

Line-driven disc winds from supercritical accretion flow: implications for BH growth

Mariko NOMURA (Hirosaki Univ.)

Ken OHSUGA (Tsukuba Univ.)



**HIROSAKI
UNIVERSITY**

FSFG2024 @Shinshu Univ. November 12, 2024

超臨界降着流とは

◆ 球対称降着：

- エディントン限界を超えて降着できない

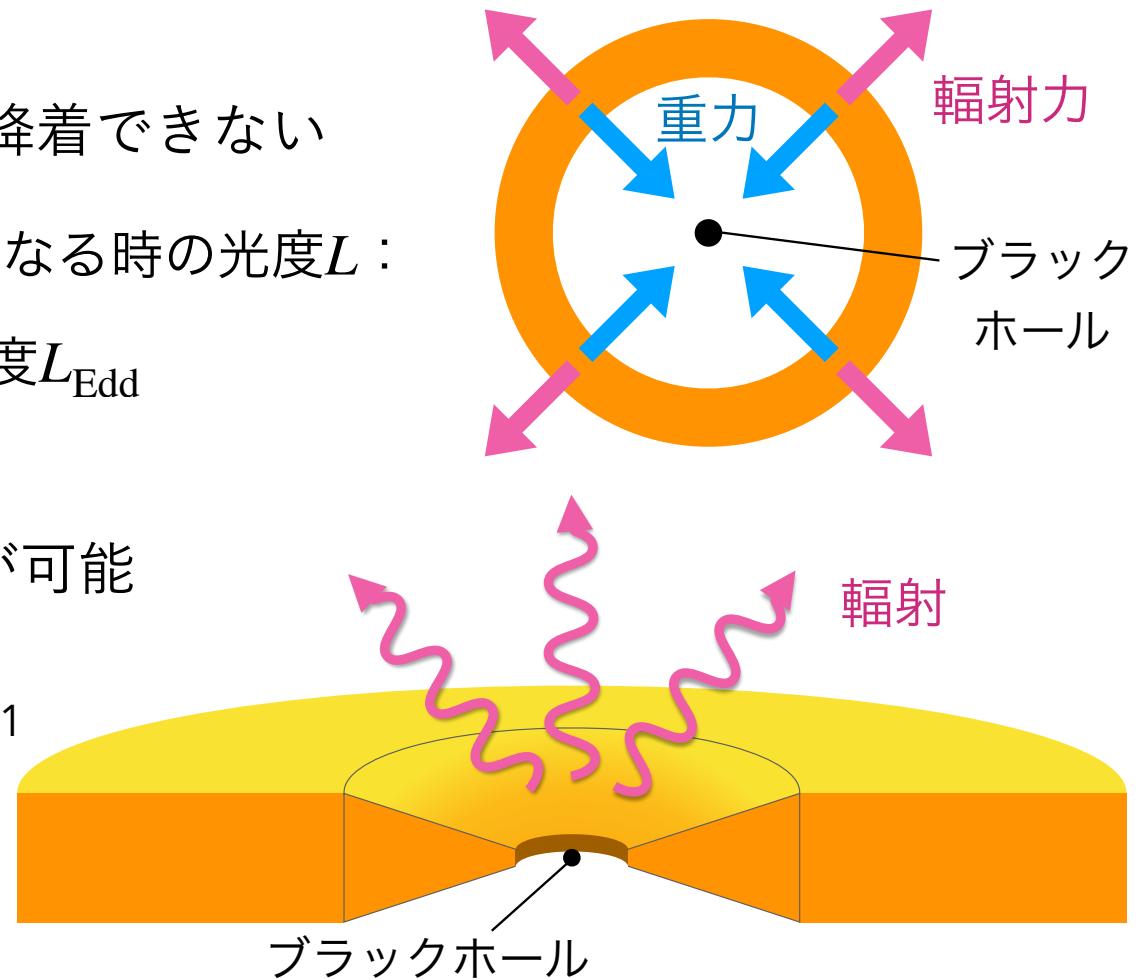
重力 = 輻射力となる時の光度 L :

エディントン光度 L_{Edd}

◆ 円盤降着：

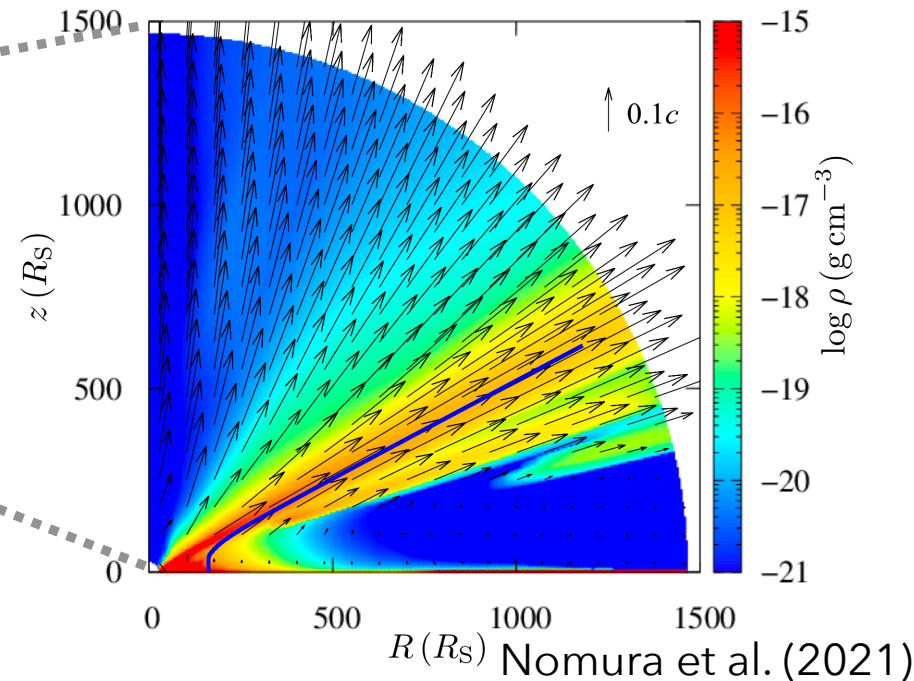
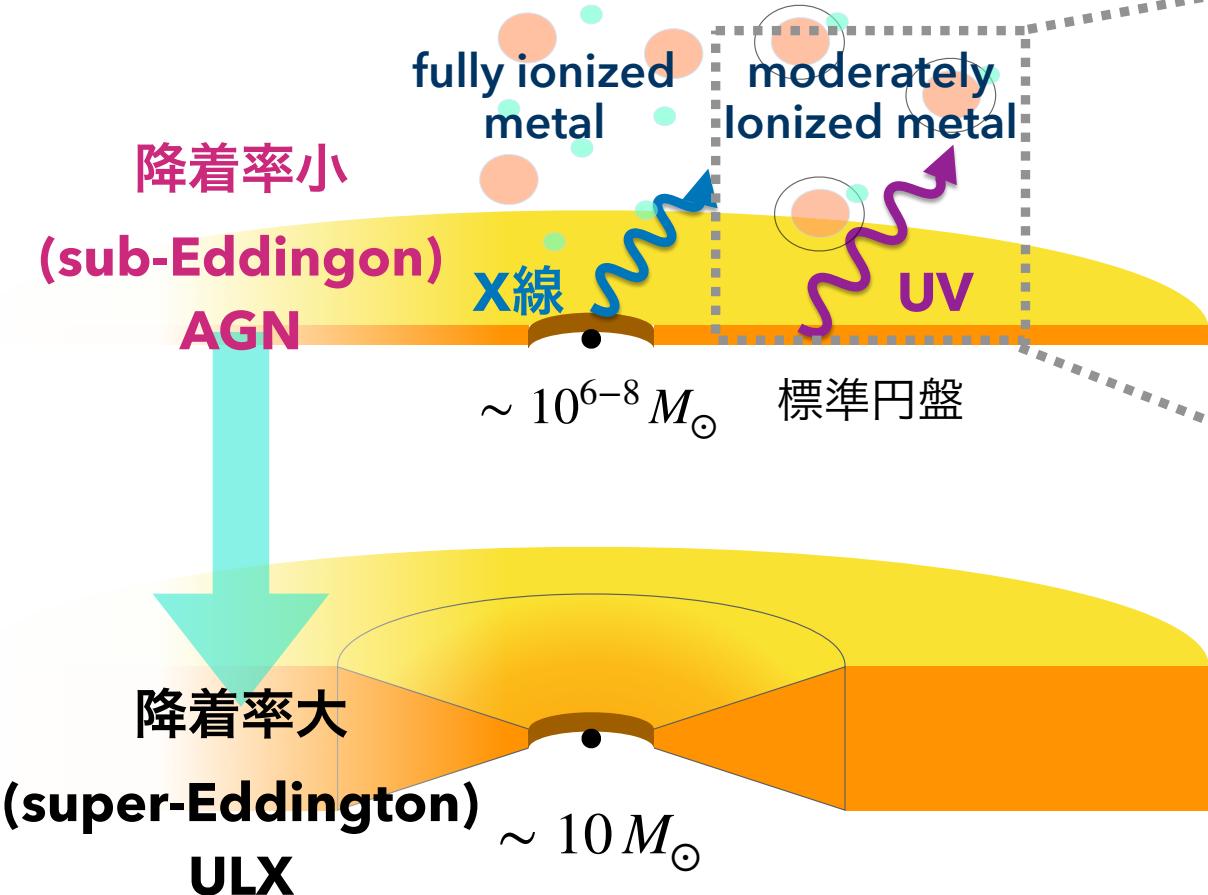
- 非等方放射 \Rightarrow 超臨界降着が可能

e.g., Ohsuga et al. 2005,
Sadowski et al. 2015, Kitaki et al. 2021



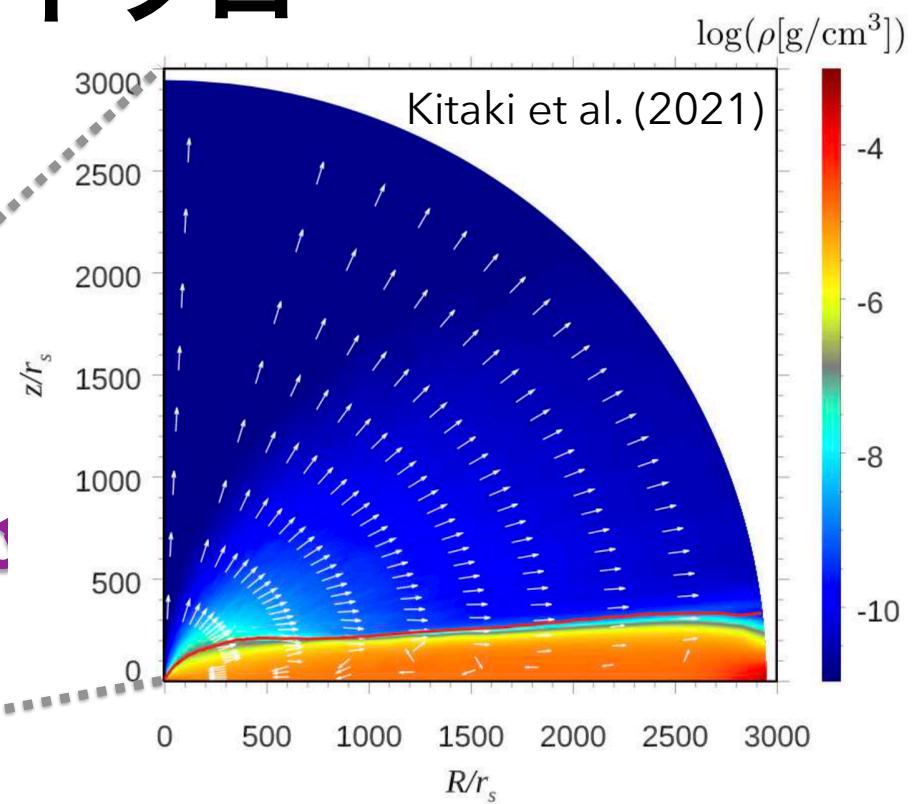
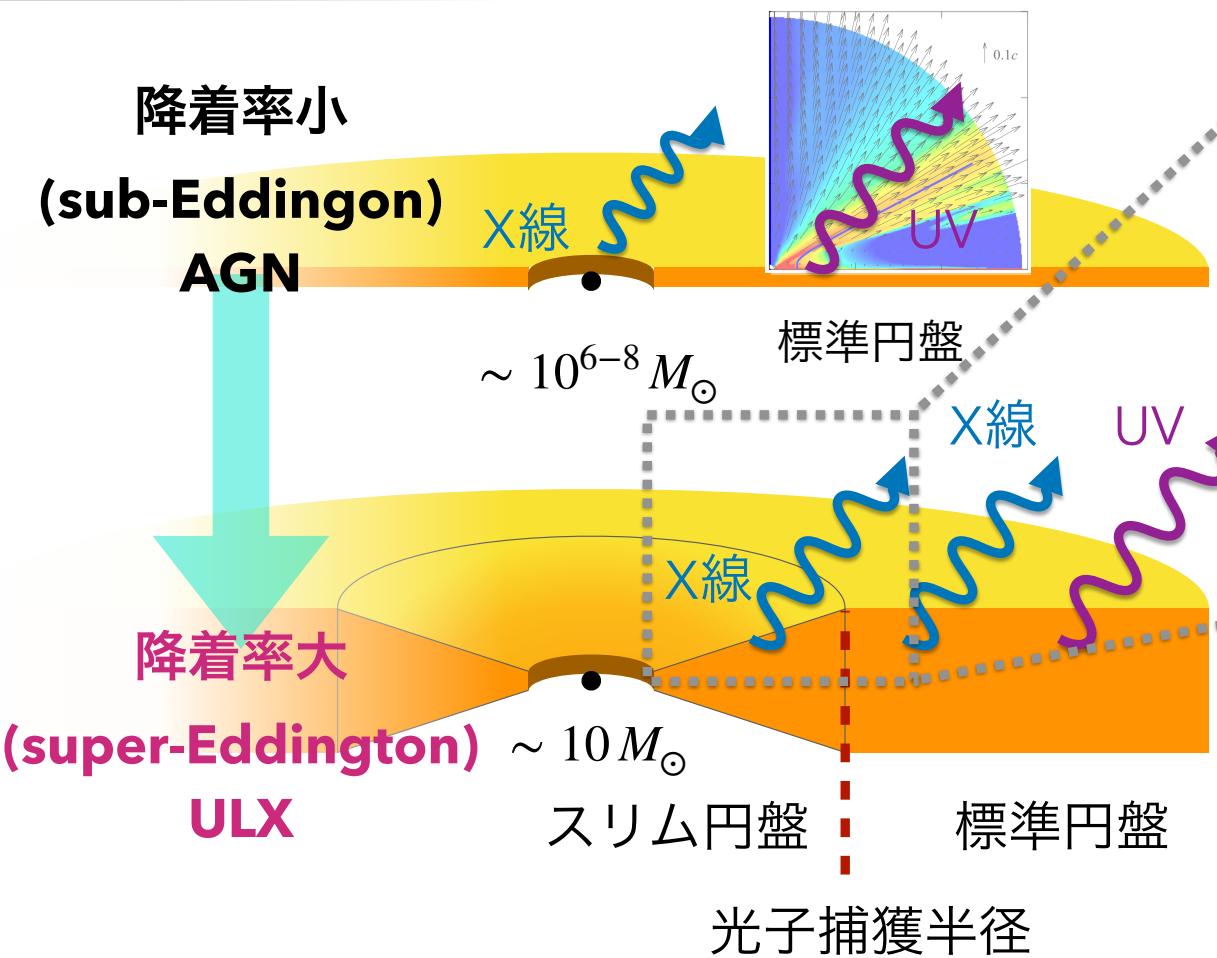
円盤降着とアウトフロー

電子散乱による輻射力加速 \times



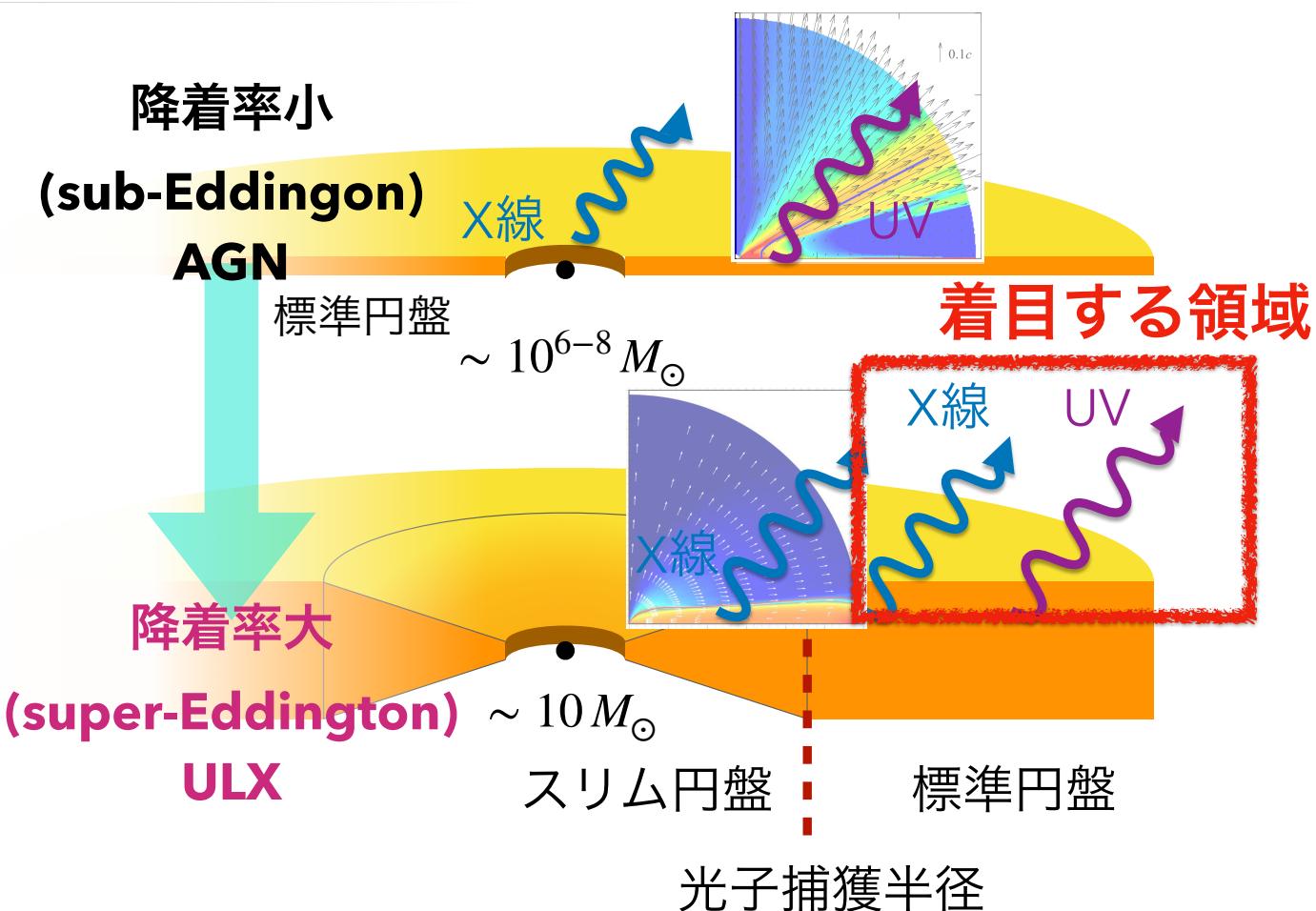
- ◆ ラインフォース（金属元素による束縛-束縛遷移吸収） 加速
- ◆ X線 → 加速を妨げる

円盤降着とアウトフロー



- ◆ 電子散乱による輻射力加速
- ◆ 光子捕獲半径より内側
(スリム円盤) で発生

本研究の目的



超臨界降着流外縁での質量降着・放出過程はブラックホールへの質量輸送において重要

→ 標準円盤領域においてラインフォース駆動型円盤風が噴出するかを検証し、質量降着への影響を解明する。

計算手法：輻射流体シミュレーション

- ♦ Mass conservation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

- ♦ Equations of motion

$$\frac{\partial(\rho v_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_r \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho \left[\frac{v_\theta^2}{r} + \frac{v_\phi^2}{r} + g_r + f_{\text{rad}, r} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho v_\theta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\theta \mathbf{v}) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho \left[-\frac{v_r v_\theta}{r} + \frac{v_\phi^2}{r} \cot \theta + g_\theta + f_{\text{rad}, \theta} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho v_\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\phi \mathbf{v}) = -\rho \left[\frac{v_\phi v_r}{r} + \frac{v_\phi v_\theta}{r} \cot \theta \right]$$

- ♦ Energy equation

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(\frac{1}{2} v^2 + e \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \mathbf{v} \left(\frac{1}{2} v^2 + e + \frac{p}{\rho} \right) \right] = \rho \mathbf{v} \cdot (\mathbf{g} + \mathbf{f}_{\text{rad}}) + \rho \mathcal{L}$$

Radiation force

Radiative heating/cooling

radiation force due to
Thomson scattering

$$f_{\text{rad}} = \frac{\sigma_e F_{\text{UV}}}{c} + \frac{\sigma_e F_{\text{UV}}}{c} \frac{M}{T}$$

force multiplier

Stevens & Kallman (1990)

ionization parameter $\xi = 4\pi F_X/n$

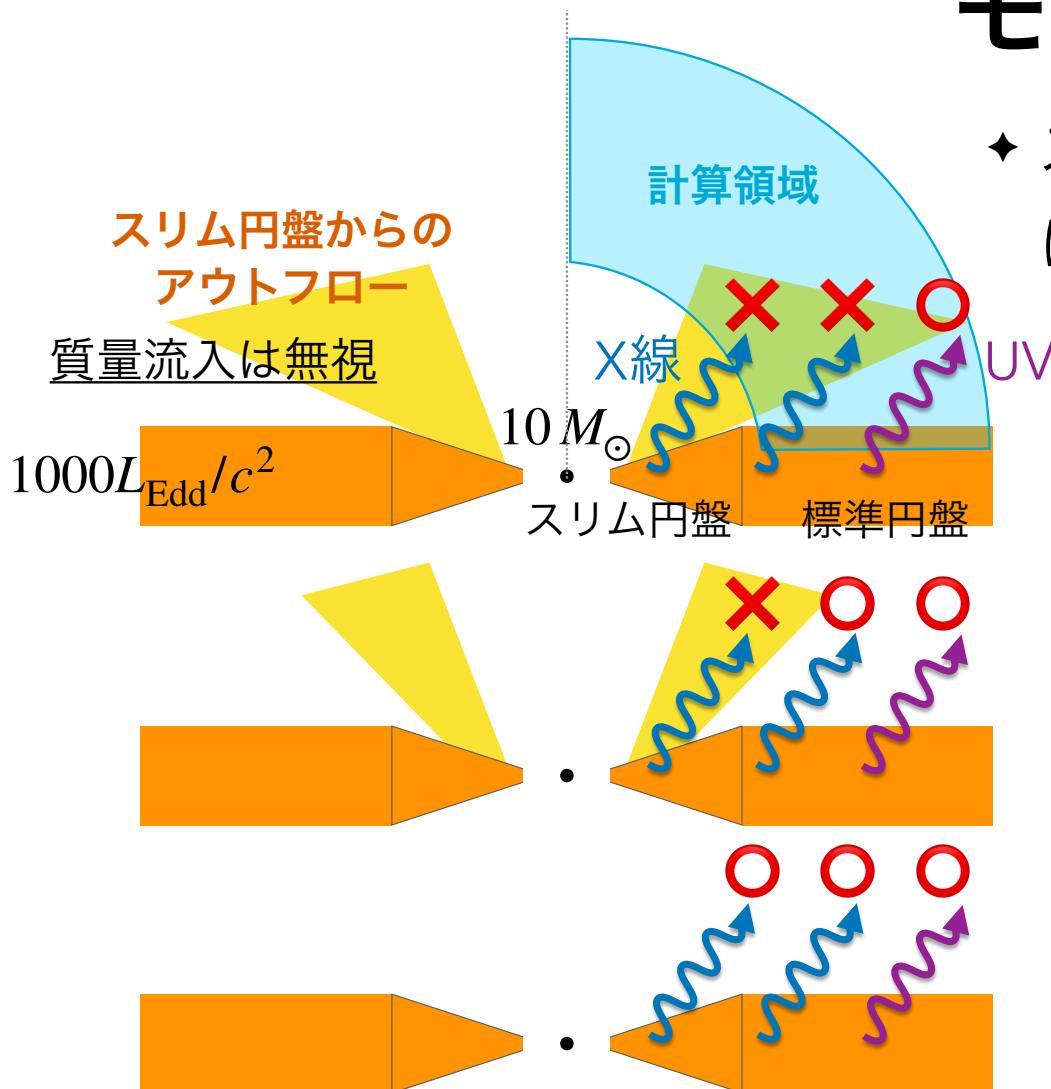
density $\rho \Rightarrow M$

velocity gradient $\left| \frac{dv}{dr} \right|$

assuming solar metallicity

モデル

- ◆ スリム円盤領域のアウトフローによるX線遮蔽効果をモデル化



Model 1. スリム円盤・標準円盤高温部からのX線を遮蔽 (UV放射のみ考慮)

Model 2. スリム円盤からのX線を遮蔽
UV放射、標準円盤高温部からのX線
(100 eV以上の放射)を考慮

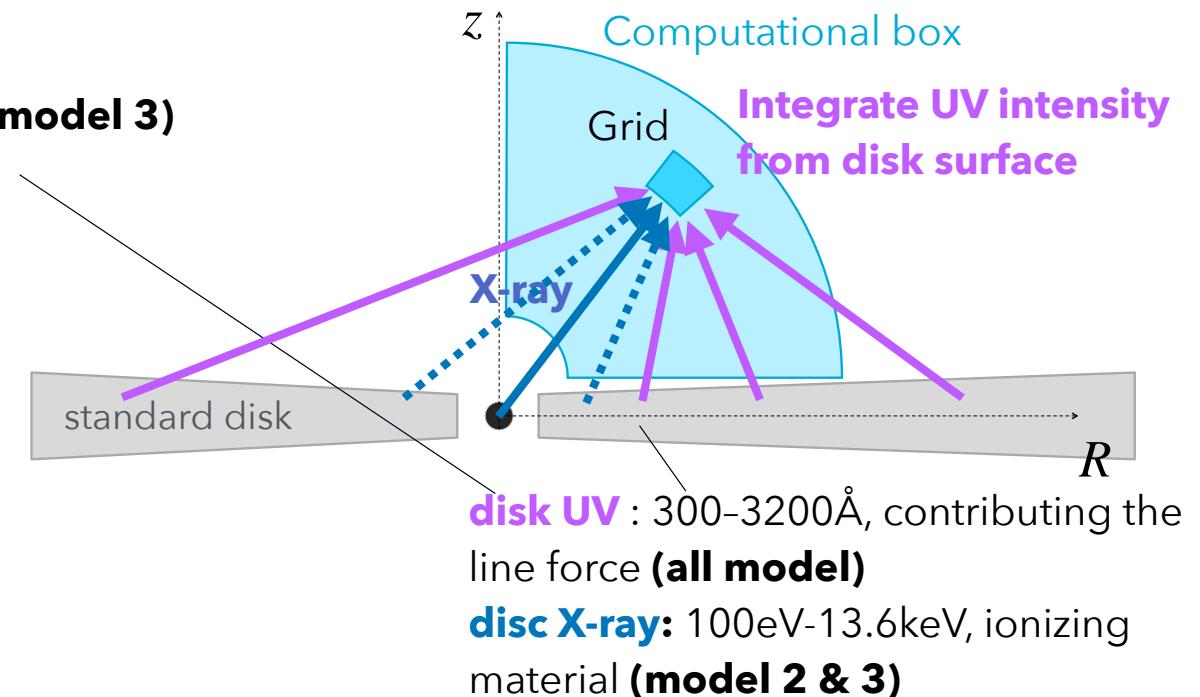
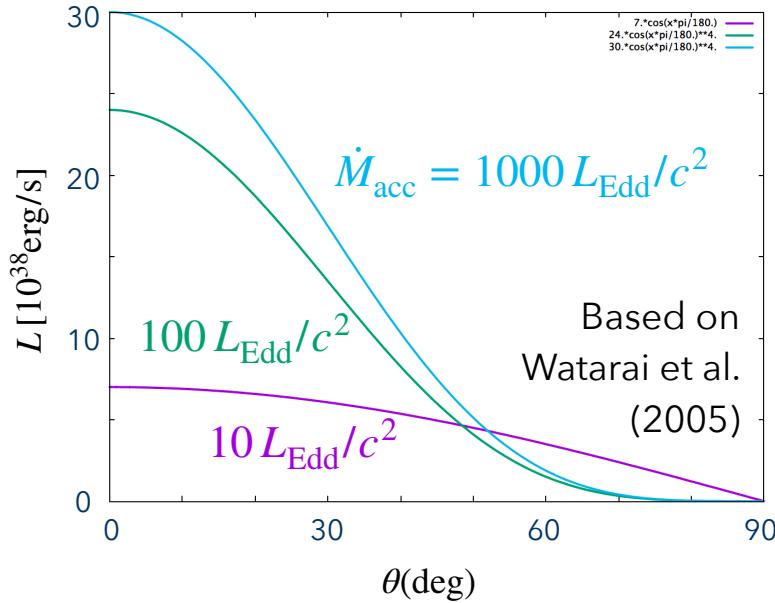
Model 3. アウトフローなし
スリム円盤・標準円盤起源のX線
・ UV放射を考慮

モデル

- ◆ The radiation is divided into **X** and **UV** according to its effect on the line force.
- ◆ Standard disc surface is set to the boundary and the accretion flow is not calculated.

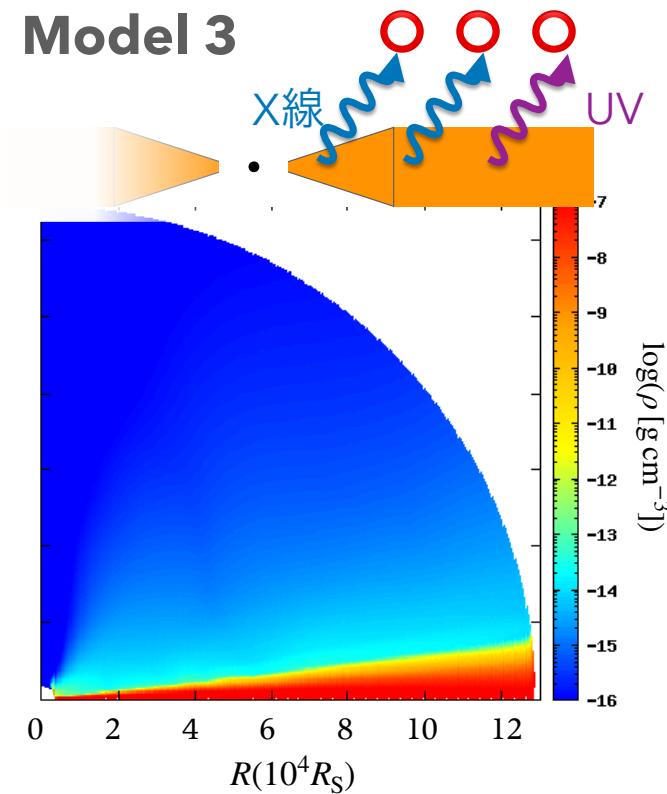
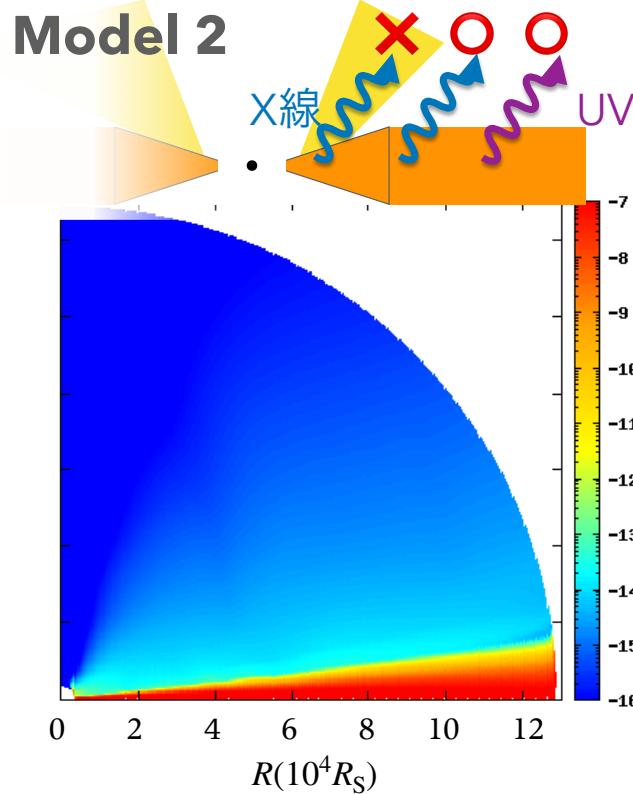
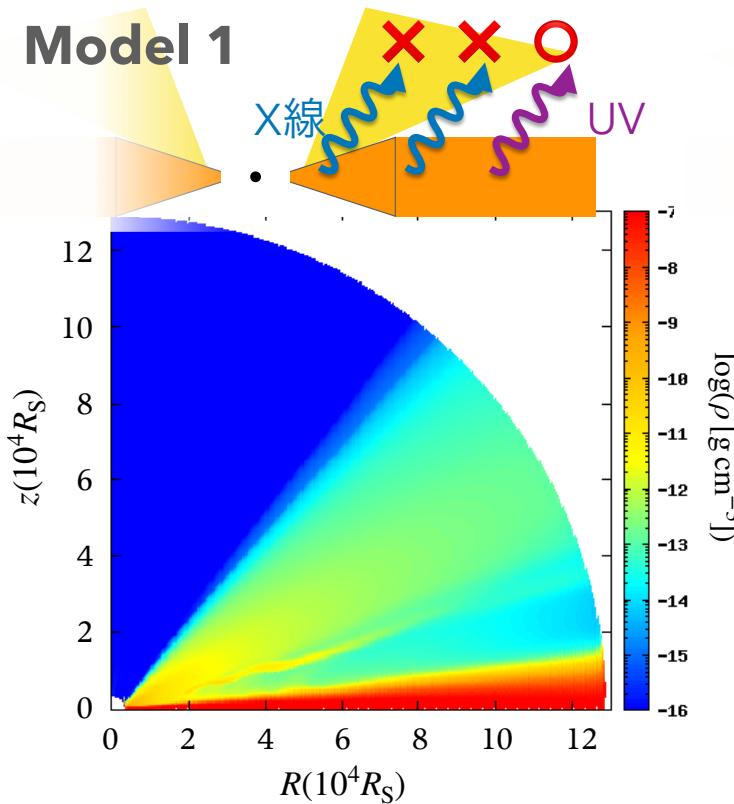
X-ray source (Slim disc):

Point source with angle dependence (**model 3**)



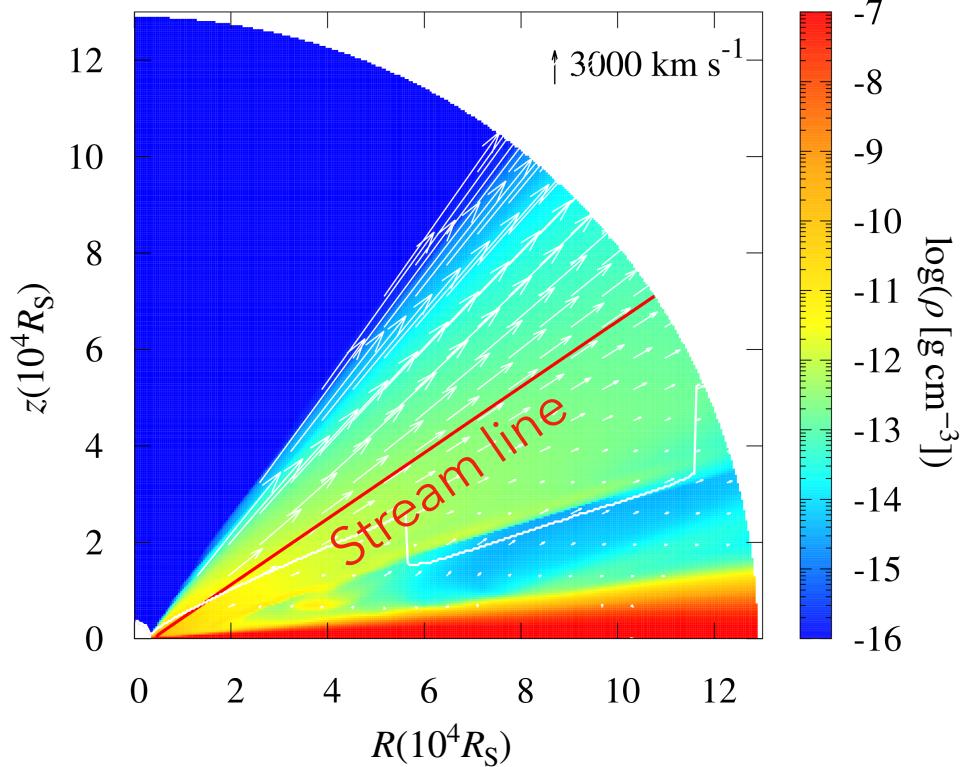
結果

$$\dot{M}/(L_{\text{Edd}}/c^2) = 1000$$

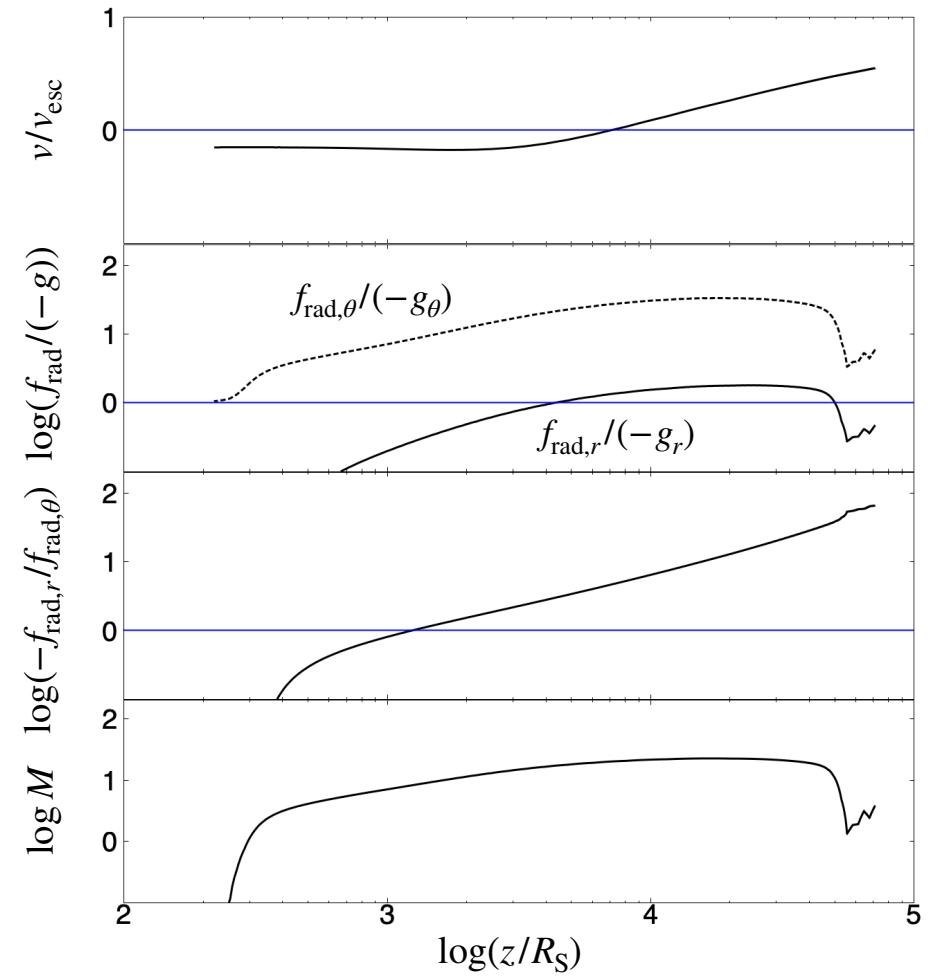


- ◆ 標準円盤起源のX線が遮蔽されるか否かで密度分布が大きく異なる
- ◆ スリム円盤起源のX線は極方向に集中 → 円盤風の構造に影響を与えない。

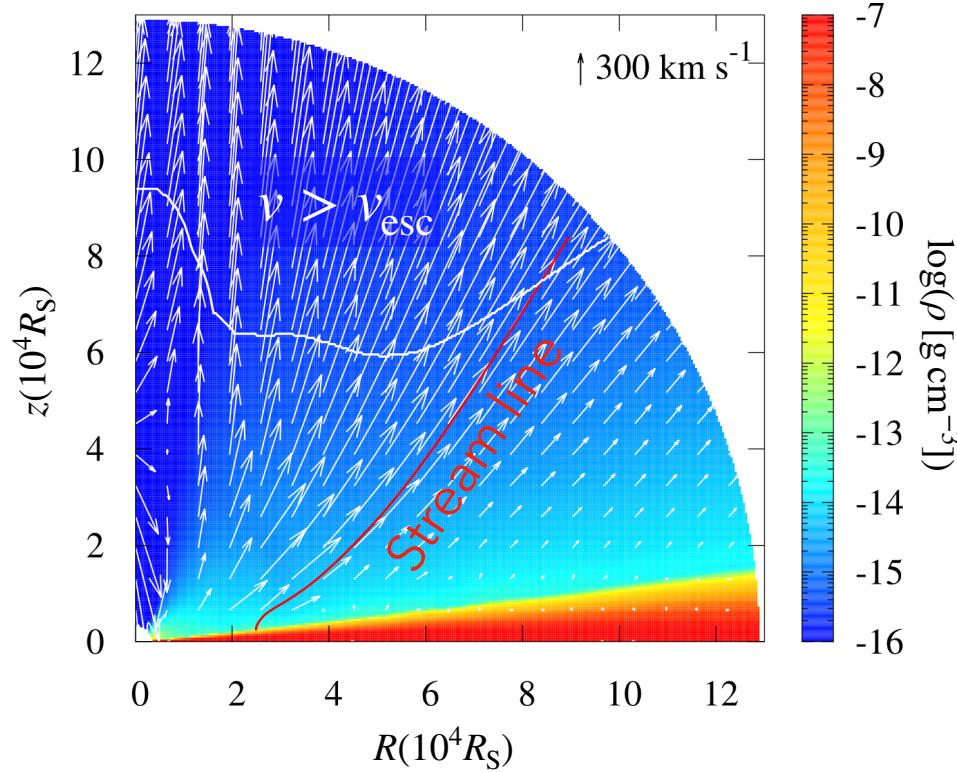
加速メカニズム (model 1)



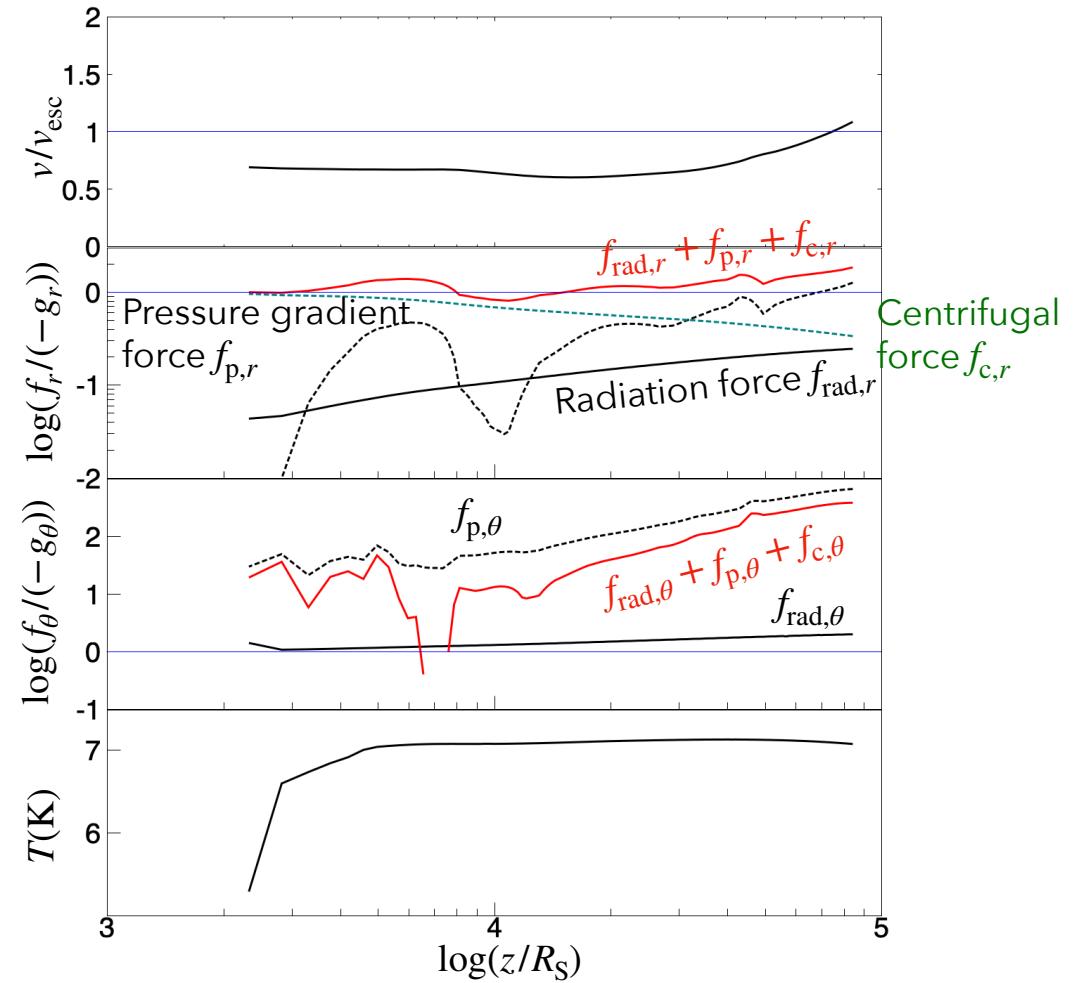
X線を考慮しないため低電離度状態
→ ラインフォースによるwind加速



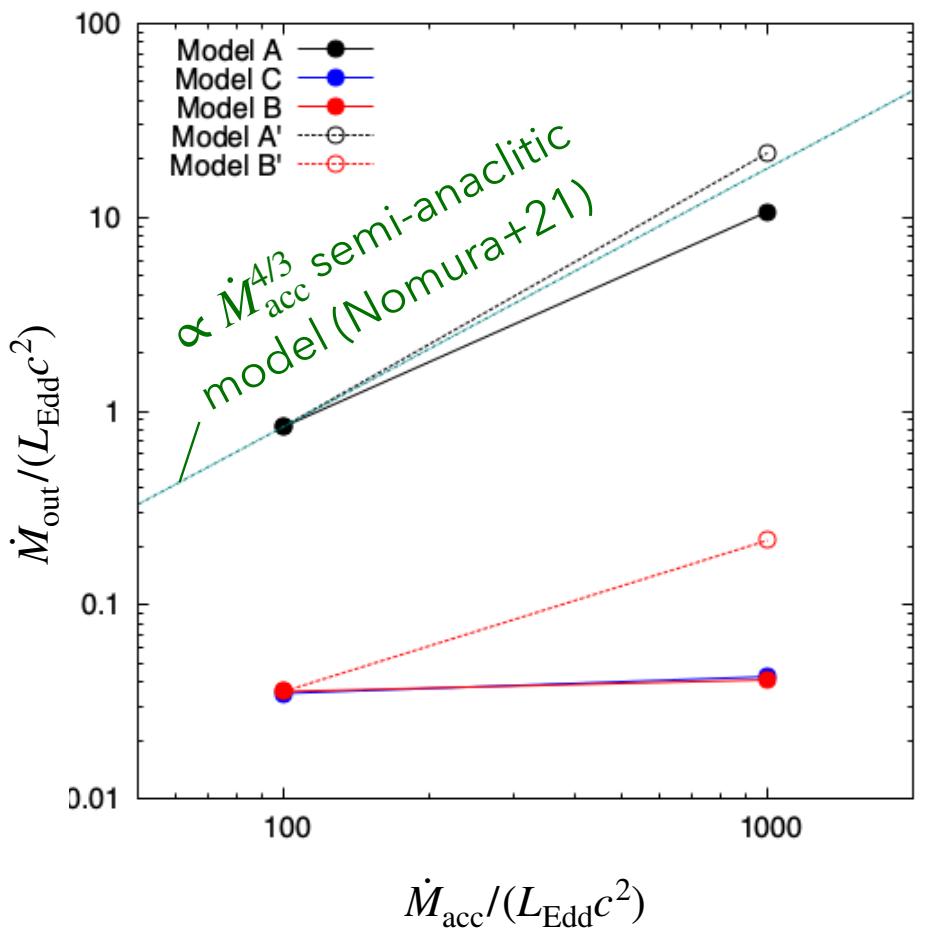
加速メカニズム (model 3)



X線による加熱で温度上昇
→ガス圧でwindを加速

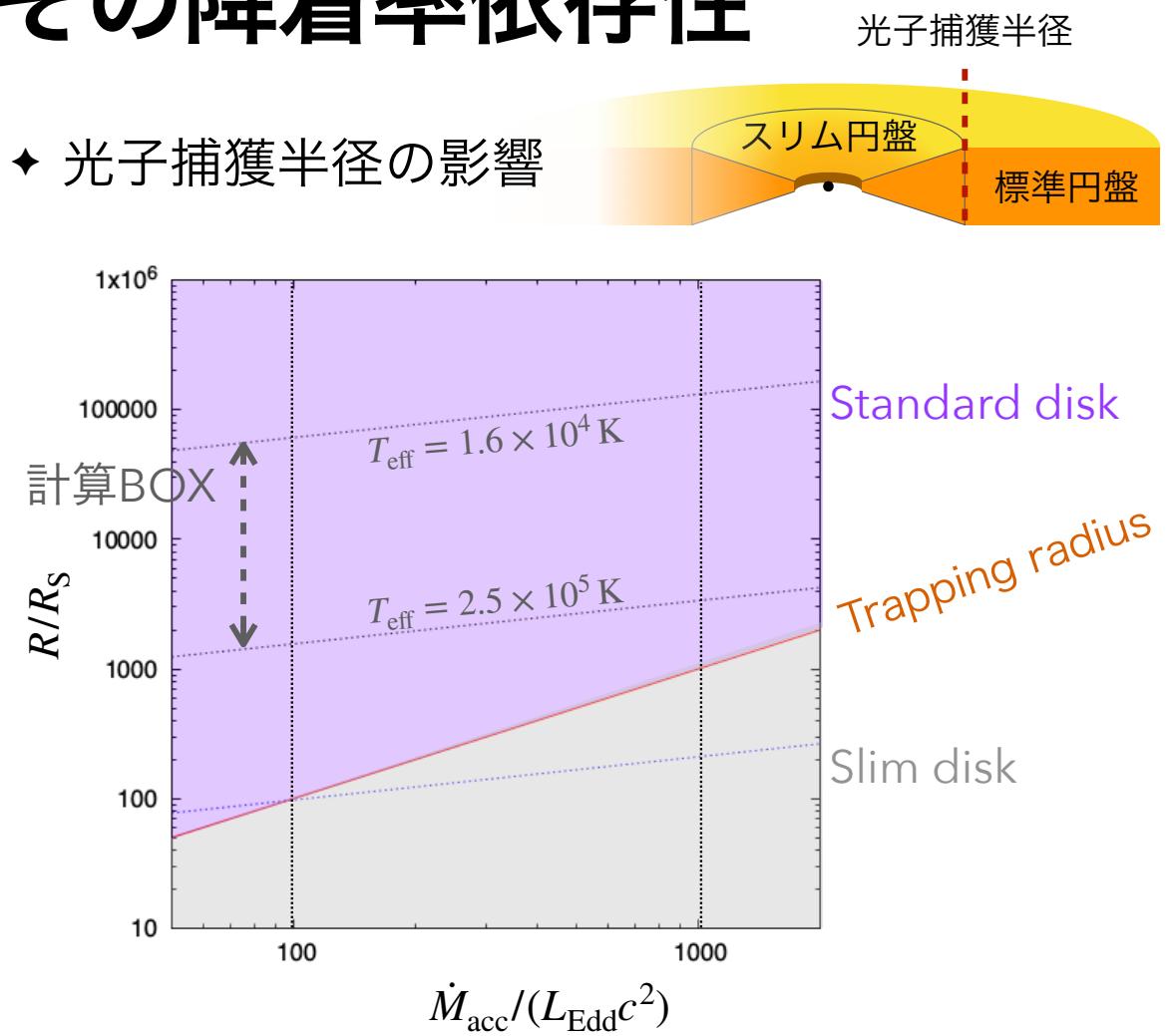
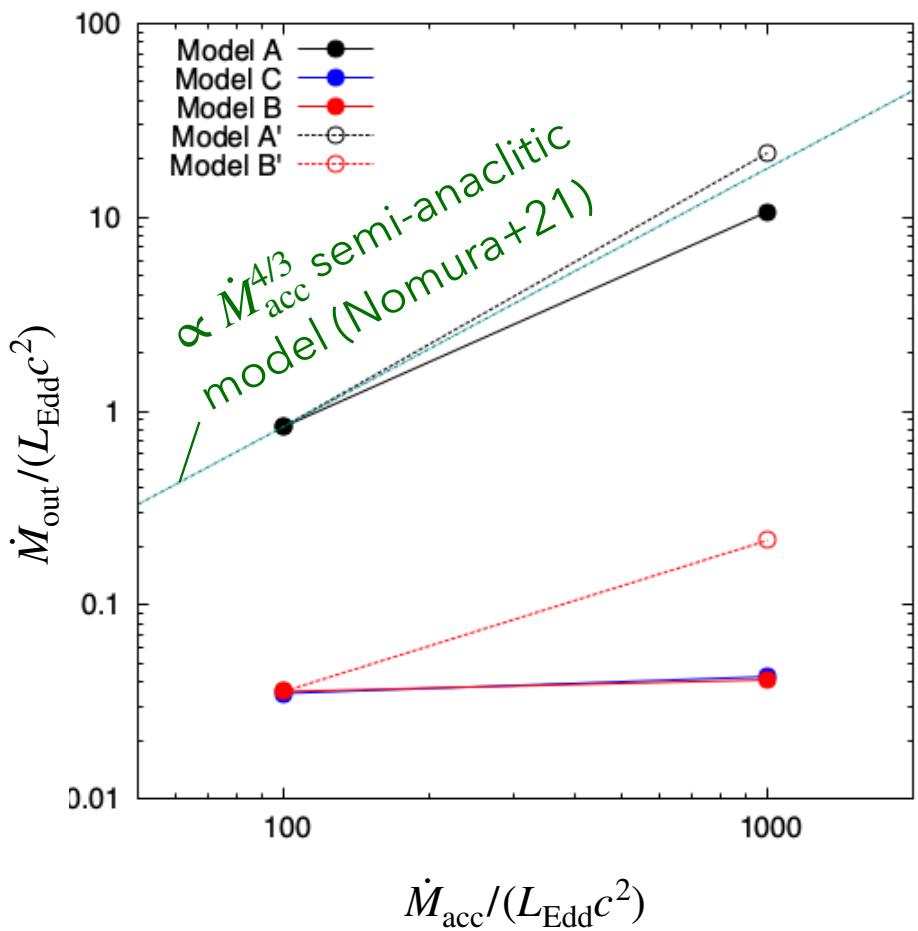


質量放出率とその降着率依存性

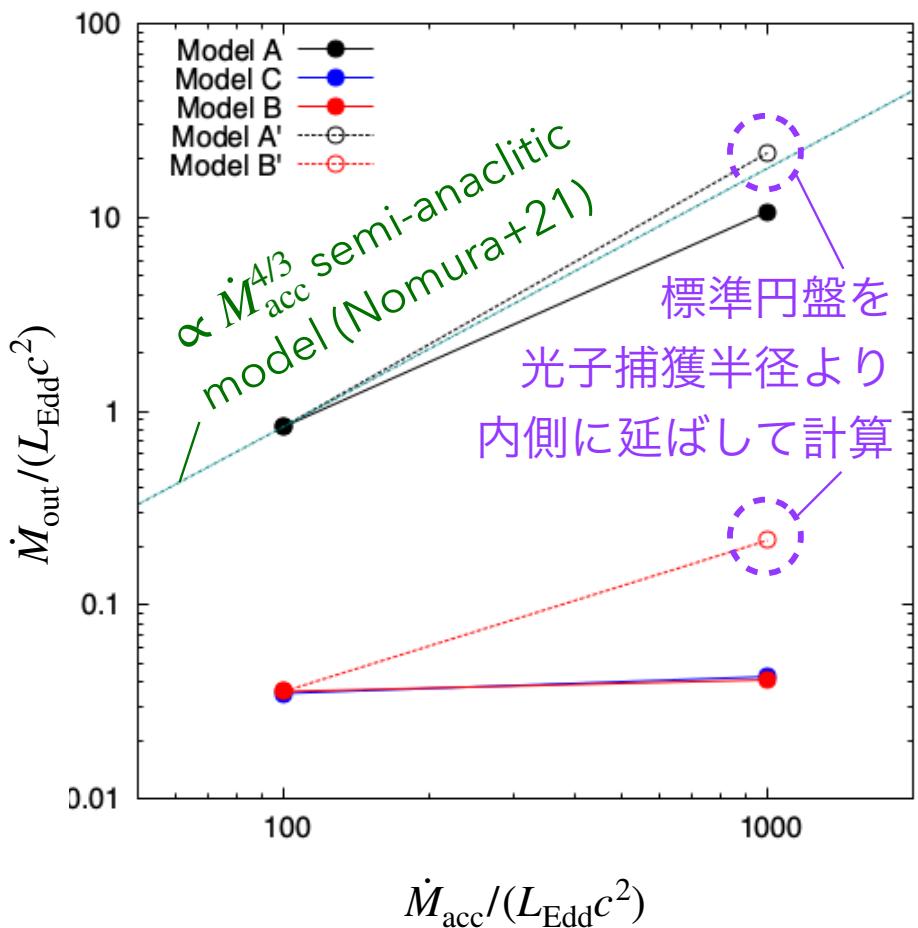


- ◆ 全てのモデルで質量放出率は降着率の $\sim 1\%$ 未満 \rightarrow 質量降着を妨げない
- ◆ Model A, Bの結果はほぼ同じ
 \rightarrow スリム円盤起源のX線は質量放出率にほぼ影響しない

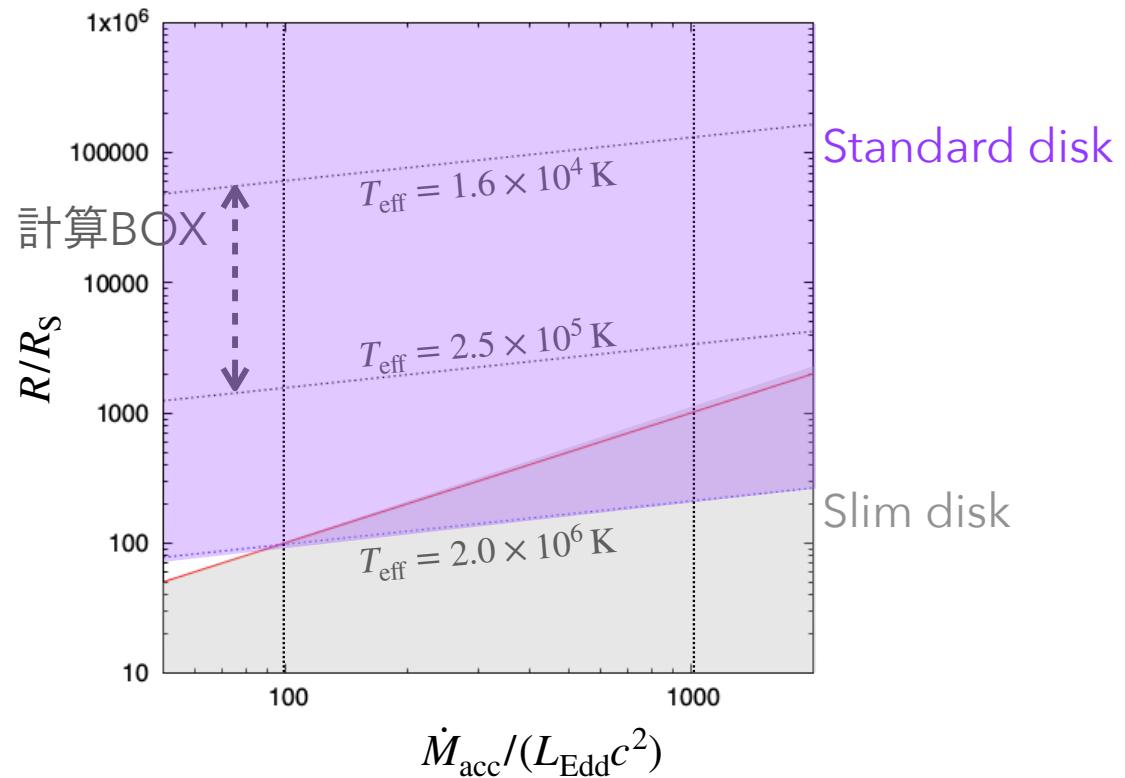
質量放出率とその降着率依存性



質量放出率とその降着率依存性



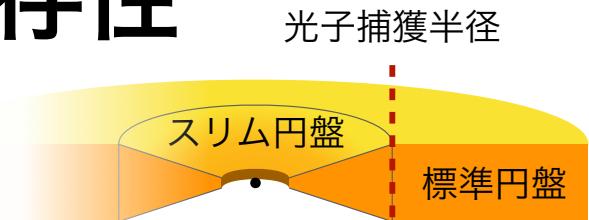
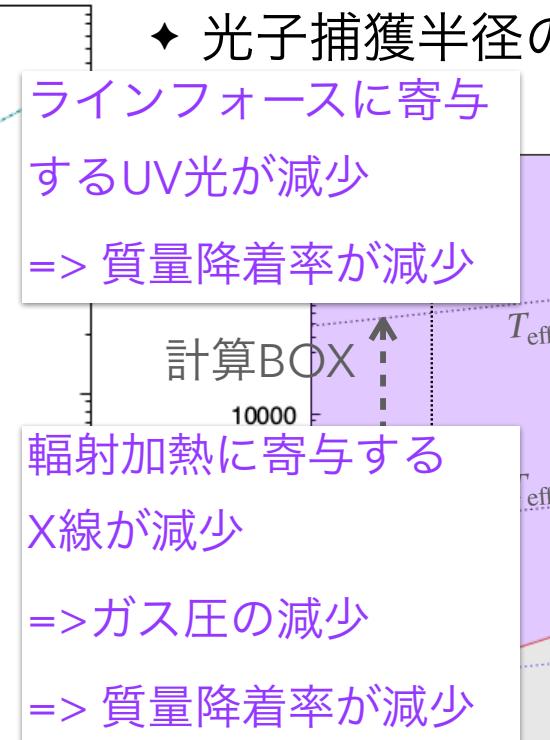
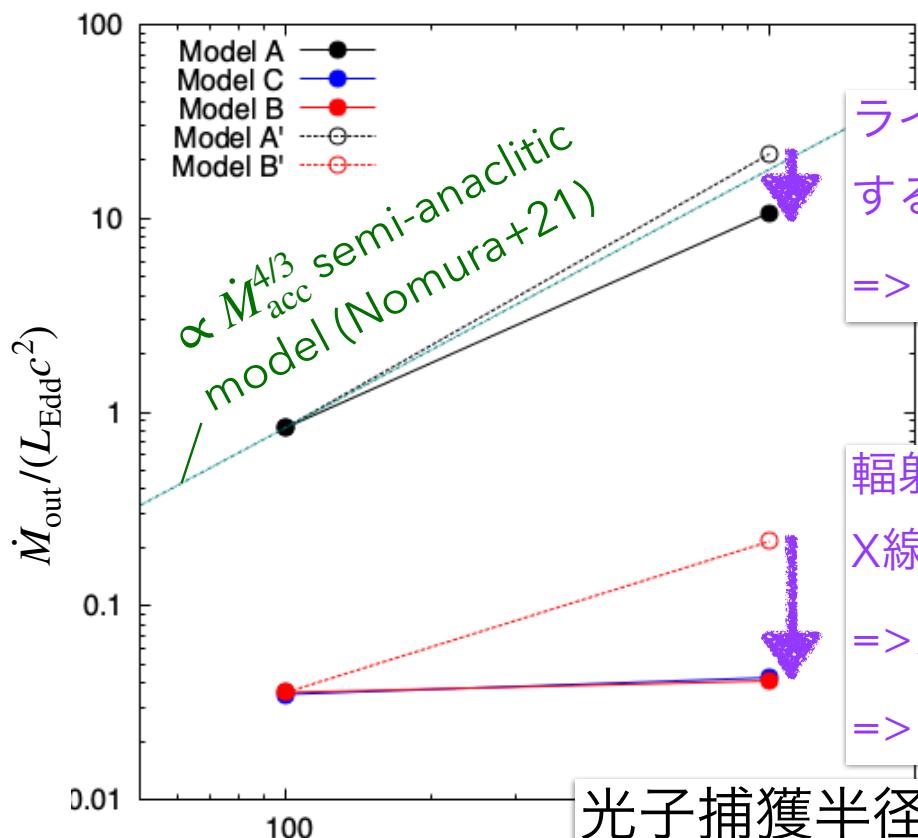
◆ 光子捕獲半径の影響



光子捕獲半径

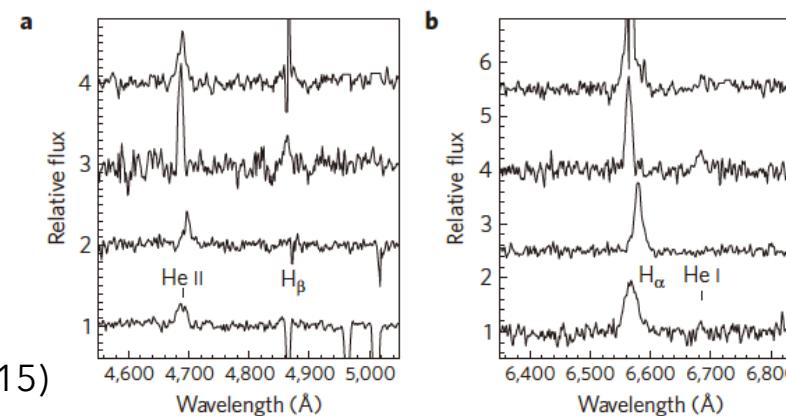
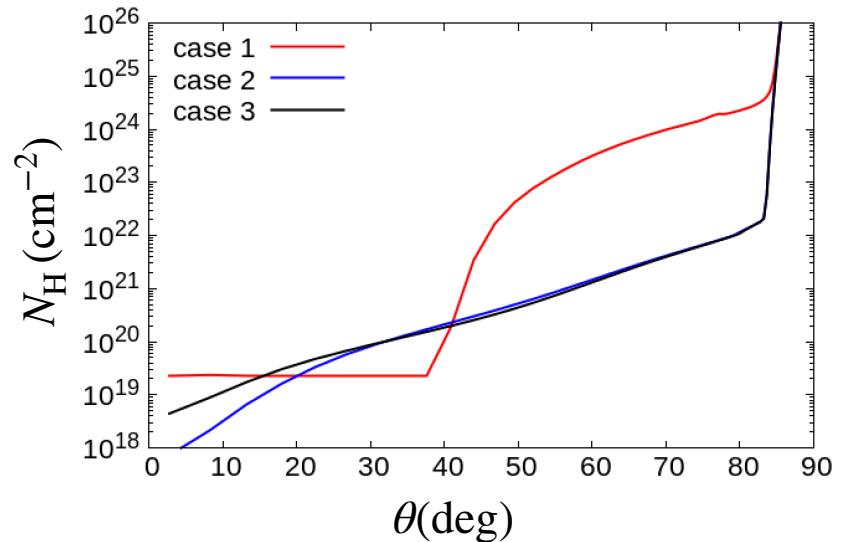


質量放出率とその降着率依存性

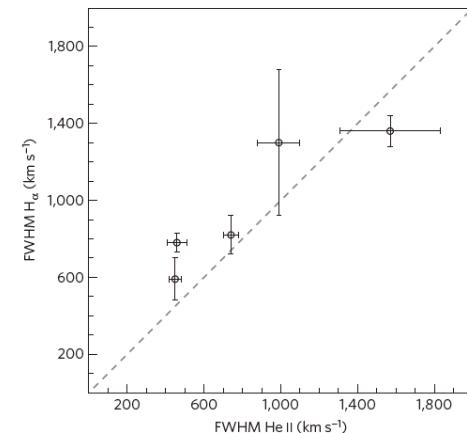


観測への示唆

- ♦ 柱密度分布
 - 柱密度（特にModel 1で）大きい
→ 埋もれたsuper-Eddington天体？ULS？
- ♦ ULXの低速アウトフローを再現？
 - model Aのような条件が実現すれば
~1000 km/sのアウトフローが再現できる？



Fabrika et al. (2015)



まとめ

- ◆ 超臨界降着円盤外縁部において、ラインフォース駆動型円盤風が噴出するか否かを検証

$$\dot{M}_{\text{acc}} = 1000(L_{\text{Edd}}/c^2) \text{ の場合}$$

Model	X線	円盤風の平均速度 (km s ⁻¹)	質量放出率 (L_{Edd}/c^2)	加速メカニズム
1	考慮なし	~3,800	~10	ラインフォース
2	標準円盤	~210 < 脱出速度	~0.04	ガス圧
3	標準+スリム円盤	~380 < 脱出速度	~0.04	ガス圧

- ◆ いずれのモデルもブラックホールへの超臨界降着流を妨げない。
- ◆ 質量降着率に対する依存性は光子捕獲半径の影響により弱められる
- ◆ より現実的なアウトフロー構造や、観測との比較を行うためにはブラックホール近傍から流入してくるアウトフローの密度・速度を考慮して計算する必要