

# ブラックホール超臨界降着流・アウトフローの 輻射スペクトル：超高光度X線源への応用

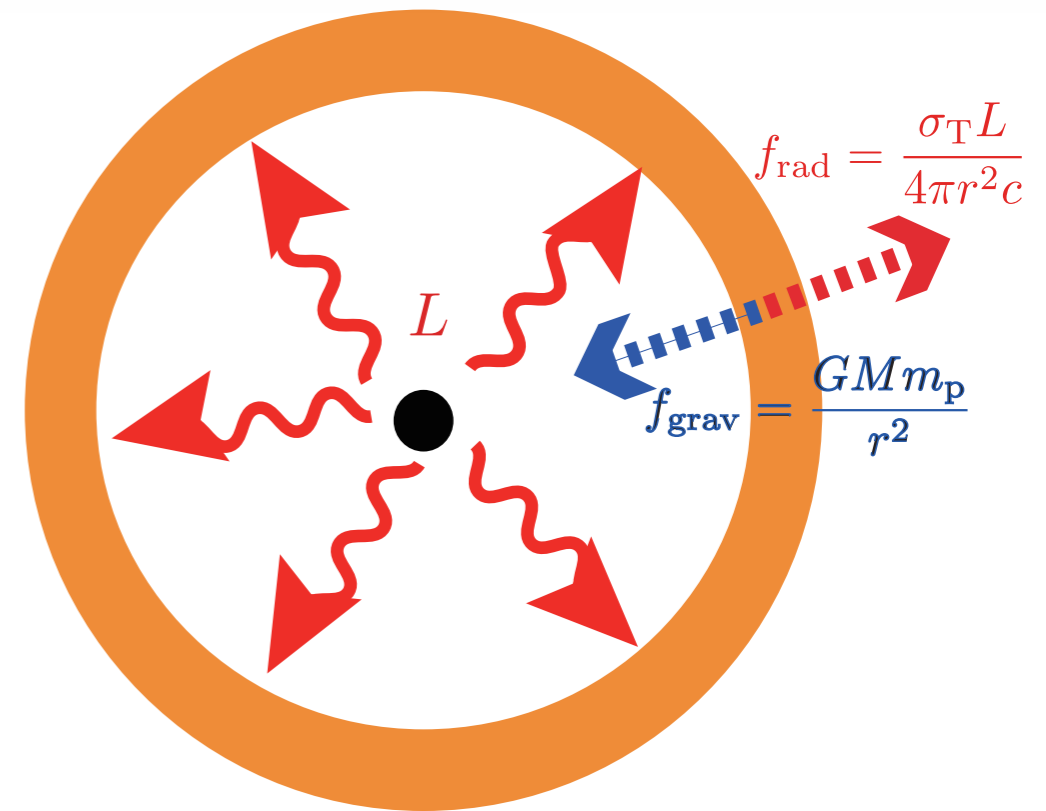
川島 朋尚

国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト

共同研究者：大須賀 健 (国立天文台), 嶺重 慎(京大), 吉田 鉄生 (国立天文台),  
松元 亮治(千葉大), 高橋 博之(国立天文台)

# 超臨界降着流とは

- 球対称降着：  
亜エディントン放射( $L < L_E$ )のみ可能  
( $L_E$ : エディントン光度)

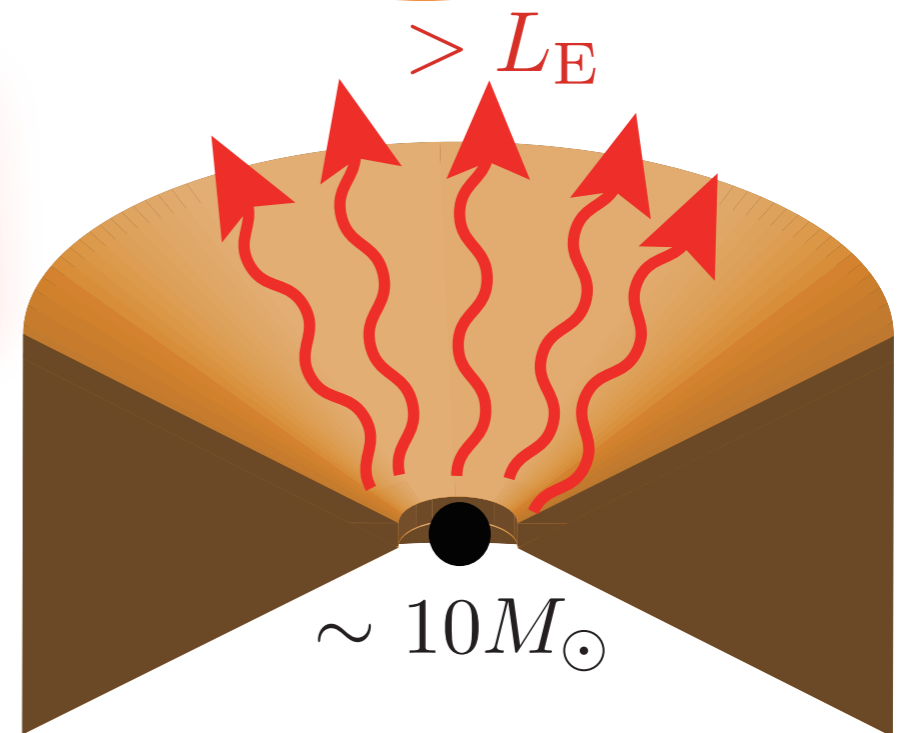


- 円盤降着：  
非等方放射

超臨界降着( $\dot{M} > L_E/c^2$ )および  
超エディントン放射( $L \gtrsim L_E$ )は可能

(Ohsuga et al. 2005, 2007等)

- 候補天体：  
超高光度X線源, 潮汐破壊事象(Swift J1644-57), NLS1, SS433, GRS1915+105(?)等

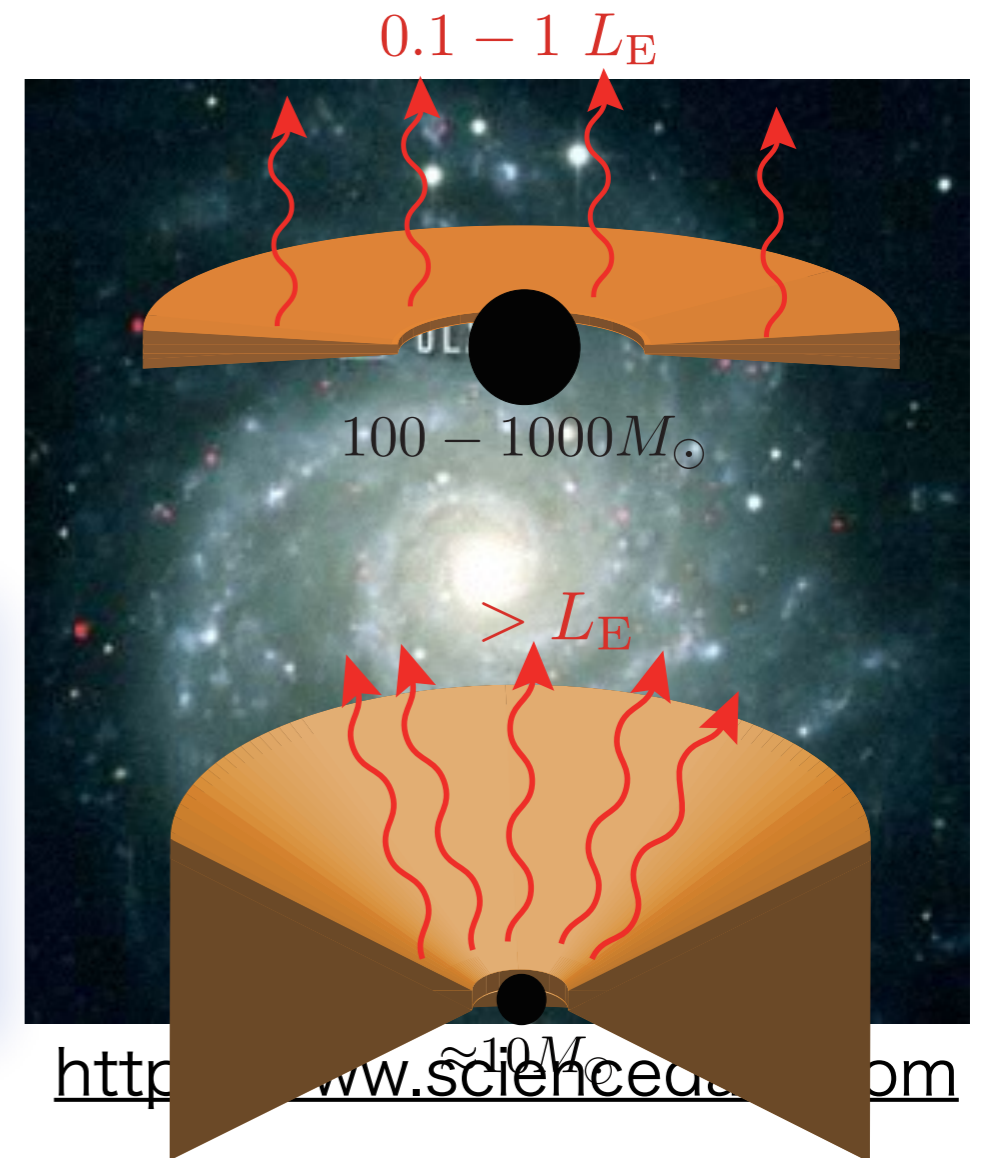


# 超高光度X線源 (ULXs)

- 近傍銀河で観測される、恒星質量BHのエディントン限界を超える光度のX線点源
- 光度： $L_X = 10^{39-41} [\text{erg}\cdot\text{s}^{-1}]$   
 $> L_E$  for  $10M_\odot$

→ (A) 中間質量BHへの亜臨界降着  
or  
(B) 恒星質量BHへの超臨界降着

モデルの正否は未決着

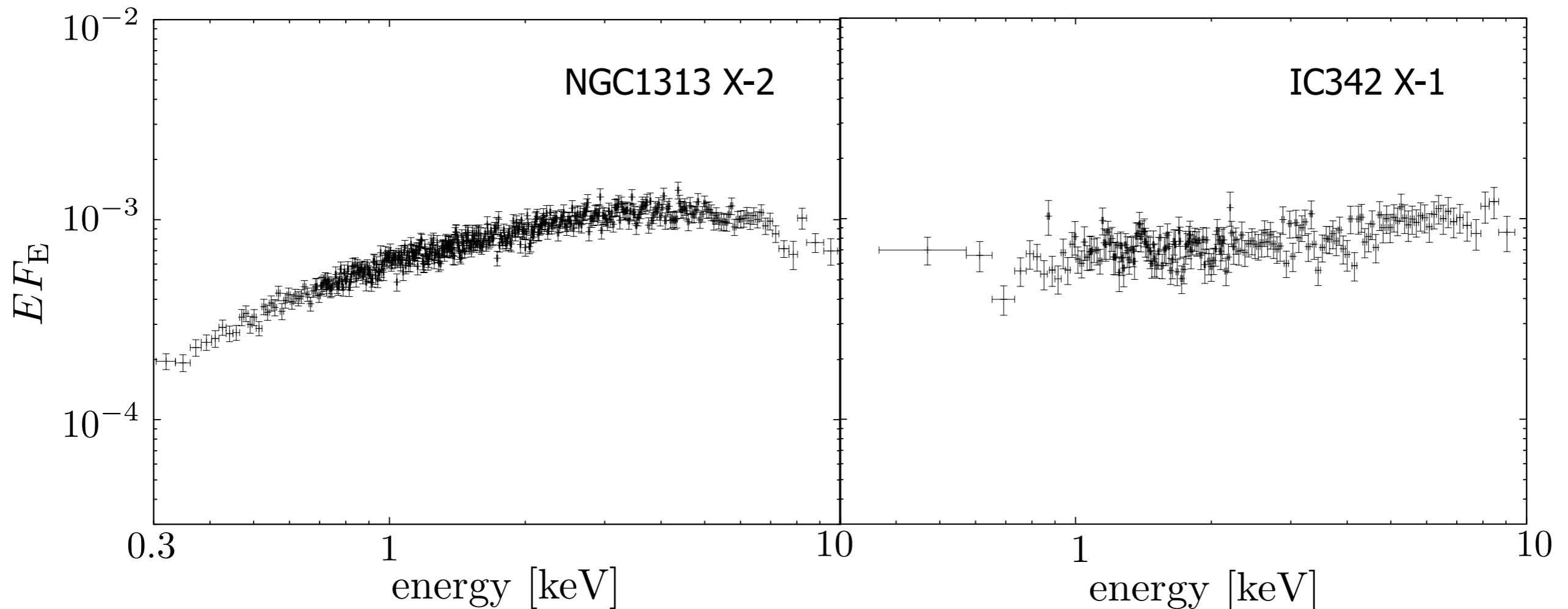


これまでの降着円盤の理論的・観測的研究からエディントン比に対応したスペクトル状態の存在が示されている

スペクトル状態からエディントン比を推測 → BH質量を推測

# ULXのX線スペクトル - 謎のスペクトル状態 -

XMM-Newtonによる (吸収補正後の) 観測データ (Gladstone et al. 2009)



ULXは硬いPL成分をもち,そのPLは

(1) ~5 keVでrolloverするか (2) 10 keV以上まで延びる.



新スペクトル状態

- 超臨界降着流の理論的な輻射スペクトルは依然良くわかっていない.
  - 超臨界降着流では輻射圧駆動アウトフローが噴出しスペクトルに影響を与える可能性大
- ➡ 輻射流体シミュレーションを実施し, post-processにより輻射スペクトルを計算.



# 輻射流体の基礎方程式

• 連続の式:  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$

• 運動方程式:  $\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\vec{\nabla} p - \rho \vec{\nabla} \psi$   $+ \rho \vec{N}$   $+ \frac{\kappa + \sigma}{c} \vec{F}_0$

BH  
重力 α粘性

• ガスエネルギー式:

$\frac{\partial e}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (e \vec{v}) = -p \vec{\nabla} \cdot \vec{v}$   $+ \Phi_{vis}$   $- 4\pi \kappa B + c \kappa E_0$   $- 4\sigma_T n_e c \frac{k_B (T_{gas} - T_{rad})}{m_e c^2} E_0$

粘性加熱

コンプトン散乱

• 輻射エネルギー式:

$\frac{\partial E_0}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (E_0 \vec{v}) = -\vec{\nabla} \cdot \vec{F}_0 - \vec{\nabla} v : \vec{P}_0 + 4\pi \kappa B - c \kappa E_0$   $+ 4\sigma_T n_e c \frac{k_B (T_{gas} - T_{rad})}{m_e c^2} E_0$

• 輻射フラックス:

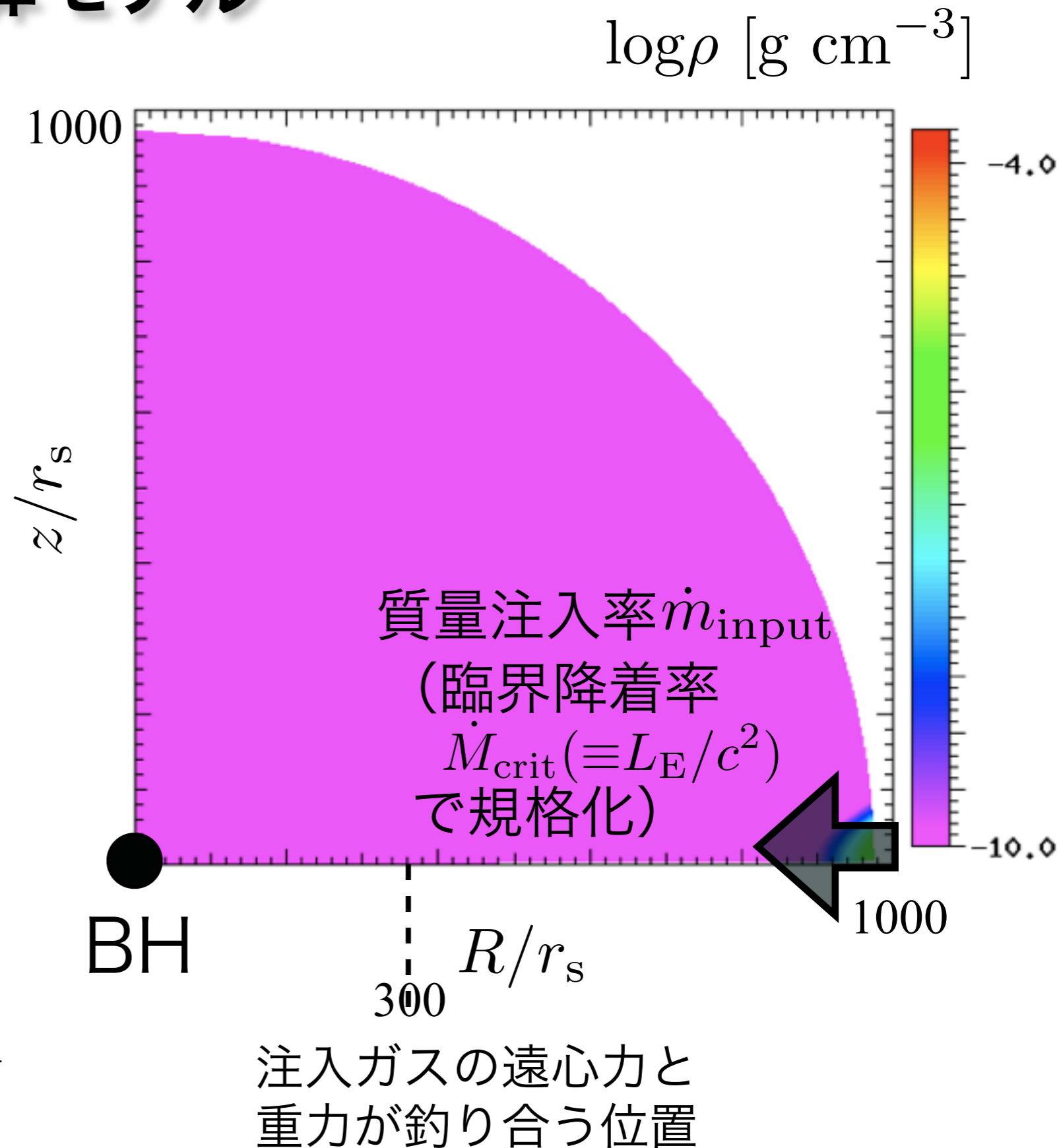
$\vec{F}_0 = -\frac{c\lambda}{\kappa + \sigma} \vec{\nabla} E_0$  ← FLD Approximation

• クロージャ関係:

$\vec{P}_0 = f E_0$

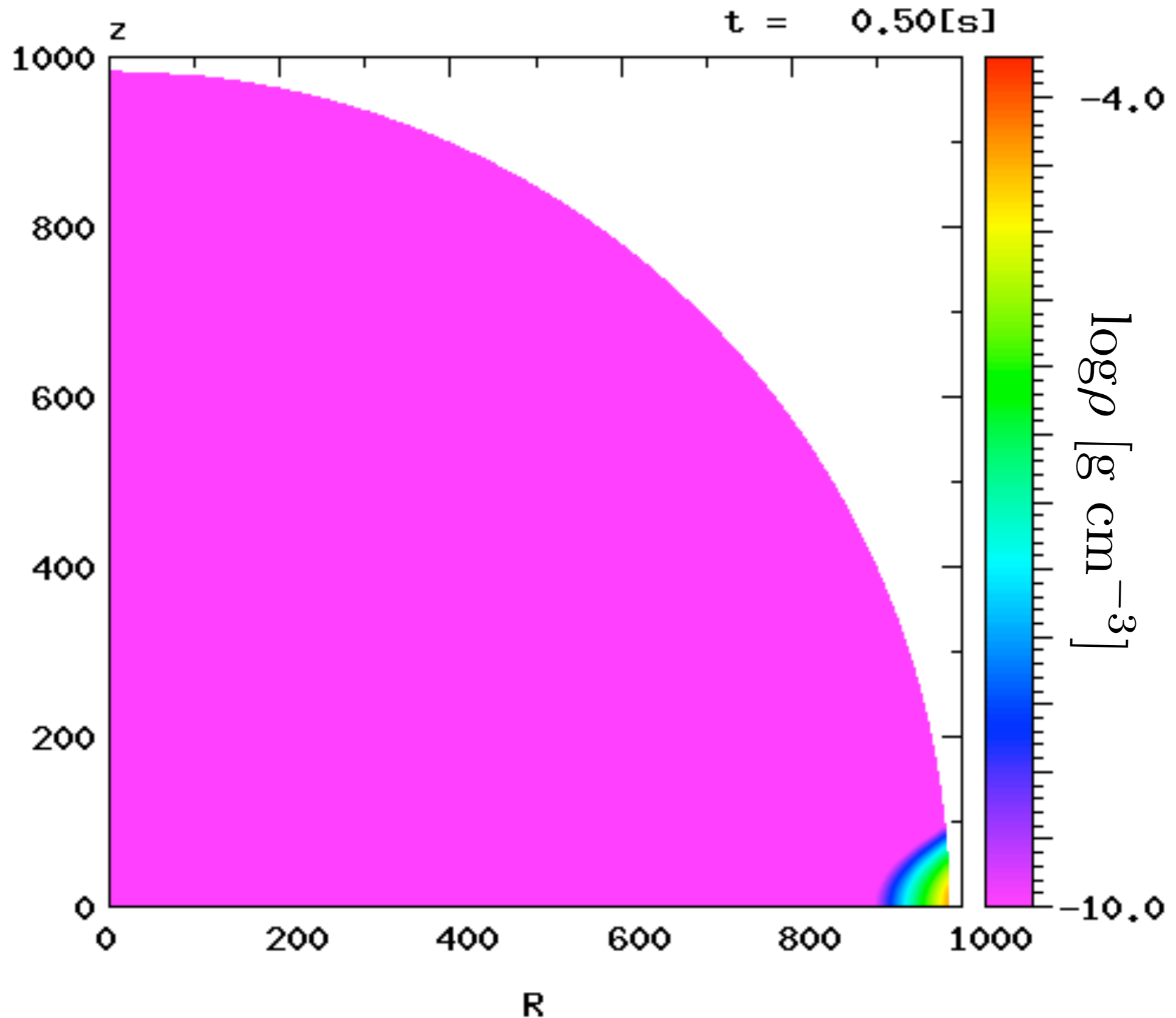
# 計算モデル

- 球座標  $(r, \theta, (\phi))$
- メッシュ数：  
 $(N_r, N_\theta) = (192, 192)$   
ただし  $d \log r = \text{const.}$
- 初期：  
円盤無し。  
円盤は外側境界から、  
ある角運動量を持った  
物質を注入し続ける事  
で作る。
- $M_{\text{BH}} = 10M_\odot$   $\alpha = 0.1$



**movie:**

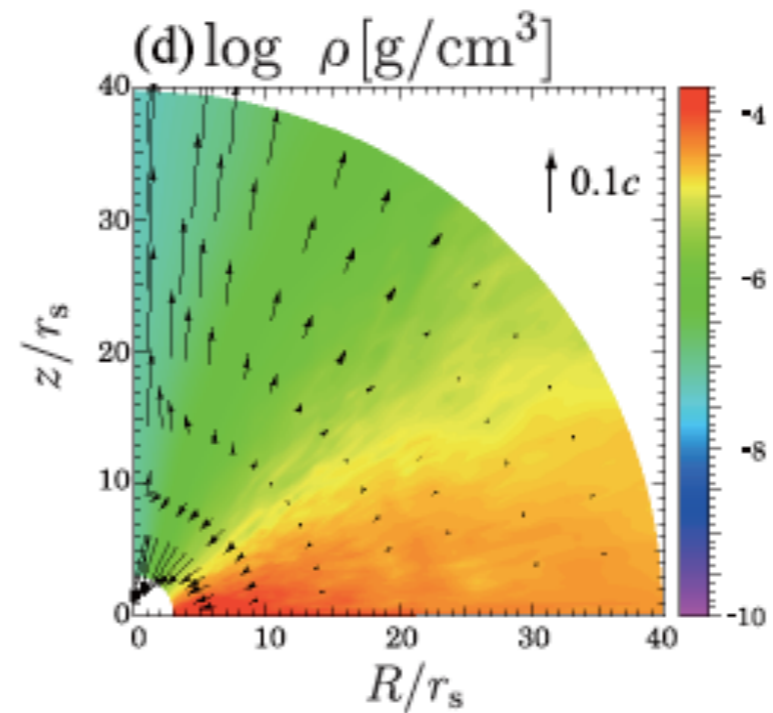
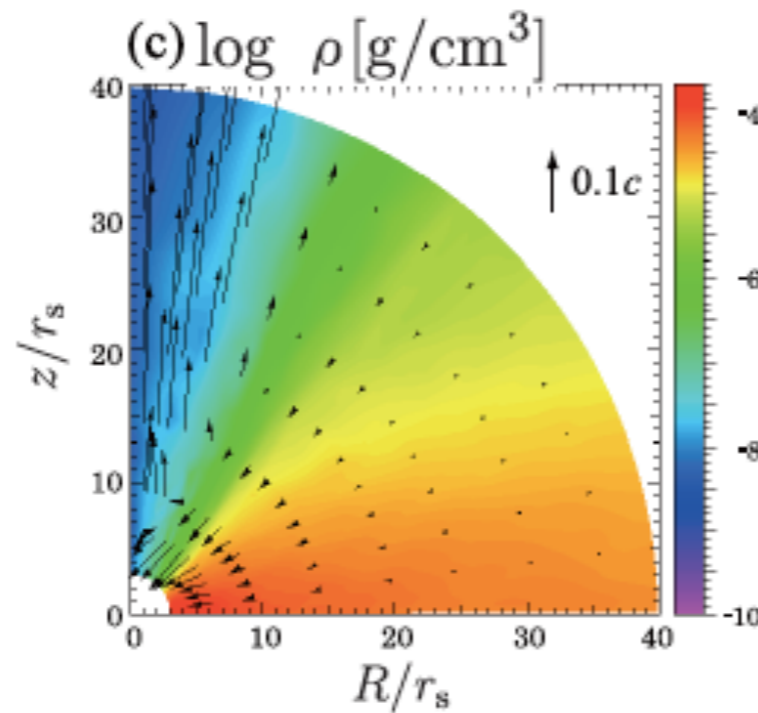
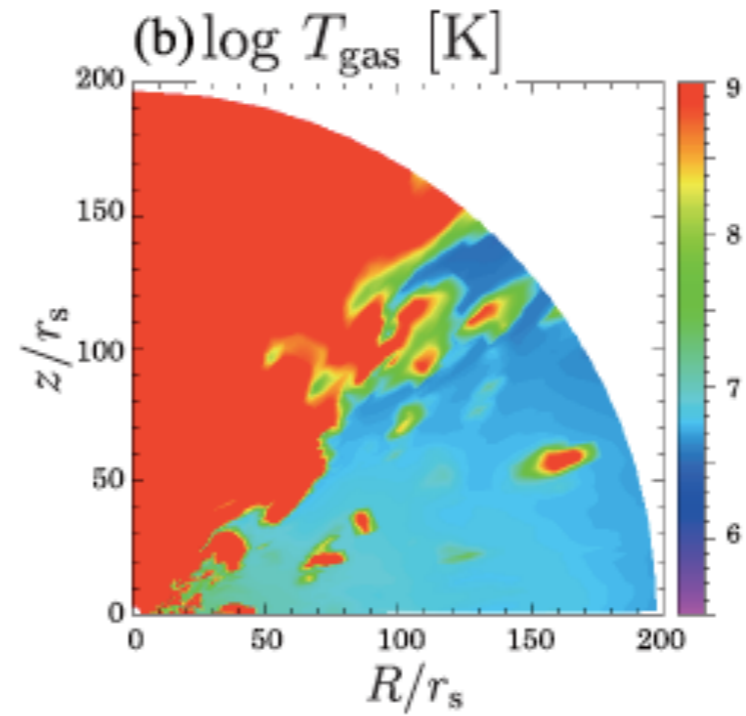
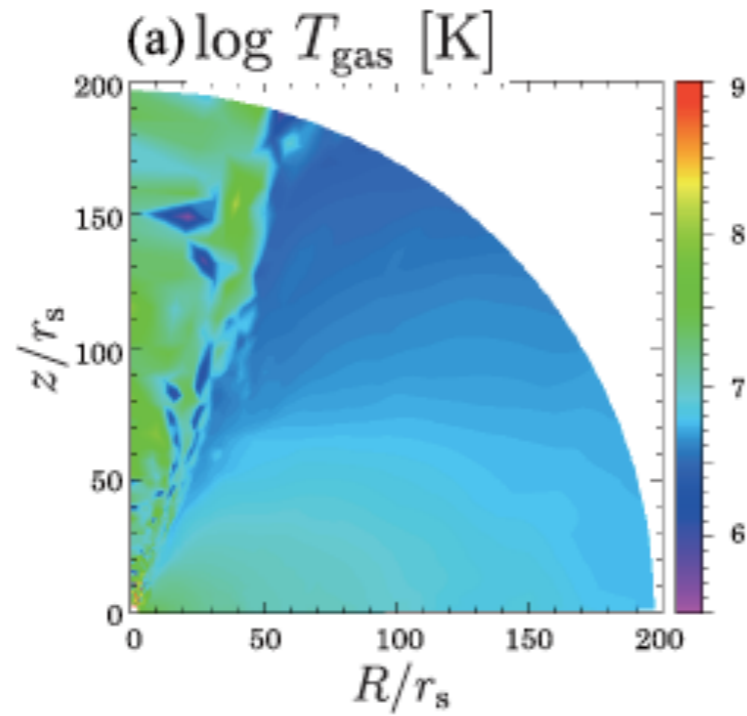
# 準定常的な超臨界降着流と輻射圧駆動アウトフロー形成



# コンプトン冷却の重要性

with Comptonization

without Comptonization

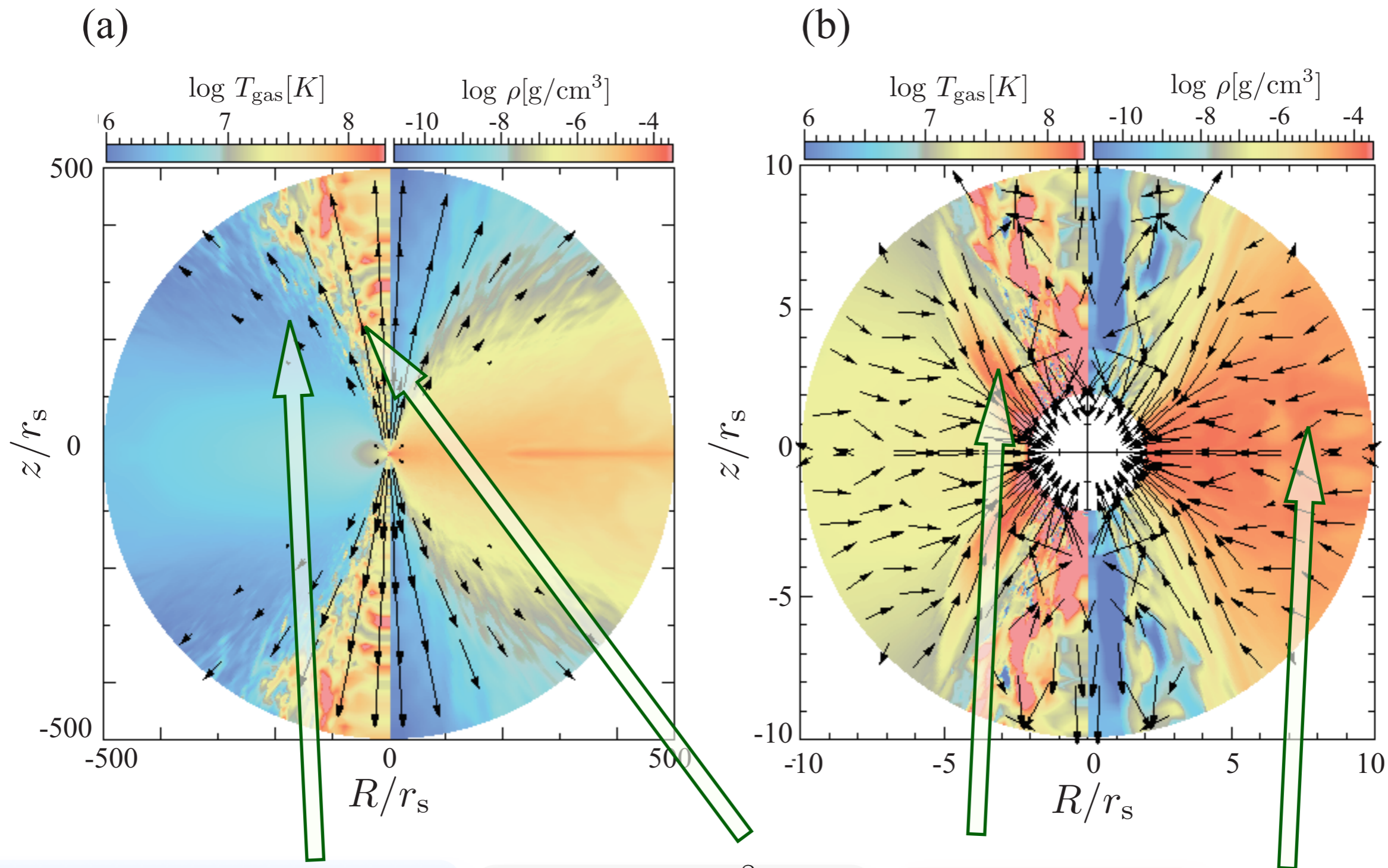


- 逆コンプトン散乱で特にアウトフロー電子温度が有意に低下する。



# 超臨界降着流・アウトフローの構造

- 軸対称2次元輻射流体シミュレーション (コンプトン冷却/加熱 考慮) -



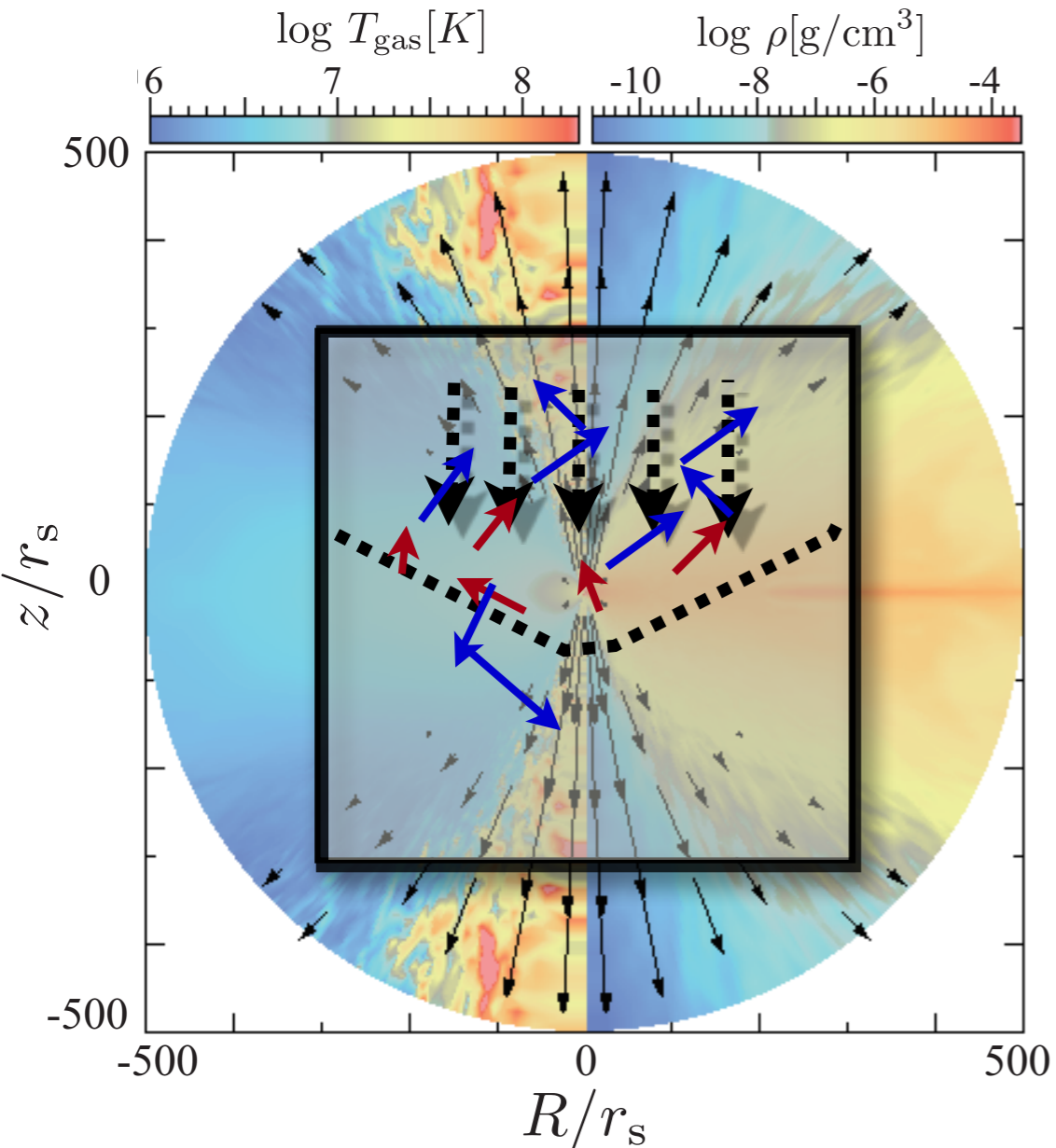
やや低温 ( $10^{6.5-7} K$ ), 高密度  
低速 ( $< 10^{-2} c$ ) アウトフロー

やや高温の ( $10^8 K$ ),  
準相対論的ファンネル  
・ジェット

衝撃波加熱領域  
( $10^8 K$ )

輻射圧優勢円盤

# 輻射スペクトル計算モデル



軸対称2次元輻射流体数値実験



$\rho, T_{\text{gas}}, v$  分布

モンテカルロ法に基づく輻射輸送計算

- メッシュ:  $(N_x, N_y, N_z) = (160, 160, 160)$
- 計算領域:  $-300r_s \leq x, y, z \leq 300r_s$
- 試行光子数:  $4 \times 10^5 \times 50$  振動数bin
- アルゴリズム:

(1) 有効光学的厚み  $\tau_{\text{eff}} \equiv \sqrt{\tau_{\text{ab}}(\tau_{\text{ab}} + \tau_{\text{es}})} = 10$  となる面を計算

(2) ステップ(1)で求めた面およびその上空から種光子を放出

- 熱的制動放射の放射率を計算
- 特殊相対論的效果(流体運動によるドップラー効果および光行差)を考慮

(3) 以下の効果を考慮してモンテカルロ法に基づき光子を追跡

- 自由-自由吸収
- 光子捕捉効果
- 熱的/バルク コンプトン効果

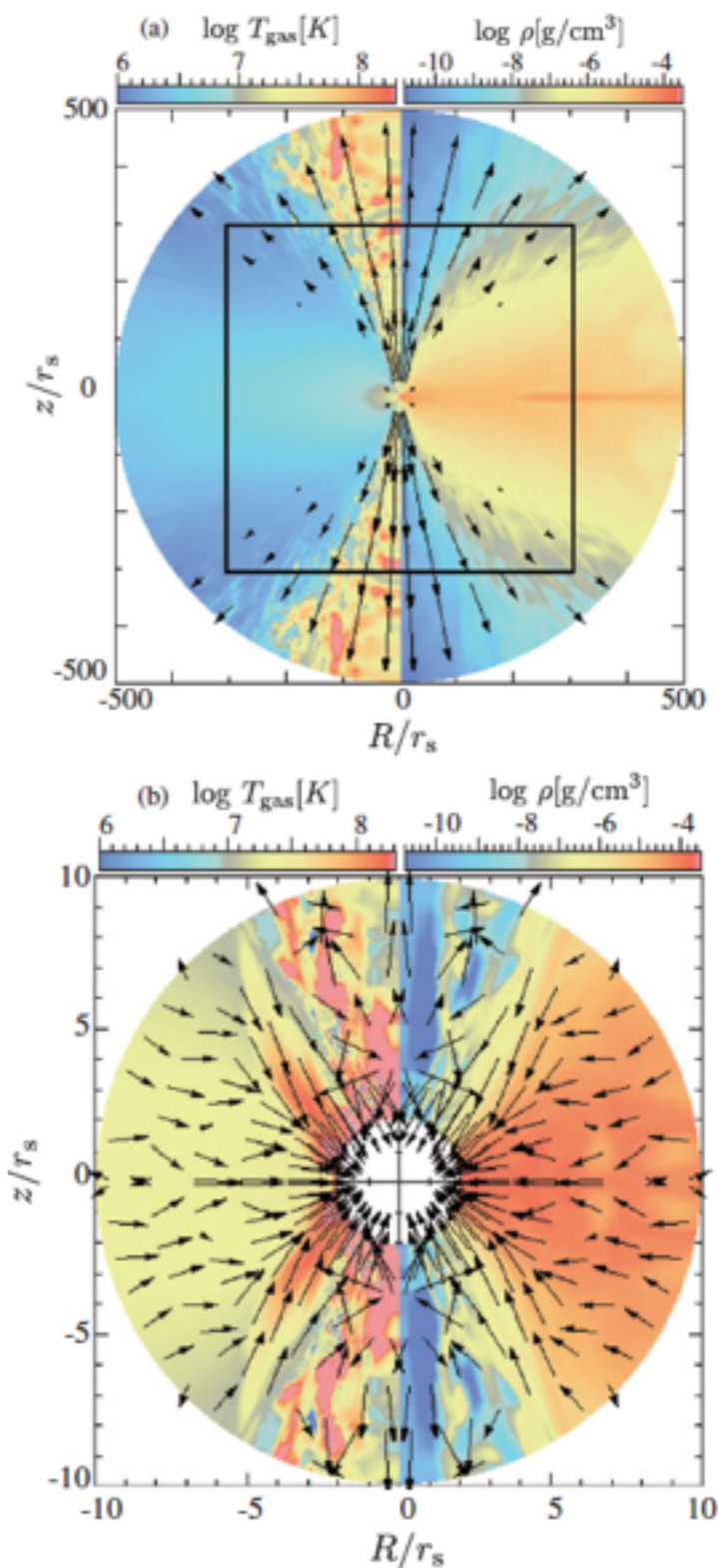
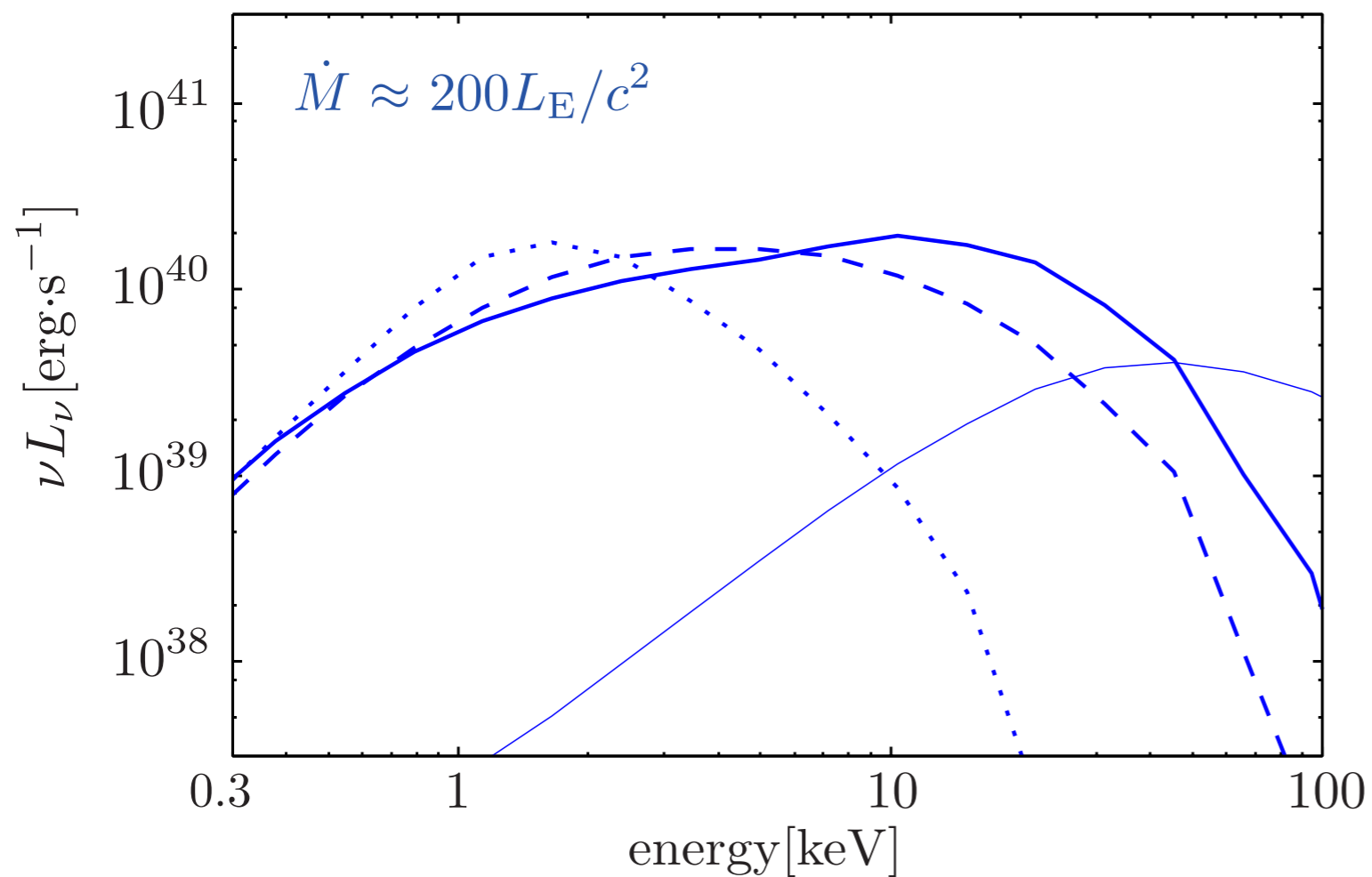


SEDをアウトプット



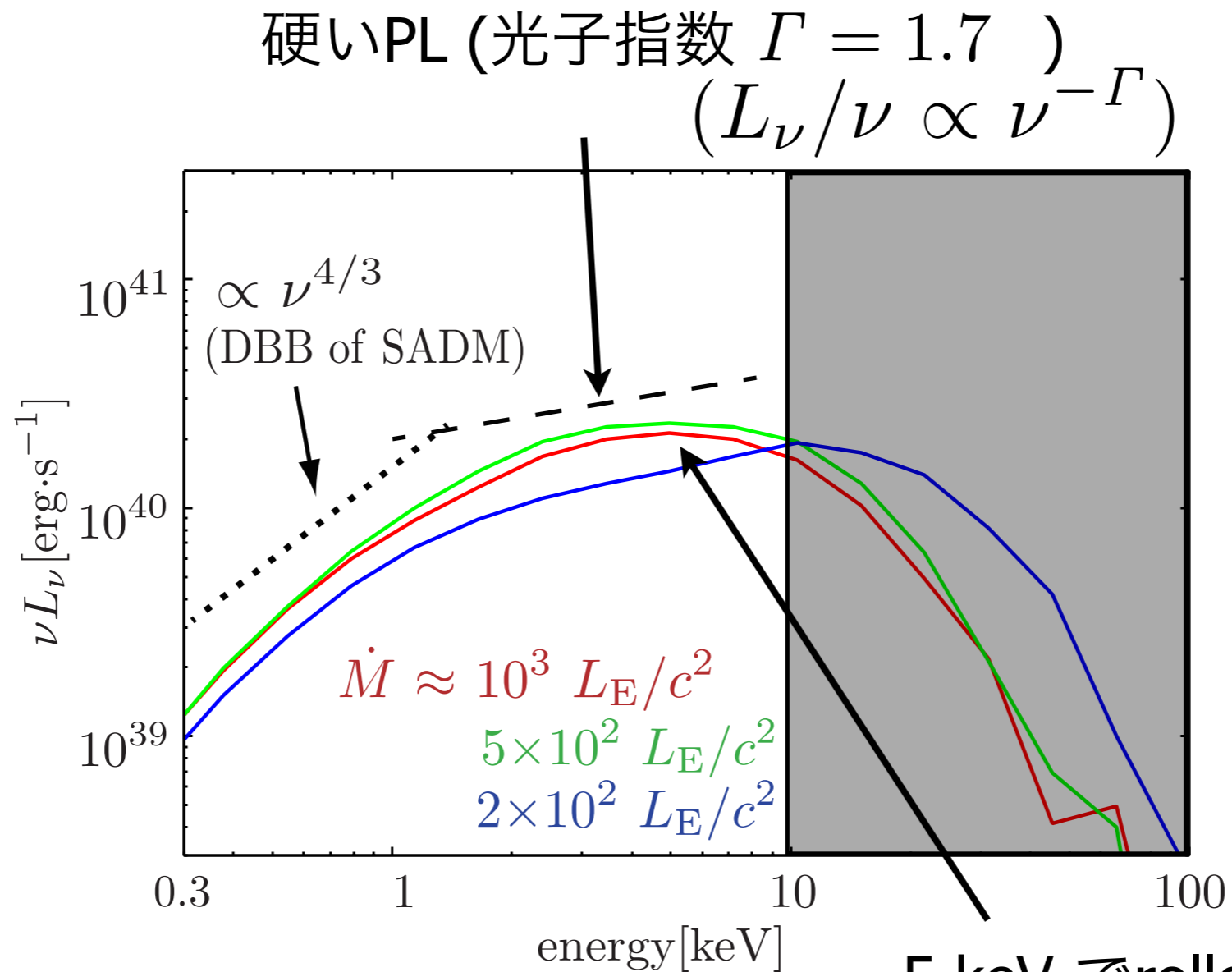
# 輻射スペクトルのコンプトン化

- with thermal +bulk Compton
- - - with thermal Compton
- ⋯ without Compton (Thomson scattering)
- · - · - swallowed by BH (with thermal+bulk Compton)



- 熱的コンプトンおよびバルク・コンプトンによりSEDはハードに.
- upscatteringは衝撃波加熱領域で起こる.

# 超臨界降着流のX線スペクトルとその降着率依存性



~5 keV でrollover

低  $\dot{M}$  : ~10 keVまで延びる硬いPL.  
 高  $\dot{M}$  : ~5 keVでrollover.

← ULXスペクトルと  
 良く似た特徴

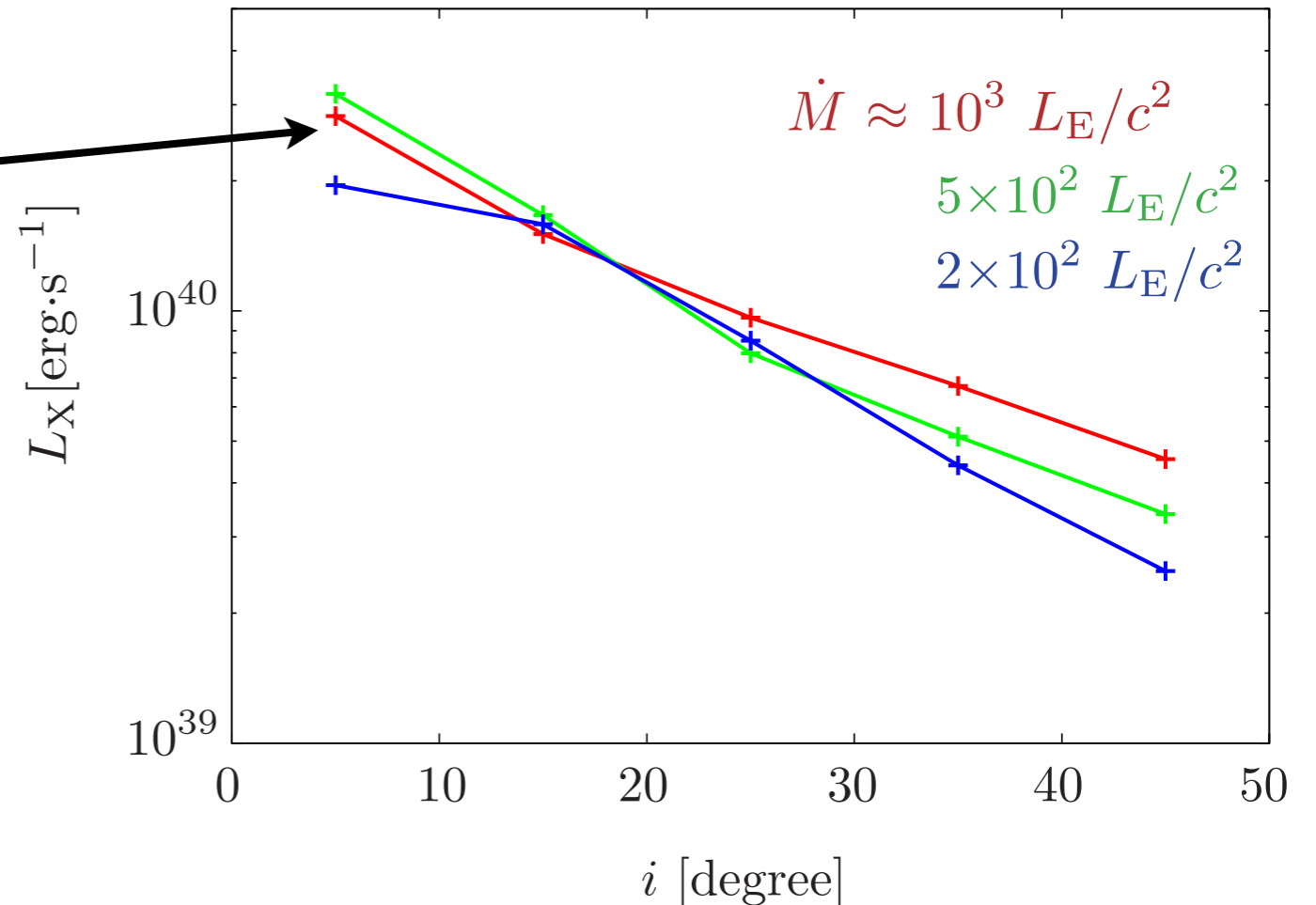
~5keVのrolloverは低温アウトフローでコンプトン化

# 等方仮定光度の視線角度依存性

$\dot{M} \approx 10^3 L_E/c^2$  (高質量降着率モデル) のX線等方仮定光度  $L_X$  は  
 $\dot{M} \approx 5 \times 10^2 L_E/c^2$  (中質量降着率モデル) に比べ低い。

理由(1):  
降着率が増えるほどより多くの光子が光子補足効果によりBHに吸い込まれる。

理由(2):  
 $\dot{M} \approx 10^3 L_E/c^2$  の場合ファンネルジェットの散乱に対する厚みが  $\tau_{es} \gg 1$  となり低温アウトフローへ侵入しやすくなり、自由-自由吸収されやすくなる。



等方仮定光度はface-onに近づくほど増加  
← 厚い降着流と高密度アウトフローによるマイルドな輻射フラックスの収束



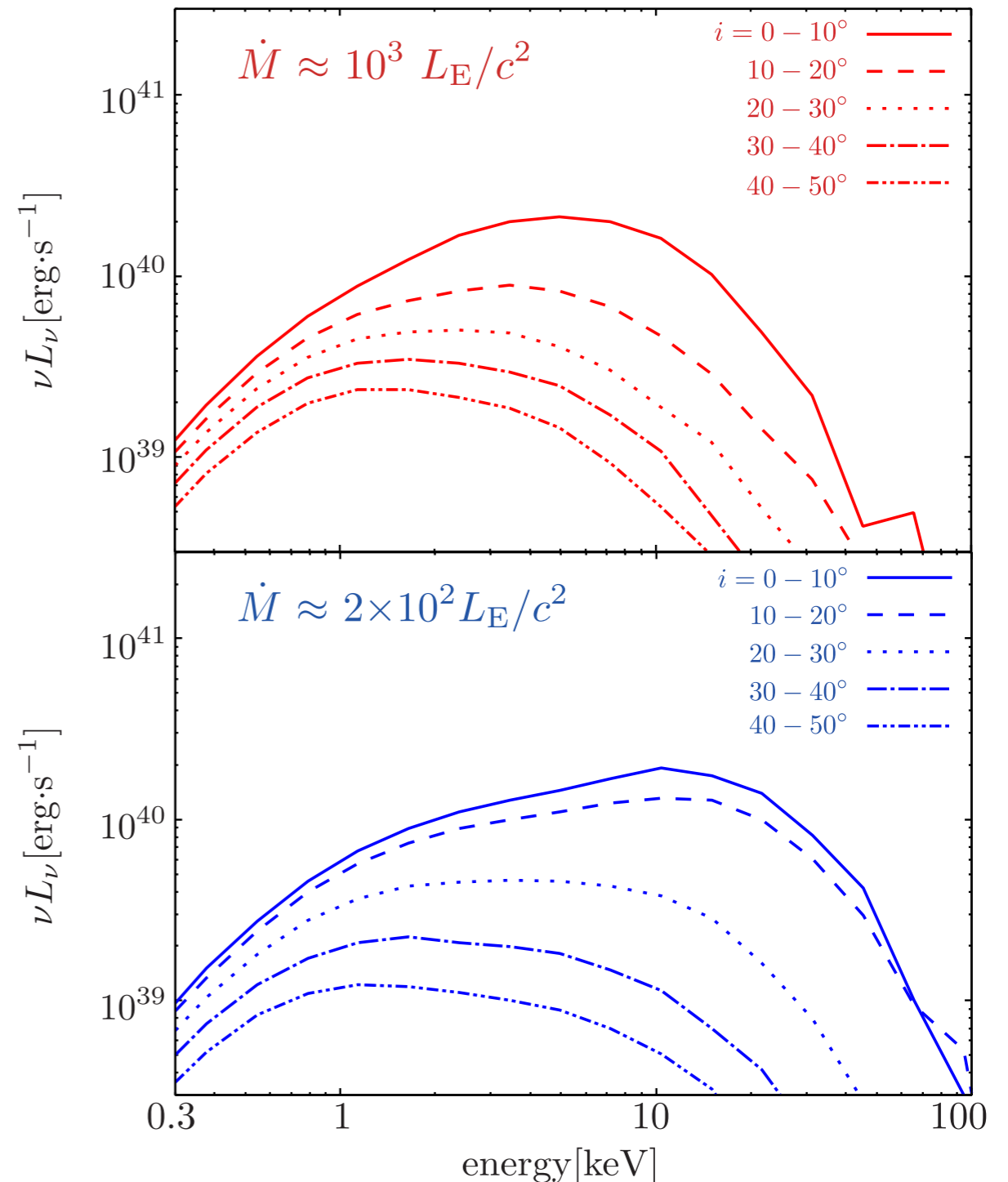
# SEDの視線角度依存性

- 視線角度が小さい(face-onに近い)ほどSEDは硬くなる。

← 低温アウトフローに邪魔されないため。

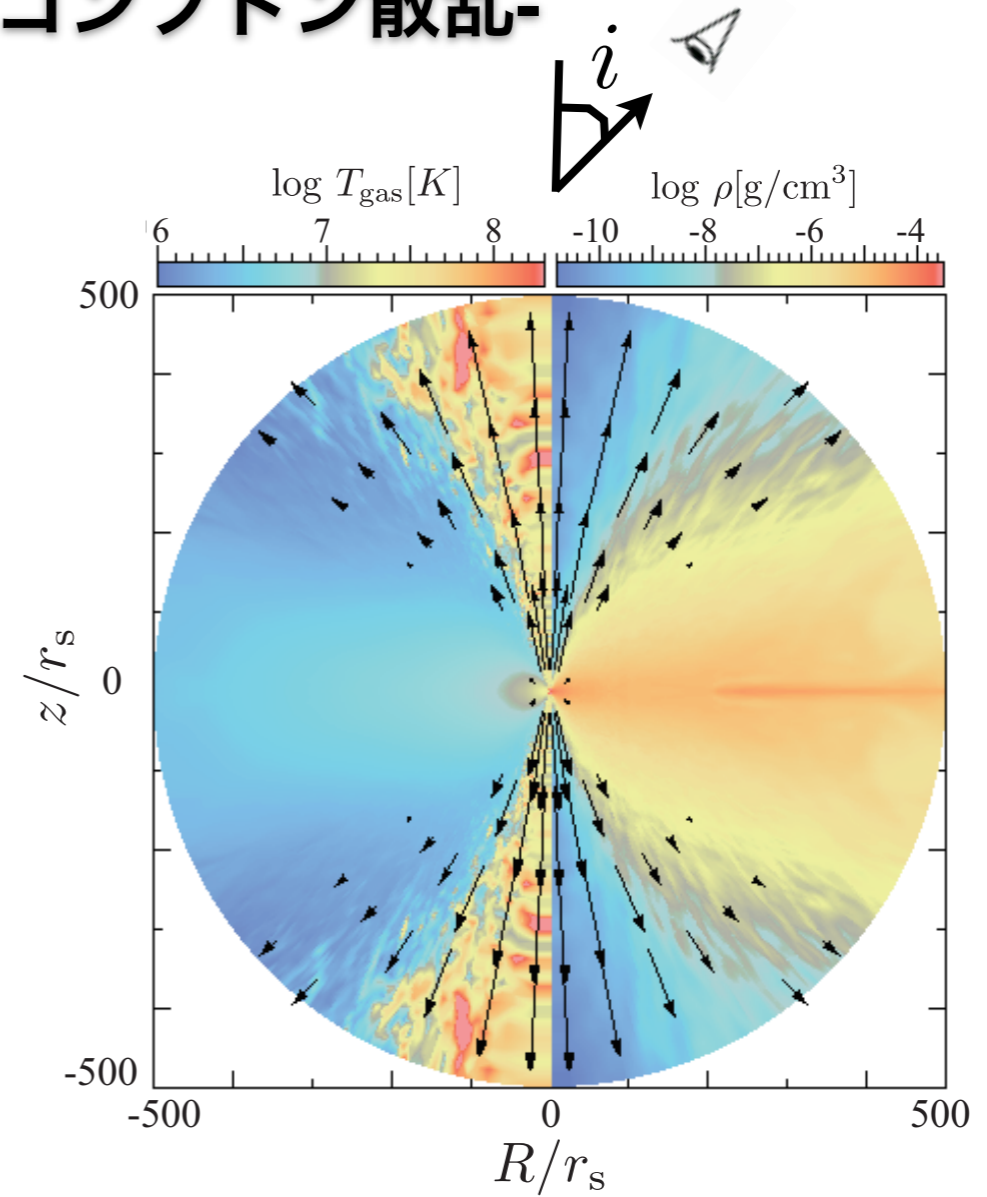
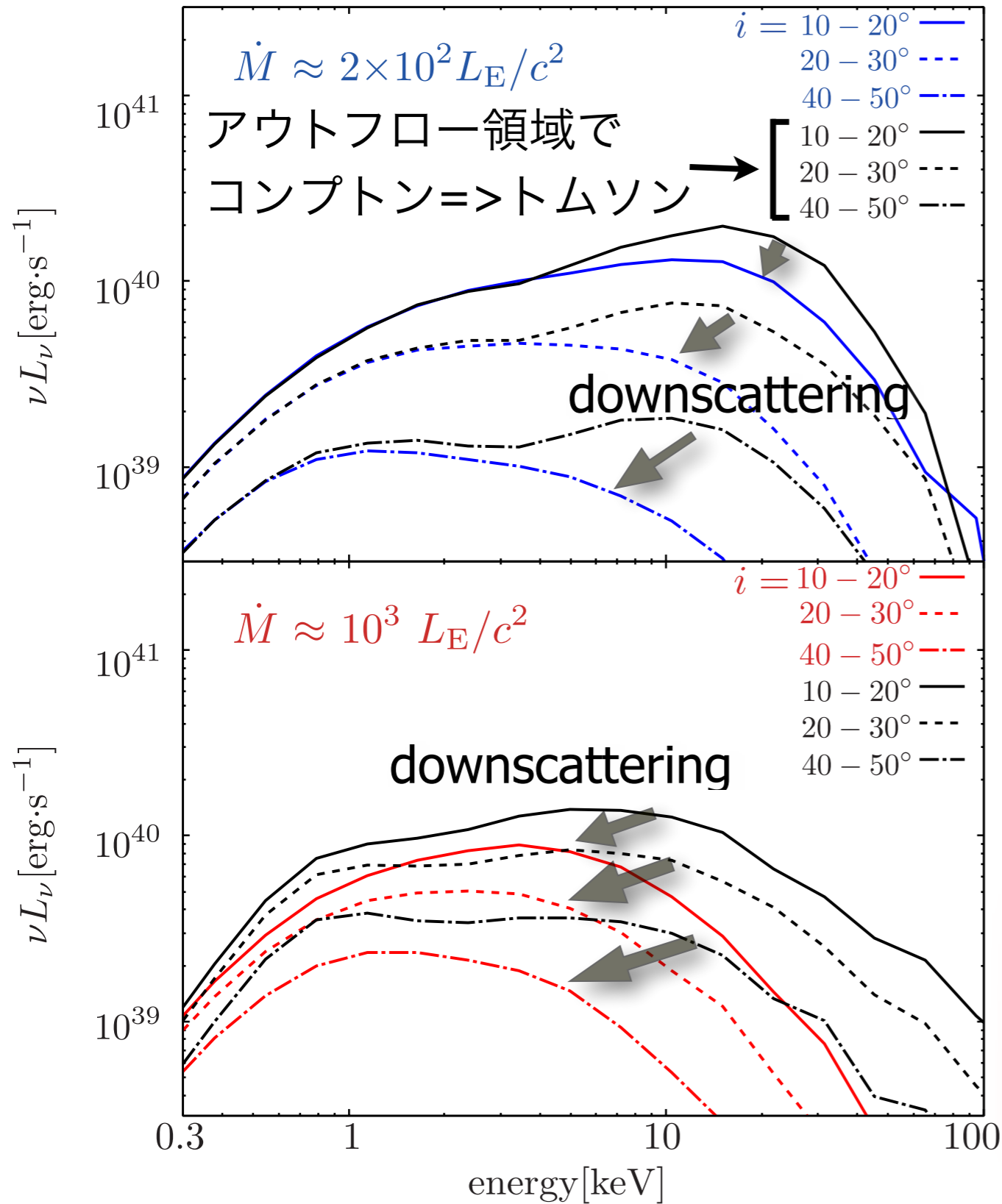
- $\dot{M} \approx 2 \times 10^2 L_E/c^2$  (低降着率モデル) でも視線角度が大きいときは $\sim 5$  keVにrolloverが現れる。

← 低温アウトフローの影響



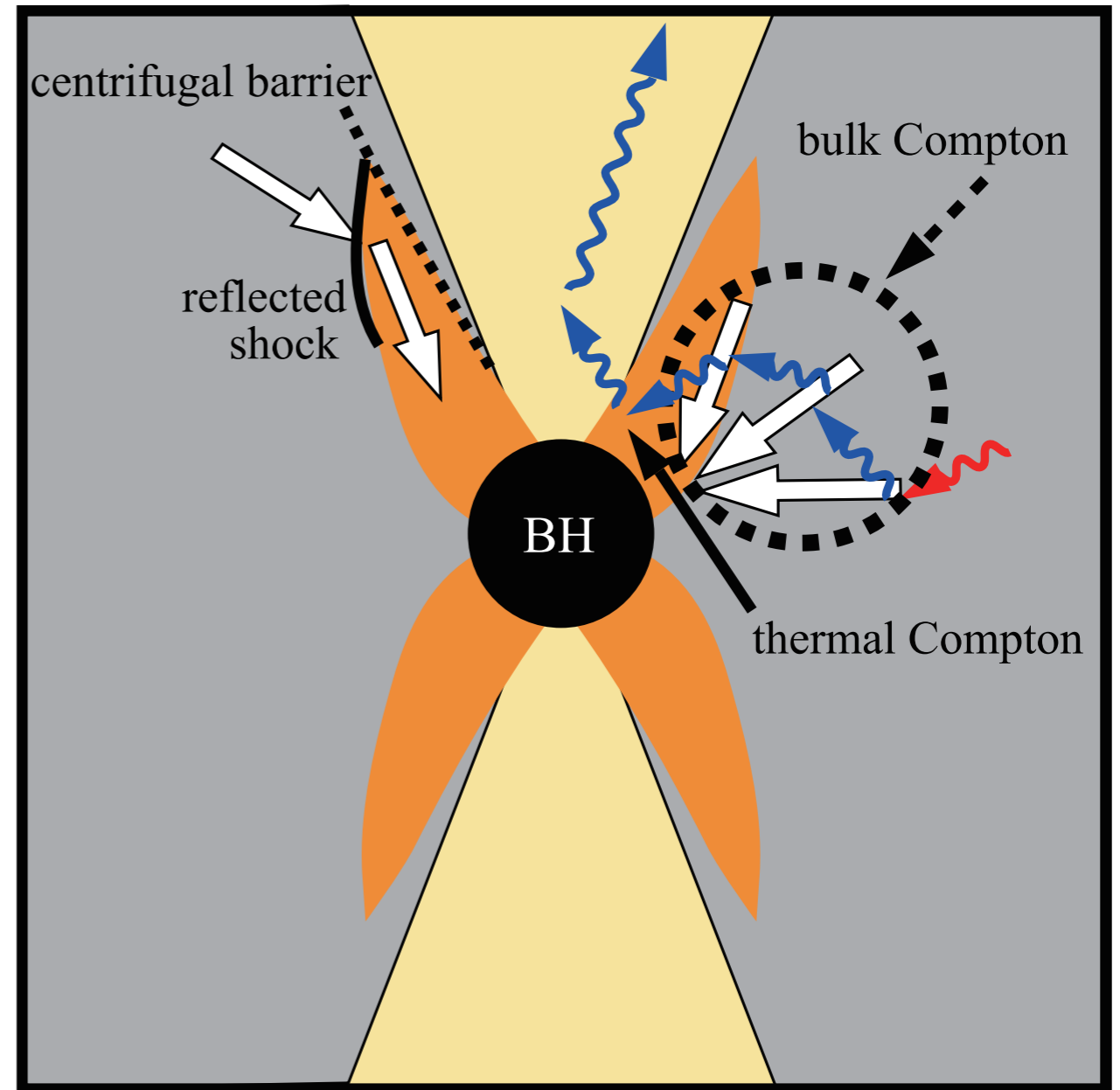
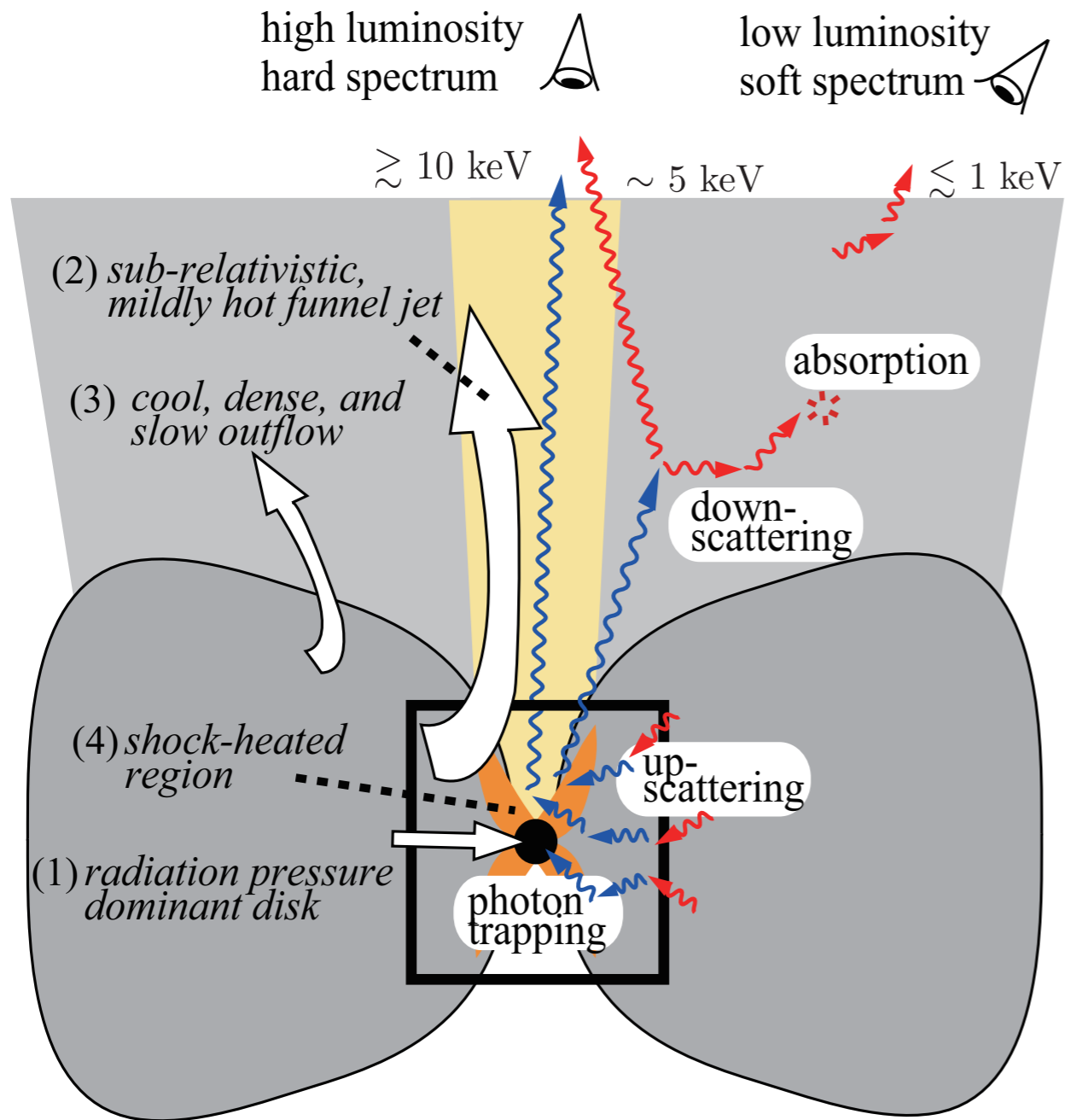
# 何が5keV付近のrolloverを作るのか？

-アウトフロー低温電子によるコンプトン散乱-



$\dot{M}$ 高 or  $i$ 大 → SEDは軟らかくなる。  
 ∴ 光子が観測者に届く前にアウトフローのやや低温な電子にdownscatterされる。

# 超臨界降着流・アウトフローの構造と光子の軌跡のまとめ



- hot Comptonizing inflowでの逆コンプトン散乱で光子振動数は増加。
- cool Comptonizing outflowでのコンプトン散乱により光子振動数は減少。

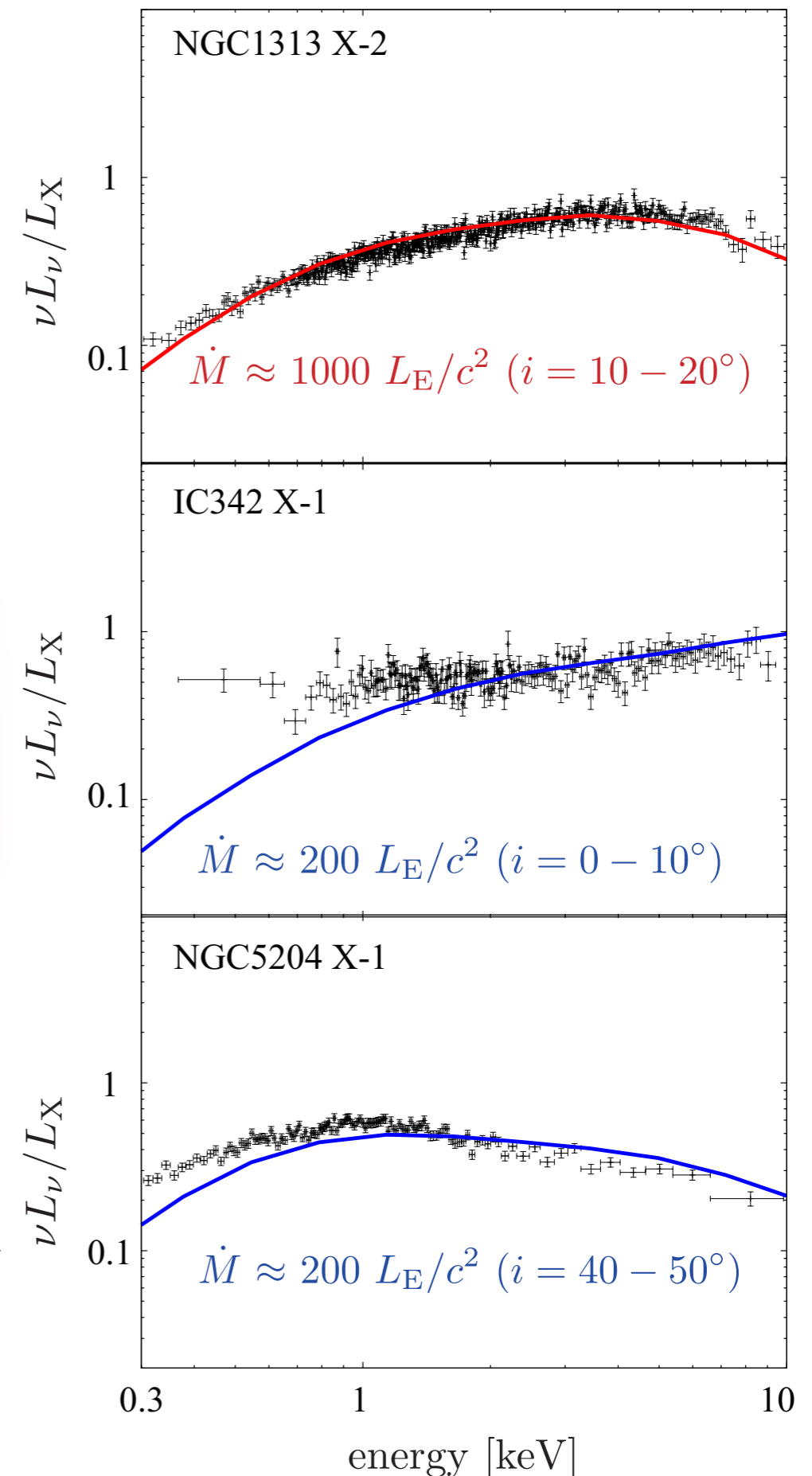
# ULXのX線スペクトルとの比較

- カラー線: 計算により得られたSED
- 黒点: 吸収補正したXMM-Newtonデータ  
(provided by Dr. Gladstone)

本計算により得られたSEDはULXの特徴をよく再現している。  
(~5keVのrollover, PLの冪指数)

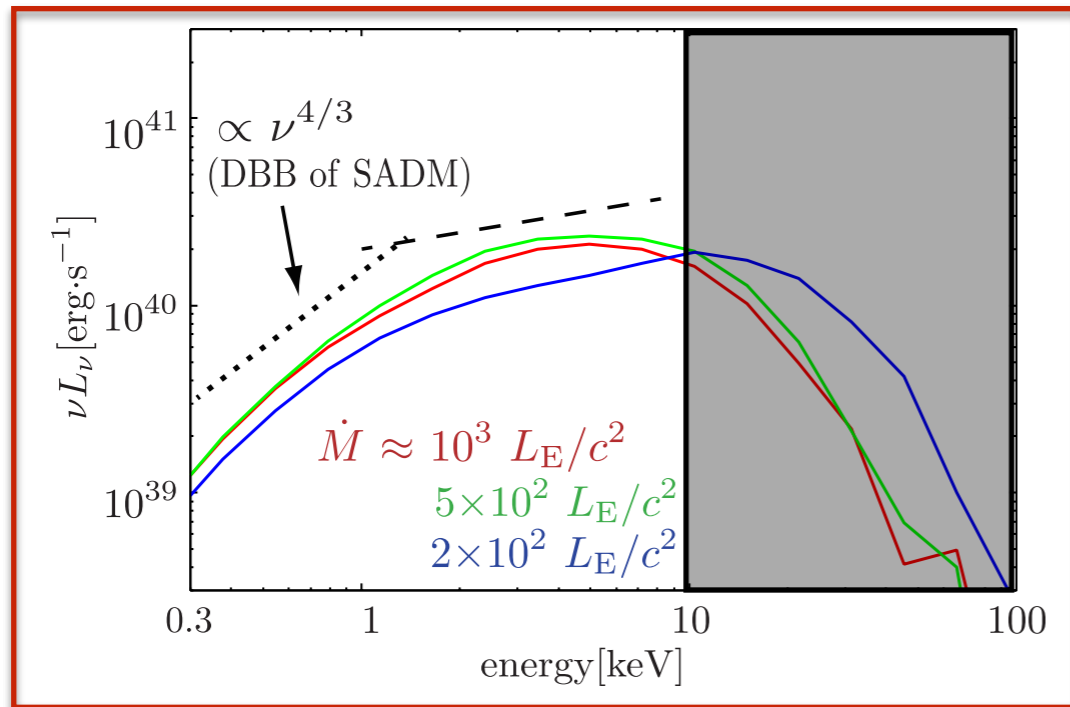
soft excess(1keV)の再現は今後の課題:  
アウトフローの軟光子が不足している

← シミュレーション領域の拡大 and/or 磁気エネルギー散逸によるわずかな加熱で解決する可能性。



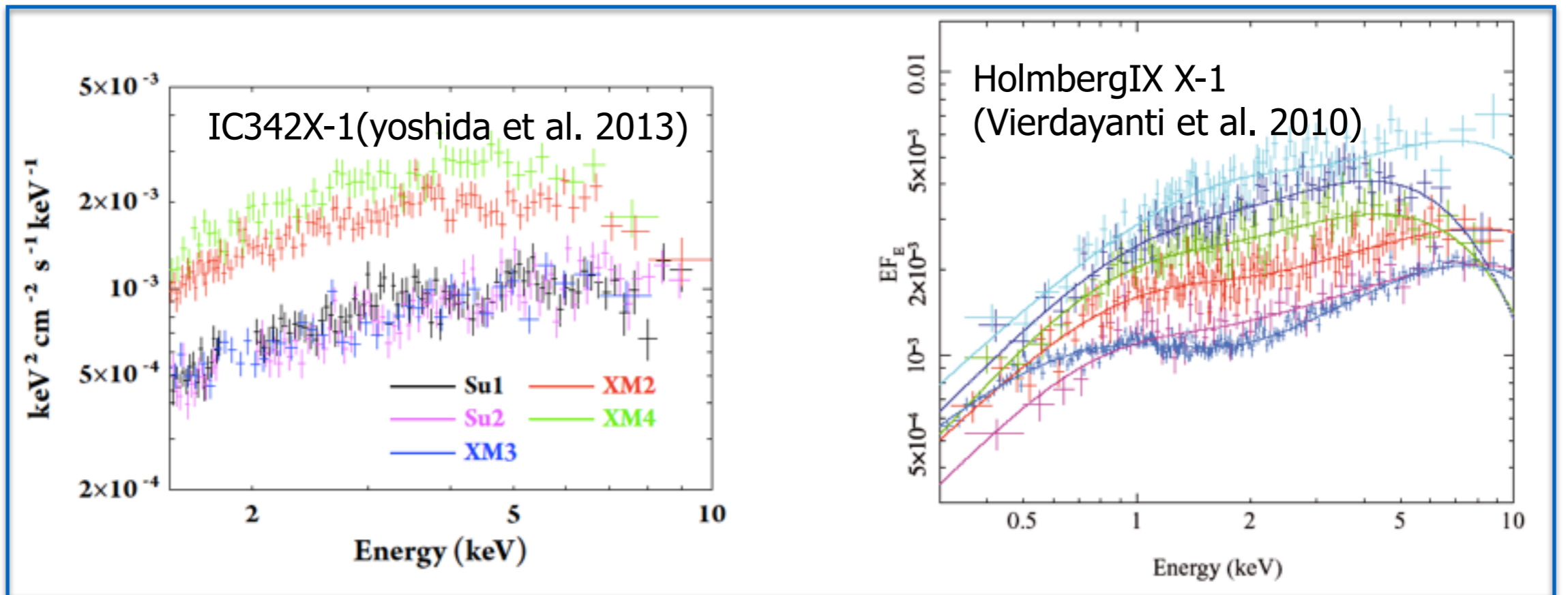
# スペクトル変動

our result



- ULXsのhard状態とsoft状態の違いは質量降着率の増加で説明できそう。
- bright hard状態の説明は難しい？

observation





# 今後の課題について

- 高温プラズマはブラックホール近傍に形成される → 一般相対論効果
- $\alpha$ 粘性を第一原理的に扱う → 磁場の効果
- FLDは妥当かどうか  
( 5 keV付近のrolloverは  $\tau \sim 1$ のsheath jetで形成) → M1 や 直接計算

一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションが必要！

最近の例(M1)：

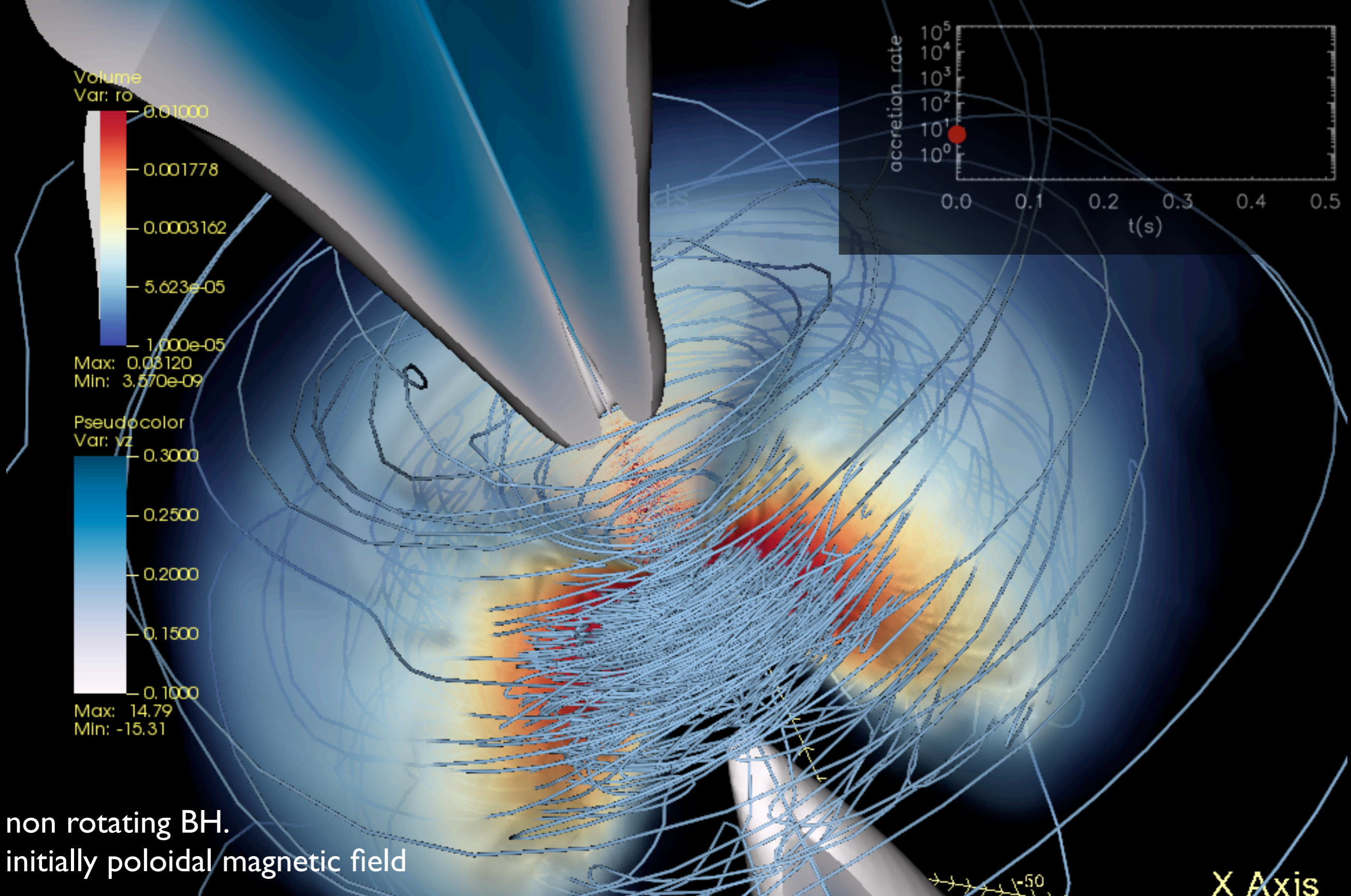
Sadowski et al. 2014, 2015

McKinney et al. 2014

Takahashi et al. in prep.

# Second Topic: Where is the hot corona formed

## 3-dim. **General Relativistic** Radiation MHD simulation



non rotating BH.  
initially poloidal magnetic field

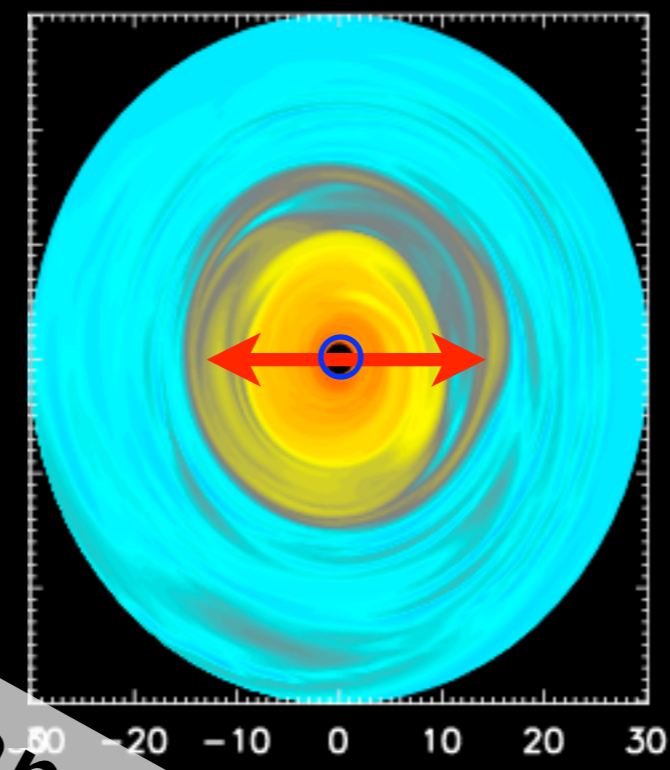
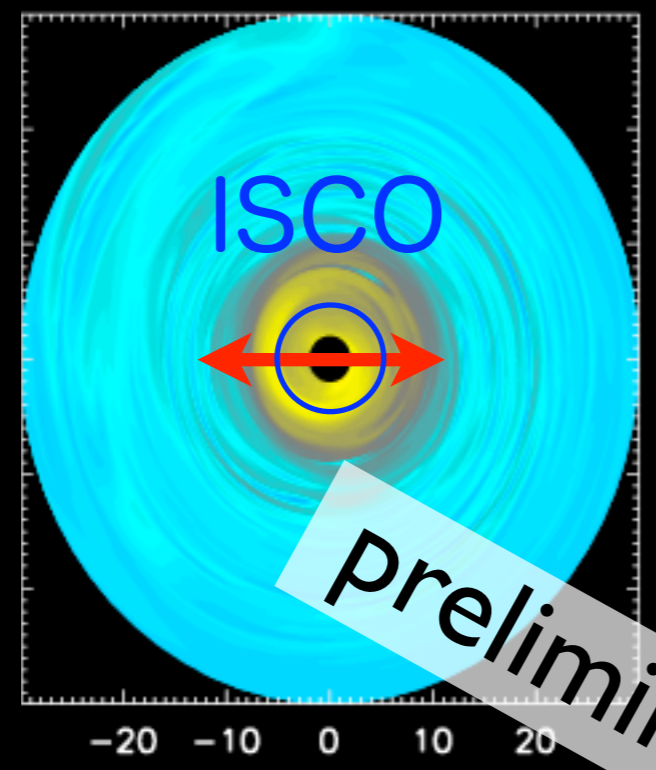
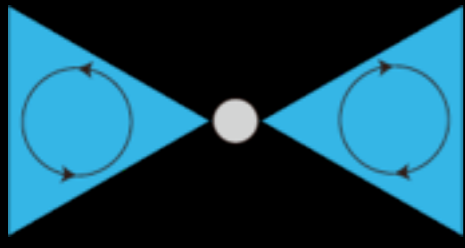
X Axis



# gas temperature on the equatorial plane

non-rotating BH    rotating BH( $a=0.94$ )

initially poloidal  
mag. field  
( $r-\theta$ )



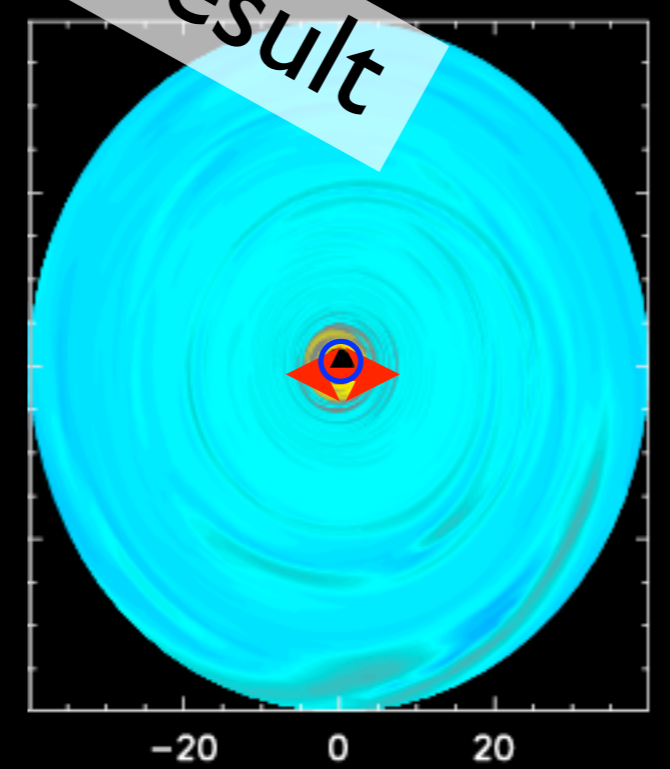
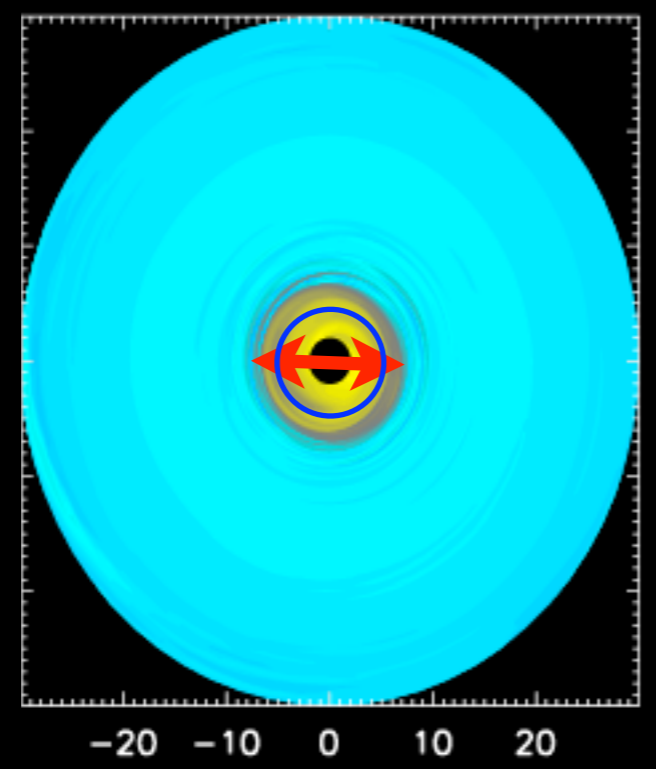
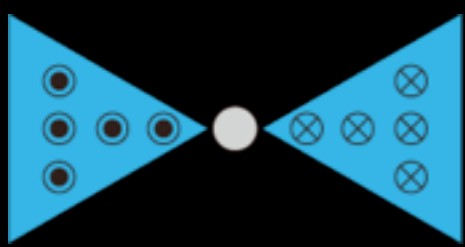
high temp.  
region

$$T_g \gg T_r$$

low temp.  
region (in LTE)

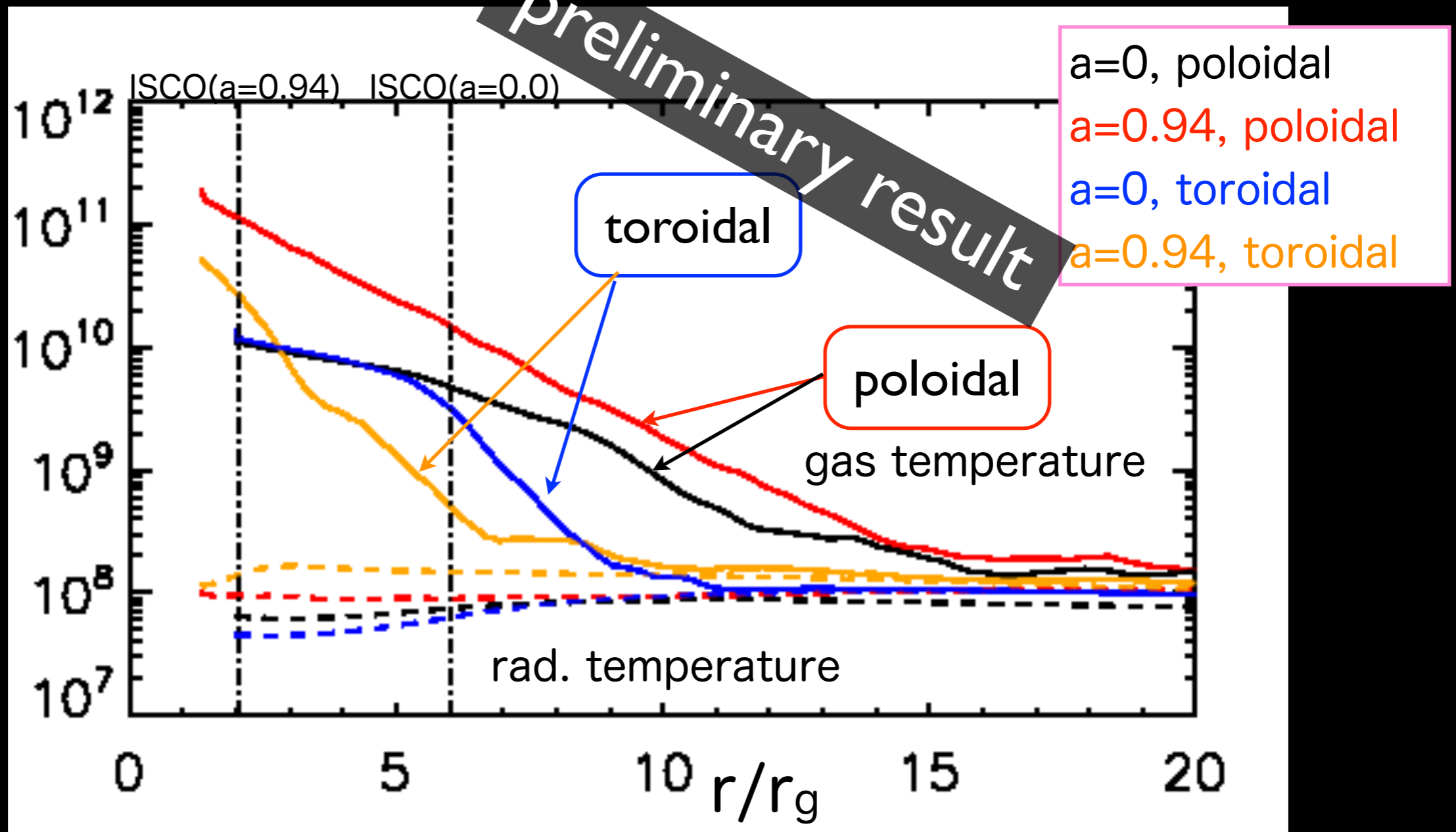
$$T_g = T_r$$

initially toroidal  
mag. field  
( $\phi$ )



Preliminary result

# temperature inside the disk



The gas is overheated near BH in all model.

The deviation starts at a larger radius for the poloidal model than the toroidal model.

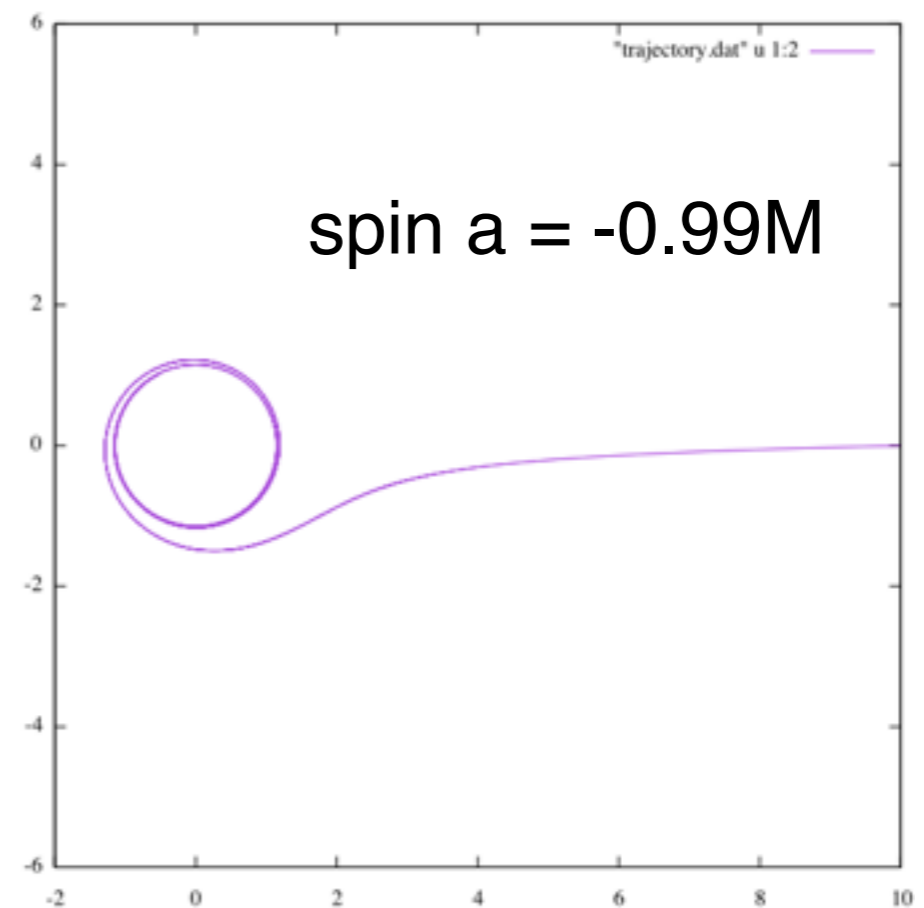
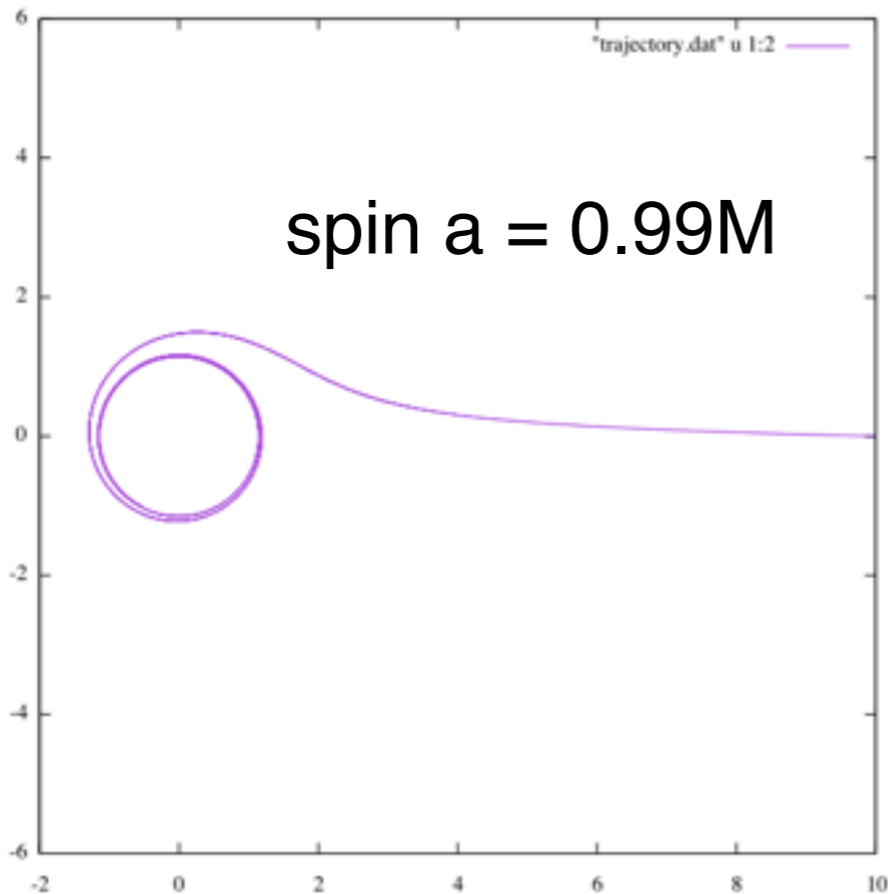
The deviation starts from the radius (slightly) larger than the ISCO.

# GRの重要性と輻射スペクトル計算コードのGR化

- 一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションの結果、(移流時間) < (輻射冷却時間)となるBH近傍で高温プラズマが形成された。高温領域の広さはBHスピンと磁場形状に依存。poloidal 磁場計算の場合、高温領域が広がる。

磁場形状の時間変動によりULXsのbright hard状態への遷移を説明できるかもしれない！

- 一般相対論的なシミュレーション結果のスペクトル計算が必要。現在、Kawashima et al. 2012のモンテカルロ法に基づく輻射輸送コードの一般相対論化を行っている。





# まとめ

- **ブラックホール超臨界降着流・アウトフローではコンプトン散乱の効果が重要：**
  - (i) BH近傍の衝撃波加熱領域の高温電子でupscatteringされて10keV付近まで延びる冪が形成される。
  - (ii) アウトフローの低温電子でdownscatteringされ5keV付近にrolloverが現れる。
- **恒星質量BHへの超臨界降着でULXsのスペクトルは説明できる。**
- 今後、一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション・データを用いて輻射スペクトルを計算予定。