv \frac{J(h\nu = 12.4\text{eV})}{10^{-21}\text{erg cm}^{-2}\text{ s}^{-1}\text{ Hz}^{-1}\text{ sr}^{-1}}$$

- H_2 光カイリ率と対応



- 臨界紫外線強度: J_{21}^{cr}

- SMS形成に必要な J_{21}

- H^- 光カイリで $J_{21}^{\text{cr}} \downarrow$

$J_{21}^{\text{cr}} \sim 1500$ ←ハードなスペクトルの場合

Wolcott-Green et al. 2011



現実的なスペクトルに対する J_{21}^{cr} は？？？

超大質量星 J_{21}^{cr} とSMSの形成確率

宇宙背景紫外線 ($z \sim 10$)

$$J_{21}^{\text{bg}} \sim 10$$

他天体起源の紫外線強度の分布

- 外部紫外線強度

$$J_{21} \equiv \frac{J(h\nu = 12.4\text{eV})}{10^{-21}\text{erg cm}^{-2}\text{ s}^{-1}\text{ Hz}^{-1}\text{ sr}^{-1}}$$

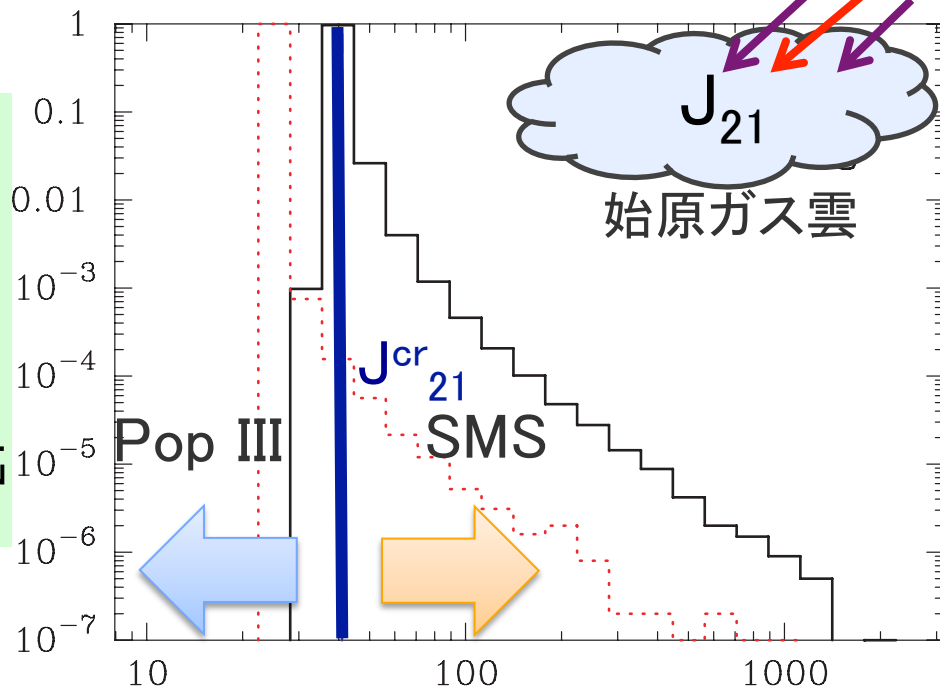
– H_2 光カイリ率と対応

- 臨界紫外線強度: J_{21}^{cr}

– SMS形成に必要な J_{21}

– H^- 光カイリで $J_{21}^{\text{cr}} \downarrow$

J_{21} の確率分布



$J_{21}^{\text{cr}} \sim 1500 \leftarrow$ ハードなスペクトルの場合

Wolcott-Green et al. 2011

J_{21}

Dijkstra et al. 2008 改変



現実的なスペクトルに対する J_{21}^{cr} は？？？

超大質量星 J_{21}^{cr} とSMSの形成確率

宇宙背景紫外線 ($z \sim 10$)

$$J_{21}^{\text{bg}} \sim 10$$

他天体起源の紫外線強度の分布

- 外部紫外線強度

$$J_{21} \equiv \frac{J(h\nu = 12.4\text{eV})}{10^{-21}\text{erg cm}^{-2}\text{ s}^{-1}\text{ Hz}^{-1}\text{ sr}^{-1}}$$

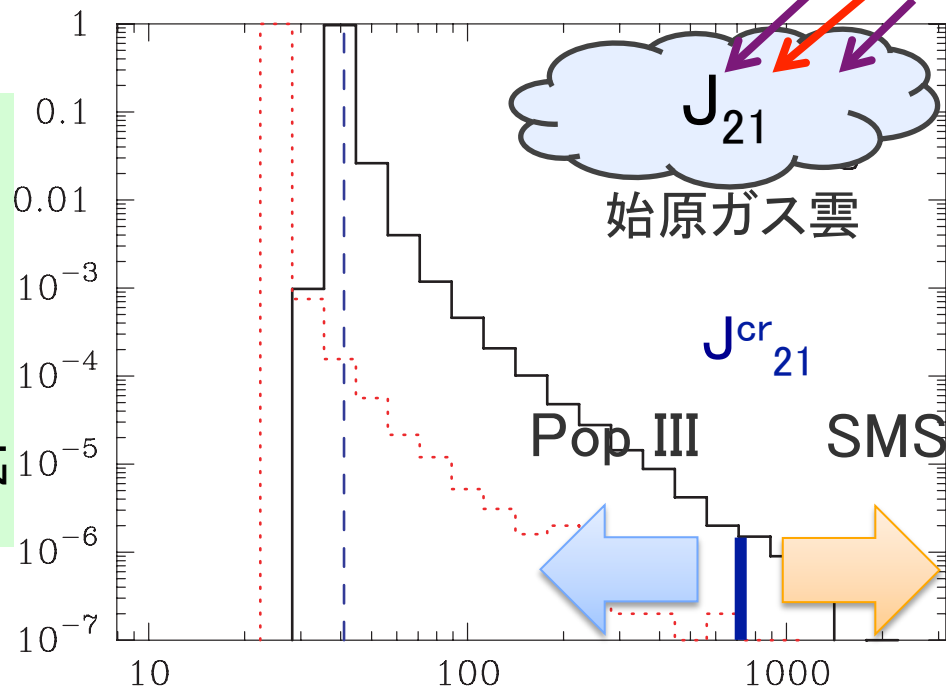
– H_2 光カイリ率と対応

- 臨界紫外線強度: J_{21}^{cr}

– SMS形成に必要な J_{21}

– H^- 光カイリで $J_{21}^{\text{cr}} \downarrow$

J_{21} の確率分布



$J_{21}^{\text{cr}} \sim 1500 \leftarrow$ ハードなスペクトルの場合

J_{21}

Dijkstra et al. 2008 改変

Wolcott-Green et al. 2011



現実的なスペクトルに対する J_{21}^{cr} は？？？



研究目的

□ これまでの問題点・本研究の目的

問題点：現実的なスペクトルに対する J_{21}^{cr} が不明

輻射源がPopII銀河（ソフトなスペクトル）

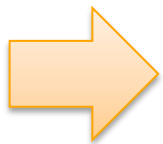


$$J_{21}^{\text{cr}} = 30? \quad 300?$$

Agarwal+ 2012

Dijkstra+ 2014

目的：さまざまな銀河の輻射スペクトル

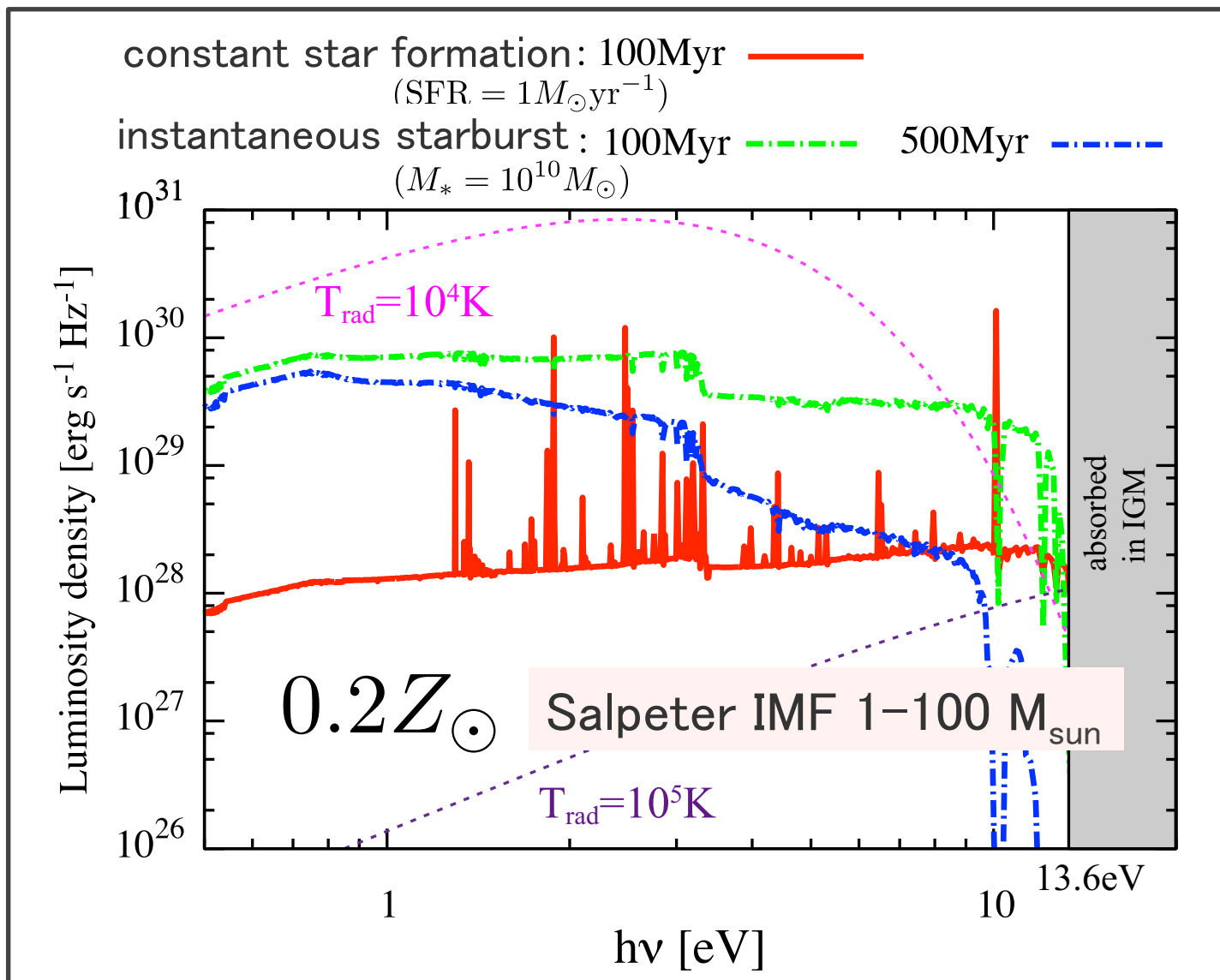


臨界紫外線強度 J_{21}^{cr} の現実的な値

銀河の輻射スペクトルの例

Starburst99、Schaerer02

Population synthesisコードを用いて計算



始原ガス雲の重力崩壊(計算手法)

run away collapse

Penston 1969, Larson 1969

コアの密度進化

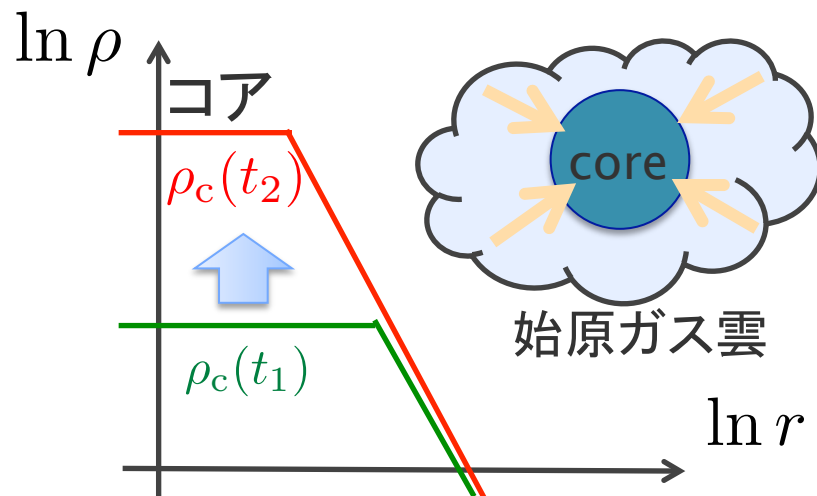
$$\frac{d\rho_c}{dt} \approx \frac{\rho_c}{t_{\text{ff}}} \quad \left(t_{\text{ff}} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho_c}} \right)$$

1-zone model

- コアの進化を1-zoneで近似
- 化学・熱進化の微視的物理過程

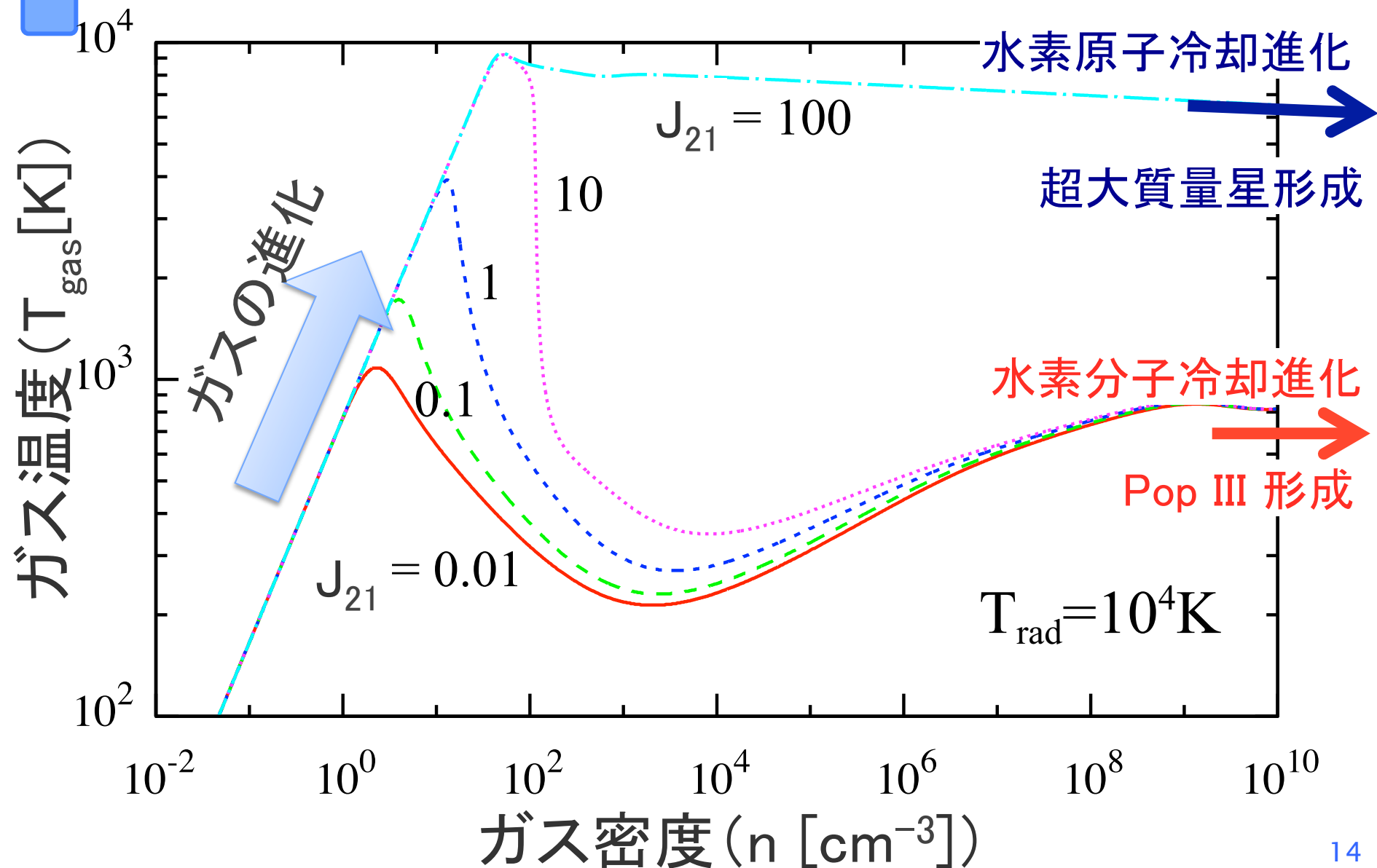
H, H⁺, H⁻, e, H₂, H₂⁺, H₂⁻, He, He⁺, He²⁺

➡ コアの密度 (n [cm⁻³])、温度 (T_{gas} [K])、化学組成の時間発展



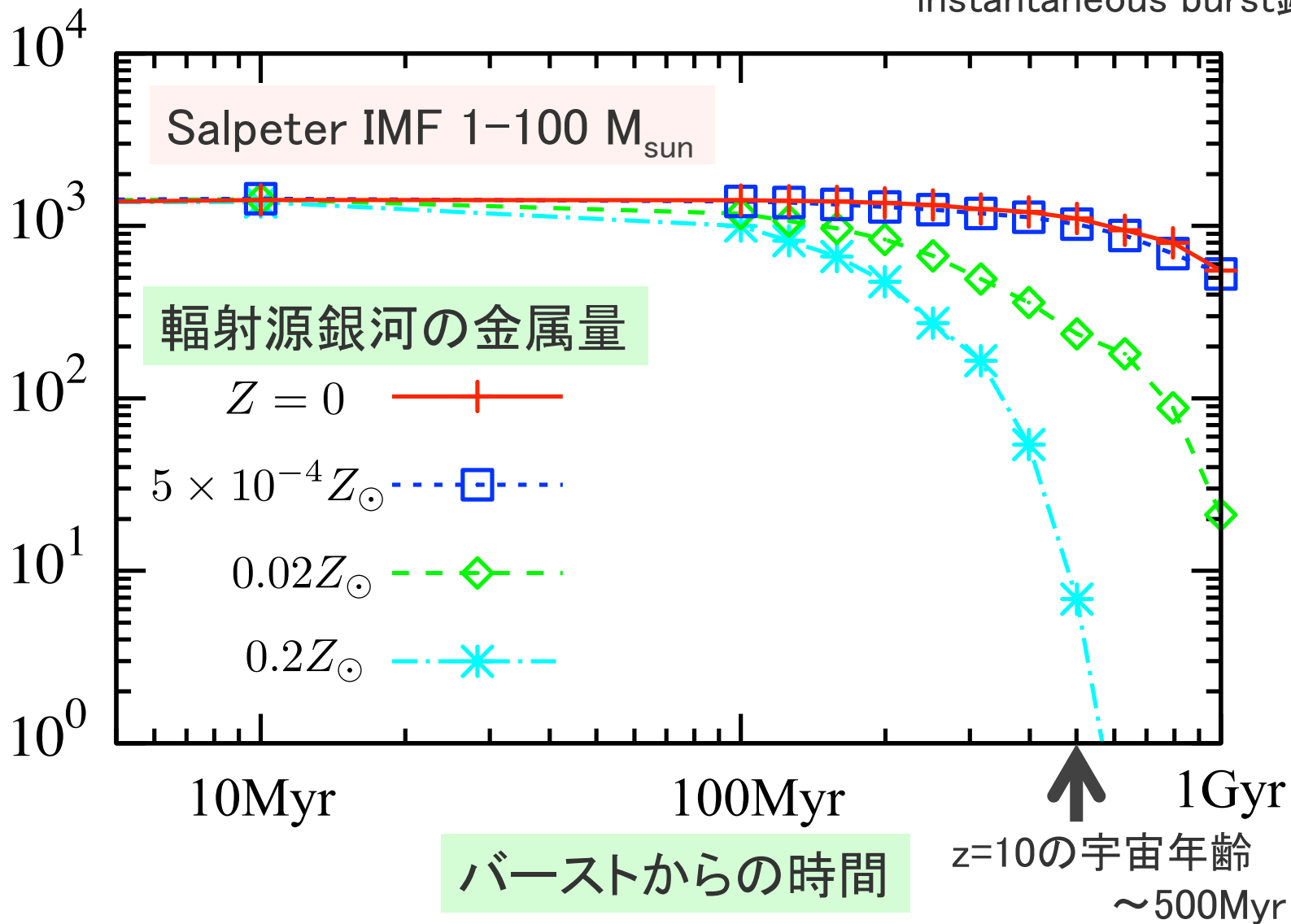
3D simulationでのコアの進化をよく再現 Shang+ 2010

ガス雲の進化計算(黒体輻射の例)



結果

instantaneous burst銀河



結論・考察

□ 現実的な J_{21}^{cr}

初期宇宙の輻射源～若い・低金属度銀河

→ $J_{21}^{\text{cr}} \sim 1400$

□ 超大質量星の数密度

– Dijkstra et al. 2014 での予言

$$n_{\text{SMS}} \sim 10^{-7} \text{ cMpc}^{-3} @ z=10$$

本研究に基づく予言

$$n_{\text{SMS}} \sim 10^{-10} \text{ cMpc}^{-3} @ z=10$$

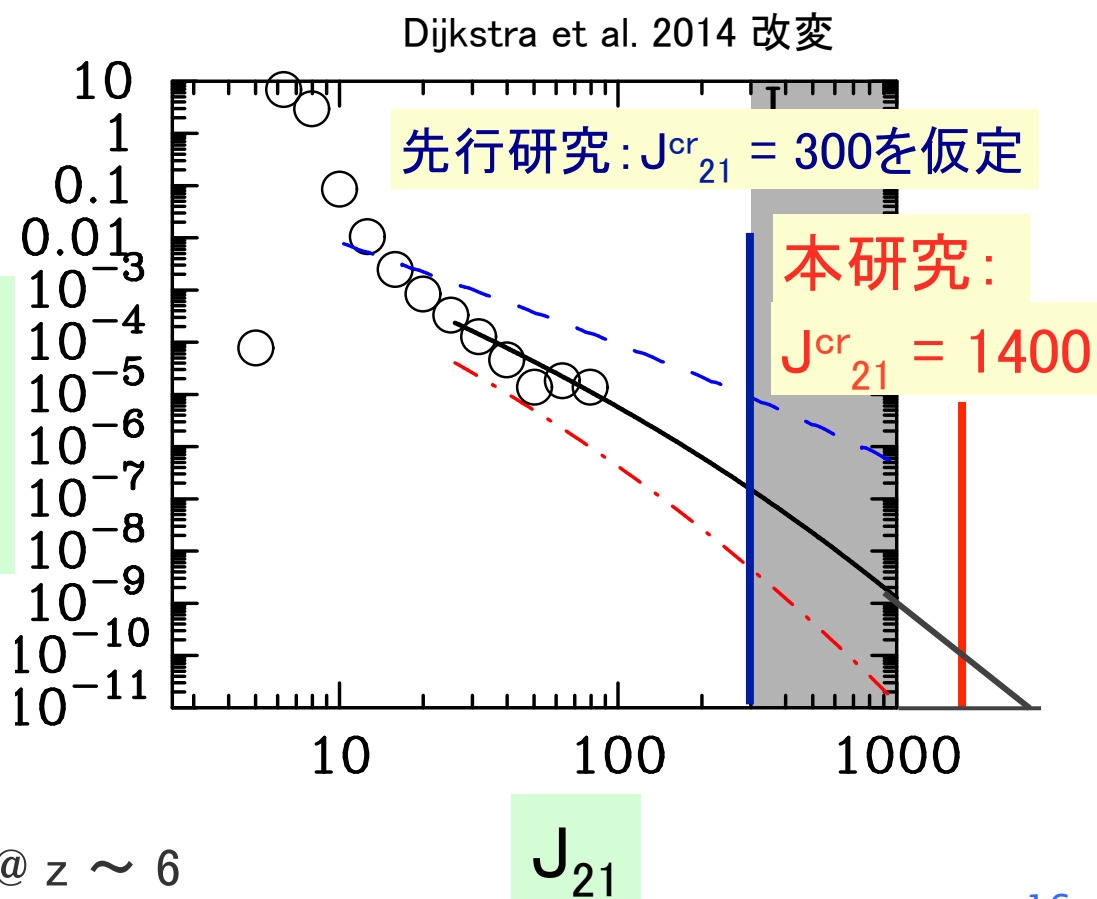


(注: 不定性大)

– SMBHの個数密度(観測)

$$n_{\text{SMBH}} \sim 10^{-9} \text{ cMpc}^{-3} @ z \sim 6$$

確率分布





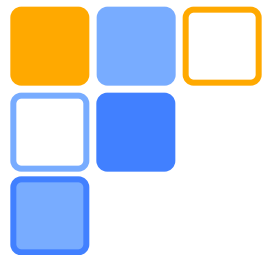
まとめ・今後の課題

□ まとめ (Direct collapse BH)

- 超大質量星形成に必要な紫外線強度 J_{21}^{cr}
- さまざまな銀河の輻射スペクトルに対して J_{21}^{cr} を計算し、初期宇宙での現実的な J_{21}^{cr} を求めた
- 超大質量星の個数密度を考察、宇宙初期のSMBH個数密度とconsistentだが不定性大
(現在のSMBH個数密度とは大きく異なる)

□ 今後の課題

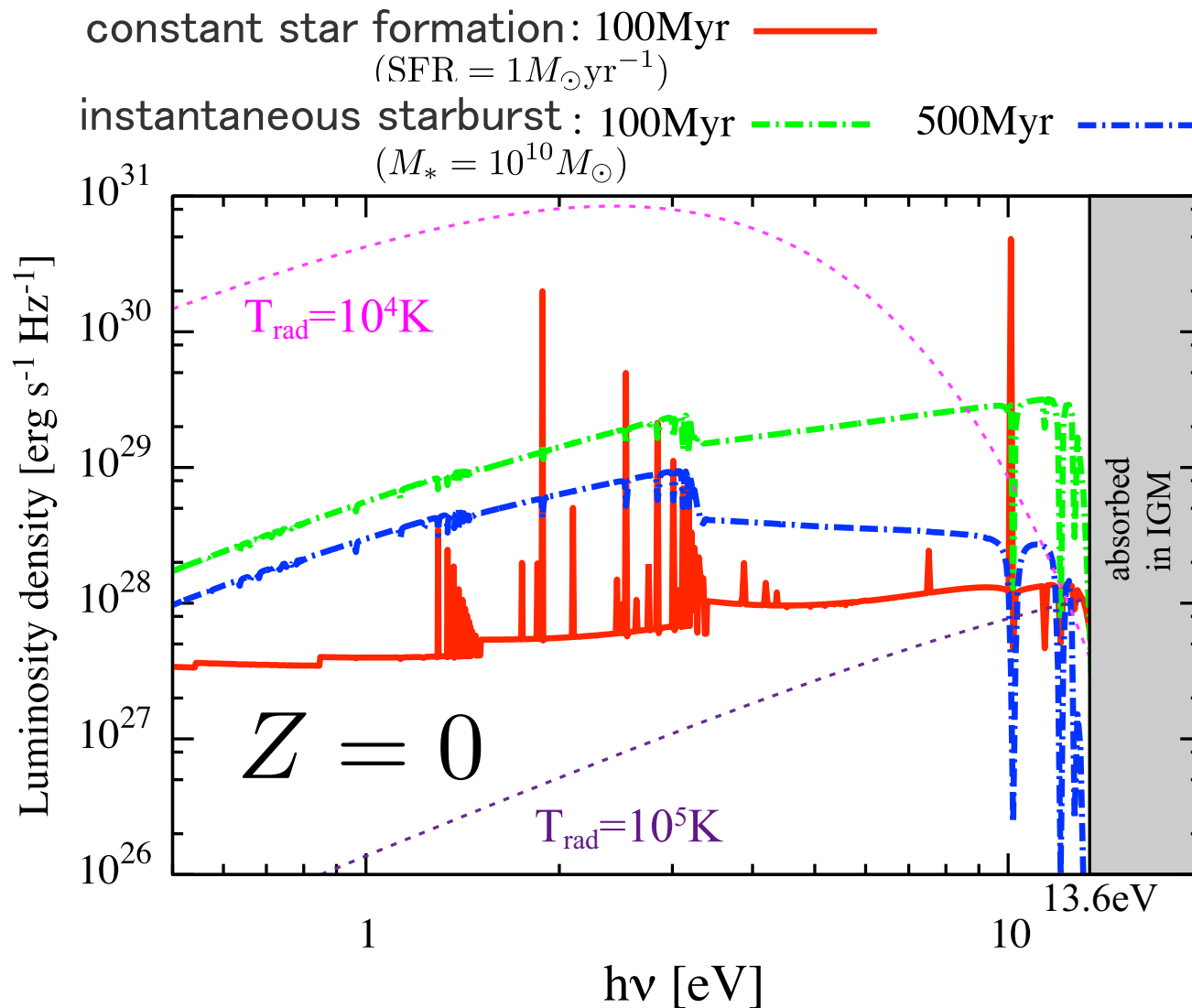
- より精確に J_{21}^{cr} を求める
三次元的効果、non-LTE化学反応の影響
- SMBH個数密度の予言の精度を上げる
現状 $10^{-2} - 10^2$ 倍以上の不定性があり、観測との比較が困難



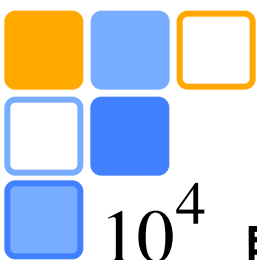
予備スライド

さまざまな銀河の輻射スペクトル (PopIII)

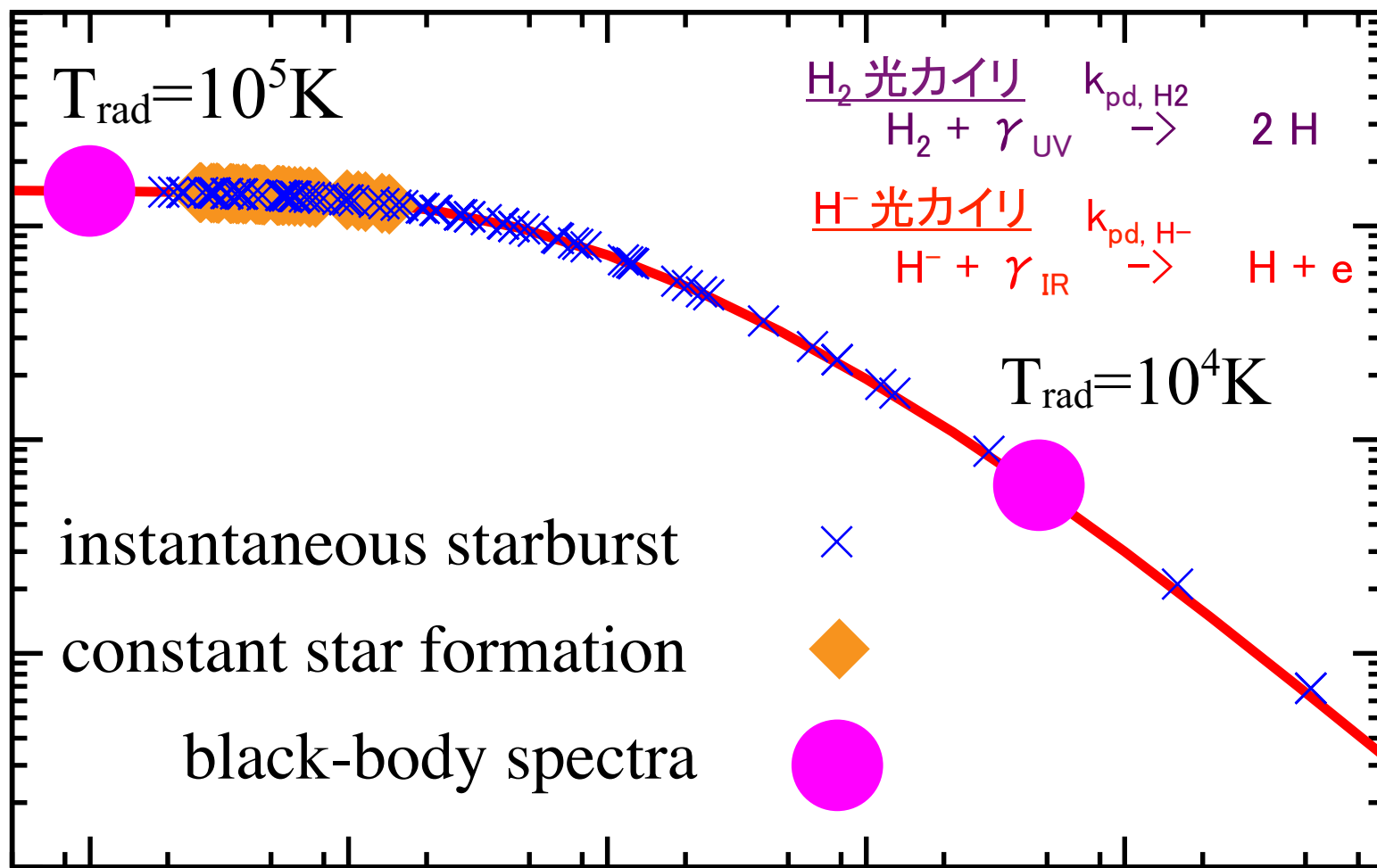
(Starburst99、Schaerer02のコードを用いて計算)



J_{21}^{cr} とスペクトルの硬さの関係



10^4



J_{21}^{cr}

スペクトルのハードネス

ハード

ソフト

H_2 光カイリのみ

$(k_{\text{pd, H}^-} / k_{\text{pd, H}_2})$

H_2 光カイリ + H^- 光カイリ