

Super-Eddington天体に対する dusty-gas中のHoyle-Lyttleton降着

尾形絵梨花 (筑波大学)

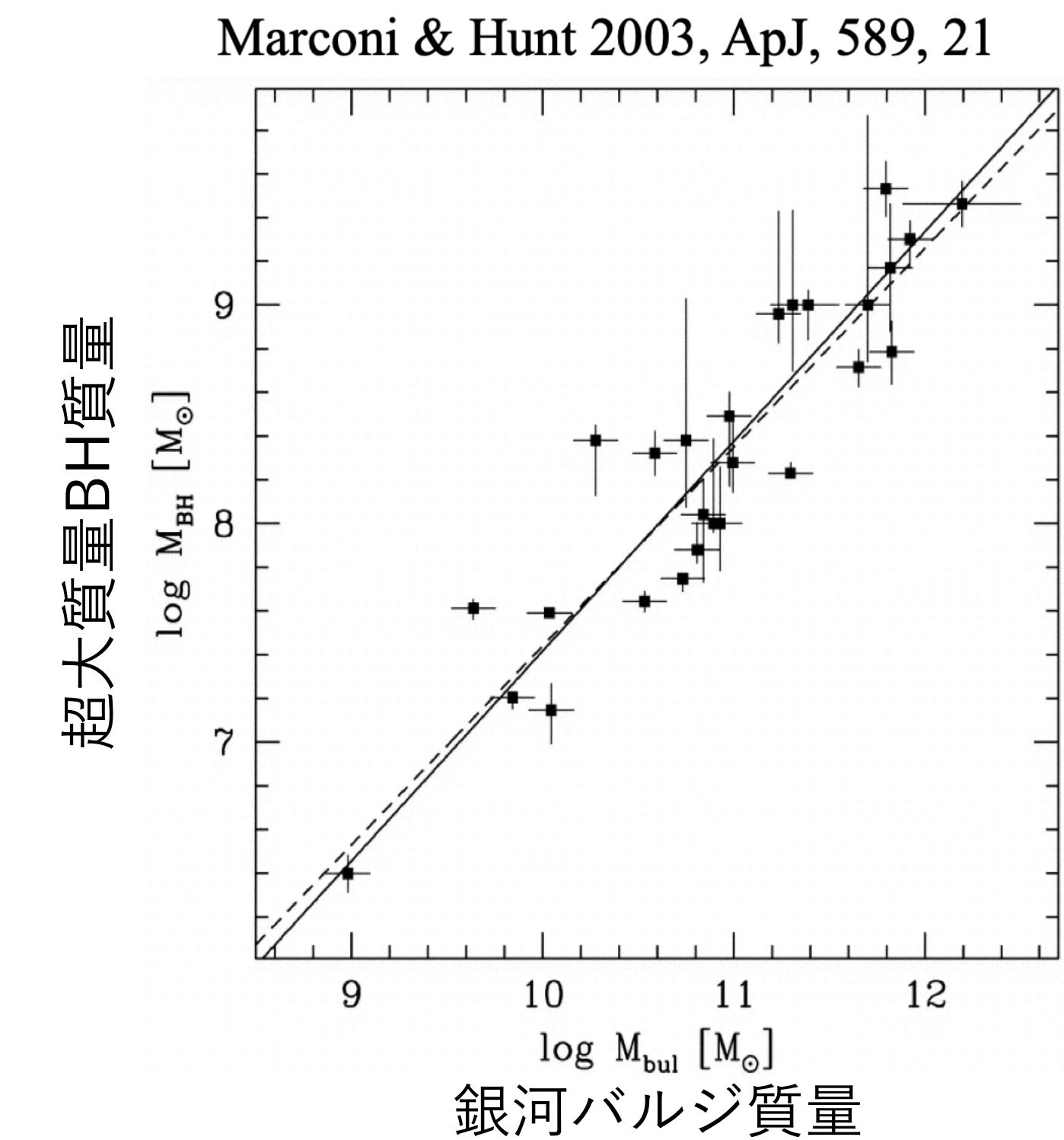
共同研究者：大須賀健 矢島秀伸 福島肇 (筑波大学)

- 超大質量BHと銀河バルジの質量に相関関係があることが観測で分かっている。

$$\frac{\text{超大質量BH質量}}{\text{銀河バルジ質量}} \times 100 \sim 0.1\%$$

>>銀河形成を知る上でも超大質量BH形成過程を理解することは重要である。

しかし、超大質量BHの形成過程は解明されていない。

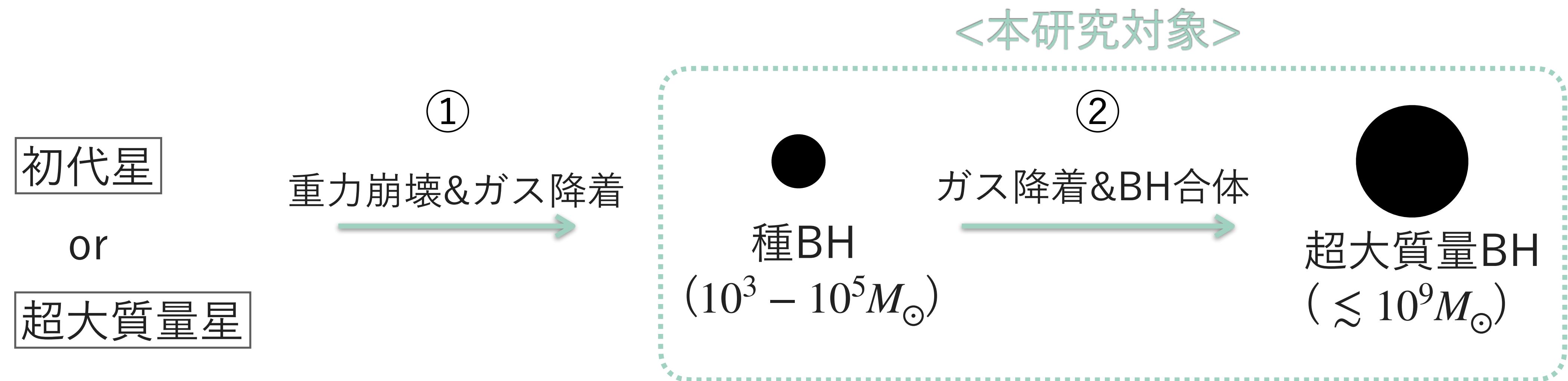


- 超大質量BH ($\sim 10^9 M_\odot$) が遠方宇宙 ($z \gtrsim 6$) に存在することが観測で分かっている。

>>超大質量BHの形成過程に関して、観測結果から形成時間の制約というヒントを得ている。この条件を満たすモデルの構築が必要。

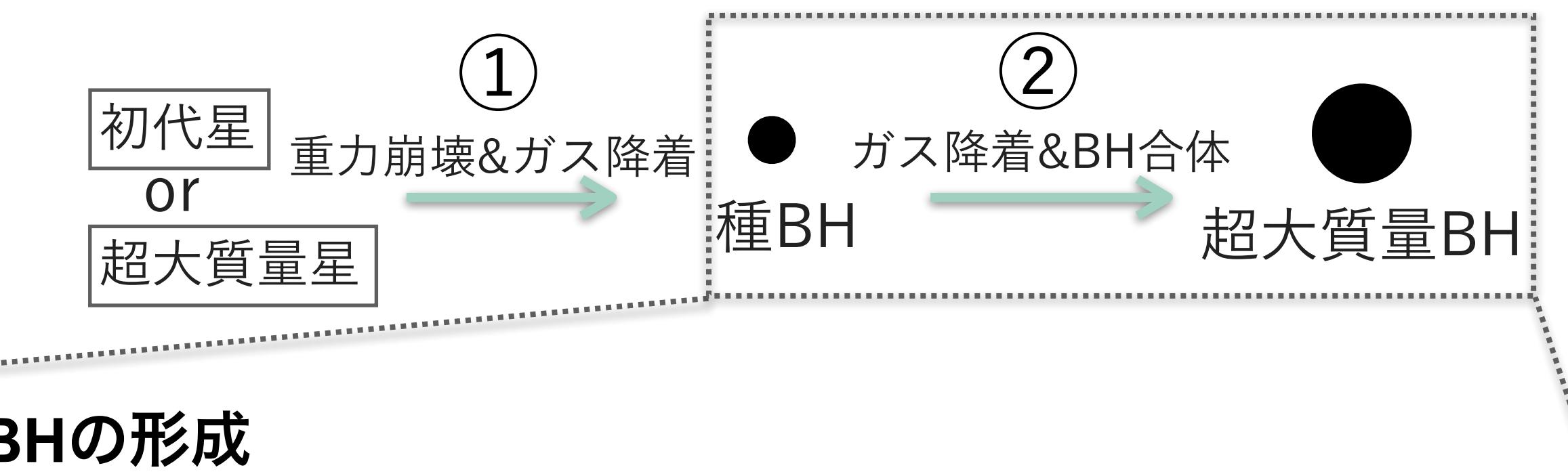
■ 超大質量BH形成の有力モデルは理論的に提唱されており、

①種BH($10^3 - 10^5 M_{\odot}$)の形成 ②種BHから超大質量BHへの成長、の2stepで考えられている。

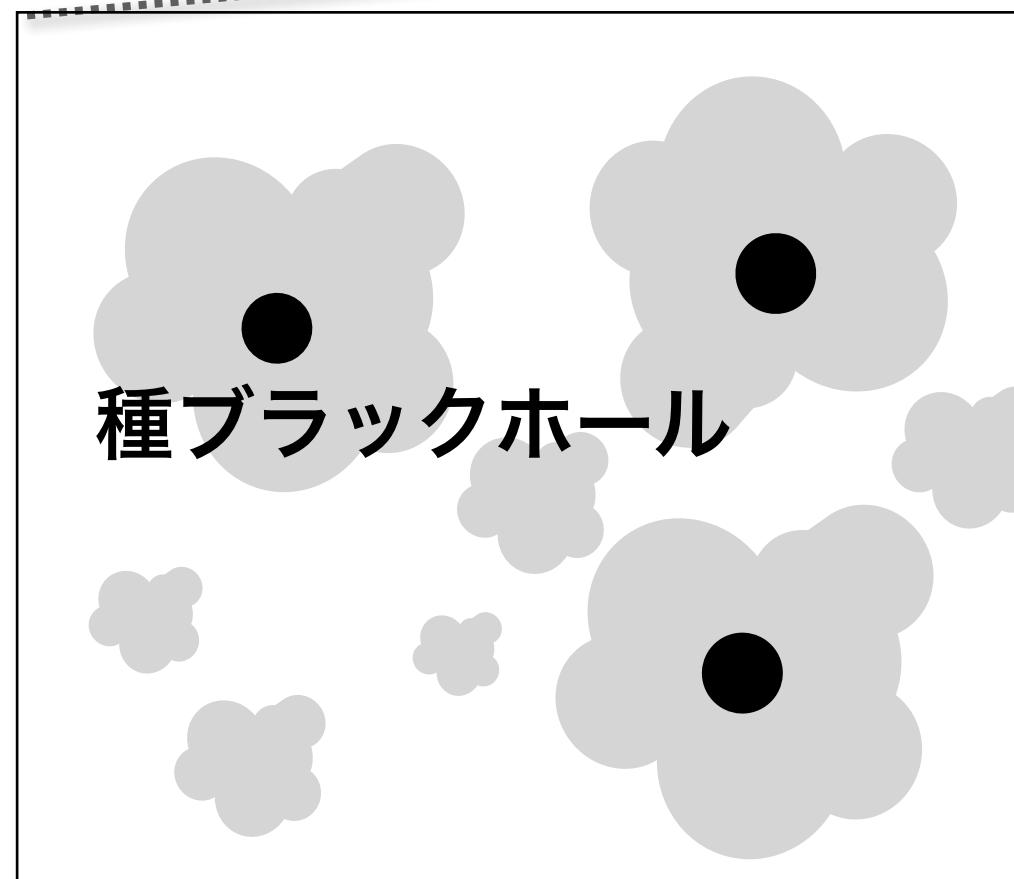


>>本研究は、超大質量BH形成過程の一部を解明することを目標に、②のガス降着過程に着目する。

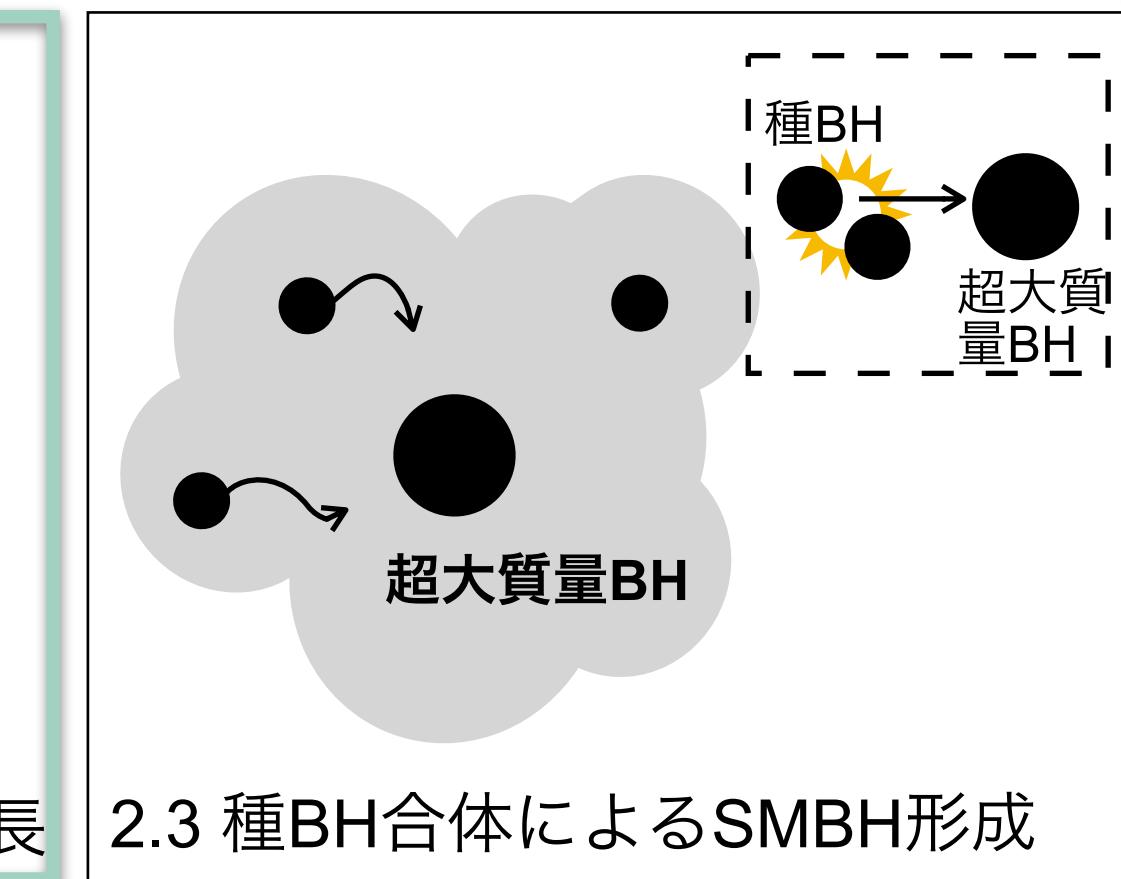
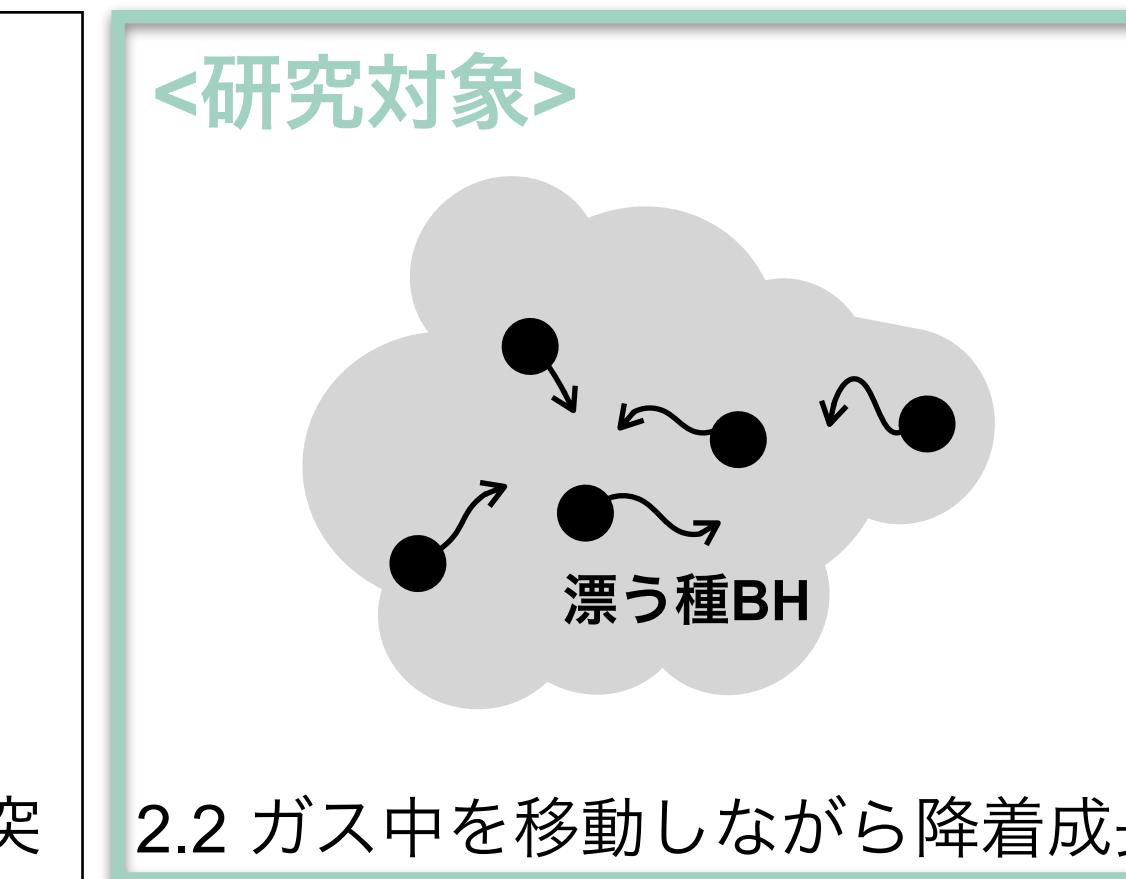
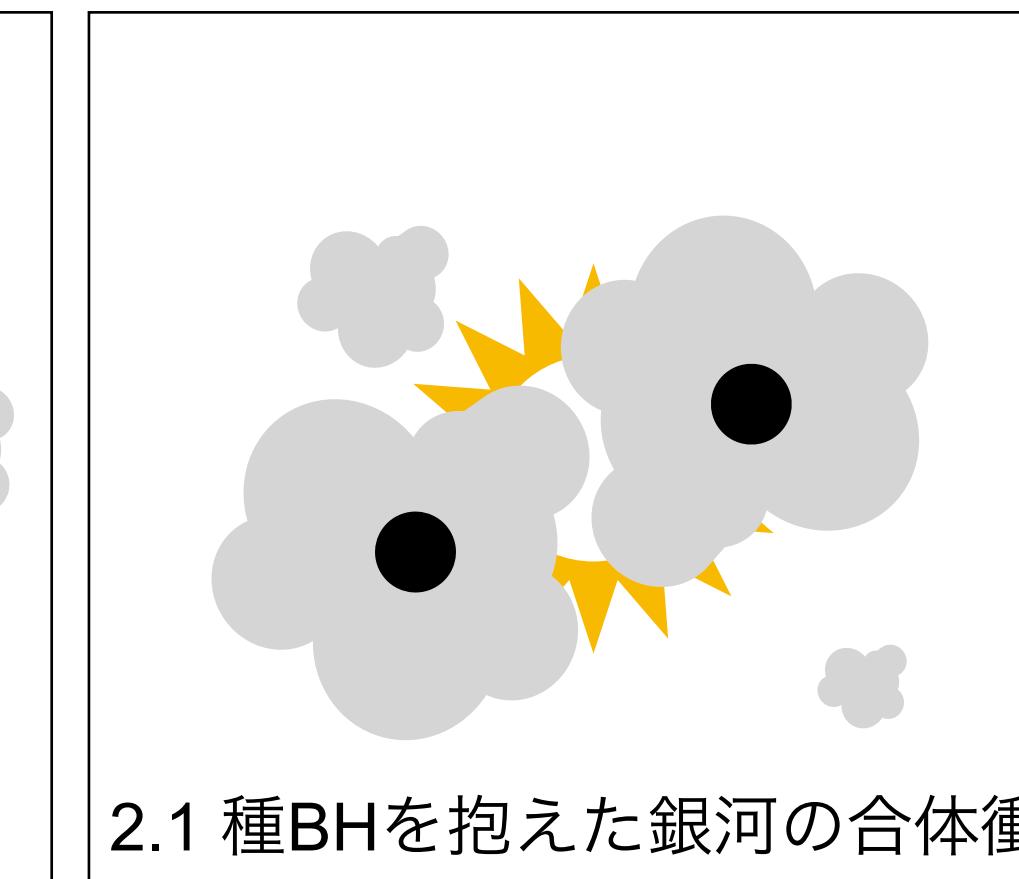
■ 種BHから超大質量BHへの成長過程(②)では、種BHを抱えた銀河が合体し種BHが残骸銀河の中で漂うことが予想されている。



(1)種BHの誕生



(2)種BHから超大質量BHの形成



>> 残骸銀河の中を漂う種BHが、ガス降着によってどの程度の質量成長率を持ち、最終的に超大質量BHまで成長可能かどうかは明らかになっていない。

INTRODUCTION

■ 漂う重力源のガス降着過程を初めて解析的に調べたのは、Hoyle&Lyttleton(1939)。

Hoyle & Lyttleton (1939)

降着半径

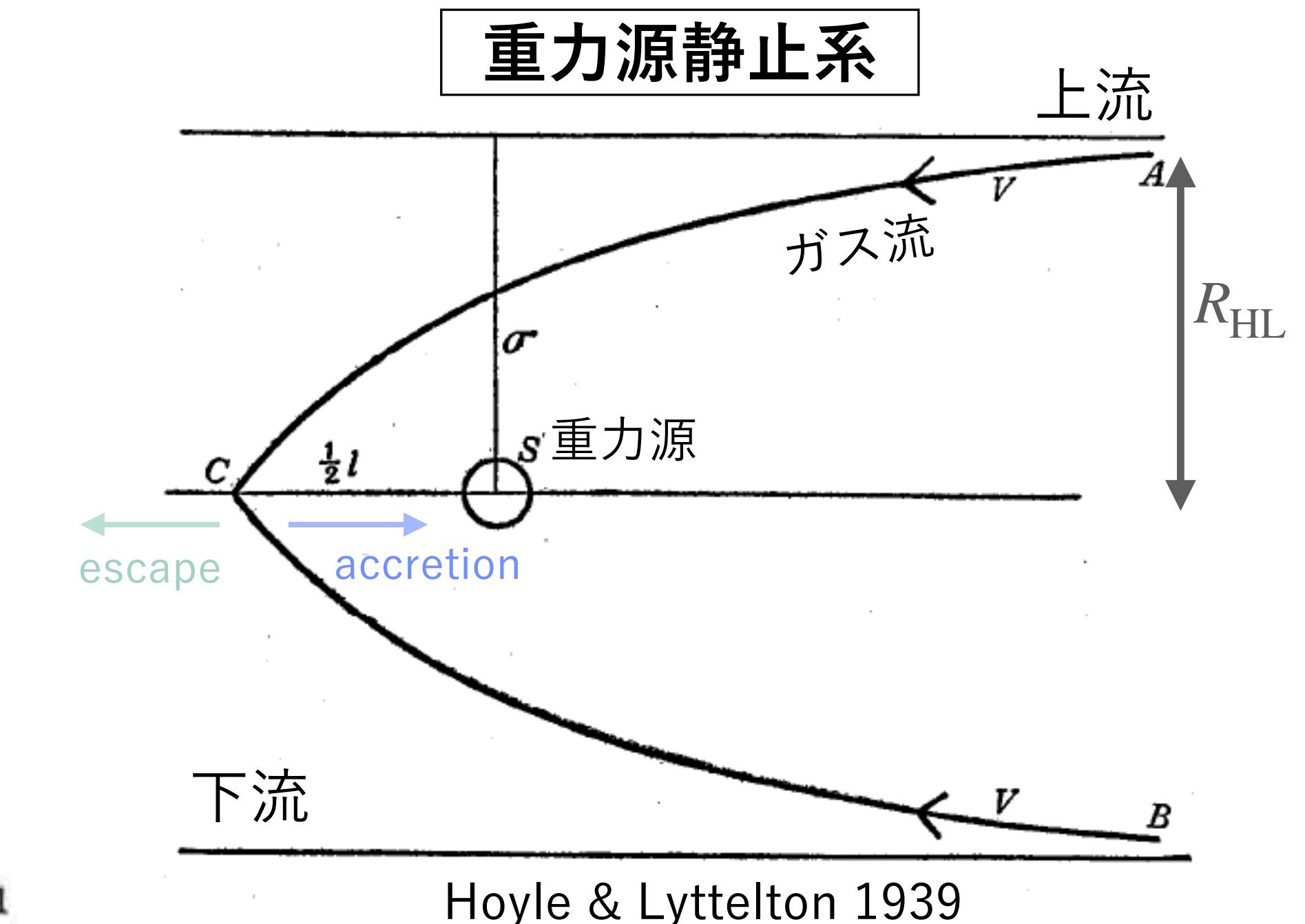
$$R_{\text{HL}} = \frac{2GM}{v_\infty^2}$$

$$= 2.65 \times 10^{15} \frac{M}{10 M_\odot} \left(\frac{v_\infty}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-2} \text{ cm.}$$

降着率

$$\dot{M}_{\text{HL}} = \pi R_{\text{HL}}^2 \rho_\infty v_\infty = \frac{4\pi \rho_\infty G^2 M^2}{v_\infty^3}$$

$$= 3.70 \times 10^{18} \left(\frac{M}{10 M_\odot} \right)^2 \frac{n_\infty}{10^5 \text{ cm}^{-3}} \times \left(\frac{v_\infty}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-3} \text{ g s}^{-1}$$



>>超音速運動を仮定し、重力源静止系で解析的に降着半径や質量降着率を導出した。

INTRODUCTION

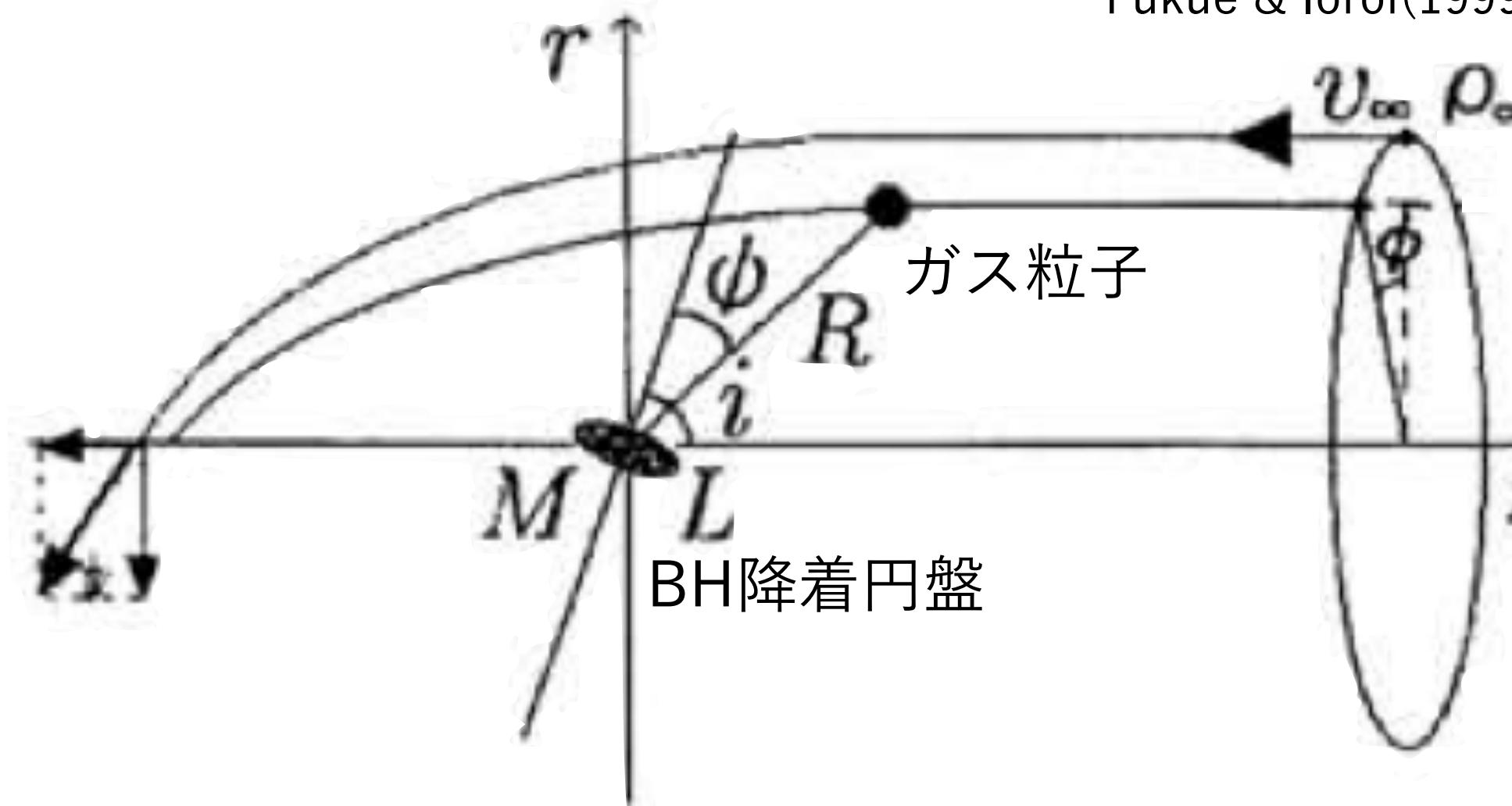
■ 先行研究Fukue & Ioroi(1999)は、Hoyle-Lyttleton降着に**輻射の非等方性**を考慮した。

運動方程式

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{GMR}{R^3}(1 - \Gamma_{eff}), \quad \Gamma_{eff} = 2\Gamma \cos\psi$$

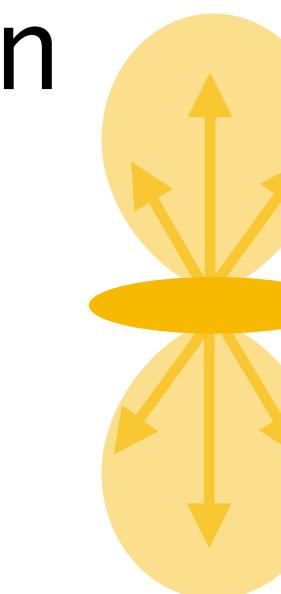
円盤極方向に強められた輻射力

計算モデル

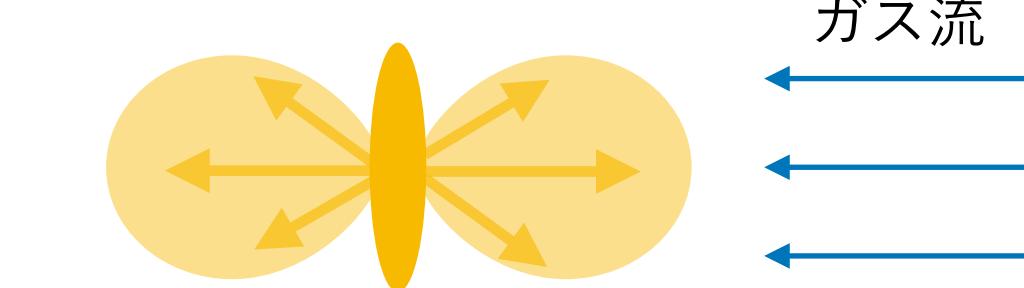


光源モデル

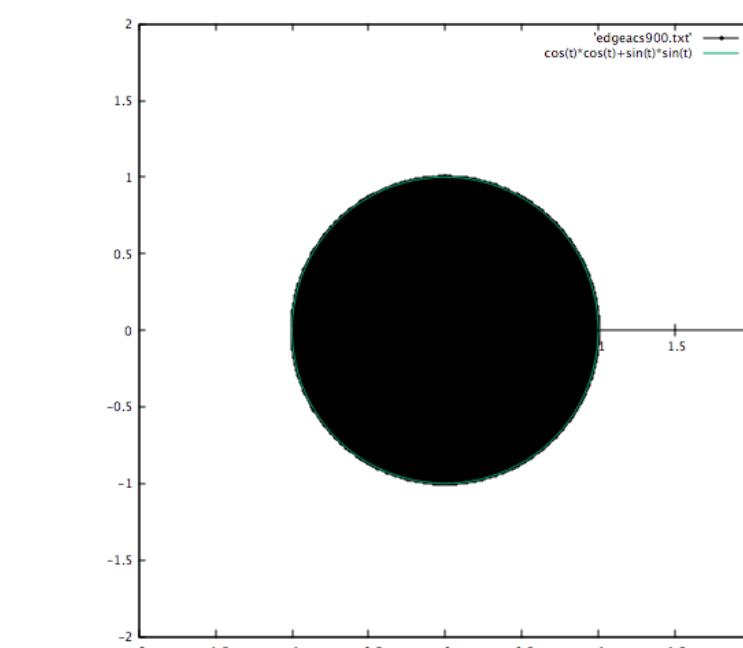
edge-on



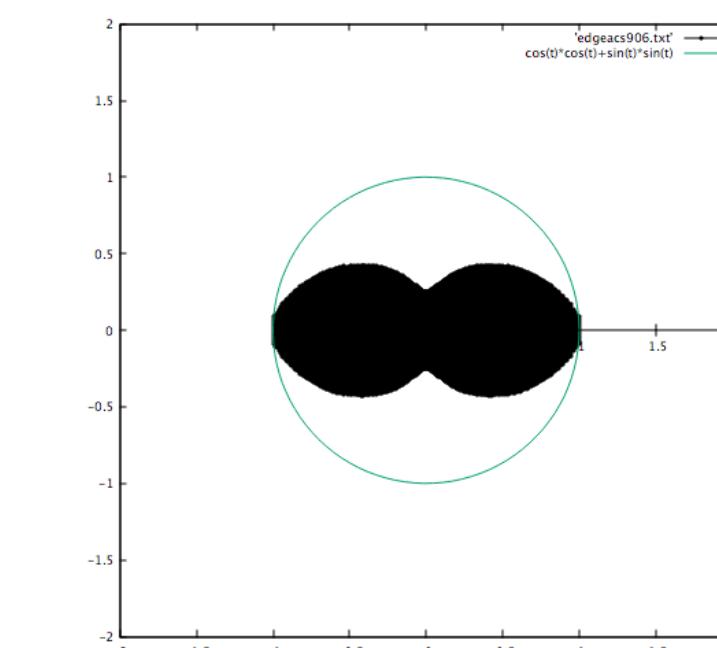
pole-on



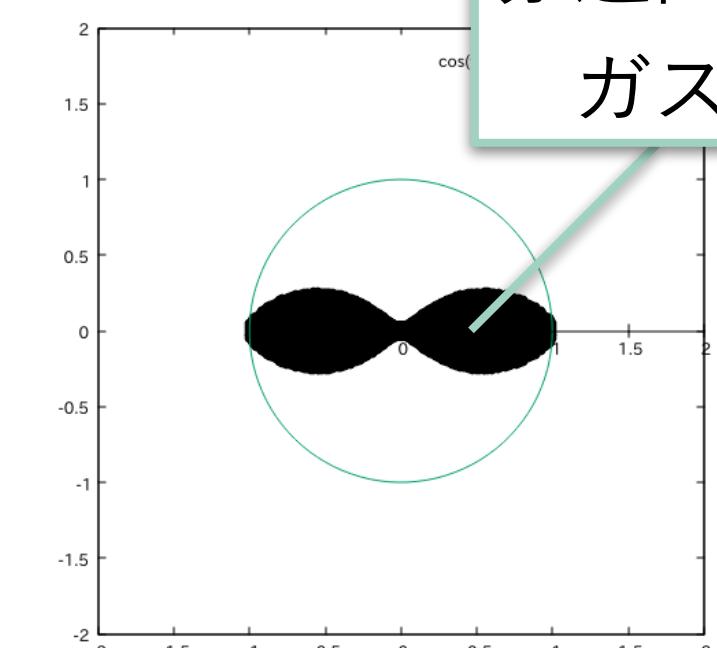
edge-onの降着断面



$\Gamma = 0.0$



$\Gamma = 0.6$



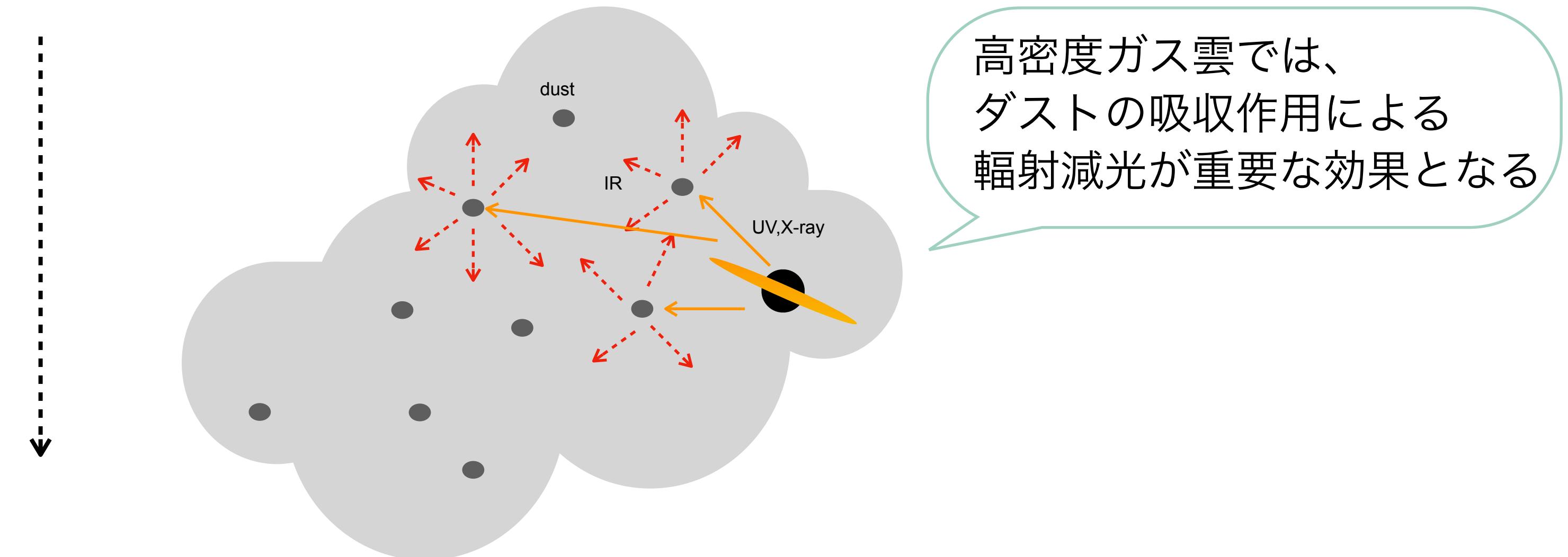
$\Gamma = 1.0$

赤道面方向からの
ガス降着の寄与

■ 本研究は、先行研究Fukue & Ioroi (1999)のアップデートを行なう

Fukue & Ioroi (1999)

- 光学的に薄い系を仮定
- 輻射の非等方性を考慮しHoyle-Lyttleton降着現象を調査



Ogata et al. (2021)

- 輻射の非等方性 & **ダストによる吸収減光効果**を考慮しHoyle-Lyttleton降着率を調査

MODEL & METHOD

運動方程式

吸収減光効果を考慮した輻射力

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{GMR}{R^3} \left\{ 1 - \Gamma' e^{-\tau} \frac{1 - e^{-\Delta\tau}}{\Delta\tau} \left[(2 \cos \psi - 1) \delta + 1 \right] \right\}, \quad \Gamma' = \kappa_{dg} L / \kappa_{es} L_E \quad \begin{cases} \delta = 0 & : \text{isotropic case} \\ \delta = 1 & : \text{disk case} \end{cases}$$

$$\Delta\tau = \frac{m_p \kappa_d}{r \Delta\varphi \sin\Theta} \frac{n_\infty v_\infty \Delta S_\infty}{v_l}, \quad \tau = \sum_i \Delta\tau_i$$

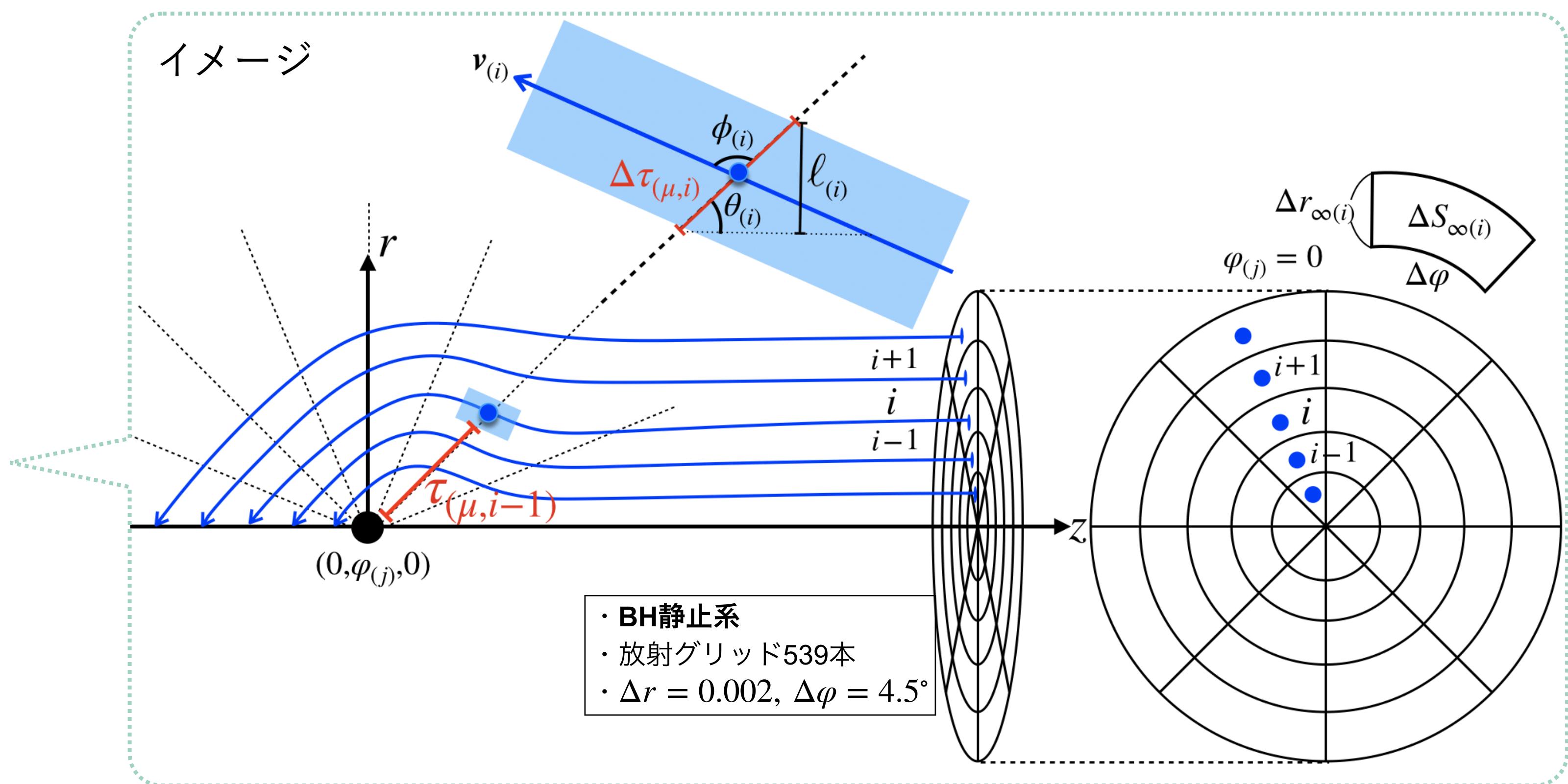
計算方法

定常流を仮定し、ガスの運動方程式をLagrange的に解く(流線を求める)

$\Delta\tau$ は、軌道が放射状グリッドと交わる点で計算する

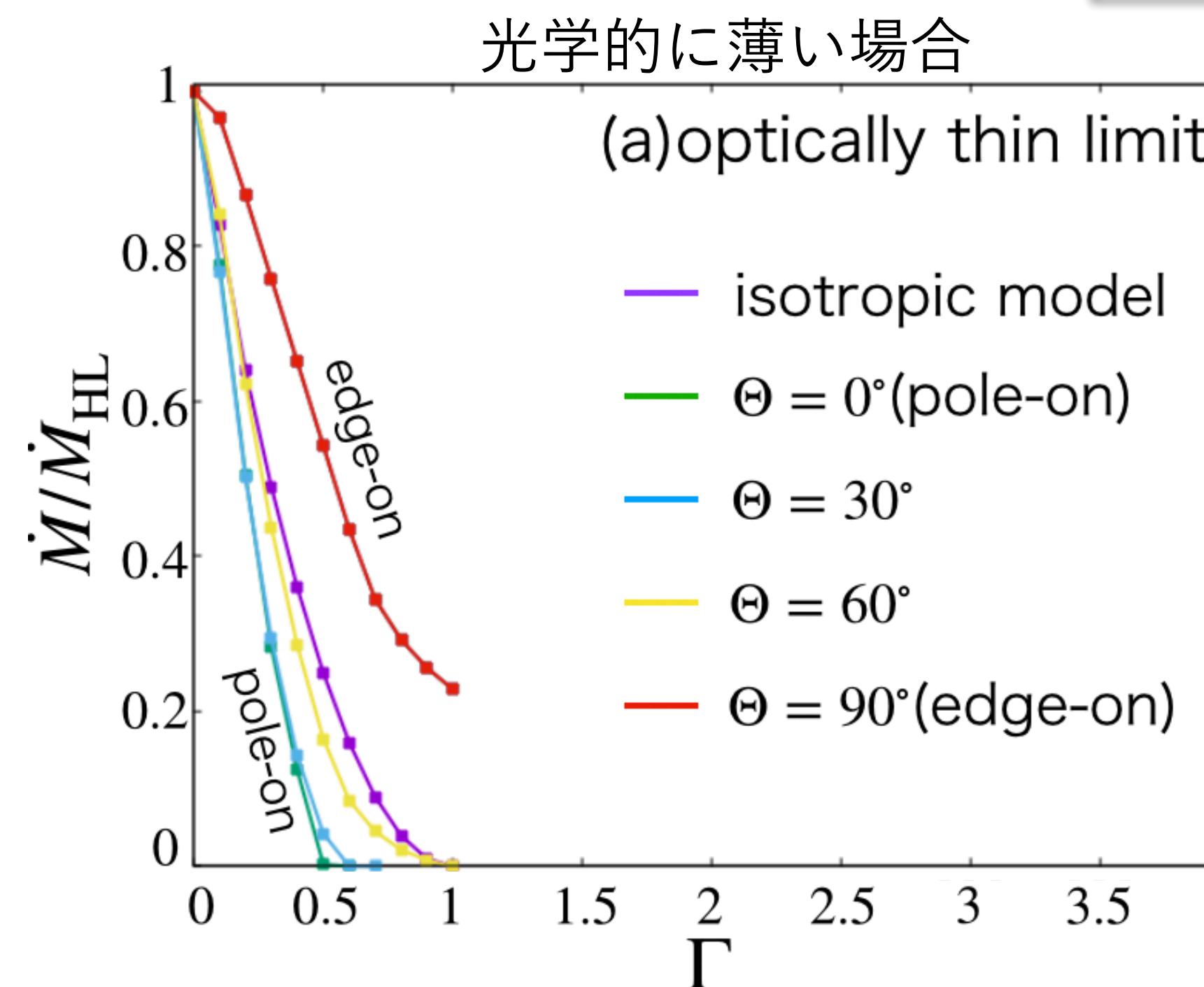
流線が交差する場合は合流させる
(その際、質量と運動量は保存する)

降着軸上で降着判定を行う

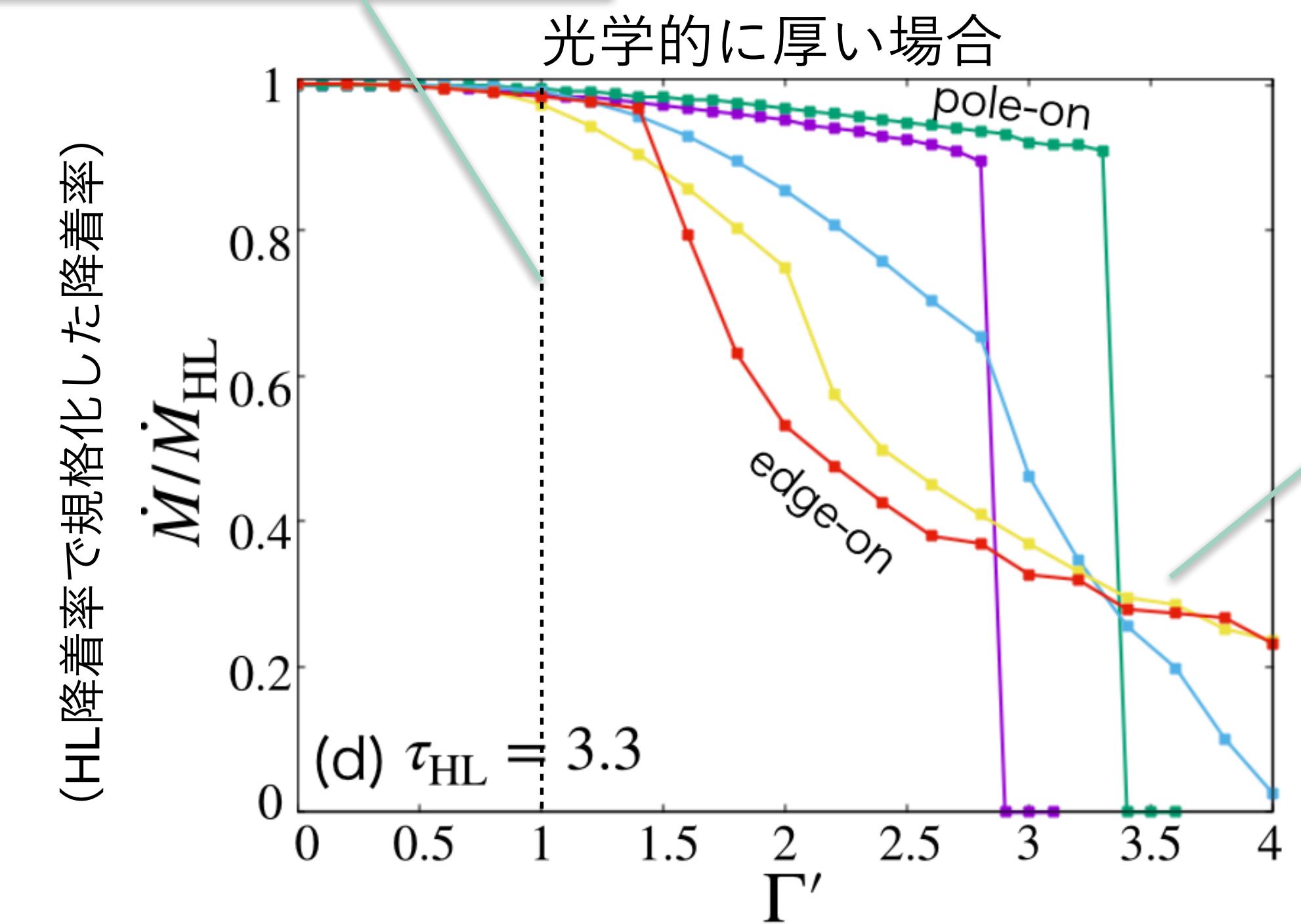


- v : ガス粒子の速度
- R : 中心天体とガス粒子の距離
- $\Delta\tau$: 流管が持つ光学的厚み
- τ : 流管が受ける光学的厚み
- Γ' : dusty-gasに対する無次元光度
- m_p : 陽子質量
- κ_{dg} : dusty-gasの不透明度
- n_∞ : 無限遠方でのガス数密度
- v_∞ : 無限遠方でのガス速度
- ΔS_∞ : 無限遠方での流管の断面積
- v_l : 流管の代表速度
- Θ : 流管と放射グリッドのなす角

■ 質量降着率



Dusty-gasに対して
Eddington光度以上でも降着可能



(Dusty-gasに対するEddington光度で規格化した光源光度)

Ogata et al.(2021)では、主に以下の2点を明らかにした。

- 光学的に厚い場合、Dusty-gasに対するEddington光度以上でも降着可能
- 降着率が最も高いのは、円盤回転軸がガスの流れと平行な向きを持つとき(pole-on)

RESULT1：補足

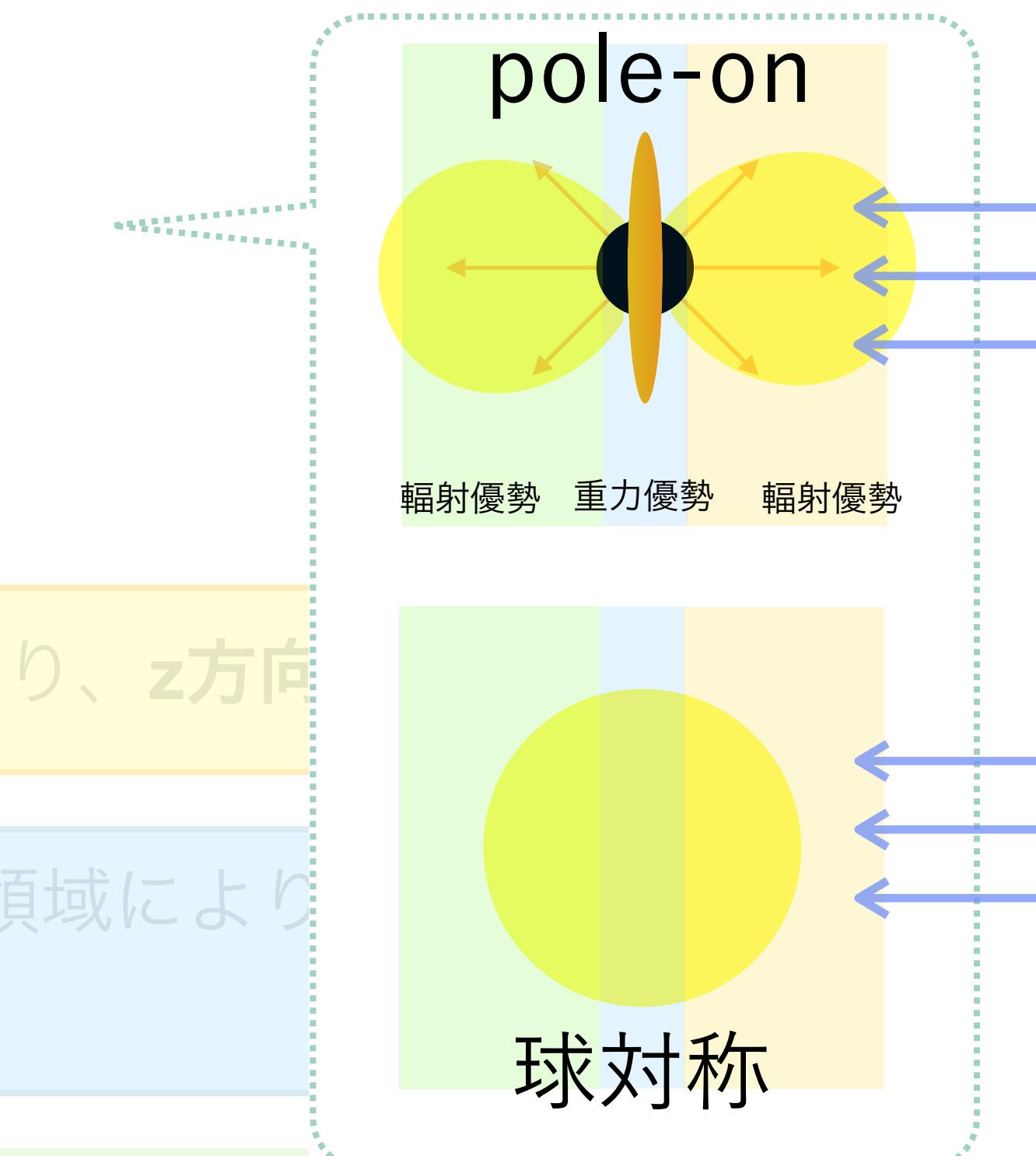
pole-onケースが最も降着しやすいのはなぜか？

解析方法

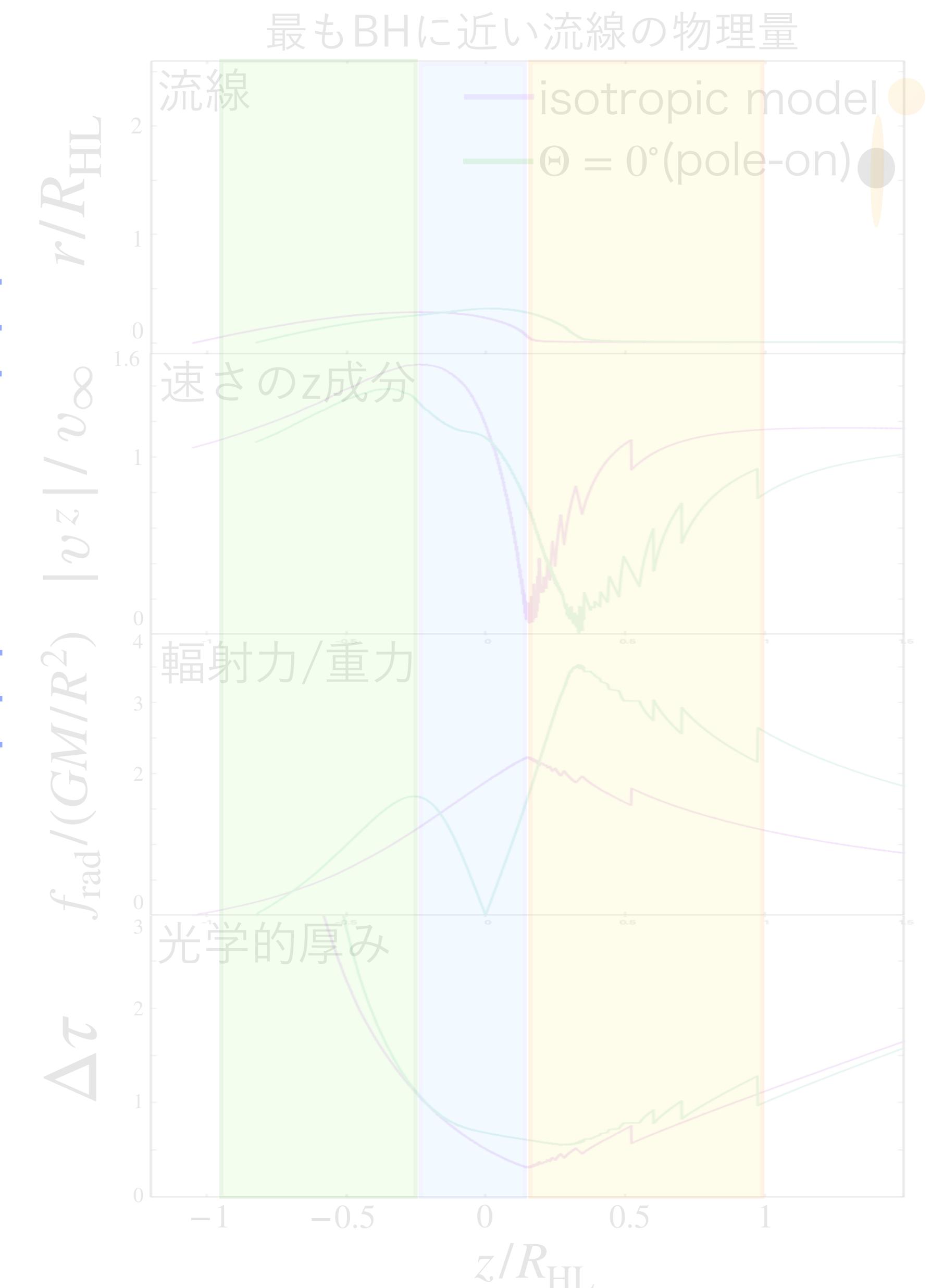
- 円盤の幾何学により領域を3分割
- BHに最も近い流線の物理量を分解
- 球対称とpole-onを比較

結果

- ①極方向に強められた輻射により、z方向
- ②円盤赤道面方向の重力>輻射領域により
BHに引き寄せられる
- ③たくさんの流線が合流し光学的厚みが
とで、円盤傾斜角 $i = 0^\circ$ であっても輻射



>> pole-onが、幾何学効果と合流(密度)効果によって降着可能なための有利な条件を持っているため。



RESULT1：補足

pole-onケースが最も降着しやすいのはなぜか？

解析方法

- 円盤の幾何学により領域を3分割
- BHに最も近い流線の物理量を分解
- 球対称とpole-onを比較

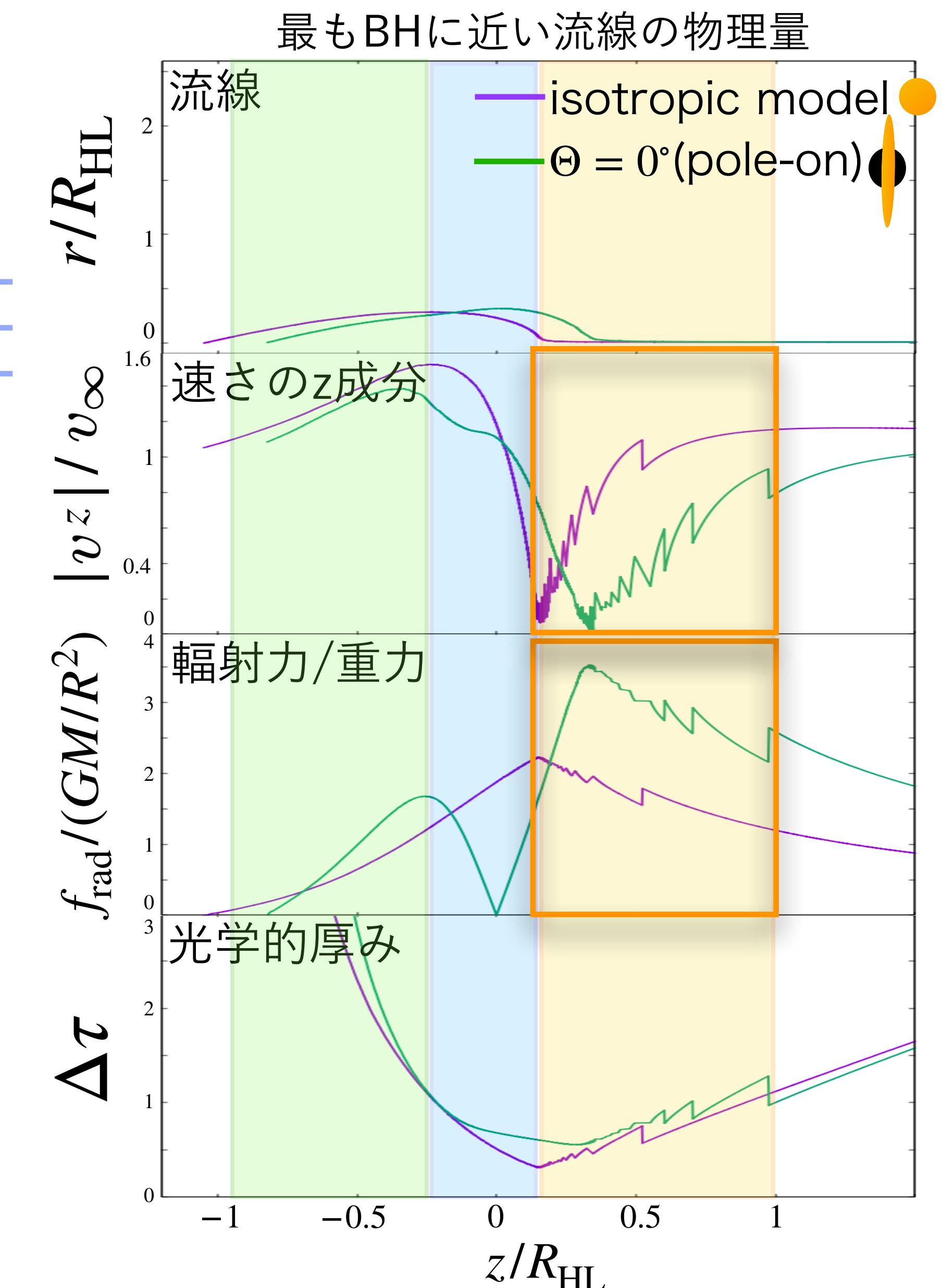
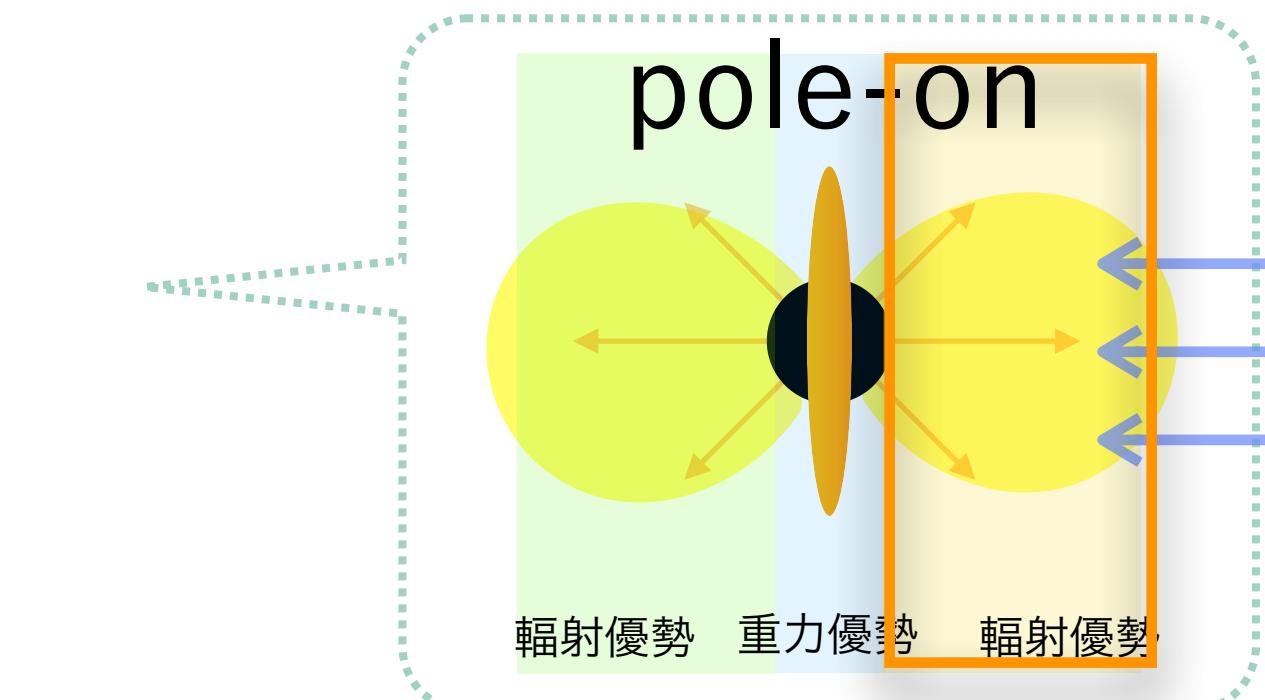
結果

①極方向に強められた輻射により、z方向の速度が低下

②円盤赤道面方向の重力>輻射領域により、流線がよりBHに引き寄せられる

③たくさんの流線が合流し光学的厚みが大きくなることで、円盤傾斜角 $i = 0^\circ$ であっても輻射は弱い

>> pole-onが、幾何学効果と合流(密度)効果によって降着可能なための有利な条件を持っているため。



RESULT1：補足

pole-onケースが最も降着しやすいのはなぜか？

解析方法

- 円盤の幾何学により領域を3分割
- BHに最も近い流線の物理量を分解
- 球対称とpole-onを比較

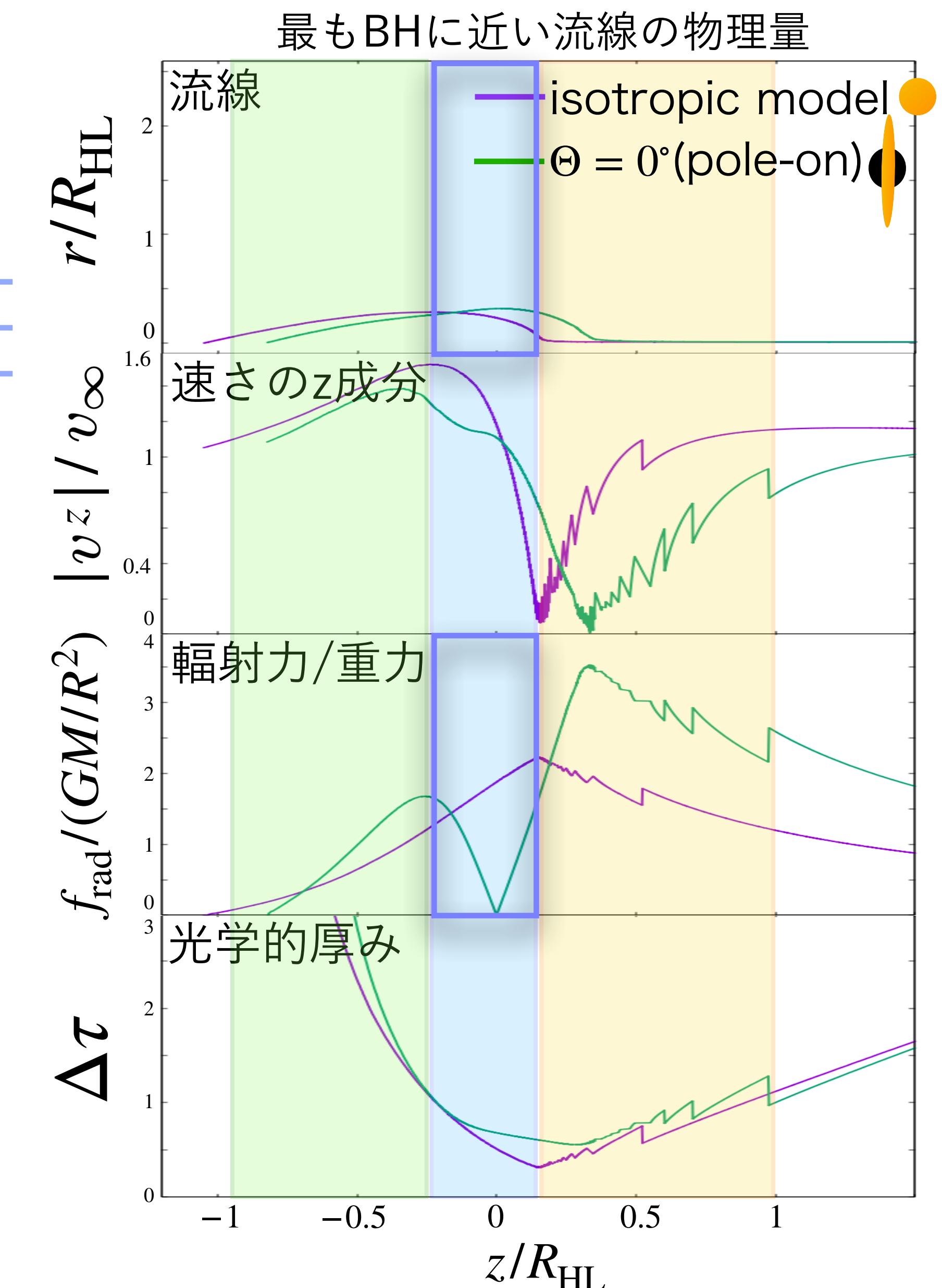
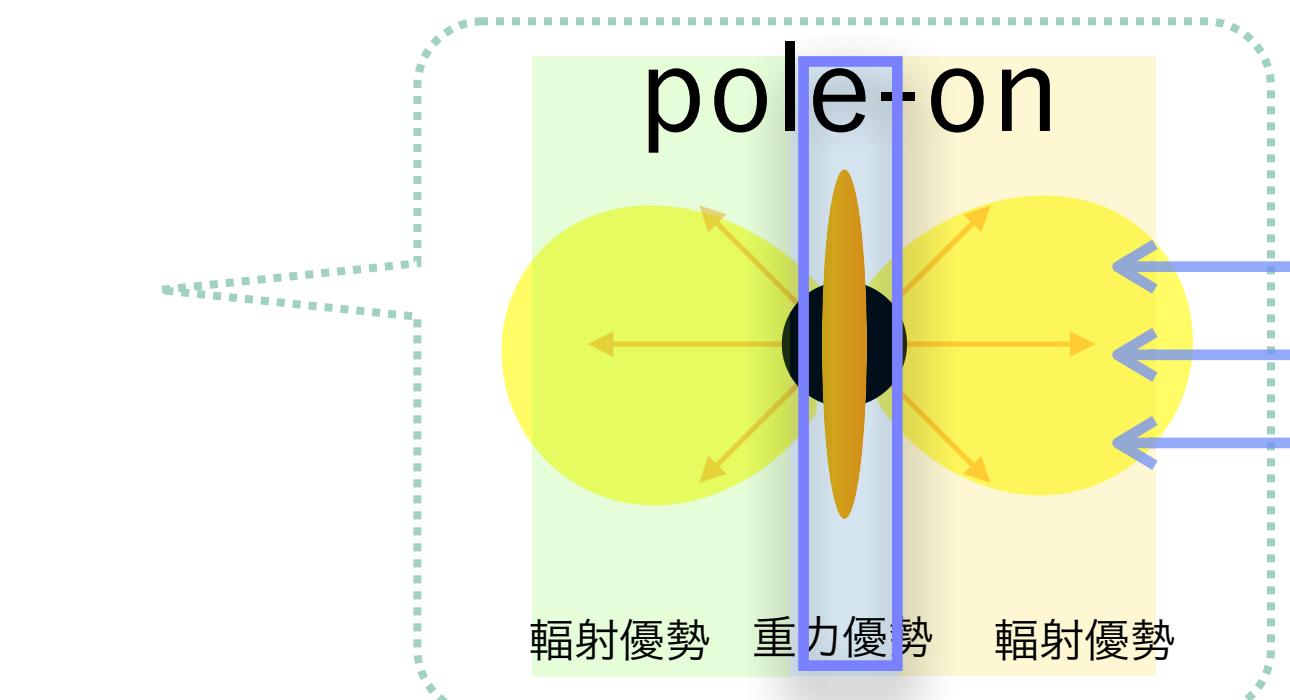
結果

①極方向に強められた輻射により、z方向の速度が低下

②円盤赤道面方向の重力>輻射領域により、**流線**がよりBHに引き寄せられる

③たくさんの流線が合流し光学的厚みが大きくなることで、円盤傾斜角 $i = 0^\circ$ であっても**輻射**は弱い

>> pole-onが、幾何学効果と合流(密度)効果によって降着可能なための有利な条件を持っているため。



RESULT1：補足

pole-onケースが最も降着しやすいのはなぜか？

解析方法

- 円盤の幾何学により領域を3分割
- BHに最も近い流線の物理量を分解
- 球対称とpole-onを比較

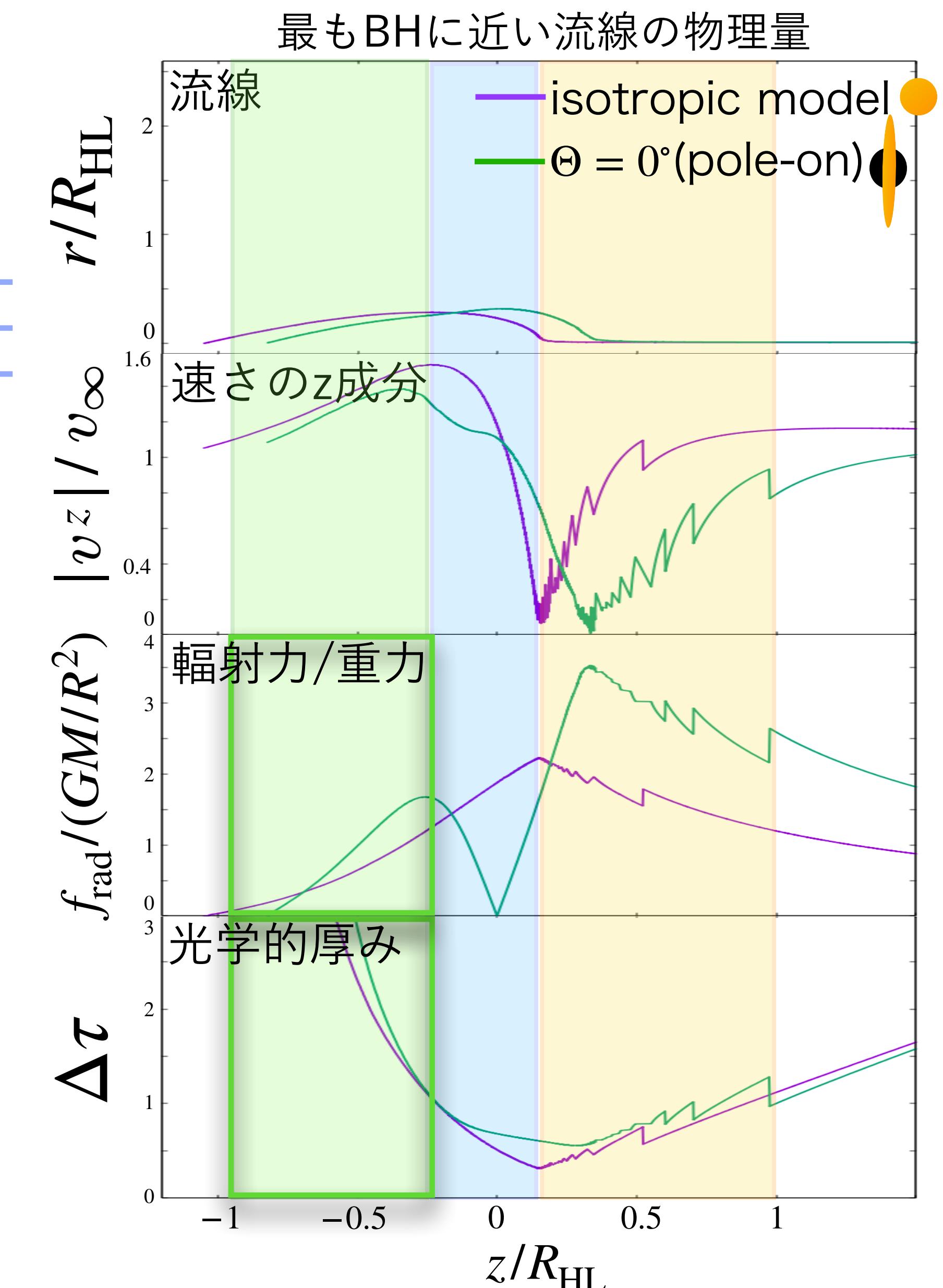
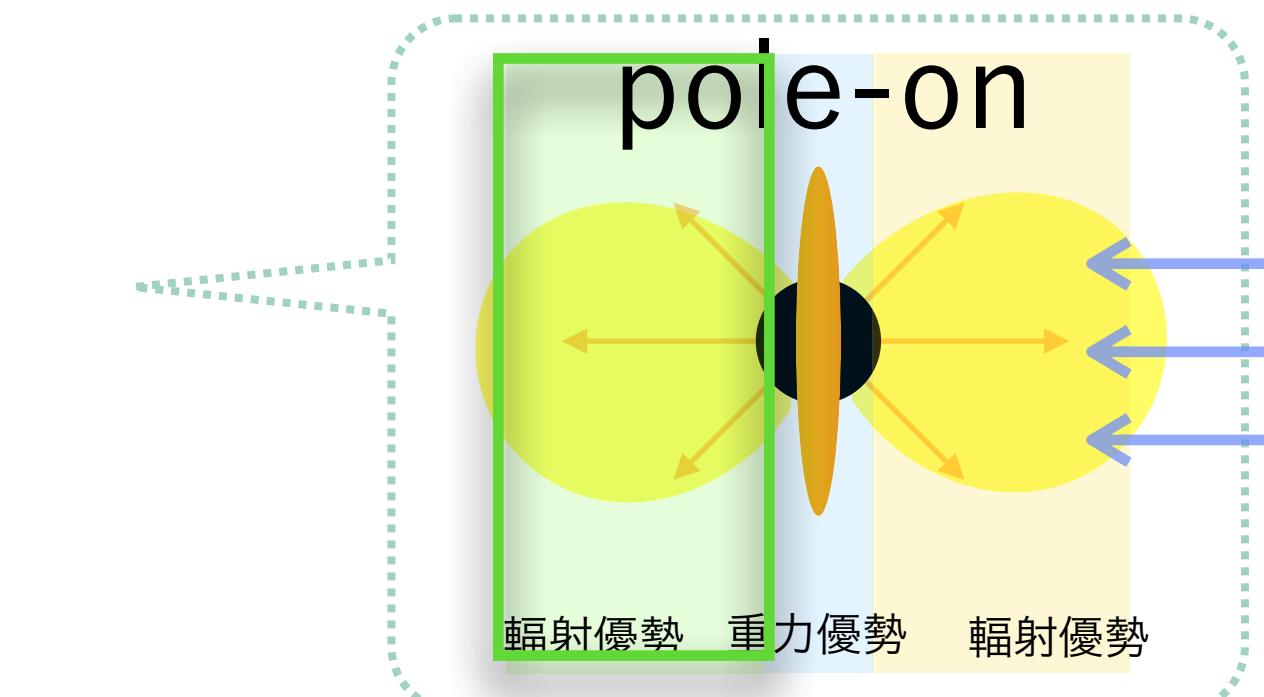
結果

①極方向に強められた輻射により、z方向の速度が低下

②円盤赤道面方向の重力>輻射領域により、流線がよりBHに引き寄せられる

③たくさんの流線が合流し光学的厚みが大きくなることで、円盤傾斜角 $i = 0^\circ$ であっても輻射は弱い

>> pole-onが、幾何学効果と合流(密度)効果によって降着可能なための有利な条件を持っているため。



RESULT1：補足

pole-onケースが最も降着しやすいのはなぜか？

解析方法

- 円盤の幾何学により領域を3分割
- BHに最も近い流線の物理量を分解
- 球対称とpole-onを比較

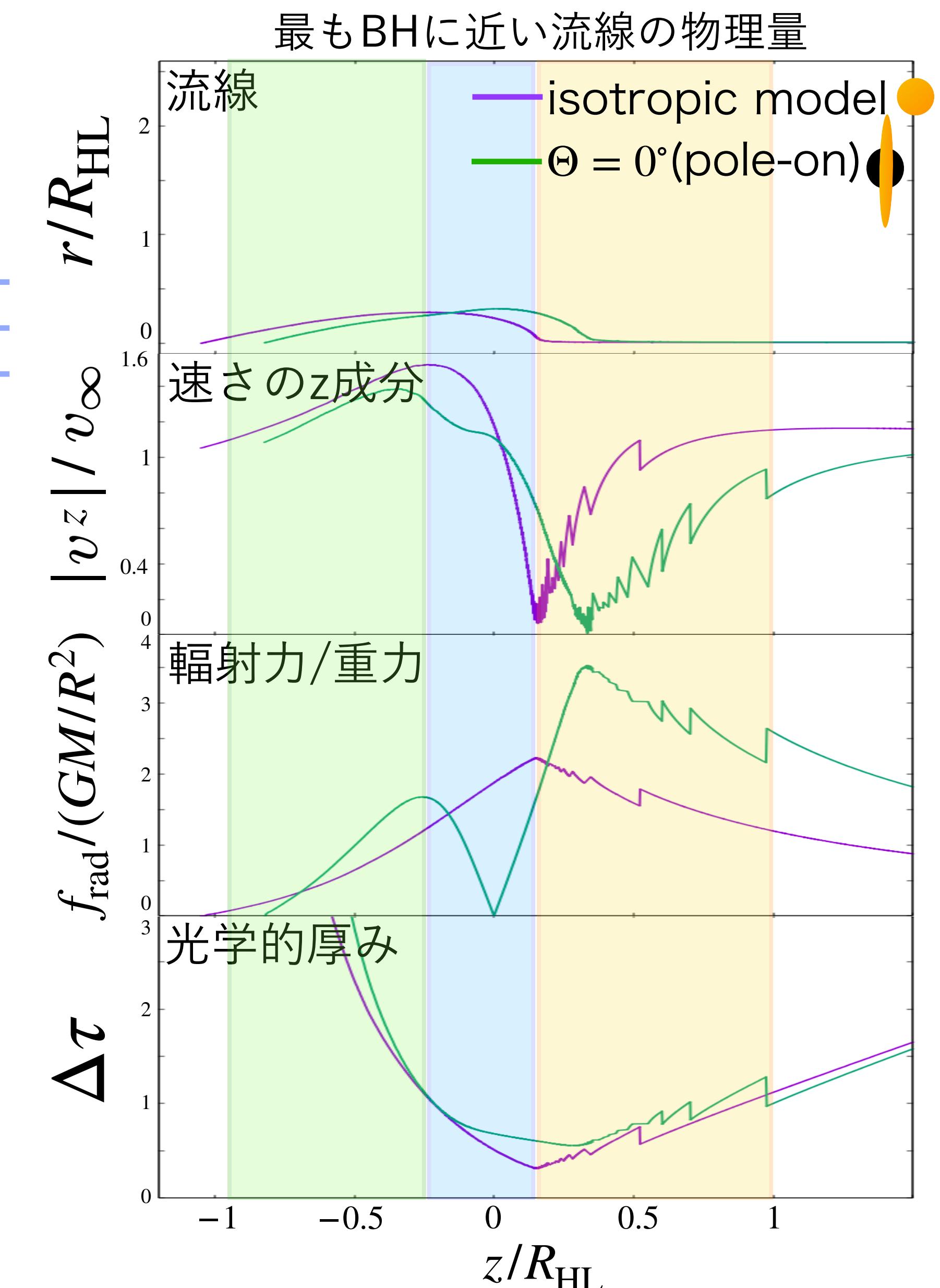
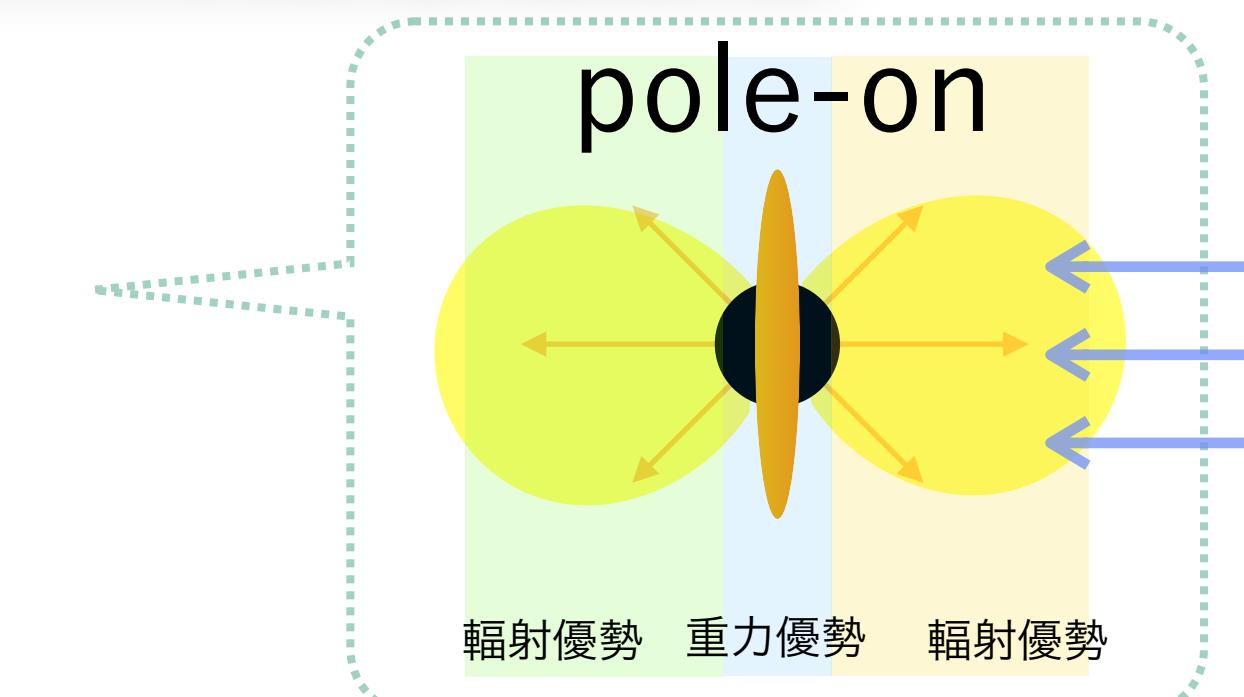
結果

①極方向に強められた輻射により、z方向の速度が低下

②円盤赤道面方向の重力>輻射領域により、流線がよりBHに引き寄せられる

③たくさんの流線が合流し光学的厚みが大きくなることで、円盤傾斜角 $i = 0^\circ$ であっても輻射は弱い

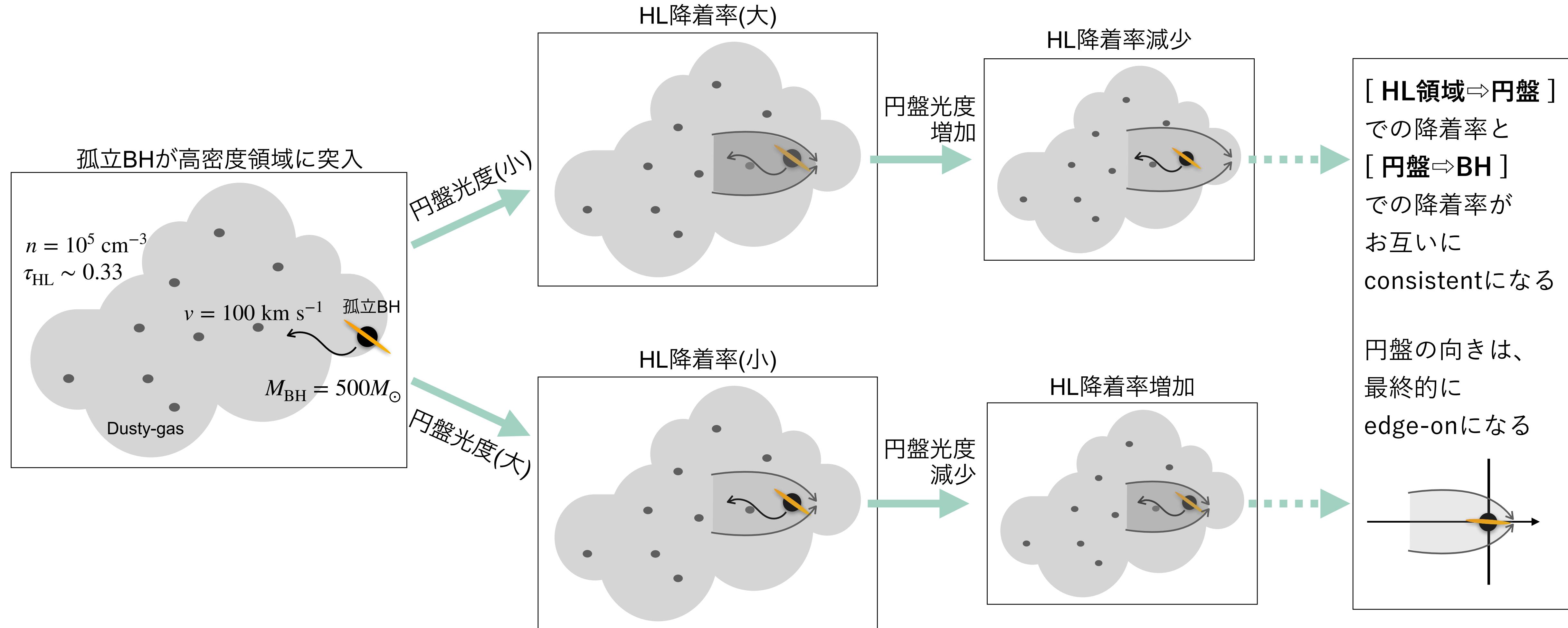
>> pole-onが、幾何学効果と合流(密度)効果によって降着可能なための有利な条件を持っているため。



Canonical luminosity

$$(L = \eta \dot{M}_{\text{HL}} c^2)$$

定義 Hoyle-Lyttleton機構の降着率と降着円盤の光度がconsistentになるときの光度



Canonical luminosity

$$(L = \eta \dot{M}_{\text{HL}} c^2)$$

定義 Hoyle-Lyttleton機構の降着率と降着円盤の光度がconsistentになるときの光度

pole-on

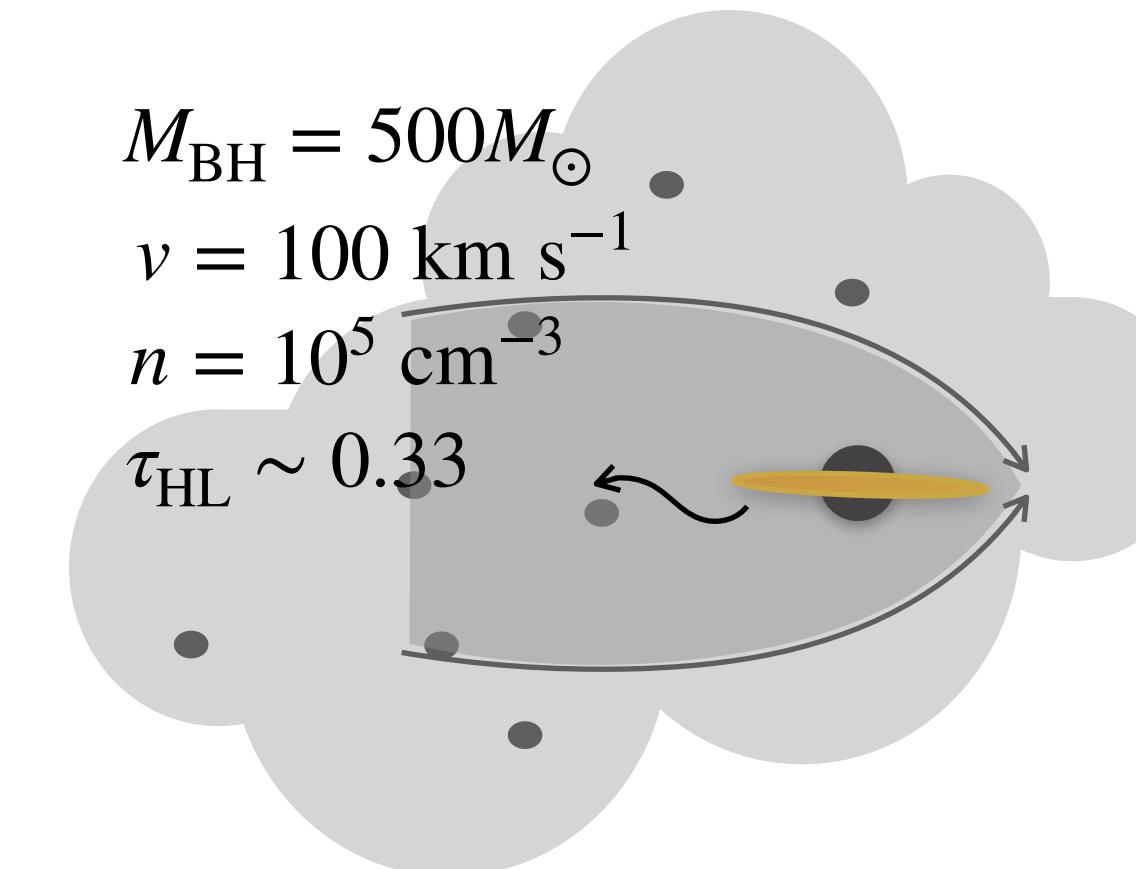
Γ'_{can} の値は \dot{m}_{dg} の増加と共に頭打ちになる

edge-on

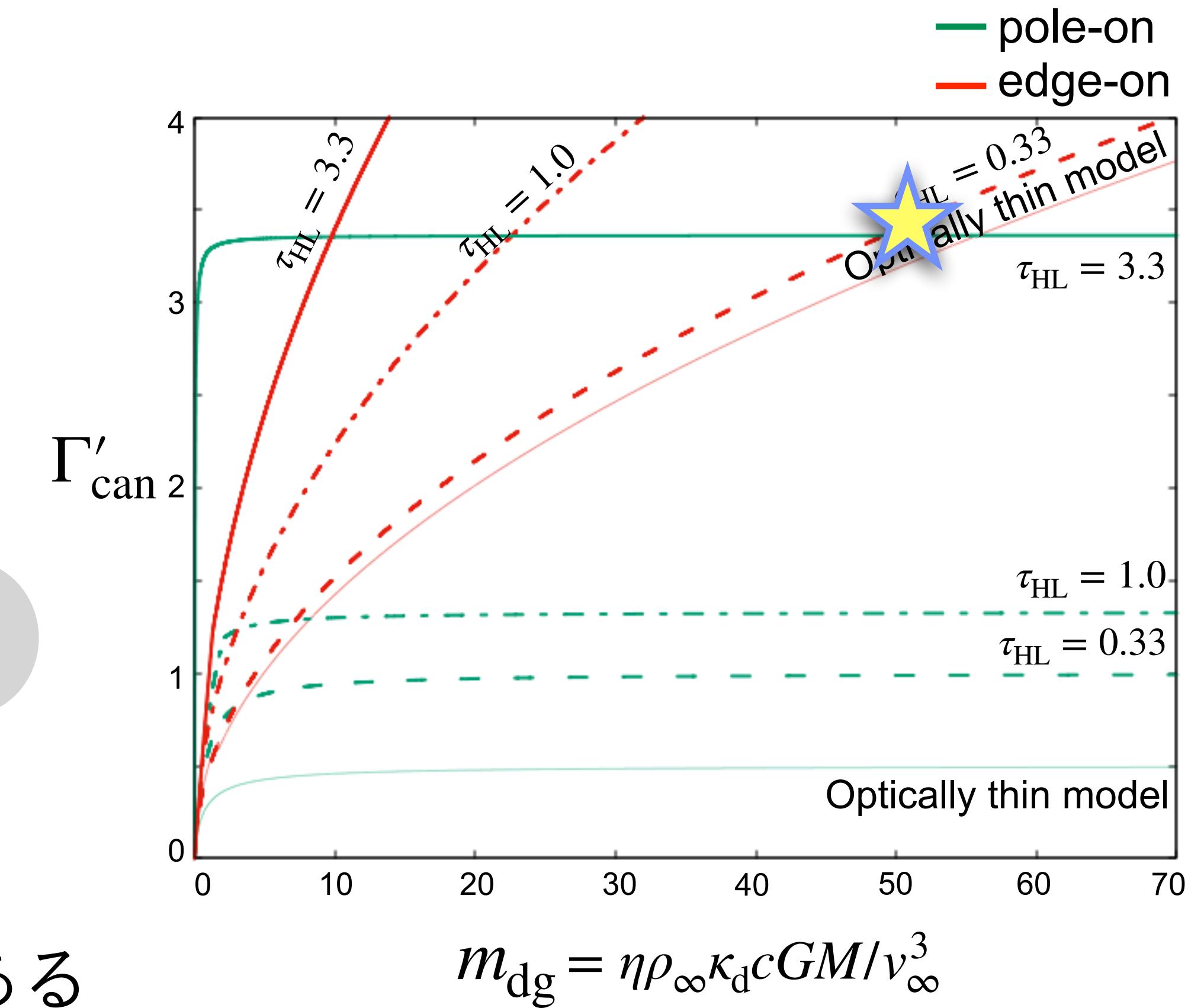
Γ'_{can} の値は \dot{m}_{dg} の増加関数

例. $\dot{m}_{\text{dg}} \sim 50$

$$\Gamma'_{\text{can}} \sim 3.4 \quad (L \sim 10^{38} \text{ erg s}^{-1})$$



>> IR帯で明るい天体として観測される可能性がある



$$m_{\text{dg}} = \eta \rho_{\infty} \kappa_{\text{d}} c G M / v_{\infty}^3$$

DISCUSSION2

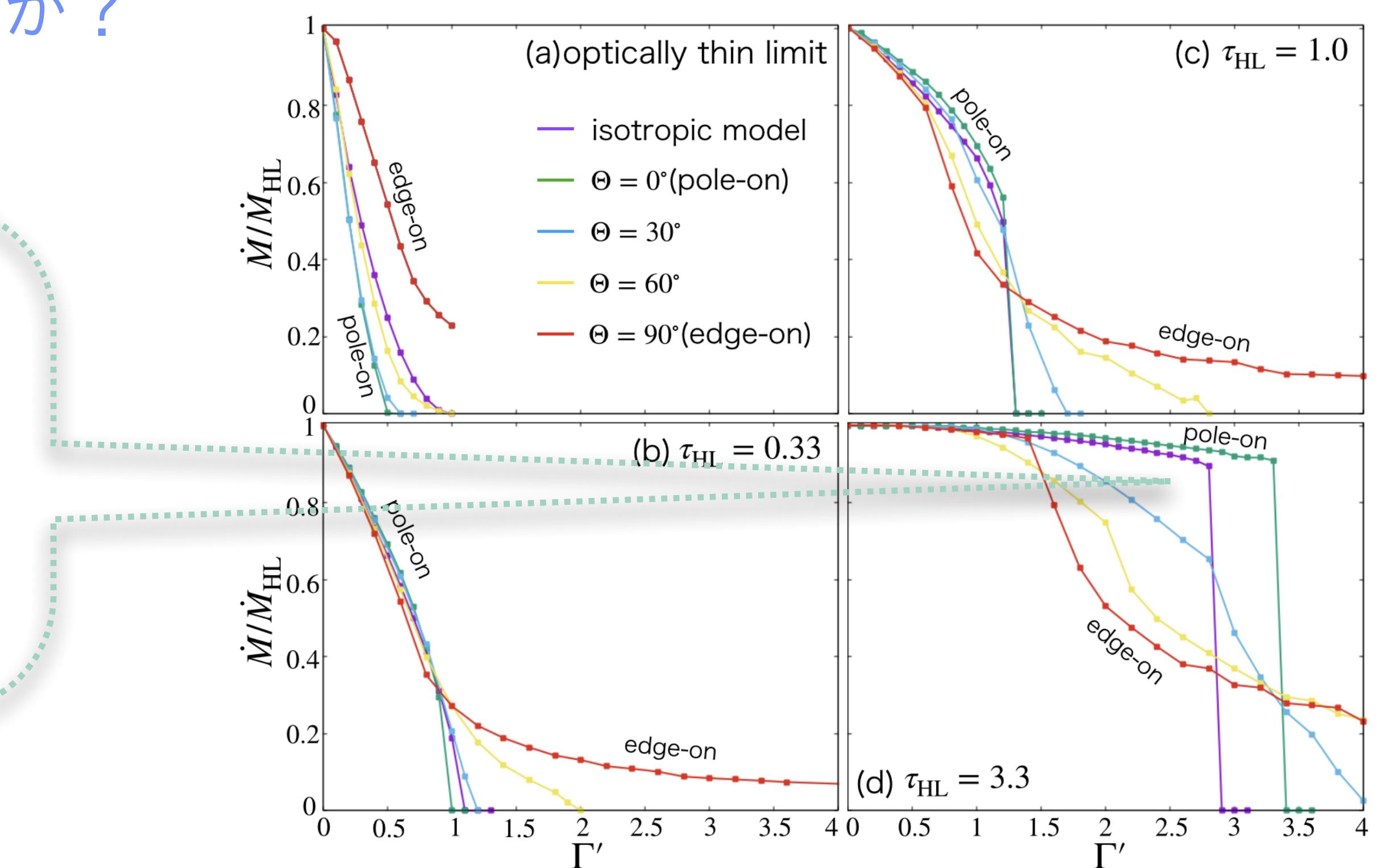
■ GW190521の合体前のBH質量 $85_{-14}^{+21}M_{\odot}$, $66_{-18}^{+17}M_{\odot}$ はmass-gap内の質量である可能性が高いと示唆されている。

Rice & Zhang (2020)：合体前のBH質量を、
恒星質量BHのHoyle-Lyttleton降着による進化で説明できそう

⇒ Ogata et al. (2021)の結果使ったらどうか？

$$\tau_{\text{HL}} = 3.3 : \sim 0.95 \dot{M}_{\text{HL}}$$

>> この降着率を使って、
GW190521の合体前質量を再現できるか解析的に計算してみる。



■ 分子雲を通過することを想定し、mass-gap質量を説明できるか？

仮定 分子雲の典型的なサイズ $R_{\text{mc}} \sim 40\text{pc}$

BHの速度 $v_{\text{bh}} \sim 10\text{km/s}$

通過時間 $t_{\text{cross}} \equiv R_{\text{mc}}/v_{\text{bh}} \sim 3.9\text{Myr}$

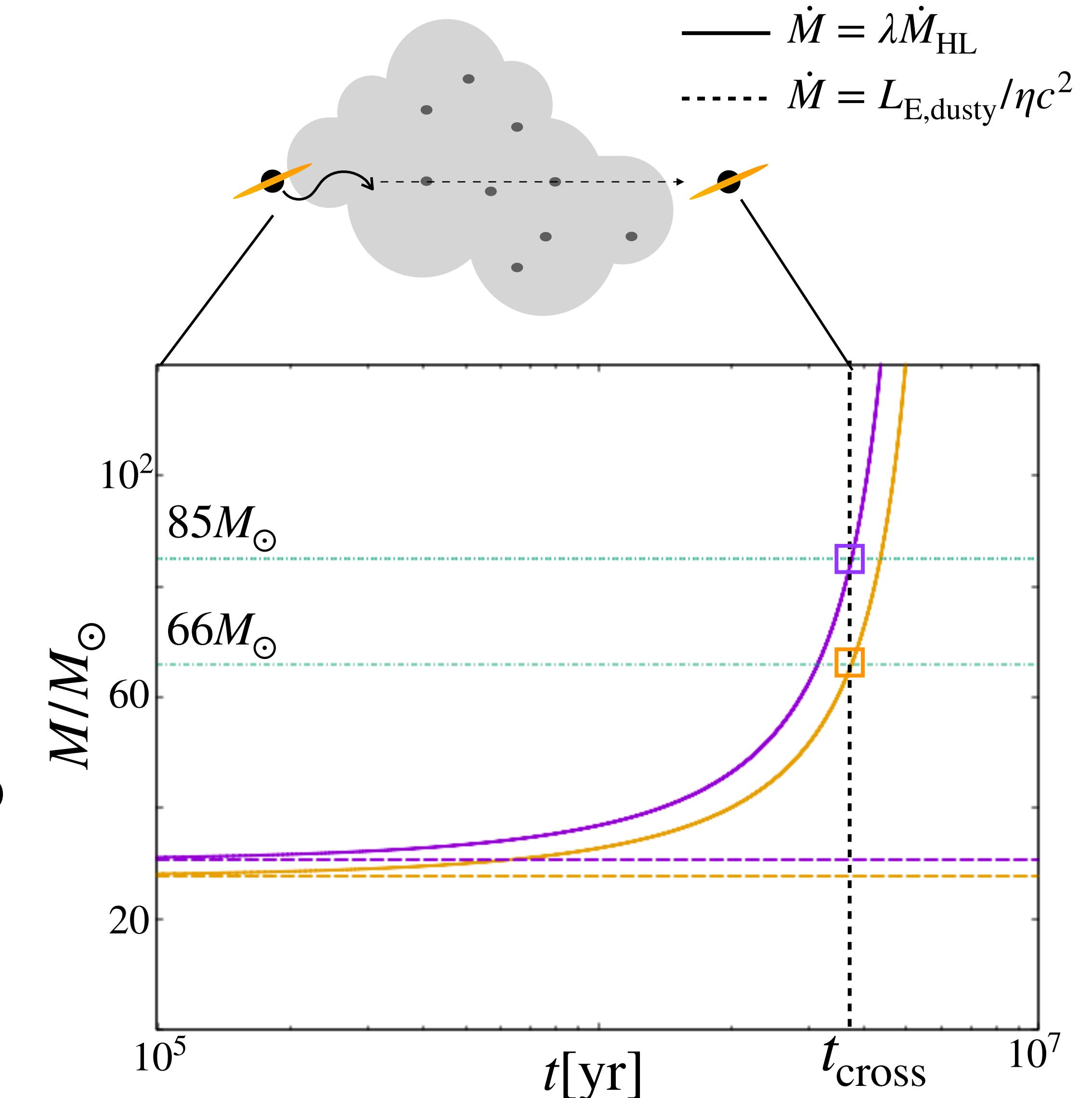
結果 $M_{\text{final}} = 66M_{\odot}$ のとき $M_{\text{ini}} \sim 28M_{\odot}$

$M_{\text{final}} = 85M_{\odot}$ のとき $M_{\text{ini}} \sim 31M_{\odot}$

>>GW190521の合体前のBH質量を、

$n = 10^6\text{cm}^{-3}, \kappa_{\text{dg}} \sim O(10^2)$ のdusty-gas中での

Hoyle-Lyttleton降着で説明可能なことを示唆する結果が得られた。



■ 星間空間を浮遊する孤立BHが質量を獲得するメカニズムのひとつとして、ダストの光学的厚みを考慮したHoyle-Lyttleton降着の計算法を開発し、計算を行った。

- 球対称・全ての円盤傾斜角ケースにおいて、 $\tau_{\text{HL}} = 0.33 \sim 3.3$ で計算を行った結果、光学的に薄い(減光効果を入れていない)先行研究と異なり、dusty-gasに対して臨界光度以上であっても降着可能なことが分かった。
- 降着可能領域で質量降着率は、pole-on(円盤傾斜角 = 0°)ケースが他のケースと比較して最も大きいことが分かった。
 - 領域 1 : 流速が輻射力によって減速される効果
 - 領域 2 : 円盤の幾何学的構造により、輻射力が弱まる効果
 - 領域 3 : 流線が集まり密度が高まる効果

