

AGN トーラスの3次元シミュレーション

斎藤貴之 (東京工業大学理学流動研究機構)

利用カテゴリ XT4A

現在、ほぼすべての銀河の中心には超巨大ブラックホール (SMBH) が存在すると考えられている。SMBH の活動性は銀河進化に大きな影響を与えていると考えられているため、その活動性は銀河形成の文脈で活発に研究がされている。たとえば、暗黒物質の質量分布関数と銀河の光度関数の間には、高光度側低光度側それぞれにずれがあり、特に高光度側のずれの起源は SMBH の活動性だと考えられている。準解析的手法による研究から、活動期間が光度関数の形状に大きなインパクトを与える可能性が示唆されており、SMBH とその周辺の構造を分解し、活動性がどのように誘発されどの程度の期間維持されるかを数値シミュレーションで明らかにすることは重要である。

SMBH はその周辺 (~ 100 pc) に厚いガストーラスを持つと思われており、それが I/II 型の起源だと思われている。このトーラスは、活動性のトリガーと関係していると目されている。トーラス構造についての数値シミュレーション的研究として主なものは、次の2つがあげられる：(1)Wada & Norman ApJ 566, L21 (2002), Wada *et. al.* ApJ 702, 63 (2009): 32 $\sim$ 64 pc スケールのトーラスの構造の高分解能シミュレーション。円盤中に埋め込まれた超新星爆発源によりトーラス構造を維持。トーラスを形成するガスの構造が極めて非一様であることを示した。積分時間は $\sim$ Myr 程度。オイラー法を使っている。(2)Hopkins *et. al.* MNRAS 407, 1529 (2009) など: 銀河円盤からトーラス構造までのシミュレーション。星間ガスの構造に Springel & Hernquist (2003) の “multiphase ISM model” を使っている。ガスの構造はかなりスムーズ。ラグランジュ法を使っている。我々は今、トーラスの微細構造と銀河とを同時に考えつつ、高精度で長時間トーラス構造の形成、維持、破壊過程を調べたい。そこで、我々が開発した N 体/SPH コード ASURA を、トーラスシミュレーションに適用した。

トーラスの3次元シミュレーションを行う。SMBH は Sink 粒子として表し座標に固定しない。質量は $1.3 \times 10^7 M_{\odot}$ で、吸込み半径は 0.1 pc。バルジは固定ポテンシャルで表し、回転速度の平坦になるところでの速度はおよそ 100 km s^{-1} である。先の SMBH 粒子はバルジポテンシャルの中心に置く。今回の設定では ~ 10 pc より内側では SMBH の重力が勝つ。ガスは、半径 160 pc に一様に配置する。ガスの初期回転速度は、初期位置でポテンシャルと釣り合う値の $1/5$ にして、時間と共に縮まって密度が上がるように設定した。初期の厚さ方向の分布は中心からの距離によらず ~ 5 pc である。このガス円盤を SPH 粒子で表した。粒子数は 100 万で、重力ソフトニングは 0.1 pc である。円盤の質量として次の2つの場合を試した: (1) $6 \times 10^6 M_{\odot}$ 、(2) $3 \times 10^7 M_{\odot}$ 。

ガスの自己重力、流体相互作用、放射冷却、星形成、II 型超新星爆発を考慮した。星形成の条件は、次の三つである: (1) $n_{\text{H}} > 10^5 \text{ cm}^{-3}$ (2) $T < 100 \text{ K}$ 、(3) $\nabla \cdot \mathbf{v} < 0$ 。これらを満たしたガス粒子は、星形成効率 $C_* = 0.033$ で星粒子を作る。こうして生まれた星粒子は典型的に生まれてから 1000 万年経つと II 型超新星爆発を起こし周りの星間ガスを加熱する。この他に、若い大質量星からのフィードバックをモデル化して導入している。今回のように力学的時間が非常に短い系 ($< \text{Myr}$) では、超新星爆発よりも速いフィードバックが重要になる。

図 1 は、ガス質量として $6 \times 10^6 M_\odot$ とした場合の時刻 $t = 6 \text{ Myr}$ におけるスナップショットである。フィードバックの効果により非一様構造の発達したトーラスが見える。横から見ると、トーラスは基本的にかなり薄く、しかしフレアによって巻き上げられてできるフィラメント状の構造が見て取れる。このように非一様性がより強く発達しているように見えるのは、星形成の結果として得られる超新星爆発が局在しているからと考えられる。温度の図からは、トーラス自体は冷たいガスによって構築されていることと、その周り、特に鉛直方向に超新星爆発によって加熱された非常に高温のガスが存在することがわかる。ガスから生まれた恒星の分布は、非常に薄くなっているが、これは低温高密度ガスの分布を直接的に反映している。

ガスの密度分布のクローズアップから、円盤の中心近くでも密度分布が不均一であることがわかる。間欠的に物質が落下して中心に供給される。

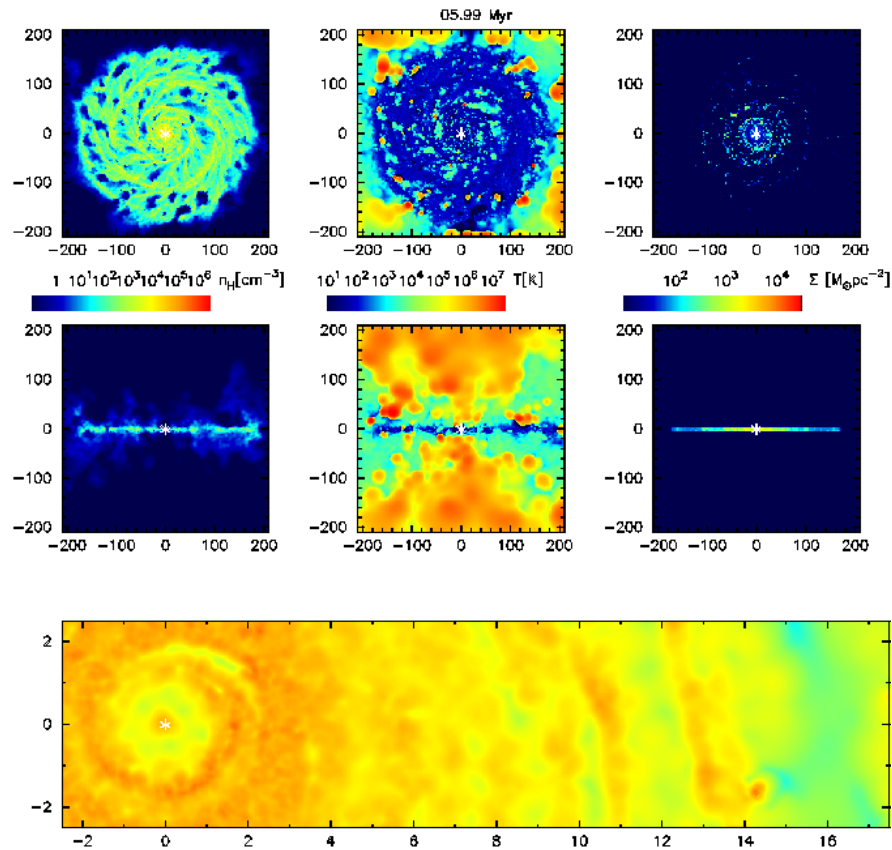


図 1: トーラスの全景。上の 3 つのパネルは、左から順にガス密度、ガス温度、星の面密度の face-on からみた分布。真ん中の 3 つのパネルは、それぞれの edge-on から見た分布。下の長方形のパネルは、SMBH のごく周辺のガス密度。すべてスケールは pc。

質量が重いガス円盤の進化はより劇的である。1 桁程度高い星形成率で進化が進むため、最初の数 Myr を経た後、急激にフィードバックが働いてトーラスが破壊される。

図 2 は、2 つのモデルの SMBH への降着率の時間進化。降着の担い手は今回の計算の

範囲ではガスが主体的になっている。また、進化の後半、特にガス質量が大きいモデルでは、トーラスが吹き飛ぶにも関わらず、SMBH 周辺では強い重力によって小さな円盤を維持することができ、それにより長く降着率が高い状態を維持することができることがわかった。これは SMBH の活動期間がかなり複雑な制御をされている可能性を示唆する。

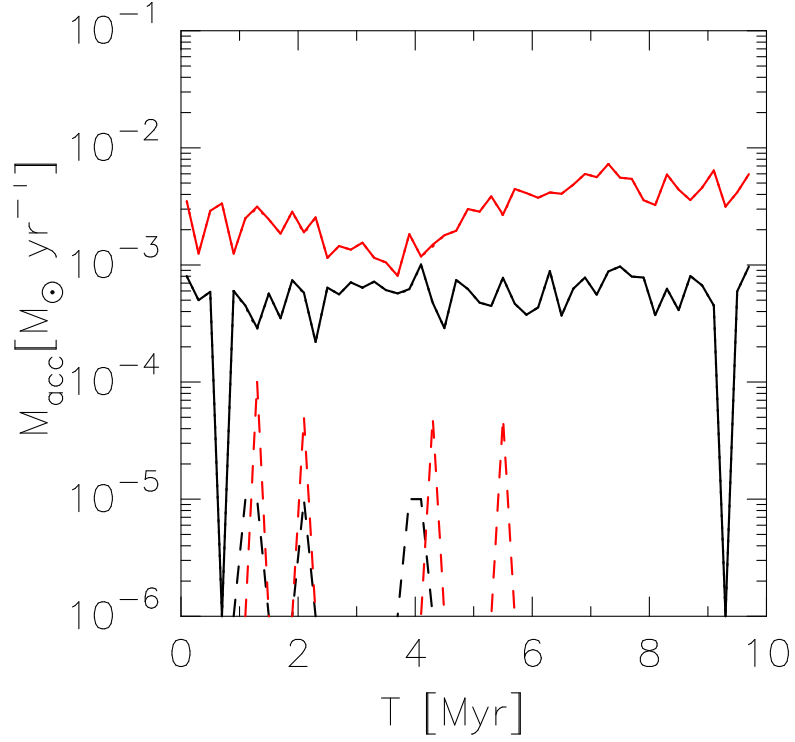


図 2: SMBH への質量降着率の時間進化。実線がガスとして吸い込まれた質量を表し、破線が星として吸い込まれ質量を表す。黒い線がガスの総質量 $6 \times 10^6 M_{\odot}$ の場合であり、赤い線が $3 \times 10^7 M_{\odot}$ の場合の線。

モデル化などは無事成功したので、今後はより高分解能のシミュレーションを、パラメータを系統的に振って調べて、SMBH による活動性についてまとめていきたい。