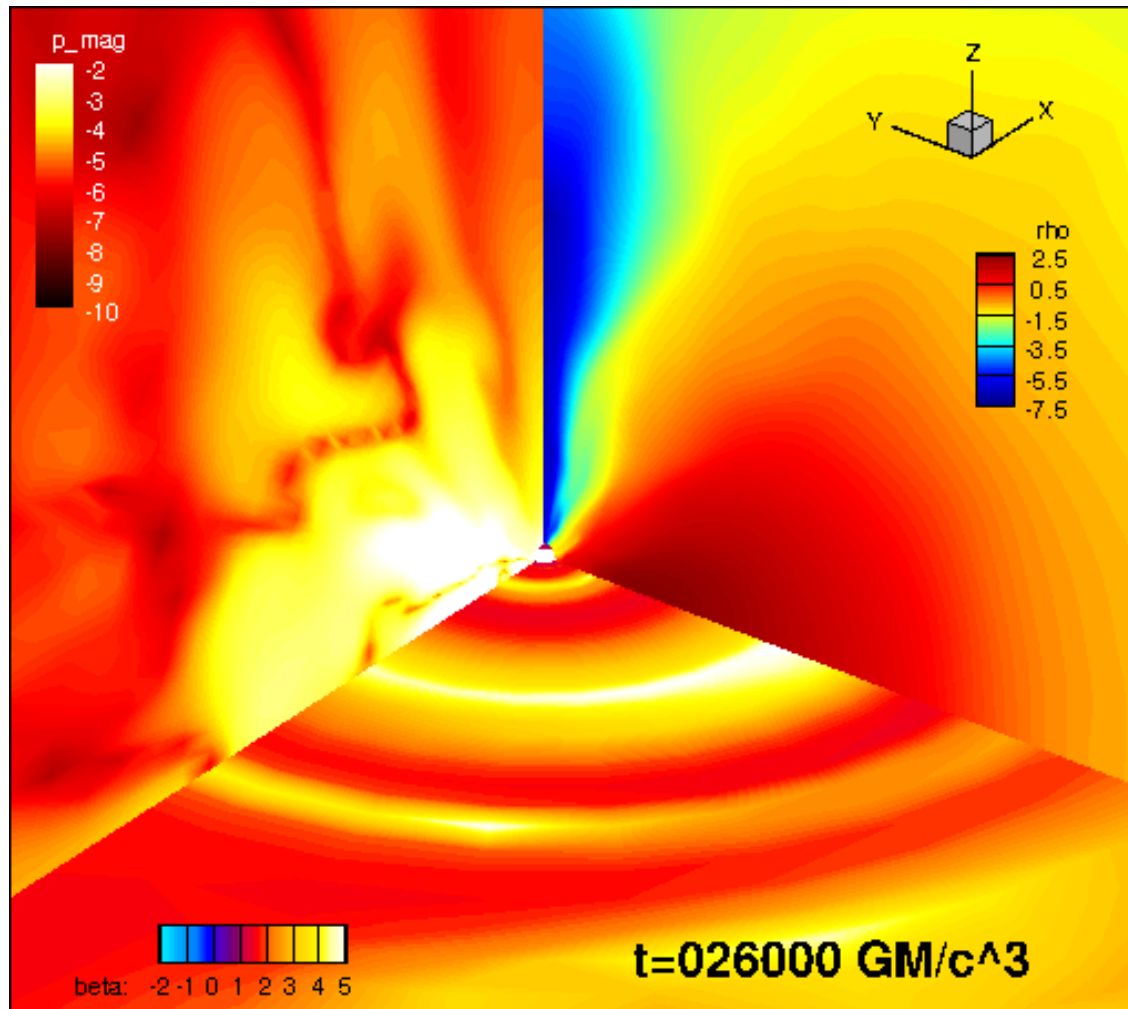


3D GRMHD simulation of accretion flows onto BH and relativistic jet formation



Akira Mizuta(RIKEN)

Toshikazu Ebisuzaki
(RIKEN)

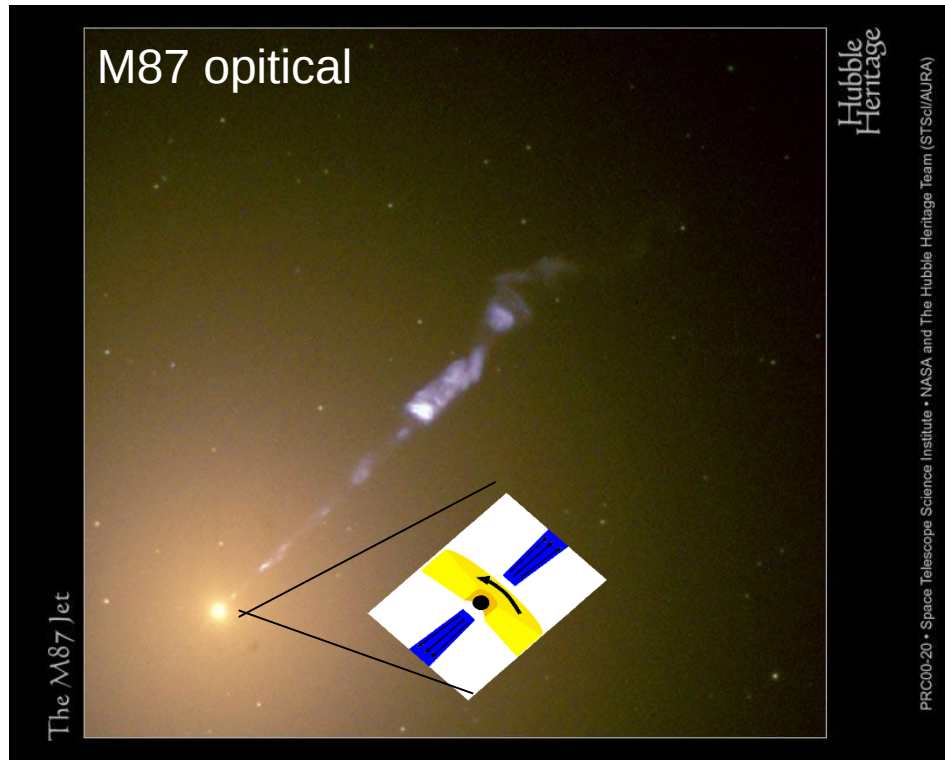
Toshiki Tajima
(UCI)

Shigehiro Nagataki
(RIKEN)

降着円盤大研究会

21.June.2015 @ 京都大

AGN : BH+accretion disk



・降着流

- BH+降着円盤
- 磁場増幅 (MRI)、QPO

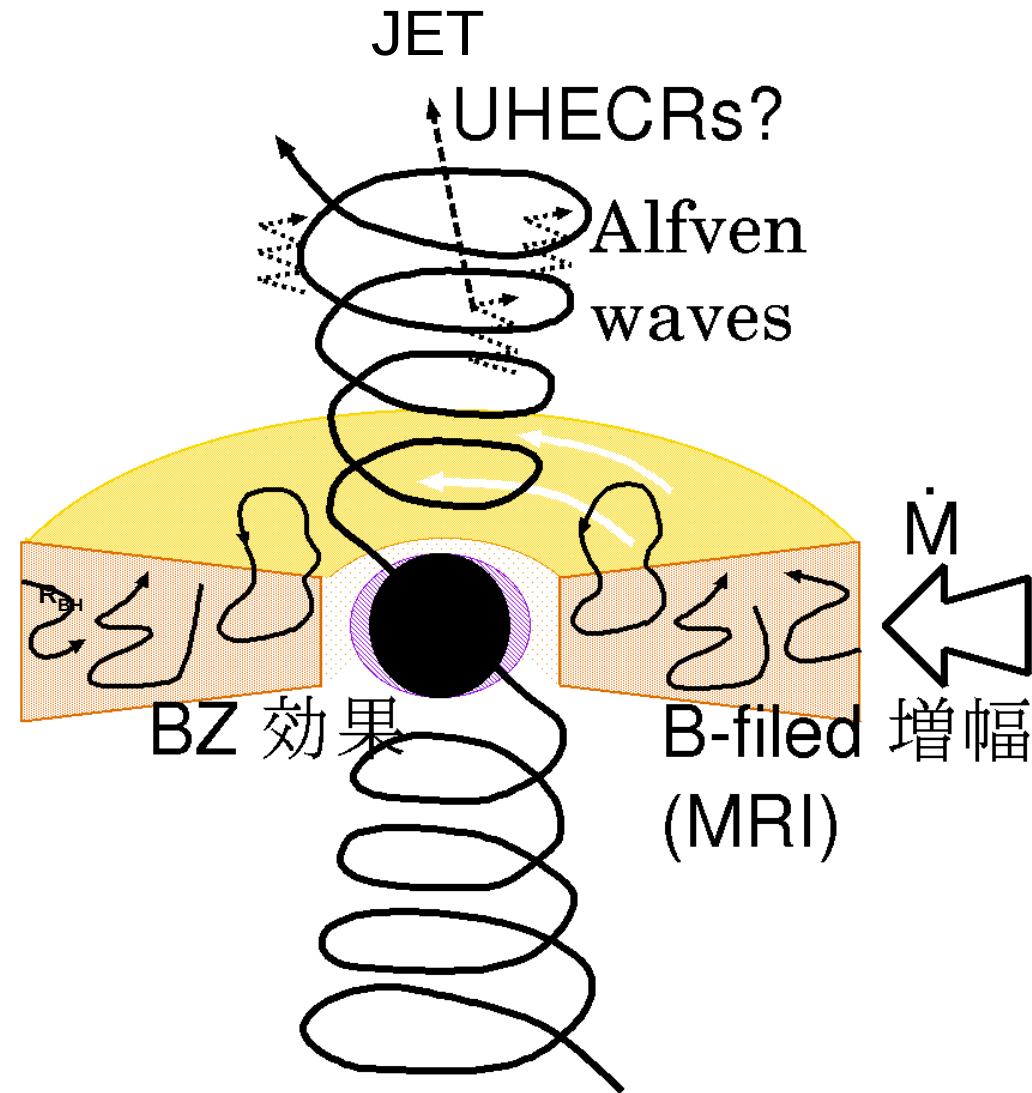
・相対論的ジェット

- ジェット形成?

(MHD, Blandford-Znajek (GR effect) ?

- 最高エネルギー宇宙線加速 up to $\sim 10^{20}$ eV (Where ? How?)

相対論的ジェット形成: 降着円盤の理解、磁場、一般相対論的效果



Basic Equations : GRMHD Eqs (GM=c=1, a: Kerr spin parameter)

$$\frac{1}{\sqrt{-g}} \partial_\mu (\sqrt{-g} \rho u^\mu) = 0 \quad \text{Mass conservation Eq.}$$

$$\partial_\mu (\sqrt{-g} T^\mu_\nu) = \sqrt{-g} T^\kappa_\lambda \Gamma^\lambda_{\nu\kappa} \quad \text{Energy-momentum conservation Eq.}$$

$$\partial_t (\sqrt{-g} B^i) + \partial_j (\sqrt{-g} (b^i u^j - b^j u^i)) = 0 \quad \text{Induction Eq.}$$

$$p = (\gamma - 1) \rho \epsilon \quad \text{EOS } (\gamma=4/3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{-g}} \partial_i (\sqrt{-g} B^i) = 0 \quad \text{No-monopoles constraint}$$

$$u_\mu b^\mu = 0 \quad \text{Ideal MHD condition}$$

$$u_\mu u^\mu = -1 \quad \text{Normalization of 4-velocity}$$

Energy-momentum tensor

$$T^{\mu\nu} = (\rho h + b^2) u^\mu u^\nu + (p_g + p_{\text{mag}}) g^{\mu\nu} - b^\mu b^\nu$$

$$p_{\text{mag}} = b^\mu b_\mu / 2 = b^2 / 2$$

$$b^\mu \equiv \epsilon^{\mu\nu\kappa\lambda} u_\nu F_{\lambda\kappa} / 2 \quad B^i = F^{*it}$$

Kerr-Schild metric (no singular at event horizon)

$$ds^2 = g_{tt} dt^2 + 2g_{tr} dt dr + 2g_{t\phi} dt d\phi + g_{rr} dr^2 + 2g_{r\phi} dr d\phi + g_{\theta\theta} d\theta^2 + g_{\phi\phi} d\phi^2$$

$$g_{tt} = \frac{2r}{\Sigma} - 1 \quad g_{rr} = 1 + \frac{2r}{\Sigma} \quad g_{\phi\phi} = \sin^2 \theta \left(\Sigma + a^2 \sin^2 \theta \left(1 + \frac{2r}{\Sigma} \right) \right)$$

$$g_{tr} = \frac{2r}{\Sigma} \quad g_{t\phi} = \frac{-2ar \sin^2 \theta}{\Sigma} \quad g_{r\phi} = -a \sin^2 \theta \left(1 + \frac{2r}{\Sigma} \right)$$

$$g_{\theta\theta} = \Sigma \quad \Sigma = r^2 + a^2 \cos^2 \theta \quad g = \det(g_{\mu\nu}) = -\Sigma^2 \sin^2 \theta$$

Computational domain, grids

Spherical coordinate (r, θ, ϕ) $R[1.4:3e4]$ $\theta[0:\pi]$ $\phi[0:2\pi]$

$[N_r=124, N_\theta=124, N_\phi=28]$

$r=\exp(n_r)$, $d\theta\sim 1.5^\circ$, $d\phi\sim 13^\circ$: uniform

– not enough high resolution to resolve MRI growth

Units $L : R_g=GM/c^2 (=R_s/2)$, $T : R_g/c=GM/c^3$, mass : scale free

$\sim 1.5 \times 10^{13} \text{cm} (M_{\text{BH}}/10^8 M_{\text{sun}})$ $\sim 0.5 \text{day} (M_{\text{BH}}/10^8 M_{\text{sun}})$

Initial condition

Fisbone-Moncrief (1976) solution – hydrostatic solution of disk around BH ($a=0.9$, $r_H\sim 1.44$), $l_* \equiv -u^t u_\phi = \text{const} = 4.45$, $r_{\text{in}}=6$.

- equilibrium state : gravitational potential, pressure gradient, and centrifugal force
- geometrical thick disk
- impose weak poloidal B-field

$$A_\phi \propto \max [\rho/\rho_{\text{max}} - 0.2, 0]$$

GRMHD code (Nagataki 2009,2011)

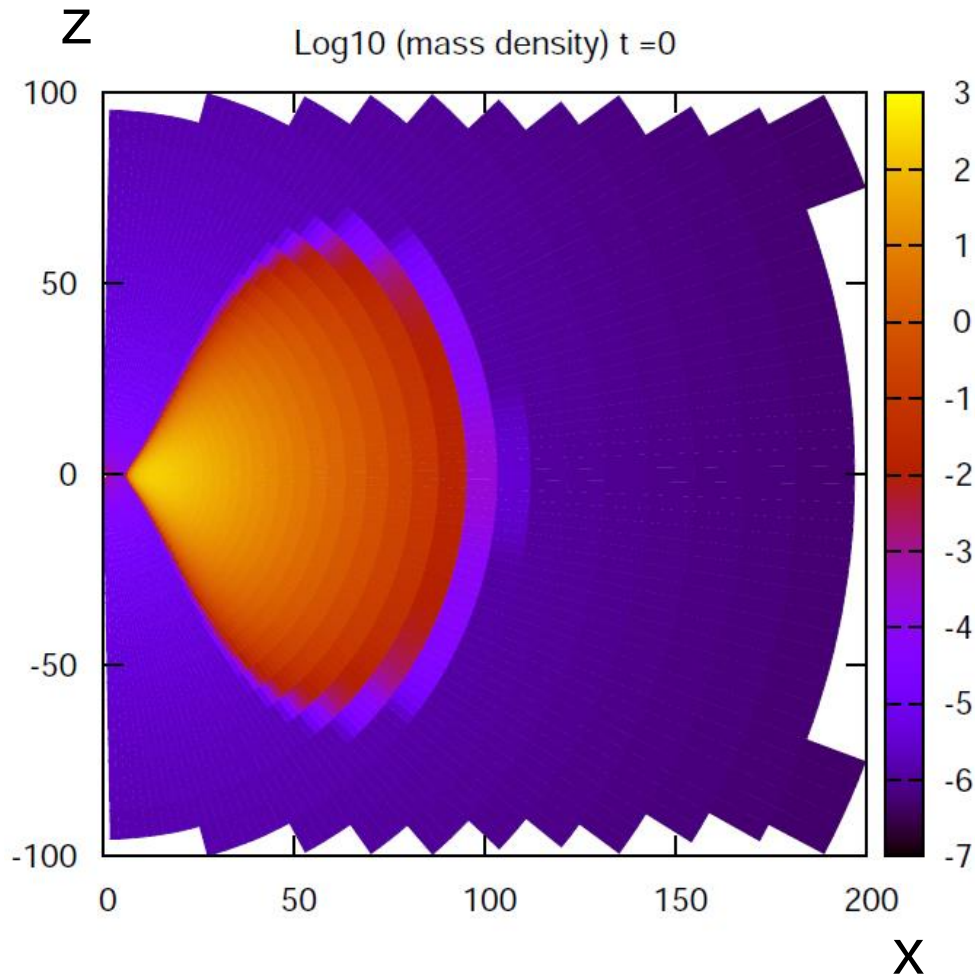
HLL flux, 2^{nd} order in space (van Leer), 2^{nd} or 3^{rd} order in time

See also, Gammie +03, Noble + 2006

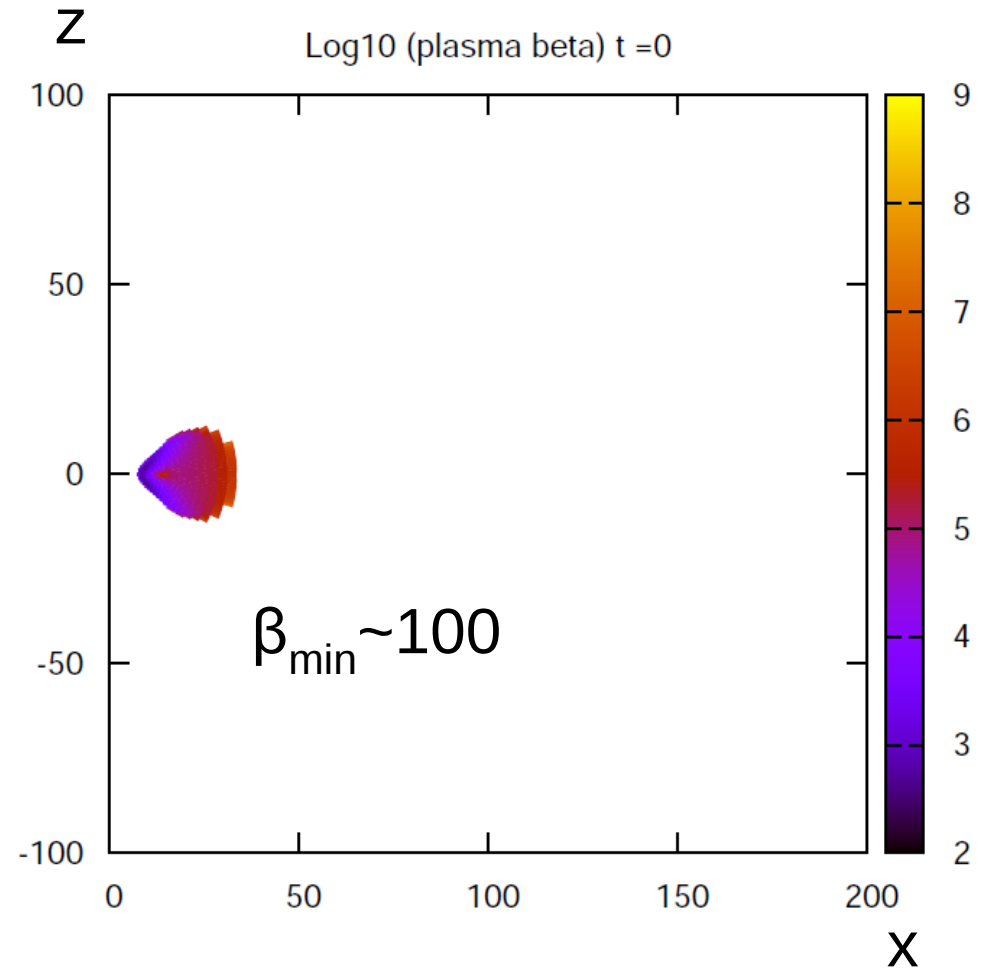
Flux-interpolated CT method for divergence free

Initial Condition

Log10 (Mass density)



Log10(Pgas/Pmag)

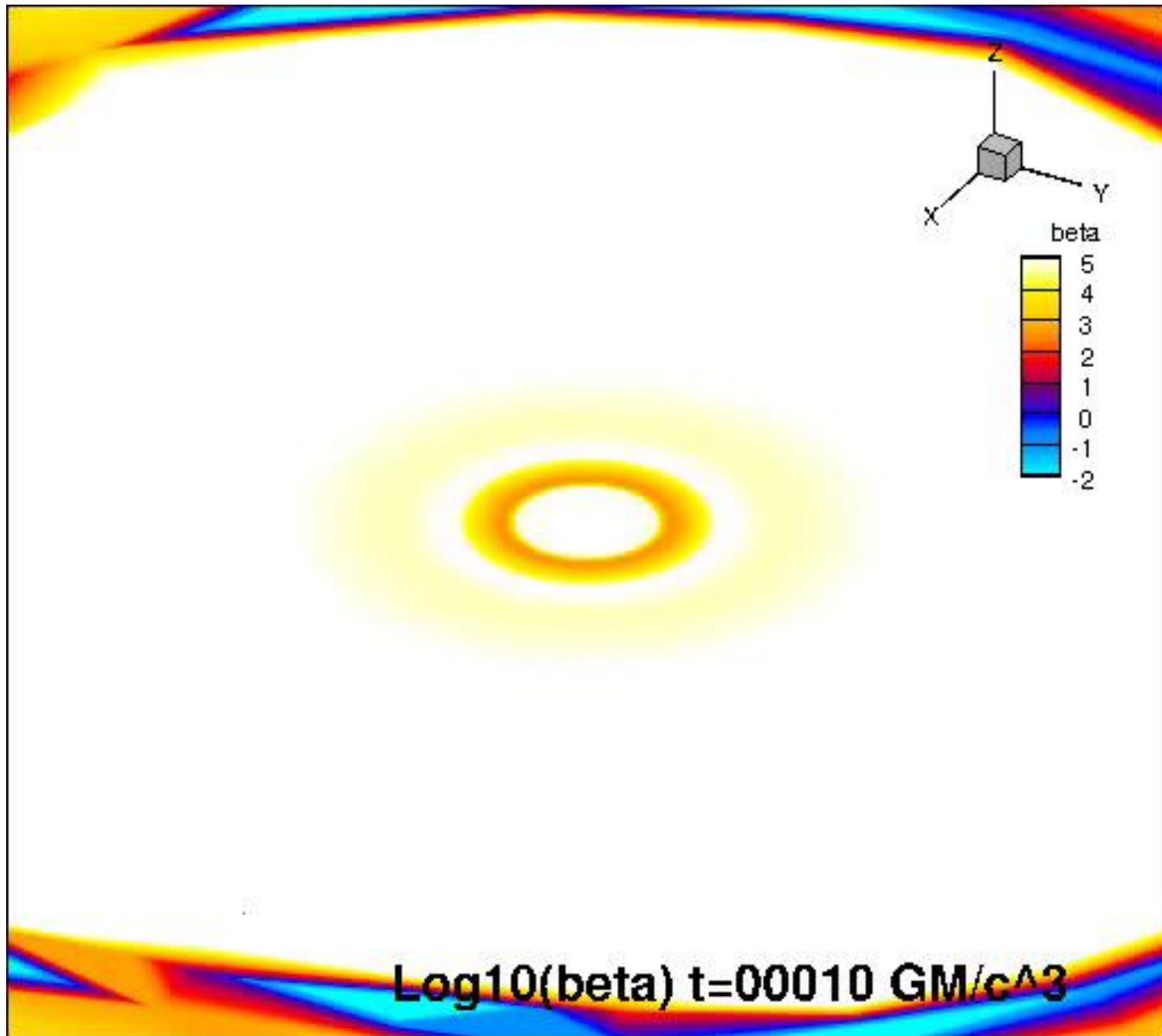


Fisbone-Moncrief (1976) solution : $a=0.9$,

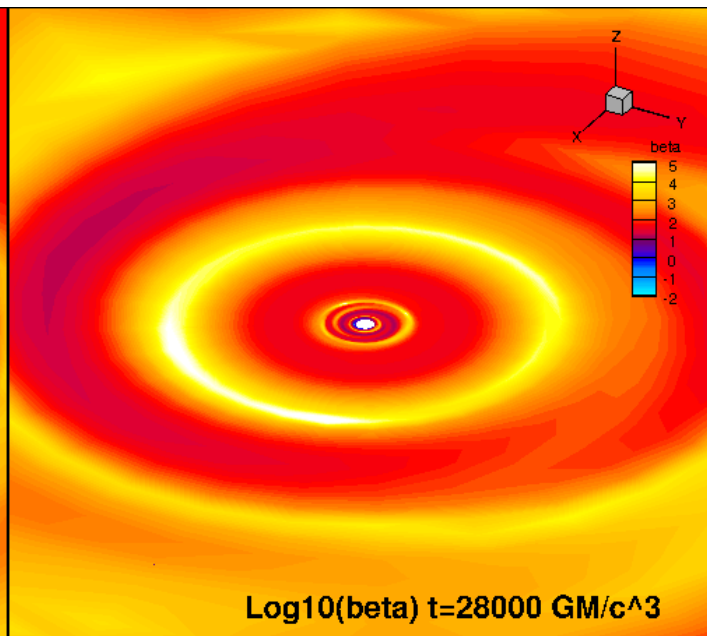
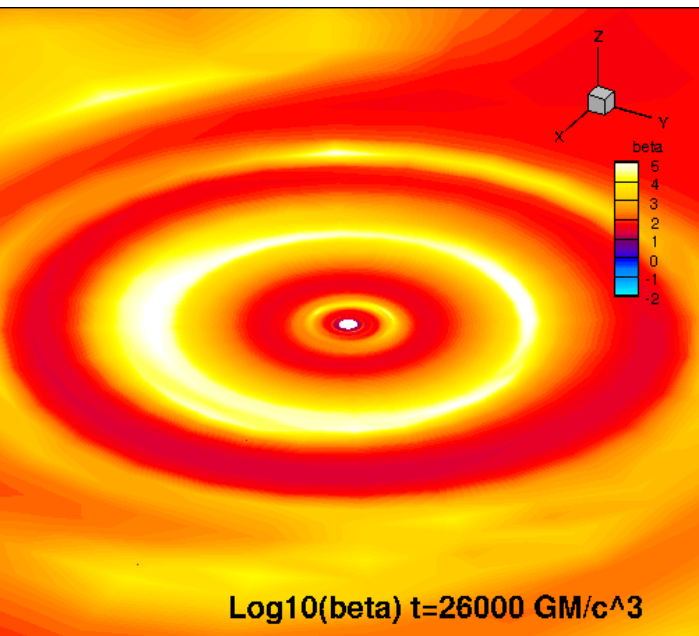
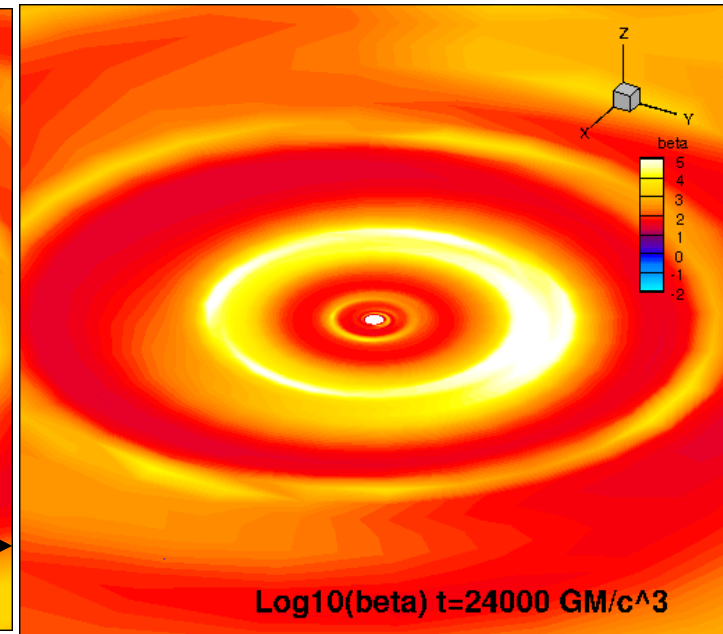
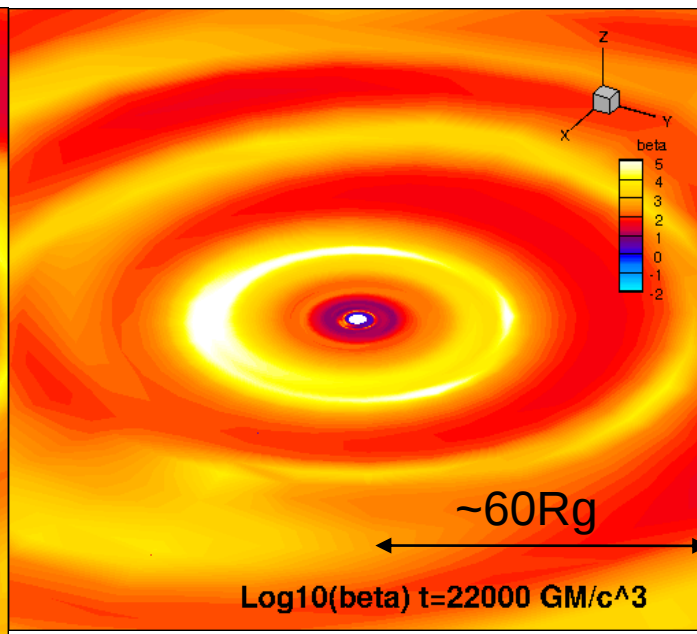
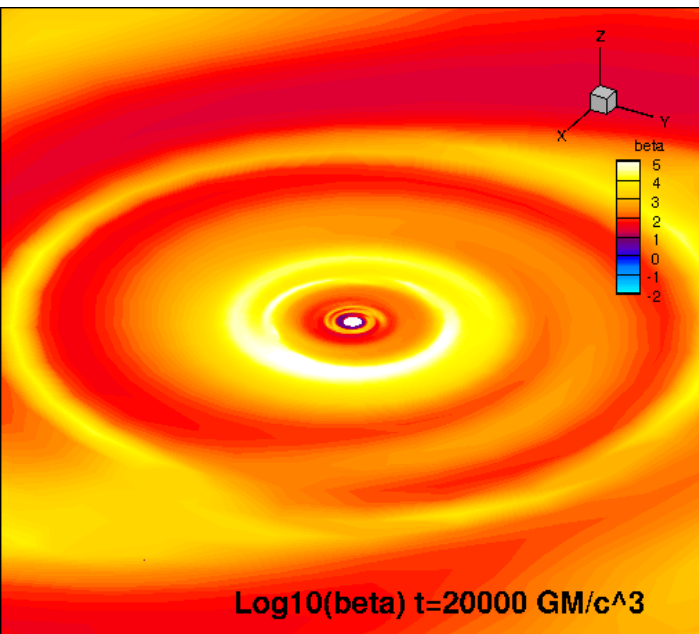
$$A_\phi \propto \max [\rho / \rho_{\max} - 0.2, 0]$$

$$l_* \equiv -u^t u_\phi = \text{const} = 4.45, r_{\text{in}} = 6.$$

Plasma Beta @ equator

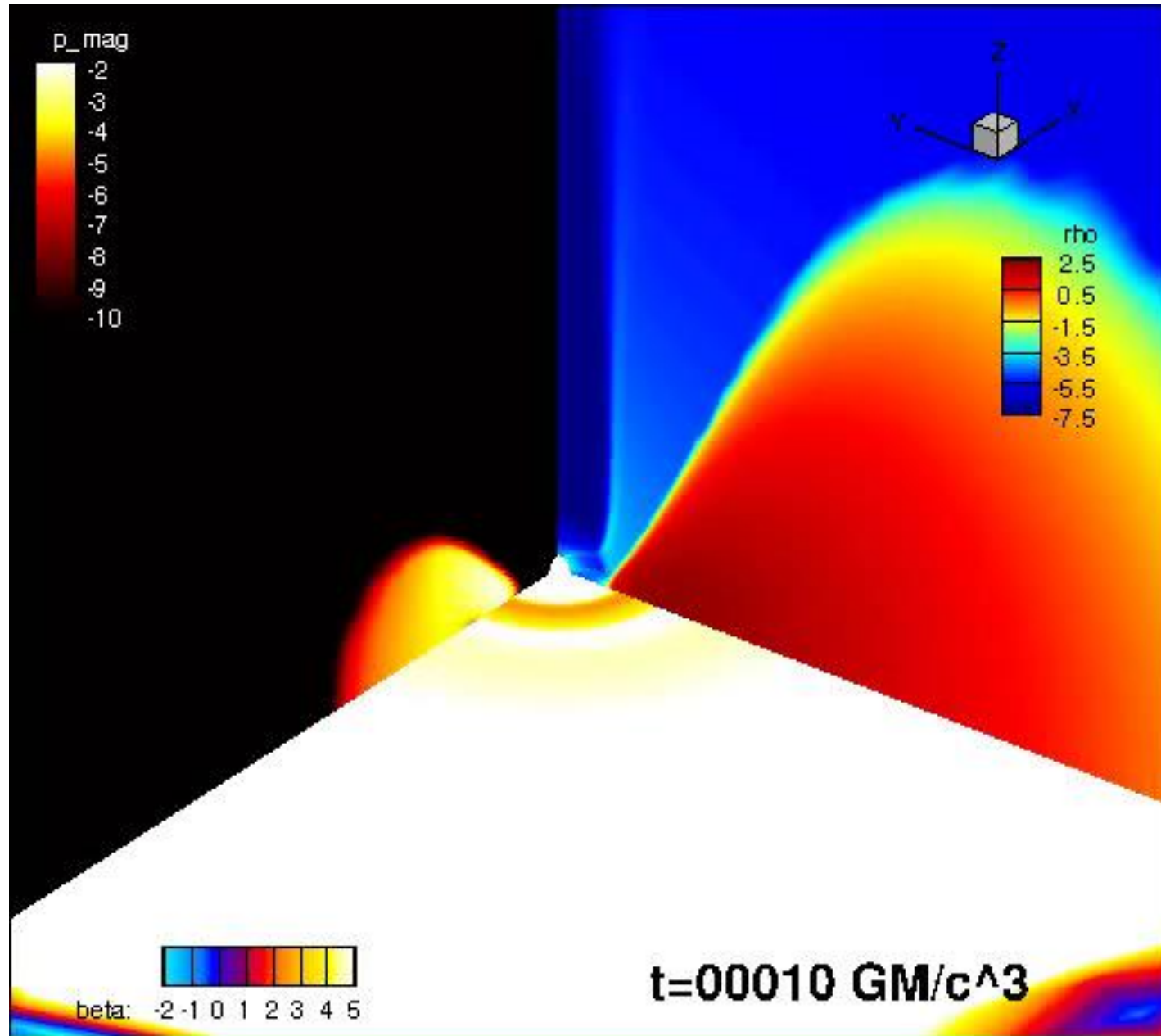


Time evolution $\log_{10}(\text{plasma beta} = P_{\text{Gas}}/P_{\text{Mag}})$ @ equatorial plane



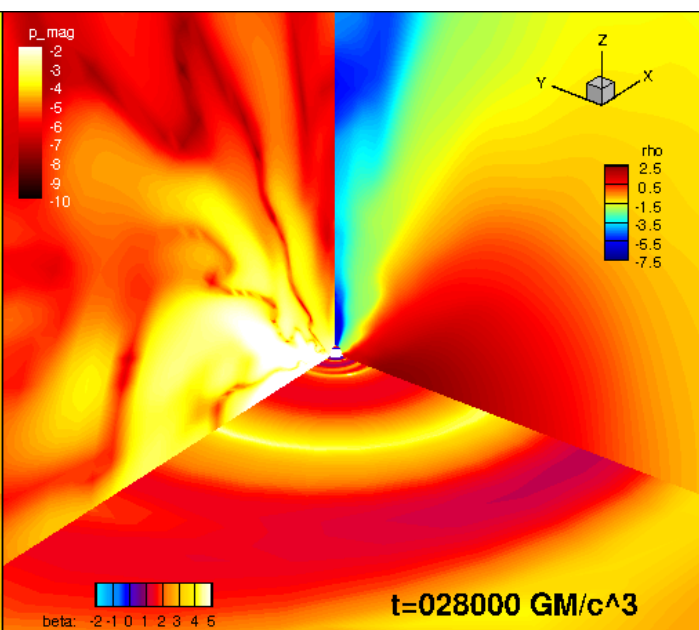
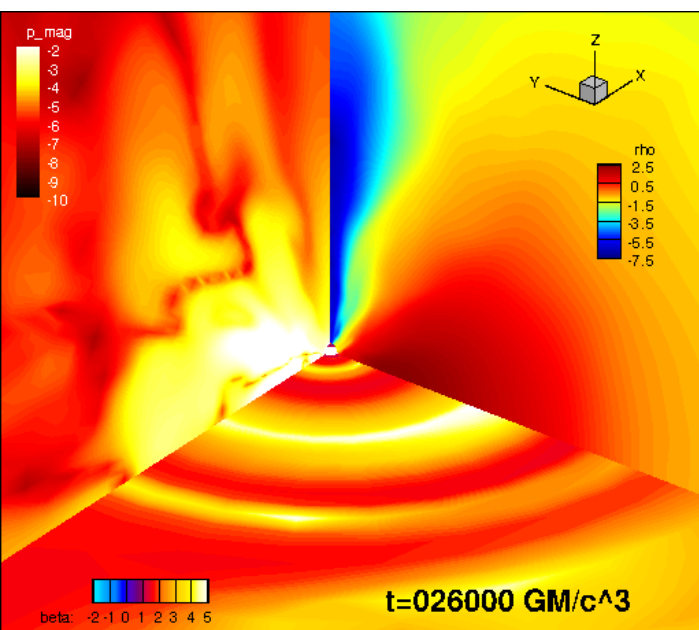
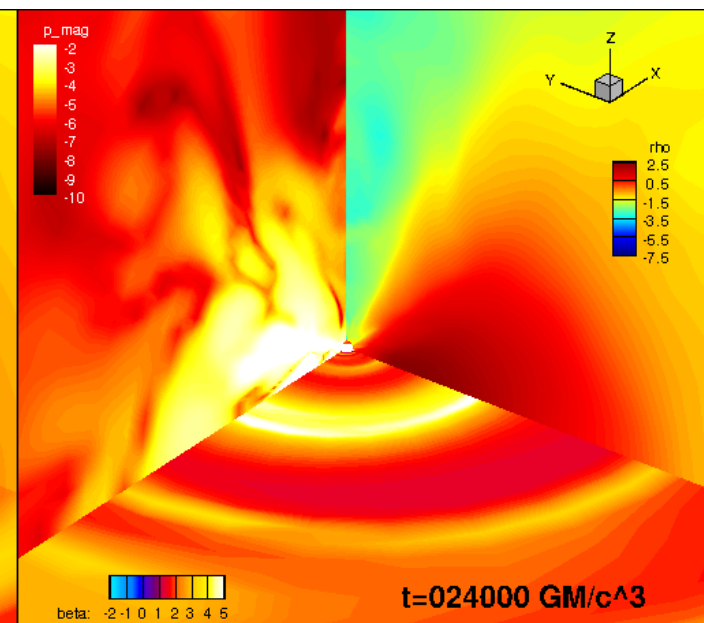
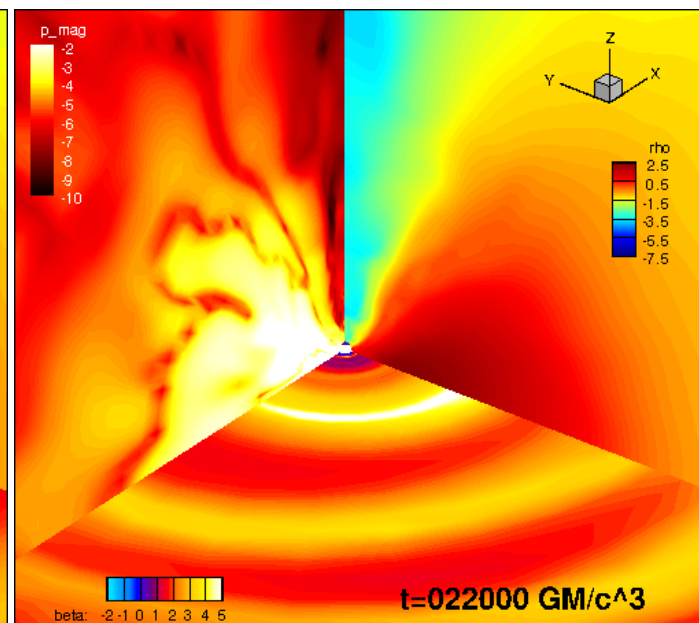
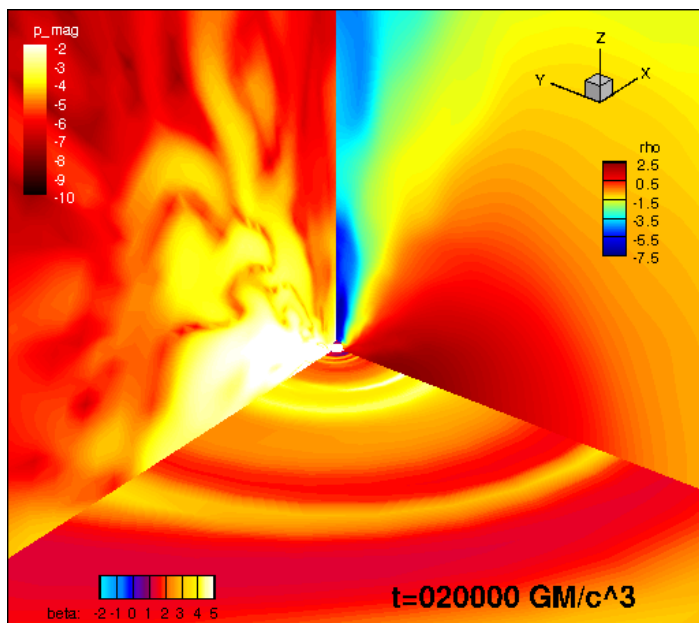
- ブラックホール近傍では
- Plasma beta 最小で ~ 1
(時間変動 ~ 10)
 - 非軸対象モード
- 外側では
- 磁場の強弱が層状に

Magnetized jet launch



数十-数百時間単位でフレアの磁場優勢ジェットが生じる

Magnetized jet launch



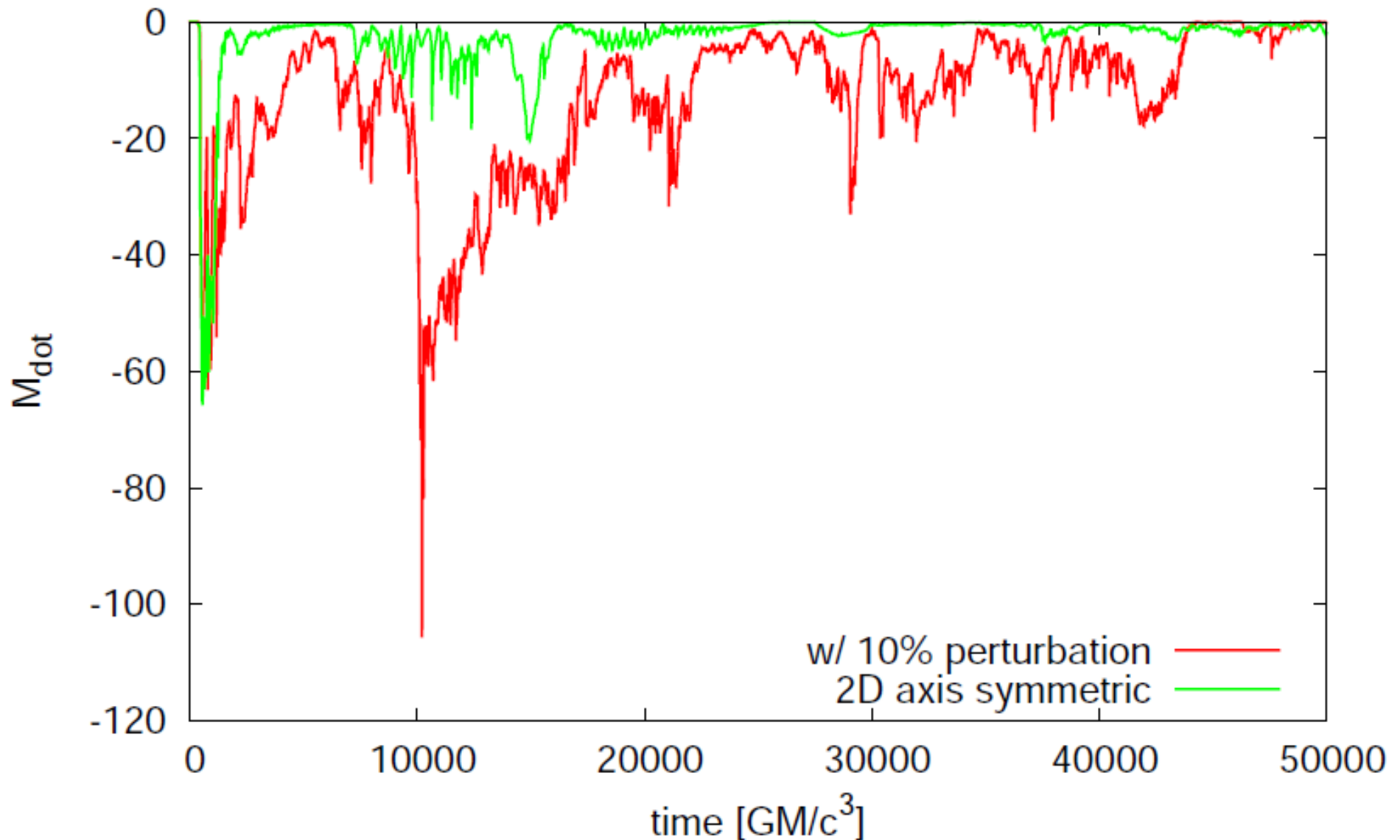
円盤

- ・磁場の強弱が層状に現れる
 - ・縁に沿って円盤風
- ## アウトフロー
- ・極方向に低密度領域
 - ・間欠的
 - ・

History of accretion rate (1) $r=1.4R_g$

$$\dot{M} = \int_{\theta=\theta_0}^{\theta=\theta^1} \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \sqrt{-g} \rho u^1 dA$$

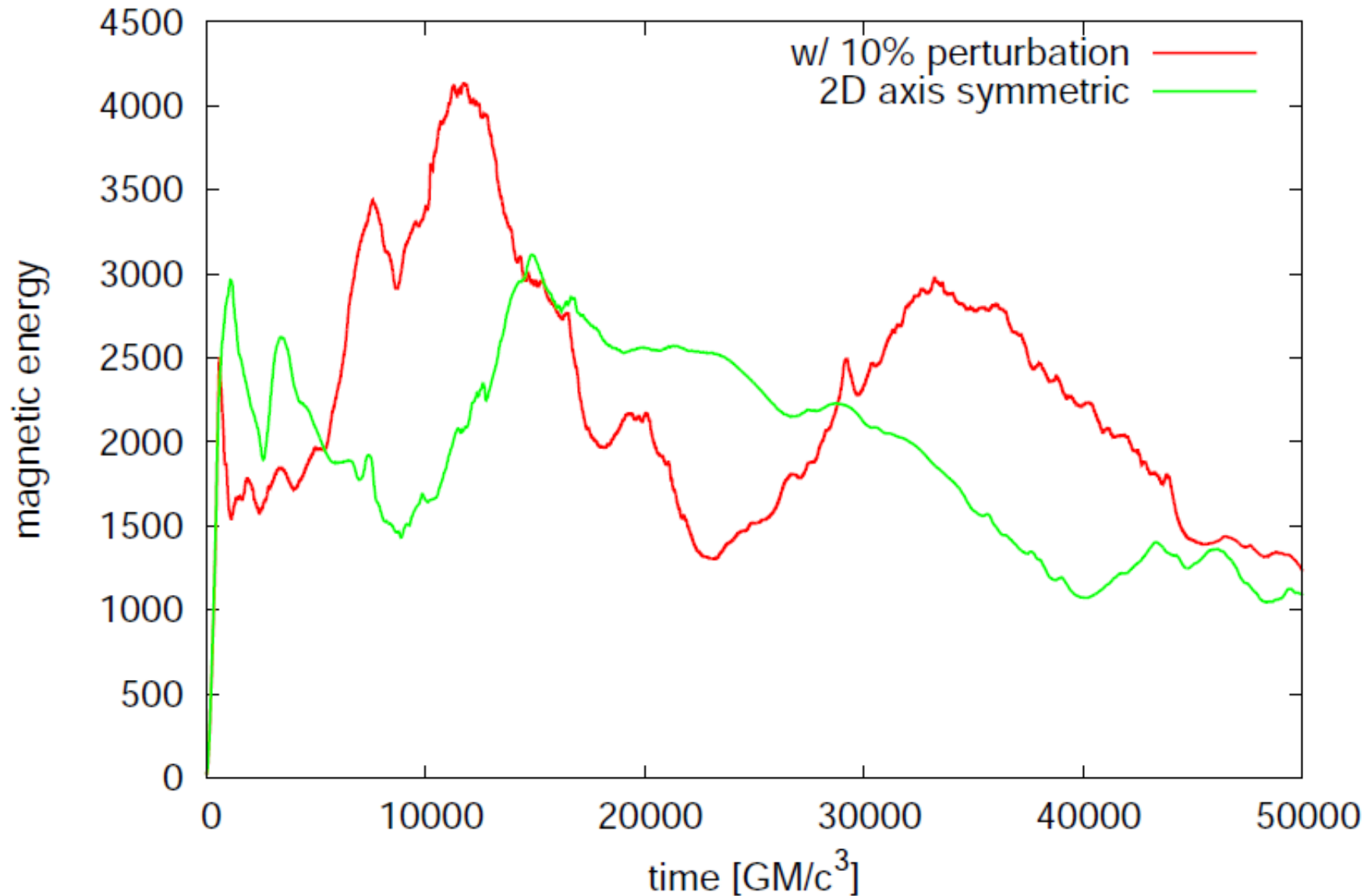
mass accretion rate $r=1.4R_g$



B-field amplification and saturation

$$\int \sqrt{-g} T_{\text{EM}}^{00} dV$$

磁場は初期に増幅され
 $t > 10000 \text{ GM}/c^3$ では準定常的になり、長い
時間スケールで振動する。

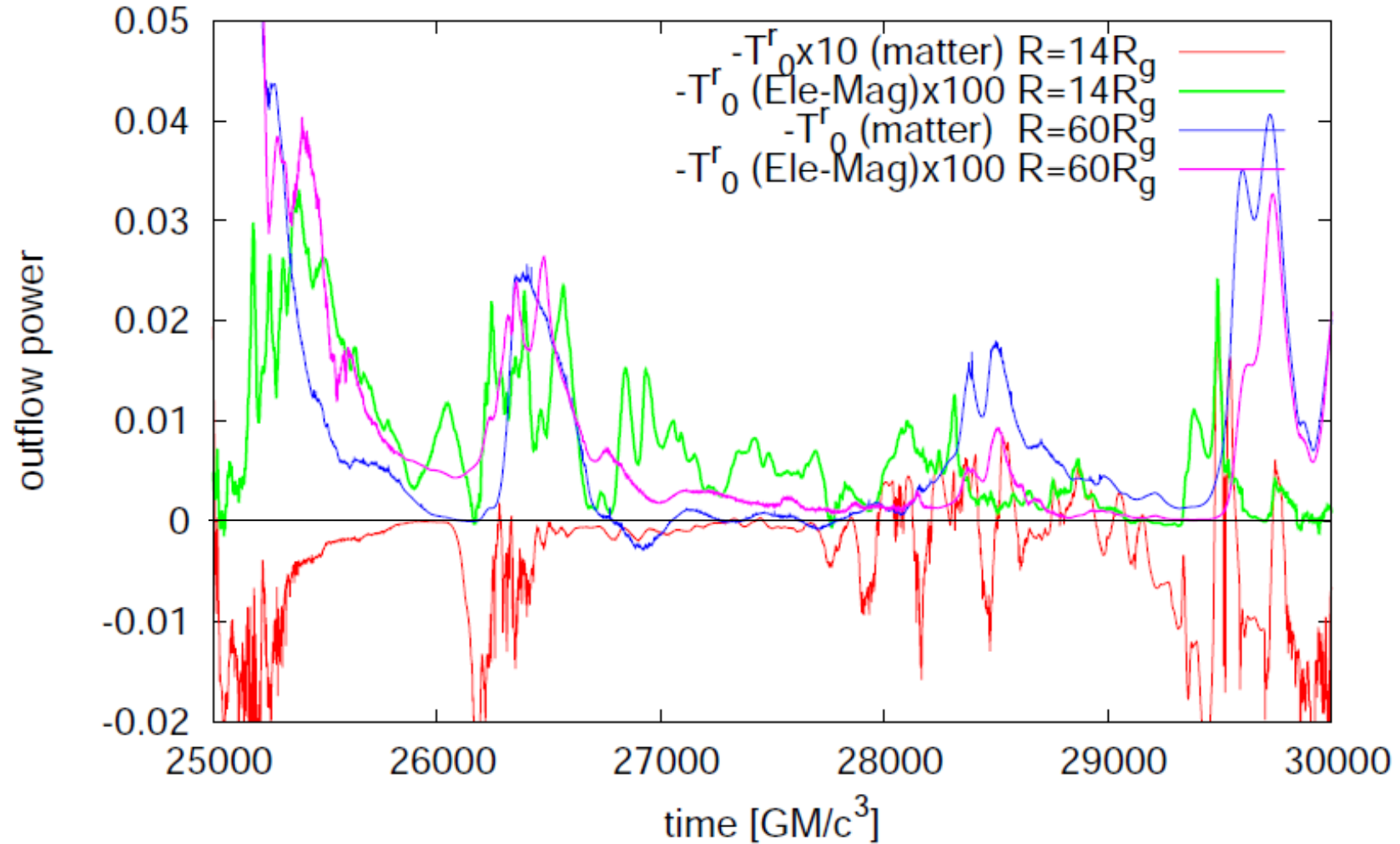


Radial Energy power (outflow $0 < \theta < 10^\circ$)

$$E_{\text{dot}} = - \int_{\theta=\theta_0}^{\theta=\theta_1} \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \sqrt{-g} T_t^r dA$$

outflow power $14R_g, 60R_g$

$\theta_0=0$
 $\theta_1=10$



物質成分と電磁気エネルギーでは異なった時間変動、電磁気成分

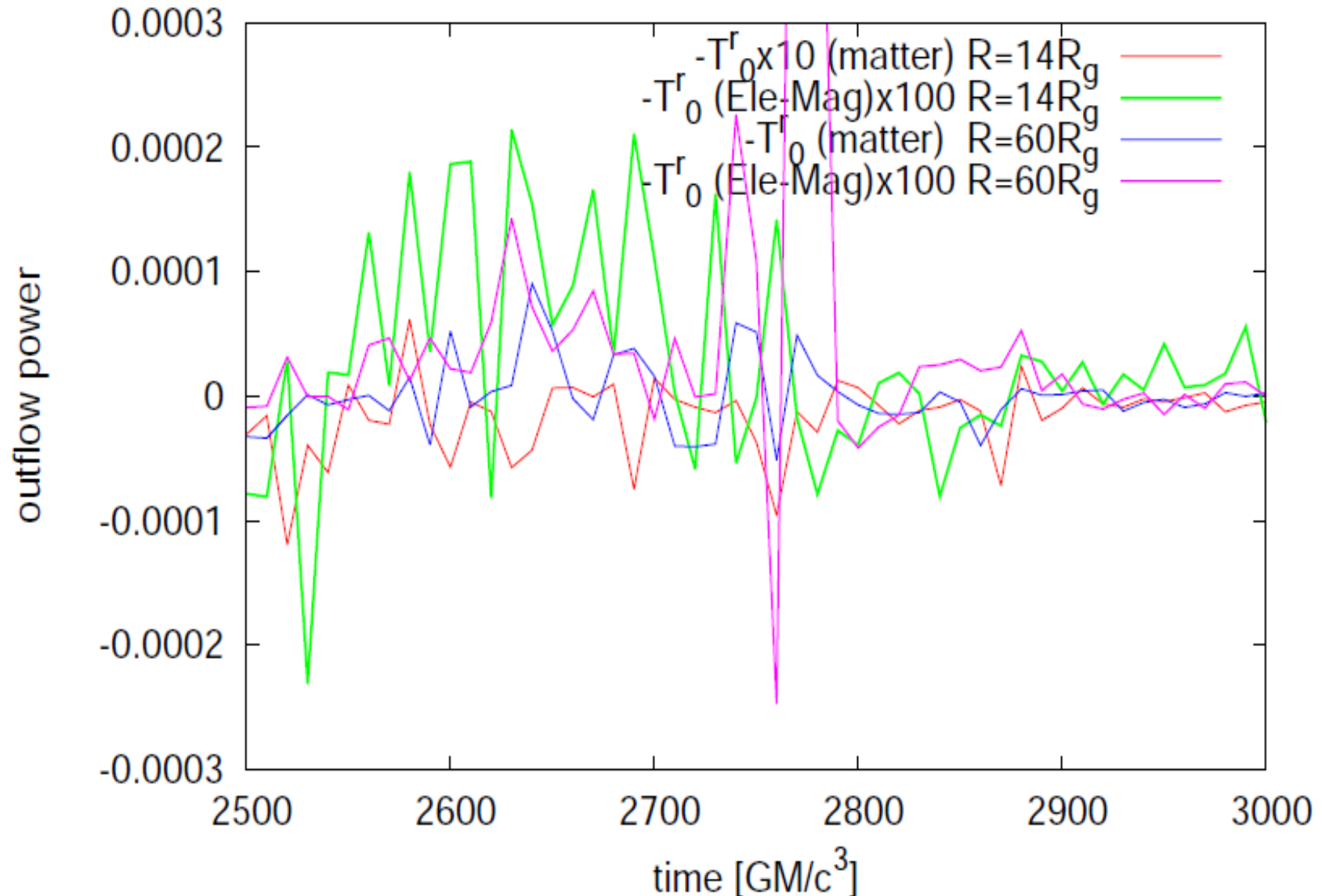
Radial energy power (outflow $0 < \theta < 10^\circ$)

$$E_{\text{dot}} = - \int_{\theta=\theta_0}^{\theta=\theta_1} \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \sqrt{-g} T_t^r dA$$

outflow power $14R_g, 60R_g$

2D 軸対称

$\theta_0=0$
 $\theta_1=10$

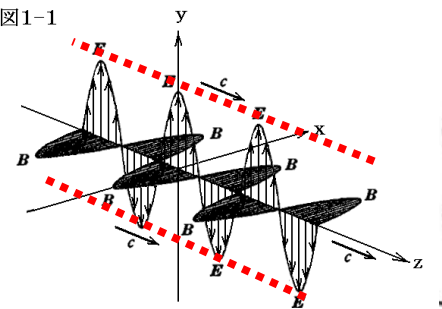


エネルギーパワーは10%擾乱を初期に与えた3D計算の~1/100

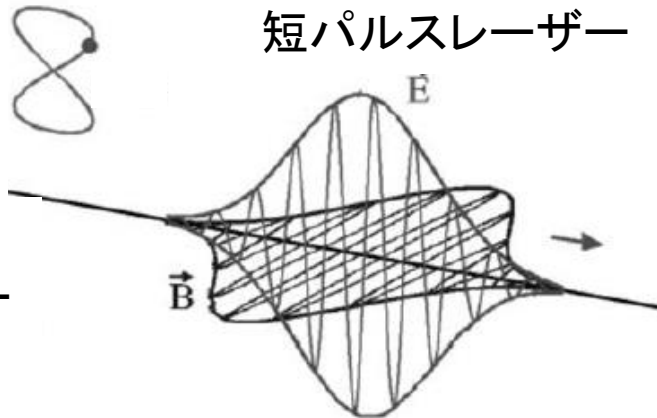
Wakefield acceleration (Tajima & Dawson PRL 1979)

図1-1

波と物質の相互作用による加速機構



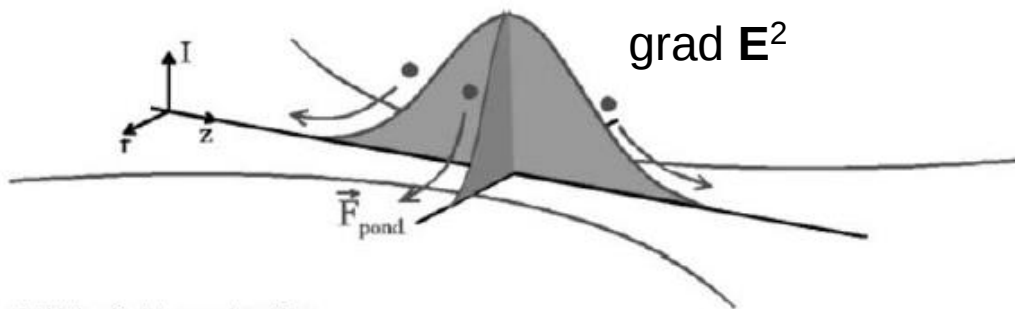
プラズマ中に
等振幅レーザー



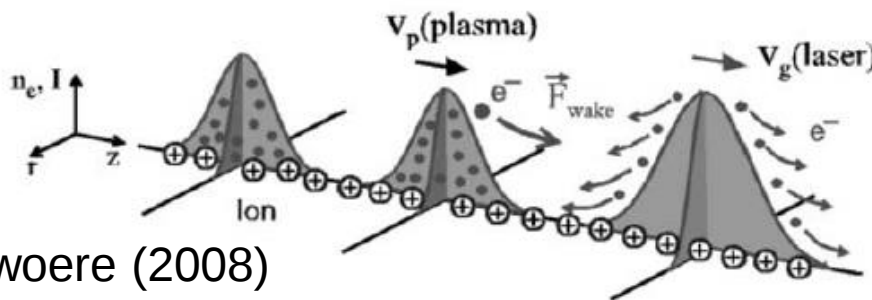
$$\mathbf{F} = q \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{B} \right)$$

電場の振動による運動で $\mathbf{v}$ が生じ、
 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ によって進行方向にも振動する
 $|\mathbf{v}| \sim c$ となると $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ による振動も大きくなる。

b) Ponderomotive force



c) Wake field acceleration



Schwoere (2008)

外場である電場(E^2)に勾配があると
電子は電場の弱い方向に集まる
(ポンデラモーティブポテンシャル)

レーザープラズマでは超高強度
($I \sim 10^{18} \text{ W/cm}^2$)で相対論的
レーザーパルスのおりに生じる航跡場
(wakefield) 中で電子が加速される
– 通常の加速器に比べ高効率 10GeV/m
(通常の加速器の100-1000倍),

Electrons: ~GeV

Ions: ~数十MeV

相対論的なAlfven wave によっても Wakefield acceleration が可能
Takahashi+2000, Chen+2002 (NS-NS merger でのSGRB に応用)
Lyubarusky 2006, Hoshino 2008 でも

AGN : UHECR accelerator ? (2)

Wakefield acceleration model (excited by Alfven wave) (Ebisuzaki & Tajima 2014)

Intense laser pulse => strong Alfven wave ($v_A \sim c$, 横波)

降着円盤内部で励起されたアルフヴェン波がアウトフロー中に伝搬

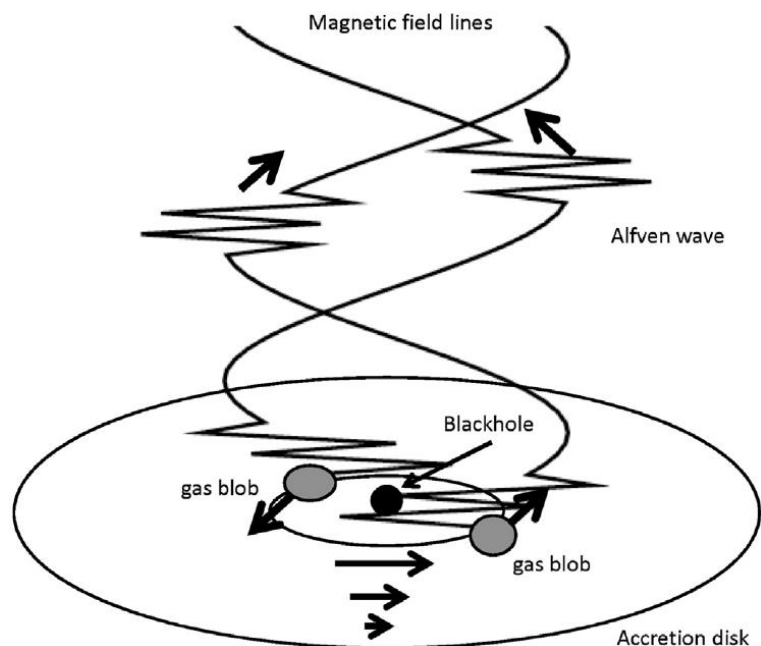
磁場が十分強ければ光速に近い位相速度となり、プラズマ中を伝搬すれば

Ponderomotive 力での

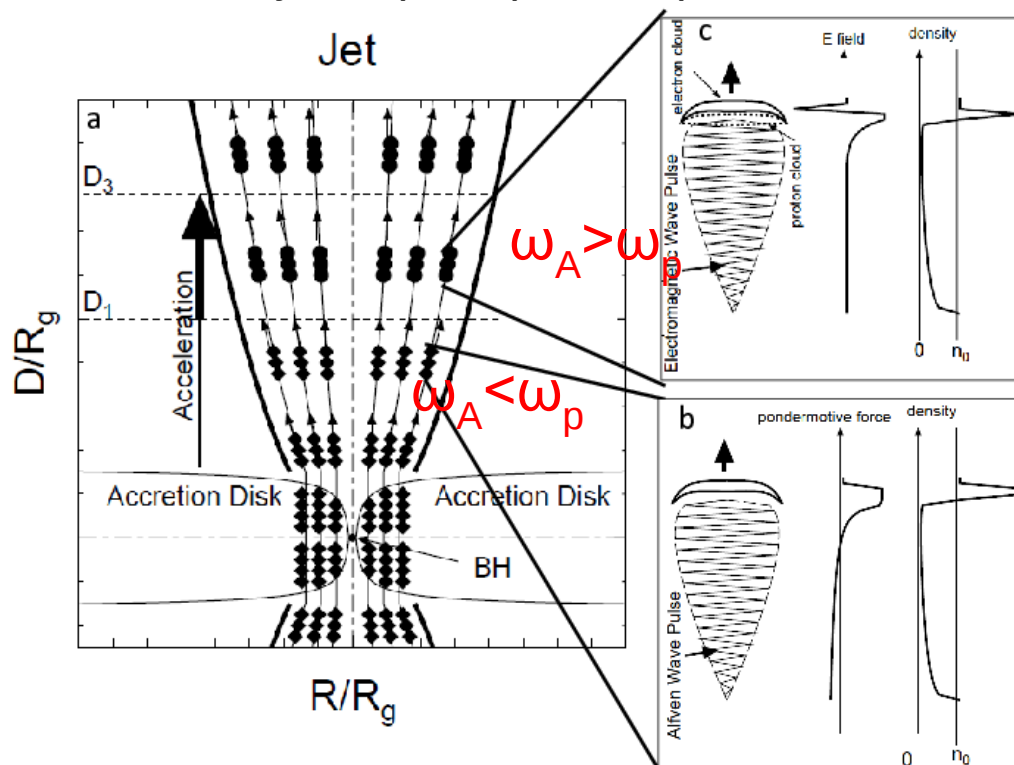
「加速」

$$a = \frac{eE}{m_e \omega_{AC}} = 2.3 \times 10^{10} \left(\frac{\dot{M}}{0.1 \dot{M}_c} \right) \left(\frac{M_{BH}}{10^8 M_\odot} \right) \gg 1$$

nonlinear & relativistic Alfven mode Standard-disk
(Shakura & Sunyaev (1973) を仮定)



Ebisuzaki & Tajima 2014



アウトフロー中の電磁場成分の時間変動はアルフヴェン波によるものか？

Summar

ブラックホール周りの降着円盤の3DGRMHD シミュレーション

- Fishbone-Moncrief 解+ Poloidal B-field
- 磁場増幅(MRI?)、飽和、磁気エネルギー解放
 $T \sim 10000 R_g / c^3$ で準平衡状態
- 極方向にアウトフロー成分(3D > 2D)
ene-mag 成分に matter 成分とは異なる時間変動
($\Delta t \sim \text{数十 } R_g / c^3$)

Future work

- 初期条件に縦磁場、アウトフロー中のアルフヴェン波
- code の改良