



CHANGING LOOK AGNの 3次元輻射磁気流体シミュレーション

千葉大学宇宙物理学研究室D1 五十嵐太一

松元亮治 (千葉大学)

加藤成晃 (理研)

高橋博之(駒澤大学)

大須賀健(筑波大学)

Active Galactic Nuclei : AGN

□ 銀河の中に存在する非常に明るく活発な核

- 銀河全体と同程度の明るさ
- 様々な波長帯で明るい
- ジェット噴出

□ 中心には超巨大ブラックホール ($M_{\text{BH}} = 10^{6-9} M_{\odot}$)

- 質量降着することにより様々な活動性を駆動

□ 主に2つに分類

- Radio mode : 電波銀河
 - 比較的暗い、 $L < 1\% L_{\text{Edd}}$
 - e.g. M87
- Quasar mode : Quasar, Seyfert銀河
 - 比較的明るい $L > 1\% L_{\text{Edd}}$
 - e.g. NGC 1068

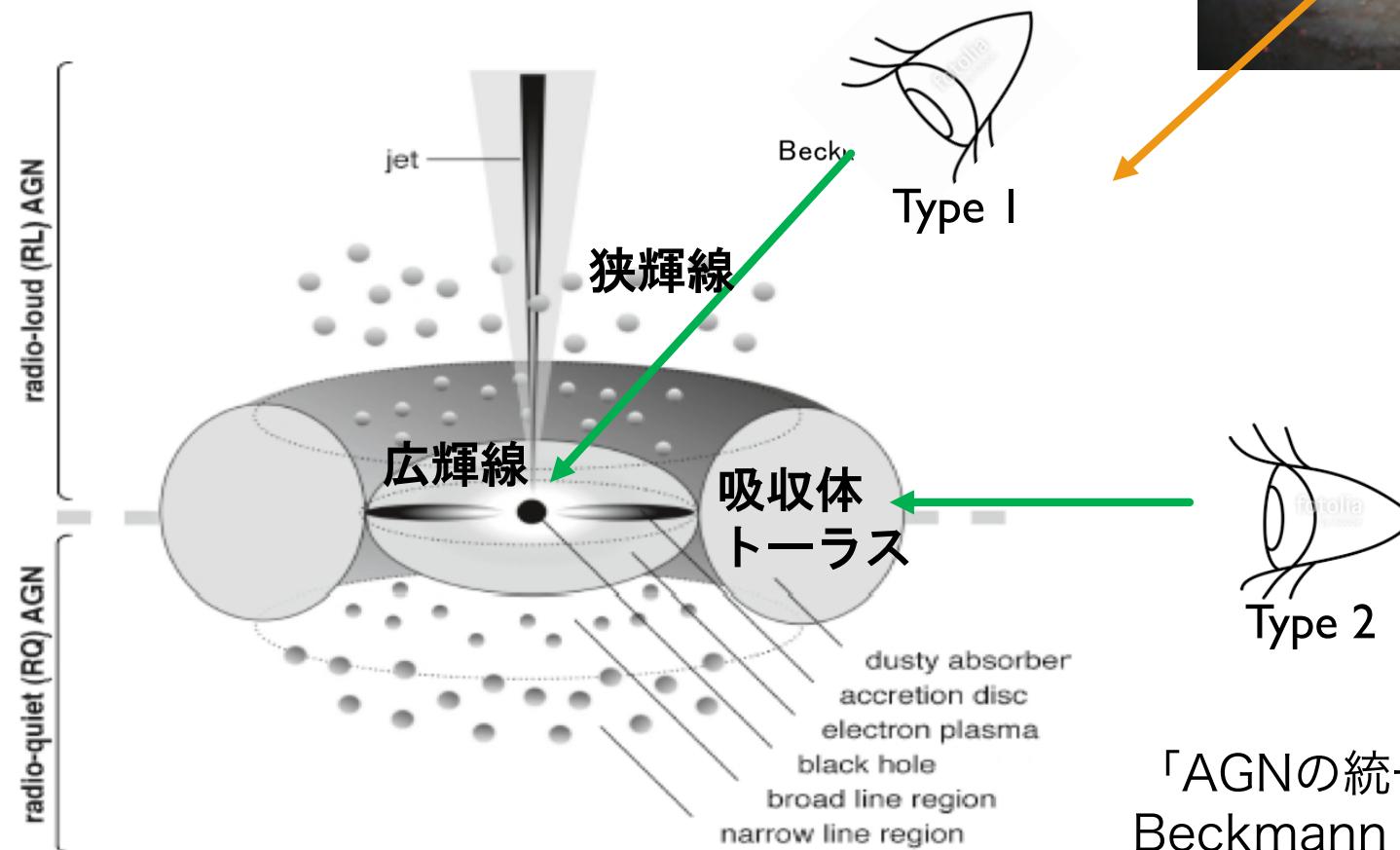
L_{Edd} : エディントン光度 $\propto M_{\text{BH}}$
球対称降着における上限光度



セイファート銀河 NGC 1068
NASA, ESA & A. van der Hoeven

SEYFERT GALAXY

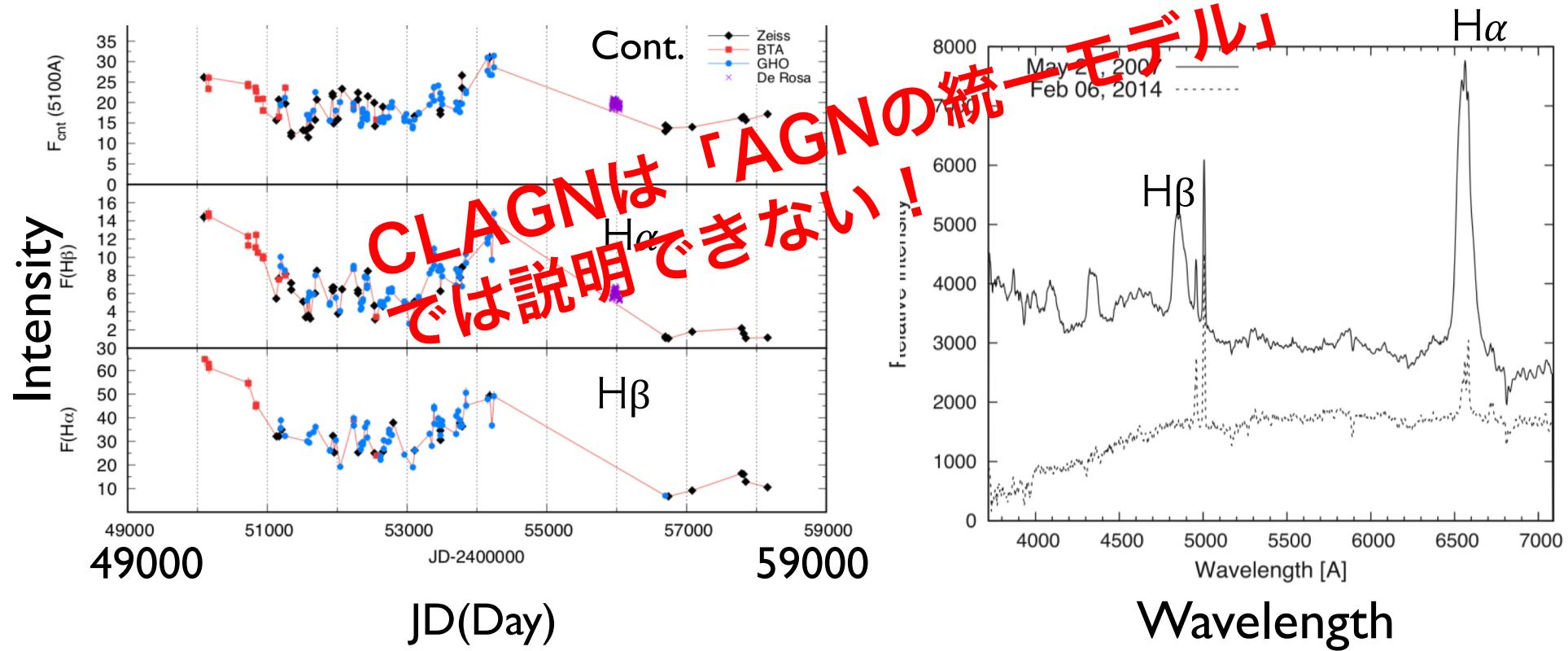
- 光度が $1\text{-}10\% L_{\text{Edd}}$ 程度の明るさ
- 可視光帯で強く、広がった輝線が観測される
- 輝線の幅によりType 1とType2に分類される
- Type1
 - 広輝線と狭輝線の両方が観測される
- Type 2
 - 狹い輝線のみが観測される



「AGNの統一モデル」
Beckmann 2012

CHANGING LOOK AGN(CLAGN)

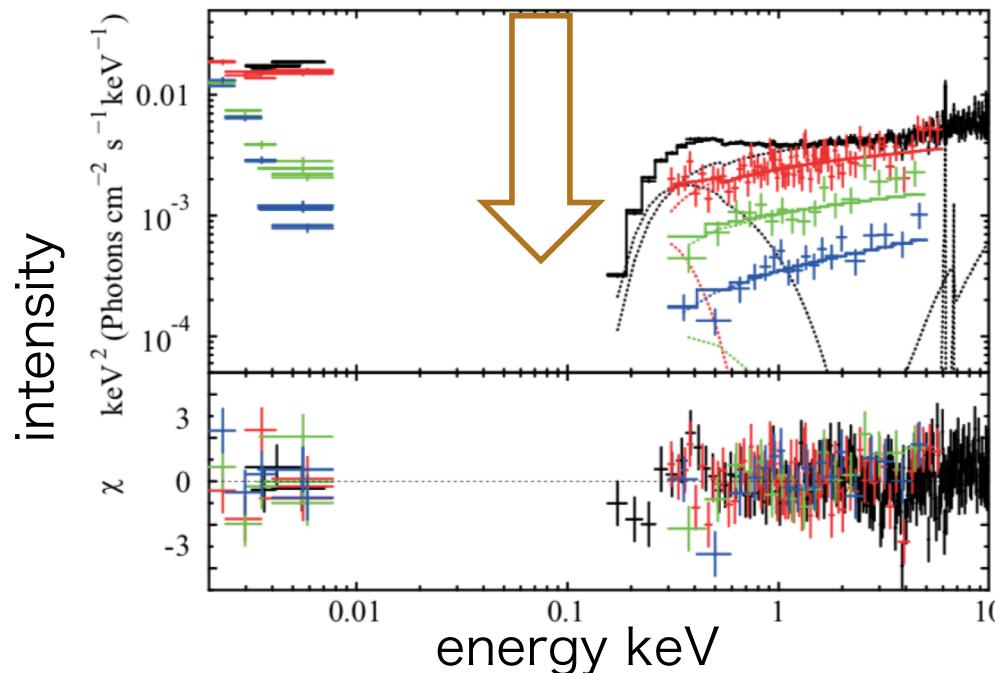
- いくつかのセイファート銀河で、数十日～数年のタイムスケールでタイプ1と2の間を状態遷移することが観測される
(e.g Shapee et al. 2014, Shapovalova et al. 2018)
 - 高光度 (高降着率) → 1型
 - 低光度 (低降着率) → 2型
- 状態遷移に比べ短いタイムスケール (~数十日) の変動



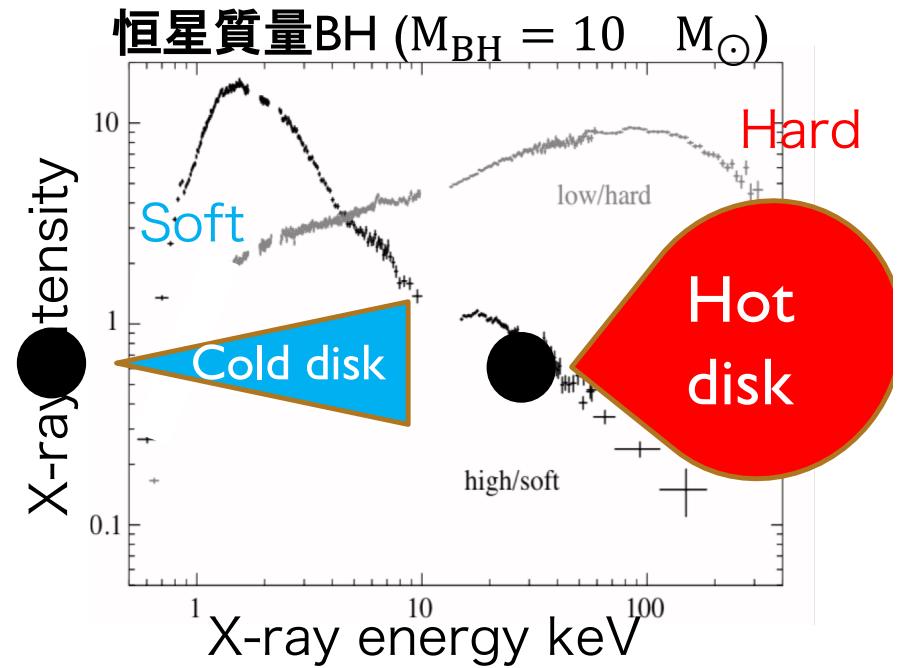
Spectrum & light curve of NGC 3516 (Shapovalova et al. 2019)

CLAGN : SOFT X-RAY EXCESS

- 軟X線(0.1~1 keV)に超過成分 (軟X線超過成分)
 - $T \sim 10^7$ K、 $\tau_{es} \sim 1 - 10$ 程度の降着流による逆コンプトン散乱?
(e.g. Done 2012, Kubota & Done 2018)
- 軟X線超過成分が急激に変化する. (Noda & Done 2018)
 - 明るい時 (降着率大) に強くなる
 - 軟X線超過成分は変化が最も大きい成分
 - 広輝線の電離源
- 恒星質量ブラックホール候補天体における状態遷移に類似



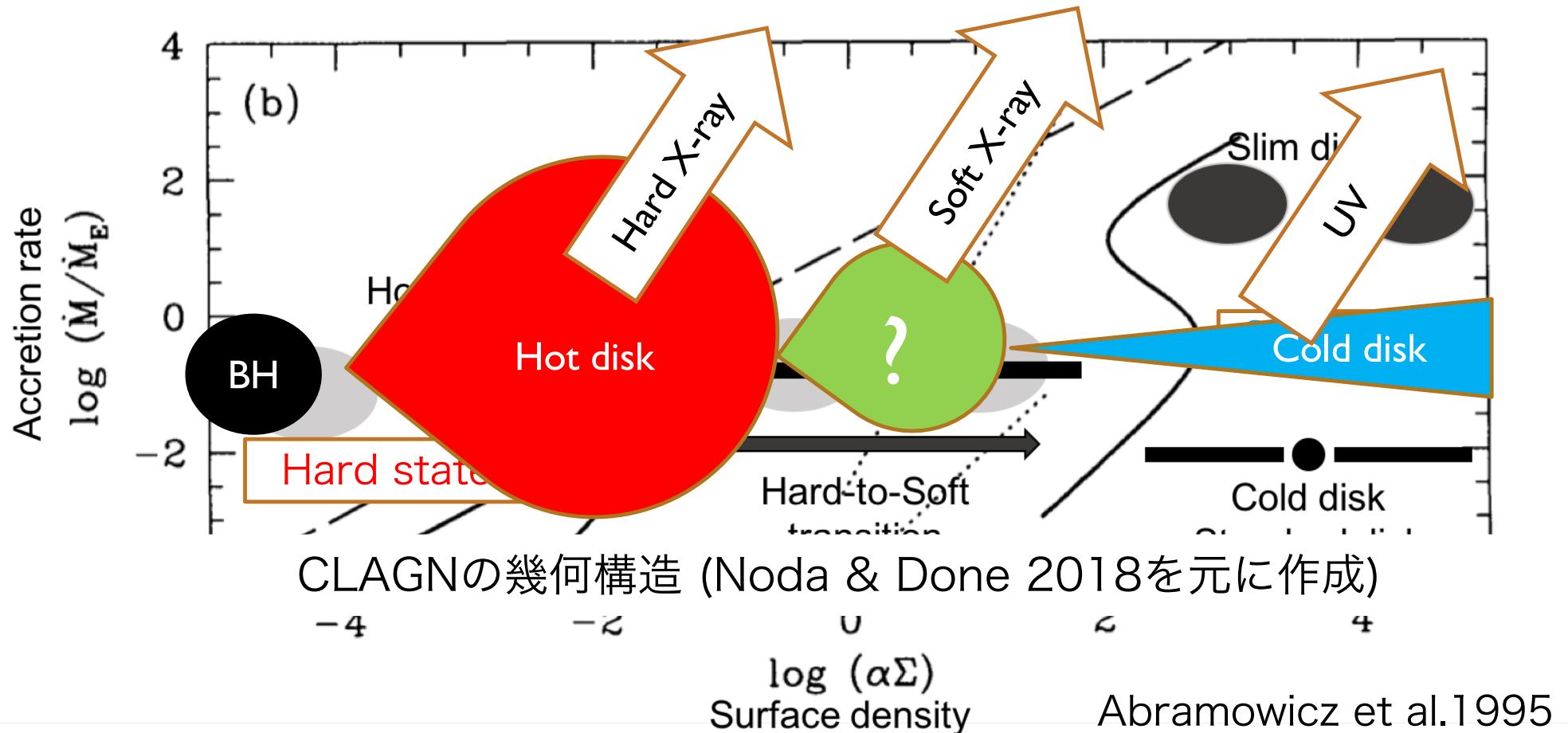
Noda & Done 2018,
Mrk 1018のスペクトル.



Cygnus X-1のスペクトル
Yamada et al.2013

THEORETICAL MODEL OF STATE TRANSITION

- 恒星質量($M_{\text{BH}} = 10 M_{\odot}$)ブラックホール降着流の熱平衡曲線
($\Sigma - \dot{M}$)
- 光学的に薄いハードステート \Leftrightarrow 光学的に厚いソフトステート
 - 光学的に薄い降着流で輻射冷却が加熱を凌駕することにより、冷却不安定性が成長

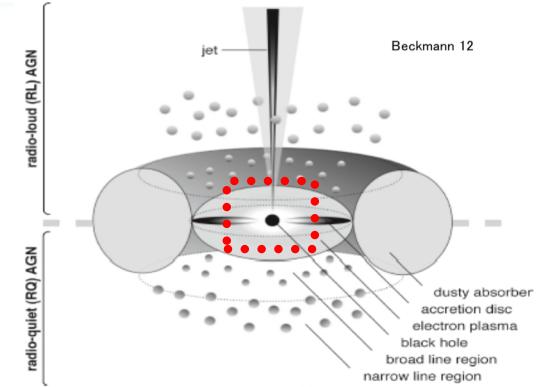


目的

- CL現象中のブラックホール近傍の降着流を調べる
 - ブラックホールから~ $200 r_s$ までの領域
 - 降着流の構造・時間変動
 - 軟X線超過成分の起原

方法

- 3次元大局的輻射磁気流体シミュレーション
 - 輻射冷却を含めずに準定常な高温降着流(RIAF)を形成
 - RIAFの降着率が $\dot{M} \sim 0.1 \dot{M}_{\text{Edd}}$ 程度になるような円盤密度を設定し、輻射冷却を考慮したシミュレーションを実施



$$\dot{M}_{\text{Edd}} = L_{\text{Edd}} / c^2: \text{エディントン光度に対応する降着率}$$

BASIC EQUATION

MHD

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) &= 0 \\ \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v} - \mathbf{B} \mathbf{B} + P \mathbf{I}) &= \rho \nabla \phi_{\text{PN}} - \mathbf{S}(\mathbb{P}_r) \\ \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot [(E + PI) \mathbf{v} - \mathbf{B}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{v})] &= -\nabla \cdot (\eta \mathbf{j} \times \mathbf{B}) + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \phi_{\text{PN}} - cS(E_r) \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \cdot (\mathbf{v} \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{v} + \psi \mathbf{I}) &= -\nabla \times (\eta \mathbf{j}) \\ \frac{\partial \psi}{\partial t} + c_h^2 \nabla \cdot \mathbf{B} &= -\frac{c_h^2}{c_p^2} \psi \end{aligned}$$

Rad. Moment eq.

$$\begin{aligned} \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{F}_r}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbb{P}_r &\rightarrow \mathbf{S}(\mathbb{P}_r) \\ \frac{\partial E_r}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_r &\rightarrow cS(E_r) \end{aligned}$$

Pseudo Newtonian potential

$$\phi_{\text{PN}} = -\frac{GM}{R - r_s}$$

Source term

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(\mathbb{P}_r) &= \rho \kappa_{\text{ff}} \frac{\mathbf{v}}{c} (a_r T^4 - E_r) - \rho (\kappa_{\text{ff}} + \kappa_{\text{es}}) \frac{1}{c} [\mathbf{F}_r - (\mathbf{v} \mathbf{E}_r + \mathbf{v} \cdot \mathbb{P}_r)] \\ S(E_r) &= \rho \kappa_{\text{ff}} (a_r T^4 - E_r) + \rho (\kappa_{\text{ff}} - \kappa_{\text{es}}) \frac{\mathbf{v}}{c} \cdot [\mathbf{F}_r - (\mathbf{v} \mathbf{E}_r + \mathbf{v} \cdot \mathbb{P}_r)] \end{aligned}$$

Electron scattering opacity

$$\kappa_{\text{es}} = \frac{\sigma_T}{m_p} = 0.4$$

Free-free opacity

$$\kappa_{\text{ff}} = 1.7 \times 10^{-25} m_p^{-2} \rho T_{\text{gas}}^{-3.5}$$

MHD : CANS+(HLLD+MP5) (Matsumoto et al. 2019)

Rad : 非相対論的輻射輸送モーメント式をM1-closureにより閉じる
(Takahashi & Ohsuga 2013)

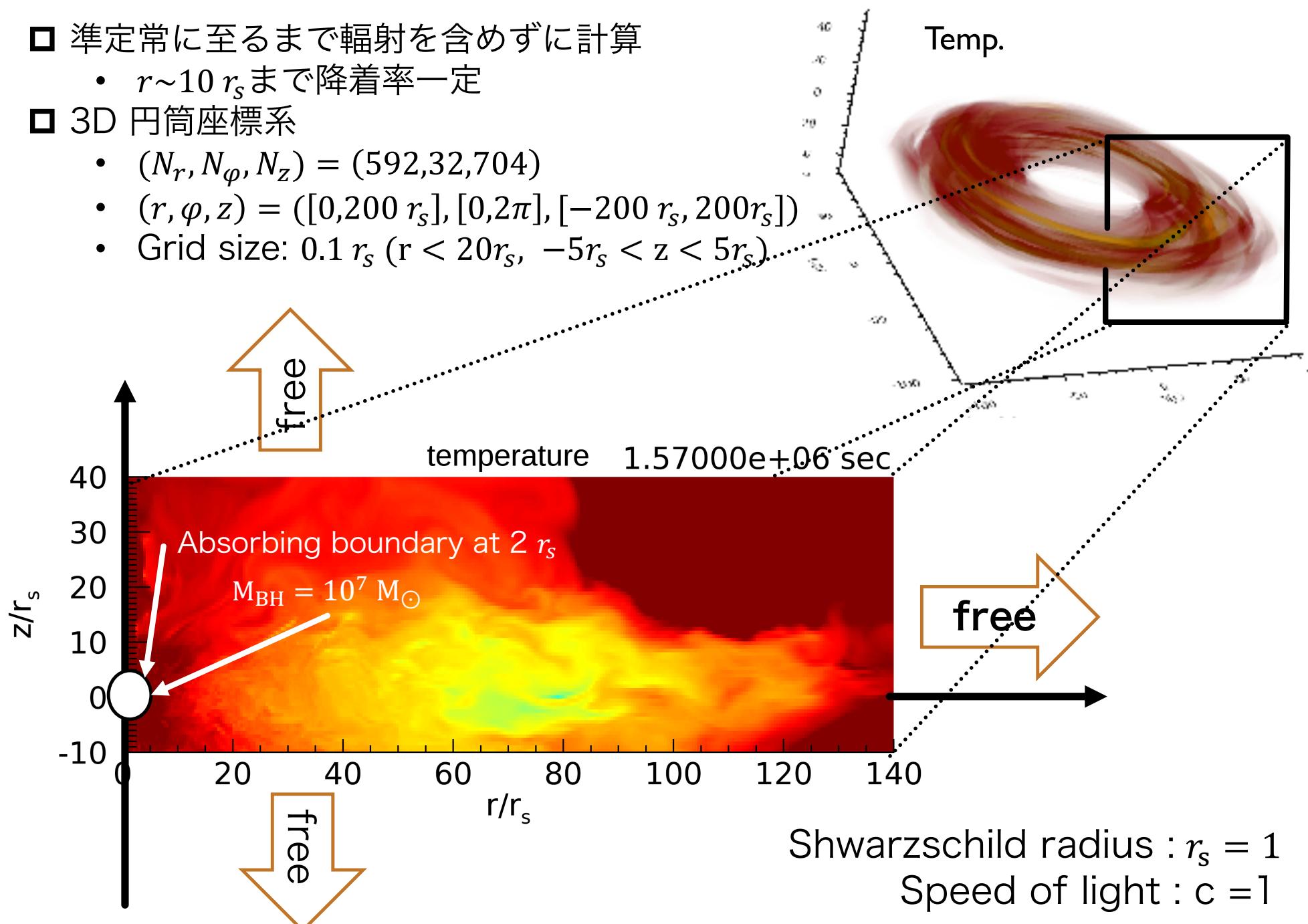
INITIAL CONDITION • BOUNDARY CONDITION

□ 準定常に至るまで輻射を含めずに計算

- $r \sim 10 r_s$ まで降着率一定

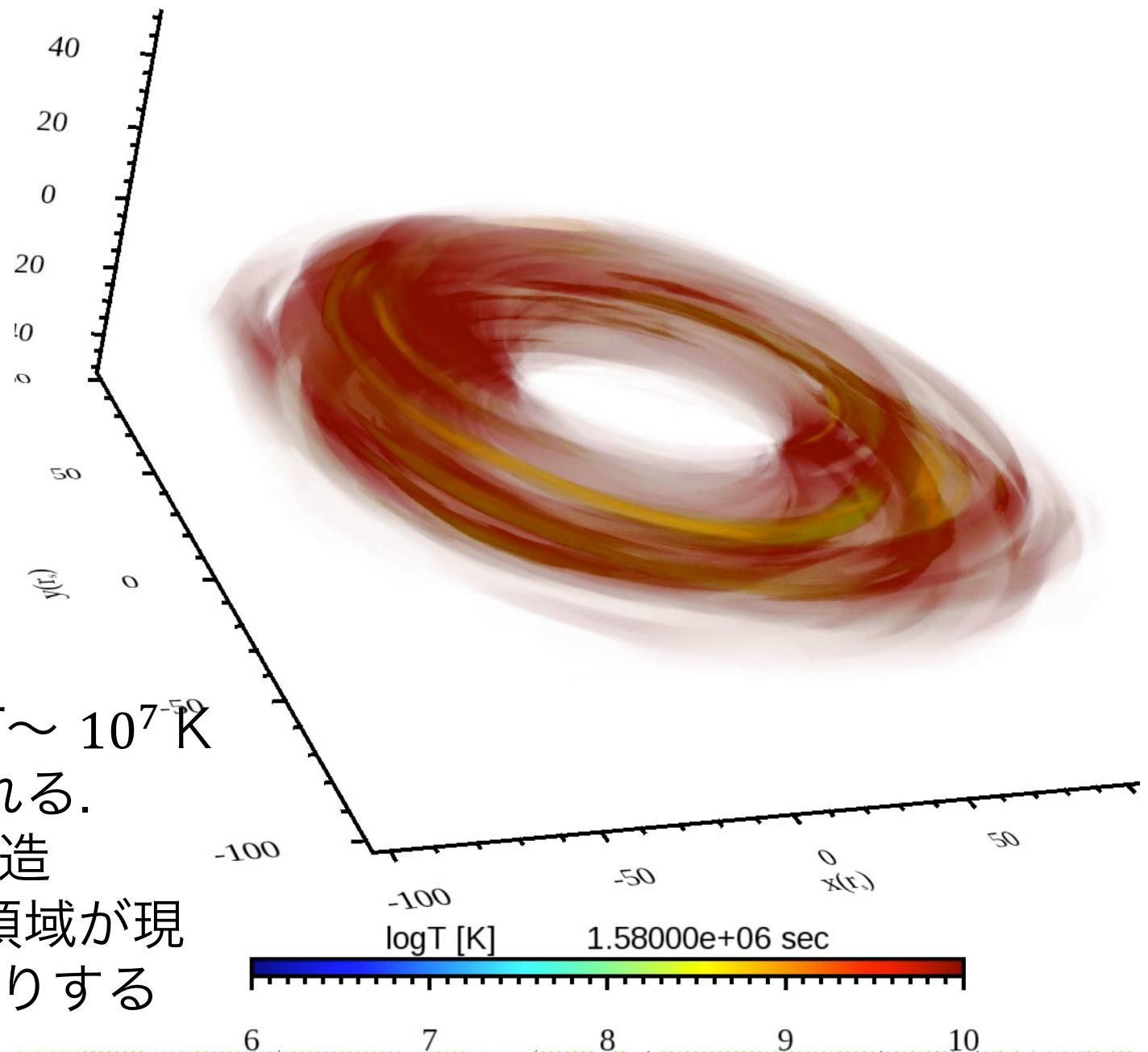
□ 3D 円筒座標系

- $(N_r, N_\varphi, N_z) = (592, 32, 704)$
- $(r, \varphi, z) = ([0, 200 r_s], [0, 2\pi], [-200 r_s, 200 r_s])$
- Grid size: $0.1 r_s$ ($r < 20 r_s$, $-5 r_s < z < 5 r_s$)



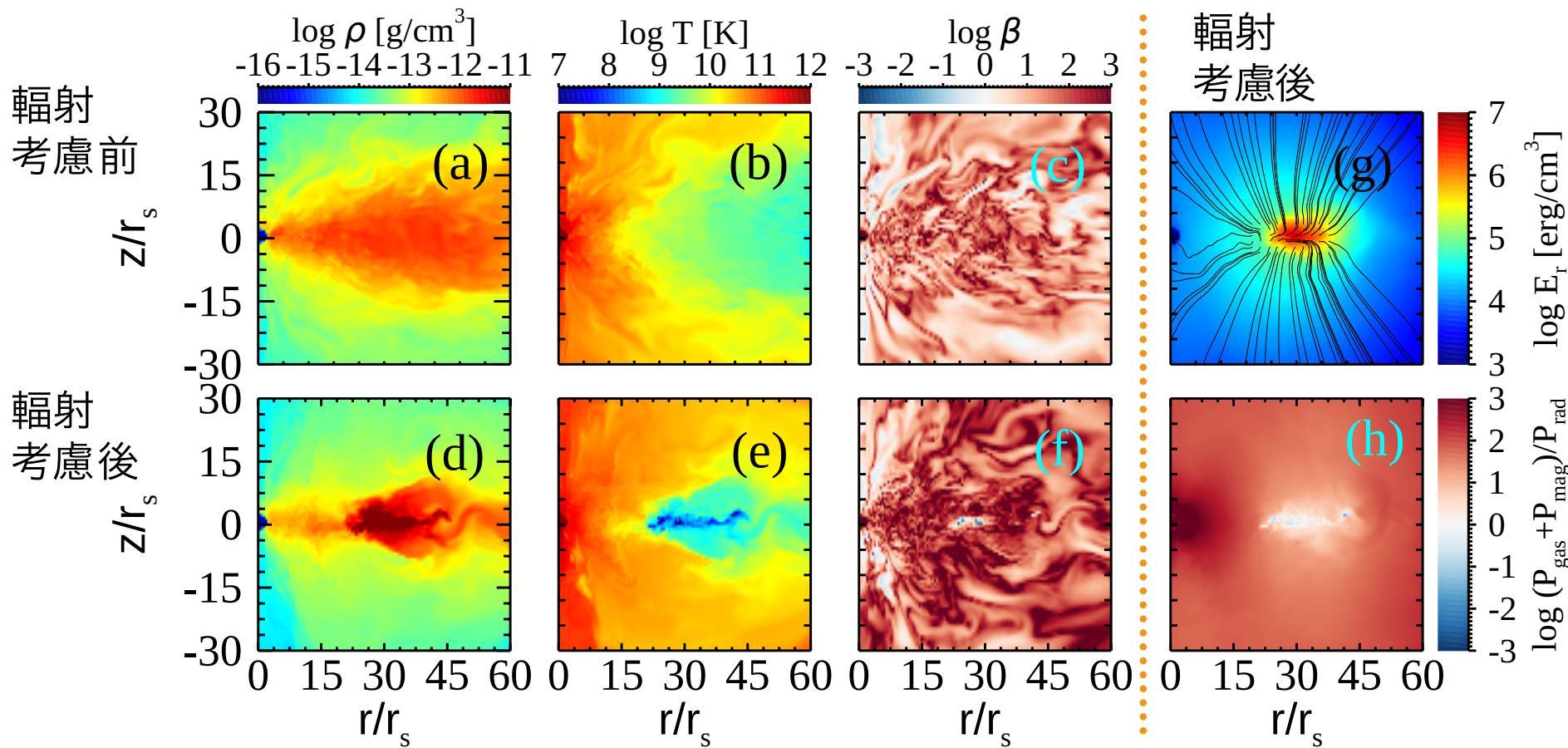
MOVIE

温度分布



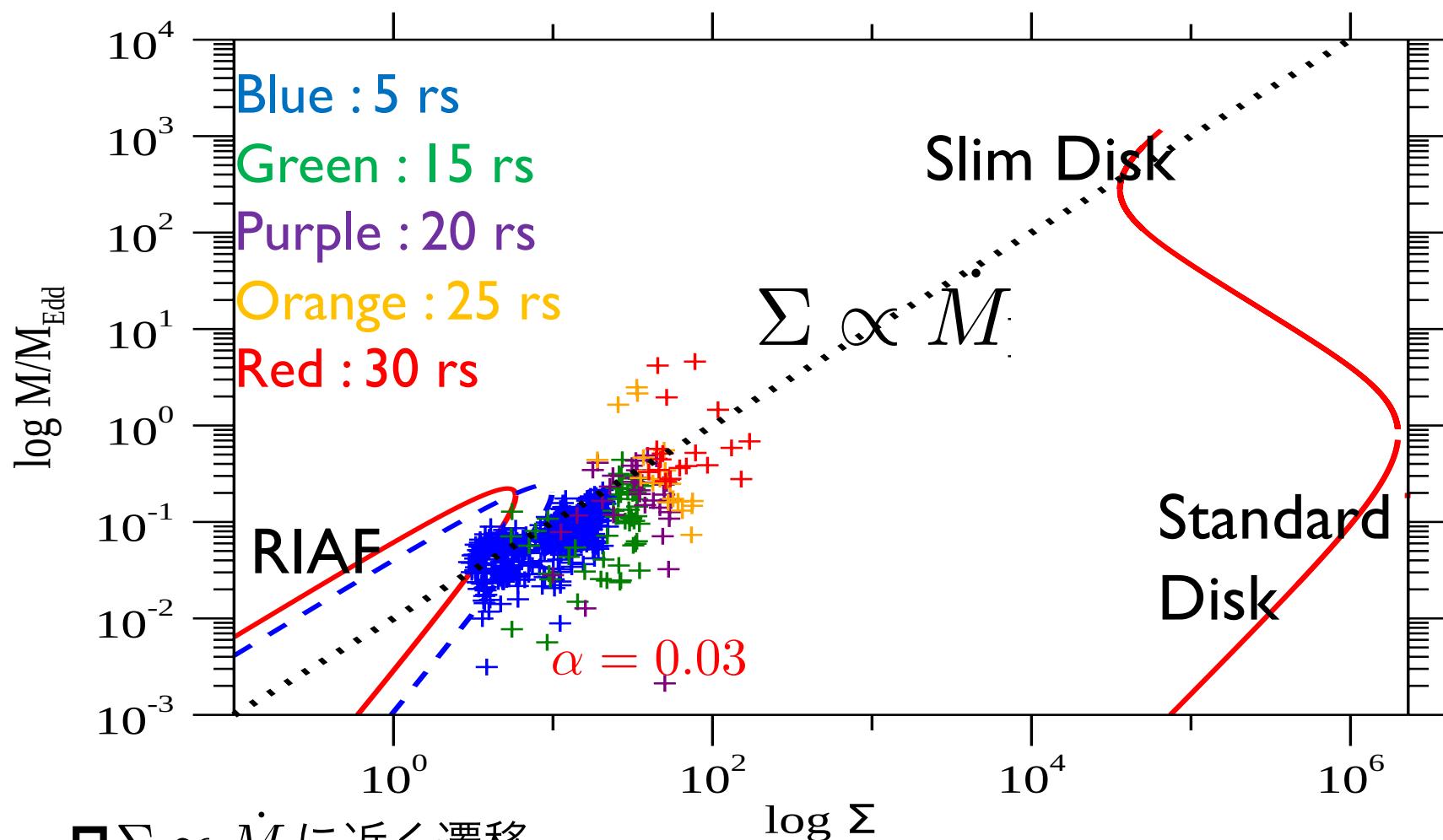
- 輻射冷却により $T \sim 10^7$ K の領域が形成される。
 - 非軸対称な構造
 - $T \sim 10^7$ Kの領域が現れたり消えたりする

SNAPSHOT IN RZ PLANE



- ブラックホール近傍には、高温($T \sim 10^{11}$ K)降着流が維持される
- ブラックホール近傍に比べて低温($T \sim 10^7$ K)、高密度、輻射圧優勢な領域が外側に現れる
 - この領域は、電子散乱に対して光学的に厚い($\tau \sim 10-100$).
 - この領域が軟X線を放射する可能性がある（軟X線放射領域）
 - 輻射の大部分は $T \sim 10^7$ Kの低温領域から放射される

SURFACE DENSITY VS ACCRETION RATE



□ $\Sigma \propto \dot{M}$ に近く遷移

- RIAFとはずれる

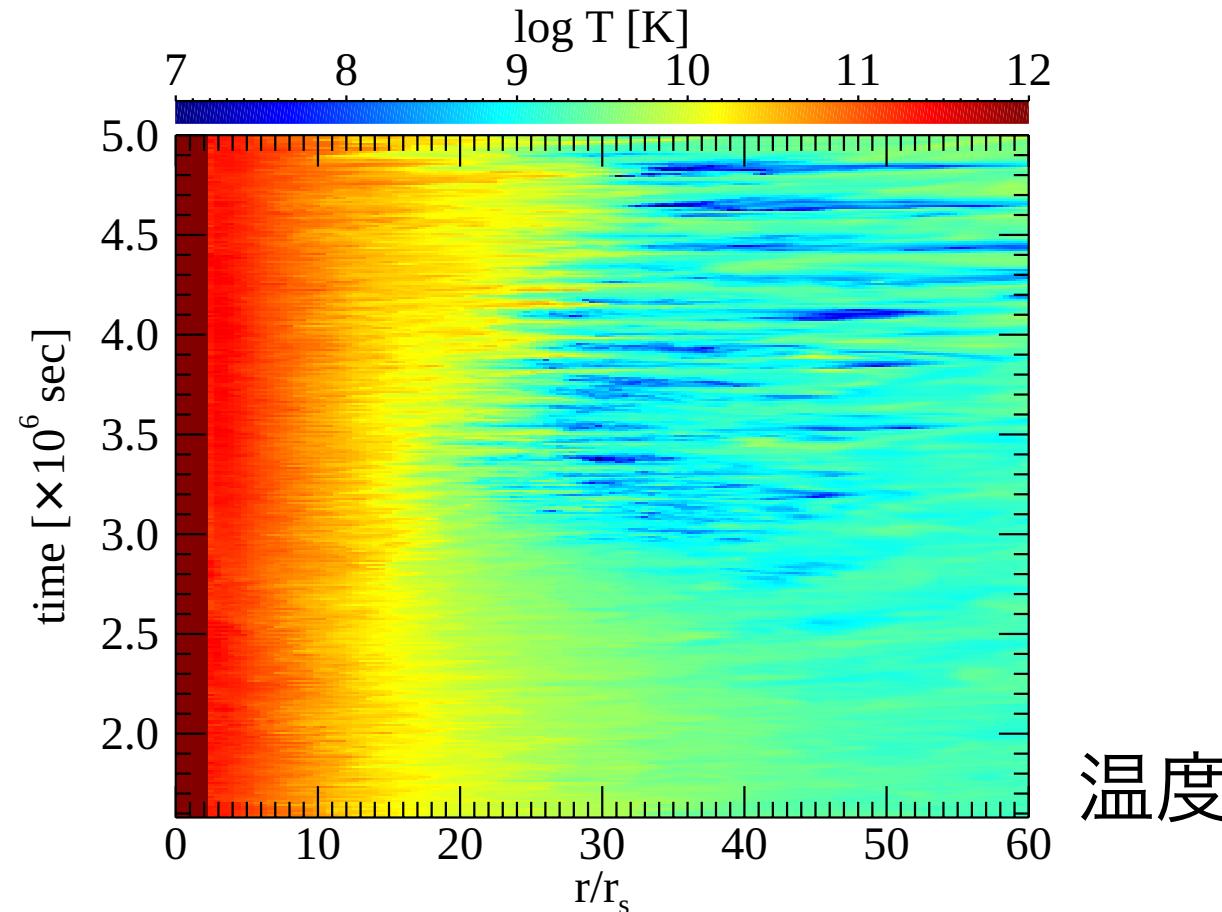
- 光学的に薄い解と厚い解の中間状態

□ 低温領域 ($r=25,30$ rs) では $\Sigma \propto \dot{M}$ から外れる

- 面密度が~ 10^2 程度になると、降着率が10倍程度変動
- 冷却不安定性が成長する

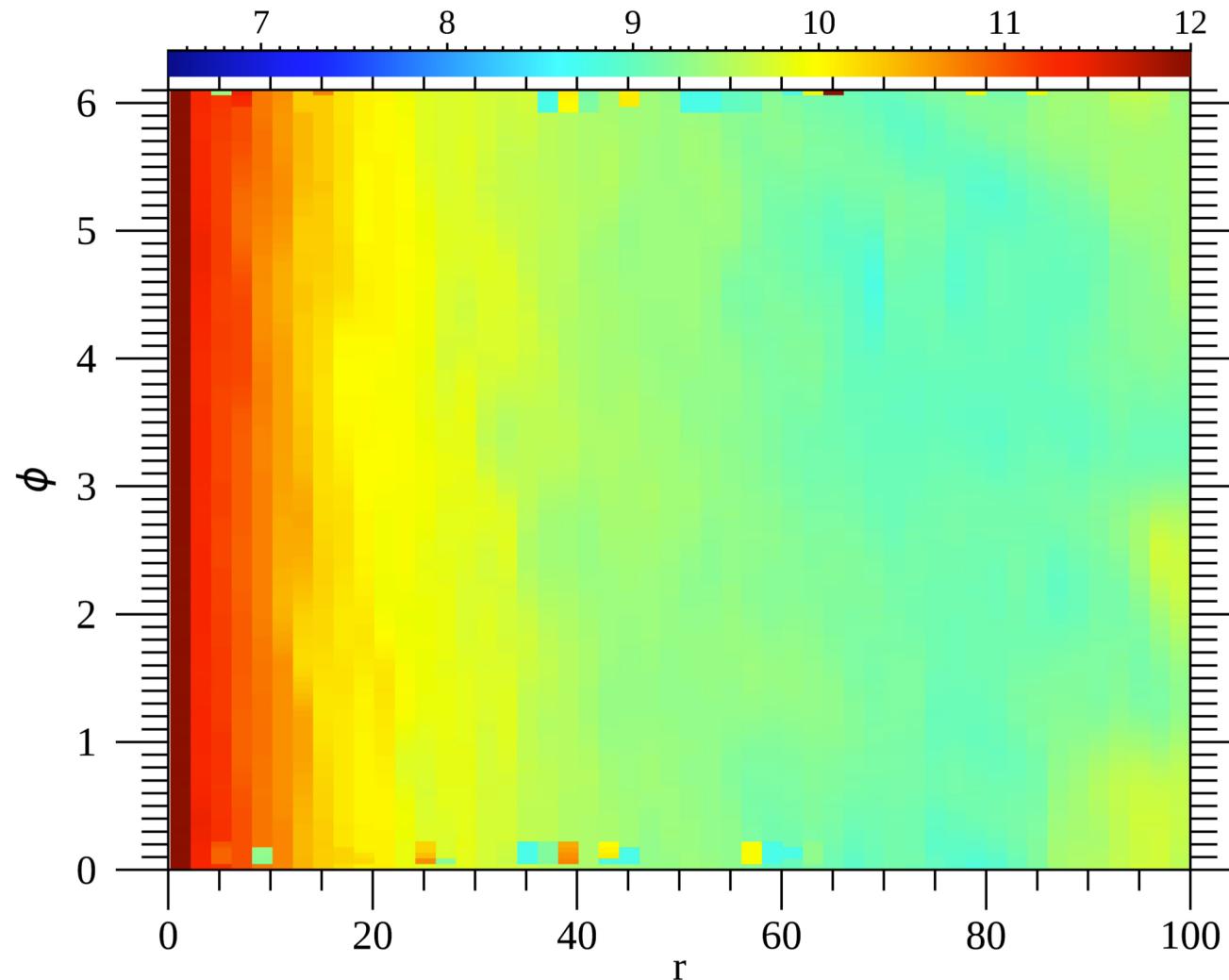
SPACE TIME DIAGRAM OF TEMPERATURE

- 高温降着流に比べて低温な領域（軟X線放射領域）が、ブラックホール近傍の高温降着流の外側に形成される
 - 高温状態と低温状態の間で準周期的な振動が起こる
 - 高振動数から低振動数に変わる
 - 低温領域は電子散乱により輻射が強くなる



MOVIE OF R- ϕ PLANE

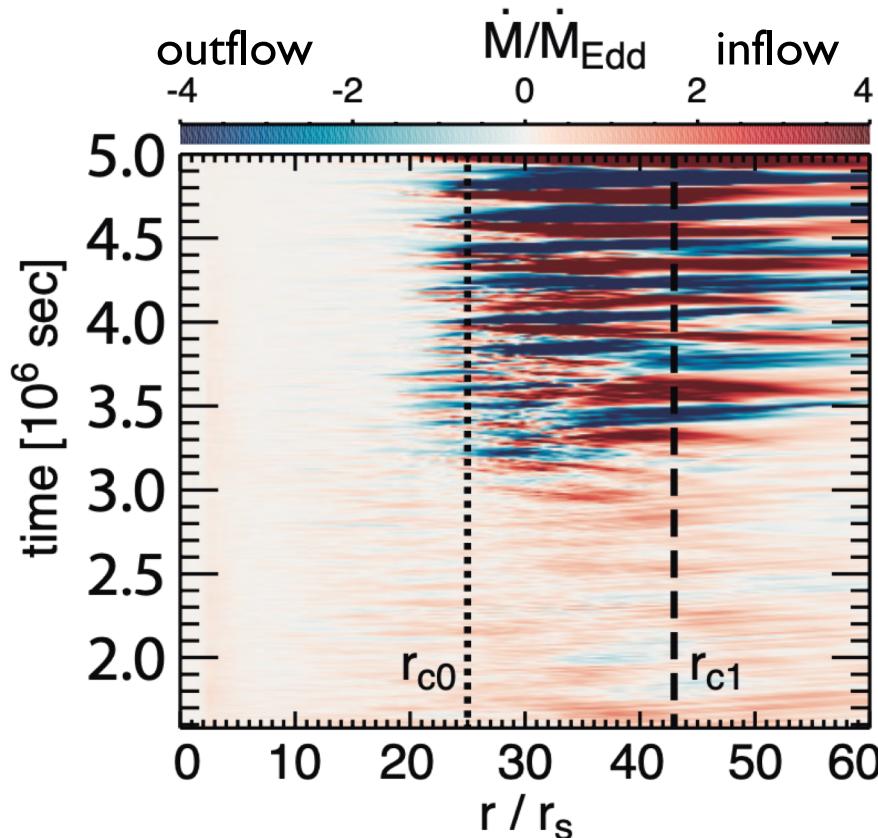
- 赤道面における温度分布の $r - \phi$ 面
- $m=1$ (1本腕) のモードが現れる
- 境界面($r \sim 25$ rs)が振動する



SPACE TIME DIAGRAM OF ACCRETION RATE

- 正味降着率の符号が準周期的に振動する

- 低温領域は降着率正に対応
- $t < 4 \times 10^6$ sでは、2つの振動モード ($m=1$)
 1. 周期 10^5 s程度の振動
 2. 周期 2×10^5 s程度の振動
- 2つの共回転半径 ($\omega - m\Omega_K(r) = 0$ となる半径) が現れる



- 1.の振動

- 高温領域と低温領域の境界半径と共回転半径 $r_{c0} \sim 25 r_s$ が一致
- この半径で振動が励起・増幅される?

- 2.の振動

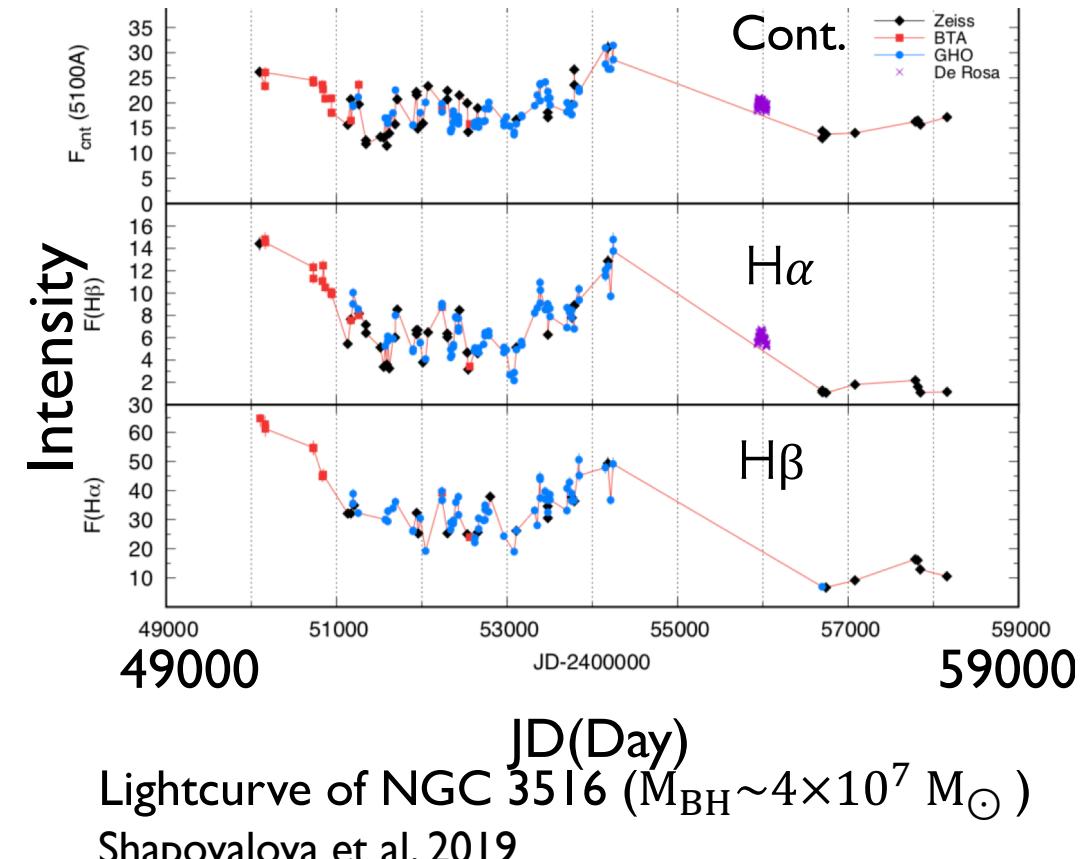
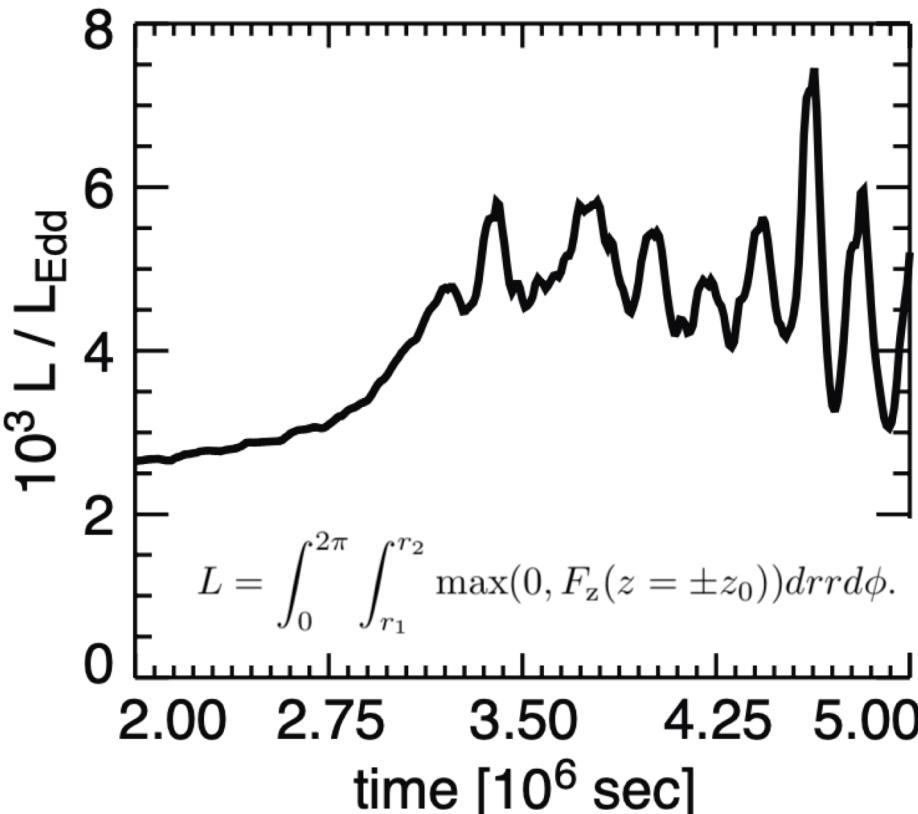
- 共回転半径は $r_{c1} \sim 43 r_s$ に現れる
- 輻射圧優勢領域での Pulsational instability?
(Kato 1978, Blumenthal et al. 1984)
- $t > 4 \times 10^6$ sこの振動が卓越する

降着率

$$\dot{M} = - \int_{-h}^h \int \rho v_r r d\phi dz$$

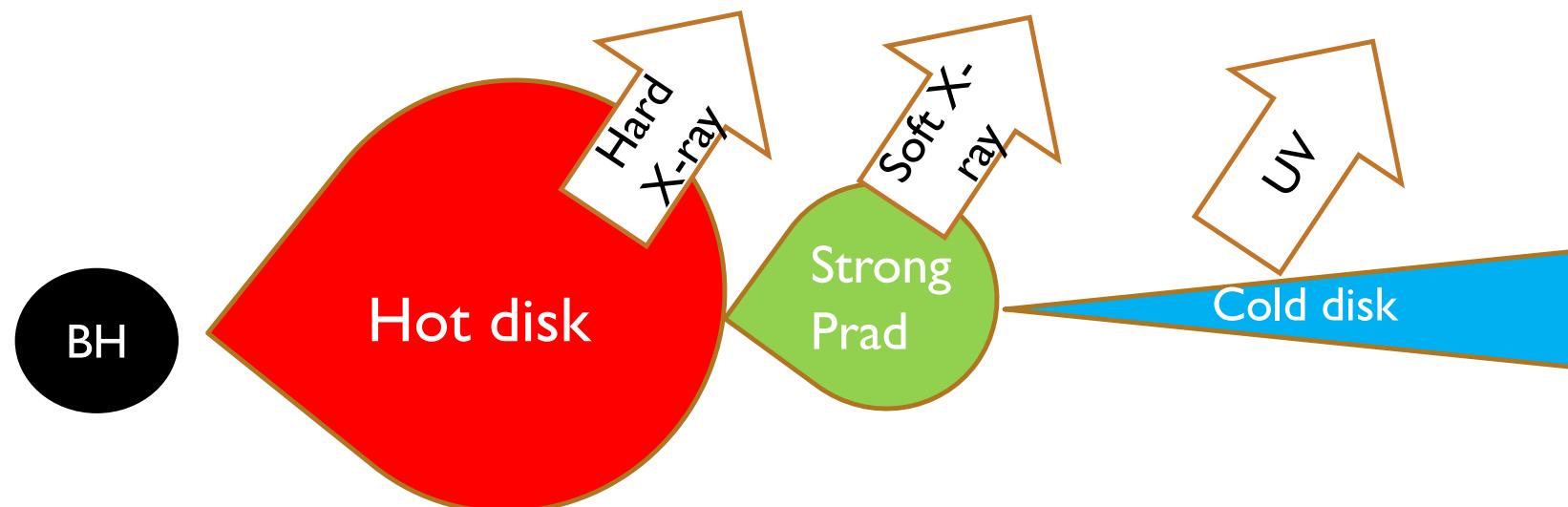
LUMINOSITY

- $z=30$ r_s における外向きの輻射フラックス F_z を積分
- エディントン光度の0.5%程度まで光度が上昇する.
- 30日程度の周期で準周期的に振動する
 - 20%程度の変動
 - 軟X線～遠紫外線で観測される？
 - X線が外側にある円盤を照射することにより、X線と連動した可視光・紫外線輝線放射でも観測される？

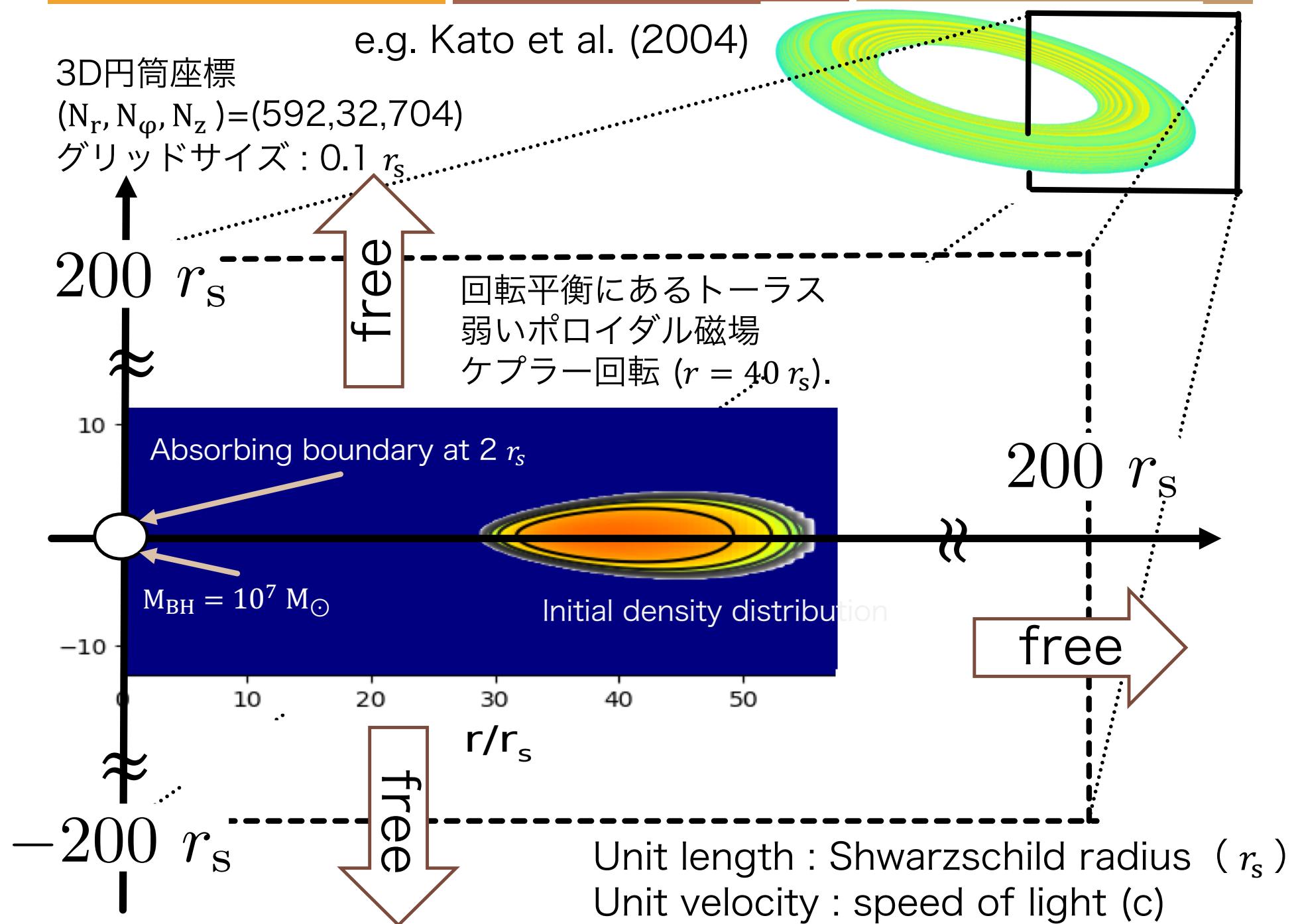


SUMMARY

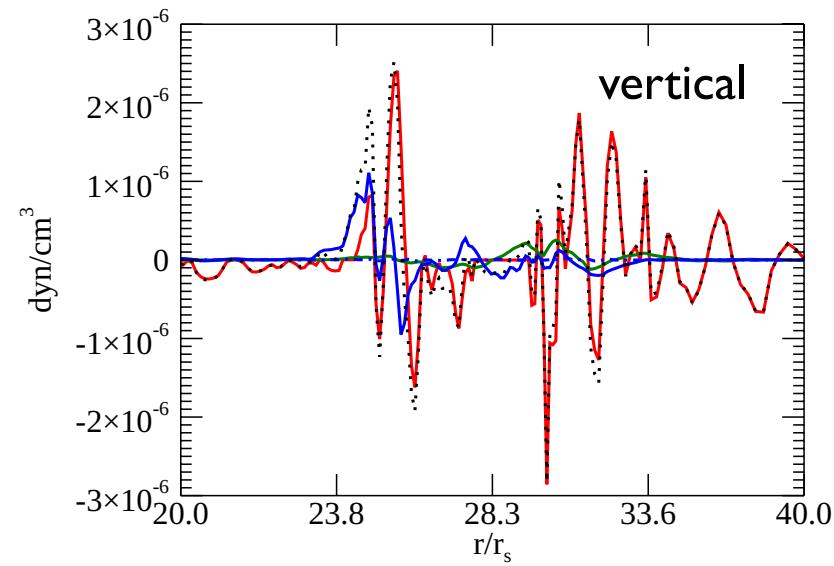
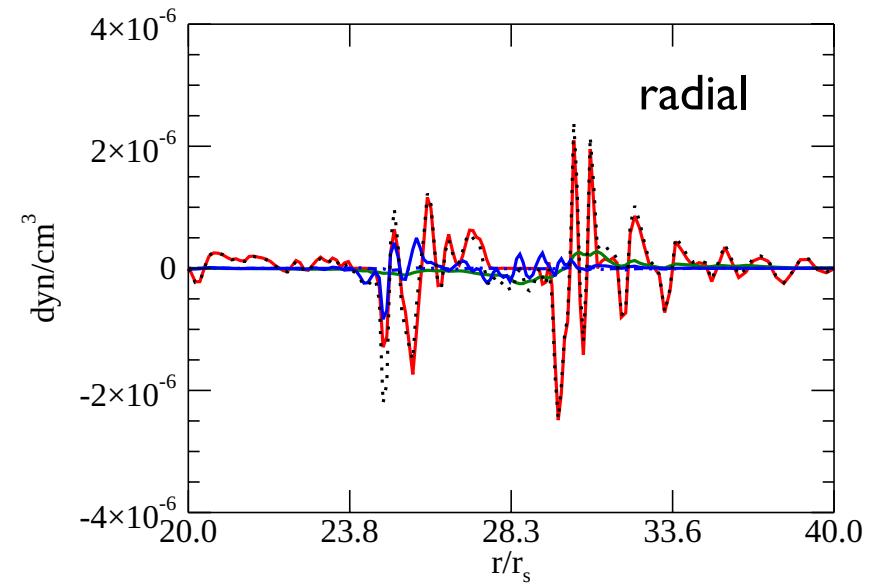
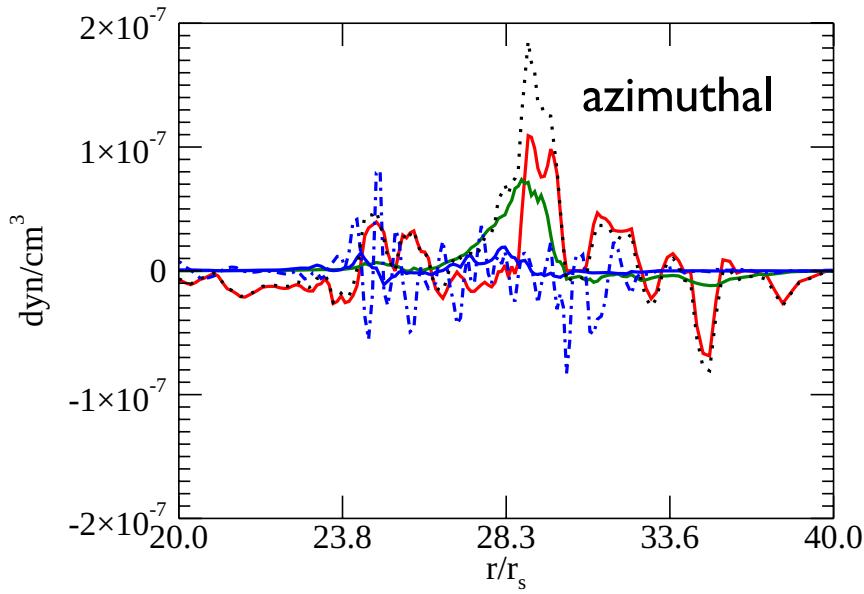
- 近年状態遷移を示すAGN (CLAGN) が見つかり始めている
- 我々は、超巨大ブラックホール($M_{\text{BH}} = 10^7 M_{\odot}$)周囲の降着流の3次元大局的輻射磁気流体シミュレーションを実施した。
- ブラックホール近傍の高温降着流(RIAF) とその外側の輻射圧優勢な $T \sim 10^7$ K円盤が形成される。
- この領域は、軟X線超過成分放射領域に対応する可能性がある。
- ほとんどの放射は軟X線放射領域から放射される。
- この領域で準周期振動が励起された。この軟X線に照射された遠方の円盤からのアウトフローも変化するため、X線変動に追随する可視光変動が観測される可能性がある。
- 逆コンプトン散乱によるRIAFの冷却等の効果を考える必要がある



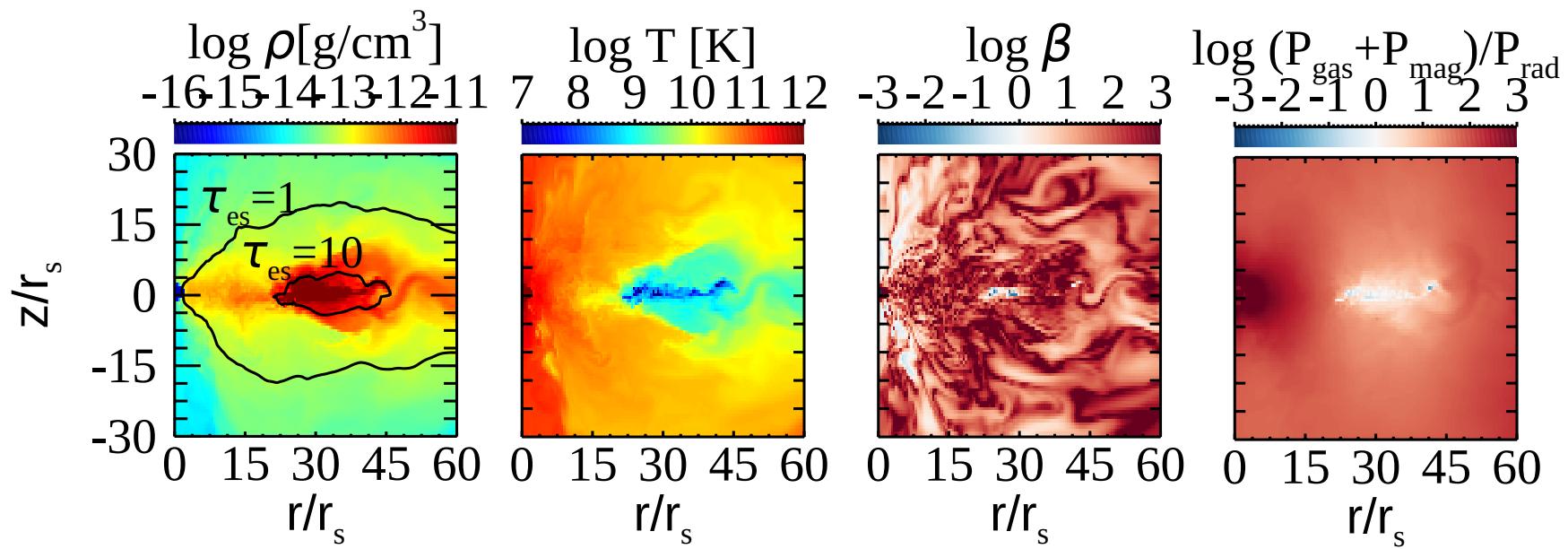
INITIAL CONDITION • BOUNDARY CONDITION



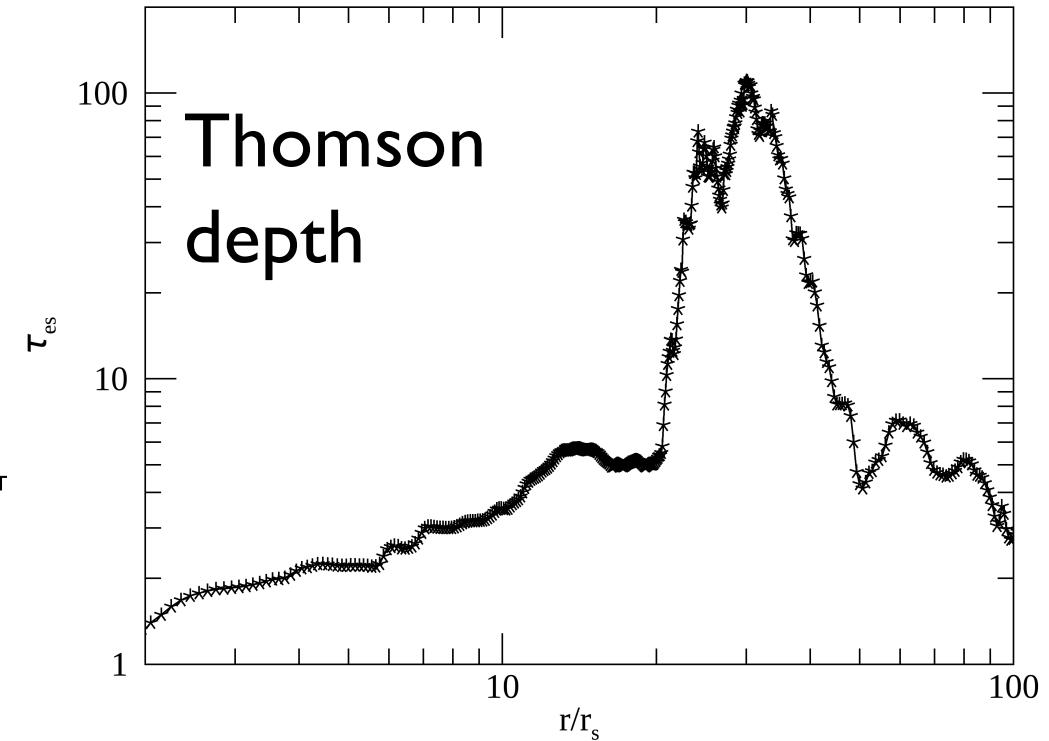
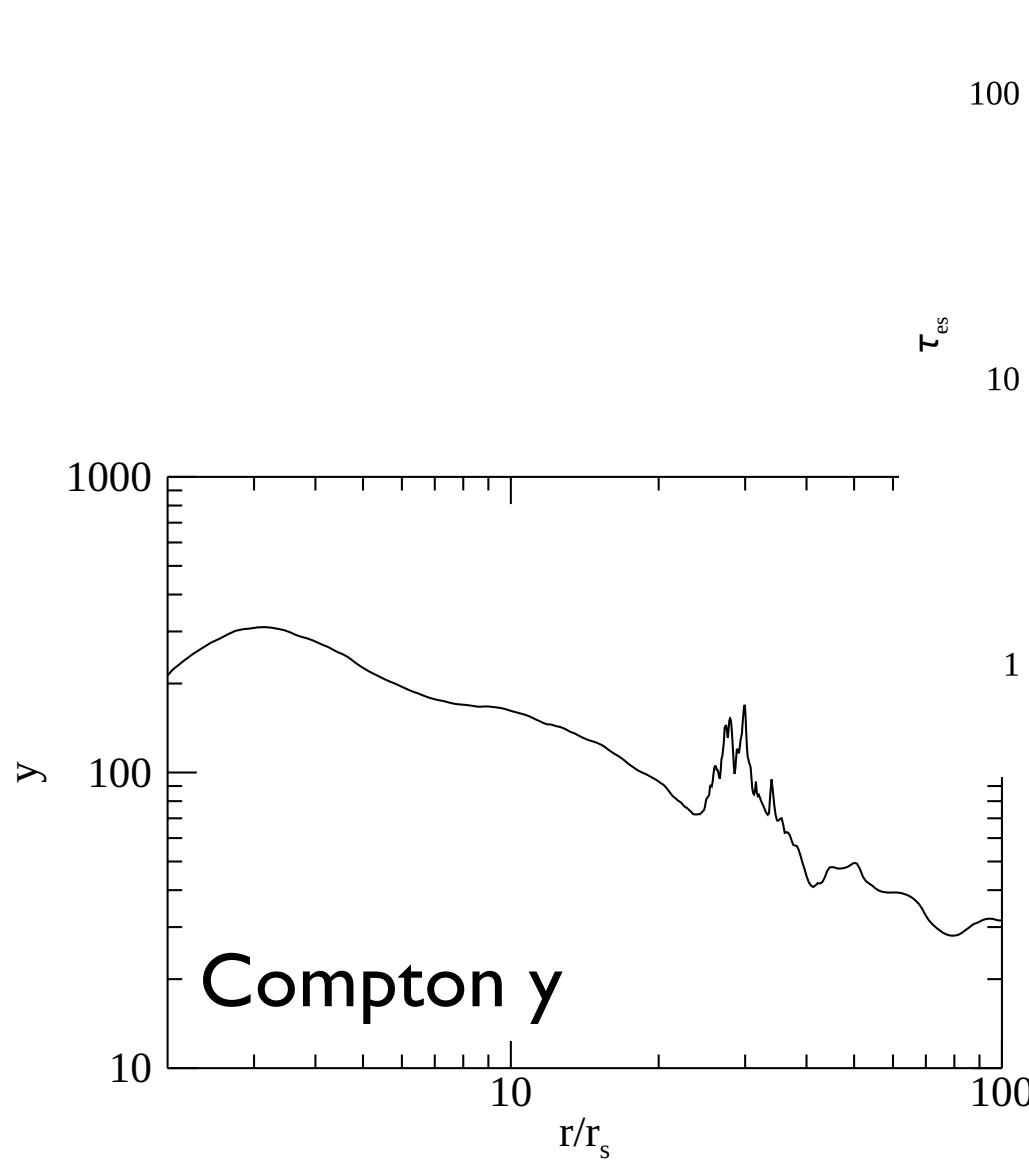
FORCE IN EQUATORIAL PLANE



SNAPSHOT



COMPTON Y, THOMSON



SPACE TIME DIAGRAM OF ERAD

