

超臨界降着流からの アウトフロー形成

高橋博之 (国立天文台)

大須賀健 (国立天文台)

降着によるブラックホール成長シナリオ

大質量ブラックホールの形成過程

宇宙初期($z > 6$, ビッグバンから10億年弱)で観測されている

ブラックホール成長機構：ブラックホール合体衝突 or ガス降着

球対称な系を考える

早い降着→高密度ガスをブラックホールまで落とす必要がある

放射力 < ブラックホール重力

$$\frac{L}{4\pi r^2 c} \sigma_T < \frac{GM_{\text{BH}} m_p}{r^2}$$

エディントン限界光度

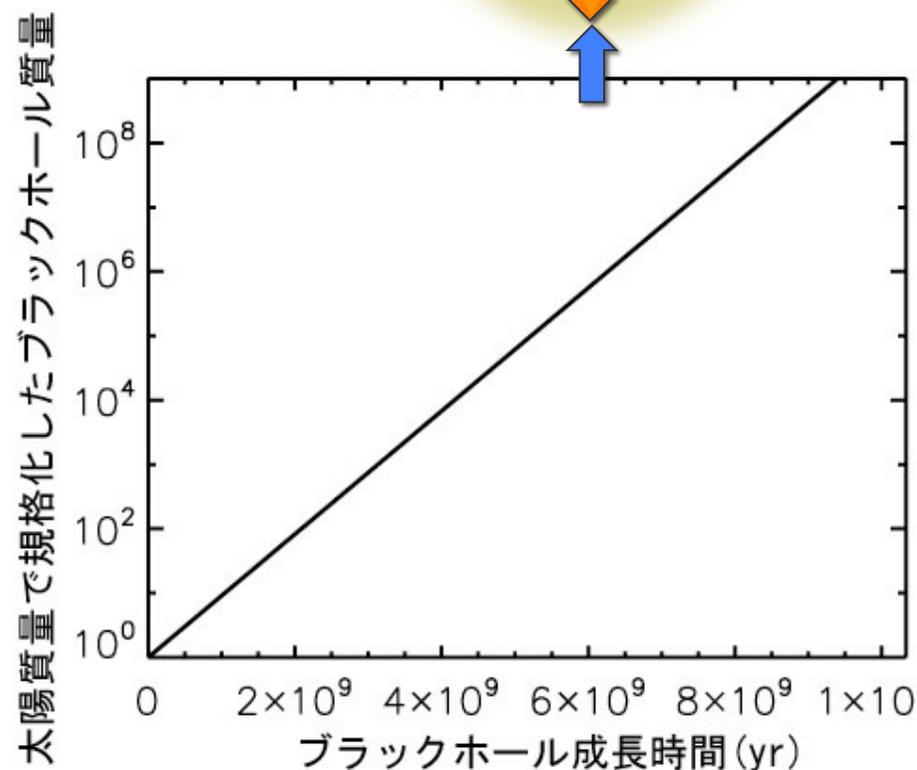
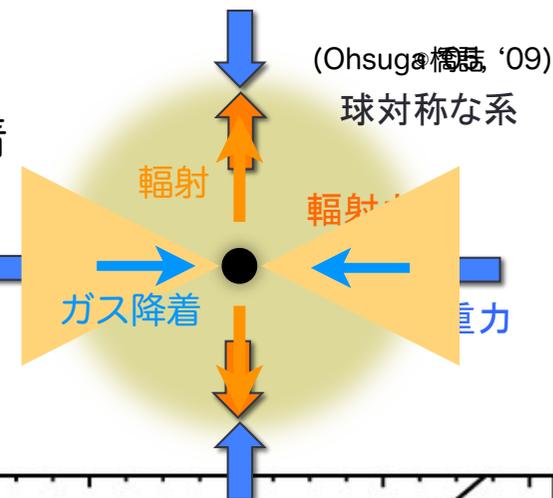
$$L < L_E = \frac{4\pi GM_{\text{BH}} m_p c}{\sigma_t}$$

$$= 1.3 \times 10^{38} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10M_{\odot}} \right) \text{ erg s}^{-1}$$

臨界降着率

$$\dot{M}_{\text{crit}} = L_E / c^2 = 1.4 \times 10^{17} \left(\frac{\eta}{0.1} \right)^{-1} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ g s}^{-1}$$

- エディントン光度以上で光ることは難
- 数Gyrで巨大ブラックホールを作るのは難



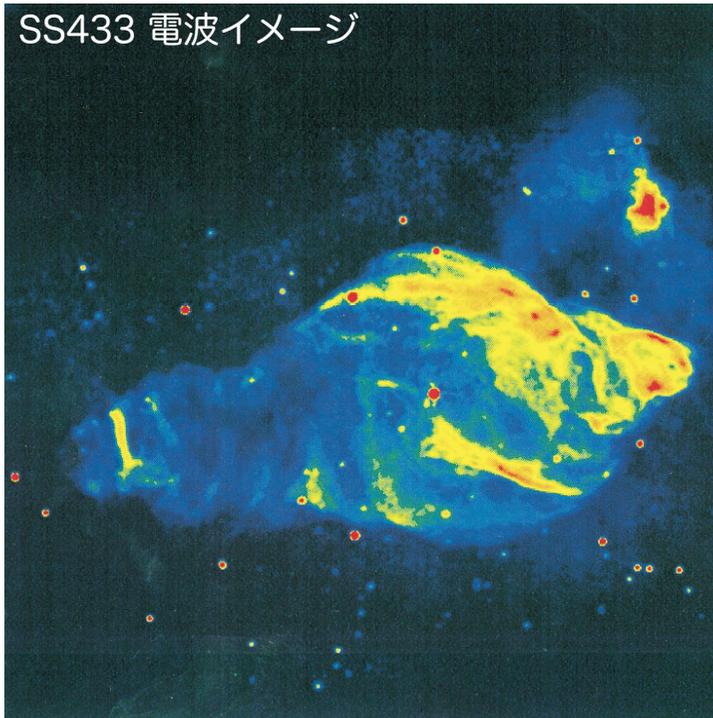
超臨界降着

超高光度X線源

SS433 (Begelman '80, Shklowvskii'81)

- 全放射光度 $L_{\text{bol}} \sim 10^{40}$ erg/s
- collimate されたアウトフローを伴う ($\sim 1^\circ$)
- kinetic luminosity $L_k \sim 10^{39}$ erg/s
- ブラックホール質量は不明
- 中心天体が恒星質量BHとすると $L_{\text{bol}} \sim 100 L_E$

SS433 電波イメージ

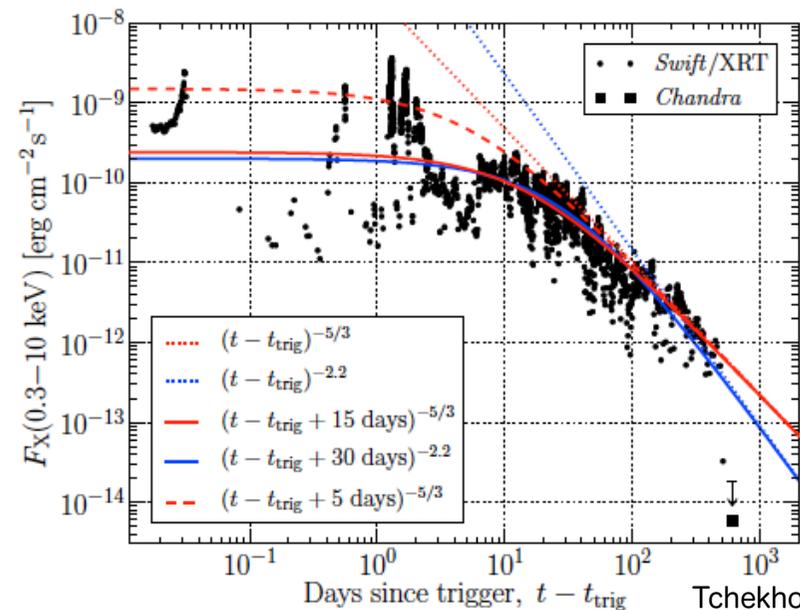


Dubner '98

Swift J1644+57 (Burrows+11, Bloom+'12, Zauderer+'12, Metzger '12)

2011年3月28日 急激な増光

- peak luminosity 10^{48} erg/s
- jet speed $\Gamma \sim 10$
- variability ~ 10 s (rest frame)
→ $M_{\text{bh}} > 10^6$ 太陽質量
- $M_{\text{bh}} - L_{\text{buldge}}$ 関係
→ $M_{\text{bh}} \sim 10^7$ 太陽質量
- 臨界光度の1万倍！



Tchekhovskoy+12

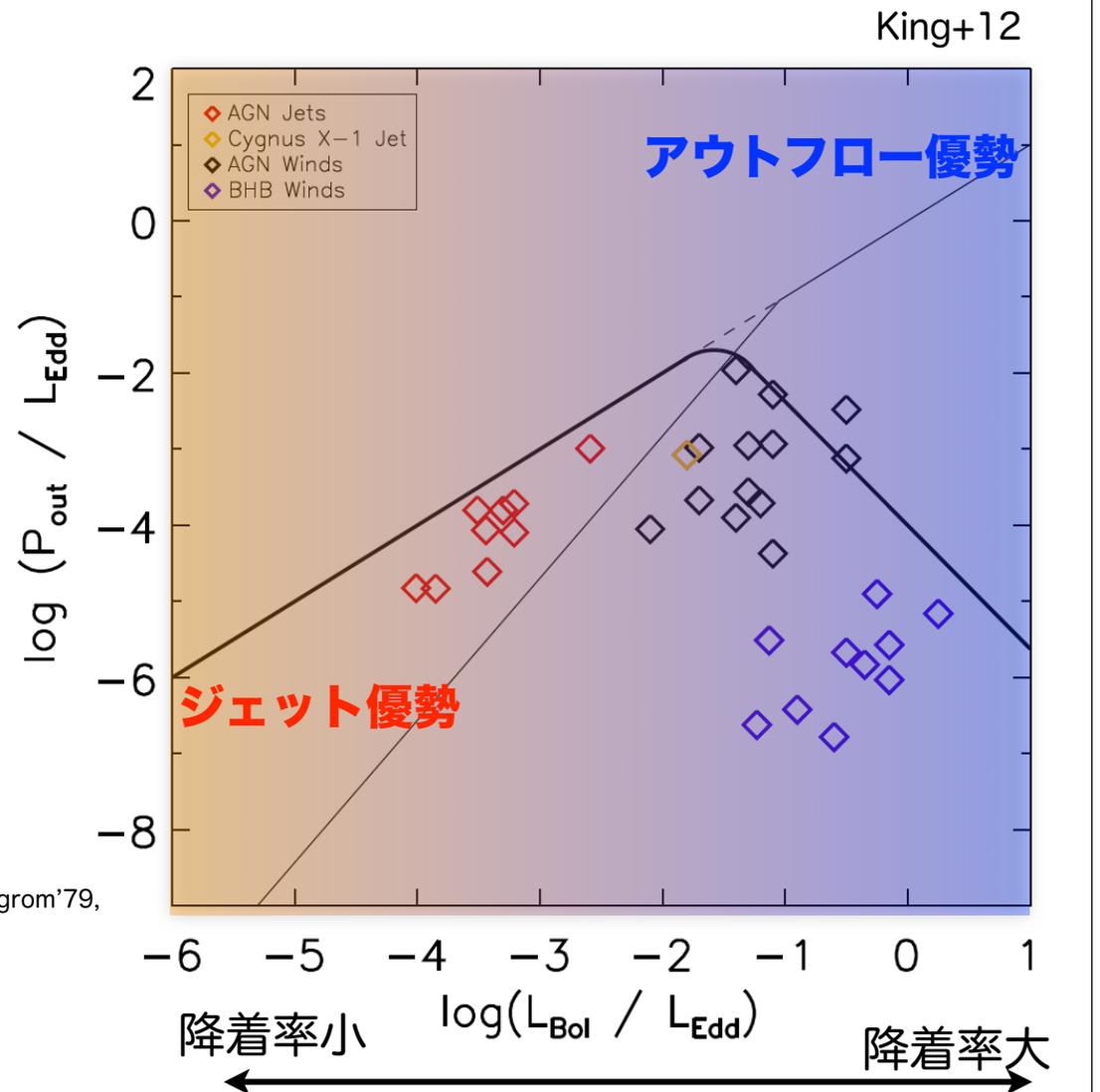
ジェット&アウトフロー

M87 jet



- 恒星質量BH: $\gamma \sim \text{a few}$ Margon+'79, Abel & Milgrom'79, Fabian & Rees '79
 SS433 $v_j = 0.26c, v_w = 0.01c$
- 巨大質量BH: $\gamma \geq 10$
 Swift J1644+57 $\gamma \sim 10$ Metzner+12
 $E_{\text{jet}} \sim E_{\text{wind}}?$ Thombesi+'12

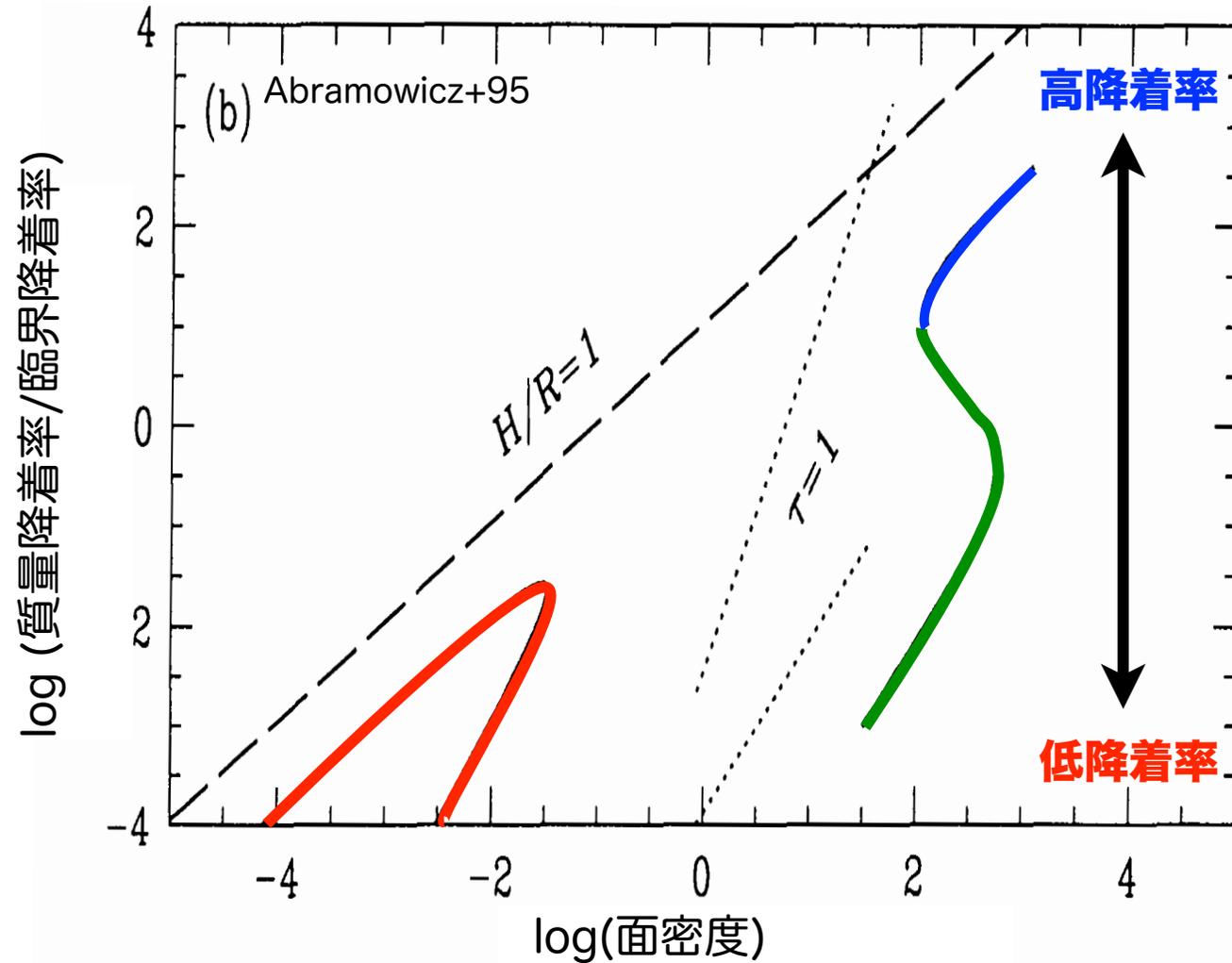
jet/outflowが星間ガスに影響 e.g., Haehnelt & Kauffmann '00, Pounds '03, King '03, Yamamoto+'09 - 質量降着/アウトフローの割合は?



- 光速近いアウトフローがつくられるのか?
- アウトフローの加速機構は?
- 質量降着/アウトフローの割合は?

降着円盤の理論モデル

降着円盤内でのエネルギー収支の釣り合い



高降着率

加熱率 ~ 移流冷却
ガス、磁場
放射冷却・輻射力

Eggum '87, Okuda +00,
Ohsuga+05, Hirose+09, Ohsuga+09

中降着率

加熱率 ~ 放射冷却
ガス、磁場
放射冷却

低降着率

加熱率 ~ 移流冷却
ガス、磁場

Uchida & Shibata '85, Kudoh+99
Hawley+01, Kato+03,04, Koide+03
McKinney+'06, '12, Penna+'12
Tchekhovskoy+'10 etc.

臨界降着率を超える高降着率降着円盤を調べるためには
ガスだけでなく**磁場**と**輻射**が重要

基礎方程式

磁気流体方程式

◆質量保存則

$$\partial_t D + \nabla \cdot (Dv) = 0$$

◆誘導方程式

$$\partial_t B + \nabla \times (v \times B) = 0$$

◆ガスのエネルギー保存

$$\partial_t E_{\text{MHD}} + \nabla \cdot m_{\text{MHD}} = G^0$$

◆ガスの運動量保存

$$\partial_t m_{\text{MHD}} + c^2 \nabla \cdot P_{\text{MHD}} = G$$

輻射4元力密度

輻射のモーメント方程式

◆輻射のエネルギー保存

$$\partial_t E_r + \nabla \cdot F_r = -G^0$$

◆輻射の運動量保存

$$\partial_t F_r + c^2 \nabla \cdot P_r = -G$$

$$D = \rho\gamma$$

$$E_{\text{MHD}} = \rho h \gamma^2 c^2 - p_g + \frac{E^2 + B^2}{8\pi}$$

$$m_{\text{MHD}}^i = \rho h \gamma^2 c^2 u^i + \frac{c \varepsilon_{jk}^i E^j B^k}{4\pi}$$

$$P_{\text{MHD}}^{ij} = \rho h \gamma^2 u^i u^j - \frac{1}{4\pi} \left[E^i E^j + B^i B^j - \frac{\delta^{ij}}{2} (E^2 + B^2) \right]$$

$$G^0 = -\rho\kappa \left(4\pi\gamma B - c\gamma E_r + \frac{u_j F_r^j}{c} \right) + \rho\sigma \left[\frac{\gamma u^2 E_r}{c} - \frac{\gamma u_j u_k P_r^{jk}}{c} - (2\gamma^2 - 1) \frac{u_j F_r^j}{c} \right]$$

$$G^i = -\rho\kappa c \left(4\pi \frac{u^i}{c} B - \gamma F_r^i + u_k P_r^{ik} \right) + \rho\sigma c \left[\gamma F_r^i - \gamma^2 u^i E_r - u_k P_r^{ik} + u^i \left(\frac{2\gamma u_j F_r^j - u_j u_k P_r^{kk}}{c^2} \right) \right]$$

12本の双曲型方程式
+状態方程式(polytropic/M1)を
数値的に解く

model

2.5次元特殊輻射磁気流体計算

512x512 grid

BH: 10太陽質量

重力: 擬ニュートンポテンシャル

輻射: 電子散乱+自由-自由吸収を考慮

2段階計算を行う

1st step:

相対論的磁気流体計算 (輻射なし)

$r=100r_s$ から磁化したガスを注入

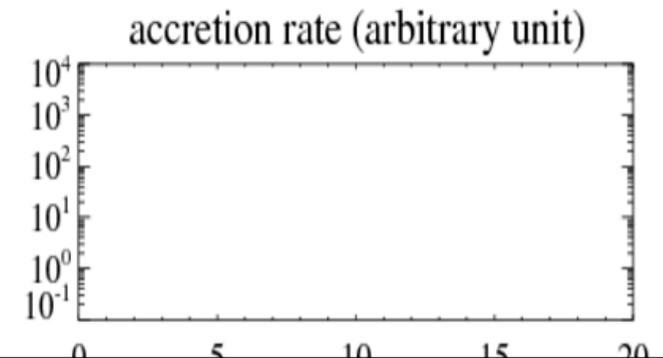
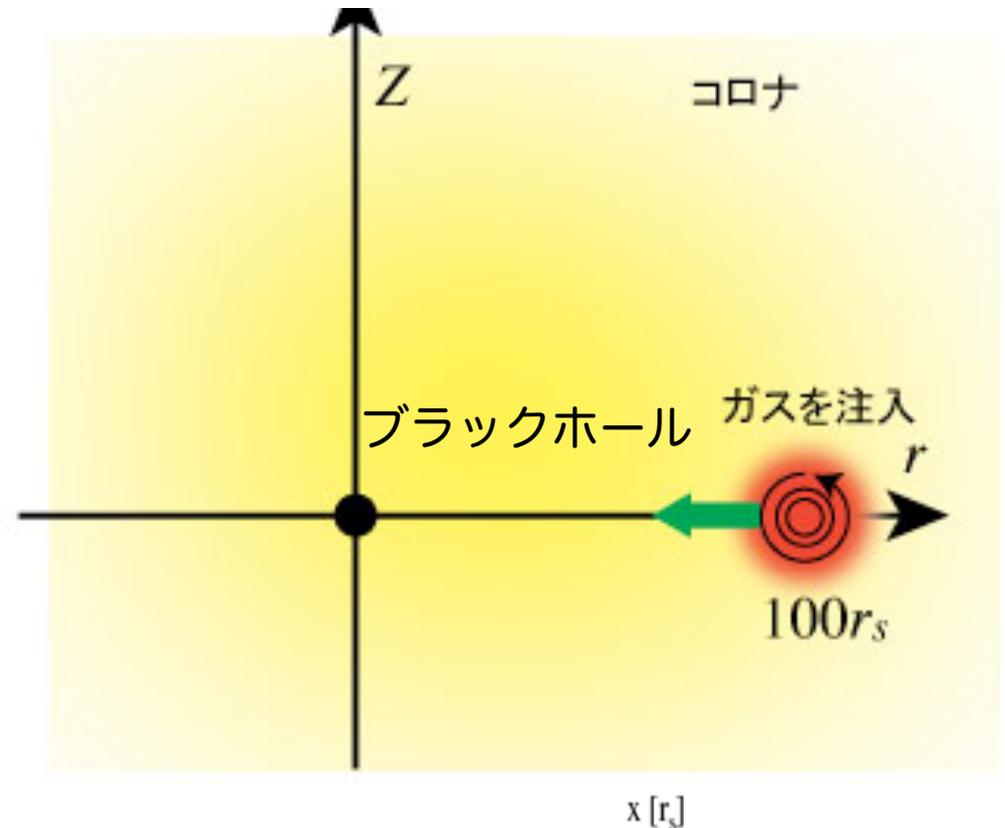
←注入ガス量がパラメータ

降着率が定常になるまで計算

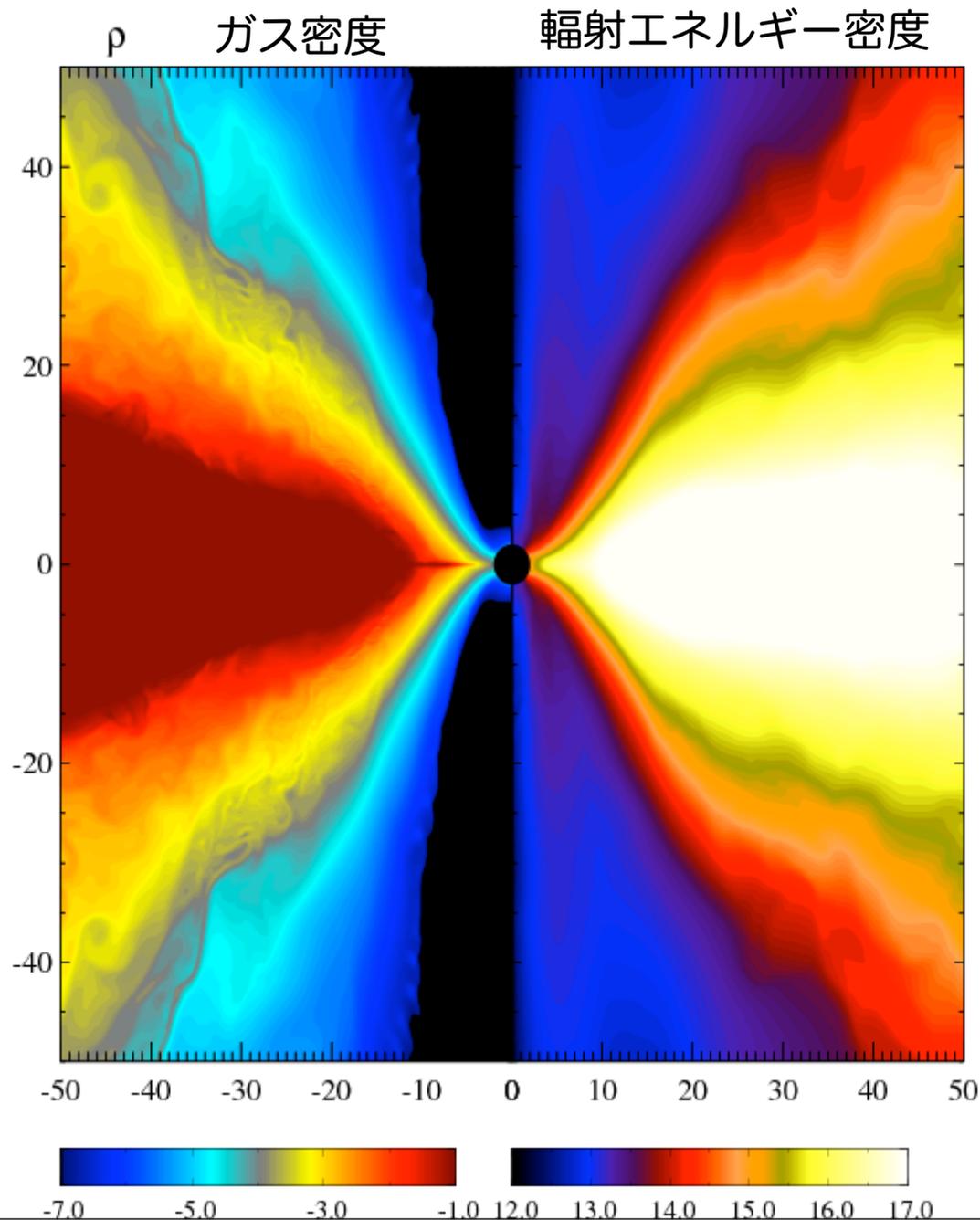
2nd step

1st stepで得られた定常状態を初期条件

として輻射磁気流体計算を開始



輻射磁気流体計算



ガス降着率:~100-1000臨界降着率
->超臨界降着は可能
光度:数-10エディントン光度
ガス放出率~ガス降着率

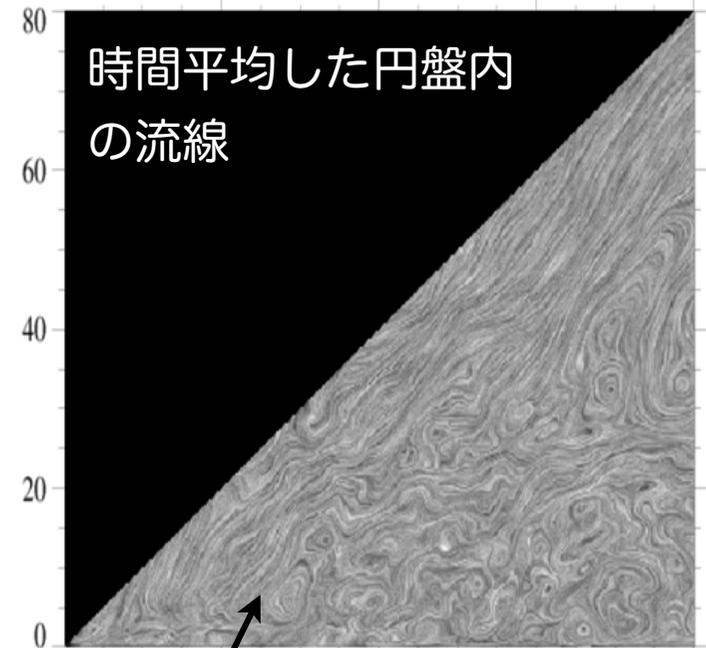
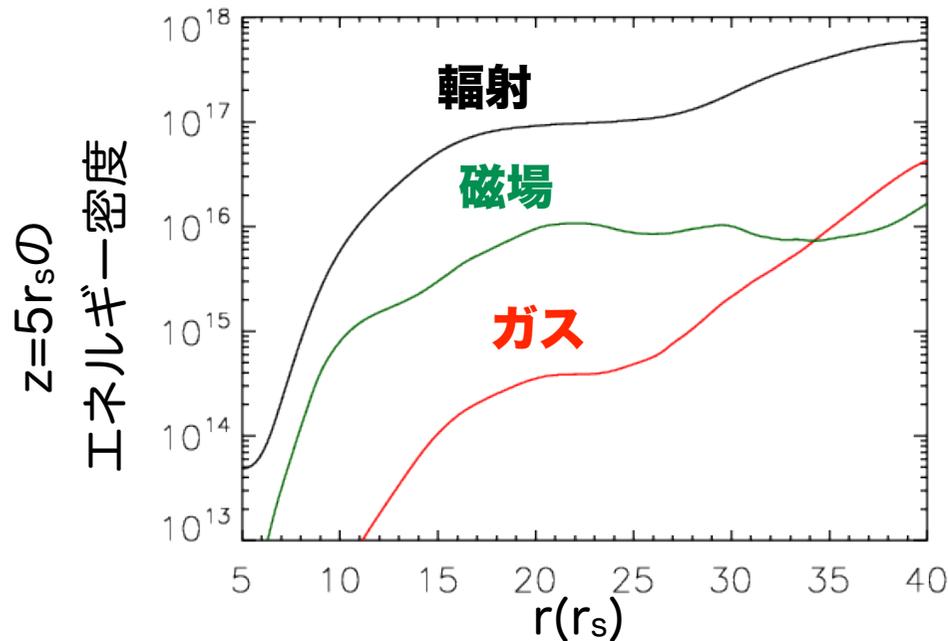
円盤内の構造

磁気回転不安定性 (Magnetorotational Instability MRI) :

円盤の差動(ケプラー)回転により乱流構造が形成して磁場が増幅
 角運動量輸送を促進してガス降着を引き起こす
 輻射が効かない場合：ガス/磁気エネルギー = 10-100

Balbus & Hawley '91, '98
 Hawley & Balbus '02
 Machida & Matsumoto '03

ガス:磁場:輻射エネルギー = 1: 100: 1000



時間平均した円盤内の流線



円盤内で渦が形成

-> MRIによる乱流が形成

-> 質量降着に寄与

MRI成長波長

$$\lambda = \frac{V_A}{\Omega_K} = \sqrt{\frac{r^3 B^2}{4\pi G M_{BH} \rho}}$$

$\lambda/H \sim 0.1-1$ とすると

円盤の厚み

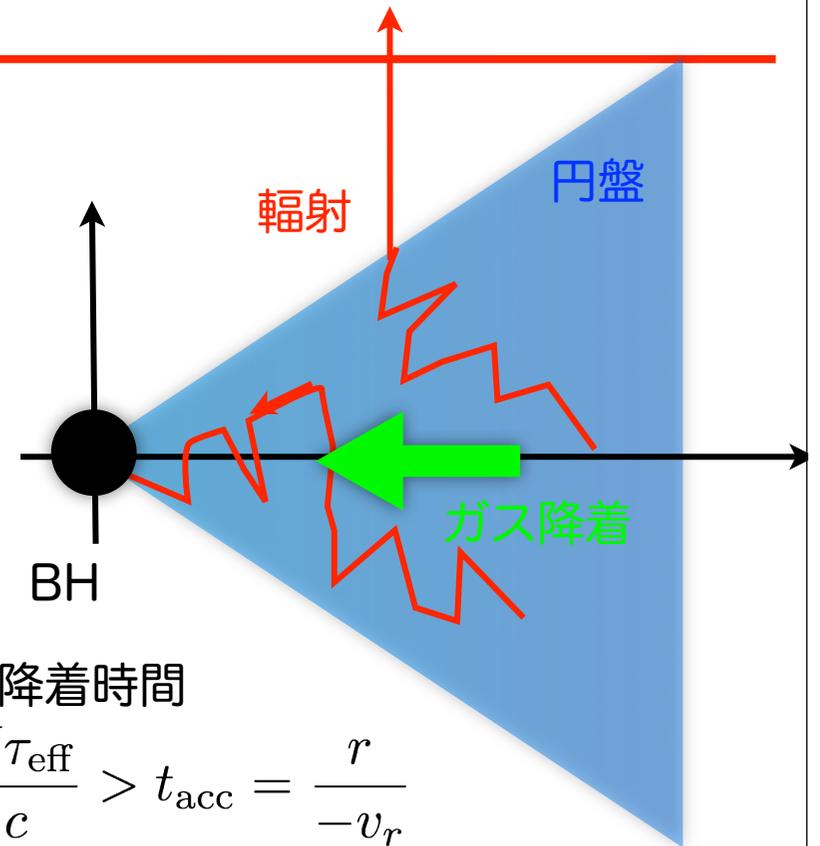
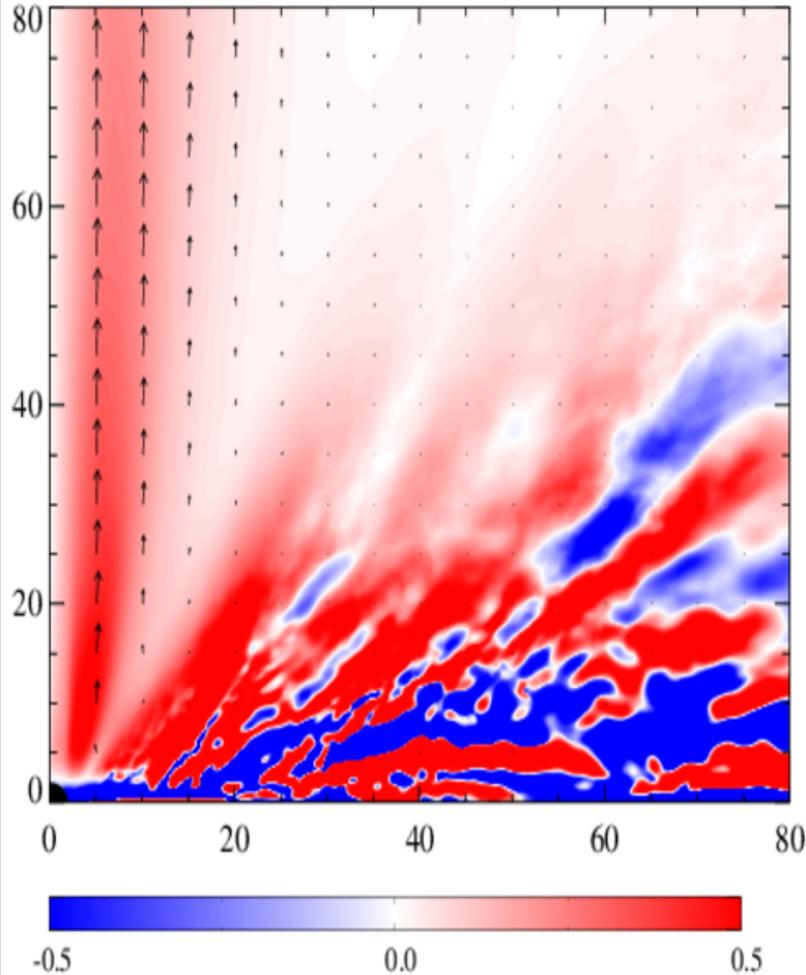
$$H = \frac{c_s}{\Omega_K} = \sqrt{\frac{r^3 \Gamma (p_g + E'_r)}{G M_{BH} \rho}}$$

ガス圧優勢: 磁気エネルギー=0.1内部エネルギー

輻射優勢: 磁気エネルギー=0.1輻射エネルギー

円盤内縁からの放射

動径方向の輻射フラックス



熱平衡になる条件

cooling time \gg 降着時間

$$t_{\text{ab}} = \frac{H\tau_{\text{eff}}}{c} > t_{\text{acc}} = \frac{r}{-v_r}$$

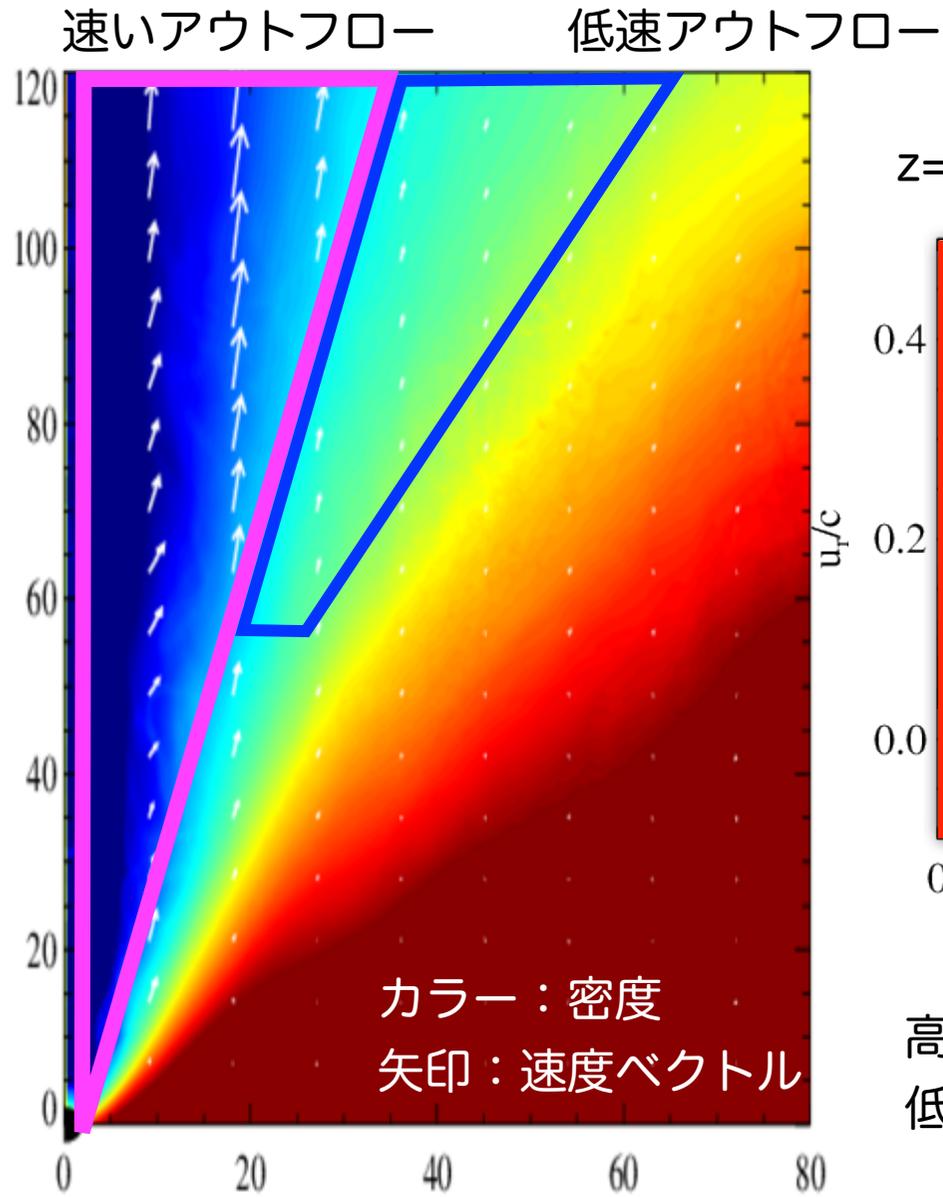
質量降着率 $\dot{M} = -2\pi r v_r \Sigma$

有効光学的厚さ $\tau_{\text{eff}} = \frac{\Sigma}{2} \sqrt{\sigma_s \kappa_{\text{ff}}}$

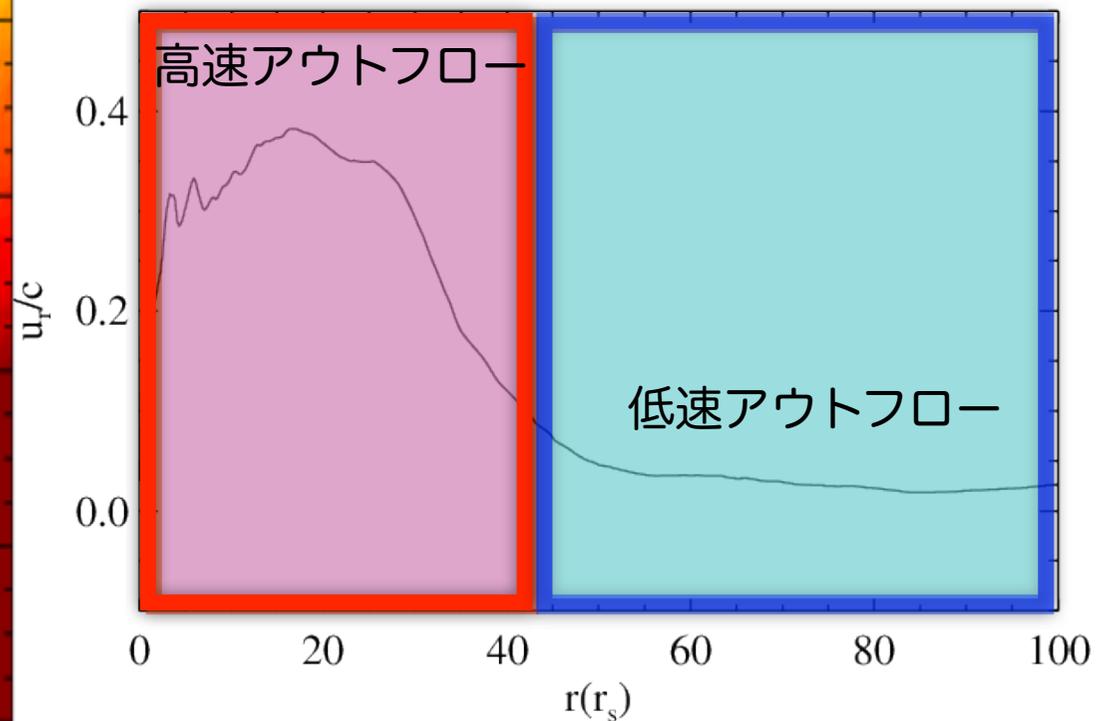
$$r < r_{\text{nonLTE}} = 2 \times 10^{-3} \dot{m} \left(\frac{\rho}{1 \text{ g cm}^{-3}} \right) \left(\frac{T_g}{10^8 \text{ K}} \right)^{-\frac{7}{4}} \frac{H}{r} r_s$$

$\dot{m} \sim 10^3$ の時、数 r_s に高温な円盤が形成される

アウトフロー速度



$z=100r_s$ の一次元断面でみたアウトフロー速度

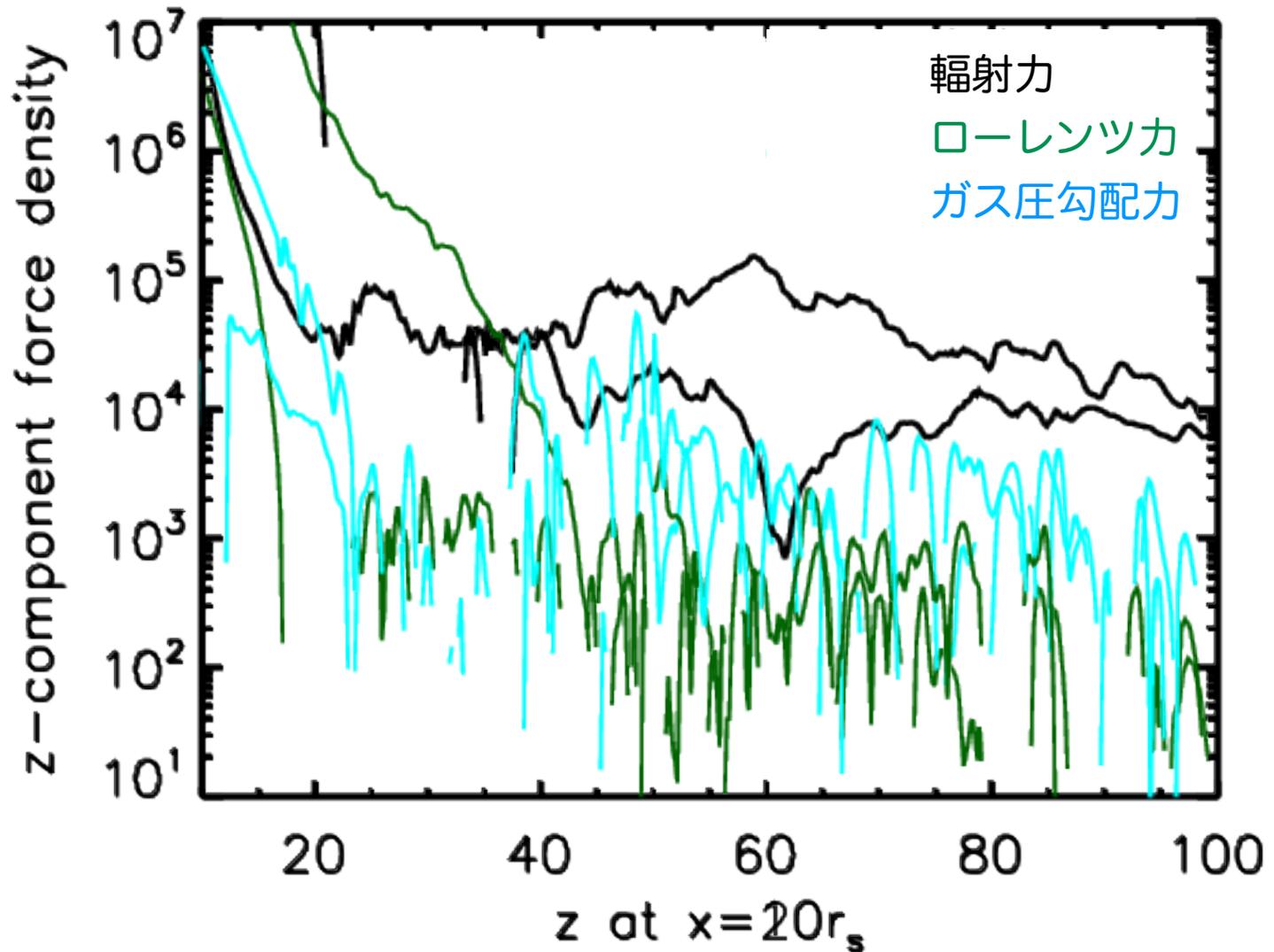
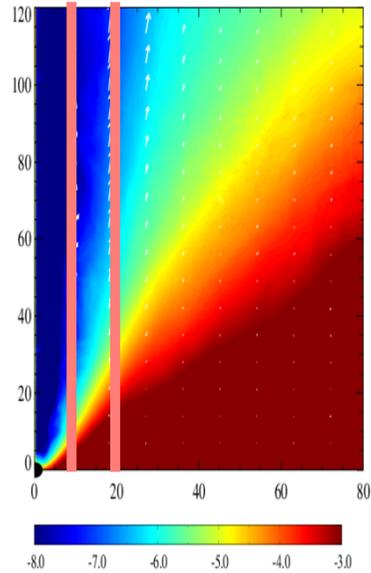


高速アウトフロー: 光速の30-50%程度

低速アウトフロー: 光速の数%弱

脱出速度に満たないが加速し続けている

アウトフローの加速

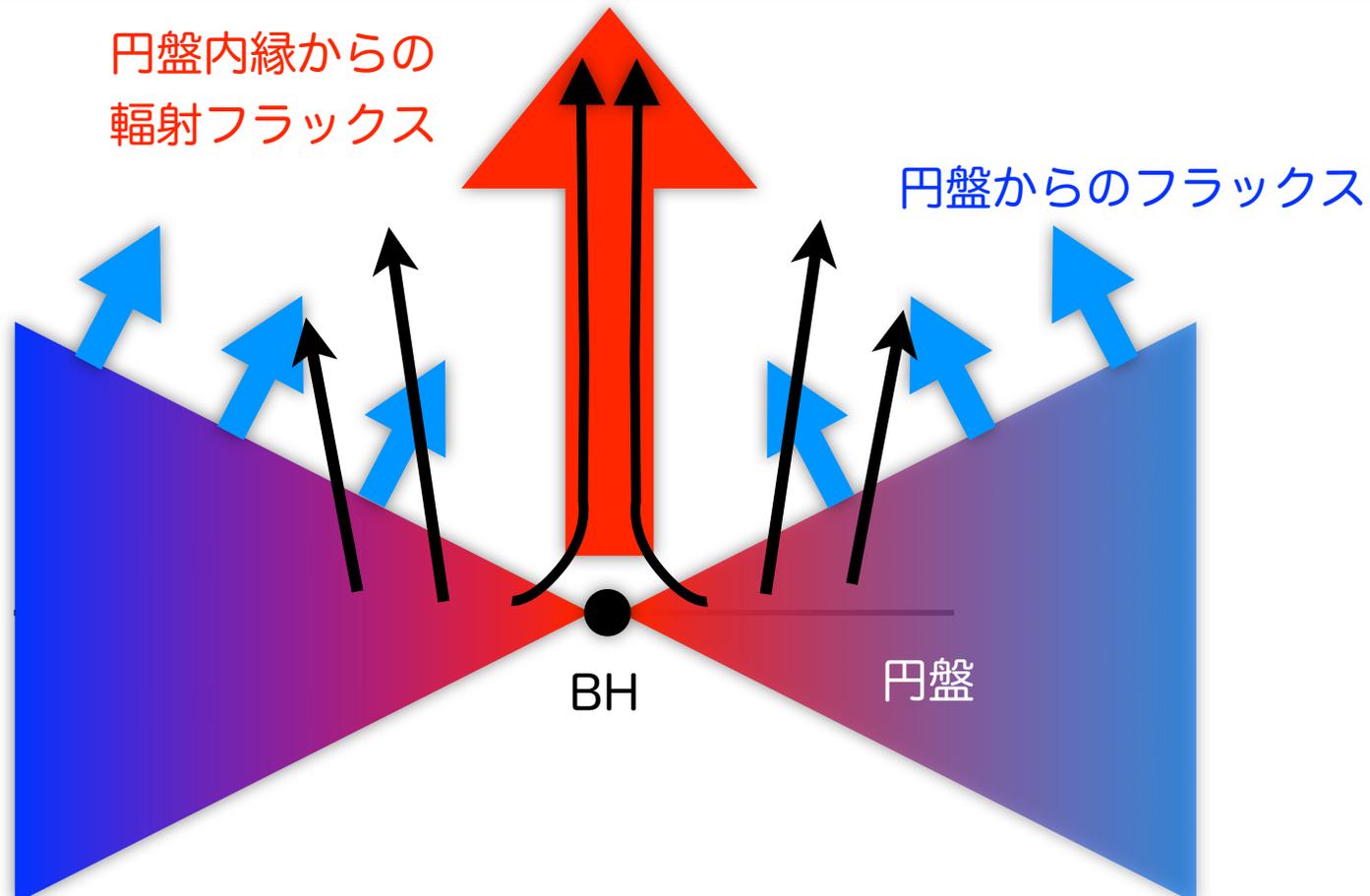


$r=10r_s$: 輻射力 \gg ガス圧 \sim 磁気力 輻射圧による加速
 $r=20r_s$: 輻射力 $>$ \sim ガス圧 \sim 磁気力 輻射力が減少して他と同程度近くの大きさ

輻射力と輻射抵抗

ガスの運動方程式

$$\rho h \gamma^2 \frac{Dv^i}{Dt} = -\nabla p_g + \rho_e E^i + \frac{\varepsilon_{klj}^i j^k B^l}{c} + \frac{\rho(\kappa + \sigma)}{c} \left[\gamma F_r^i - (E_r u^i + u_j P_r^{ij}) + \frac{u^i u_k F_r^k}{\gamma c^2} \right]$$



まとめ

超臨界降着流の2.5次元相対論的輻射磁気流体計算を行った

- 円盤内では自由-自由吸収によってガスと輻射は熱平衡
→輻射圧が卓越した輻射圧優勢円盤が形成
- 円盤内縁では落下時間>吸収時間のために高温な円盤が形成
→円盤内縁からの強い輻射フラックス
- 円盤内縁からの輻射に強い、比較的収束した
アウトフロー (0.4c程度~高光度X線源の観測とconsistent)
- より外側から広角の遅いアウトフロー
フラックスが広がる効果+輻射抵抗

