



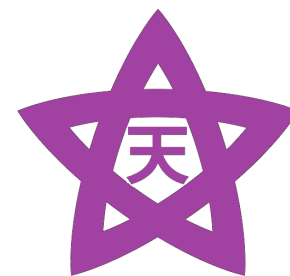
(Direct Collapse シナリオによる)

超巨大ブラックホール形成に 必要な紫外線輻射強度



TOHOKU
UNIVERSITY

杉村 和幸 (東北大)



Theoretical Astrophysics
Tohoku University

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)

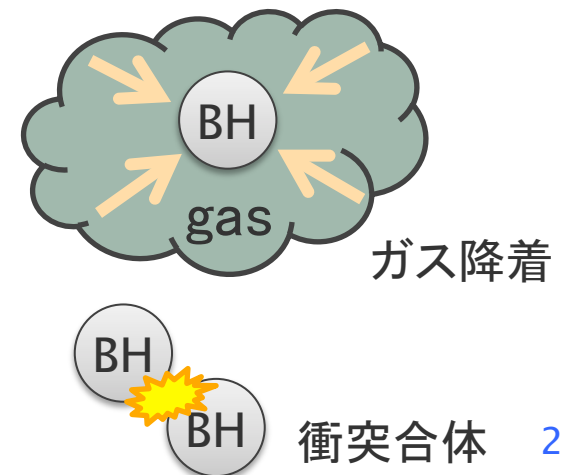
- 現在: 銀河中心に普遍的に存在
- 宇宙初期 ($z \sim 7$, 0.8Gyr):
 $M_{\text{BH}} \sim 10^9 M_{\odot}$ が存在
Mortlock + 2011
- 降着ガスからの輻射 (クエーサー、AGN)

宇宙初期のSMBH形成は大きな謎

- 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?

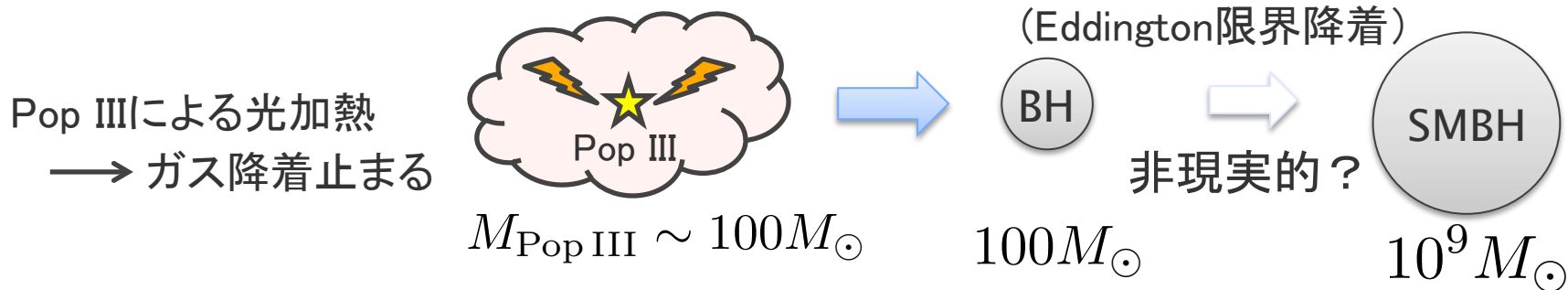


クエーサーのイメージ図
(Credit: ESO/M. Kornmesser)



宇宙初期のSMBHの種候補

I. 初代星(Pop III)起源BH



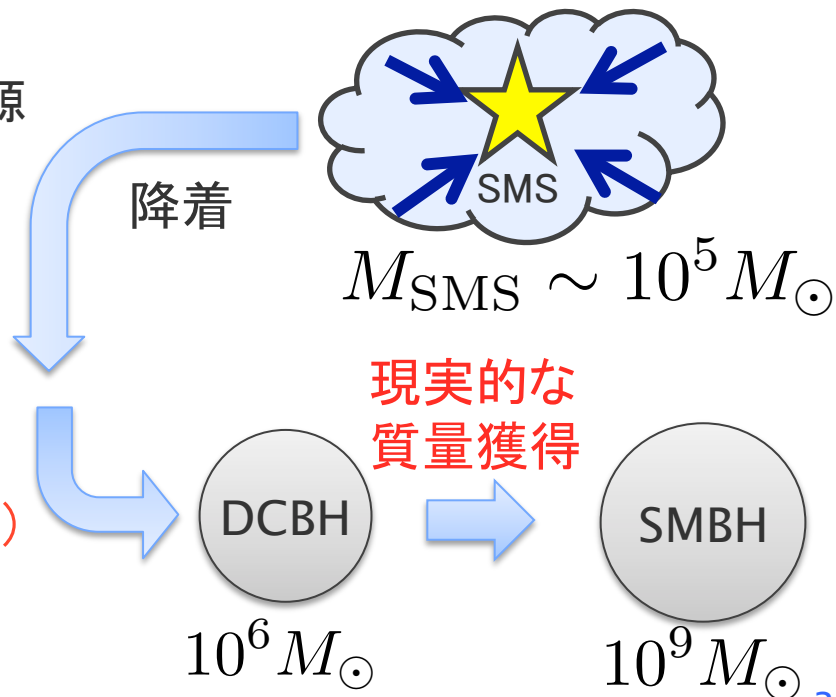
II. Direct collapse BH

超大質量星 (Supermassive Star; SMS) 起源

- ・ 高い降着率・広がった構造
 - ・ 弱い輻射フィードバック
- Hosokawa, Yorke and Omukai (2012)

→ 相対論的效果でBHに (Direct collapse)

Bromm and Loeb (2003)

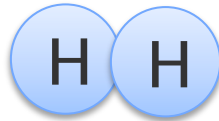




Pop III と超大質量星を分かつ物理

□ 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

→ **Pop III 形成**
 $M_{\text{Pop III}} \sim 100M_{\odot}$

- 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
($T_{\text{gas}} > 8000\text{K}$)

→ H冷却で等温的進化

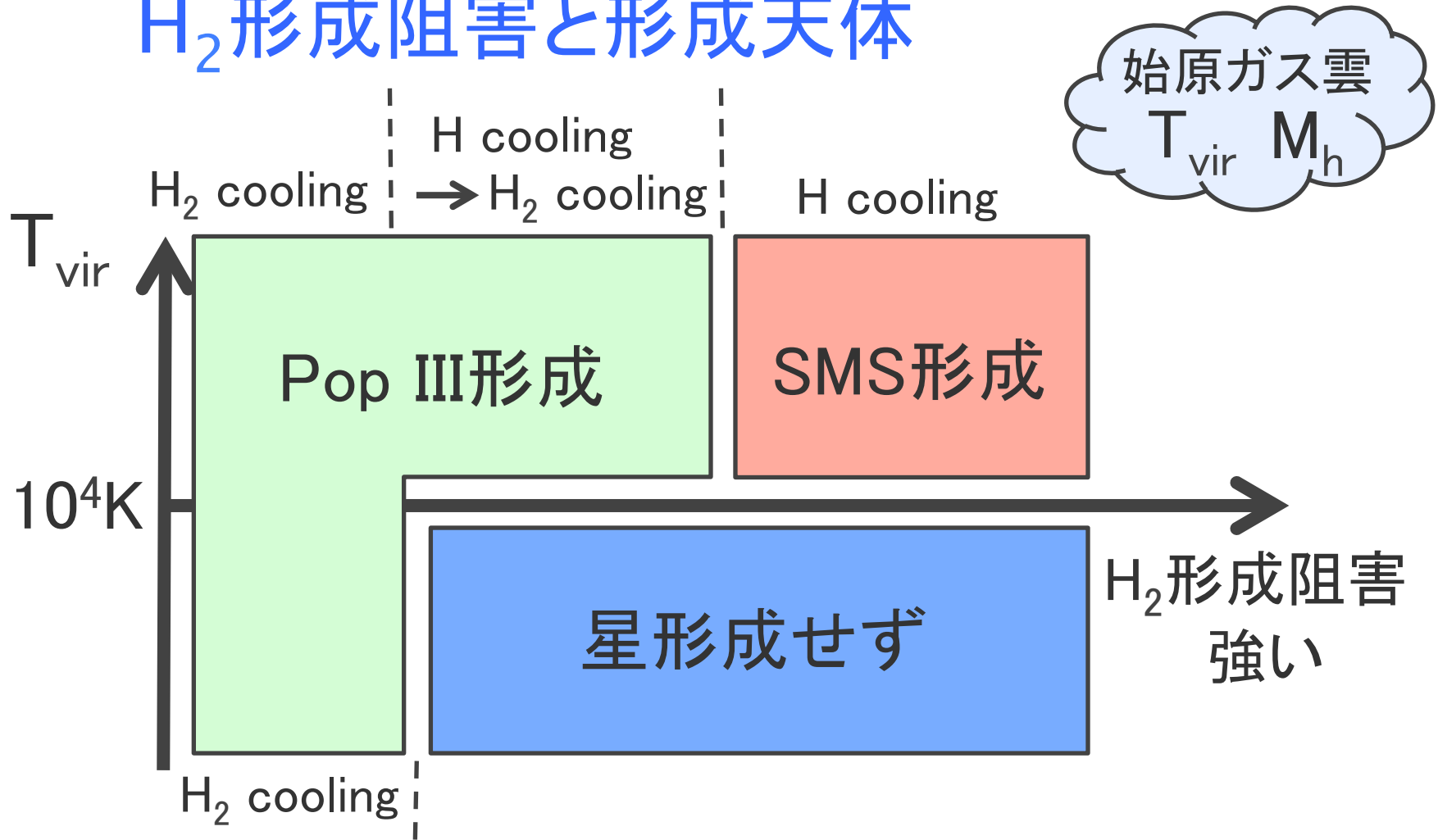
Inayoshi, Omukai and Tasker (2014)

→ **超大質量星形成**
 $M_{\text{SMS}} \sim 10^4 M_{\odot}$



$$T_{\text{vir}} \simeq 10^4 \left(\frac{M_h}{10^7 M_\odot} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1+z}{10} \right) \text{ K}$$

H₂形成障害と形成天体



H₂形成が障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？



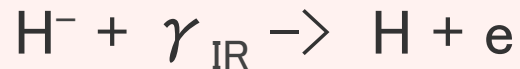
水素分子形成を阻害する反応

H₂ 光カイリ

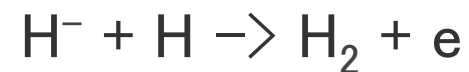


H₂を直接破壊

H⁻ 光カイリ

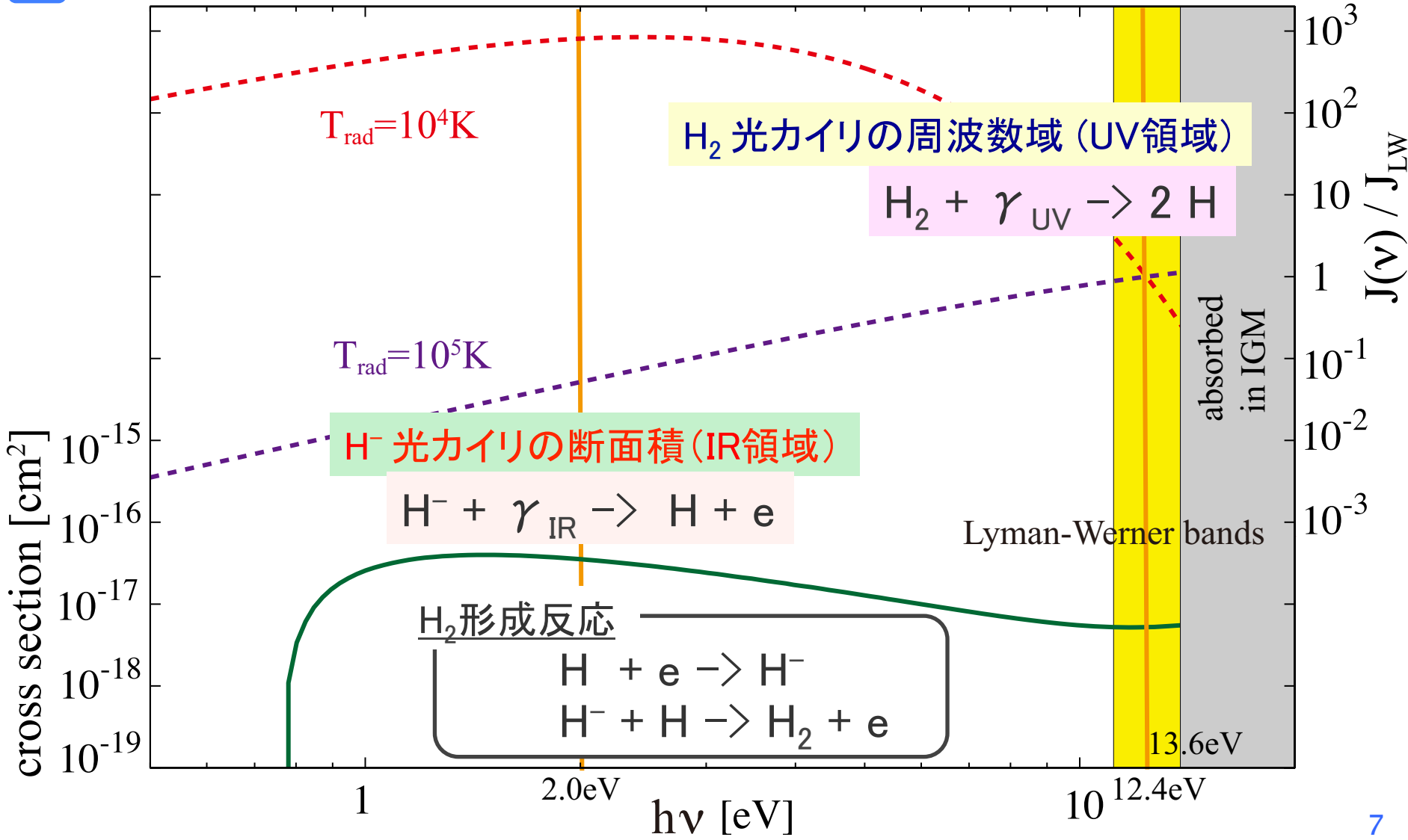


H₂形成反応



H₂形成の中間生成物を破壊

黒体放射スペクトルと光カイリの断面積

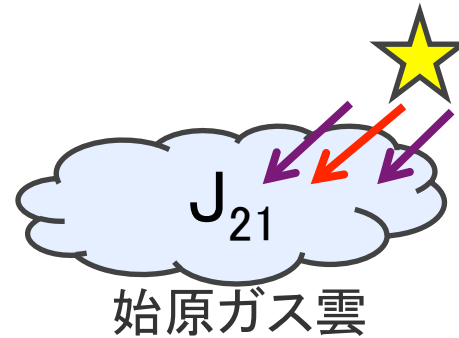


超大質量星 J_{21}^{cr} とSMSの形成確率

- 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}

ハードなスペクトルの場合

(H^- 光カイリが効かない場合) $\rightarrow J_{21}^{\text{cr}} \sim 1500$
Wolcott-Green et al. 2011

現実的なスペクトルに対する J_{21}^{cr} は???

(H^- 光カイリが効く場合) $\rightarrow J_{21}^{\text{cr}} \sim 30??$ Dijkstra et al. 2008 8



超大質量星

J_{21}^{cr} とSMSの形成確率

宇宙背景紫外線 ($z \sim 10$)

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

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}

ハードなスペクトルの場合

(H -光カイリが効かない場合)

$$\rightarrow J_{21}^{cr} \sim 1500$$

Wolcott-Green et al. 2011

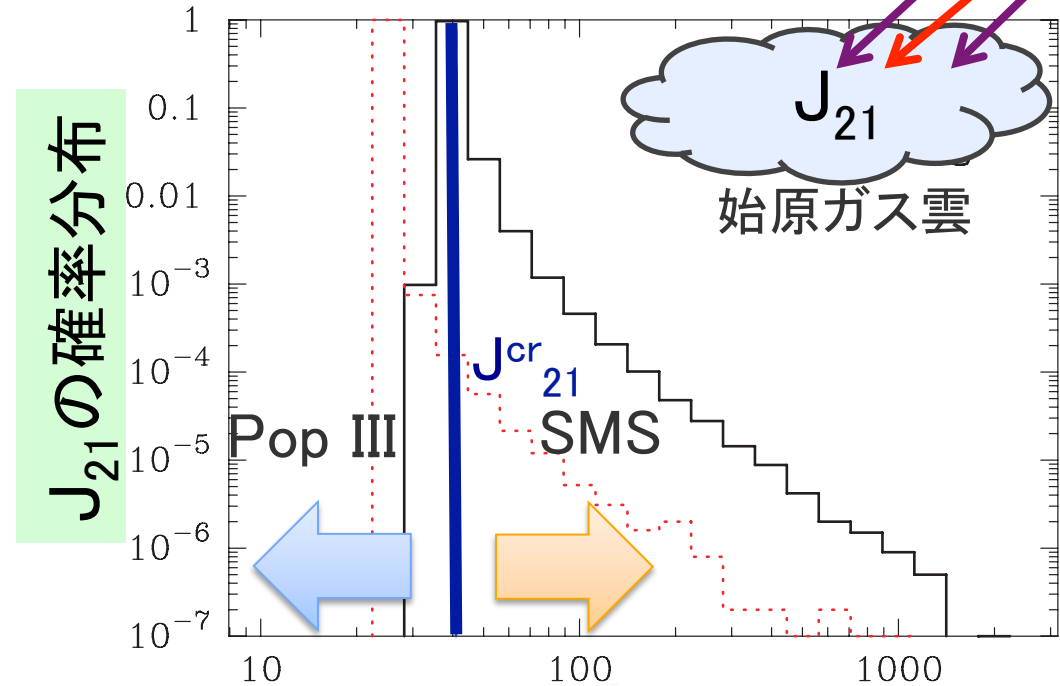
J_{21}

Dijkstra et al. 2008 改変

現実的なスペクトルに対する J_{21}^{cr} は???

(H -光カイリが効く場合)

$$\rightarrow J_{21}^{cr} \sim 30??$$





超大質量星 J_{21}^{cr} とSMSの形成確率

宇宙背景紫外線 ($z \sim 10$)

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

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}

ハードなスペクトルの場合

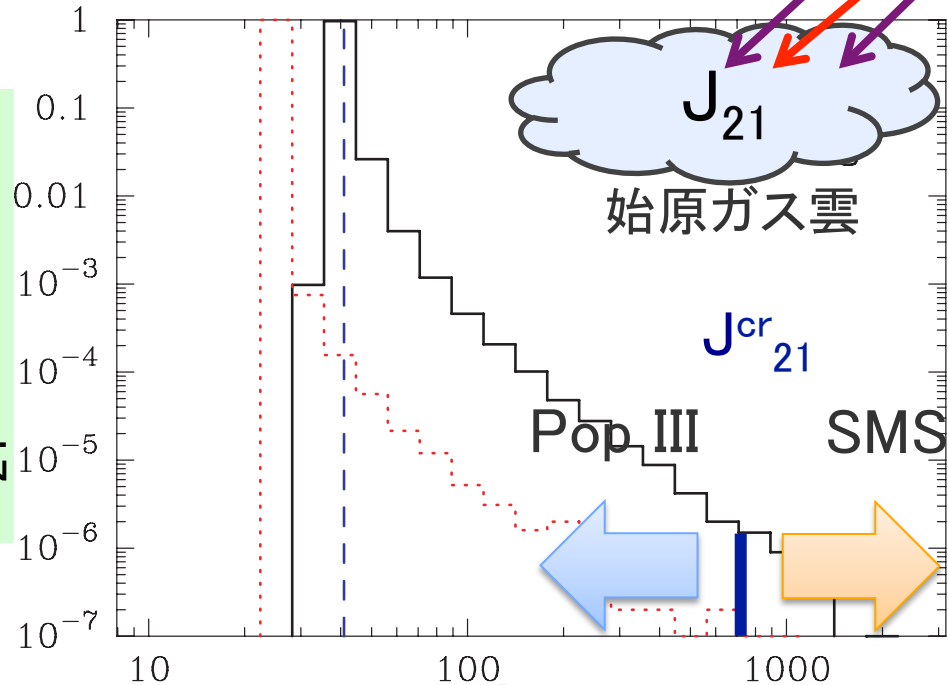
(H-光カイリが効かない場合)

$$\rightarrow J_{21}^{cr} \sim 1500$$

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 ???

(H-光カイリが効く場合)

$$\rightarrow J_{21}^{cr} \sim 30 \text{ ? ? } \text{ Dijkstra et al. 2008 } 10$$



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）のとき



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

Dijkstra+ 2008

Dijkstra+ 2014

Agarwal+ 2012

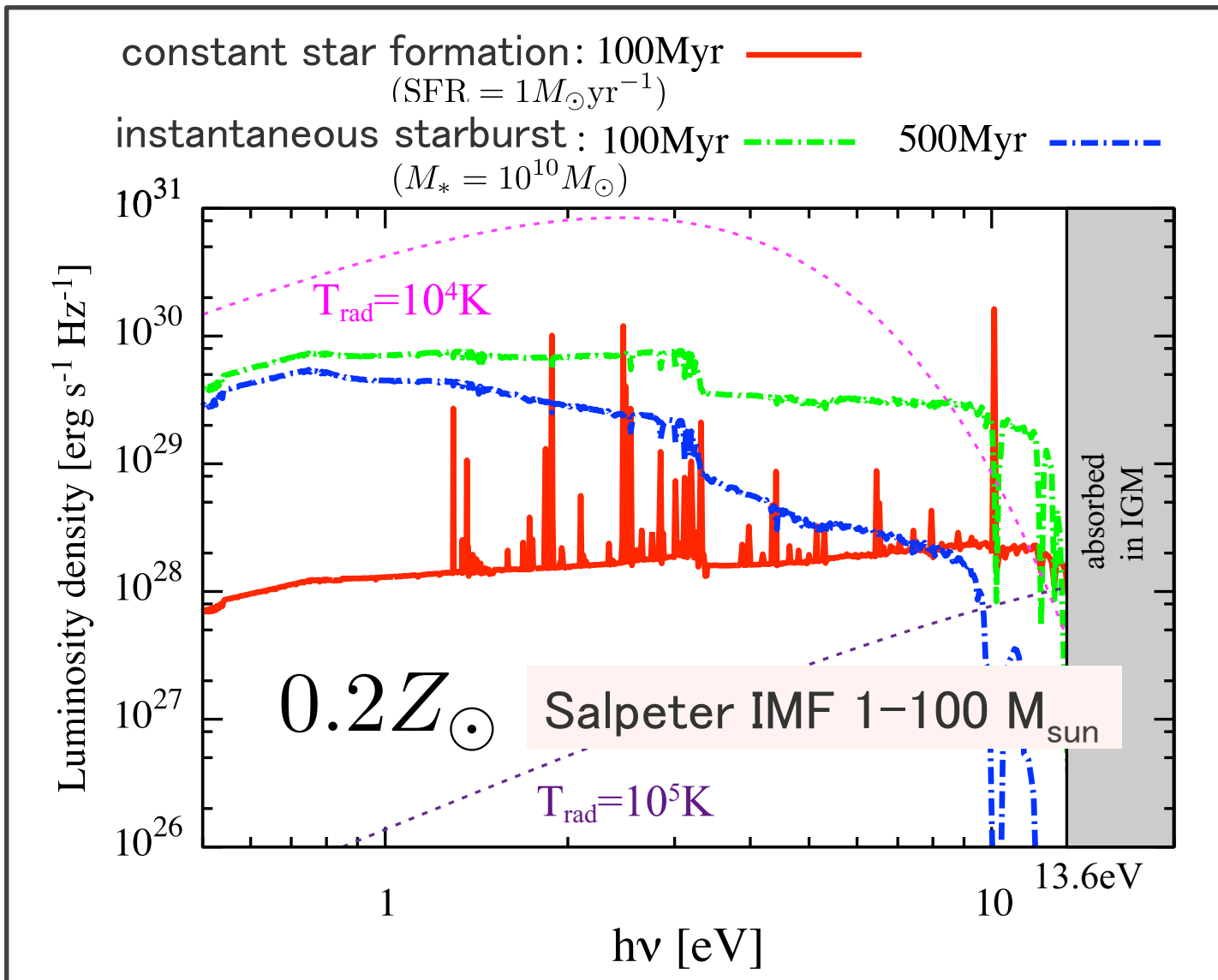
J_{21}^{cr} が不明だと形成する超大質量星の
個数密度を理論予言できない！！

目的：さまざまな銀河の輻射スペクトルに対し J_{21}^{cr} を
計算して J_{21}^{cr} の現実的な値を求める

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

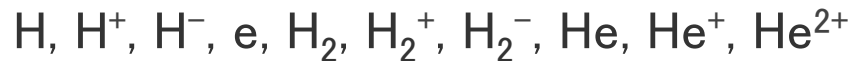
Penston 1969, Larson 1969

- コアの密度進化

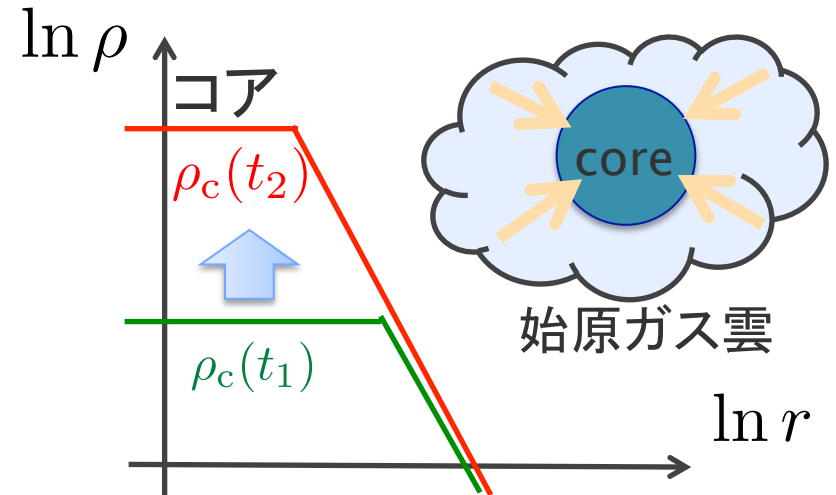
$$\frac{d\rho_c}{dt} \approx \frac{\rho_c}{t_{\text{ff}}} \quad \left(t_{\text{ff}} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho_c}} \right)$$

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

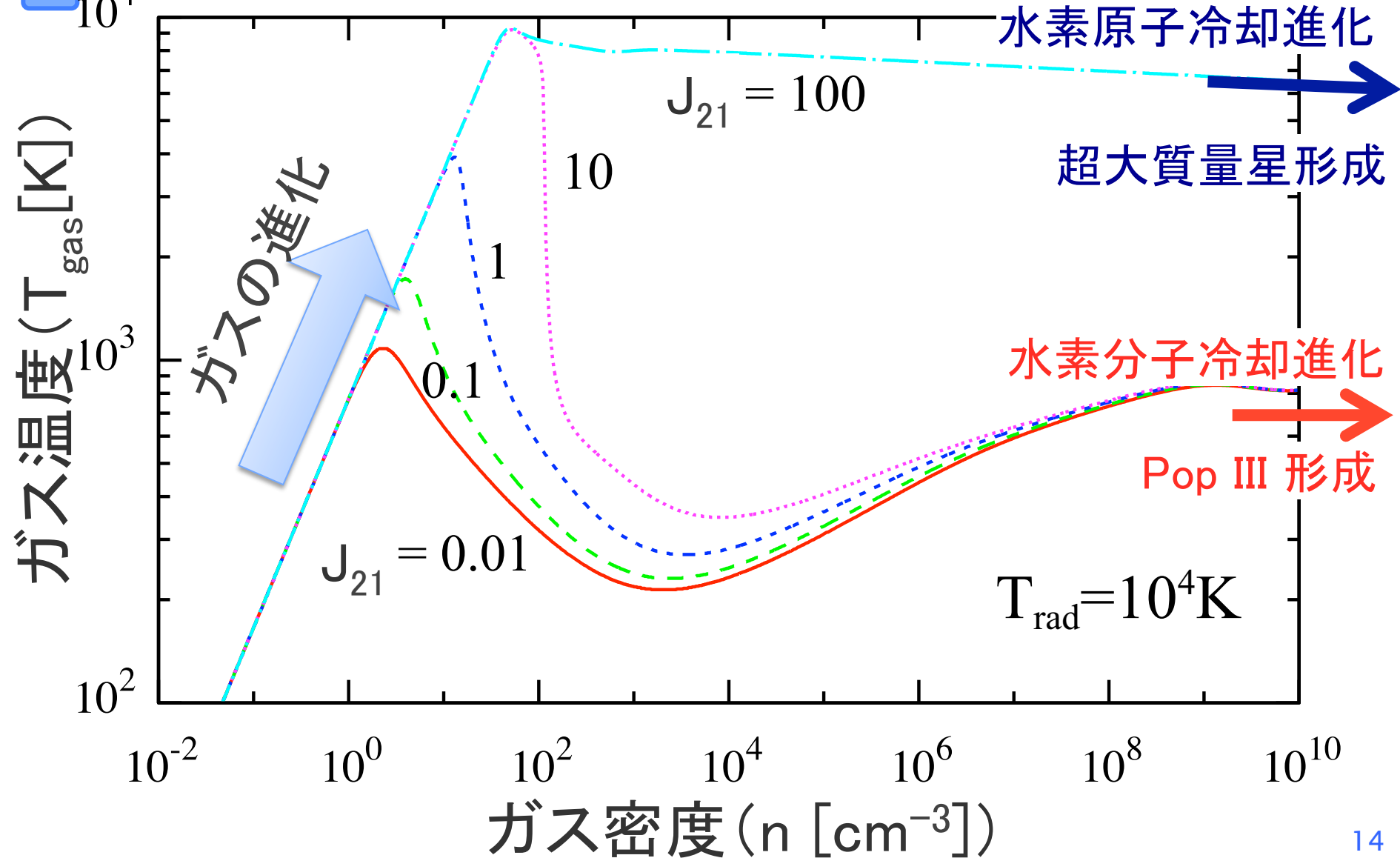


➡ コアの密度 (n [cm^{-3}])、温度 (T_{gas} [K])、化学組成の時間発展



3D simulationでのコアの進化をよく再現 Shang+ 2010

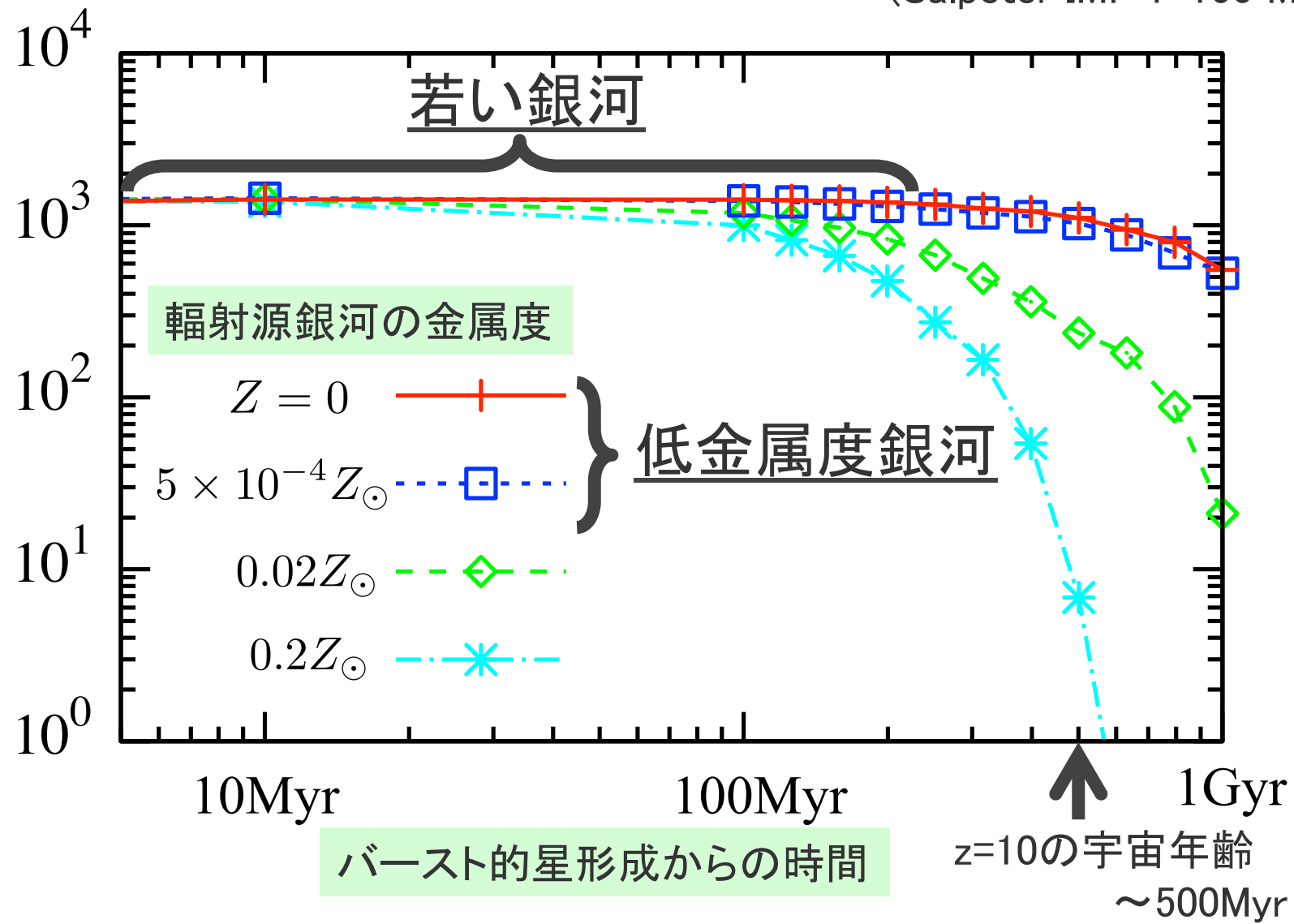
ガス雲の進化計算 (黒体輻射の例)



結果

instantaneous burst 銀河
(Salpeter IMF 1-100 M_{sun})

$J_{\text{cr}21}$



バースト的星形成からの時間

z=10の宇宙年齢
~500Myr

結果と考察

現実的な J_{21}^{cr}

$J_{21}^{cr} \sim 300$? (Dijkstra et al. 2014)

初期宇宙の輻射源 ~ 若い・低金属度銀河



$J_{21}^{cr} \sim 1400$

予想される超大質量星数密度

$n_{SMS} \sim 10^{-7} \text{ cMpc}^{-3} @ z=10$
(Dijkstra et al. 2014)



本研究に基づく予言

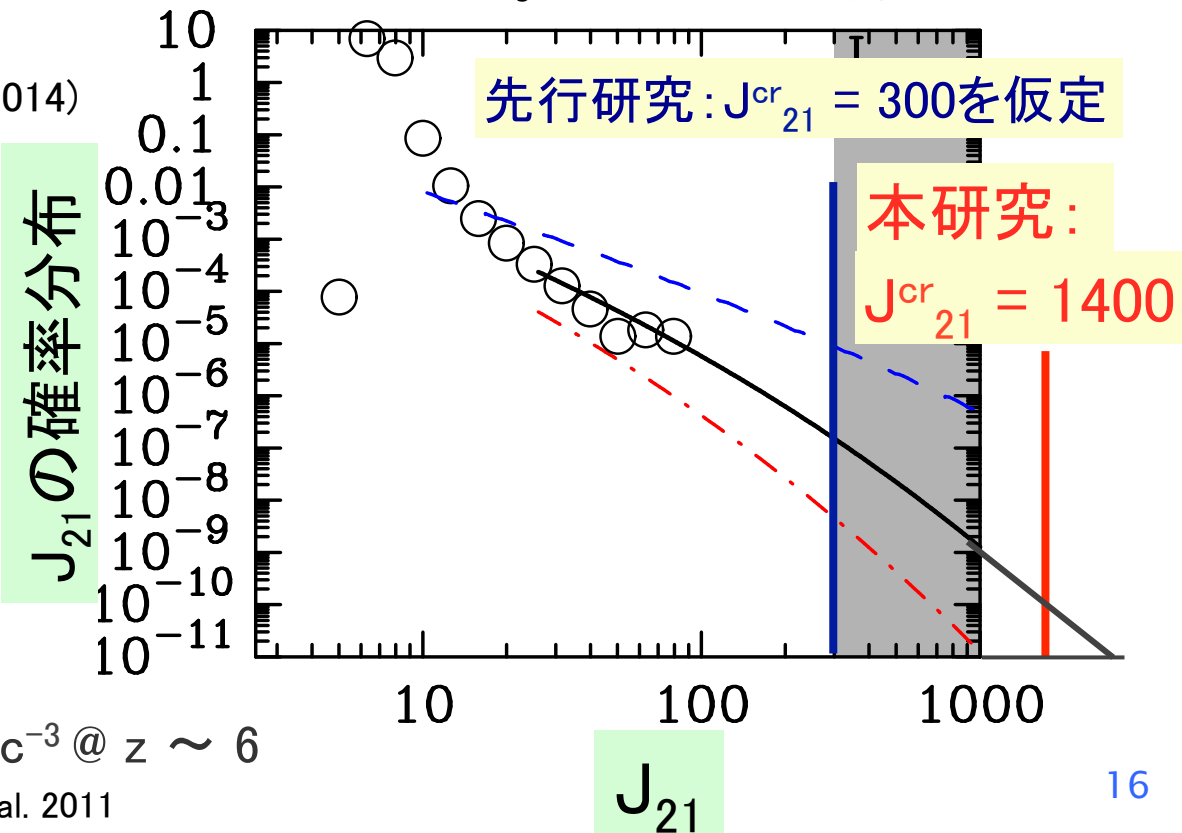
$n_{SMS} \sim 10^{-10} \text{ cMpc}^{-3}$
@ $z=10$

- SMBHの個数密度(観測)

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

Fan et al. 2011

Dijkstra et al. 2014 改変





まとめ

- さまざまな銀河の輻射スペクトルに対して、超大質量星形成に必要な外部紫外線強度 J_{21}^{cr} を計算し、現実的な値を求めた
- 輻射スペクトル依存性を考慮して得られた値 $J_{21}^{\text{cr}} \sim 1400$ は、これまで用いられてきた値より**数倍大きかった**
- これにより予言される超大質量星の個数密度は**三桁小さくなり**、観測される宇宙初期SMBH個数密度より約一桁小さくなった（しかし不定性大）
- SMBHの超大質量星起源説を検証する上で、超大質量星の形成条件を突き詰めて調べる**ことが重要**

注) 強い紫外線照射を受けた場合以外にも、強い衝撃波を経験した領域で超大質量星が形成する可能性がある

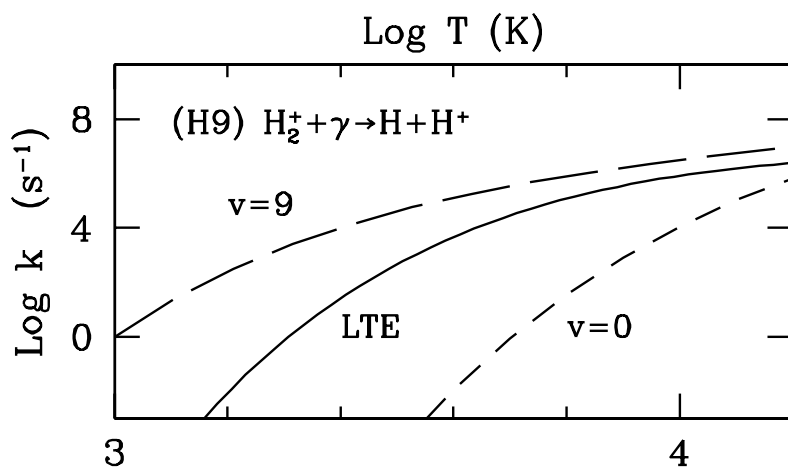
(Inayoshi & Omukai 2012)

今後の課題

形成条件の不定性

外部X線・宇宙線 三次元的効果 non-LTE化学反応 ...

よく用いられている化学反応率は本当に正しいのか！？



(Galli & Palla 1998)

例) H_2^+ の振動準位と光カイリ率

振動準位分布に大きく依存

しかし業界標準はLTE rate

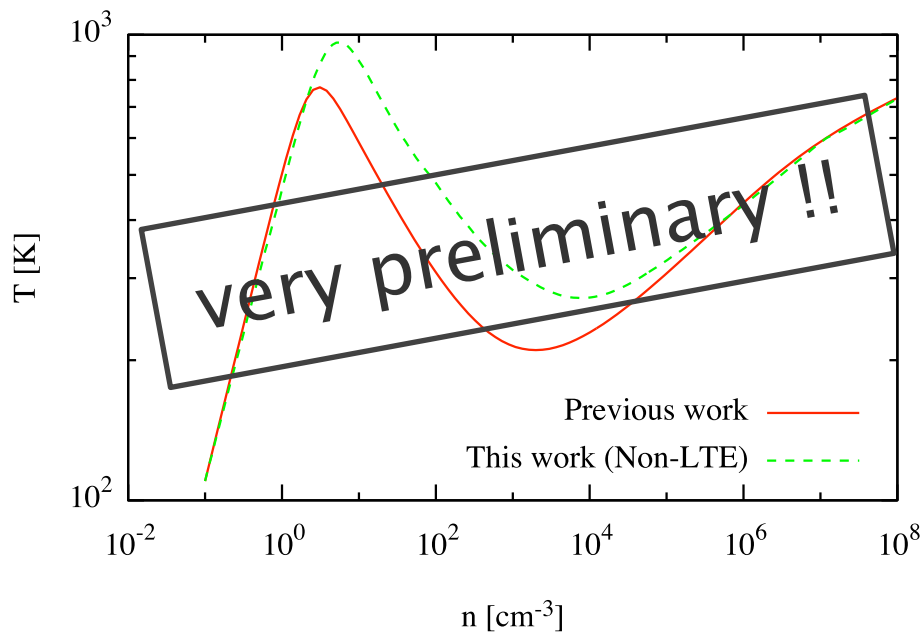


H₂とH₂⁺の非平衡準位占有数の J_{cr}²¹への影響

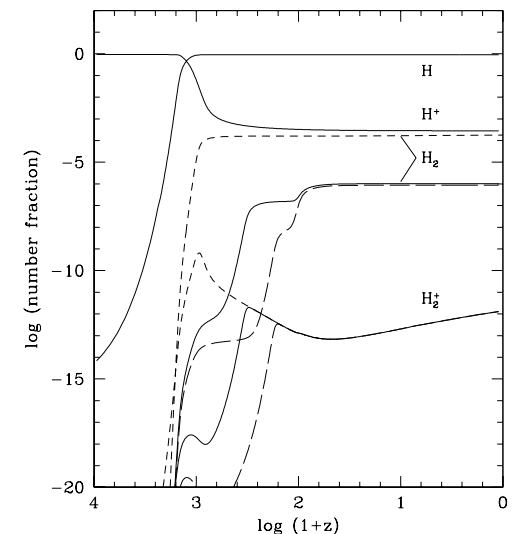
(共同研究者: Coppola、Galli、Palla、大向)

□ 現在進行中。○○○

without UV radiation



一様宇宙での水素分子形成量は、LTEとv=0の場合
で2桁程度変化することが知られている
(Galli & Palla 1998, Coppola+ 2011)

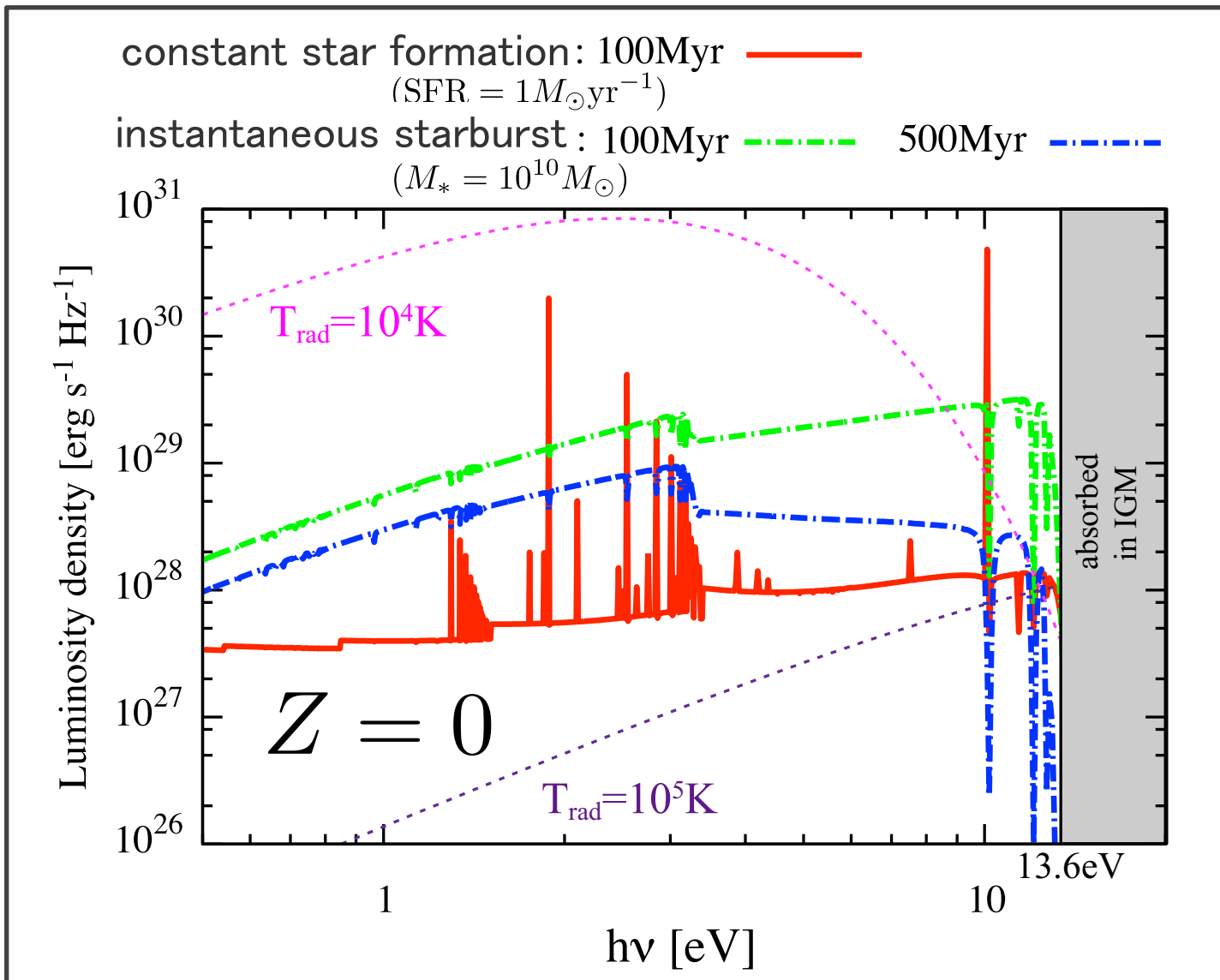




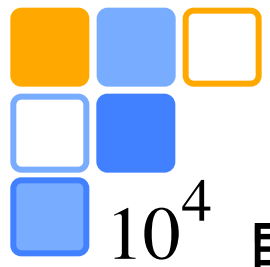
予備スライド

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)

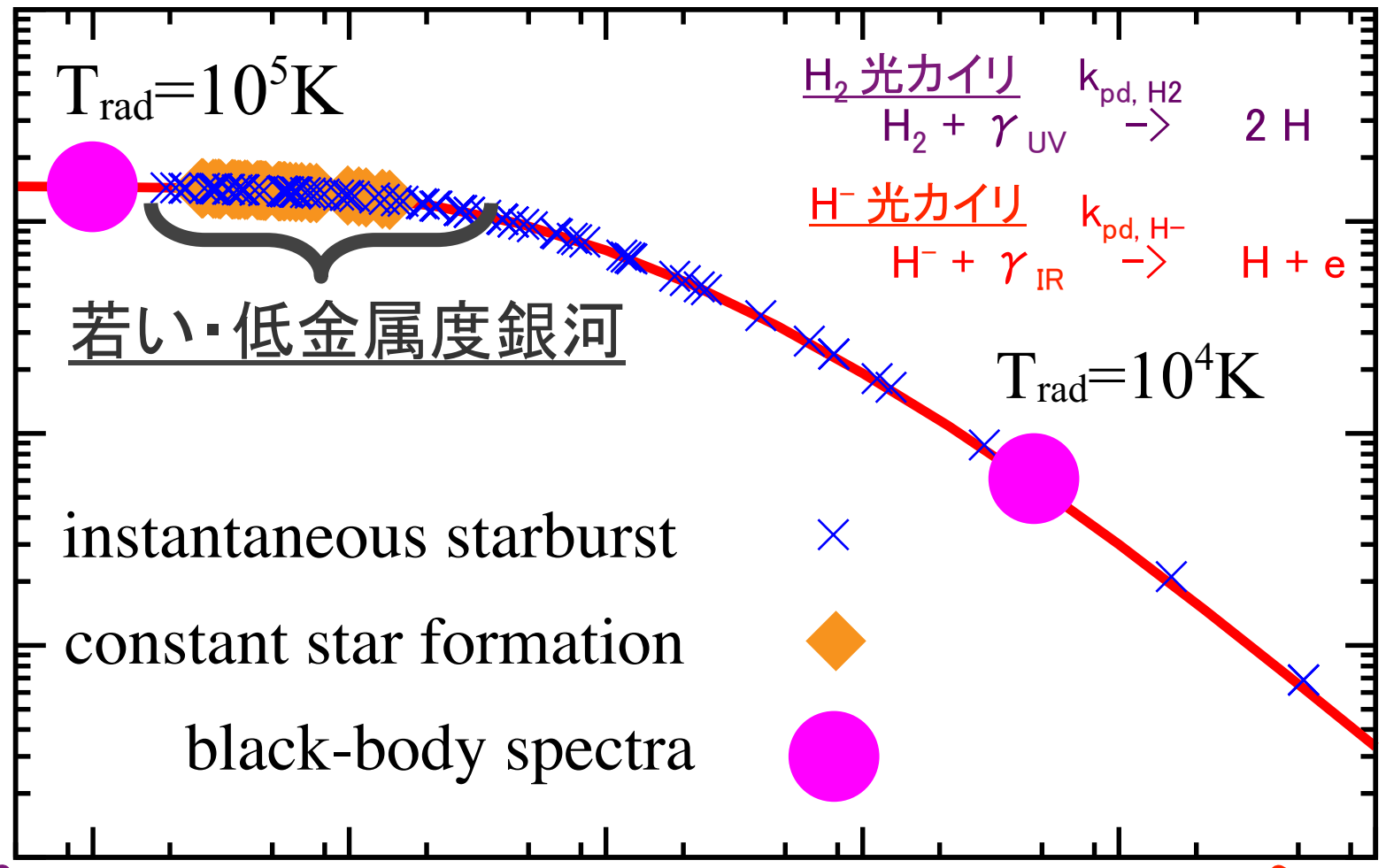


J_{21}^{cr} とスペクトルの硬さの関係



10^4

J_{21}^{cr}



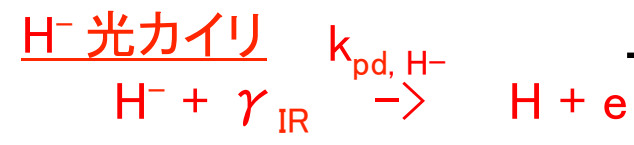
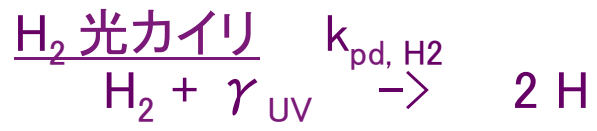
$T_{\text{rad}}=10^5\text{K}$

若い・低金属度銀河

instantaneous starburst

constant star formation

black-body spectra



$T_{\text{rad}}=10^4\text{K}$

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

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

H_2 光カイリ + H^- 光カイリ