

研究課題名: 銀河活動中心核トーラスの 輻射磁気流体シミュレーション

工藤祐己 (鹿児島大学)

利用カテゴリ 利用カテゴリ XC-B

pc スケールの幾何学・光学的に厚いトーラスガスは核周円盤の構成要素としてどの活動銀河中心核 (AGN) にも存在していると考えられている。この領域のガス構造を理解することは X 線放射源である 10^{-3} pc スケールの降着円盤の活動性に関係するため重要である。観測的にこれらの構造は、X 線が中心部のガスによって遮蔽されることや光度の時間変動を用いた UV/可視とダストの赤外の変化の遅延 (reverberation mapping) によって明らかにされてきた。近年では ALMA による空間分解能の向上によって pc スケールの速度構造に迫ることが可能となっている。本研究はこれらの構造をシミュレーション結果から擬似観測によって再現することを目的としたものである。物理としては降着円盤からの X 線がダストと相互作用することで生じる輻射力が重要となるため、光学的厚みからその効果を計算する Long characteristics 法モジュールを CANS+コードに実装した。我々はメッシュ法におけるこの輻射力の取り扱いについて適切に取り扱う必要があることを報告する。

一般にコンパクトな中心光源からの定常 X 線照射による輻射力は次のように与えられる (Mihalas & Mihalas 1984)。

$$\mathbf{f}_{\text{rad}} = \frac{\rho \alpha_{\text{dust}} \kappa^{\text{dust}}}{c} \mathbf{F}_{\text{rad}} \quad (1)$$

ここで κ^{dust} はダストオパシティ、 α_{dust} はダスト・ガス比、そして ρ はガス密度を表す。照射フラックスは、光源光度 L からの距離 r でする向き $\mathbf{e}_r$ について、 $\mathbf{F}_{\text{rad}} = \frac{L e^{-\tau}}{4\pi r^2} \mathbf{e}_r$ で与えられる。距離 r まで経由する間のガスによって減光されるため、これを光学的厚み $\tau = \int \rho \alpha_{\text{dust}} \kappa^{\text{dust}} dl$ によって評価する。

メッシュ法において、セル中心で輻射力を評価する場合とセル表面で照射フラックスの流入出から評価する場合で結果が変わることがわかった。輻射力は以下のように書き換えられる。

$$\mathbf{f}_{\text{rad}} = \frac{\rho \alpha_{\text{dust}} \kappa^{\text{dust}}}{c} \mathbf{F}_{\text{rad}} = -\frac{\mathbf{e}_r}{c} \nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{rad}} \quad (2)$$

我々は赤で書かれた式をセル表面の照射フラックスの差分として評価した (e.g., Klassen et al. 2014; Namekata et al. 2014; Chen & Krolik 2017)。

$$\nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{rad}} \sim -\frac{F_{\text{in}} - F_{\text{out}}}{\Delta r} = -\frac{(1 - e^{-\Delta \tau})}{\Delta r} |\mathbf{F}_{\text{rad}}| \quad (3)$$

ここで Δr はセルを通過したときの光学的厚みである。一方で、青はセル中心で定義されている物理量を用いて評価した。

図 1 に輻射力の評価方法を変えた場合の計算結果を示す。初期に $|z| < 0.1$ pc の領域に高密度ガス ($\sim 10^4 \text{M}_{\odot} \text{pc}^{-1}$) とその周りに低密度ガス ($\sim 10^{-6} \text{M}_{\odot} \text{pc}^{-1}$) を置き、輻射力

を考慮した円筒座標 2 次元流体計算を行った。解像度は $\Delta R = \Delta z = 0.05$ pc の一様メッシュ、計算領域は $R < 16$ pc, $|z| < 16$ pc を設定した。赤 (左図; セル表面) では密度分布 (右半分) をみると中心領域でほぼガスの存在しない空洞が生じており、中心からの輻射力としてガスが吹き上げられていることがわかる。一方で、青 (右図; セル中心) はガスが中心領域に留まり、輻射力が強くないため低密度ガス ($\sim 10^{-2} \text{M}_{\odot} \text{pc}^{-3}$) が広がっている。この違いは有限のセル内部の光学的厚み $\Delta\tau$ が解像度に依存するためである。実際、(2) 式は $\Delta\tau \ll 1$ のテイラー展開によって近似的に等しくなることがわかる。青のセル中心で評価するためには、セル内部の光学的厚みが薄くなるような解像度を選ぶ必要がある。

$$f_{\text{rad}} = \frac{e_r (1 - e^{-\Delta\tau})}{c \Delta r} |F_{\text{rad}}| = \frac{\rho \alpha_{\text{dust}} \kappa_{\text{dust}}}{c} F_{\text{rad}}$$

$$\text{円盤面では... } \Delta\tau \sim 5 \left(\frac{\kappa_{\text{dust}} \alpha_{\text{dust}}}{1800 \text{cm}^2 \text{g}^{-1}} \right) \left(\frac{\rho}{10^{-19} \text{gcm}^{-3}} \right) \left(\frac{\Delta r}{0.01 \text{pc}} \right) > 1 \quad F_{\text{rad}} = \frac{L_{\star} e^{-\tau}}{4\pi r^2} e_r$$

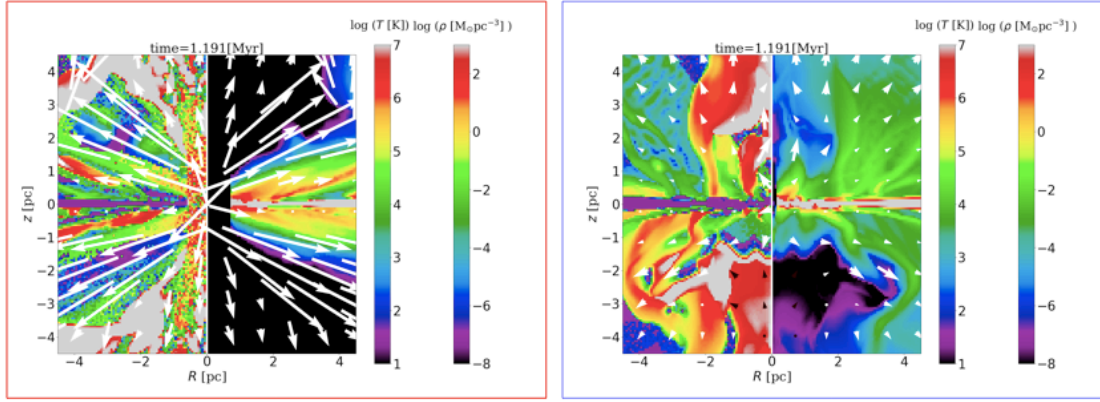


図 1: 輻射力をセル表面 (赤) とセル中心 (青) によって評価した結果の違い。各図の左に温度、右に密度分布を示す。矢印は速度ベクトルを表す。