

学位論文題名

Study on Evolution of a Circumnuclear Gas Disk and Gas Supply to the Galactic Center

(核周ガス円盤の進化と銀河系中心へのガス供給過程に関する研究)

学位論文内容の要旨

1. 背景

銀河中心へのガス供給過程は、銀河中心の巨大ブラックホールの成長や活動性にとって非常に重要であるが、十分解明されていない。巨大ブラックホールに降着するガスが解放する重力エネルギーは、非常に強力な輻射や宇宙ジェットによって、周囲の星間ガスとともに、母銀河や近傍の銀河にも大きな影響を与えることが観測的および理論的研究によって示唆されている。このため、銀河中心へのガス供給過程の研究は銀河の進化と密接に関わっており重要である。

巨大ブラックホールへ降着するガスの起源は、銀河の広い範囲に豊富に存在するガスである。これが何らかのメカニズムによって、銀河中心領域に集められたと考えられる。このガスは角運動量を持つために、銀河中心付近にガス円盤(核周ガス円盤)を形成する。このような核周ガス円盤は、これまで多く観測されており、巨大ブラックホールへのガス降着と核周ガス円盤の関係に興味が持たれている。

我々は、これまでの研究において、我々の銀河(銀河系)を研究対象とし、銀河中心へのガス供給過程の研究を行ってきた。この研究で、多重棒構造によって、銀河系中心領域に大質量の核周ガス円盤が形成される場合を示した。この核周ガス円盤のサイズは、銀河系中心部で観測されている巨大分子ガスリングや大質量星団の位置と一致している。銀河中心領域へのガス供給とこれらの関係や核周ガス円盤から銀河中心へのさらなるガス供給過程を明らかにすることが必要である。

そこで、本研究では、星形成を考慮して、核周ガス円盤の形成と進化の数値シミュレーションを行い、核周ガス円盤の進化と銀河中心へのガス供給について調べた。この結果に基づいて、銀河系中心の観測的特徴と計算結果の比較を行い、銀河系中心での星形成とガス供給について議論した。

2. モデルと手法

この研究では、母銀河からのガス供給を受けて核周ガス円盤が成長すると仮定する。核周ガス円盤の質量が増加し、輻射によるガスの冷却が効果的になると、自己重力不安定が起こると期待される。この自己重力不安定によって、高密度のガスの塊(ガスクランプ)が形成され、そこで星が形成される。我々は、この過程を計算するため、ガスの自己重力と輻射冷却、星形成を考慮した数値シミュレーションを行った。

星形成は、次のようにモデル化する。星は低温・高密度ガスから形成される。我々は、ガスの表面密度と温度が星形成条件($\Sigma_{\text{gas}} > \Sigma_{\text{th}}$, $T_{\text{gas}} < T_{\text{th}}$)を満たした領域で星が形成されると仮定する。このときの星形成率は、その領域の表面密度に依存すると考えられる。我々は、これを、近傍銀河の観測から得られている経験則(Kennicutt-Schmidt 則: $\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{gas}}^{1.4}$)に基づいてモデル化した。Kennicutt-Schmidt 則は、大局的なスケールの観測量に基づいており、必ずしも銀河中心でこの経験則が成り立つとは限らない。何故なら銀河系中心部は非常に特異な環境(強い輻射場、強い磁場、強い潮汐力)にあるからである。そこで、我々は比例定数を3種類仮定して数値シミュレーションを行う。モデルは、次の通りである: モデル1(比例定数が Kennicutt-Schmidt 則の値の1/10倍)、モデル2(1倍)、モデル3(10倍)。

核周ガス円盤の進化の過程で、ガスクランプ同士の衝突による衝撃波が頻繁に起こる。これを正確に計算するため、数値流体の流束計算に効率的で、かつ、高精度な方法である M-AUSMPW+MLP5 を用いた。星形成によって形成された星の運動は、PM法で計算する。また、高い空間解像度で計算を行うため、計算コードをMPIで並列化し、大規模計算を可能にした。

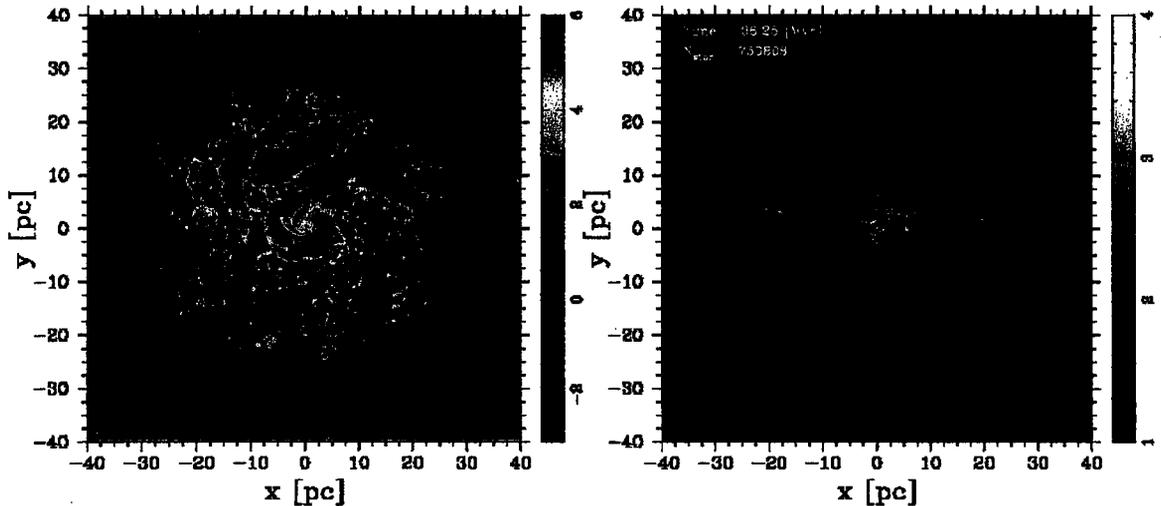


図 1: モデル 2 の計算開始後 35.25Myr の核周ガス円盤のガスの表面密度(左図)と星の表面密度(右図)。各表面密度 ($M_{\odot} \text{pc}^{-2}$) は、対数スケールである。核周ガス円盤の自己重力不安定によって、ガスクランプが活発に形成されている。銀河中心近傍でガスクランプ同士の重力散乱によって、角運動量を失った大質量ガスクランプが銀河中心に落下し、中心 5pc 以内で活発な星形成が起きている様子が見られる。

3. 結果および結論

我々は、星形成の影響を明確にするため、星形成を考慮せずに数値シミュレーションを行った。母銀河からのガス供給によって質量を増した核周ガス円盤で自己重力不安定が起こり、ガスクランプが活発に形成される。質量の大きなガスクランプ同士の重力散乱が起こり、それによって角運動量輸送が起きた。これによって、大質量ガスクランプの一部が角運動量を失い、銀河中心へのガス供給が起こることがわかった。特に、銀河中心近傍(<10pc)で大質量ガスクランプ同士の重力散乱が起きることが重要である。銀河中心へのガス供給率は、時間とともに増加し、母銀河からのガス供給率の 45% に達した。

次に、我々は、星形成を考慮して数値シミュレーションを行った。星形成率の高いモデル 3 では、核周ガス円盤の自己重力不安定によって、ガスクランプの形成が起こるが、その大部分はすぐに星形成で消費される。ガスクランプの一部は、内側へ移動するが、その過程で星となり、銀河中心へのガス供給は起こらない。これは、モデル 3 では小さい半径へのガス供給率が小さく、銀河中心近傍で大質量ガスクランプの形成に必要なガスの表面密度を実現できないためである。一方、モデル 1, 2 の場合には、形成されたガスクランプが星となる前に、ガスクランプ同士の角運動量輸送が活発に起こり、より小さい半径へとガス供給が起こる。その結果、銀河中心近傍で大質量ガスクランプが複数形成され、銀河中心へのガス供給が起こる。これによって、銀河中心のガスの表面密度が高まり、そこで活発に星形成を起こす (図 1)。このため、形成された星は中心に集中して分布する。この結果は、モデル 1, 2 では星形成率が低く、星形成によるガスの消費のタイムスケールよりも、ガスクランプの形成と角運動量輸送のタイムスケールの方が短いと考えられる。銀河中心へのガス供給率は、星形成率に応じて、母銀河からガス供給率の 0.6%(モデル 3)、10%(モデル 2)、26%(モデル 1) となった。このように、我々は、星形成率の違いによる核周ガス円盤の進化や銀河中心へのガス供給の違いを系統的に明らかにすることができた。この結果は、核周ガス円盤での星形成率が巨大ブラックホールの成長に大きく影響することを示している。銀河中心へのガス供給過程の研究において、星形成率を左右する素過程の研究が重要である。特に、銀河形成期では、金属量が少ないため、水素分子形成が起きにくく、星形成率が低いことが期待される。異なる環境での核周ガス円盤のより詳細な研究が重要である。

我々は、計算結果と銀河系中心領域の観測([i] 銀河系中心部の X 線強度分布から推定される超新星爆発率、[ii] 銀河系半径 2-5pc にある巨大分子ガスリングの質量、[iii] 若い星の分布の特徴、[iv] 過去の星形成史)の比較を行った。その結果、モデル 1, 2 が、すべての観測的特徴と矛盾しない結果を与えた。このことは、銀河系中心部の星形成率が Kennicutt-Schmidt 則より大きくないことを示している。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 羽 部 朝 男
副 査 教 授 藤 本 正 行
副 査 教 授 小 笹 隆 司
副 査 教 授 鈴 木 久 男

学位論文題名

Study on Evolution of a Circumnuclear Gas Disk and Gas Supply to the Galactic Center

(核周ガス円盤の進化と銀河系中心へのガス供給過程に関する研究)

多くの銀河中心に太陽質量の百万倍以上の巨大ブラックホール(以下、SMBH)が存在する観測的証拠が多数ある。このSMBHの成長は銀河全体に分布しているガスが銀河中心へ流入する過程(以下、ガス供給過程)が深く関連すると考えられ、ガス供給過程の詳細な研究は宇宙物理学に取って非常に重要な研究課題である。にもかかわらず、詳細な研究は十分行なわれていない。そこで本論文において申請者は、我々の銀河を対象にこのガス供給過程の研究を高精度数値シミュレーションによって行った。

銀河中心領域は巨大ブラックホールが存在し、また、星の分布も強く集中しているために銀河の重力場は非常に強く、ガスの運動も複雑と成るために、その研究には高精度の大規模数値シミュレーションが必要と成る。申請者は、この研究のために、強い衝撃波の解析が可能でしかも高精度で大規模計算が可能な数値シミュレーションコードを新たに開発し研究を行った。

その結果、コンパクトなガス円盤(以下、核周ガス円盤)が銀河中心領域に形成され、ガスが銀河円盤部から流れ込むとともにその質量が増加し、自己重力不安定と成ることを示した。さらに、自己重力不安定によって核周円盤が分裂して形成されたコンパクトなガスの塊の運動を調べたところ、重力相互作用によって角運動量輸送が起り、核周円盤中心へのガス供給が起こることを示した。また、この過程で星形成の影響を調べたところ、それによって核周円盤中心へのガス供給量が大きく影響される様子が明らかになった。以上の結果を、我々の銀河中心におけるX線観測、大質量星星団、分子雲観測と総合的に比較検討すると、本研究のモデルの星形成効率が低いモデルでよく説明できることを示した。以上のように、

これを要するに、著者はSMBHの成長に深く関係する銀河中心へのガス供給過程を銀河中心核のまわりの核周ガス円盤の進化を高精度数値シミュレーションして研究し、銀河中心へのガス供給過程について重要な知見をもたらすものであり、宇宙物理学の研究に対

して貢献するところ大なるものである。

よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格があるものと認める。