

# ラインフォース駆動型円盤風による SMBH進化の自己制御機構

**野村真理子 (慶應義塾大学)**

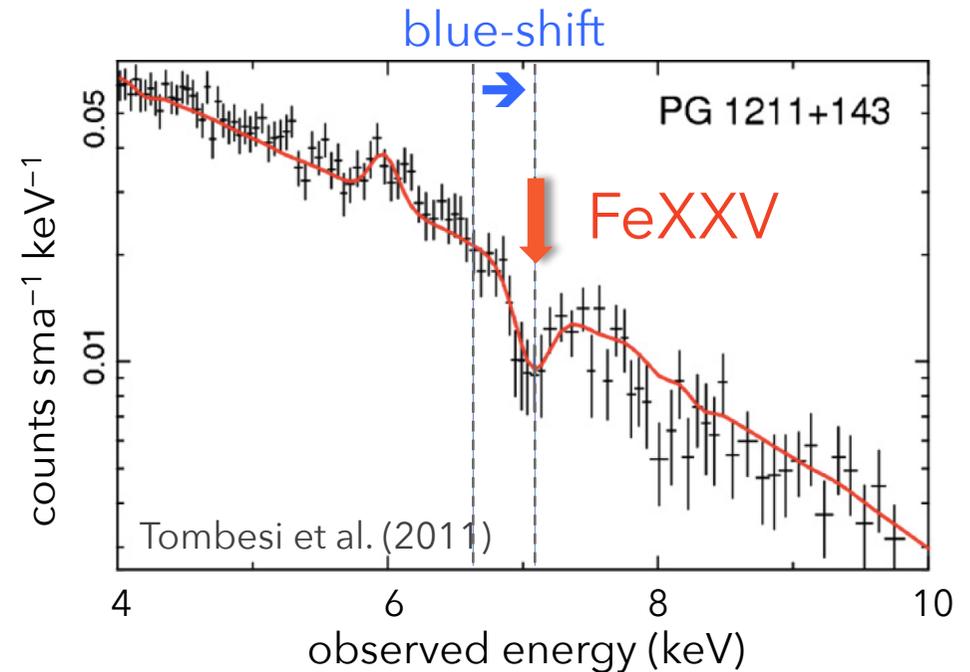
大須賀健 (国立天文台), Chris Done (Durham Univ.)

# Ultra-Fast Outflow (UFO)

- 一部のAGNの輻射スペクトルに青方偏移した吸収線を発見  
トーラスでは青方偏移が説明できない ⇒ **アウトフロー**

- **Ultra-fast outflow (UFO):**

- X線スペクトル上の鉄吸収線 (FeXXV and/or FeXXVI) によって示唆
- アウトフロー速度  $\sim 0.1c-0.3c$
- Seyfert銀河の  $\sim 40\%$  に存在



UFOは質量・エネルギー放出率が大きいいため、**BHの成長過程**や**母銀河の星形成**に大きく影響を及ぼす可能性がある

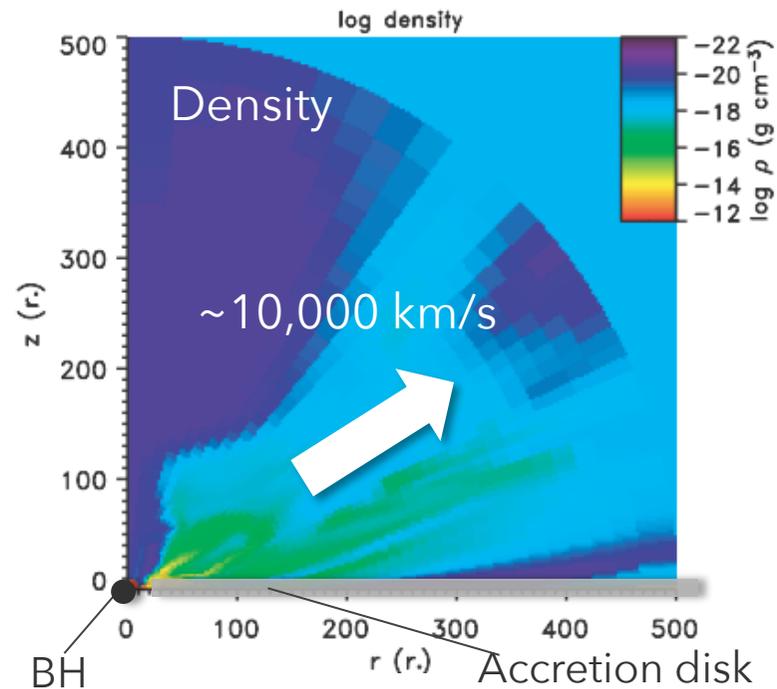
# ラインフォース駆動型円盤風モデル

- 金属元素によるUV光の束縛-束縛遷移吸収によって受ける力 (**ラインフォース**)で生じる円盤風
- 完全電離していない金属を選択的に加速  
→ **円盤風の加速と電離状態を同時に説明可能**
- sub-Eddingtonでも加速が可能



# これまでの研究

- Proga et al. (2000, 2004)
  - 典型的なBH質量・光度についての2次元輻射流体シミュレーション

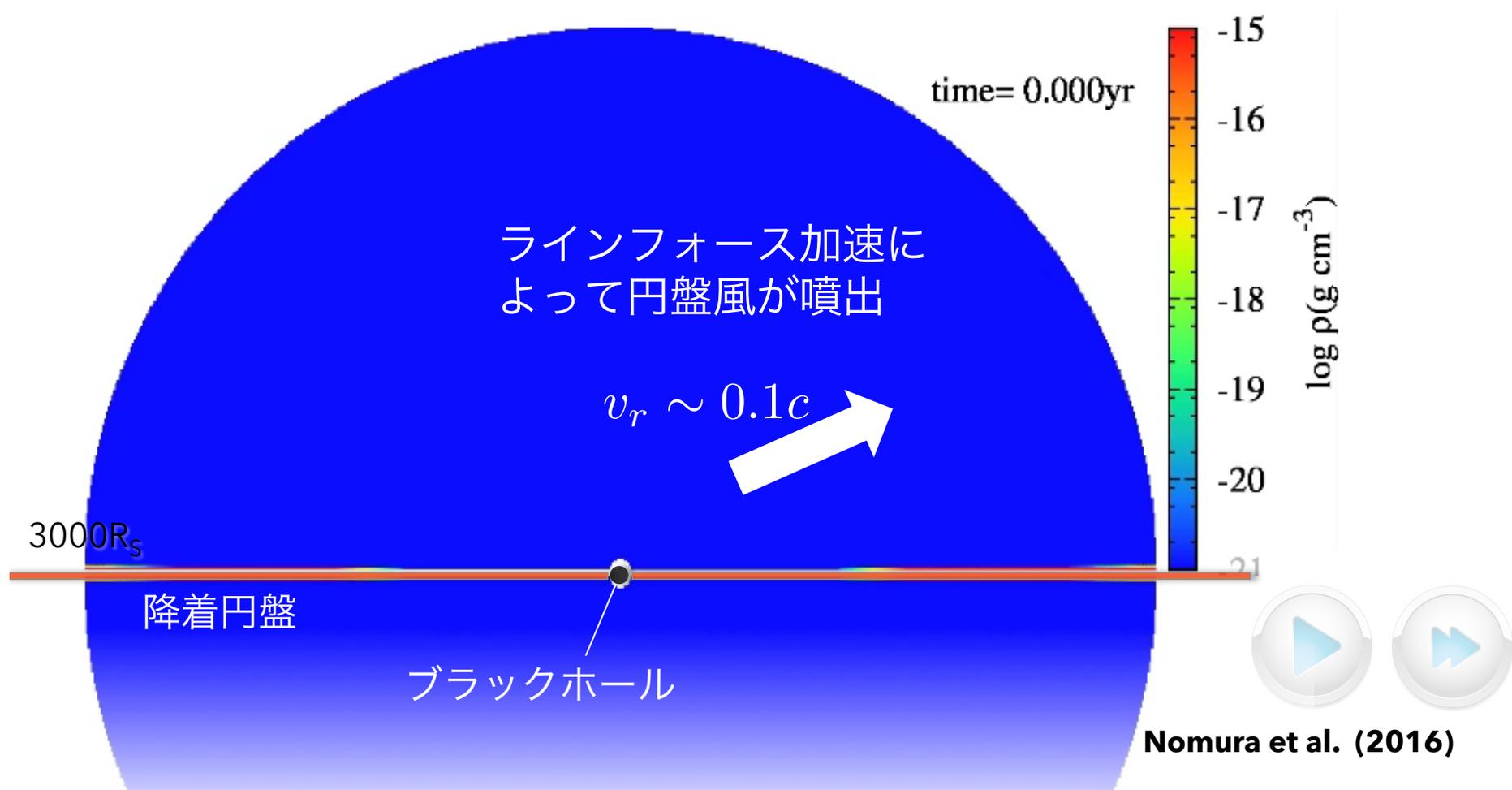


Proga & Kallman (2004)

# これまでの研究

## ● **Nomura et al. (2016)**

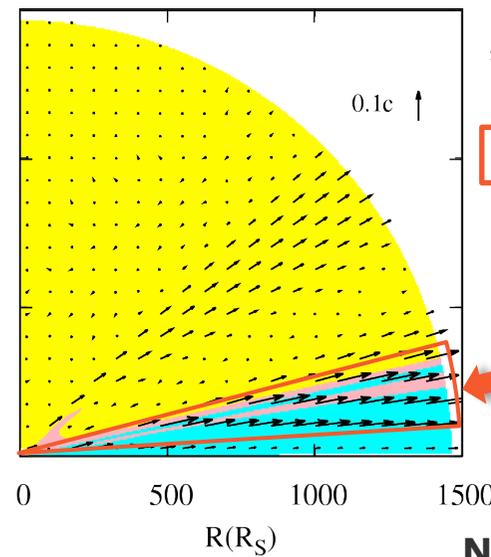
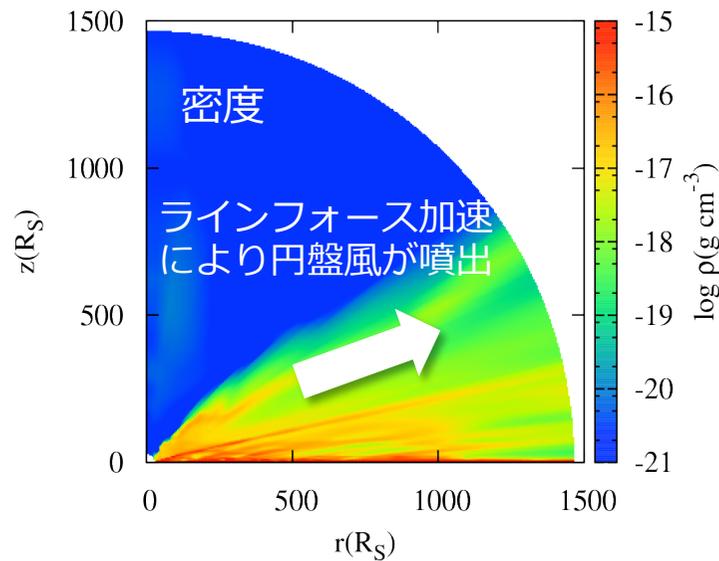
- 広いBH質量、エディントン比領域での2次元輻射流体計算
- ラインフォース駆動型円盤風はUFOの電離状態・速度・柱密度を再現



# これまでの研究

## ● Nomura et al. (2016)

- 広いBH質量、エディントン比領域での2次元輻射流体計算
- ラインフォース駆動型円盤風はUFOの電離状態・速度・柱密度を再現



物質の電離状態

■  $\log \xi \geq 5.5$

■  $2.5 \leq \log \xi < 5.5$

■  $\log \xi < 2.5$

UFOの吸収構造に  
寄与する電離状態

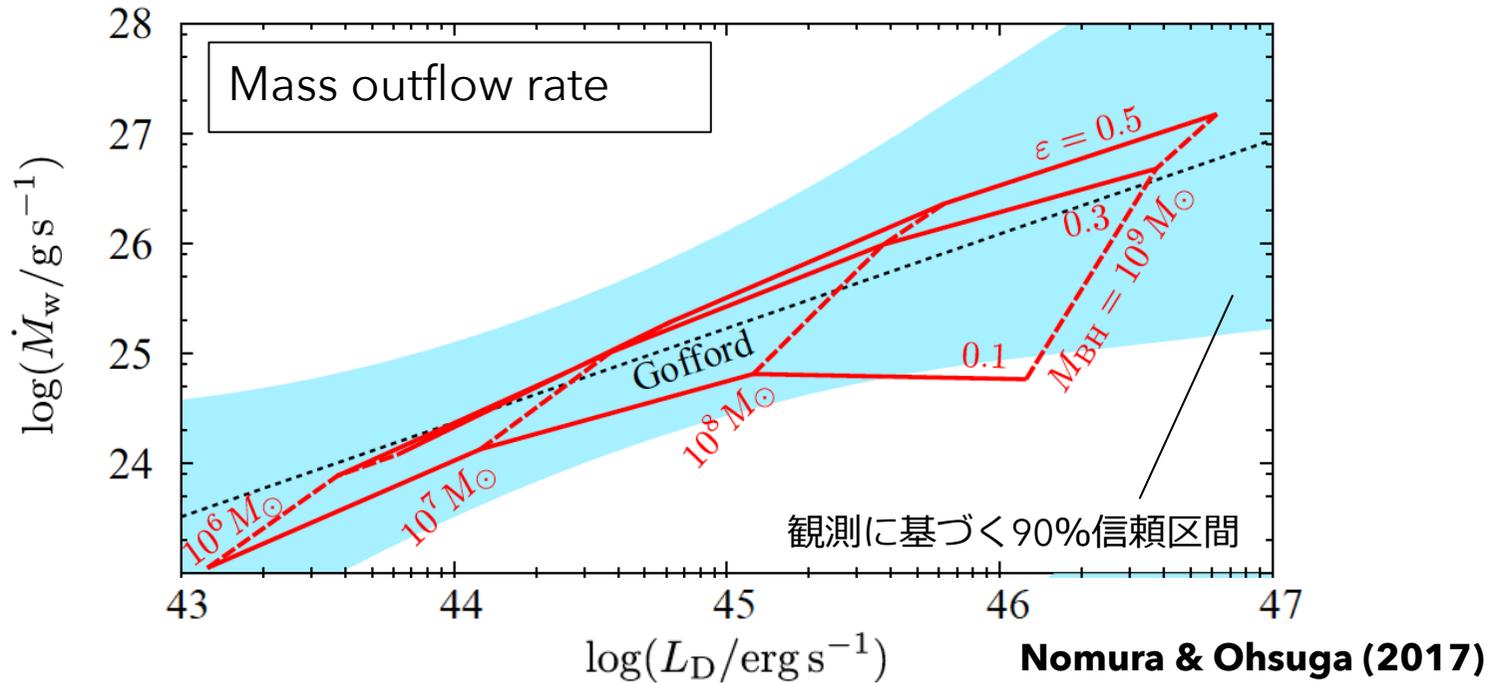
▲  
UFO

Nomura et al. (2016)

# これまでの研究

## Nomura & Ohsuga (2017)

質量放出率の光度依存性はラインフォース加速モデルで再現可能



ラインフォース駆動型円盤風によってUFOが説明可能

## 問題点と本研究の目的

- 問題点: 円盤風噴出による降着率の変化を考慮していない
  - エディントン比  $\gtrsim 0.5$  の場合、質量放出率~質量降着率
    - 降着率の変化は無視できない
- **質量放出率・降着率・円盤風の構造を自己矛盾なく扱う必要**
- **SMBH進化の過程で円盤風の担う役割を定量的に解明**

# ラインフォースを含む輻射流体シミュレーション

## 基礎方程式 [球座標 $(r, \theta, \phi)$ ]

(1) 質量保存の式  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$

ラインフォースを含む輻射力

(2) 運動方程式

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

(3) エネルギー方程式  $\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( \frac{1}{2} v^2 + e \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \mathbf{v} \left( \frac{1}{2} v^2 + e + \frac{p}{\rho} \right) \right] = \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g} + \underline{\rho \mathcal{L}}$  輻射加熱・冷却

### ☆ ラインフォースを含む輻射力

$$\mathbf{f}^{\text{rad}} = \frac{\sigma_e \mathbf{F}_{\text{UV}}}{c} + \frac{\sigma_e \mathbf{F}_{\text{UV}}}{c} M$$

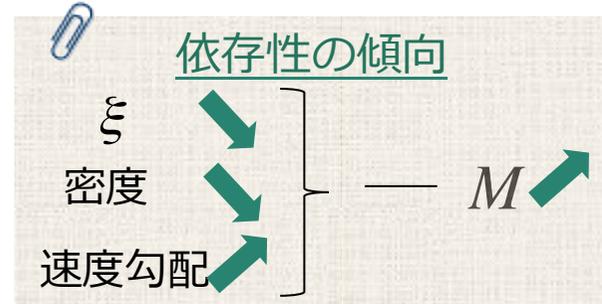
電子散乱による輻射力

ラインフォース

(Stevens & Kallman 1990)

### フォースマルチプライア:

(ラインフォース)/(電子散乱力)を電離パラメータ  $\xi$ , 密度、速度勾配の関数として近似したもの



電離パラメータ:  $\xi = \frac{F_X}{n}$   $F_X$ : X線フラックス  
 $n$ : 個数密度

# ラインフォースを含む輻射流体シミュレーション

基礎方程式 [球座標  $(r, \theta, \phi)$ ]

(1) 質量保存の式

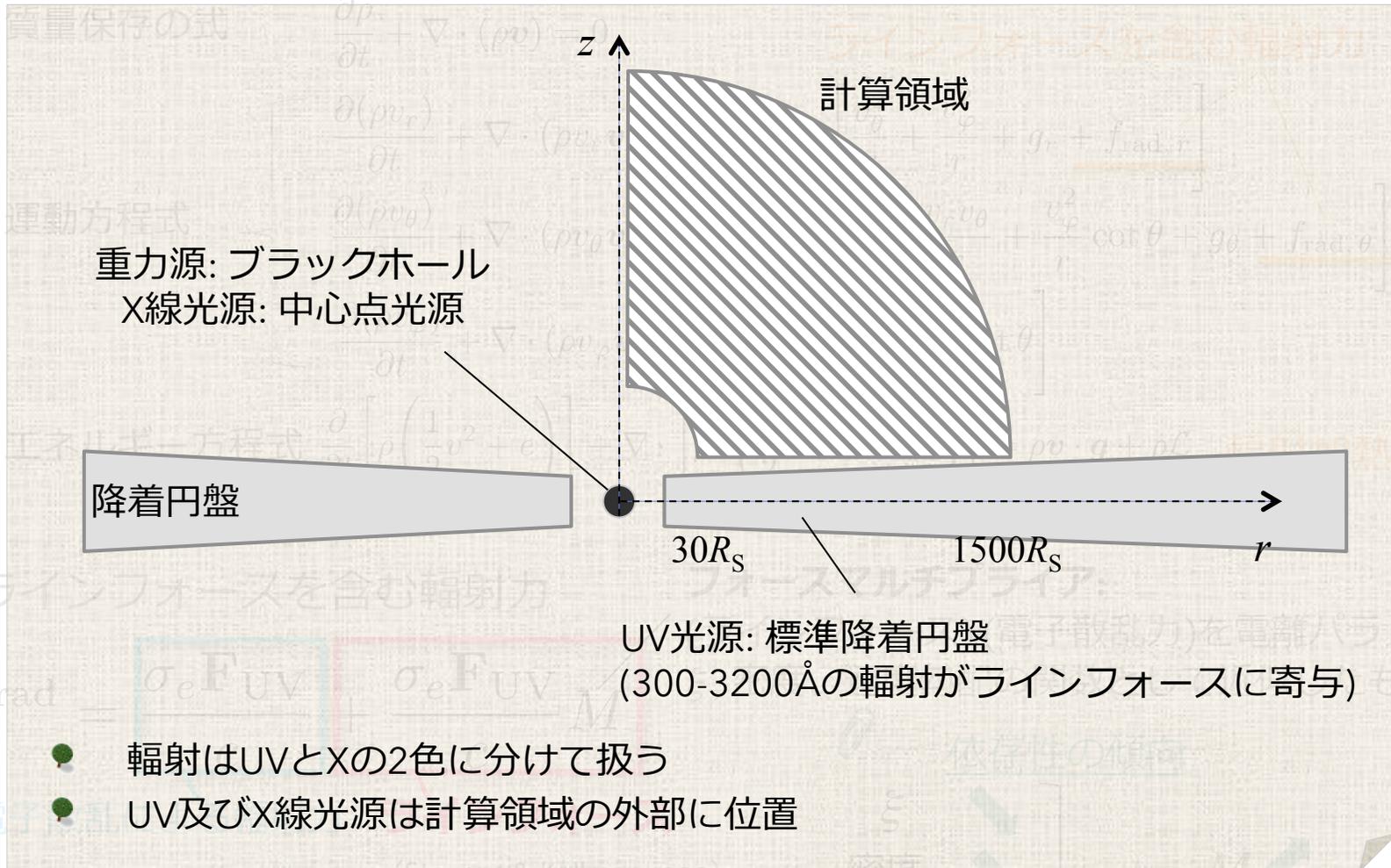
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

(2) 運動方程式

$$\frac{\partial (\rho v_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_r \mathbf{v}) + \frac{v_\theta^2}{r} \cot \theta + g_r = f_{\text{rad}, r}$$

(3) エネルギー方程式

$$\frac{\partial \rho \left( \frac{1}{2} v^2 + e \right)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \left( \frac{1}{2} v^2 + e \right)) + \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g} + \rho c_p \frac{dT}{dt} = \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{f}_{\text{rad}}$$



- 輻射はUVとXの2色に分けて扱う
- UV及びX線光源は計算領域の外部に位置

(Stevens & Kallman 1990)

電離パラメータ:  $\xi = \frac{F_X}{n}$   $F_X$ : X線フラックス  $n$ : 個数密度

# ラインフォースを含む輻射流体シミュレーション

基礎方程式 [球座標  $(r, \theta, \phi)$ ]

(1) 質量保存の式

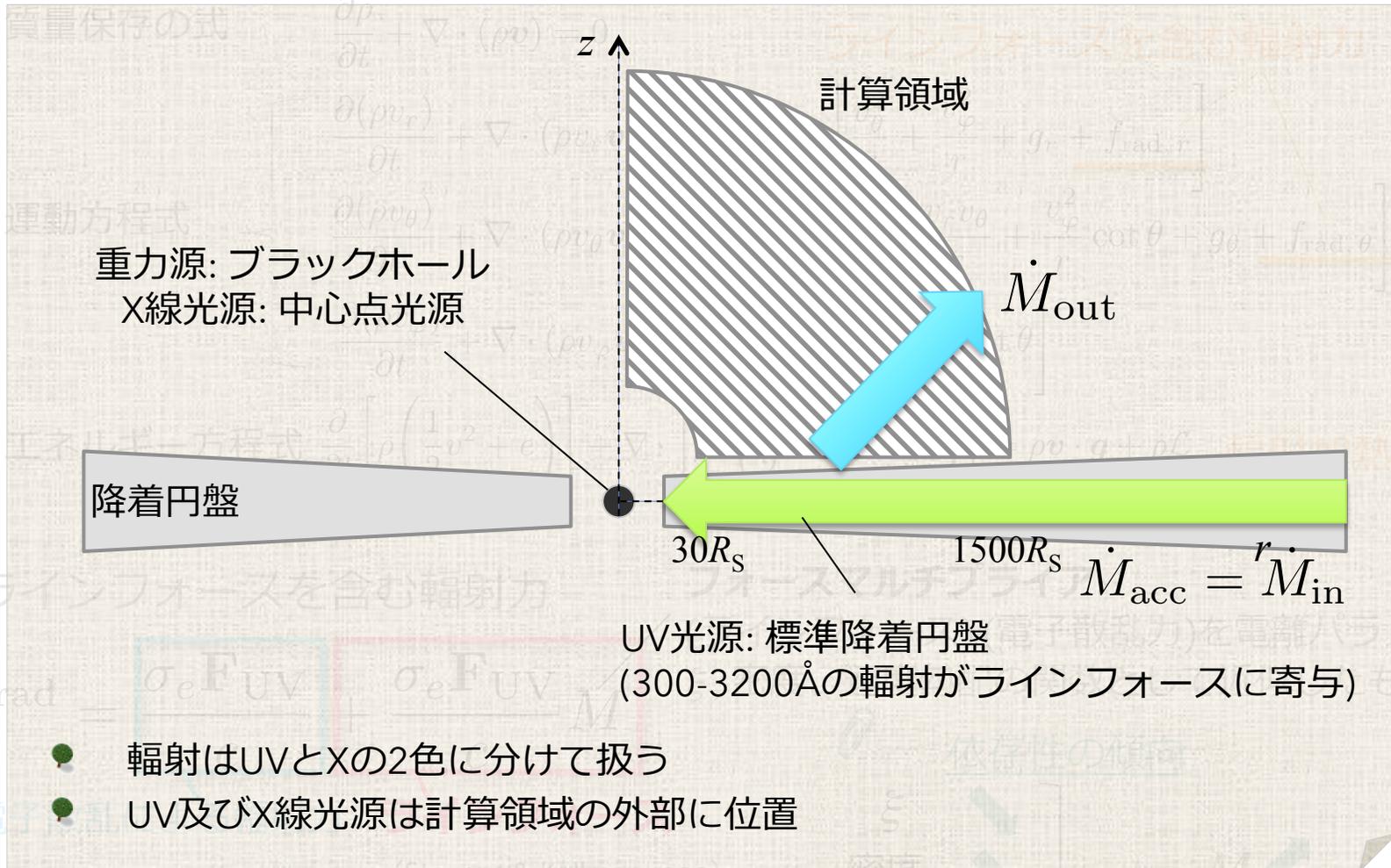
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

(2) 運動方程式

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} - f_{\text{rad}}$$

(3) エネルギー方程式

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} e) = \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g} + \rho \dot{Q} - f_{\text{rad}}$$



- 輻射はUVとXの2色に分けて扱う
- UV及びX線光源は計算領域の外部に位置

(Stevens & Kallman 1990)

電離パラメータ:  $\xi = \frac{F_X}{n}$   $F_X$ : X線フラックス  
 $n$ : 個数密度

# ラインフォースを含む輻射流体シミュレーション

基礎方程式 [球座標  $(r, \theta, \phi)$ ]

(1) 質量保存の式  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$

(2) 運動方程式  $\frac{\partial (\rho v_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_r \mathbf{v}) + g_r = f_{rad, r}$

$\frac{\partial (\rho v_\theta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\theta \mathbf{v}) + g_\theta = f_{rad, \theta}$

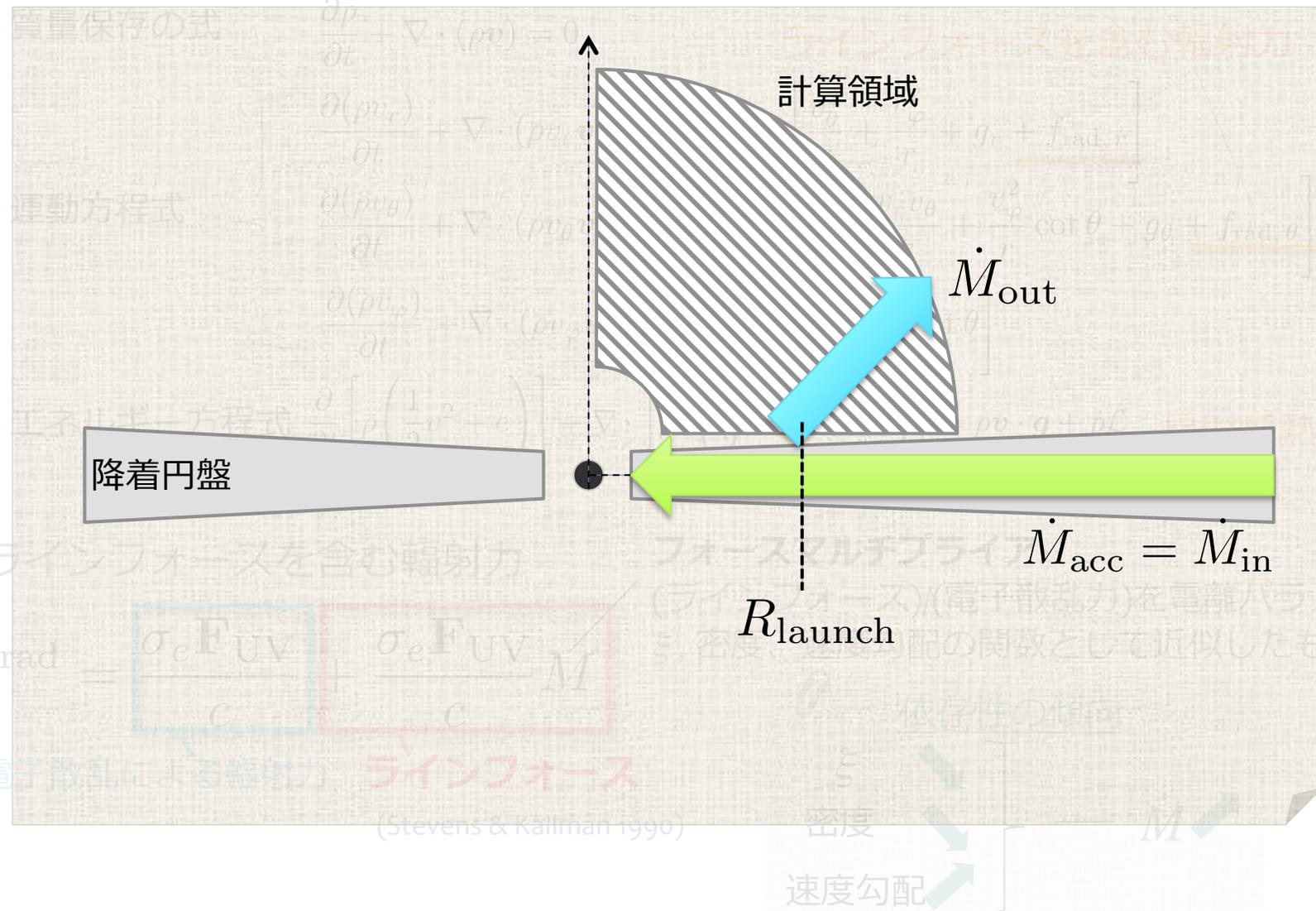
(3) エネルギー方程式  $\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( \frac{1}{2} v^2 + e \right) \right] + \nabla \cdot \left( \rho v e + p \mathbf{v} \right) = \rho v \cdot \mathbf{g} + \rho f_{rad}$

☆ ラインフォースを含む輻射力

$$\mathbf{f}_{rad} = \frac{\sigma_e F_{UV}}{c} \mathbf{M} + \frac{\sigma_e F_{UV}}{c} \mathbf{M}$$

電子散乱による輻射力 ラインフォース

(Stevens & Kallman 1990)



電離パラメータ:  $\xi = \frac{F_X}{n}$   $F_X$ : X線フラックス  $n$ : 個数密度

# ラインフォースを含む輻射流体シミュレーション

基礎方程式 [球座標  $(r, \theta, \phi)$ ]

(1) 質量保存の式  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$

(2) 運動方程式  $\frac{\partial(\rho v_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_r \mathbf{v}) + g_r - f_{rad,r}$

$\frac{\partial(\rho v_\theta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\theta \mathbf{v}) + \frac{v_\phi^2}{r} \cot \theta + g_\theta - f_{rad,\theta}$

$\frac{\partial(\rho v_\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\phi \mathbf{v})$

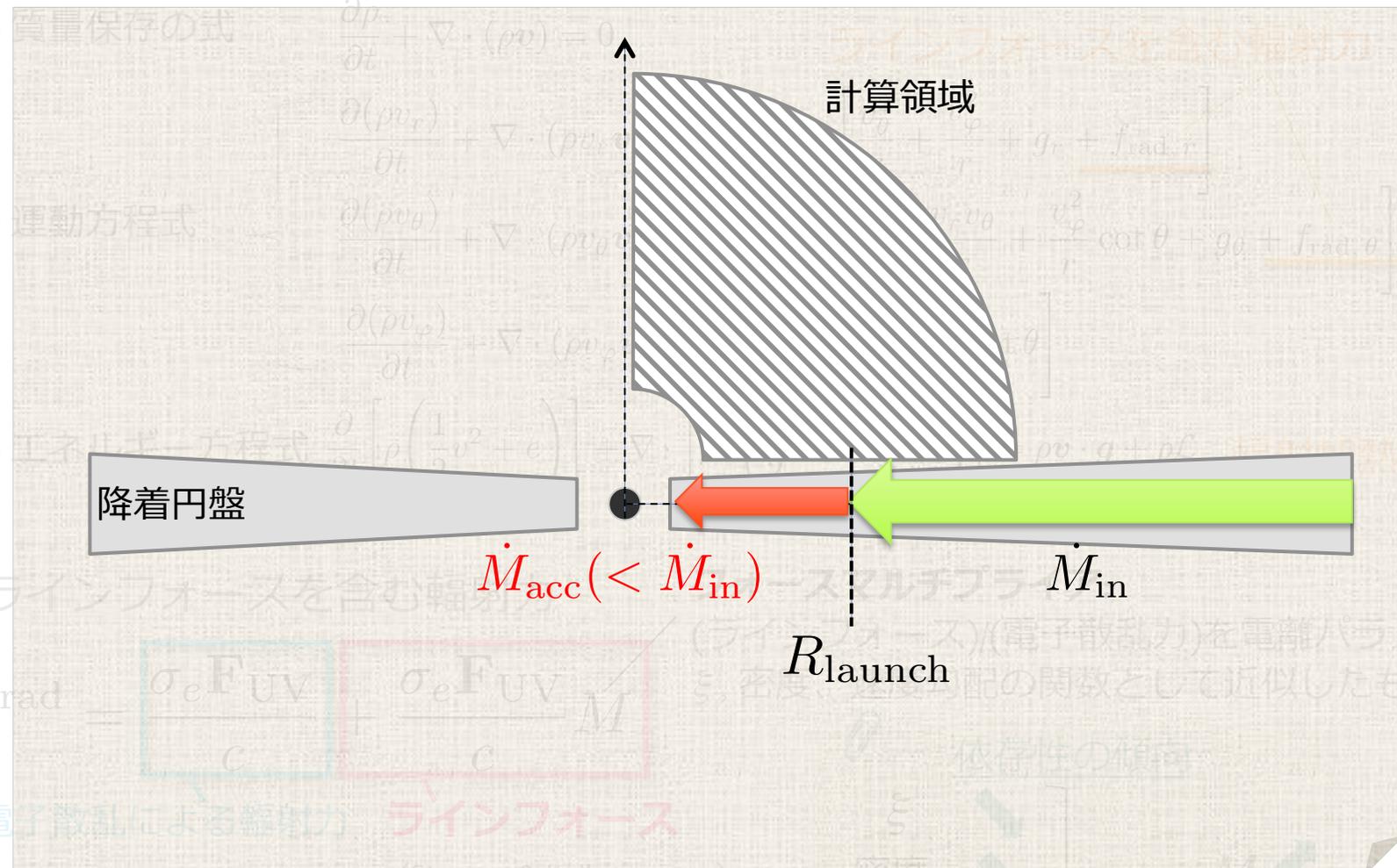
(3) エネルギー方程式  $\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( \frac{1}{2} v^2 + e \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho v \left( \frac{1}{2} v^2 + e \right) + p \mathbf{v} \right] + \rho v \cdot \mathbf{g} + \rho f_{rad}$

☆ ラインフォースを含む輻射流体シミュレーション (ラインフォース)(電子散乱力)を電離パラメータ

$$\mathbf{f}_{rad} = \frac{\sigma_e F_{UV}}{c} + \frac{\sigma_e F_{UV}}{c} M$$

電子散乱による輻射力 ラインフォース

(Stevens & Kallman 1990)



電離パラメータ:  $\xi = \frac{F_X}{n}$   $F_X$ : X線フラックス  $n$ : 個数密度



# ラインフォースを含む輻射流体シミュレーション

基礎方程式 [球座標  $(r, \theta, \phi)$ ]

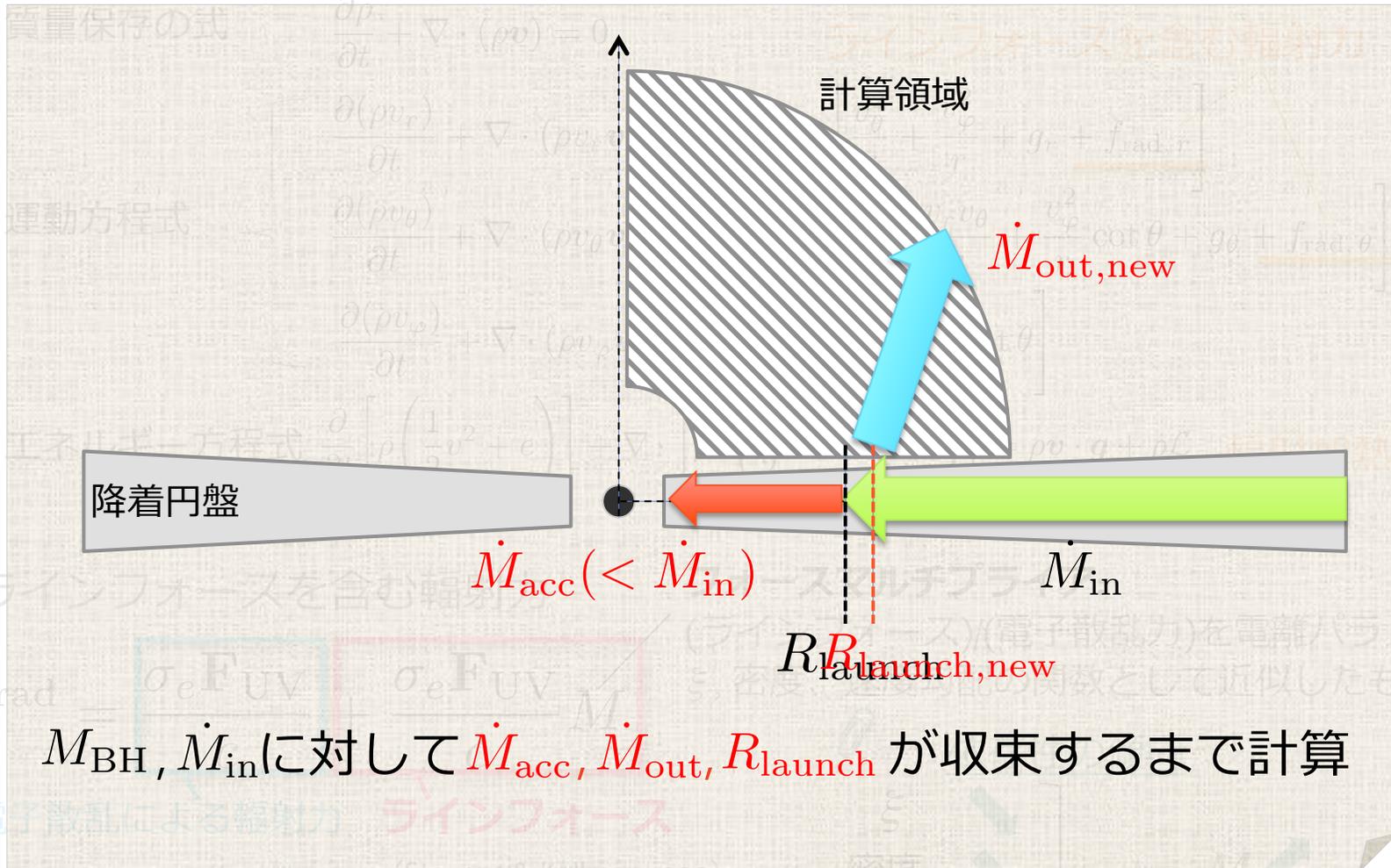
(1) 質量保存の式  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$

(2) 運動方程式  $\frac{\partial (\rho v_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_r \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial r} + g_r - f_{\text{rad},r}$

(2) 運動方程式  $\frac{\partial (\rho v_\theta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\theta \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial \theta} + g_\theta - f_{\text{rad},\theta}$

(2) 運動方程式  $\frac{\partial (\rho v_\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\phi \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial \phi} + g_\phi - f_{\text{rad},\phi}$

(3) エネルギー方程式  $\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( \frac{1}{2} v^2 + e \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \mathbf{v} \left( \frac{1}{2} v^2 + e \right) \right] = \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g} + \rho \dot{e} - \dot{q} + \dot{q}_{\text{rad}}$



☆ ラインフォースを含む輻射流体シミュレーション (ラインフォース) (電子散乱力) を電離パラメータ  $\xi$  を用いて表現する。この場合、電離パラメータ  $\xi$  は、電離パラメータ  $\xi$  の値を電離パラメータ  $\xi$  の値として近似したもの。

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

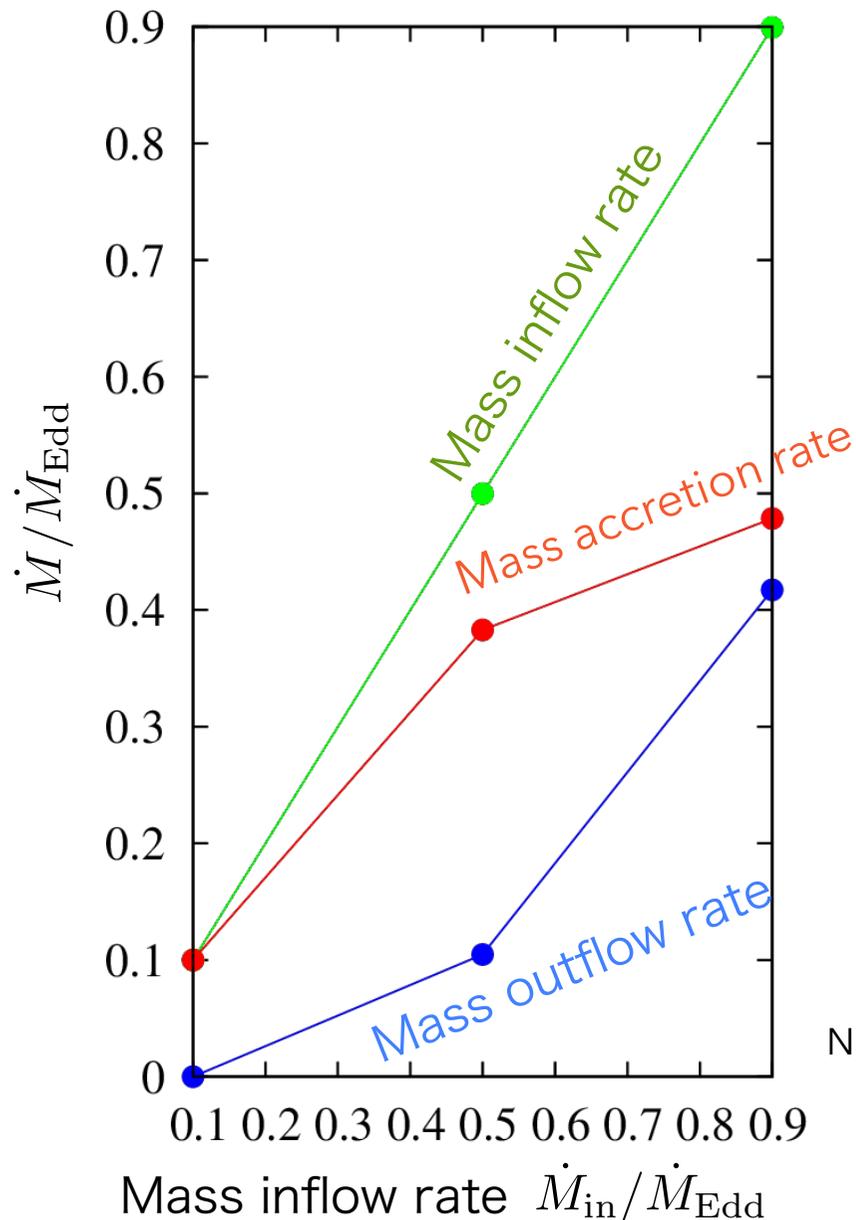
$M_{\text{BH}}, \dot{M}_{\text{in}}$  に対して  $\dot{M}_{\text{acc}}, \dot{M}_{\text{out}}, R_{\text{launch}}$  が収束するまで計算

(Stevens & Kallman 1990)



電離パラメータ:  $\xi = \frac{F_X}{n}$   $F_X$ : X線フラックス  $n$ : 個数密度

# 計算結果－質量放出率と降着率



## 質量流入率が小さい場合

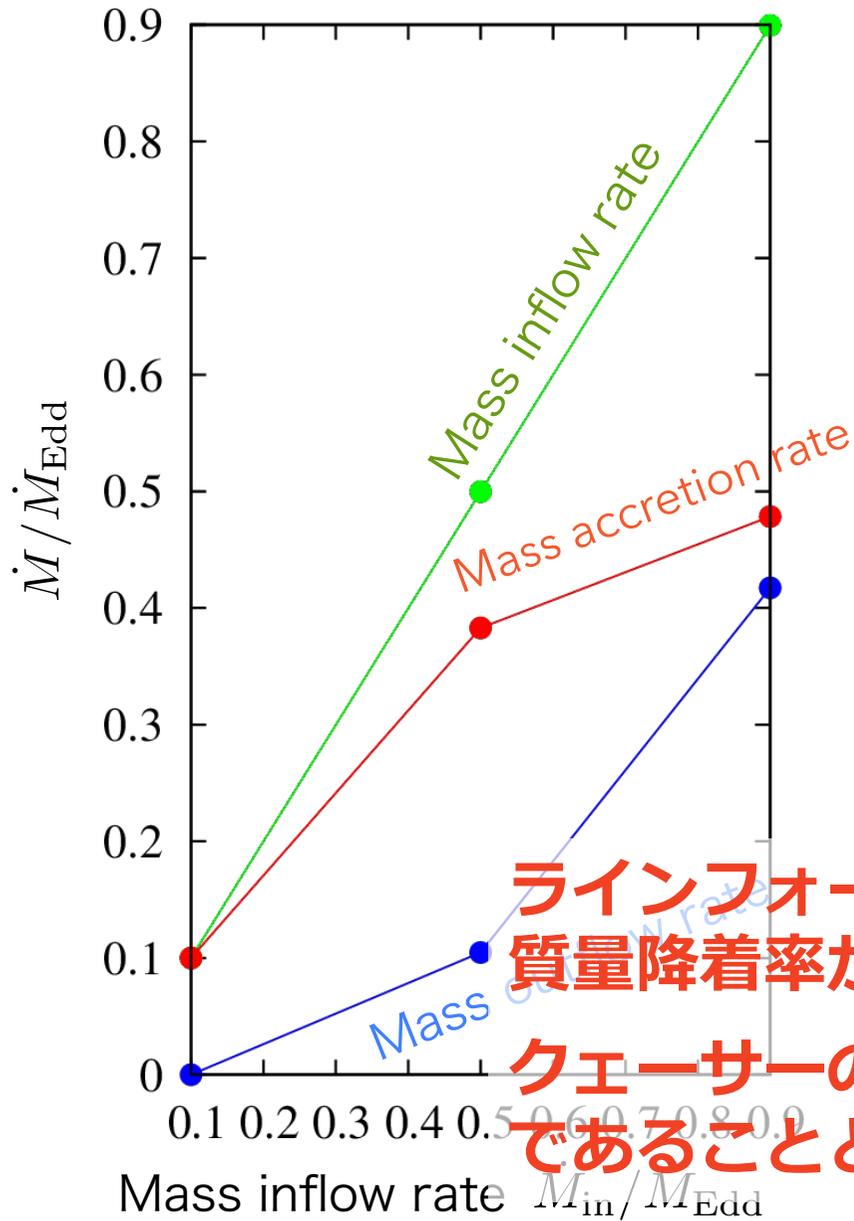
- 質量放出率は小さく、質量流入率～質量降着率

## 質量流入率が大きい場合

- 流入した質量の約半分程度がアウトフローとして放出
- 質量降着率は流入率の半分以下！

Nomura et al. in prep

# 計算結果－質量放出率と降着率



## 質量流入率が小さい場合

- 質量放出率は小さく、質量流入率～質量降着率

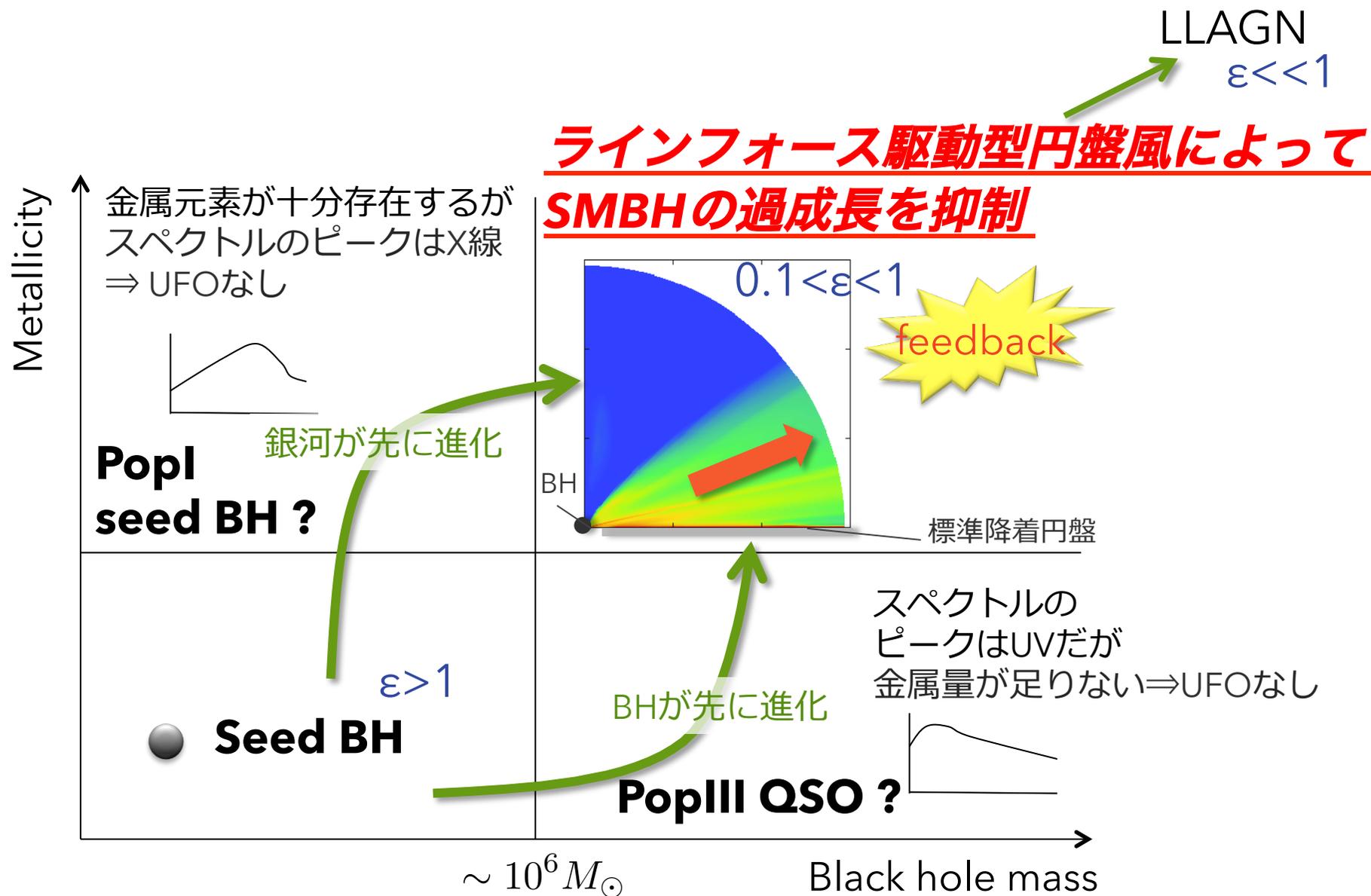
## 質量流入率が大きい場合

- 流入した質量の約半分程度がアウトフローとして放出
- 質量降着率は流入率の半分以下！

ラインフォース駆動型円盤風の噴出によって質量降着率が大きく減少

クェーサーのほとんどがsub-Eddingtonであることと無矛盾

# SMBHの進化とラインフォース駆動型円盤風の役割



## Summary

- UFOの有力モデルであるラインフォース駆動型円盤風に関して、**質量降着率・放出率を自己矛盾なく計算する世界初の新モデル**を構築
- 明るいAGNの場合、円盤風の噴出によって、**質量降着率がおよそ半分まで減少**することがわかった。
- **ラインフォース駆動型円盤風はSMBH進化の最終段階でBHへの質量降着を抑制する。**