

Ultra Fast Outflowの ライنفォース駆動型円盤風モデル



野村 真理子(国立天文台)

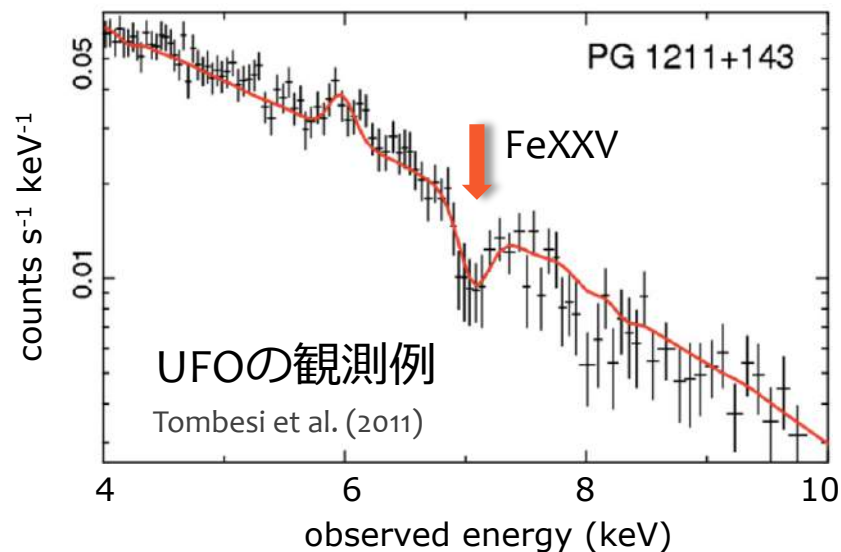
共同研究者:

大須賀健, 高橋博之, 吉田鉄生(国立天文台)

和田桂一(鹿児島大学)

Ultra Fast Outflow

- ✧ 一部のAGNの輻射スペクトルに青方偏移した吸収線が発見、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線観測で見つかった新種のアウトフロー

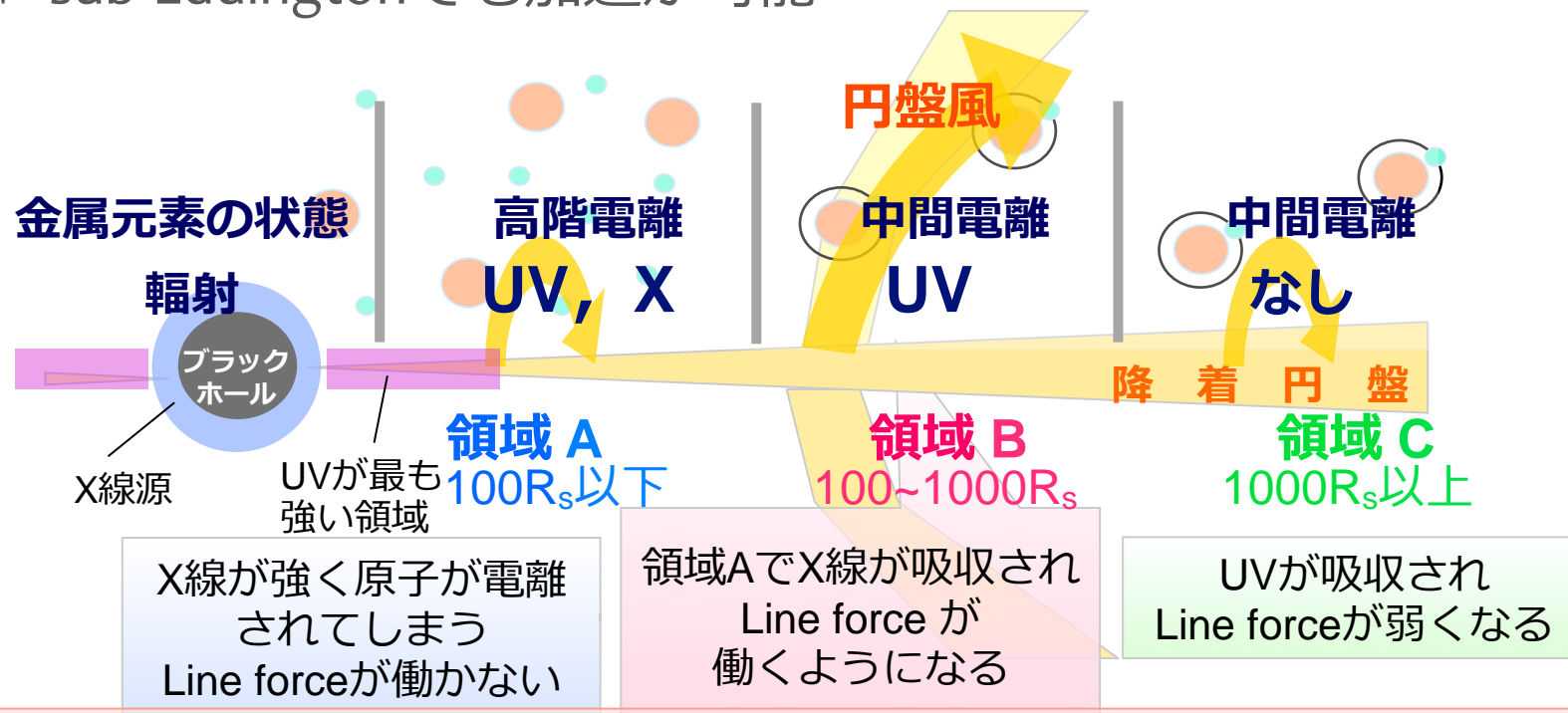


- ☆ 速度 $\sim 0.1c$ - $0.3c$, Seyfert銀河の約半数に存在(Tombesi et al. 2011)
- ☆ 質量放出が大きく、質量降着が減りブラックホールの成長が遅くなる
- ☆ 質量放出、エネルギー放出が大きく、母銀河の星形成に影響する可能性

UFOの構造、噴出メカニズムは不明

ラインフォース駆動型円盤風モデル

- ✧ 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
- ✧ 円盤風の加速と電離状態を同時に説明できる
- ✧ sub-Eddingtonでも加速が可能



2次元輻射流体シミュレーションで円盤風のダイナミクスを調べる

- ★ 広いパラメータ領域を調査
- ★ UFOの観測との比較を行う

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

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

(2) 運動方程式

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

コンプトン加熱/冷却、
電離、再結合による加熱/冷却、
制動放射、輝線放射による冷却

(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

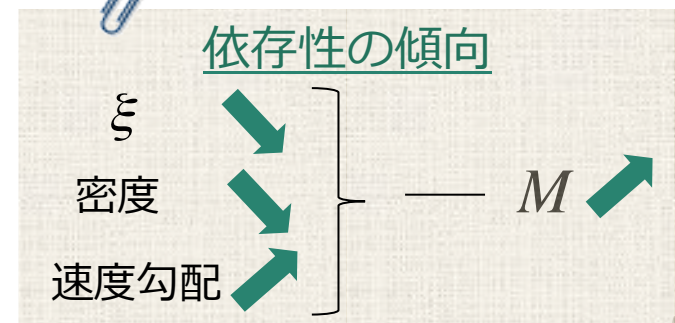
ラインフォース

(Stevens & Kallman 1990)

フォースマルチプライア

電離パラメータ ξ , 密度、速度勾配の関数

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

(1) 質量保存の式

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

(2) 運動方程式

$$\frac{\partial(\rho v_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_r \mathbf{v}) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta}$$

$$\frac{\partial(\rho v_\theta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\theta \mathbf{v}) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta}$$

$$\frac{\partial(\rho v_\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_\phi \mathbf{v}) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta}$$

(3) エネルギー方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(\frac{1}{2} v^2 + \epsilon \right) \right] + \nabla \cdot \left(\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g} + \rho \mathcal{L} \right) = \rho v \cdot \mathbf{g} + \rho \mathcal{L}$$

重力源: ブラックホール
X線光源: 中心点光源

計算領域

UV光源: 降着円盤

$30R_s$

$1500R_s$

r

※ 輻射はUVとXの2色に分けて扱う
※ 輻射場を外場のように扱う

☆ 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

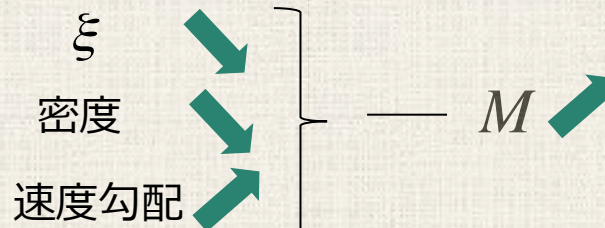
(Stevens & Kallman 1990)

フォースマルティプライア

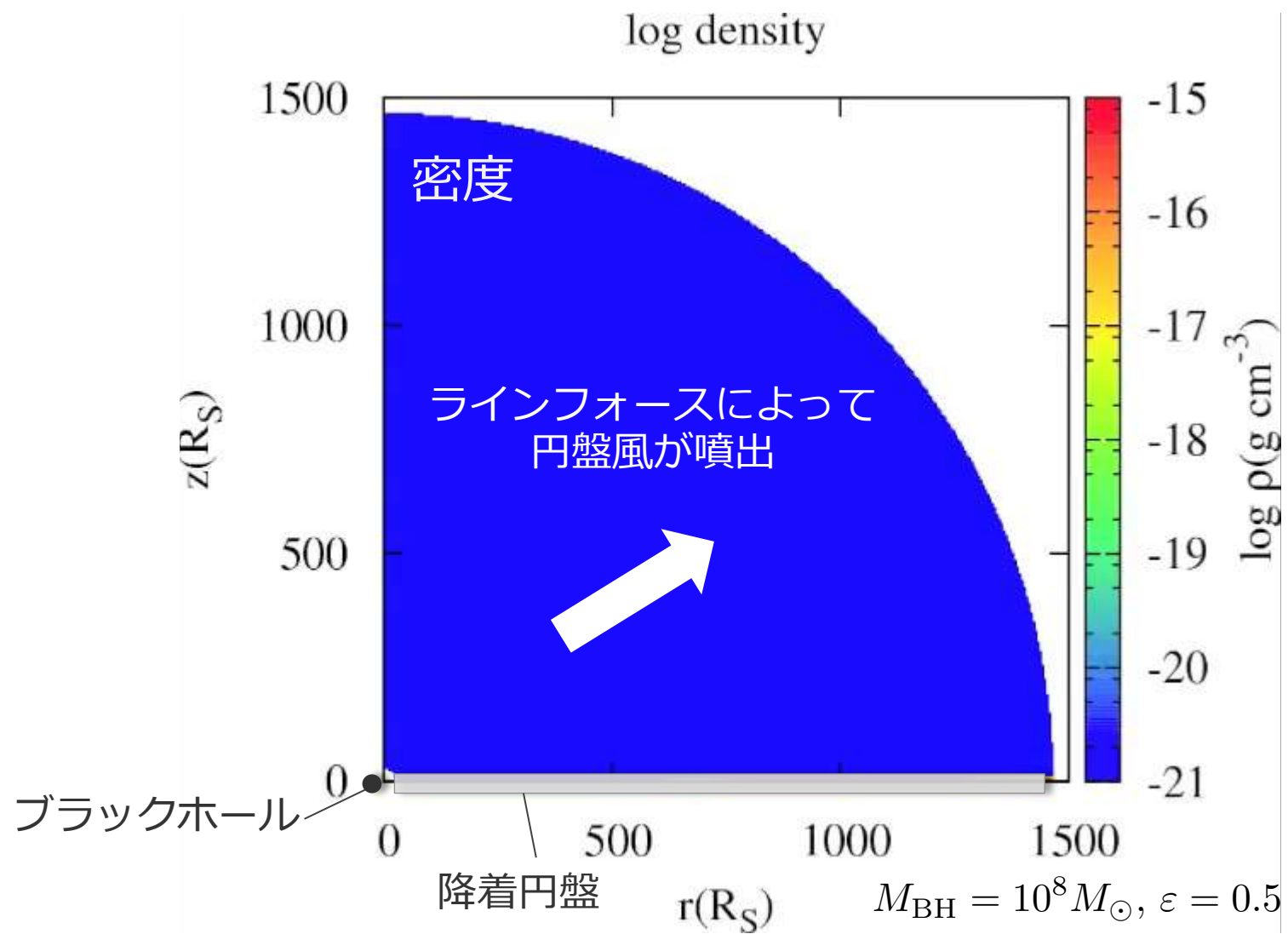
電離パラメータ ξ , 密度、速度勾配の関数

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

依存性の傾向



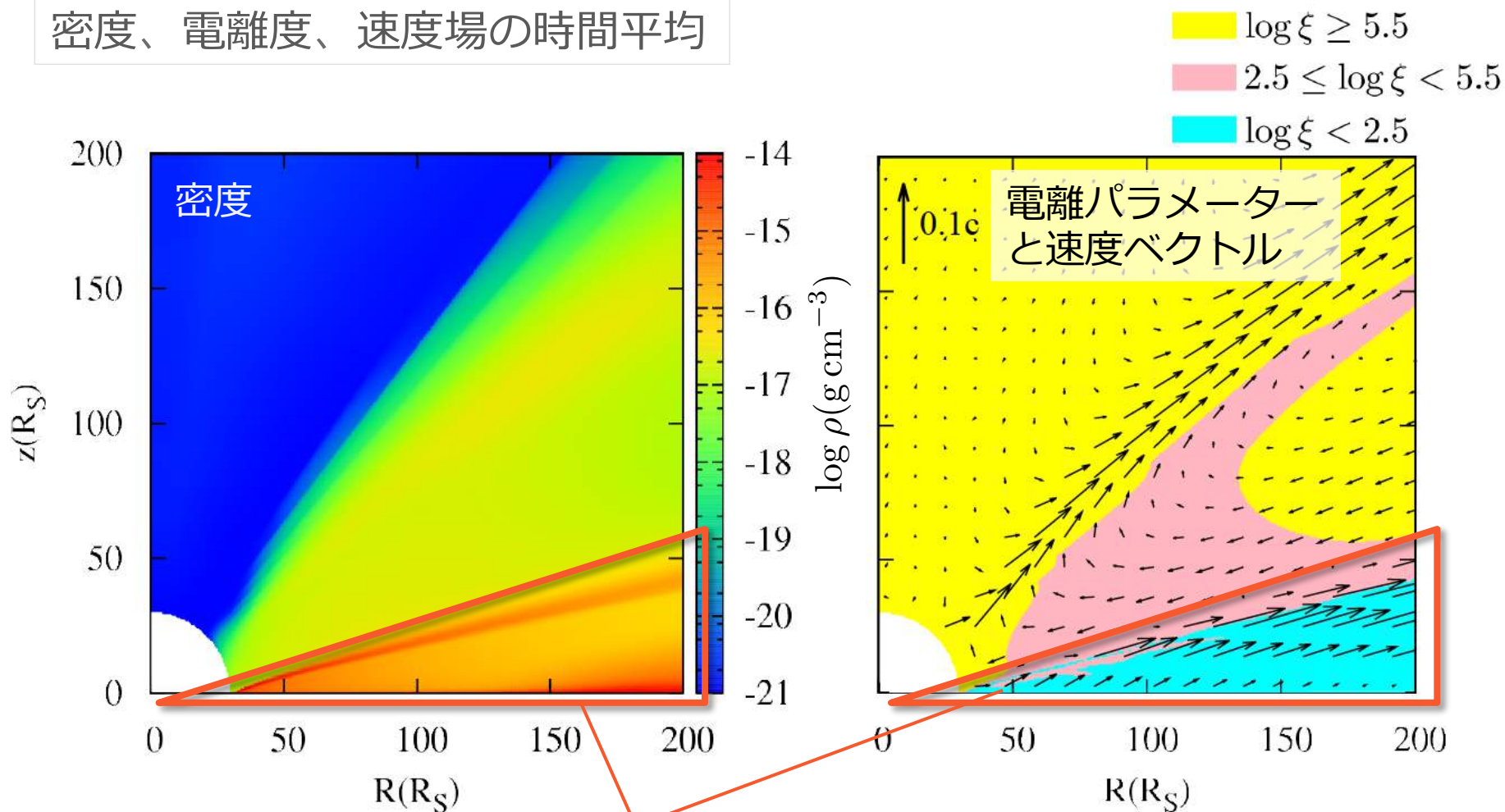
結果



Nomura et al. submitted to PASJ

円盤風の噴出メカニズム

密度、電離度、速度場の時間平均



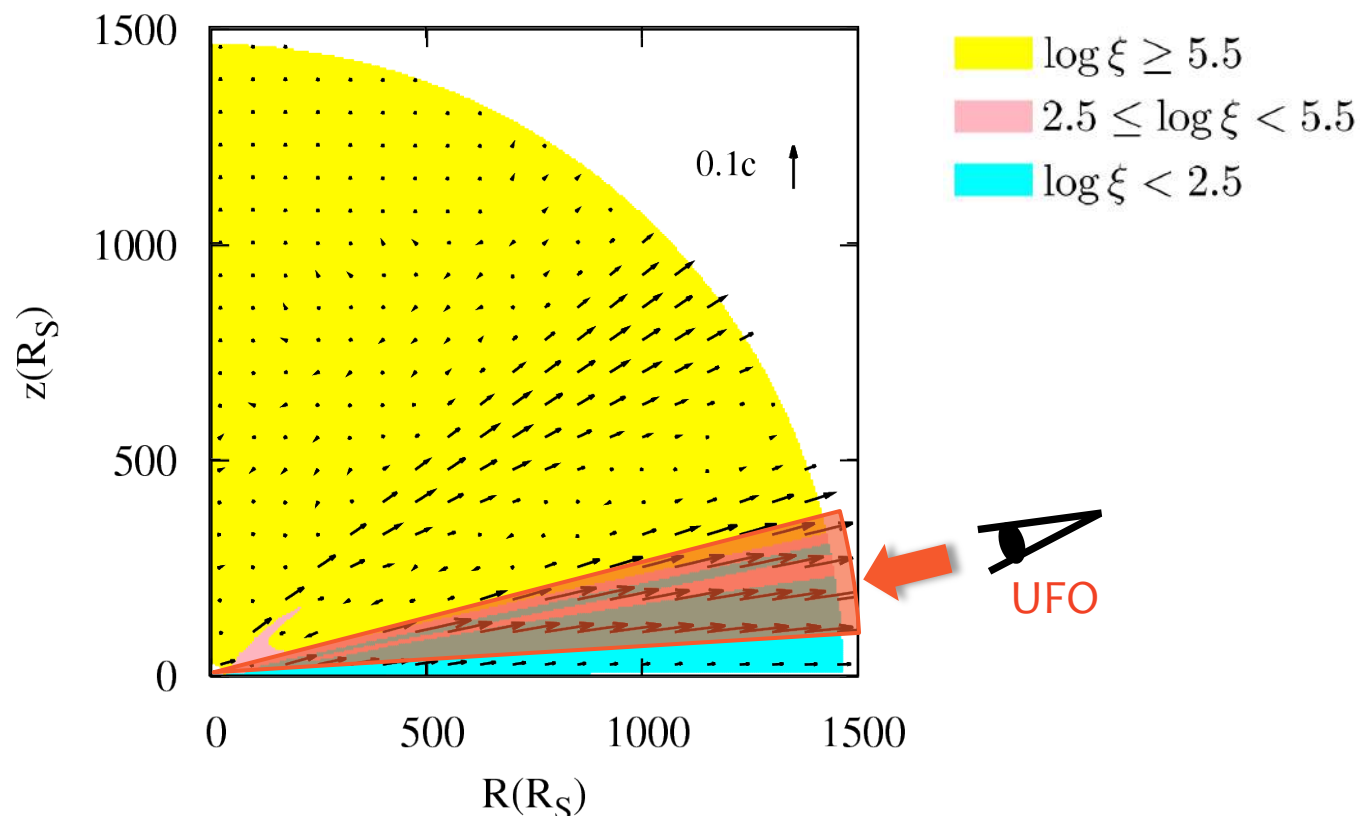
☆ 電離パラメータが低い領域($\log \xi \lesssim 2.5$)では、ラインフォースが働きやすい \Rightarrow 密度が高く、速度が速い($v \sim 0.1c$)円盤風が噴出

UFOの観測との比較

視線に沿って電離パラメータと速度、柱密度をUFOの観測と比較

UFOが観測される条件: 電離度 $2.5 < \log \xi < 5.5$ を満たす物質の...

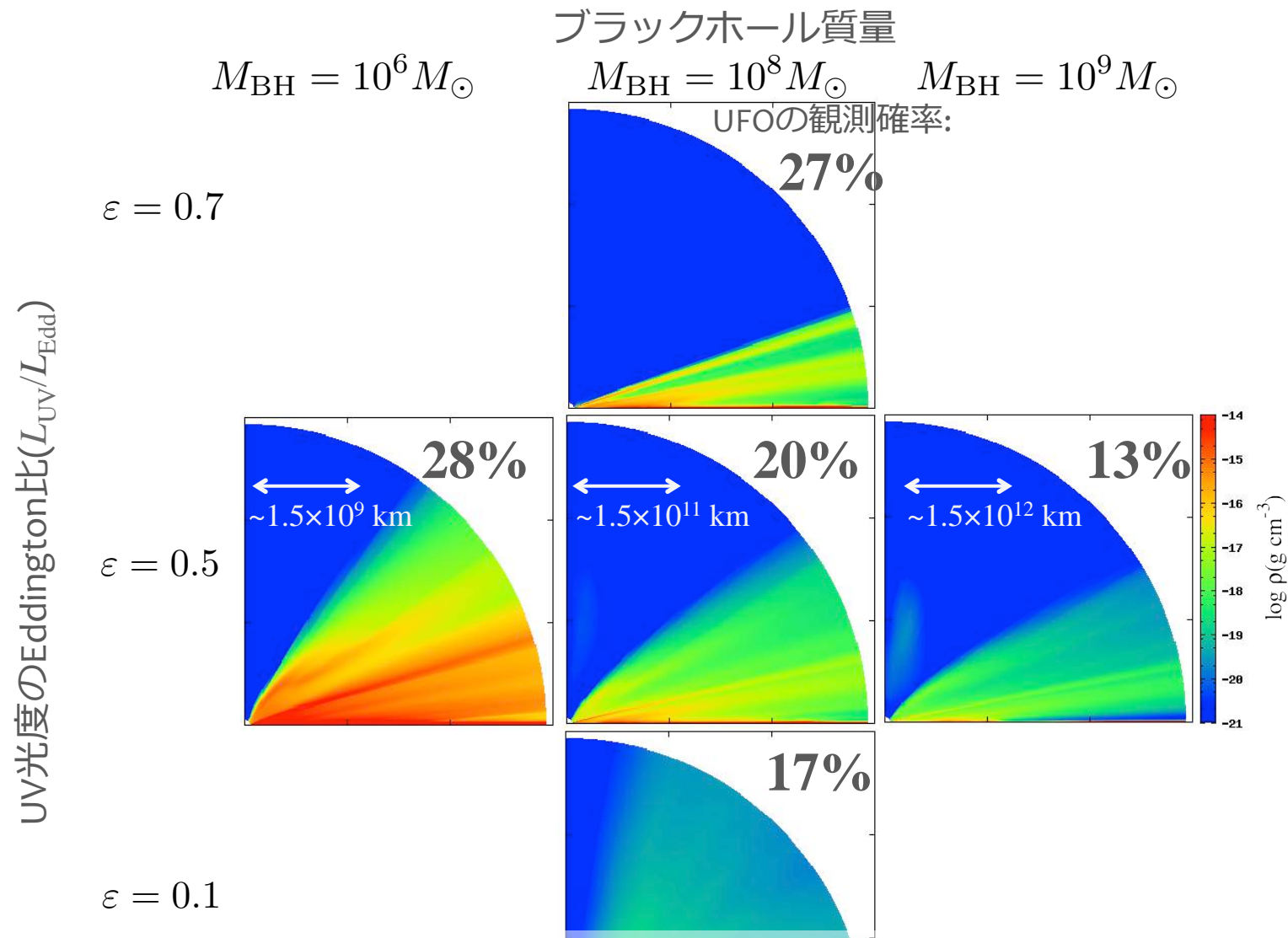
(1) 最大速度 $10,000 \text{ km s}^{-1}$ 以上 かつ (2) 柱密度 10^{22} cm^{-2} 以上



☆ $\sim 70^\circ$ から観測した場合にUFOの特徴が現れる

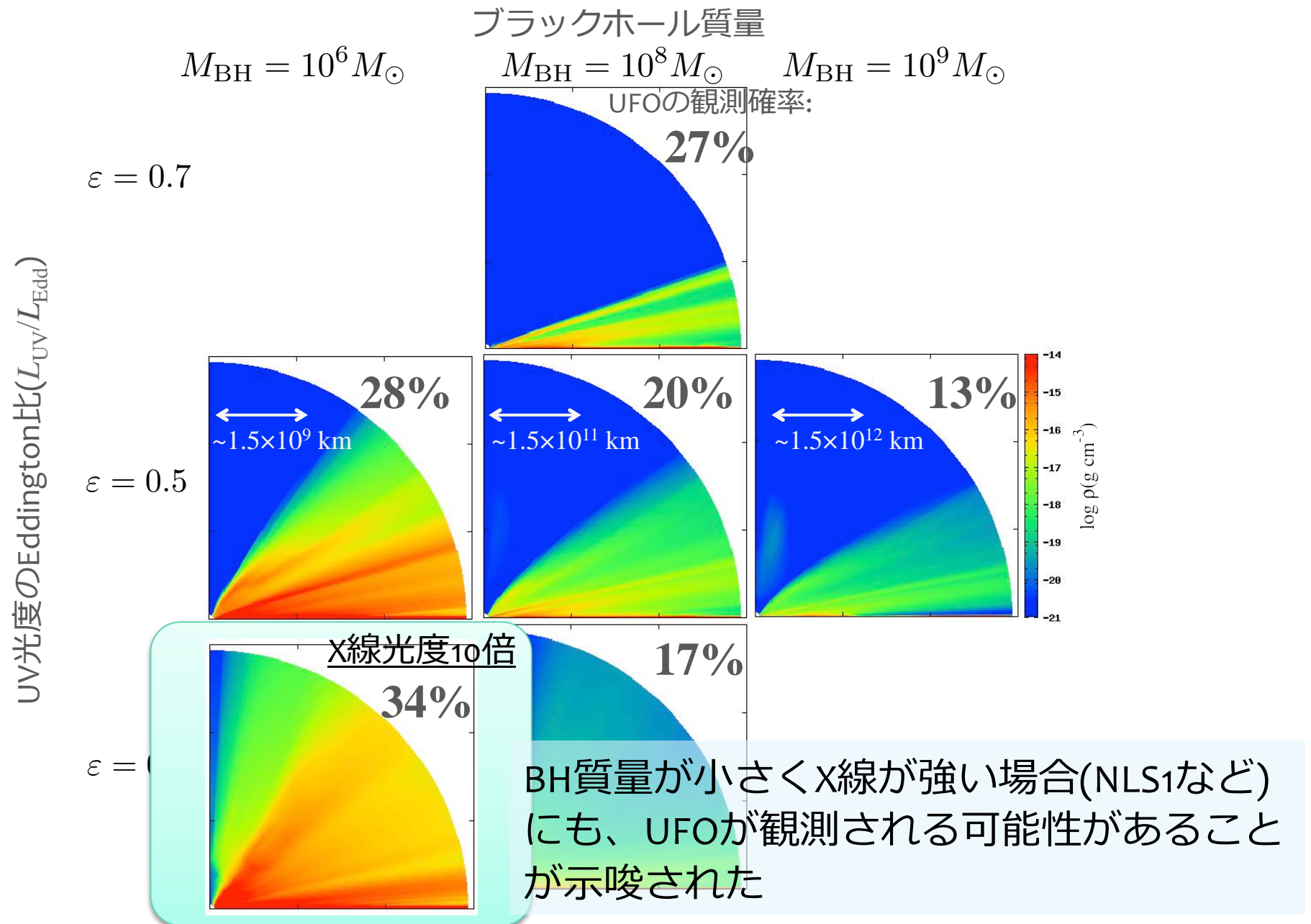
☆ UFOの観測確率 [(UFOが観測される立体角)/ 4π] の時間平均は **$\sim 20\%$**

ブラックホール質量及びエディントン比依存性



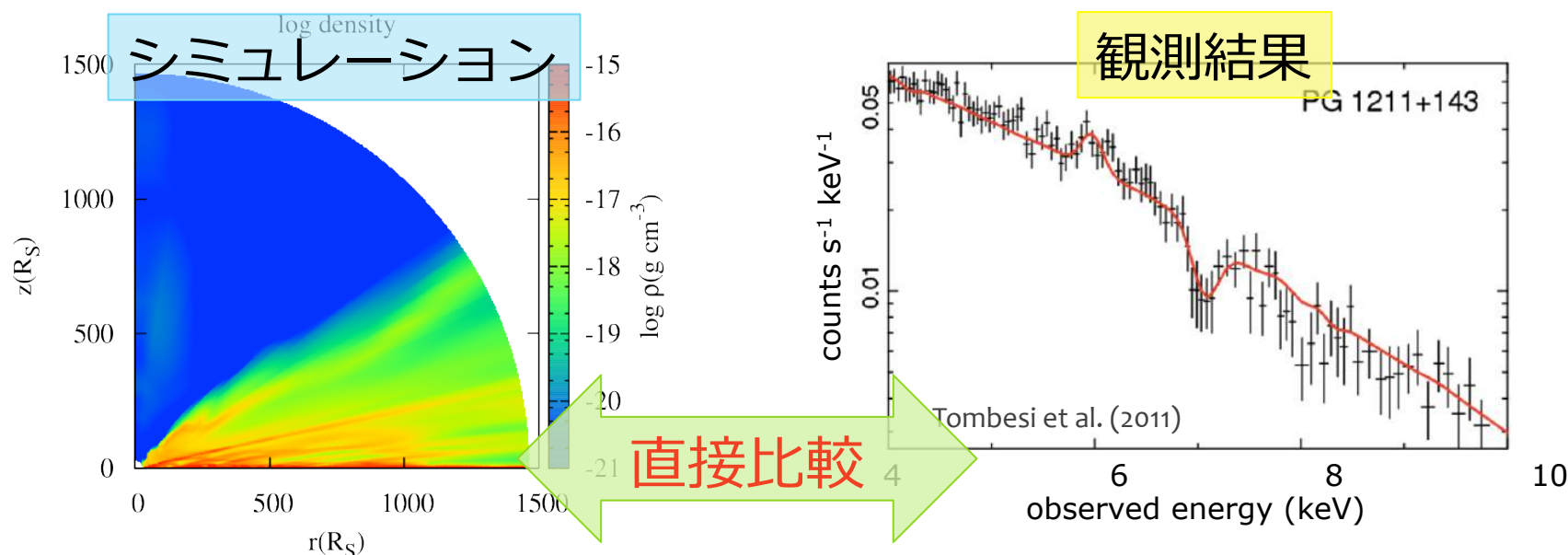
- ☆ 広いパラメータ領域で円盤風が噴出しUFOの観測確率は~15-30%
- ☆ ただし、 $\varepsilon=0.01$ のとき円盤風は噴出しない

ブラックホール質量及びエディントン比依存性



スペクトル合成

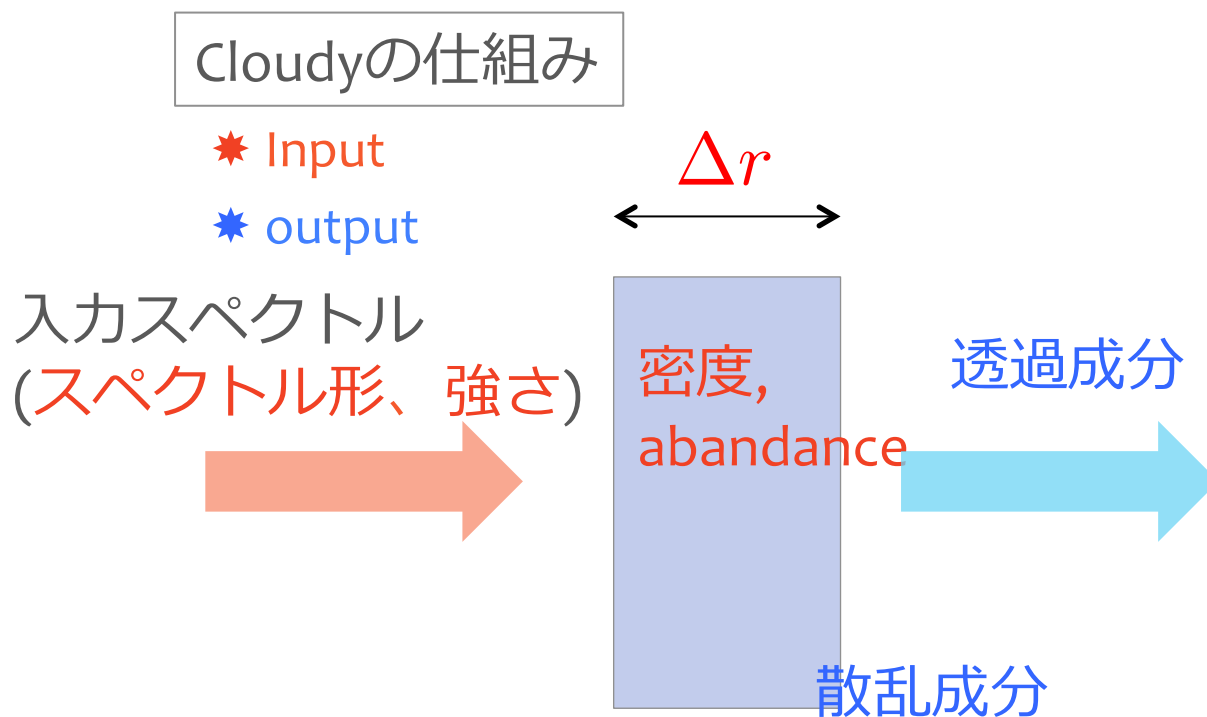
- ☆ これまではシミュレーション結果を観測的特徴(電離度、速度、柱密度)と比較することで、UFOが検出されるかどうかを調べた \Rightarrow 本当に吸収構造が再現されるのか？
- ☆ UFOはASTRO-Hの主要ターゲット(UFOのサンプル数増加、吸収プロファイルなどの情報が得られる) \Rightarrow 観測結果を解釈する理論モデルが必要



シミュレーション結果を元にした輻射スペクトル計算が不可欠

Cloudy

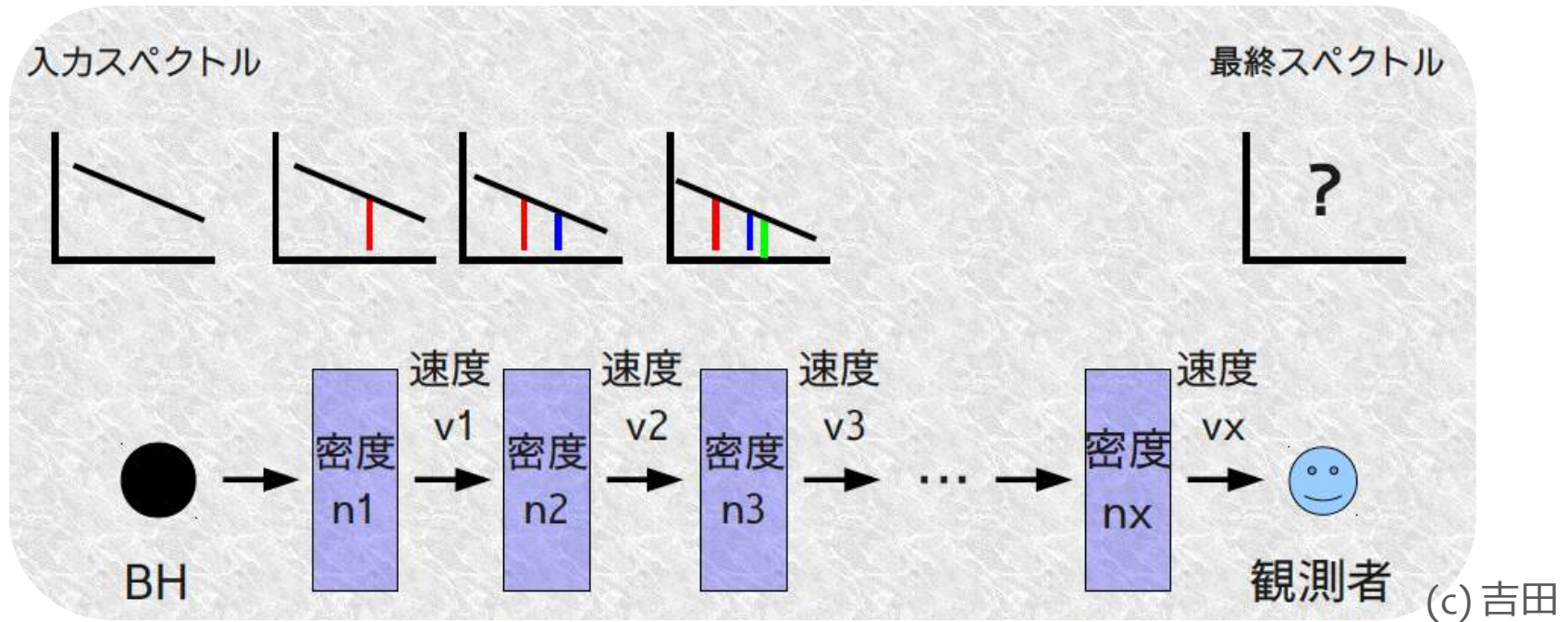
✧ 1次元輻射輸送コード(Cloudy)を用いてスペクトルを計算



問題点

- ✧ 一つの密度しか解けない
- ✧ スペクトルを青方(赤方)偏移させることができない

アウトフローに適用するための工夫



- 1) シミュレーション結果の速度、密度を視線に沿ってx個のゾーンに分ける
- 2) 各ゾーンで...
 - ★ 出力スペクトルを青方(赤方)偏移させて次の入力とする
 - ★ 球状に広がるので r^2 でIntensityを下げる
 - ★ 各ゾーンの速度差は相対論的に計算
- 3) x回繰り返すことで、アウトフローを透過してきたスペクトルが得られる

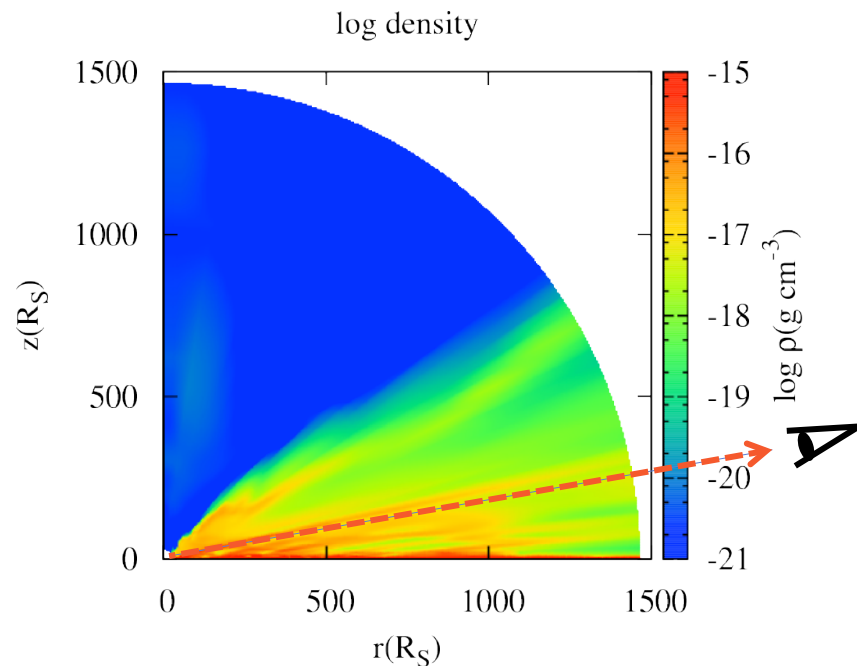
Setup

Input:

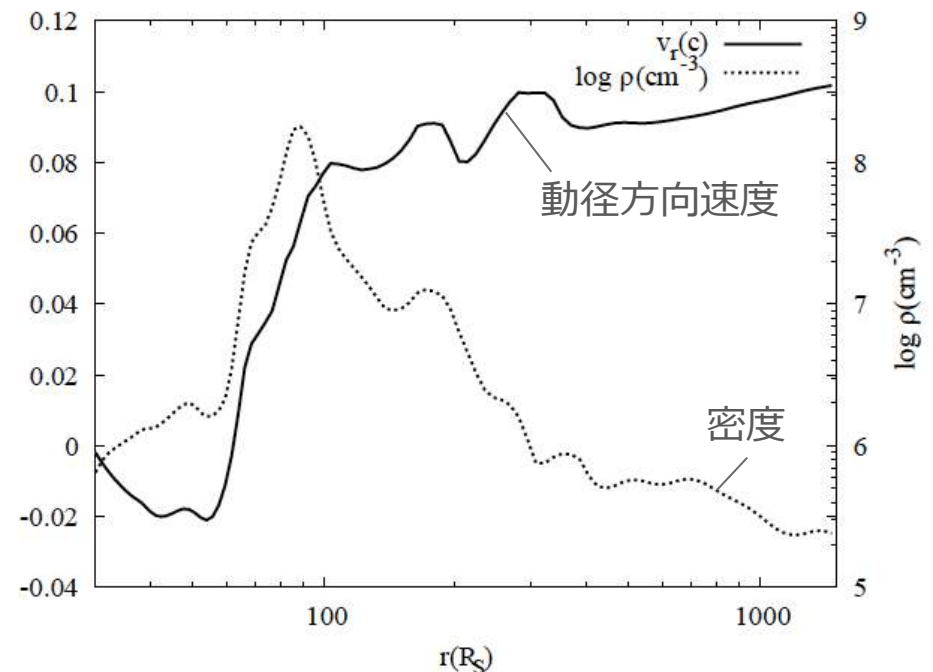
入カスペクトル: Cloudyで用意されている典型的AGNスペクトル

アバundance: 太陽組成(Feのみラインを見やすくするため1万倍程度)

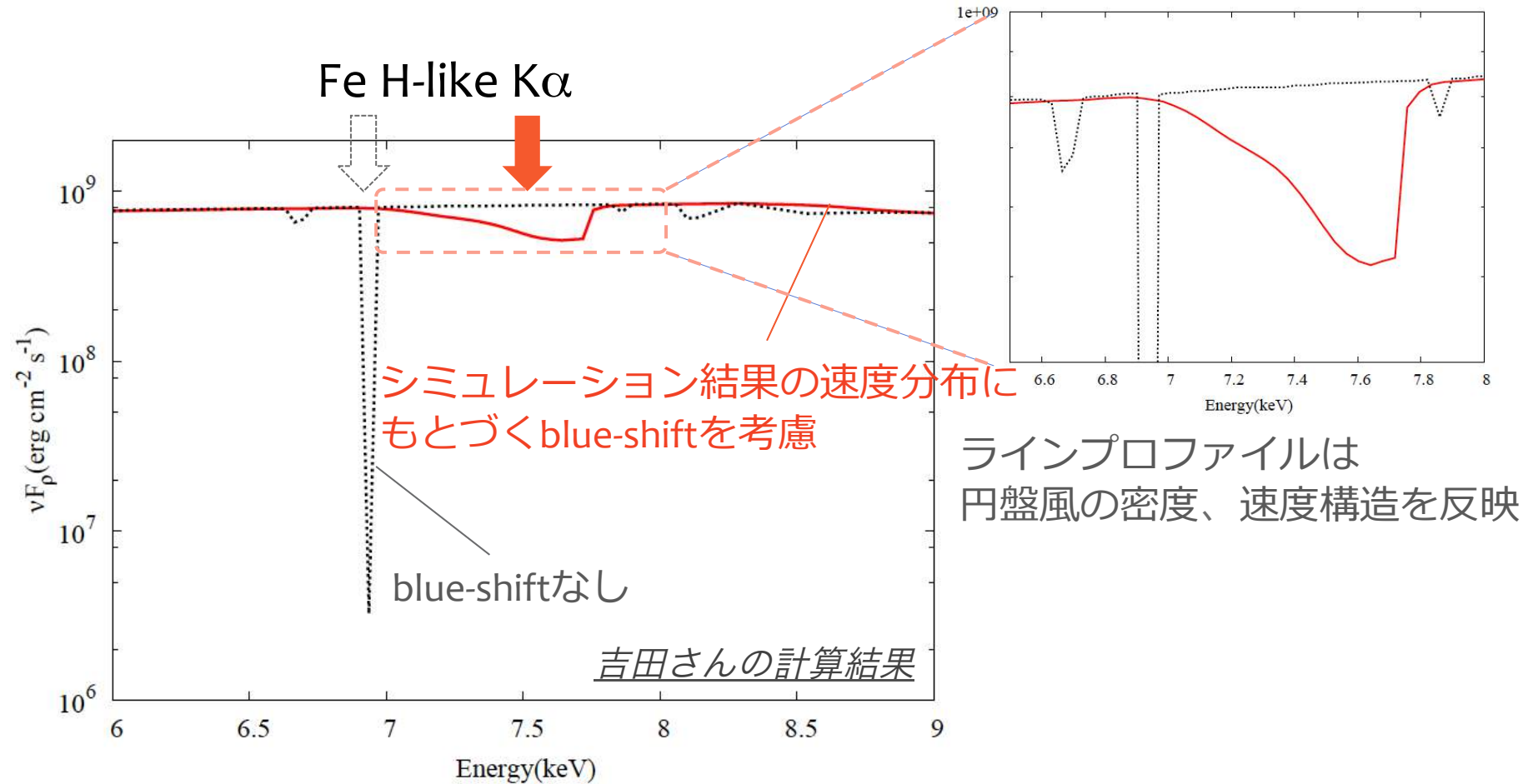
シミュレーション結果の動径方向速度、密度



視線に沿った動径方向速度および密度



結果



スペクトルにblue-shiftした鉄の吸収線が現れることがわかった。

Summary

- ✧ 2次元輻射流体シミュレーションを行い、ラインフォース駆動型円盤風のダイナミクスを調べた。
- ✧ 計算の結果、funnel型で速度 $\sim 0.1c$ の円盤風が噴出した。
- ✧ シミュレーション結果の電離度、速度、柱密度はUFOのX線観測と合致した。
- ✧ 強いX線照射がある場合も、円盤風が噴出しUFOが観測される可能性があることがわかった。
- ✧ シミュレーション結果を元にしたスペクトル合成の結果、青方偏移した鉄の吸収線が現れた。