

原始惑星系円盤上ガス渦の三次元シミュレーション: スパイラル・ダスト集積

小野智弘 (プリンストン大学・東京工業大学)

利用カテゴリ 利用カテゴリ XC-B

1 背景

微惑星はキロメートルサイズの天体であり、原始惑星系円盤（以下、円盤）の中で固体微粒子（以下、ダスト）が惑星に成長する際に経由する中間段階であると考えられている。しかし、微惑星の形成は未だよく分かっておらず、その解決のためにはいくつかの理論的困難を乗り越えなくてはならない。近年の観測から、円盤は多様な構造をもつことが分かってきた。そのような円盤構造は、ガス渦が形成されやすい環境であると考えられる。円盤上のガス渦は、周囲のダストを集積・濃縮することができる。そのため、ガス渦は微惑星形成の現場として注目を集めるようになってきている。

円盤中に巨大ガス渦が存在する時、サブミリ波ダスト連続光で三日月状の円盤構造が観測されると考えられている。実際、ALMA 望遠鏡によって三日月状構造は複数の天体で観測されてきた。一方、円盤中の惑星も三日月状構造を誘引し得ることが指摘されている。ガス渦と惑星のどちらが三日月状構造の成因であるかは未だ決着がつかない。

2 目的

本研究課題では、円盤三日月状構造の成因を観測的に同定することを目的とした。そのために、以下の2つの小課題にそれぞれ取り組んだ。

(1) ガス渦に付随するスパイラルの観測可能性

ガス渦や惑星を持つ円盤中では、スパイラル状の密度波も同時に存在する。先行研究によって、惑星が励起する密度波はよく調べられている。一方、ガス渦に付随する密度波についてはよく分かっていなかった。本小課題では、密度波の強度や惑星が立てる密度波との違いを明らかにすることを目的とした。

(2) 渦運動の観測可能性

近年のALMA望遠鏡による円盤分子線観測によって、ガス運動がケプラー回転から局所的に乖離している天体が確認されてきた。この速度乖離はチャンネルマップ上で、等速度線の捻じれ（キンク）として観測される。キンクを説明するモデルとして有力なのは、惑星を用いたものである。一方、ガス渦もその渦運動によって局所的な速度乖離を引き起こすことが考えられる。本小課題では、渦運動によるキンクを定量的に調べ、惑星によるキンクとの違いを明らかにすることを目的とした。

3 手法

本研究課題における主な研究手法は、Athena++コード (Stone et al., in submitted) を用いた数値流体計算である。小課題(1)では、局所シアリングボックス内で2次元・3次元計算を行い、多様なガス渦に付随する密度波の強度や空間構造を調べた。また、強い密度波が期待されるガス渦に対して3次元グローバル計算を行い、ガス渦に付随する密度波の観測可能性について議論した。小課題(2)では、3次元グローバル計算を行い、ガス渦が引き起こす速度乖離について調べた。ガス渦のサイズは3通り考え、それぞれのサイズで渦運動が最大となるパラメータを取った。数値計算の結果を模擬観測することで、渦運動によるキンクが観測可能かどうかを調べた。

4 コード開発

4.1 Athena++コードにおける軌道移流法の導入

本研究課題を達成するため、報告者は Athena++コードに軌道移流法を導入した。円盤はおおよそケプラー回転している。一般的に、ケプラー回転速度は超音速なのに対して、円盤速度場のケプラー回転からの乖離は亜音速である。軌道移流法は、円盤内の速度場をケプラー回転成分と速度乖離成分に分けて解く数値流体計算の手法である。これを用いることにより、円盤計算にかかる計算時間が数倍短くなる。また、実装した軌道移流法は格子細分化法を用いた数値計算に対しても有効である。

4.2 Athena++コードにおける局所シアリングボックスの改善

Athena++コードには元から局所シアリングボックス内での計算に対応していた。しかし、その実装には流体の保存量が保存しない、計算エラーが大きすぎるといった問題があった。報告者は流体フラックスを途中で修正することで保存量問題を解決し、シア一周境界を計算する時に用いる時間を最適化することで計算エラーを軽減した。

5 結果

(1) ガス渦に付随するスパイラルの観測可能性

惑星が励起する密度波は惑星の近傍から1本ずつ内外に射出される。一方、ガス渦の場合はガス渦の端から内外に2本ずつ射出されることが分かった。ガス渦に付随する密度波は惑星が励起するものに比べて空間的に広がるが、強度としては弱い。多様なガス渦の場合で密度波の強度を測定した結果、どんなに強いガス渦であっても密度波を直接的に観測することは困難であることが分かった。また、ガス渦の移動について調べるために密度波が運ぶ角運動量フラックスについても定量的に測定した。これにより、円盤内における渦移動速度を推定できるようになった。

(2) 渦運動の観測可能性

渦運動が作るキンクは惑星の場合と比べて捻じれの方向が反対であることが分かった。また、渦運動が作るキンクの方がより空間的に広がった構造を持つ傾向がある。ガス渦のサイズを変えながら渦由来のキンクに関する観測可能性を議論した結果、観測のためにはサブミリ波ダスト連続光で三日月状構造が観測できるほどガス渦が巨大である必要がある。この結果から、サブミリ波ダスト連続光で三日月状構造が観測されている天体に対して空間分解能が高い分子線観測を行うことで、三日月状構造の成因を特定することができるようになると期待される。