

学 位 論 文 題 名

# The Role of a Central Supermassive Black Hole in Gas Fueling

(ガス供給機構における銀河中心の巨大ブラックホールの役割)

## 学位論文内容の要旨

活動的銀河核や銀河中心領域での爆発的星形成など、系外銀河の銀河中心領域では活発な活動が多く観測されている。活動的銀河核はその大きな光度と光っている領域の狭さから、恒星の集団では説明がつかず、銀河中心にある巨大ブラックホールに流入するガスが重力エネルギーを解放して光っているというモデルが提案されている。この流入するガスは銀河スケールに分布していたものが銀河中心へ供給されたと考えられている。また、銀河中心領域での爆発的星形成の場合にも星の材料となるガスの供給源として銀河スケールに分布しているガスが考えられている。このように、銀河スケールから銀河中心部へのガス供給は銀河中心での活発な活動の説明のために必要と考えられている。しかし、この銀河中心へのガス供給のためにはガスのもつ角運動量を大幅に失わせる必要があり、その機構はまだ明らかにされていない。このガス供給機構の解明は現在の宇宙物理学の重要な課題のひとつとなっている。

これまでの研究から、円盤銀河の約半数に存在している銀河の円盤中の棒状の構造と関係したガス供給機構が明らかにされている。これは、この棒状構造による非軸対称な重力ポテンシャルと円盤銀河内の星間ガスの回転運動の間の共鳴（リンドブラッド共鳴）によって、ガスを集めることができるというものである。この機構によって、爆発的星形成の中でも比較的大きな領域で起きているものは説明が可能となった。しかし、この機構ではリンドブラッド共鳴点の位置より内側にガスを供給するはできないため、活動的銀河核やより中心付近の領域での爆発的星形成には不十分であった。

そこで我々は、銀河中心に巨大ブラックホールが存在する場合に通常のリンドブラッド共鳴より内側にもう一つリンドブラッド共鳴があらわれることに注目し、これが従来のリンドブラッド共鳴の半径よりも内側にガスを供給する機構となりうるかを数値計算を用いて調べた。我々が用いた数値計算法は、SPH法と呼ばれるもので、大きさをもった仮想的な粒子の集団で流体を記述する数値計算法である。この方法は今回のようなダイナ

ミックレンジの大きな流体の運動を計算するのに適している。我々の計算では、星間ガスの自己重力は銀河中の星々のそれにくらべ十分弱いため、ガスの運動のみを計算して、銀河の星の分布は固定してその重力ポテンシャルを外場として扱った。

我々の数値計算の結果、巨大ブラックホールによるリンドブラッド共鳴が存在する場合には、この共鳴点付近にスパイラル状衝撃波が形成され、この衝撃波によってガスが集められてガスリングが形成されることが分かった。このガスリングの半径はこの共鳴点の銀河中心からの距離の約五分の一となった。また、集められたガスの範囲はリンドブラッド共鳴点の距離の数倍の半径であることも分かった。得られたガスリングは銀河中心でのリング状の爆発的星形成領域に対応する空間的大きさをもつ。

次に、このガスリングの自己重力の強さを見積もったところ、通常の銀河に存在するガスの質量程度でリングが自己重力不安定になることが期待されることがわかった。そこで、我々はガスの自己重力も考慮した数値計算を行い、ガスリングの自己重力の効果を調べた。

その結果、このガスリングが実際に自己重力不安定になる条件は、自己重力を考慮していない場合の計算の結果からの推定とほぼ一致することが分かった。自己重力不安定になった場合のガスリングはいくつかの塊に分裂し、その塊同士が衝突することにより巨大なガス塊が形成された。この巨大なガス塊の重力によるトルクにより、ガスリングの一部は角運動量を失い、ガスリングの内側にガスディスクが形成されることが分かった。この巨大なガス塊は、周囲の星との相互作用により角運動量を失って中心へ落ちて行き、さらなるガス供給を引き起こすことが期待される。また、この巨大なガス塊は、銀河中心領域で見つかっている巨大な分子雲や巨大な星団をの成因となる可能性がある。

以上のように、活動的銀河核のモデルに必要なガス供給が、銀河中心に巨大ブラックホールによって引き起こされる過程を明らかにした。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	藤本	正行
副査	教授	石川	健三
副査	教授	和田	宏
副査	助教授	兼古	昇
副査	助教授	羽部	朝男

学位論文題名

## The Role of a Central Supermassive Black Hole in Gas Fueling

(ガス供給機構における銀河中心の巨大ブラックホールの役割)

系外銀河系では、活動的な銀河核 (AGN) と呼ばれる活発な活動が多く観測されている。これは、中心の非常に小さな領域 ( $\sim 10^{-4}$  pc) から、銀河全体に匹敵する膨大なエネルギーを放出している現象である。AGN のエネルギー発生機構としては、銀河中心に巨大なブラックホール (質量  $10^6 \sim 10^9 M_{\odot}$ ) を仮定し、そこにガスが流入することによって重力エネルギーを開放するというモデルが有力と考えられている。非常に大きな高度を保つためには、ほぼ銀河全体に存在するガスを必要とするため、このモデルには、銀河円盤 (半径  $\sim 10$  kpc) から、AGN のエネルギー発生領域までどのようにしてガスを供給するのかという問題が存在している。銀河中心部へのガス供給のためには、銀河円盤のガスのもつ角運動量を失わせる必要があるが、本研究はその機構の解明を目指したものである。

このガスの角運動量の輸送機構としては、これまで、円盤銀河の約半数に存在している bar 構造によるガス供給機構が提案されてきた。これは bar のつくる非軸対称な重力ポテンシャルと円盤銀河内の星間ガス雲の回転運動からの摂動の共鳴 (ILR; Inner Lindblad Resonance) によってガスを中心部に集めるというものであるが、これによって、銀河スケールから ILR 共鳴点の半径の半分程度 ( $\sim 1$  kpc) まで集めることが可能であることが示された。また、巨大ブラックホールから数 10 pc 葉にでは、降着円盤内での乱流粘性によるガスの角運動量輸送が効いてくると考えられている。したがって、AGN の活動を説明するためには、この間をつなぐ、ガスの角運動量の輸送機構が必要である。

本研究では、銀河中心に巨大ブラックホールが存在する場合に、上記の ILR の内側にもうひとつの ILR (以下では、NLR と呼んで区別する) が現れることに着目し、それがガス供給に及ぼす効果を研究している。この問題は、散逸を伴う非線型の

流体力学系の時間発展を調べることになり、数値的な手法によってのみ扱うことが可能である。著者は、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を応用して、数値シミュレーションのコードを開発し、この問題を解いた。その計算結果に基づいて、巨大ブラックホールが存在する場合には、NLR の半径付近に渦状の衝撃波が発生し、この衝撃波によって、ガスリングが、NLR の半径の約  $1/5$  すなわち、 $150\text{pc}$  の付近に形成されることを示した。巨大ブラックホールによる NLR の効果によって、ガスを、bar の ILR のみの場合より、さらに約一桁小さな領域に集められることになる。このため、ガスリングの密度が大きくなり、自己重力で不安定になることが期待されることを見出した。

著者は、ついで、ガスの自己重力も考慮した、時間発展の数値計算を実行し、実際、ガスリングが自己重力不安定を起し、分裂に至ることを示した。分裂したガスの塊は、互いに衝突・合体を繰り返すことによって、巨大なガス塊 (質量  $10^7 M_{\odot}$ ) に成長、このガス塊との重力相互作用によって、ガスリングのガスは、角運動量を失い、さらに、 $\sim 1/3$  ほど、ブラックホールに落下し、その周りにガス円盤を形成することがわかった。数値計算の精度の限界のため、これ以後の時間発展で追うことはできない。しかし、この構造と連星系での降着円盤と類似にから、巨大ガス塊のトルクによって、ガス円盤に渦状衝撃波が発生し、それによる、角運動量の輸送の結果、ガスはさらに中心に落ち、乱流粘性の効く領域まで、もたらされると類推されると論じている。

以上のように、非軸対称な bar 構造と巨大ブラックホールの存在という枠組みの中で、ガスの角運動量輸送、銀河円盤から銀河中心へのガスの集積過程を研究し、AGN のモデルに必要なガス供給の具体的な機構を明らかにした。これは、円盤銀河内のガスの運動、活動的な中心核の構造と進化について、理解をすすめる、これらの天体現象の解明に重要な寄与をしたもの評価できる。よって、著者は、北海道大学博士 (理学) を授与される資格があるものと認める。