

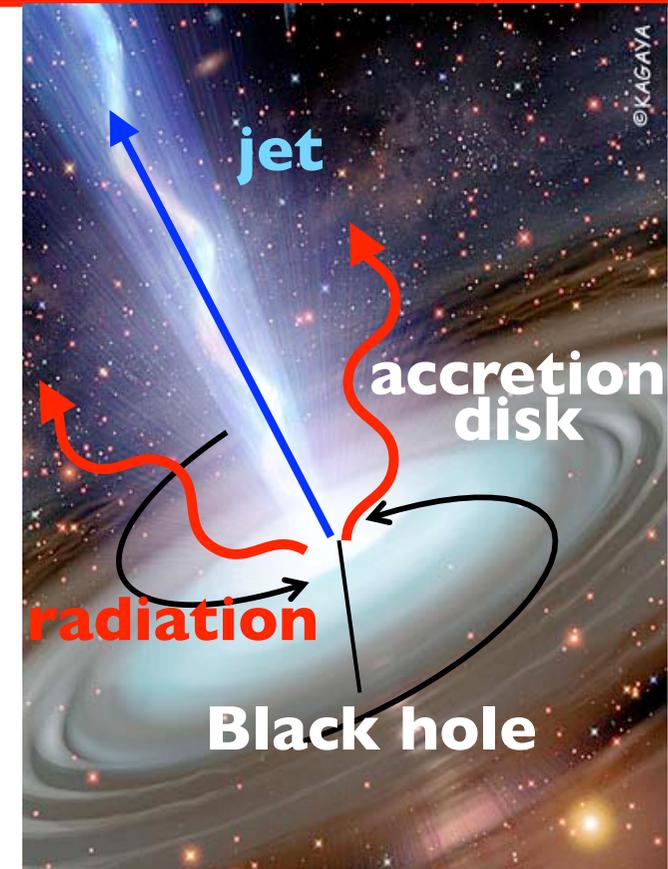
超臨界降着の一般相対論的 輻射磁気流体シミュレーション

高橋博之 (国立天文台)

大須賀健 (国立天文台) 関口雄一郎 (京都大学) 川島朋尚 (国立天文台)

Short introduction to BH accretion disks

- 伴星から供給された角運動量を持ったガスがブラックホール近傍へ
- ケプラー回転→粘性(磁場起源)によってブラックホールへと降着
- 降着によって重力エネルギーを解放
- 重力エネルギー
 - ガスの熱・運動エネルギー
 - 輻射エネルギー
 - ジェット・アウトフローのエネルギー



ブラックホールはガス降着によってエネルギーが生成される

→ブラックホールへの質量降着率が重要なパラメータ

特に降着率が臨界降着率を超える場合には

円盤密度が高いため、輻射の効果が重要になる

ブラックホール成長の謎を解くためには

相対論的輻射磁気流体が必要

臨界降着率

$$\dot{M}_c \equiv L_E/c^2 = 1.4 \times 10^{18} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10M_\odot} \right) \text{ g s}^{-1}$$

エディントン光度

$$L_E = 1.3 \times 10^{39} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10M_\odot} \right) \text{ erg s}^{-1}$$

超臨界降着円盤

臨界降着を超えている(BHが成長過程にある)天体

Ultra luminous X-ray source

SS433 (Begelman '80, Shklowvskii'81)

- bolometric luminosity $L_{bol} \sim 10^{40}$ erg/s
- kinetic luminosity $L_k \sim 10^{39}$ erg/s
- If BH is 10 solar mass, $L_{bol} \sim 100 L_E$

特徴

- 臨界光度を超える明るさ(10太陽質量で 10^{39} erg/s)
- 光速に近い速度を持つアウトフロー(0.26c for SS433)

→ 二次元特殊相対論的輻射磁気流体計算

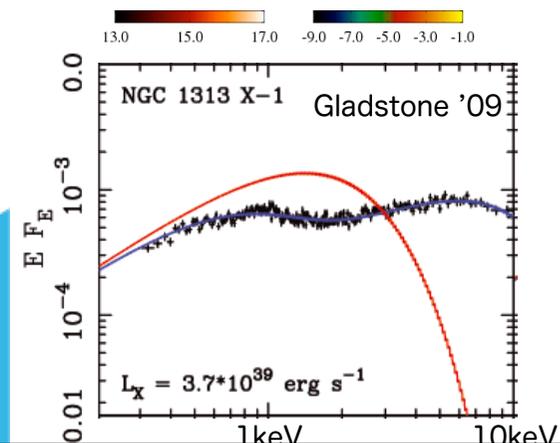
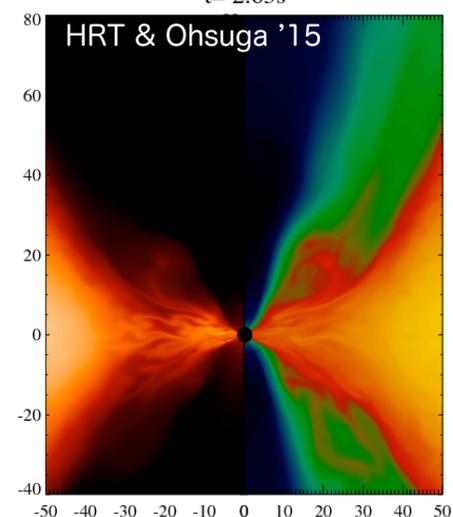
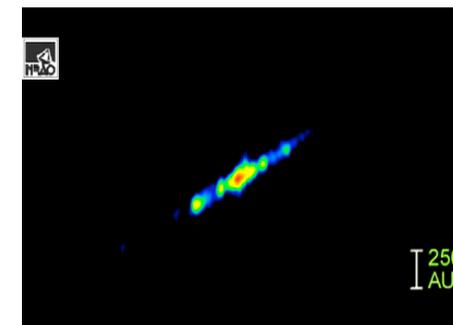
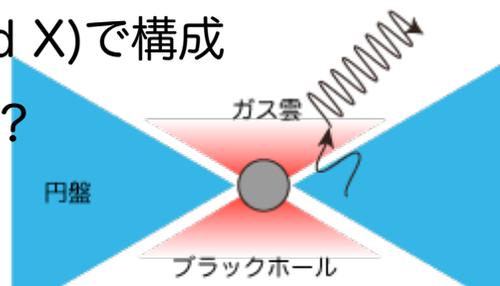
少なくとも1万倍の超臨界降着は可能

アウトフロー速度 $\sim 0.3c$

- ソフト(thermal)+ハード(~ 10 keV)のスペクトル

Thermal + Comptonized (hard X)で構成

円盤上空付近に何らかのガス雲が形成？



一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション

質量保存 $\partial_t (\sqrt{-g}\rho u^t) + \partial_i (\sqrt{-g}\rho u^i) = 0$

ガウスの法則 $\partial_i (\sqrt{-g}B^i) = 0$

誘導方程式 $\partial_t (\sqrt{-g}B^i) = -\partial_j [\sqrt{-g} (b^j u^i - b^i u^j)]$

磁気流体のエネルギー
運動量保存 $\partial_t (\sqrt{-g}T_\nu^t) + \partial_i (\sqrt{-g}T_\nu^i) = \sqrt{-g}T_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda + \sqrt{-g}G_\nu$

輻射のエネルギー
運動量保存 $\partial_t (\sqrt{-g}R_\nu^t) + \partial_i (\sqrt{-g}R_\nu^i) = \sqrt{-g}R_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda - \sqrt{-g}G_\nu$

輻射力 $G^\mu = -\rho(\kappa_a + \kappa_s)R^{\mu\nu}u_\nu - \rho(\kappa_s R^{\alpha\beta}u_\alpha u_\beta + \kappa_a 4\pi B)u^\mu$

M1クロージャー $R^{\mu\nu} = \frac{4}{3}\bar{E}_R u_R^\mu u_R^\nu + \frac{1}{3}\bar{E}_R g^{\mu\nu}$

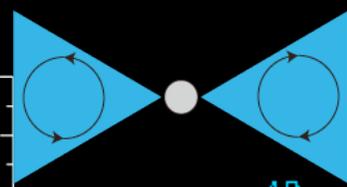
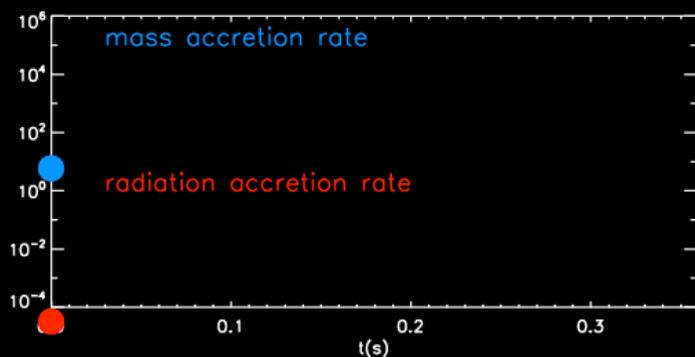
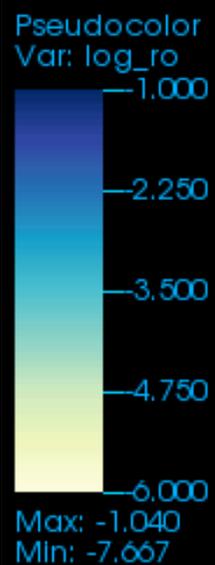
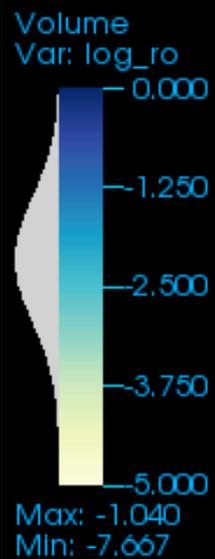
これまでの特殊相対論的輻射磁気流体コードをアップグレードして
一般相対論効果を含める

メトリックは固定メトリック(Kerr-Schild metric)

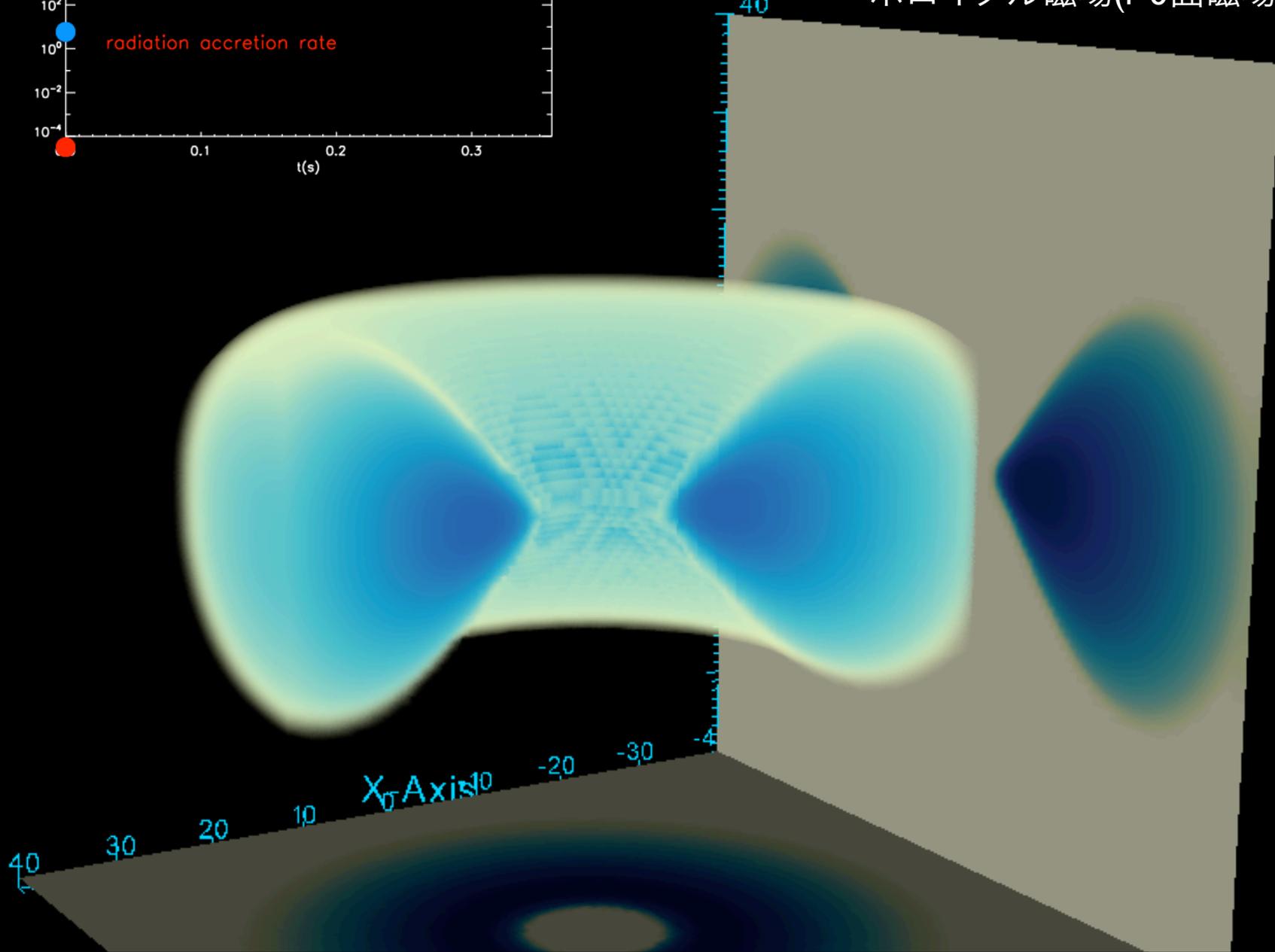
輻射の状態方程式としてM1クロージャーを用いる(変更なし)

Time:0

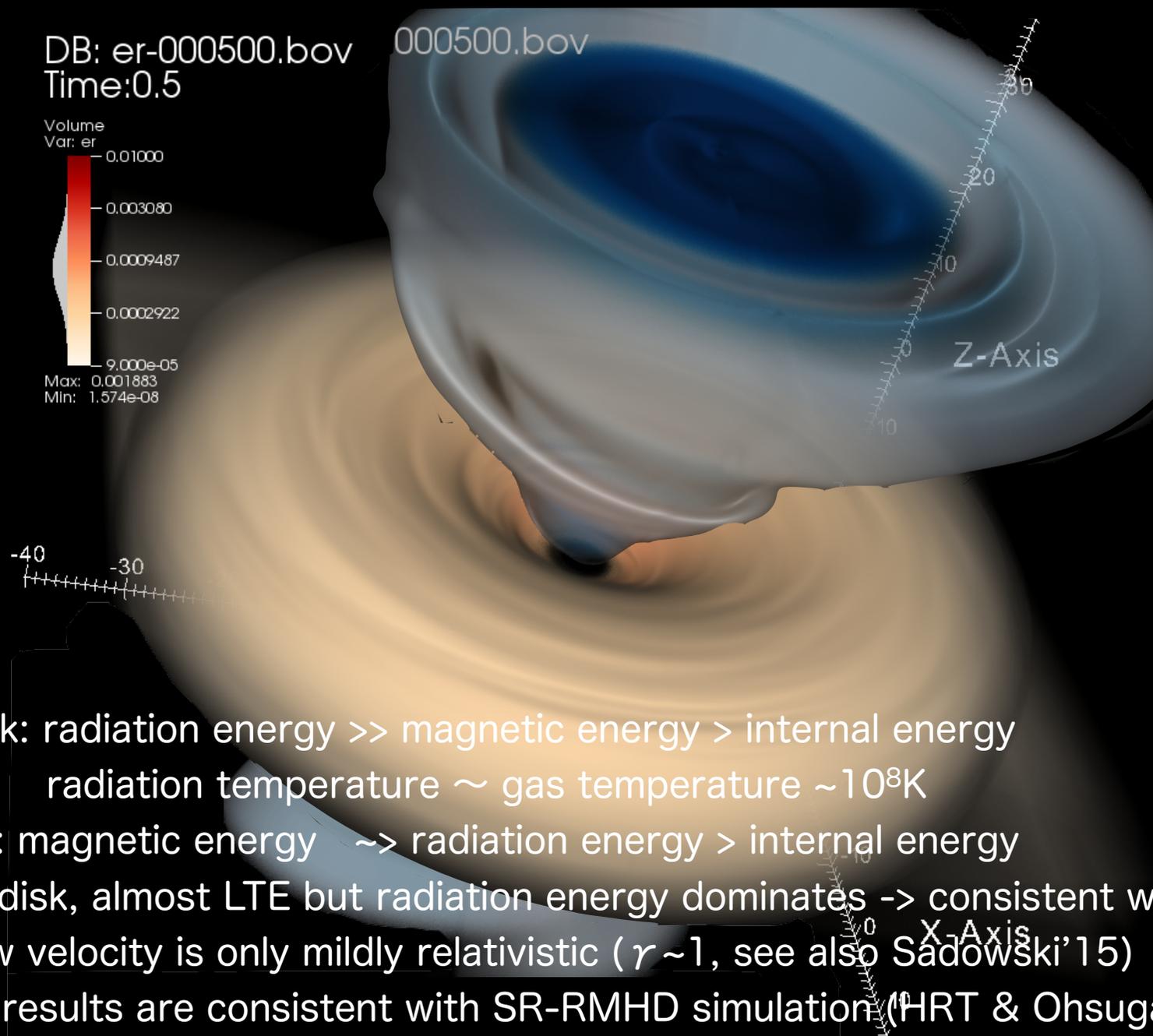
s



ブラックホール質量=10太陽質量
無回転ブラックホール
ポロイダル磁場(r- θ 面磁場)



Overview: Energetics



disk: radiation energy \gg magnetic energy $>$ internal energy

radiation temperature \sim gas temperature $\sim 10^8$ K

jet: magnetic energy \sim radiation energy $>$ internal energy

Inside disk, almost LTE but radiation energy dominates \rightarrow consistent with slim disk

outflow velocity is only mildly relativistic ($\gamma \sim 1$, see also Sądowski '15)

These results are consistent with SR-RMHD simulation (HRT & Ohsuga '15)

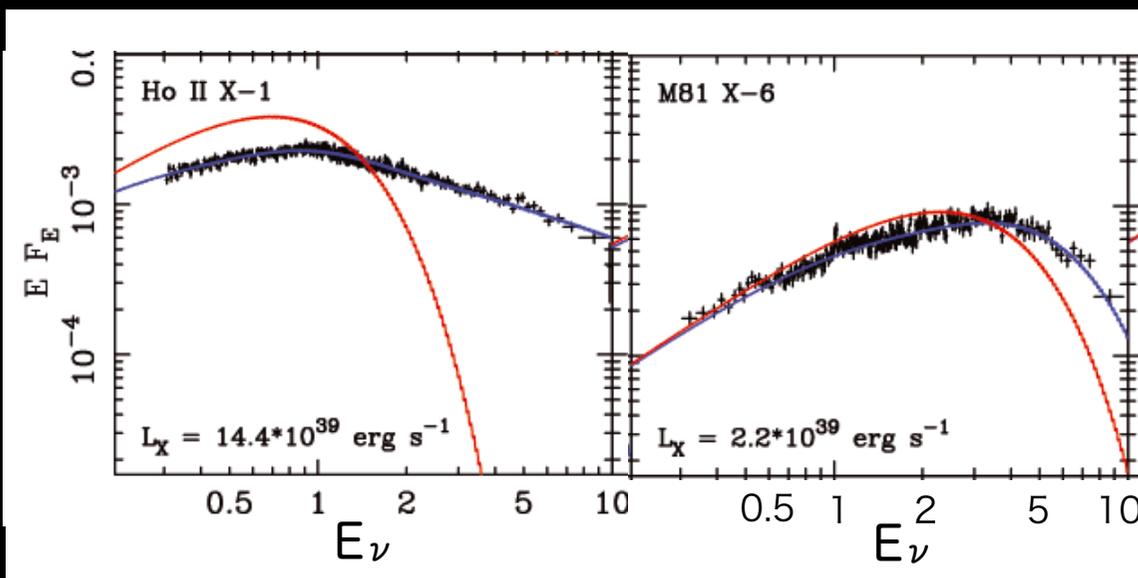
結論

3次元一般相対論的輻射磁気流体計算

- 大局的構造(光度、アウトフロー速度) は特殊相対論効果と無矛盾
- BH近傍(ポテンシャルの深い領域)に高温ガス雲が形成

円盤内縁に高温ガス雲が形成 $\sim 15\text{rg}$

→hard Xの起源となる(Beloborodov '98)



円盤内ある半径でのエネルギー収支

