

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21540236

研究課題名（和文） 周連星円盤と原始惑星系円盤の進化

研究課題名（英文） Evolution of Circumbinary and Protostellar Disks

研究代表者

花輪 知幸 (HANAWA TOMOYUKI)

千葉大学・先進科学センター・教授

研究者番号：50172953

研究成果の概要（和文）：

若い連星には 3 つのガス円盤(原始惑星系円盤)があり、それぞれ主星、伴星、共通重心を中心として回転している。本研究では数値シミュレーションにより、共通重心を中心とする周連星円盤から主星・伴星へのガスの流れを調べた。流れ込んだガスは主星へより多く流れ込むことと、主星と伴星の間でそれらの周囲を回転するガスが衝突して橋を形成することが確認された。またこれらの特徴はすばる望遠鏡による近赤外線像と良い一致を示すことも確認された。

研究成果の概要（英文）：

A young binary is associated with three gas disks, which rotate around the primary, the secondary, and the common mass, respectively. We studied the gas flow from the circumbinary disk rotating around the common mass to the primary and secondary using numerical simulations of high resolution. We have confirmed that the gas flows mainly onto the primary and that the circumprimary and circumsecondary disks interact to form a bridge of dense gas. We have found that these features coincide with the near infrared image of a young binary, SR24, taken with the Subaru telescope.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：理論天文学、星形成、原始惑星系円盤、連星

1. 研究開始当初の背景

本課題では、新しい手法による連星系での原始惑星系円盤の流体力学シミュレーションを提案する。この提案は、以下に記す現状分析に基づいている。

原始星から前主系列星にいたる若い星に

は、普遍的に原始惑星系円盤が付随している原始惑星系円盤からのガス降着は、若い星の重要なエネルギー供給源である。また原始惑星系円盤は、降着や消散によりその質量が減少してゆくので、これらの星の年齢を表す重要な指標でもある。

このような原始星から前主系列星への進化の描像は、主に単独星の統計的な研究によりもたらされたものである。しかし多くの若い星は、連星や多重星系の一員なので、原始星円盤は伴星により力学的な影響を受けるはずである。伴星は潮汐力により相手の周星ガス円盤の外縁を剥ぎ取るとともに、連星系全体を取り巻く(周連星)円盤に摂動を加え、ガス降着を推進する作用がある。これらの作用は、質量降着が盛んな若い連星の進化に大きな影響を与えると考えられる。しかし、これらは推測に過ぎず、観測的にも理論的にも実証はされていない。

このような状況はこれから数年で大きく変化すると期待できる。近赤外線や可視光では、補償光学とコロナグラフを組み合わせるにより、原始惑星系円盤が0.1秒角の分解能で観測可能になってきた。またミリ波やサブミリ波でも、ALMAの稼働により、分子雲に埋もれた若い連星を0.1秒角あるいはさらに高い角分解能での観測が可能になる。近傍の星形成領域でこの角分解能は10 AU強に相当し、典型的な連星間距離に比べ十分に高い。従って若い連星系に属する原始星円盤は、確実に見えてくると期待できる。

2. 研究の目的

まず基本的な問題として、主星と伴星の質量降着率の比を求めたい。Lubow & Artymowicz や Bate & Bonnell は、軌道半径の大きい伴星のほうが質量降着率が大きいという結果を準粒子法(SPH法)で求めているが、この結果には納得しがたい点がある。もしこの結果が一般的であれば、連星の質量比は1に近づくはずであるが、実際には主星に比べ伴星が軽い連星がいくつも見つかっている。

またエネルギーが散逸しない限り主星や伴星への降着はあり得ないが、どのような散逸が起きているのか示されていない。衝撃波は散逸を起こす現実的な過程であるが、SPH法は衝撃波の取り扱いが難しい。とくに周連星円盤と、主星および伴星の間は密度が薄く粒子数が減るために、SPH法では精度がでにくい。

エネルギー的な観点からすると、ガスの温度が低いほど、主星と伴星の重力ポテンシャルの差異に敏感になり、質量降着率が異なってくるはずである。また連星の軌道が楕円の

場合、ガスの流れは公転運動により変調されるはずである。連星の質量比や、降着するガスの温度、連星の離心率などを変えたシミュレーションにより、質量降着率がこれらのどの要素に依存するかを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究の主眼は、連星系の外部にある周連星円盤から、主星や伴星へのガスの流れを明らかにすることである。目的の項でも述べたように、連星間距離が数百AUの系であれば、研究期間内に近赤外線ではこれらの円盤が撮像できるようになる。ミリ波・サブミリ波でも、ALMAが本格稼働する2012年には同様の撮像が可能になる。これらの観測は、理論シミュレーションの当否判定を可能にする。主星円盤や伴星円盤がどこまで広がるか、それぞれの質量降着率はどれほどになるか、といった問題が議論できる。近接連星系の場合、撮像は難しいが、分光観測による速度情報が得られる。公転周期の短い近接連星系では、公転変化を利用したドップラートモグラフィーにより連星系内の流れを推定できる可能性がある。これらを念頭に、周連星円盤および主星・伴星をとりまく原始惑星系円盤の構造を明らかにする数値シミュレーションを行う。

平成21年度は、数値シミュレーションコードを並列化し、より高い空間分解能の大型シミュレーションが可能となるコードを開発する。高い空間分解能が必要なのは、公転速度の大きな連星を取り扱うためである。参照速度法でも、高速で公転する連星を取り扱うには高い空間分解能が必要だからである。数値シミュレーションで隣りあうセル間での参照速度 v の差が音速に比べて十分小さくなるよう、数値格子を細かく設定しなければ、意味のある結果は得られない。たとえば20 Kのガスであれば、音速は0.3 km/sである。これに対して総質量が太陽質量で連星間距離が500 AUの場合、公転速度は13 km/sで音速の約400倍になる。参照速度はおおよそ公転速度と同程度になるので、セル当たりの参照速度の変化を音速以下とするためには、連星間距離の1/1000程度の空間分解能が必要となる。この分解能は、 512^2 のセル数をもつ数値格子を8段重ねた現在の数値格子で達成されているが、連星間距離が短く、公転速度が速い場合を扱うためにはより高い空間分解能が必要となる。空間分解能を2倍上げると、計算量

は必然的に8倍に増える。現在のシミュレーションがスーパーコンピュータSR11000の1ノード16CPUを1週間連続使用しているため、これよりCPUの多い超並列型の計算機利用が必要となってくる。このため、計算コードを超並列タイプの計算機に合うよう、書き換える必要がある。

これと平行して主星と伴星の質量比($q = M_2/M_1$)や、降着するガスの音速と公転速度の比($M \equiv v_{\text{rot}}/cs$)を変えた系統的なシミュレーションを行う。主星と伴星の質量が大きくなると、周連星円盤からのガスの流れ込み口となる、ラグランジュのL2点とL3点のポテンシャル差が大きくなる(図3を参照のこと)。この差がガスの熱エネルギーに比べて大きいと、両点からのガスの流れ込みに大きな差が現れ、ロッシュローブ内でのガスの流れにも大きな非対称性が期待できる。このことを念頭において、シミュレーションの解析を行いたい。

またL2点やL3点から流れ込んだガスは高いエネルギーをもっているため、主星や伴星に降着する際にエネルギー散逸を伴う「ホットスポット」を形成する可能性がある。X線連星や矮新星からの類推に過ぎないが、連星系に流れ込んだガスと原始惑星系円盤が衝突する場所が存在するはずである。これまでの私達のシミュレーションによれば、主星を中心とする原始惑星系円盤でL1点に近い場所がその候補である。L2点からのガスは、伴星を中心とする原始惑星系円盤の外縁を接するように流れ、主星を中心とする原始惑星系円盤と衝突する。

ここでは衝撃波が発生し、密度や温度が上昇するので、濃く熱くホットスポットになるはずである。このホットスポットはドップラートモグラフィーにより検知できる可能性がある。

さらに周連星円盤に励起される渦状衝撃波の時間変動と、時間変動を起こす機構についても解析を進める。連星と共に回転する系から見ると、円運動する連星の重力ポテンシャルは時間変化しいので、周連星円盤はやがて準定常状態になると、思われていた(現在もそのように考えている研究者もいるであろう)。しかしシミュレーション結果は定常状態に落ち着かず、連星へのガス降着は大きく振動する。ただし従来のシミュレーションでは、数値的な振動も混じり込んでいて、振動の原因

は特定できていない。数値的な振動は参照速度法により低く抑えられるようになったので、振動の様子が明確に捉えられ、その原因も特定されると期待できる。

これまで技術的に取り扱いやすい円軌道に絞って研究を続けてきたが、楕円軌道をもつ連星に適用することを考える。楕円軌道の場合も、軌道は準解析的に求められるので、適切な参照速度を設定できる可能性がある。楕円軌道の連星では、周連星円盤の中心が偏り、その近点がゆっくりと移動する可能性が示唆されている。食変光星KH 15Dは離心率の大きい弱輝線T Tau型星で、偏心して反った周連星円盤が歳差運動しているために、特異な変光を起こしていると考えられている。円盤が反る効果は3次元なので取り扱えないが、偏心したガス円盤が歳差することは取り扱える可能性がある。歳差は公転にくらべ遅い動きなので、従来の流体シミュレーションでは取り扱いが困難であった。参照速度を導入することにより、歳差による小さな速度変化を正しく追うことができると期待される。

また惑星を質量比が極端な連星とみなすことにより、惑星により形成される原始惑星系円盤の間隙について調べる。太陽系の場合、最も質量の大きい惑星である木星ですら、その質量は太陽の1/1000である。このように極端な場合をすぐに取り扱うのはまだ困難があるので、質量比が0.1, 0.05, 0.02, ...と段階的に小さい場合に挑戦する。

4. 研究成果

本研究では連星系でのガスの流れを高精度で計算する2次元および3次元の数値シミュレーションコードを開発した。また開発した計算コードを、渦状銀河や惑星をもつ原始惑星系円盤への応用も研究した。これらの系でも回転と重力が釣り合っているため、これまでに比べて高い精度が得られた。またシミュレーション結果の妥当性を検証するために、若い連星をすばる望遠鏡やアルマ望遠鏡で観測する共同研究を行った。成果の一部は論文として公表したが、一部は学会での口頭発表だけを行った段階である。また申請中で採択されていない観測提案もある。以下では原著論文あるいは学会での口頭発表を行ったものを中心に成果をまとめる。

(1) 連星系でのガスの流れ

周連星円盤や原始惑星系円盤では、遠心力と重力がほぼ釣り合った状態にある。温度が低いためガスの圧力はこれらに比べて小さいために、精度を上げるためには遠心力を正確に計算する必要がある。遠心力を精度良く求めるため、速度を参照速度とそこからの残差に分けて計算した。参照速度は解析的に与えられるので、その微分により求められる遠心力は正確になる。残差は小さいので、遠心力全体が精度よく求まる。この方法を多層格子と組み合わせ、2次元の数値シミュレーションを行った。多層格子は、様々な解像度をもつ数値格子を組み合わせたもので、連星間距離の40倍というこれまでにない広い領域を覆いながら、主星や伴星の周囲では連星間距離の1000分の1以下という高解像度を達成した。図1はその数値計算の例である。左上から右下へと連星周囲のガスが変化してゆく様子を示している。いずれ色はガスの面密度を表している。

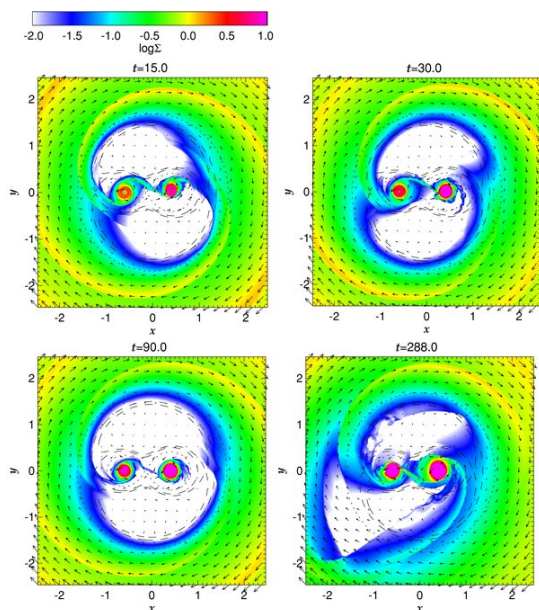


図1. 連星系でのガスの流れ。雑誌論文③ Hanawa et al. (2010)より

この計算により、周連星円盤にも渦状衝撃波が形成されることと、渦状衝撃波が震動することが明らかになった。渦状衝撃波が震動するために、連星への降着率も震動することが見いだされた。

この論文を出版後、参照速度を陽に定義せずに同様の精度を達成する方法を開発した。

新しい方法では重力により数値セル内部で速度が変化することを考慮した。この方法は参照速度は、星と惑星のように質量比が大きく異なる場合など、参照速度を設定しにくい場合にも有効に働くことを確認できた。このため現在は参照速度を使う計算コードは使用しなくなった。この手法については国際会議で口頭発表した、雑誌論文にはまとめられていない。

(2) 若い連星SR24

眞山聡(総合研究大学院大学・助教)が中心となって、すばる望遠鏡の近赤外線コロナグラフ Ciao でへびつかい座にある若い連星SR24で撮像し、主星であるSR24Sと伴星SR24Nの周囲に円盤があることを見いだした。これらの円盤は、主星や伴星の重力圏より広がっていることを見いだしたほかに、「ブリッジ」と名付けた構造を主星と伴星の間に見いだした(図2)。これらの特徴は前項で述べた数値シミュレーションと符合している。

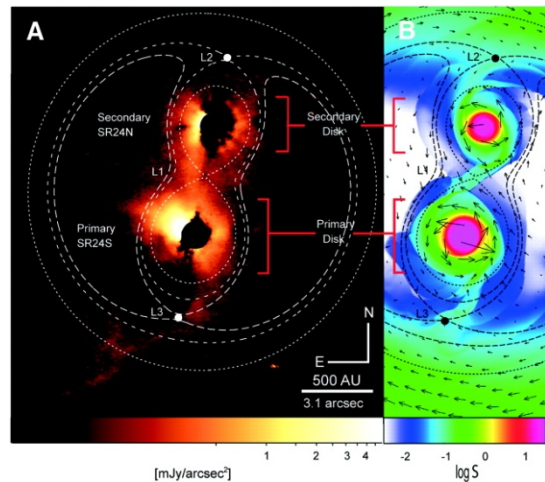


図2. 若い連星SR24の近赤外線像(左)と対応する数値シミュレーション(右)。雑誌論文② Mayama et al (2010)より

またこの観測では下方(南)に伸びた渦状の腕構造も見いだされた。この腕はSR24が天球面上を反時計回りに回る連星であることと、周連星円盤から連星へガスが流れ込んでいることを示す直接的な証拠である。ブリッジ、腕、2つの円盤は連星系でのガスの流れを捉えた世界初の撮像でその成果は国際誌 Science および国立天文台のニュースでも取り上げられた。

本研究の代表者は、理論面の担当者としてこの観測の共同研究者を務めた。

(3) 衝撃波の力学的安定性と数値不安定性

関連した問題として、円盤銀河に現れる銀河衝撃波の安定性についても調べた。

高い空間分解能で銀河衝撃波をシミュレーションすると、衝撃波下流に大きなゆらぎが発生することが10年ほど前から知られている。しかし不安定の原因はまだ特定されていない。衝撃波により銀河の微分回転が強められたためのケルビン=ヘルムホルツ不安定とする説が主流であるが、解像度を上げるほど細かいゆらぎが発生するなど、物理的とは考えにくい特徴も知られている。本研究ではより単純な系として、等温で速度シアのない衝撃波を伴った1次元流を考えた。衝撃波面下流で減速していれば、この流れは衝撃波面をゆがめる曲げモードに対しても安定であることを数学的に証明した。またこのように安定であることを証明された流れでも、強い衝撃波が数値格子に対して傾いて存在すると、数値不安定を起すことに気づいた。この結果は雑誌掲載用の論文にまとめたが、まだ査読中である。

(4) 3次元シミュレーション

原始惑星円盤の厚み方向の構造を調べるため、3次元シミュレーションコードも開発した。このシミュレーションにより、主星や伴星の周りの円盤の厚みが動径方向だけでなく方位角方向にも大きく変化することや、ブリッジでは公転面と上空で流れが大きく異なることなどが見えてきたが、結果は未整理でまだまとまった発表に至っていない。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① T. Matsumoto, T. Hanawa, Protostellar Collapse of Magneto-turbulent Cloud Cores: Shape During Collapse and Outflow Formation, *Astrophys. J.*, 査読有, 728巻, 2011, 47号論文, DOI:10.1088/0004-637X/728/1/47
- ② S. Mayama, M. Tamura, T. Hanawa, T. Matsumoto, M. Ishii, T.-S. Pyo, H. Suto, T. Naoi, T. Kudo, J. Hashimoto, S. Nishiyama, M. Kuzuhara, M. Hayashi.

Direct imaging of bridged twin protoplanetary disks in a young multiple star, *Science*, 査読有, 327巻, 306-308,

DOI: 10.1126/science.1179679

- ③ T. Hanawa, Y. Ochi, K. Ando, Gas Accretion from a Circumbinary Disk, *Astrophys. J.*, 査読有, 708巻, 2010, 485-497, DOI:10.1088/0004-637X/708/1/485

[学会発表] (計13件)

- ① 菅野裕次, 花輪知幸, 輻射輸送の M1 モデルの数値解とその特性, 日本天文学会, 2012年3月22日, 龍谷大学, 京都市
- ② 花輪知幸, 菊池大輔, 銀河衝撃波の湾曲と振動, 日本天文学会, 2012年3月21日, 龍谷大学, 京都市
- ③ 菅野裕次, 花輪知幸, 輻射輸送の M1 モデルの数値解法, 日本天文学会, 2011年9月21日, 鹿児島大学, 鹿児島市
- ④ 花輪知幸, 菊池大輔, 銀河衝撃波の力学的安定性と数値不安定性, 日本天文学会, 2011年9月20日, 鹿児島大学, 鹿児島市
- ⑤ T. Hanawa, D. Kikuchi, Dynamical Stability of Galactic Shocks: Numerical Instability and Dynamical Instability, 6th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows, 2011年6月15日, Valencia, スペイン
- ⑥ 花輪知幸, 菊池大輔, 銀河衝撃波に伴う Wiggle Instability の再検討 II, 日本天文学会, 2011年3月17日(震災により中止), 筑波大学, つくば市
- ⑦ T. Hanawa, 3D structure of Accreting Binary, 4th East Asia Numerical Astrophysics Meeting, 2010年11月3日, ASIAA, 台北, 台湾
- ⑧ 花輪知幸, ガス降着が盛んな連星の3次元構造, 日本天文学会, 2010年9月22日, 金沢大学, 金沢市
- ⑨ 花輪知幸, 菊池大輔, 円盤銀河の渦状衝撃波構造 Wiggle instability の再検討, 日本流体力学会, 2010年9月3日, 北海道大学, 札幌市
- ⑩ T. Hanawa, D. Kikuchi, Y. Otomo, Numerical Scheme to Solve 3D Structure of Rotationally Supported Gas Disks, 5th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows, 2010年6月15日, The Westin San Diego, 合衆国
- ⑪ 花輪知幸, 菊池大輔, 大友雄造, Numerical Scheme to Solve 3D Structure

of Rotationally Supported, Gas Disks
参照速度を導入した回転平衡にあるガス
円盤の数値解法, 日本地球惑星科学連合
2010年大会, 2010年5月27日, 幕張メ
ッセ, 千葉県

- ⑫ 花輪知幸, 近接連星 V4046 Sgr の幅広い
輝線の解釈, 日本天文学会, 2009年9月
15日, 金沢大学, 金沢市
- ⑬ T. Hanawa, A New Scheme to Solve Gas
Disks around Stars, 4th International
Conference on Numerical Modeling of
Space Plasma Flows, 2009年6月30日,
Chamonix, フランス

[図書] (計1件)

花輪 知幸, 日本評論社, 天体物理学の基礎 I,
第3章第2節 流体の不安定と乱流, 観山 正
見, 野本 憲一, 二間瀬 敏史 編 2009,
pp.272—298, (第3章第2節 分担執筆)

[その他]

ホームページ等

すばる望遠鏡、双子の若い星の星周円盤を直
接観測 --- 星周円盤に外部からの物質流
入を初めて検出 --- 2009年11月19日, 国
立天文台 ニュース

http://subarutelescope.org/Pressrelease/2009/11/19/j_index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

花輪 知幸 (HANAWA TOMOYUKI)

千葉大学・先進科学センター・教授

研究者番号 : 50172953