

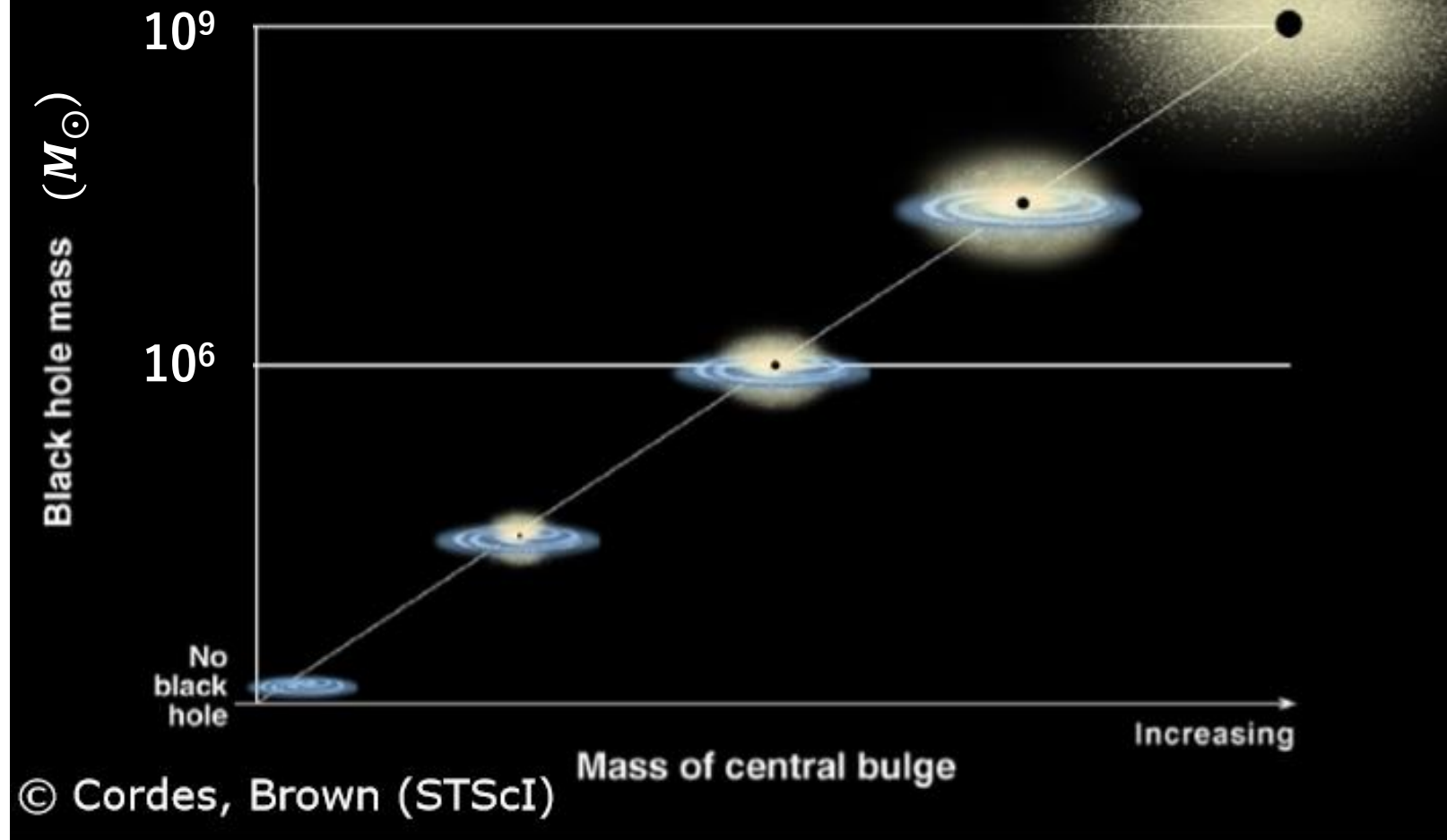
超臨界ブラックホール降着流における ライマンアルファ輝線の輻射力の計算

武者野 拓也（筑波大学 宇宙理論研究室 M2）

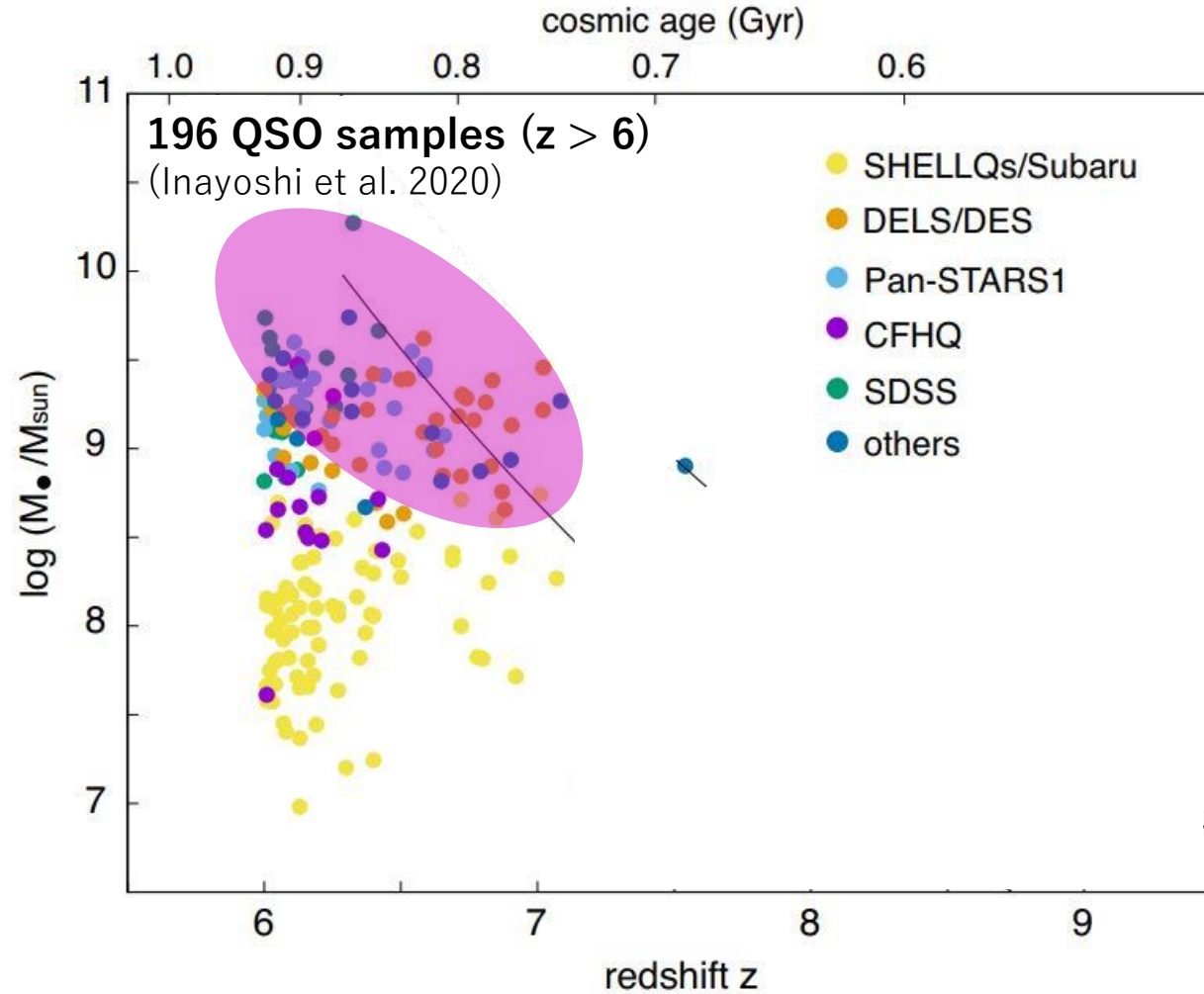
共同研究者 小川拓未、大須賀健、矢島秀伸（筑波大学）、大向一行（東北大学）

銀河中心の巨大ブラックホール(BH)

M_{\odot} :太陽質量 2



銀河中心に普遍的に存在する巨大BHは銀河との共進化を示唆している
⇒ **巨大BHがいつどこで生まれ、どのように成長したのか**を明らかにすることは
宇宙の歴史を理解するうえで極めて重要



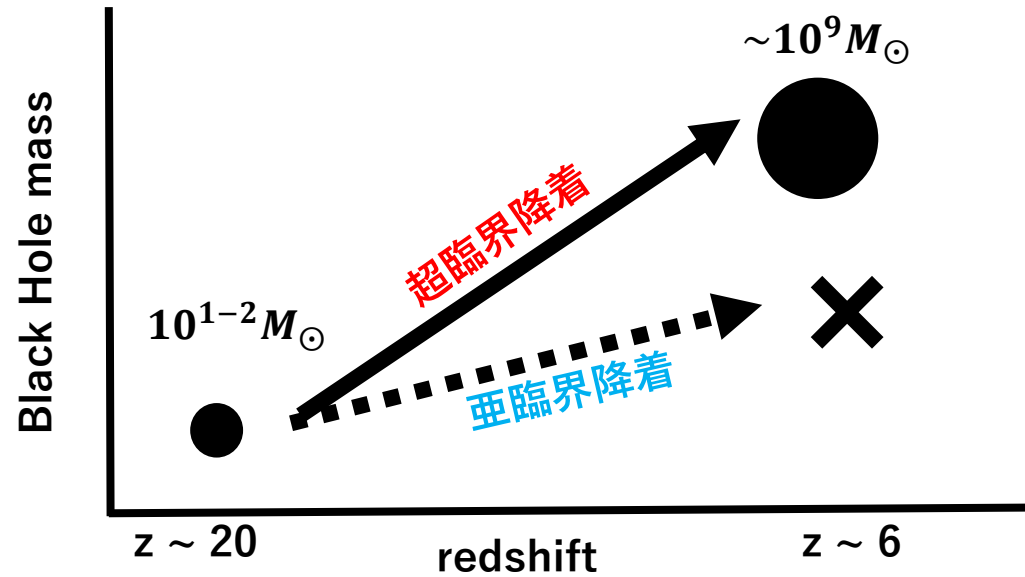
宇宙初期($z > 6$)に $10^9 M_{\odot}$ 程度の超巨大ブラックホールが存在
⇒ 形成シナリオに厳しい制約を与える

形成シナリオの1つの可能性：ガス降着による急成長

初代星由来の種BH ($M_{\text{BH}} \sim 10^{1-2} M_{\odot}$, $z \sim 20$)



周囲のガスを取り込み急成長



成長時間の問題

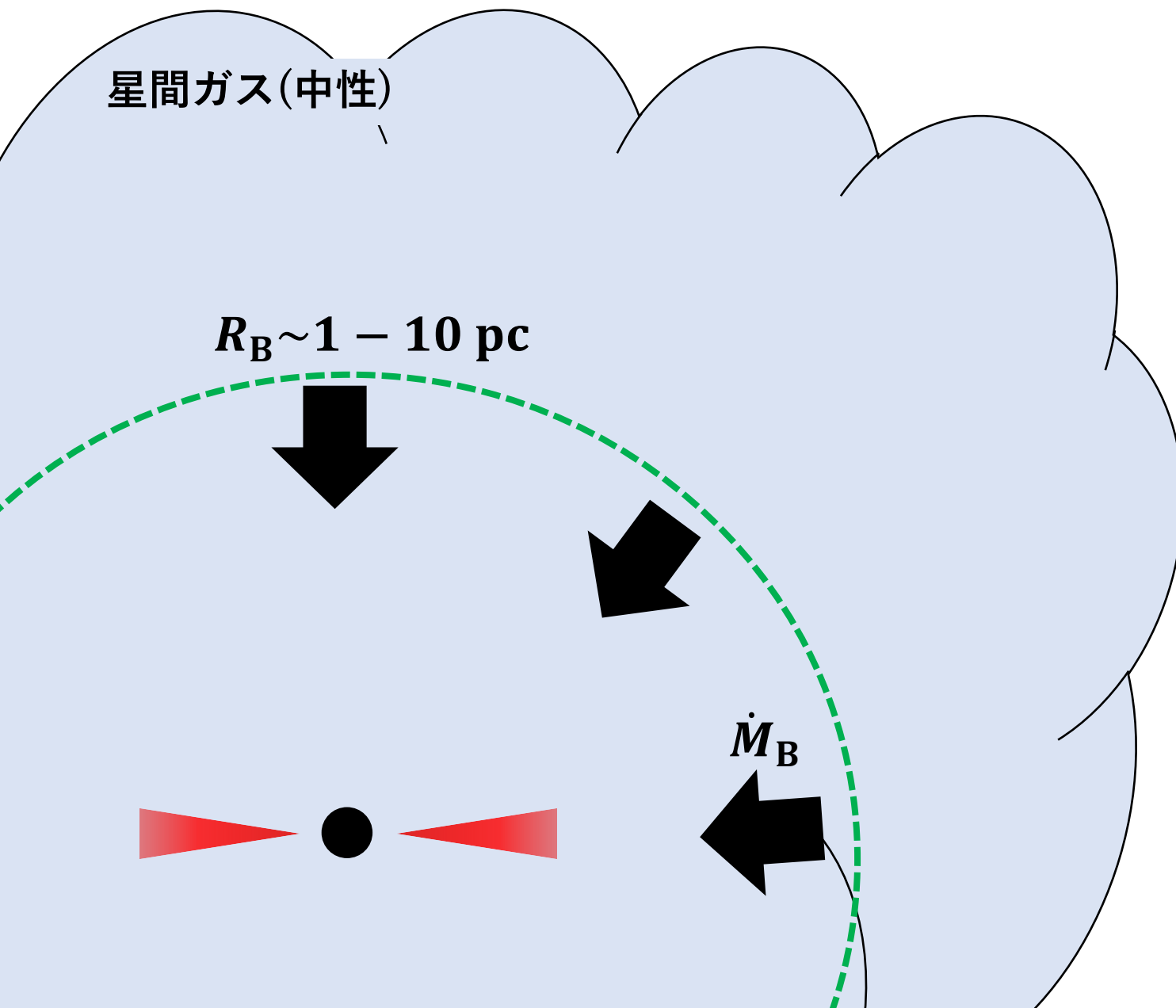
Eddington 降着では観測を説明できない



降着による超巨大ブラックホール成長には
超臨界降着が不可欠

※ $M_{\text{BH}} \sim 10^{3-4} M_{\odot}$ の超大質量星由来のBHを種とする説もある

輻射電離加熱によるガス降着の抑制



星間ガス(中性)

$R_B \sim 1 - 10 \text{ pc}$

\dot{M}_B

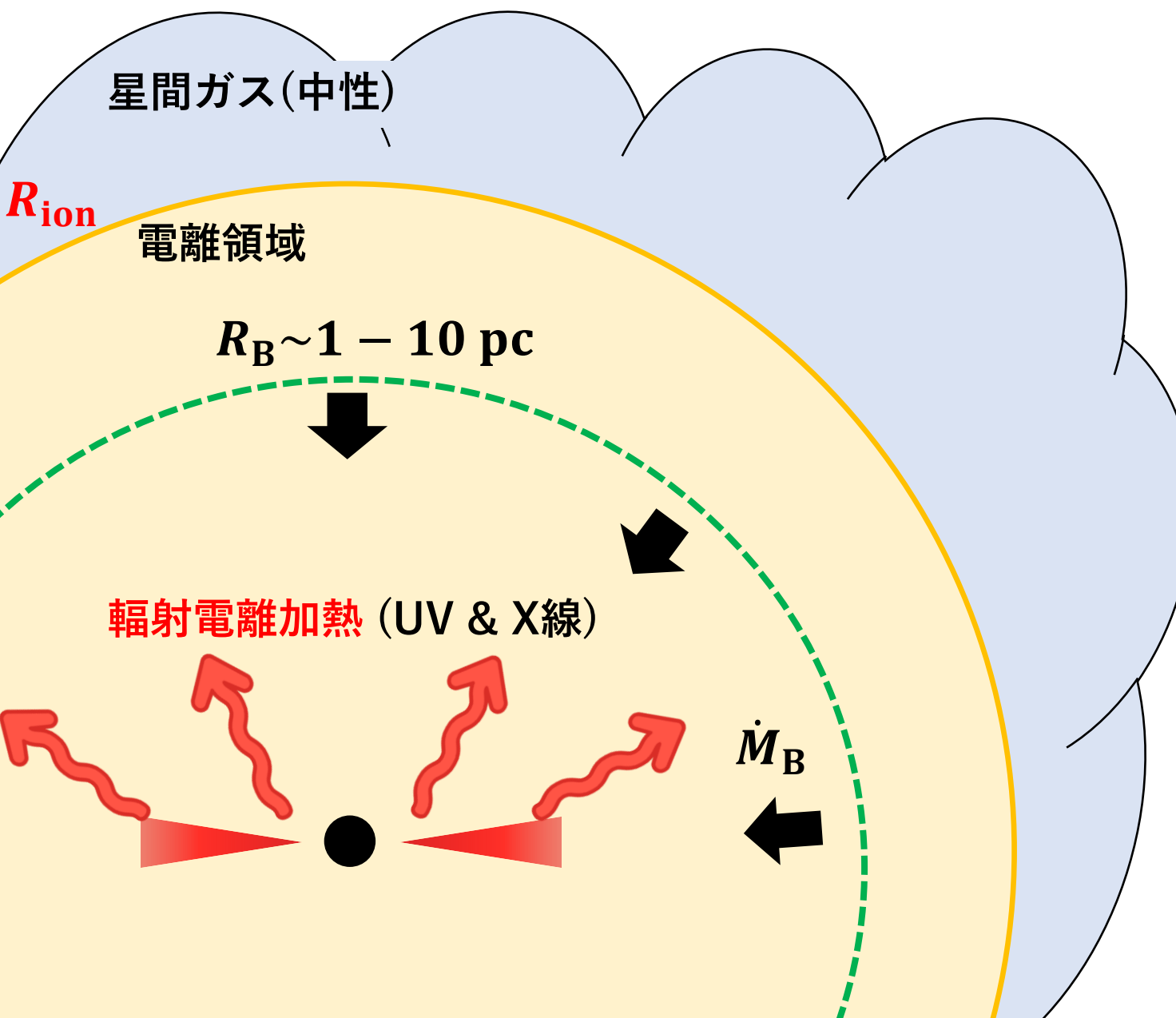
ハローの星間ガスが
降着円盤スケールに
供給される過程に注目
(低角運動量のため球対称を仮定)

R_B : Bondi 半径, \dot{M}_B : Bondi 降着率

R_{ion} : 電離領域の半径

n_∞ : 星間ガスの数密度, T_∞ : 星間ガスの温度

輻射電離加熱によるガス降着の抑制



ハローの星間ガスが
降着円盤スケールに
供給される過程に注目
(低角運動量のため球対称を仮定)

降着円盤からの輻射電離加熱が
星間ガスを温め**電離領域**を形成(T_∞ 上昇)



降着率低下

$$\dot{M}_B \propto M_{\text{BH}}^2 n_\infty T_\infty^{-3/2}$$

Milosavjevic et al. 2009

R_B : Bondi 半径, \dot{M}_B : Bondi 降着率

R_{ion} : 電離領域の半径

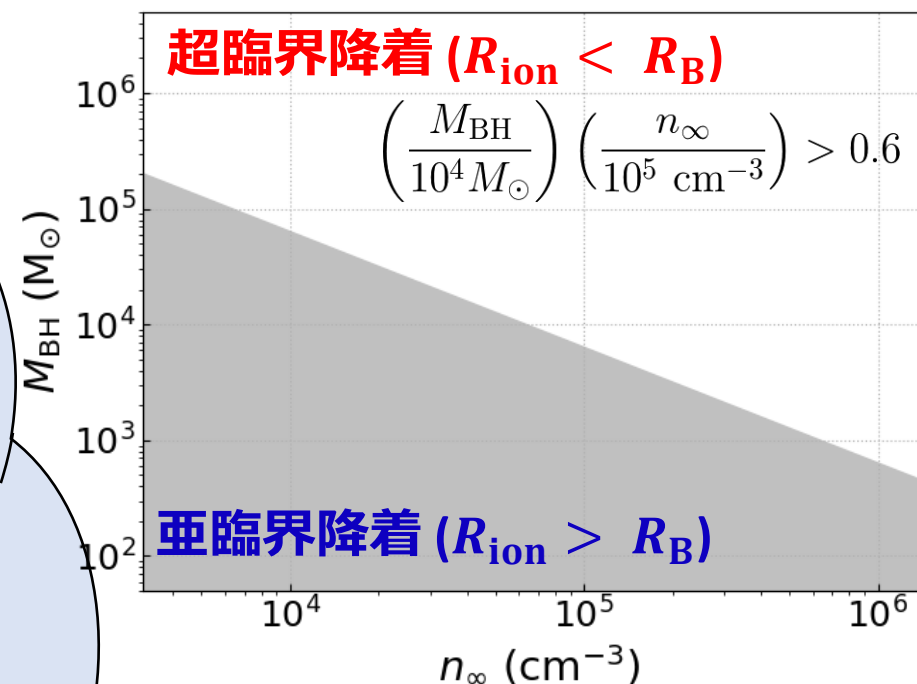
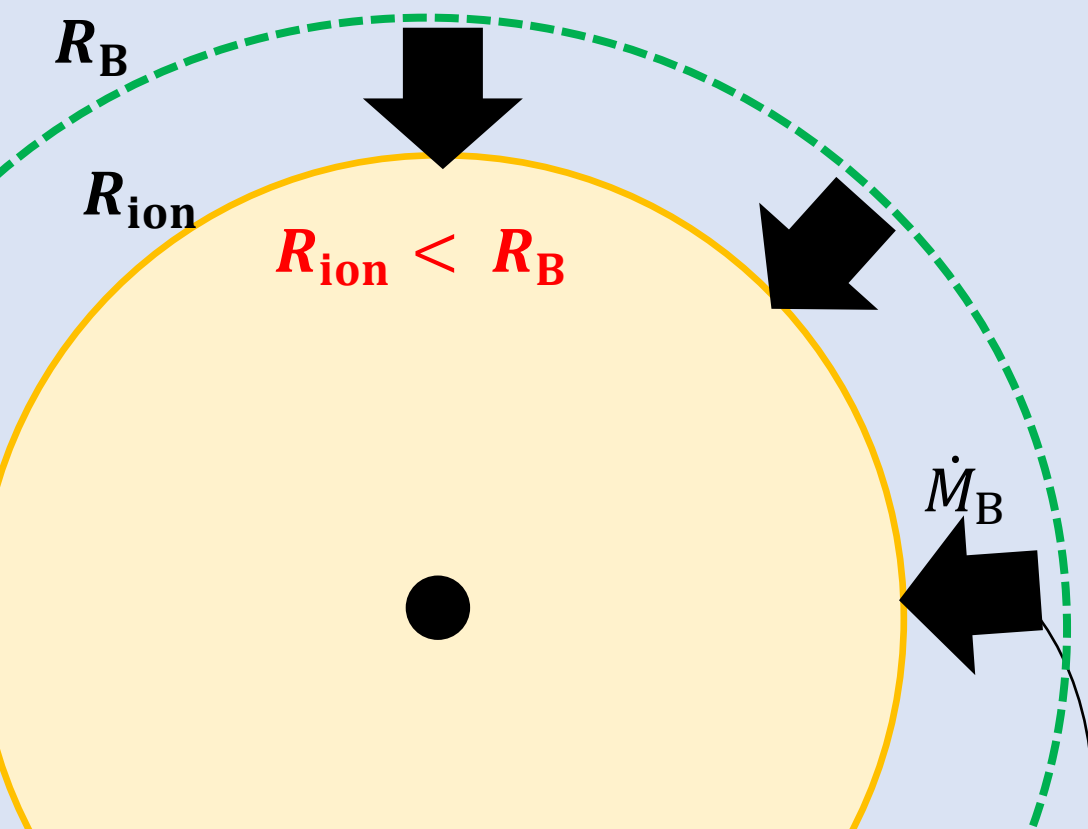
n_∞ : 星間ガスの数密度, T_∞ : 星間ガスの温度

高密度環境中の超臨界降着解 (Inayoshi, et. al. 2016, Sakurai, et al. 2016)

高密度環境 ($R_{\text{ion}} < R_B$) では
降着流の動圧が電離領域を押しつぶし
全系を中性化



超臨界降着(等温Bondi降着)が実現



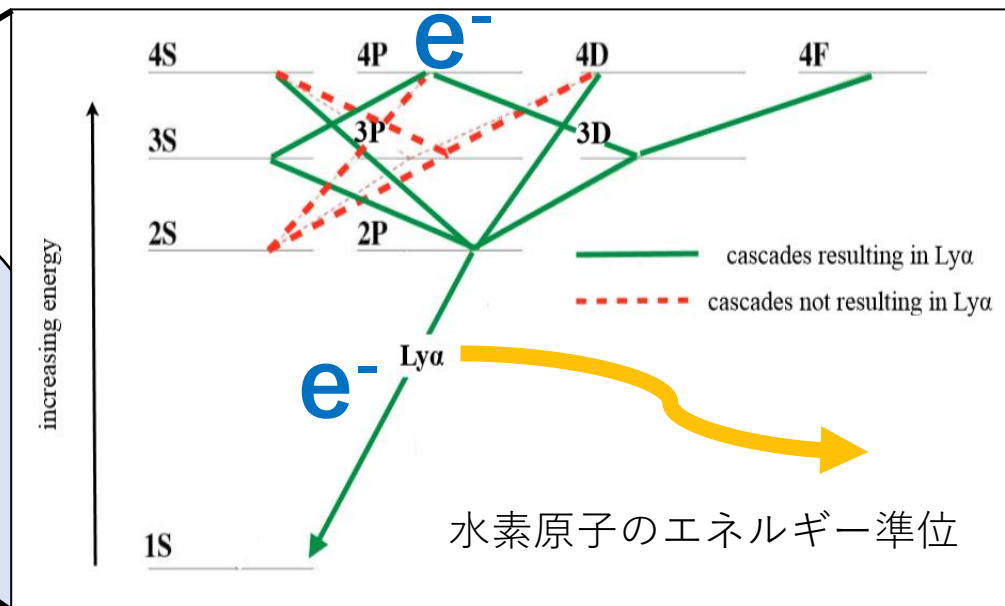
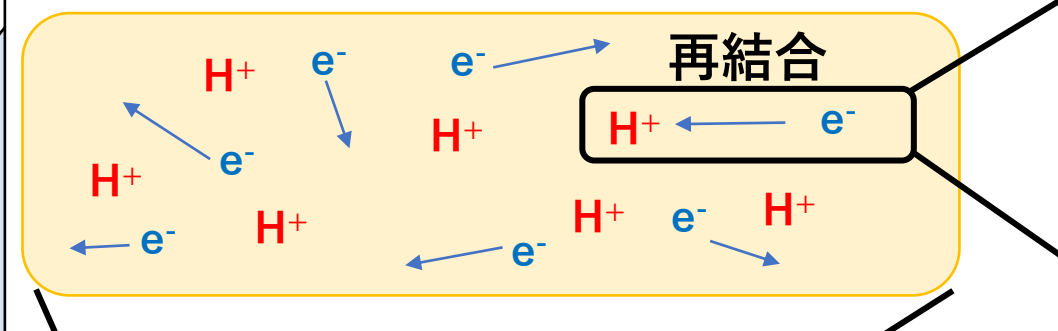
問題点

電離領域で生成される
Ly α 光子の強力な輻射力が
考慮されていない

Ly α 光子とは？(次ページ)

Ly α 光子の強力な輻射力が降着を阻害？

電離領域でLy α 光子が生成



励起状態の電子が基底状態に遷移する際に Ly α 光子が生成

多重散乱

Ly α 輻射力

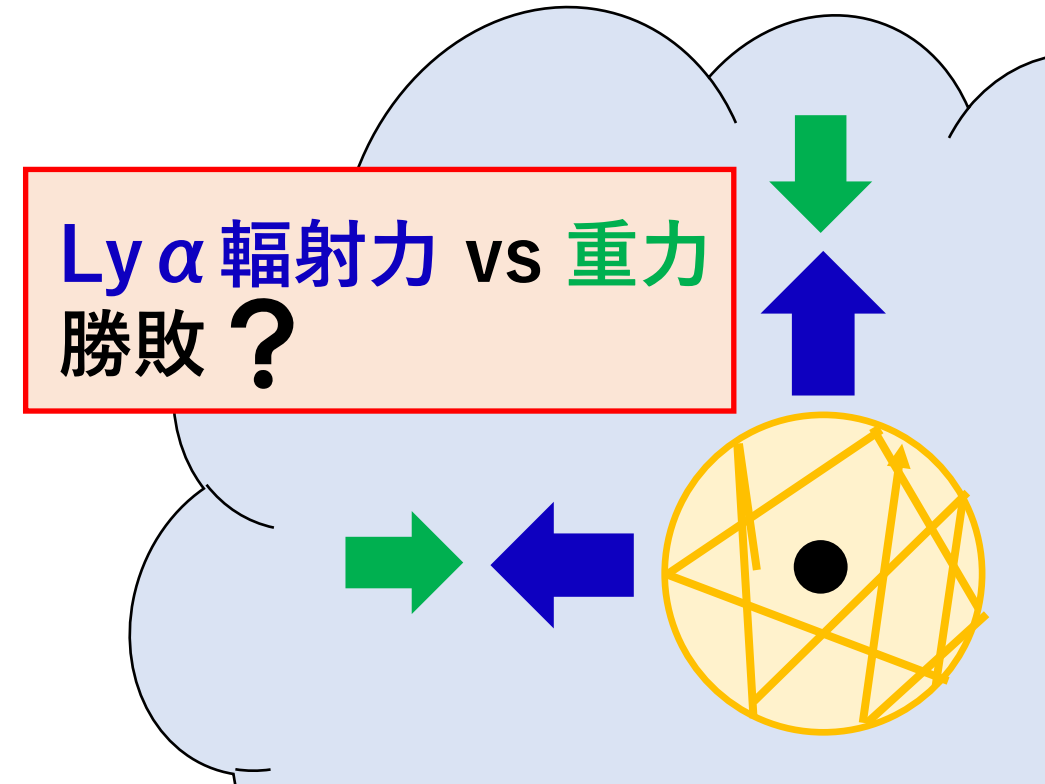
電離領域で生成されたLy α 光子の強力な輻射力が降着を妨げる可能性

これまでの研究

- ・ 超臨界降着は実現可能と思われるが、
Ly α 輻射力が考慮されていないために最終的な結論は不明
- ・ しかしBH降着流の流体計算との結合に適した
Ly α 輻射輸送計算コードは存在しない

本研究

- ・ Ly α 輻射流体計算の第一歩として、
**流体の速度場を考慮した
Ly α 輻射輸送計算コードを開発**
- ・ **球対称超臨界降着解の妥当性を評価：**
定常降着流中でLy α 輻射輸送を
解きLy α 輻射力と重力を比較



静的ガスに対する球対称ライン拡散方程式(Dijkstra et al. 2006)を**動的ガス**に拡張

$$\frac{\partial E_{x_0}}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{c}{3\kappa_{x_0}} \frac{\partial E_{x_0}}{\partial r} \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_0} \left(\kappa_{x_0} \frac{\partial E_{x_0}}{\partial x_0} \right) + 4\pi\eta_{x_0}$$

静的ガスの場合と同じ

$$- \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 E_{x_0} v) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v) \frac{1}{3} E_{x_0} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v) \frac{\partial}{\partial x_0} \left[\left(\frac{c}{v_{\text{th}}} + x_0 \right) \frac{1}{3} E_{x_0} \right]$$

動的ガス効果

0付き文字：流体静止系での量

※Ly α 輻射力評価時には定常輻射場を使用

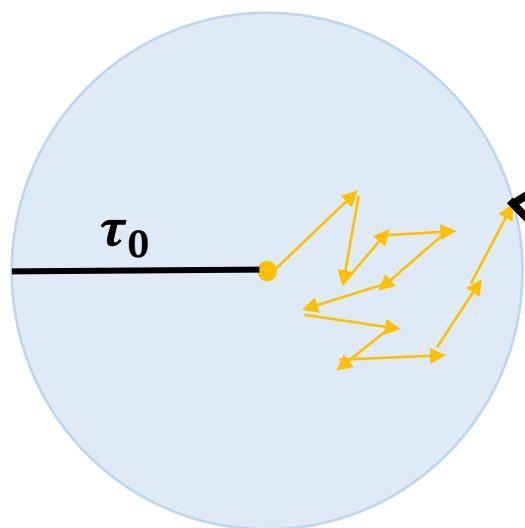
使っている近似

- ・ 流体静止系における Eddington 近似 ($P_{x_0} = E_{x_0}/3$)
- ・ Fokker-Planck 近似 (散乱前後の振動数変化が小さい)
- ・ 亜相対論近似 (v/c の 2 次以上の項を無視)

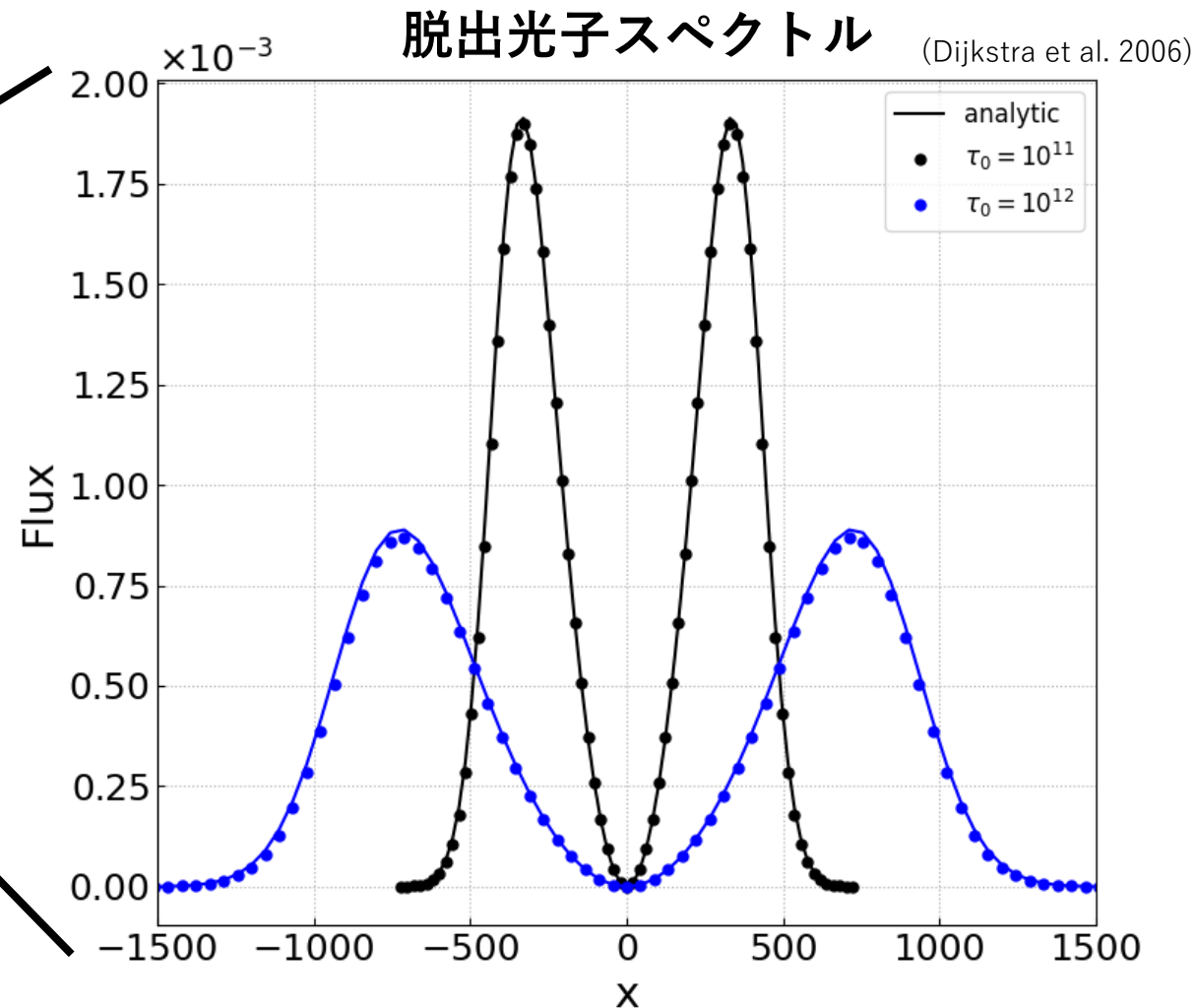
E_x ：振動数依存輻射エネルギー密度
 $x = (v - v_\alpha)/\Delta v_\alpha$ (無次元化した振動数)
 $v_\alpha = 2.47 \times 10^{15}$ Hz (Ly α 振動数)
 $\Delta v_\alpha = v_\alpha (v_{\text{th}}/c)$
 c ：光速
 v_{th} ：流体の熱速度
 v ：流体の速度
 $\kappa_x = \sigma_0 \phi(x) n(r)$ (散乱係数)
 ϕ ：Voigt profile
(Smith et al. 2015 のフィッティング式を使用)
 σ_0 ：Ly α ライン中心に対する
中性水素ガスの散乱断面積
 n ：水素数密度
 η ：放射率
 L_{Edd} ：トムソン散乱に対する Eddington 光度

静的一様ガスのテスト計算

ライン中心に対する光学的厚み $\tau_0 = 10^{11}$, 10^{12}



計算結果と解析解はよく一致

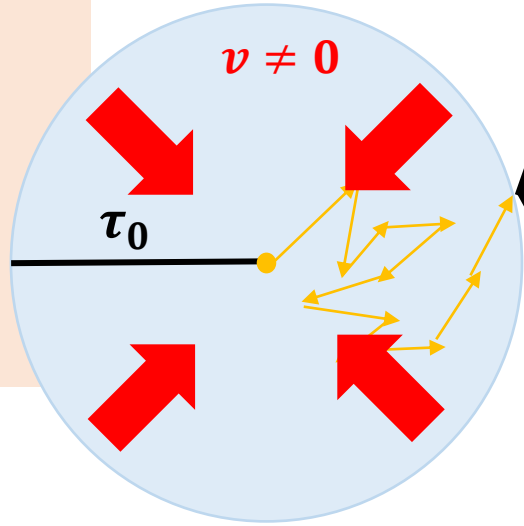


速度場効果

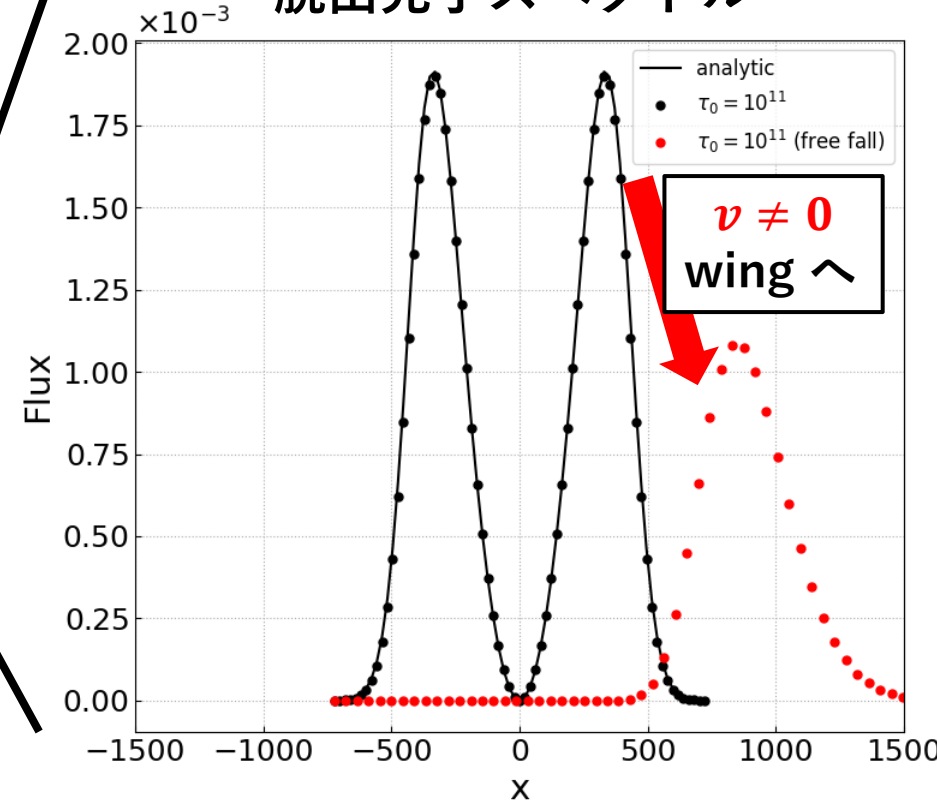
速度場：超音速インフローを仮定

$$v(r) = 30v_{\text{th}} \left(\frac{r}{R_{\text{min}}} \right)^{-0.5}, \quad n(r) \propto \left(\frac{r}{R_{\text{min}}} \right)^{-1.5}$$

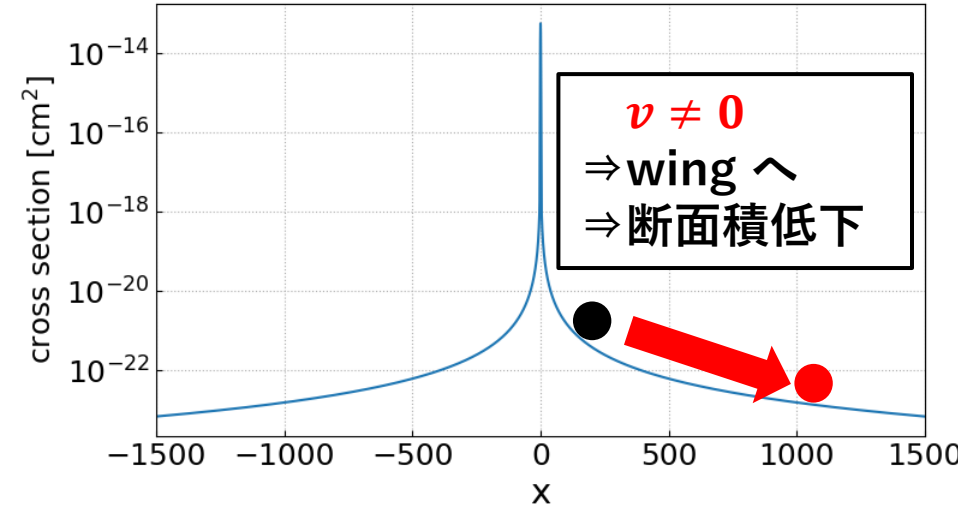
振動数が wing に遷移
(\because ドップラー効果)
 \Rightarrow 散乱断面積が低下
 \Rightarrow 輻射力の増幅は非効率に



脱出光子スペクトル



- 流体の**速度場**は輻射力を低下させる働きを持つ
- 定量的な評価には**シミュレーションが必須**
(\because 速度場入りの解析解は無い)



超臨界降着流中のLy α 輻射力評価

超臨界降着流中のLy α 輻射力評価の計算条件

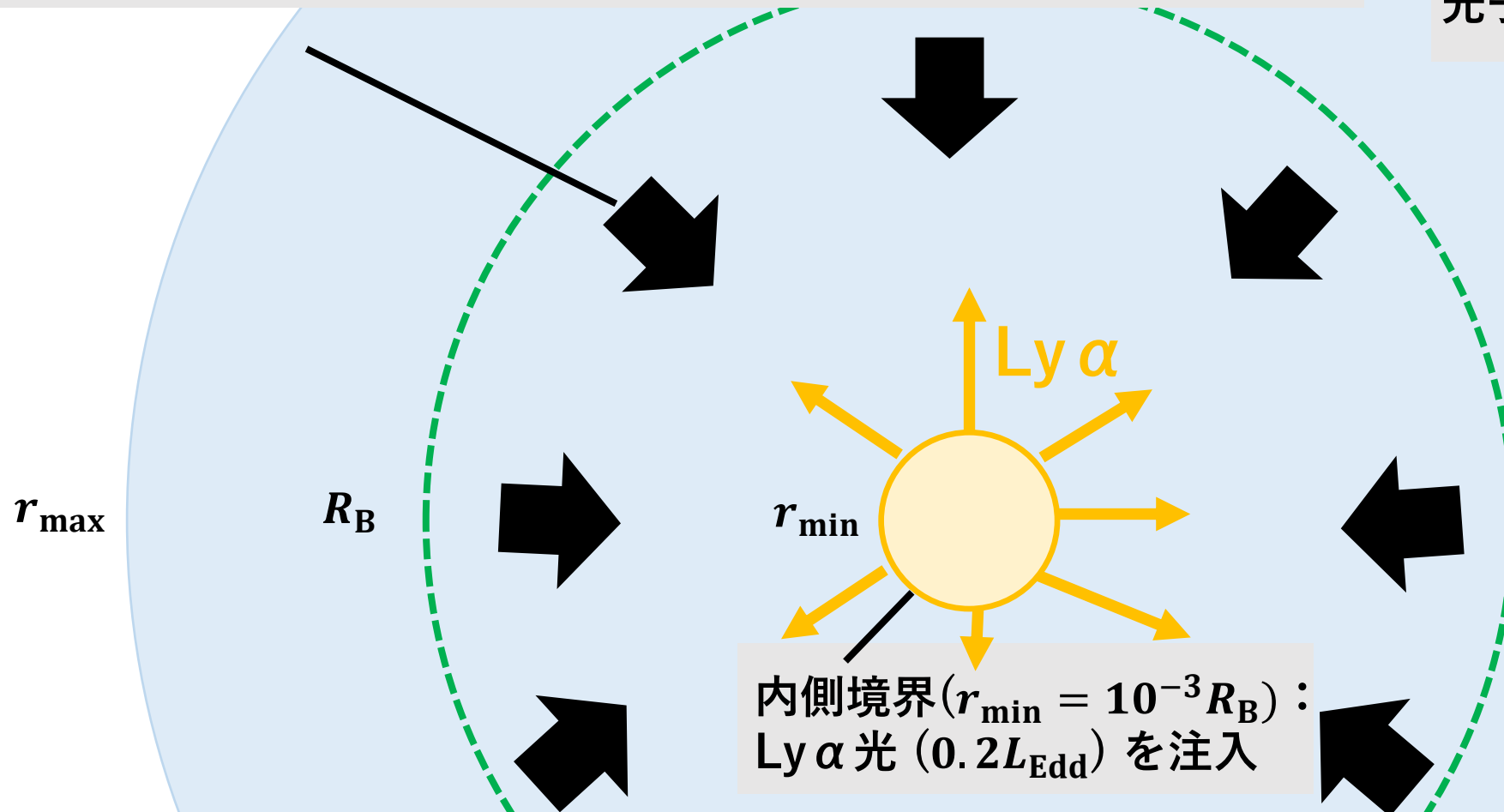
14

計算領域(中性水素ガス)：

$$r_{\min}(=10^{-3}R_B) < r < r_{\max}(=10R_B)$$

流体場：超臨界降着流 ($T=10^4$ K の等温 Bondi 降着流) を仮定；
($M_{\text{BH}}, n_{\infty}$) をパラメータとして15モデル計算

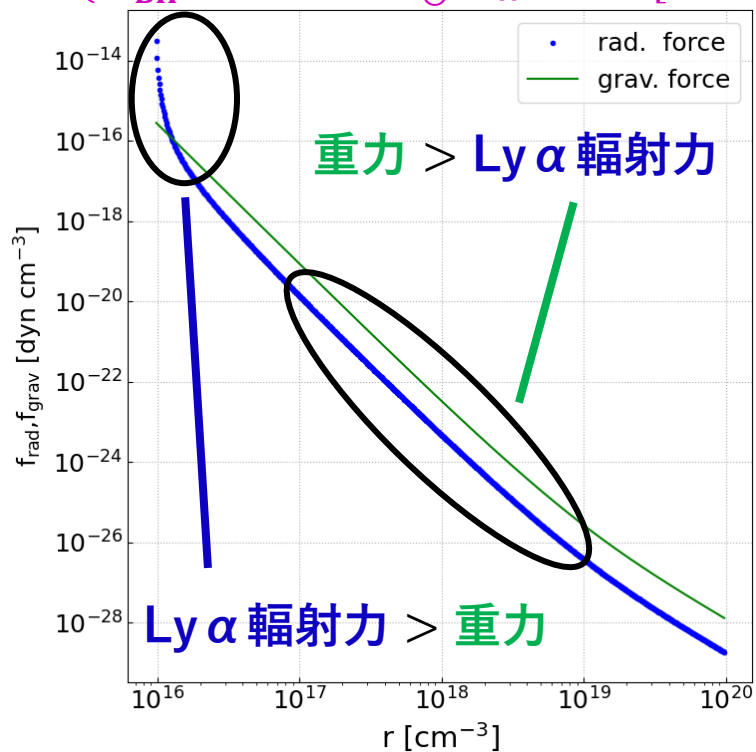
外側境界($r_{\max}=10R_B$)：
光子の流出は自由 (注入は無し)



内側境界($r_{\min}=10^{-3}R_B$)：
Ly α 光 ($0.2L_{\text{Edd}}$) を注入

結果：Ly α 輻射力

$(M_{\text{BH}} = 5 \times 10^4 M_{\odot}, n_{\infty} = 10^5 [\text{cm}^{-3}])$



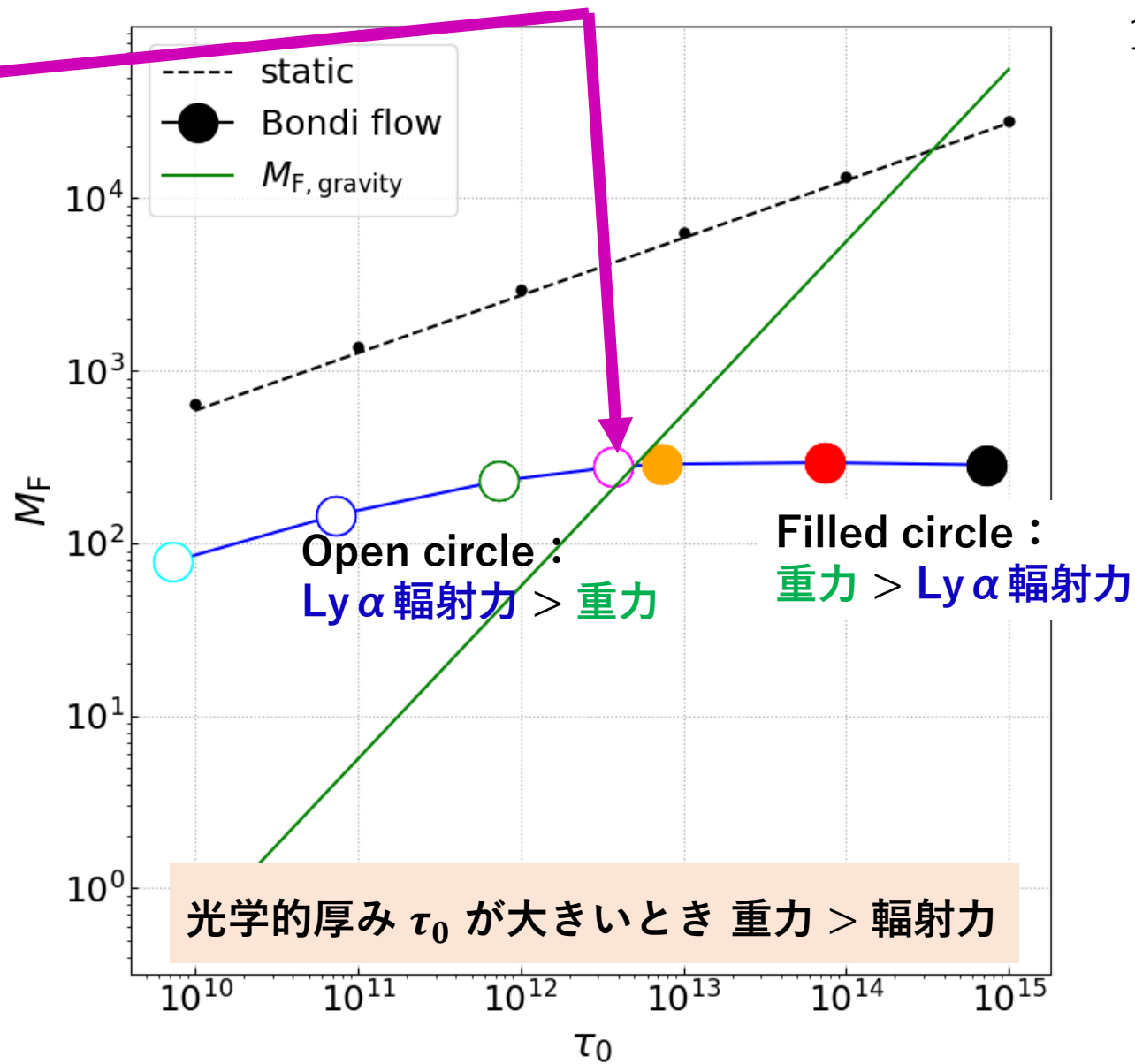
Force Multiplier M_{F}

$$\frac{L_{\text{Ly}\alpha}}{c} M_{\text{F}} := \int f_{\text{rad}}(r) dV$$

$$\frac{L_{\text{Ly}\alpha}}{c} M_{\text{F,grav}} := \int f_{\text{grav}}(r) dV$$

$L_{\text{Ly}\alpha}$: Ly α 光度

f_{rad} : 単位体積当たりのLy α 輻射力, f_{grav} : 単位体積当たりの重力



$$\tau_0 \approx 7 \times 10^{11} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^4 M_{\odot}} \right) \left(\frac{n_{\infty}}{10^5 \text{ cm}^{-3}} \right)$$

結果：Ly α 輻射力は超臨界降着を抑制するか？

本研究

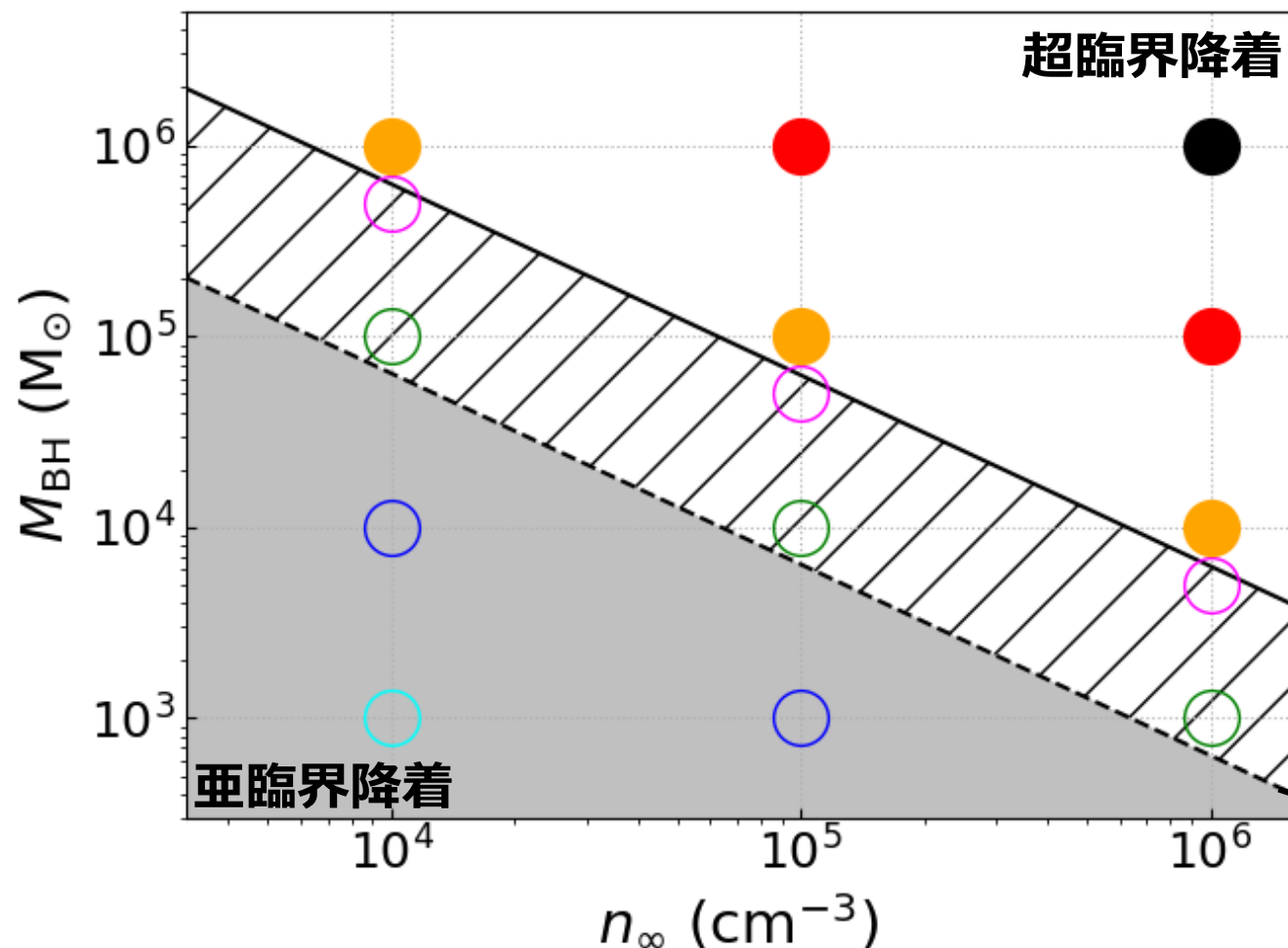
Filled circle : 重力 > Ly α 輻射力

Open circle : Ly α 輻射力 > 重力

先行研究(Inayoshi, et al. 2016, Sakurai, et al. 2016)

白領域：超臨界降着可能

影領域：亜臨界降着



従来の研究で超臨界降着が実現可能とされている領域でありながら、Ly α 輻射力が重力を上回る領域

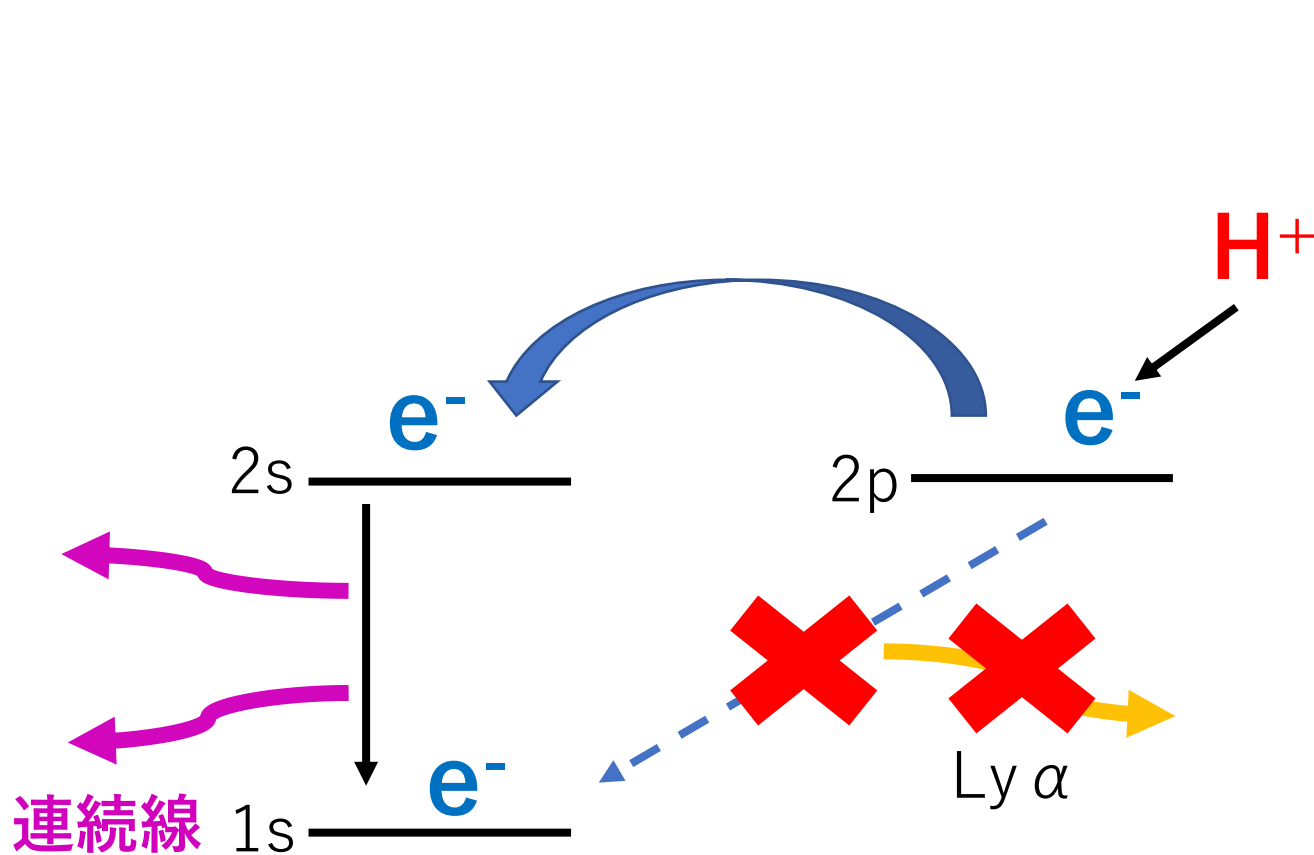
$$0.6 < \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^4 M_{\odot}} \right) \left(\frac{n_{\infty}}{10^5 \text{ cm}^{-3}} \right) < 6$$

Ly α 輻射力が降着率を抑制する可能性があるため、今後Ly α 輻射力入りの流体計算を用いた詳細な研究が必要

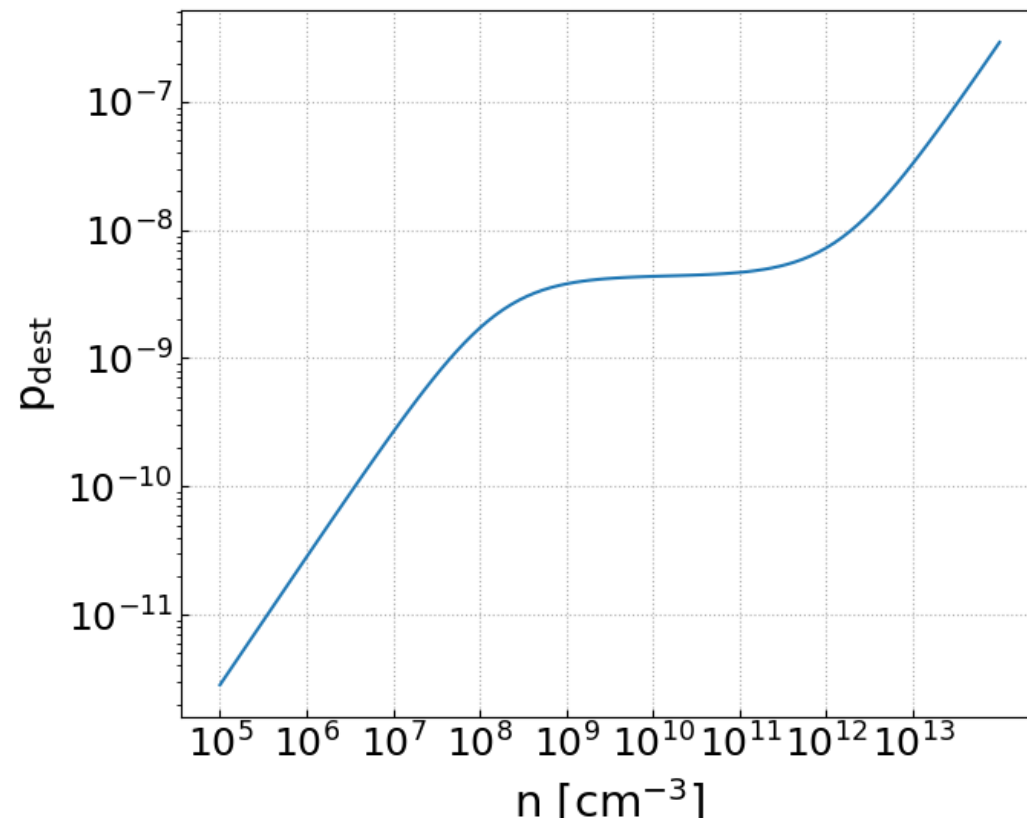
以上のLy α 輻射輸送計算で考慮していなかった、
2光子放射による**Ly α 輻射力の減衰効果**について

2 光子放射によるLy α 光子の破壊効果の影響

18



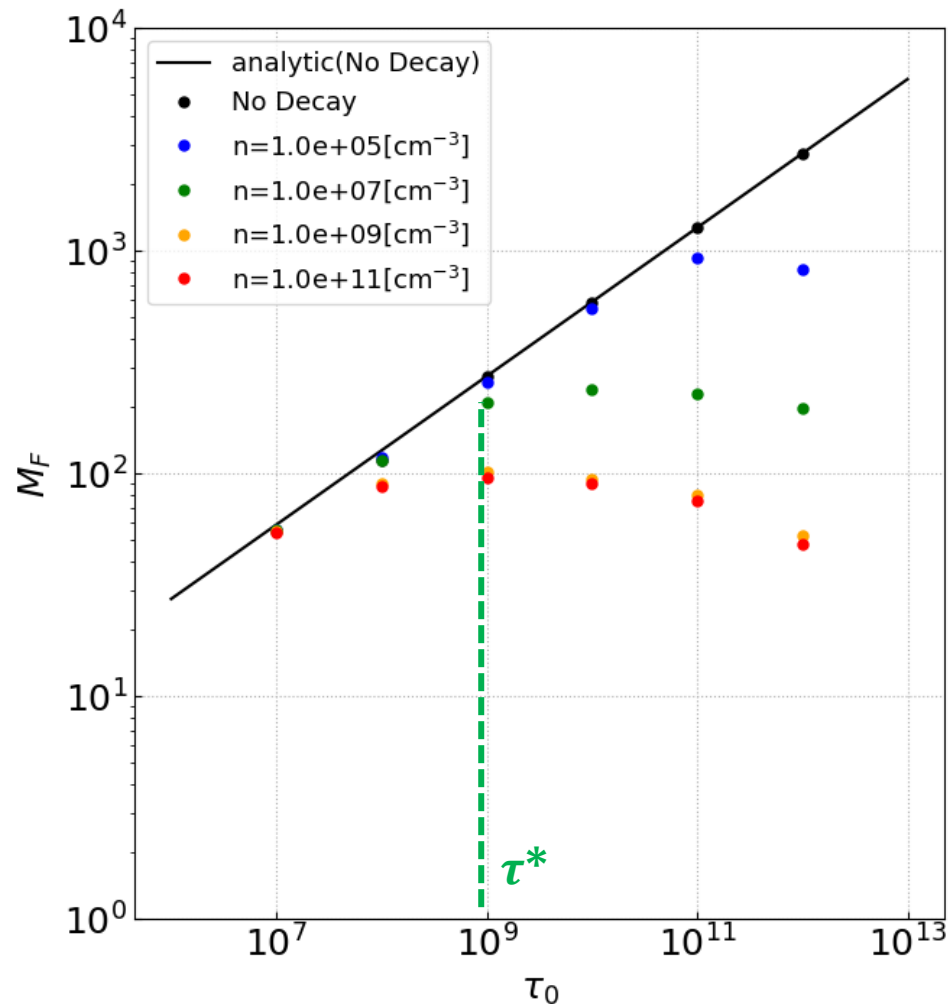
p_{dest} : 散乱一回当たりのLy α 破壊確率
 n : 中性水素数密度 (電離度 10^{-4} を仮定)



2p軌道にいる電子が低確率でイオンと相互作用して2s軌道に遷移
⇒ 1s軌道への遷移時に連続線 (禁制線) を放射
⇒ **1回の散乱当たりにある確率 p_{dest} でLy α 光子が破壊される**

2 光子放射によるLy α 光子の破壊効果の影響

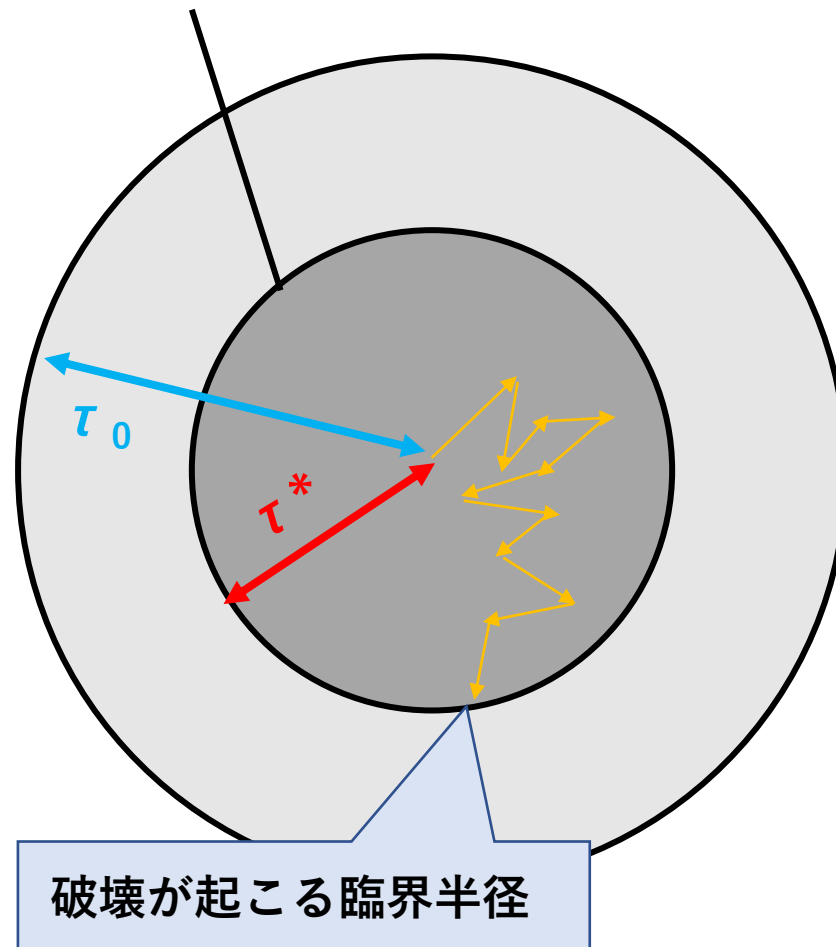
静的一様ガスの場合における
2光子破壊の輻射力への影響



* 電離度 10^{-4} を仮定

τ_0 : ライン中心に対する系の光学的厚み

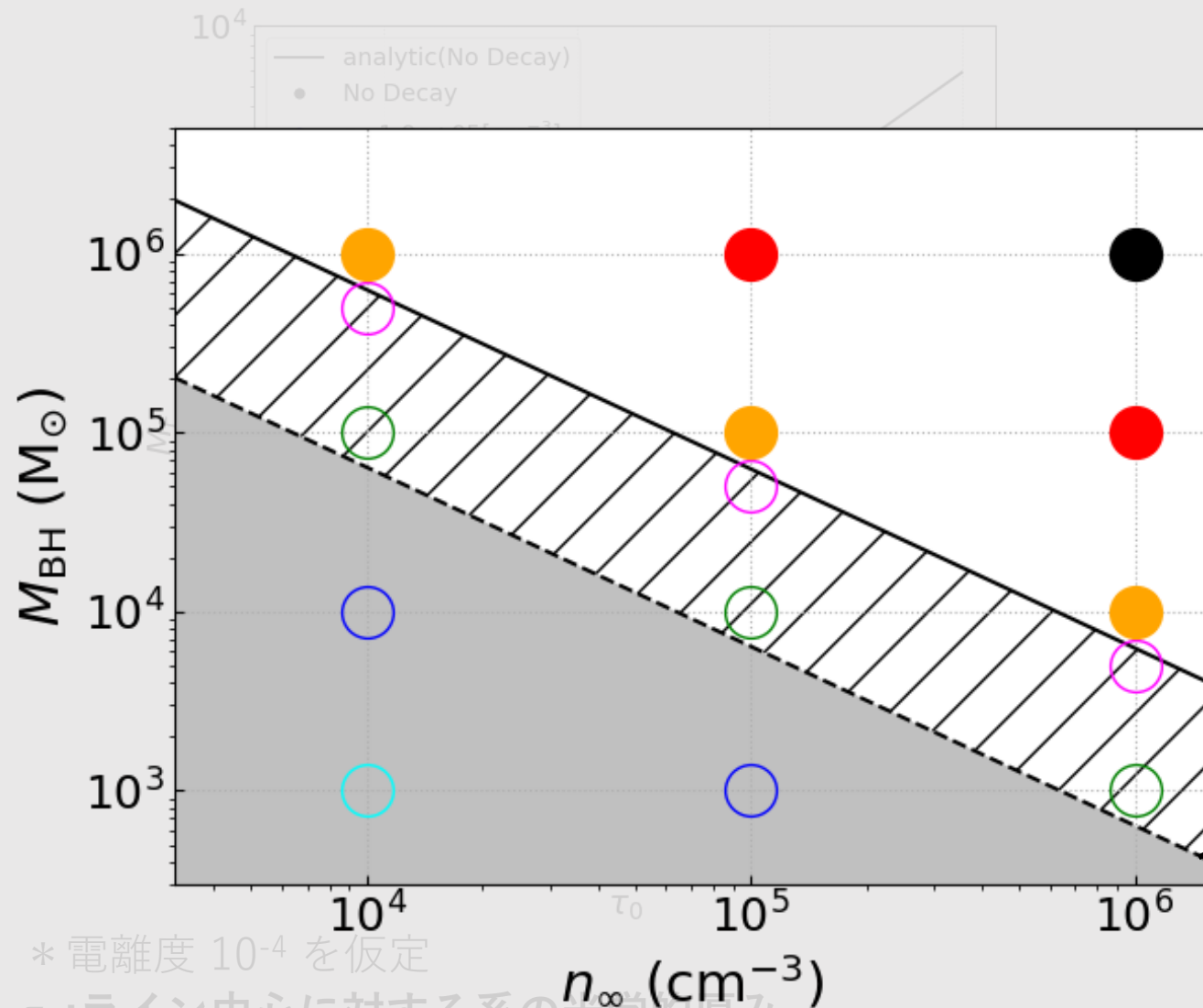
ある τ^* までほぼ全ての光子が破壊される
 $= \tau^*$ より内側で輻射力の増幅 M_F が決まる
 $\Rightarrow \tau_0 = \tau^*$ で輻射力の増幅は打ち止め



2光子放射によるLy α 光子の破壊効果の影響

20

静的一様ガスの場合における
2光子破壊の輻射力への影響



* 電離度 10^{-4} を仮定

τ_0 : ライン中心に対する系の光学的厚み

ある τ^* まではほぼ全ての光子が破壊される
= τ^* より内側で輻射力の増幅 M_F が決まる
 $\Rightarrow \tau_0 = \tau^*$ で輻射力の増幅は打ち止め

2光子放射による
Ly α 輻射力の減衰によって
超臨界降着が実現する
可能性 (計算中)

破壊が起こる臨界半径

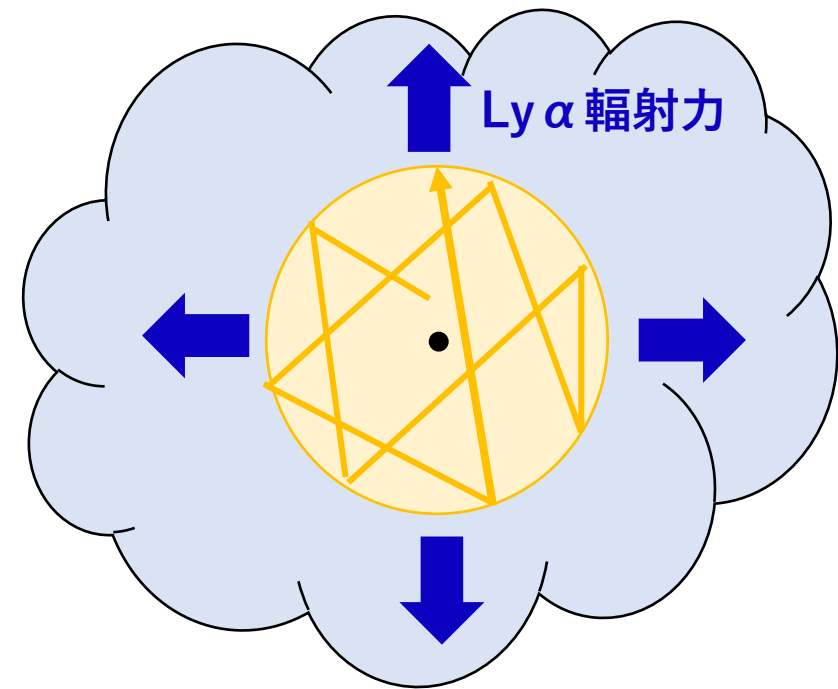
まとめ

- ・宇宙初期のブラックホールの超臨界降着への $\text{Ly}\alpha$ 輻射力の影響を評価するために、速度場の影響を考慮した $\text{Ly}\alpha$ 輝線輻射輸送コードを開発した。
- ・先行研究で示されている球対称超臨界降着流での $\text{Ly}\alpha$ 輻射力を評価した結果、超臨界降着が実現可能とされていながらも、 $\text{Ly}\alpha$ 輻射力が重力を上回る条件があることがわかった。

$$0.6 < \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^4 M_{\odot}} \right) \left(\frac{n_{\infty}}{10^5 \text{ cm}^{-3}} \right) < 6$$

この結果、超臨界降着が実現しにくくなる可能性がある。

(2光子放射による $\text{Ly}\alpha$ 輻射力の減衰が有効に働き、上記の条件は緩和される可能性がある。)



future work

- ・ $\text{Ly}\alpha$ 輻射力を考慮した流体計算を行い、最終的に得られる降着率を明らかにする。
- ・ 多次元化効果を考慮するために $\text{Ly}\alpha$ 輻射輸送コードを拡張する。

