

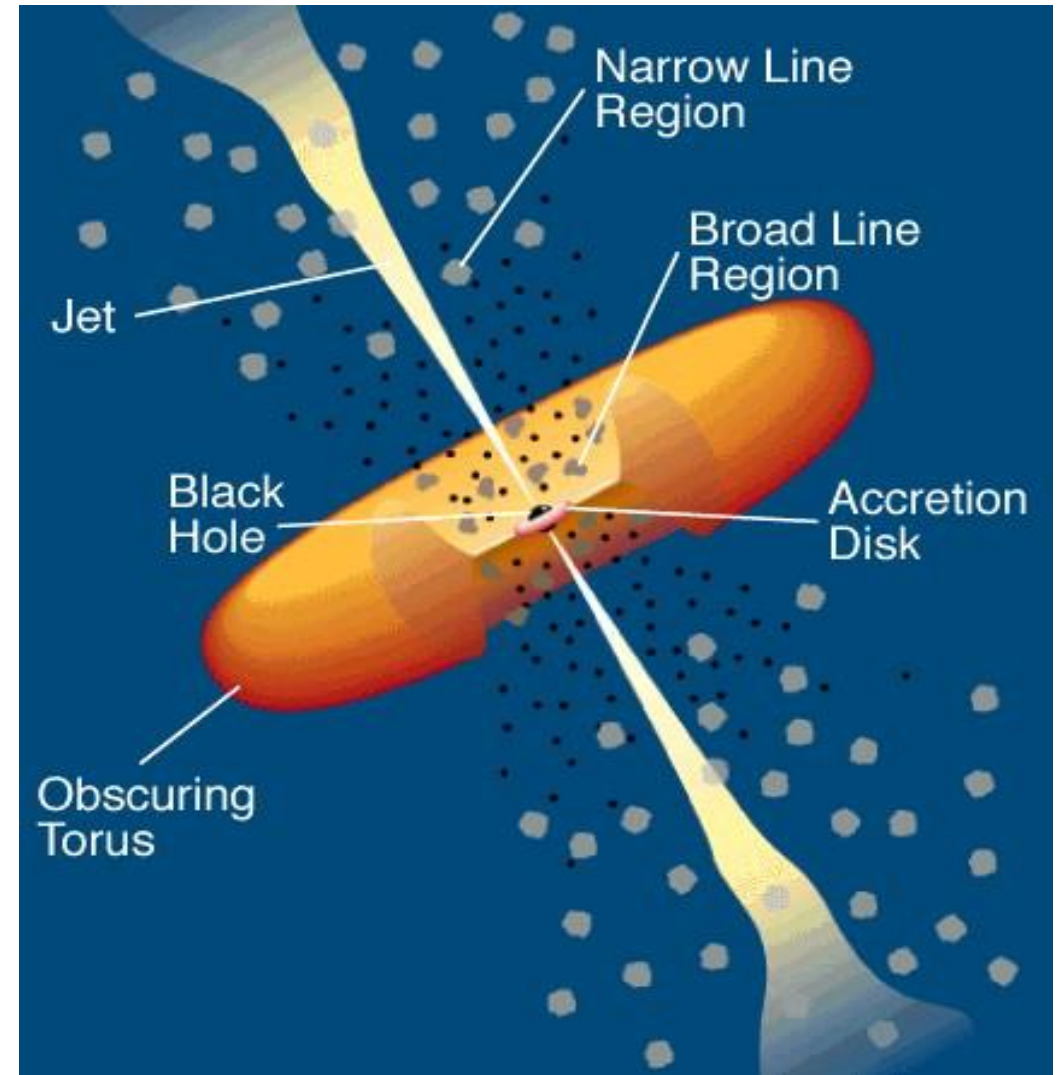
円盤風の噴出による 降着円盤の構造の変化

筑波大学理工学群物理学類4年

荻野 圭那子

活動銀河核(AGN)

- 強力な放射やガス噴出現象など、様々な高エネルギー現象が起こる銀河の中心部分
- 活動のエネルギー源は、巨大なブラックホールと降着円盤による重力エネルギーの解放であると考えられる



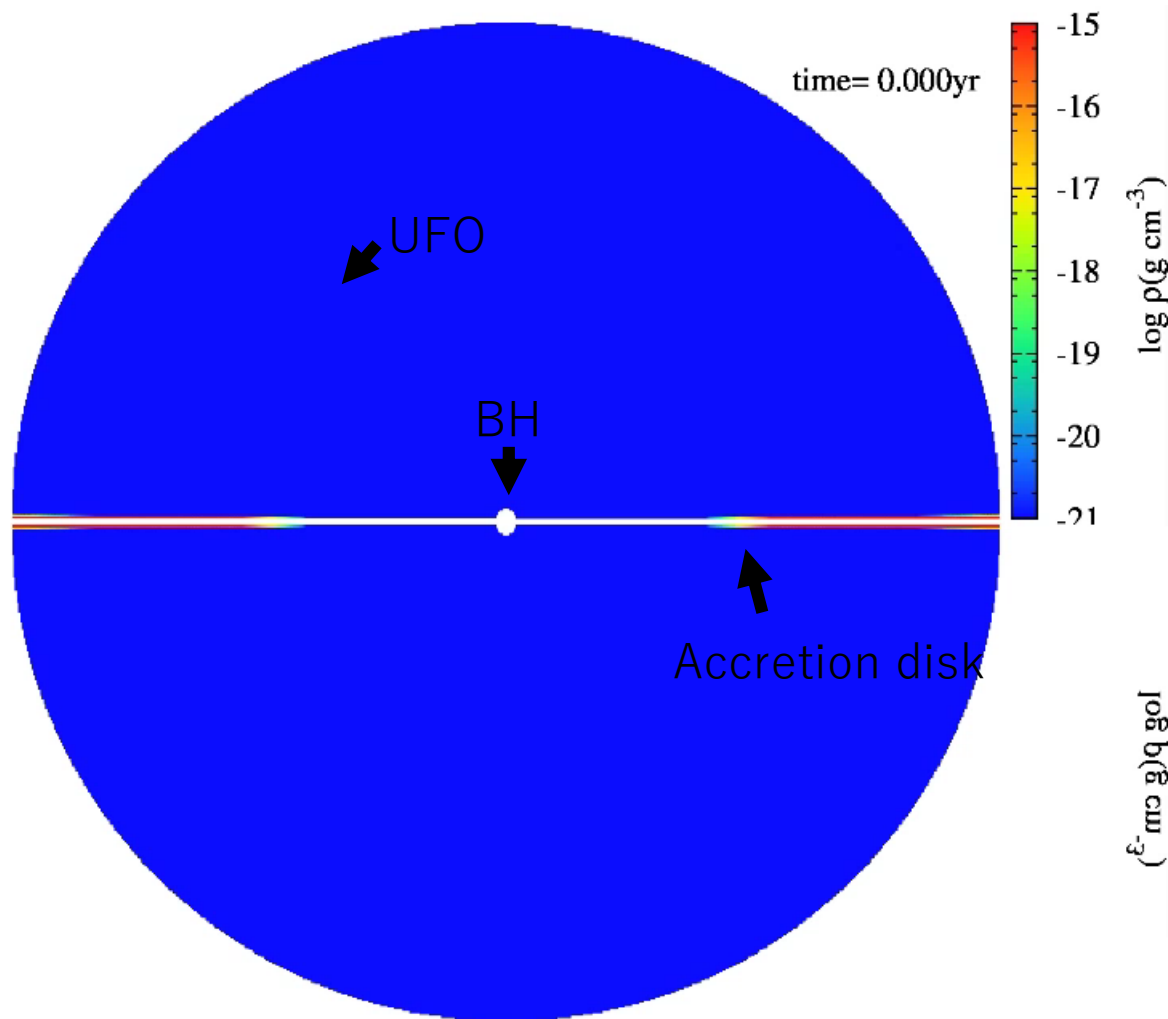
活動銀河核モデル (Urry & Padovani, 1995)

Ultra-fast Outflow (UFO)

- Ultra-fast outflow(UFO)：一部の活動銀河核の輻射スペクトルに青方偏移した鉄の吸収線が発見される→アウトフローが存在
- UFOの主な特徴
 - X線観測 (FeXXV/FeXXVIの吸収線) により発見された
 - $0.1c \sim 0.3c$ の速度を持つ
 - セイファート銀河の約4割に存在する

UFOはエネルギー放出率、質量放出率が大きくBHの成長やAGNの活動に大きくかかわる可能性がある

UFOのシミュレーション



過去のUFOの研究

- Proga et al. (2000)
- Nomura et al. (2016)

←野村さんの二次元輻射流体シミュレーション
(密度変化)

先行研究の問題点

-円盤風が噴出すると円盤からガスが抜け、
構造に変化が生じるはずであるが、先行研
究では円盤の構造は仮定されており、ガス
の噴出による円盤構造の変化は考慮されて
いない

研究目的

目的：

円盤風の発生による降着円盤の構造の変化を調べる

具体的には、1次元の円盤の方程式を円盤風による質量の抜き取りを考慮して解き、降着円盤の面密度や温度の分布とその時間進化を数値的に調べる

基礎方程式

解くべき方程式

連続の式
$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \dot{M}}{\partial r} + S(r, t) \quad (1)$$

角運動量保存
$$\dot{M} = 6\pi r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2}) \quad (2)$$

テスト計算では、 $\nu \propto r$ として

(1) (2) 式の連立方程式を考える

Σ : 面密度

\dot{M} : 質量降着率

ν : 粘性係数

Ω : 角速度

a : 放射定数

c : 音速

T : 温度

κ : 不透明度

p : 圧力

H : ディスクの厚さの半分

ρ : 密度

μ : 分子量

m : 質量

k : ボルツマン定数

α : 定数係数

(1) 式の導出

連続の式 $\frac{\partial}{\partial t}(2\pi r \Delta r \Sigma) = (-v_r \cdot 2\pi r \Sigma)_r - (-v_r \cdot 2\pi r \Sigma)_{r'}$

$$\cong -2\pi \Delta r \frac{\partial}{\partial r}(r \Sigma v_r) \quad (8)$$

$$\Rightarrow r \frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(r \Sigma v_r) = 0 \quad (9)$$

$$\dot{M} \equiv -2\pi r v_r \Sigma \quad (10)$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \dot{M}}{\partial r}} \quad (1)$$

(2) 式の導出

角運動量保存 $\frac{\partial}{\partial t}(2\pi r \Delta r \Sigma r^2 \Omega) = (-v_r \cdot 2\pi r \Sigma \cdot r^2 \Omega)_r - (-v_r \cdot 2\pi r \Sigma \cdot r^2 \Omega)_{r'} + \frac{\partial G}{\partial r} \Delta r$

$$\cong -2\pi \Delta r \frac{\partial}{\partial r} (r \Sigma v_r r^2 \Omega) + \frac{\partial G}{\partial r} \Delta r \quad (11)$$

ガスリング全体に働くトルクG $G(r, t) = 2\pi r^2 T_{r\varphi} = 2\pi r^3 v \Sigma \frac{\partial \Omega}{\partial r} \quad (12)$

$\Delta r \rightarrow 0$ の極限をとる $r \frac{\partial(\Sigma r^2 \Omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (r \Sigma v_r r^2 \Omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial G}{\partial r} \quad (13)$

連続の式を用い、また v_r を \dot{M} で書き換える $\dot{M} \left[\frac{d}{dr} (r^2 \Omega) \right] = -2\pi \frac{\partial}{\partial r} (r^2 T_{r\varphi}) = -2\pi \frac{\partial}{\partial r} \left(r^3 v \Sigma \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right) \quad (14)$

ここでケプラー角速度 ($\Omega = \sqrt{\frac{GM}{r^3}}$) とすると

$$\dot{M} = 6\pi r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (v \Sigma r^{1/2}) \quad (2)$$

数値計算のために

導出された2式 $\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \dot{M}}{\partial r}$, $\dot{M} = 6\pi r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (v \Sigma r^{1/2})$ をまとめると

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (v \Sigma r^{1/2}) \right] \quad (15)$$

◆ コンピュータでの数値計算のため、(15) 式を変数変換し差分化して書き直す

$X = 2r^{1/2}$ $S = X\Sigma$ と変換

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{12}{X^2} \frac{\partial^2}{\partial X^2} (Sv) \quad (16)$$

差分化 $S_n^{i+1} = S_n^i + \frac{12\Delta t}{X_n^2 \Delta X^2} (S_{n-1}^i v_{n-1}^i + S_{n+1}^i v_{n+1}^i - 2S_n^i v_n^i) \quad (17)$

$$\Delta t < \frac{1}{2} \frac{X_n^2 \Delta X^2}{12v_n} \quad (18)$$

G. T. Bath and J. E. Pringle(1981)

(15)式のある解析解を用いた時間発展の様子を、この数値計算で再現することを目指す

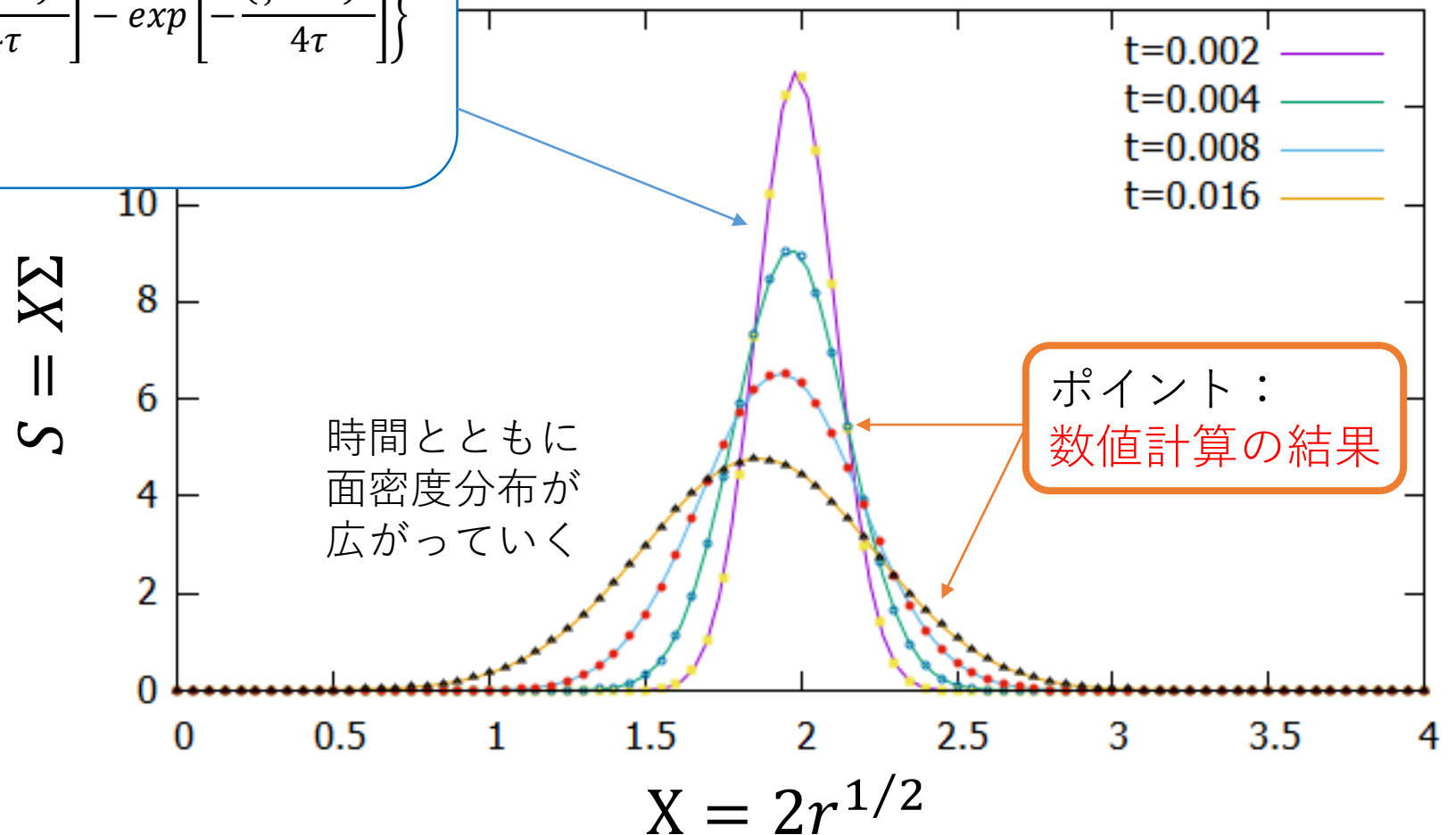
テスト計算（粘性拡散）

実線： $\nu \propto r$ とした時の解析解 Kato et al. (2008)

$$\Sigma(\xi, t) = \frac{\Sigma_0}{2\xi^3\sqrt{\pi\tau}} \left\{ \exp\left[-\frac{(\xi-1)^2}{4\tau}\right] - \exp\left[-\frac{(\xi+1)^2}{4\tau}\right] \right\}$$

$$\tau \equiv t/t_0 \quad \xi \equiv (r/r_0)^{1/2}$$

数値計算により
再現することが
できた



まとめ

- 円盤風の噴出による降着円盤の構造変化を調べるための数値計算コードの作成を進めている
- テストとして、 $\nu \propto r$ の場合の粘性拡散をテストしたところ、解析解を再現することに成功した

今後の目標

- 今回無視した (3) ~ (6) 式を解くようにコードを改良
- 今回無視した円盤風の噴出項 (面密度減少項) を追加
 - 数値シミュレーションを行い、円盤風の噴出による降着円盤の構造変化を調べる

参考文献

- Shoji Kato ; Jun Fukue and Shin Mineshige. Black-Hole Accretion Disks Towards a New Paradigm. Kyoto. Kyoto university press. 2008. p549
- G. A. SHIELDS; CHRISTOPHER F. MCKEE; D. N. C. LIN and MITCHELL C. BEGELMAN. CHOMPTON-HEATED WINDS AND CORONAE ABOVE ACCRETION DISKS. III. INSTABILITY AND OSCILLATIONS. U.S.A. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL. 1986.
- Mariko NOMURA; Ken OHSUGA; Hiroyuki R. TAKAHASHI; Keiich WADA and Tessei YOSHIDA. Radiation Hydrodynamic Simulations of Line-Driven Disk Winds for Ultra Fast Outflows. PASJ. 2015. p14
- G. T. Bath and J. E. Pringle. The evolution of viscous disks – I. Mass transfer variations. 1980