

学 位 論 文 題 名

Gaseous structure excited by resonances
in a non-axisymmetric gravitational potential

(非軸対称重力場中の共鳴励起によるガス構造)

学位論文内容の要旨

1. 序論

多くの渦巻銀河の重力ポテンシャルは、星の棒状分布や近傍の銀河の潮汐力のため、回転軸対称ではない。このような歪んだポテンシャルは星間ガスの力学に大きく影響し、1) Our Galaxy や系外銀河の中心付近で観測されているガスの空間、速度分布の非軸対称性の起源、2) 銀河中心付近のスターバースト領域へのガスの供給メカニズム、3) 銀河の渦巻構造の発生と維持のメカニズム、4) 星の棒状構造の安定性、などの様々な問題と密接な関係があると考えられている。

非軸対称ポテンシャル（バーポテンシャル）が、ガスの力学に与える影響は、計算機によるシミュレーションによって多く調べられてきた。その結果、バーポテンシャルの回転速度に応じて、スパイラルや、バーポテンシャルに対して先行する歪んだリング、棒状のガス構造が形成されることがわかってきた。このような非軸対称構造はバーポテンシャルからのトルクによる角運動量輸送、ひいてはガス分布の変化に重要な役割を果たしている。しかし、このようなガスの振舞い、構造形成についての理論的、物理的理解はこれまで不十分であった。

この論文では、弱いバーポテンシャル中でのガスの軌道を定量的に表す解析的なモデルを提唱する。このモデルは、より現実的なシミュレーション、観測結果を理解する上で基本となるものである。実際、我々の計算機シミュレーション結果がこのモデルから自然に理解できることを示す。また、このシミュレーションから銀河の力学進化にとって重要な新しい結果が得られた。

2. ガス軌道のモデル

ここではバーポテンシャルの回転系（角速度 Ω_b ）でのガスの閉軌道をエピサイクル近似（線形近似）に基づいて議論する。この系での粒子の閉軌道は、半径方向の強制振動を表す運動方程式の解で表される。そこで、ガスの散逸的な性質を半径方向の速度に比例した摩擦項として、この運動方程式の左辺に取り入れると、

$$\ddot{R}_1 + 2\lambda\dot{R}_1 + \kappa_0^2 R_1 = f_0 \cos 2(\Omega_0 - \Omega_b)t, \quad f_0 \equiv - \left[\frac{d\Phi_b}{dR} + \frac{2\Omega\Phi_b}{R(\Omega - \Omega_b)} \right]_{R_0} \quad (1)$$

ここで、 R_1 は半径 R_0 からの一次の摂動、 Ω_0 、 κ_0 は R_0 での角速度とエピサクリック振動数、 λ は減衰率を表す定数である。(1) 式の一般解のうち、閉軌道を表すのは

$$R_1(t) = B \cos [2(\Omega_0 - \Omega_b)t + \delta_0], \quad (2)$$

$$\delta_0 \equiv \arctan \left[\frac{2F\Lambda}{F^2 - 1} \right], \quad F \equiv \frac{2(\Omega_0 - \Omega_b)}{\kappa_0}, \quad \Lambda \equiv \frac{\lambda}{\kappa_0}. \quad (3)$$

ここで、位相差 δ_0 は corotation より内側で常に負であることが重要な点である。つまり、楕円軌道は corotation より内側で常にバーポテンシャルに対して先行する。また、inner Lindblad resonances (ILR) では常に、楕円状軌道の長軸はバーポテンシャルの長軸に対して回転方向に +45 度、outer Lindblad resonance では -45 度傾く。

また、弱い非軸対称成分をもった銀河のポテンシャルに対して、first ILR 付近では楕円状軌道のバーポテンシャルに対する角度が増加すること、second ILR 付近では逆に減少すること、バーポテンシャルに対して完全に直交あるいは平行になる軌道をガスはとらないことがわかった。この軌道の向きの半径方向の変化のために、first ILR では leading spiral が、second ILR では trailing spiral が出現することが予測される。実際に数値流体シミュレーションを行ってみると予測どおりの位置に leading、trailing spiral が出現することが確かめられた。従来のシミュレーションで、しばしばみられた楕円リングは、この内側の leading spiral が変化したものである。また、シミュレーションでのガスの角運動量変化は上のガス軌道のモデルからの予測とよく一致する。

3. 数値シミュレーション

ガスの自己重力を考慮した場合や、長時間にわたるガス分布の変化、恒星系とガス系の重力相互作用などの非線形な振舞いを、数値シミュレーションを用いて調べた。ILR よりも内側の自己重力ガスディスクの弱いバーポテンシャル中での進化の2次元計算 (PM-SPH code: 参考文献1) から、ガスは進化の初期の段階で、線形モデルから予測された軌道を取るため、自己重力の効果でバーに対してほぼ45度傾いた細い棒状構造を形成することがわかった。この棒状構造に沿ってガスが中心へ落ち、その過程でtrailing spiral 状の形態をとる。同様の進化過程は棒状恒星系中のガスディスクの3次元計算 (Tree-SPH code) でもみられた。このシミュレーションから、ガスと恒星系の重力相互作用によって、ガスが上記の過程で中心へ集中するとともに、恒星系の棒状構造が急速に弱まることが明らかになった。これは銀河の構造形成の理論にとって重要な示唆を与える。

4. 議論及び結論

我々のシミュレーションでみられたバーポテンシャルに対して先行するガスの棒状構造とその中心への集中過程は、バー銀河中心付近で観測される分子ガス構造形成のメカニズムとして有力である。ガス分布変化に伴う恒星系の棒構造の急速な変化は爆発的星生成現象と銀河構造の関連を示しており、興味深い。非軸対称ポテンシャル中のガスの基本的な振舞いは、我々の「減衰強制振動モデル」によってよく理解できる。従来の「粒子軌道-共鳴モデル」はシミュレーション結果、観測を説明できない。

この論文の線形モデル及び数値シミュレーションで、ILRが存在するようなバーポテンシャルの回転速度のとき、角運動量をより失い易い軌道にガスが自然に従い、その結果ガス分布が大きく変化すること、そして、その物理的必然性が明らかになった。ガスの自己重力は、バーポテンシャルによるガス分布の変化をより強める。観測される銀河のガスの構造、爆発的星生成、渦状腕形成はこの非軸対称重力場中のガスの振舞いと密接な関係がある。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	坂 下 志 郎
副 査	教 授	石 川 健 三
副 査	助教授	兼 古 昇
副 査	講 師	羽 部 朝 男

学 位 論 文 題 名

Gaseous structure excited by resonances in a non-axisymmetric
gravitational potential

(非軸対称重力場中の共鳴励起によるガス構造)

銀河は星と星間気体から成る系で、質量の大半は星の系が占めており、銀河の重力は星の系で決定される。銀河の典型である渦巻状銀河における腕構造の形成と構造の維持機構を明らかにすることは、銀河構造論の重要な問題である。更に、最近、銀河中心で星形成が急激に進行するスター・バースト銀河が発見され、銀河中心にガスを供給する機構として、腕構造の形成が注目されている。

申請者は、すでに、星の系の作る重力ポテンシャルが非軸対称の場合、このポテンシャル中を微分回転する気体中に腕構造が形成され、気体から星の系に角運動量が輸送され、気体は急速に銀河中心に落下し、スター・バーストの原因となることを、気体の自己重力も含めた数値シミュレーションにより明らかにしていた。

本論文では、申請者は、以前の数値シミュレーションで得られた結果を基礎に、非軸対称ポテンシャル中の気体の運動を表す新たなモデルを提案し、腕構造形成の機構を解析的に明らかにした。申請者はまず、非軸対称ポテンシャルの回転系における気体運動の閉軌道をエピサイクリック近似で求めた。従来は、気体も無衝突系として取り扱われていたが、申請者は、気体の特徴である散逸的な性質を新たに取り入れ、気体の運

動は、減衰強制振動の方程式で記述されるとするモデルを提案した。このモデルによれば、腕構造がポテンシャルの回転に先行するか或いは後続するのかは、強制振動の位相差の問題として定量的に解析でき、その結果、気体から星の系への角運動量の輸送される条件などを定量的に示すことができた。申請者が用いたエピサイクリック近似は線形近似であり、その近似の正当性を確かめるため、申請者は更に数値シミュレーションを行い、モデルとの比較を行った。その結果、モデルと数値シミュレーションは線形段階では極めて良く一致すること、非線形段階の構造も線形モデルの延長上で良く説明できることを示した。

以上のように、本研究は、銀河構造の研究に重要な知見を加えたものであり、審査員一同は、申請者が博士(理学)の学位を受けるのに十分な資格があるものと認めた。