

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05040

研究課題名(和文) 輻射磁気流体力学計算に基づく降着円盤の熱平衡曲線

研究課題名(英文) Thermal equilibrium curves of accretion disks obtained by radiation MHD simulations

研究代表者

廣瀬 重信 (HIROSE, Shigenobu)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・主任研究員

研究者番号：90266924

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：降着円盤はブラックホールや中性子星、原始星など様々な天体の周囲に形成される回転ガス円盤であり、円盤ガスの持つ重力エネルギーによって輝いている。恒星において質量と光度の間にある一定の関係が成り立つように、降着円盤でもその回転角速度に応じて(単位面積あたりの)質量と光度の間に一定の関係=熱平衡曲線が成り立つ。この質量と光度の関係は、定常状態にある天体の熱力学を表す基本的かつ重要な関係式である。本研究では、(典型的ガス温度が10Kのものから1e7Kのものに至るまで)様々なタイプの降着円盤に対して、単一の輻射磁気流体力学シミュレーションコードを用いて、その熱平衡曲線を系統立てて求めることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Accretion disks are rotating gaseous disks formed around a gravitational object including a black hole, a neutron star, and a protostar. Just as stars in the main sequence have a mass-luminosity relation, accretion disks have also a mass - luminosity relation (per unit area), depending on the angular frequency, which is called a thermal equilibrium curve. This sort of "mass - luminosity" relation is a fundamental relation for astrophysical objects in a steady state since they describes the basic thermodynamics of them. In this study, we have succeeded in obtaining thermal equilibrium curves systematically, using a single radiation magnetohydrodynamics simulation code, for various types of accretion disks, whose typical gas temperature ranges from 10K to 1e7K.

研究分野：天文学

キーワード：降着円盤 輻射輸送 磁気回転不安定 重力不安定 対流不安定

1. 研究開始当初の背景

降着円盤とは、中性子星やブラックホール、原始星など様々な重力天体の周囲に普遍的に形成される回転ガス円盤である。降着円盤では一般に、差動回転からエネルギー供給を受けて乱流が維持される。この乱流によるエネルギー散逸と、乱流起源のシアストレスによる角運動量輸送を通じて、ガスは回転しつつ重力天体に徐々に落下する。降着円盤は、こうして降着ガスの重力エネルギーを持続的かつ効率良く熱エネルギーに変換することで、宇宙における様々な高エネルギー現象・活動現象のエンジンとして働くほか、原始惑星系円盤においては惑星形成の舞台としても働く。このため、降着円盤は現代天体物理学における重要な研究対象の一つである。本研究では特に、局所的な熱力学平衡が実現する降着円盤＝標準降着円盤を研究対象とする。

降着円盤では、主にそのガス温度の違いによって重要となる物理(輻射圧、水素電離、非理想磁気流体力学効果、自己重力など)が異なる。それを反映して、降着円盤は多様な性質を示すが、それらはそれぞれの「熱平衡曲線」を比べることで統一的に理解することができる。恒星における「質量-光度関係式」が恒星の熱力学を表す基本的な関係式であるように、降着円盤における「熱平衡曲線」も降着円盤の熱力学および進化を理解する上で極めて重要である。具体的には、(加熱と冷却が釣り合った)熱平衡にある降着円盤のある半径(角速度 Ω)において、面密度 Σ のガスから放たれるエネルギー量 F を表す関係式、すなわち $F = F(\Sigma; \Omega)$ を熱平衡曲線と呼んでいる。これは正に、降着円盤の(角速度 Ω の場所における)単位面積あたりの質量(Σ)と光度(F)の関係式になっている。

恒星の「質量-光度関係式」が、恒星の内部構造を解くことで求まるように、熱平衡曲線も原理的には降着円盤の内部構造を解くことで求めることが可能である。しかし、恒星の加熱源が、解析的な定式化がなされている核反応であるのに対し、降着円盤の加熱源は、一般に解析的な取り扱いが困難である乱流散逸であるという困難がある。この困難を回避するため、これまでは、乱流起源のシアストレスを圧力でパラメタライズした「 α モデル」(Shakura & Sunyaev 1973)に基づいて熱平衡曲線は議論されてきた。しかし、降着円盤における最も本質的な物理プロセスである「乱流」を隠蔽した方法では、その適用にも限界がある。

これに対し研究代表者らは、輻射磁気流体力学の直接数値計算によって、磁気回転不安定(Balbus & Hawley 1991)が駆動する乱流を解像することで、内部構造をパラメタライズなしに「第一原理」から計算する方法を確立し、それを用いて熱平衡解を求める研究を進めてきた。これにより、従来の α モデルでは記述できなかった物理(シアストレスと

圧力の時間変動差、磁気浮力に伴う輻射移流、対流と磁気乱流の相互作用など)を明らかにするとともに、「第一原理」に基づく新しい熱平衡曲線を様々な降着円盤に対して確立してきている(Hirose et al. 2006, Hirose et al. 2009, Hirose & Turner 2011, Hirose et al. 2014, Hirose 2015など)。

一方、磁気乱流の他に、銀河中心核降着円盤や原始惑星系円盤における乱流の候補として考えられるのが、重力不安定が駆動する乱流である(Gammie 2001)。この重力乱流は、温度が低く面密度が高い場合に起こるので、磁気乱流と相補的に働く可能性があることで、最近注目されている(Martin & Lubow 2011)。

2. 研究の目的

本研究では、以下3点を目的とした。

(1) これまで研究代表者らが研究を進めてきた磁気乱流が駆動する降着円盤(活動銀河核降着円盤と矮新星降着円盤)について、特にその物理的性質や観測データとの対応に関する議論を深める

(2) これまで対象としてこなかったAM CVn型星降着円盤(水素を含まずヘリウムが主体)について、その特徴的な化学組成が磁気乱流に与える影響を明らかにしつつ、熱平衡曲線を求める

(3) 原始惑星系円盤を想定し、重力不安定の非線形発展を明らかにしつつ、重力乱流が駆動する降着円盤の熱平衡曲線を求める

3. 研究の方法

(1) 概要

独自に開発を行ってきた輻射磁気流体力学計算コードに、新たに自己重力を扱うモジュールを開発する。これを用いて、降着円盤の局所内部構造をシアリングボックス近似(後述)のもとで再現し、準定常状態(熱平衡解)における面密度 Σ とエネルギー流束 F の関係、すなわち、熱平衡曲線を求める。計算は、JAMSTEC・国立天文台天文シミュレーションプロジェクト・京都大学基礎物理学研究所が所有する大型並列計算機を併用して進めた。

(2) 詳細

降着円盤のある半径(角速度 Ω)における局所内部構造を再現するために、シアリングボックスと呼ばれる線形化した回転座標系を用いる。支配方程式は流束制限拡散近似を適用した輻射磁気流体力学方程式であり、これを、エネルギー保存するように修正したZEUS法を用いて数値的に解く。輻射輸送部分はマルチグリッド法を用いて時間陰的に解く。状態方程式とオパシティ(輻射拡散係数)に関してはテーブル化してそれを参照する。

(3) 熱平衡曲線を求める具体的な手順

- ① 角速度 Ω を設定したシアリングボックス内に、初期条件として、面密度

Σ に相当するガスと、適当な輻射と磁場を分布させる(輻射と磁場の量は最終的にはセルフコンシステントに決まる)

- ② 乱流の種を与えて時間発展させた結果、(熱時間よりも十分長く乱流が維持される) 準定常状態に落ち着くかどうか調べる
- ③ そのような準定常状態が達成された場合は、ボックスの上下面(円盤表面に相当)から出て行く輻射エネルギー流束 F を測定する

これら一連の作業を、角速度 Ω 、面密度 Σ を変えて繰り返すことで、それら熱平衡解の「集合」としての熱平衡曲線 $F = F(\Sigma; \Omega)$ が得られる。(図 1)

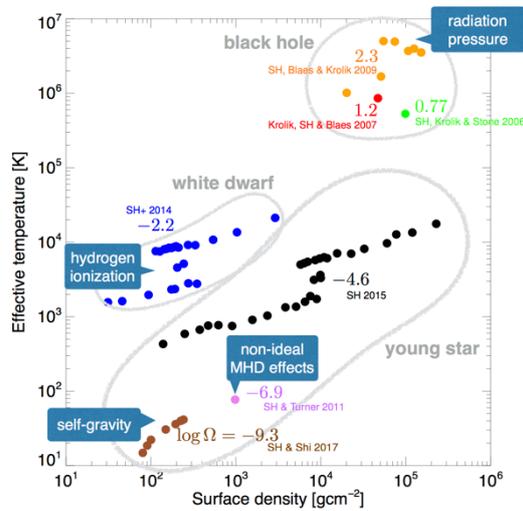


図 1 様々なタイプの降着円盤(色で区別している)に対する熱平衡曲線 $F = F(\Sigma; \Omega)$ 。横軸は Σ 、縦軸は $F = \sigma T^4$ を満たす温度 T (ここで σ はステファン・ボルツマン定数)。数値は $\log \Omega$ [s^{-1}] を表す。

4. 研究成果

(1) 原始惑星系円盤

① 「中心星からの可視光照射を受ける原始惑星系円盤における重力乱流」(Hirose & Shi 2017)

中心星からの可視光照射を含む現実的な熱力学を考慮した輻射流体力学計算を行い、中心星からの距離 50 天文単位における重力不安定の非線形発展を、面密度と照射角をパラメータとして調べた。その結果、ある面密度範囲において準定常的な「重力乱流」状態が維持され、それを超えると分裂・収縮が起きることがわかった。この面密度に関する分裂条件は、重力乱流で実現され得る最低の平均トゥームレ値が 0.7 程度であると解釈できる。一方、平均的な冷却時間ベータ値は 4 程度で面密度に依らず一定であるため、分裂条件には直接関係していない。重力乱流が維持される準定常状態では、熱平衡曲線は、 $F(\Sigma) \sim \Sigma^{7/3}$ と求まった。一方、照射角に関しては、0.32 より大きくならない限り(赤道面近傍で

起こっている) 重力乱流には影響を与えない。② 「中心星からの可視光照射を受ける原始惑星系円盤における重力不安定の非線形発展」(Hirose & Shi in prep.)

Hirose & Shi (2017) を発展させ、中心星からの可視光照射を受ける原始惑星系円盤における重力不安定の非線形発展を、面密度 Σ と中心星からの距離 r をパラメータとして調べた。その結果、非線形発展は、初期に発達する密度波が不安定化する際の局所トゥームレ値によって決まることがわかった。具体的には、その値が 0.2 以下のときに分裂が起き、それ以上では重力乱流が維持される。この分裂条件が満たされるのは、 $r \geq 75$ 天文単位、または、 $\Sigma \geq \Sigma_{0.2}$ の場合である(ここで、 $\Sigma_{0.2}$ は初期のトゥームレ値が 0.2 に相当する面密度)。また、その場合、初期の密度波において音波に対する回転の影響が相対的に弱いことが特徴であることを突き止めた。一方、一旦重力乱流が維持された状態になった場合でも、赤道面近傍での密度変動が大きい場合には、密度塊同士の合体によって局所トゥームレ値が下がることで分裂が起こりうる。また、分裂が起きる際に充分な量のガスが集まる場合には、中心温度が水素分子の解離温度を超えることにより、さらに重力収縮が続くことが明らかになった。

(2) 矮新星降着円盤

① 「磁気乱流による矮新星アウトバースト」(Coleman et al. 2016)

いわゆる円盤不安定モデルは矮新星の光度曲線の再現に成功しているが、その基盤となる熱平衡曲線において「 α モデル」を用いる場合にはアドホックなパラメータ調整が必要である。一方、近年、輻射磁気流体力学計算によって熱平衡曲線を第一原理から求めることが可能になった(Hirose et al. 2014)。そこでは、(従来のアドホックなモデルが熱い解ブランチ全体で高い α 値を仮定したのと異なり) 熱い解ブランチの低温側において選択的に、熱対流によって α 値が上昇する。このような特徴的な α 値の分布を持つ熱平衡曲線が、観測される光度曲線を再現できるか確かめるために、第一原理計算結果を円盤不安定モデルに組み込んでみた。その結果、実際第一原理計算による熱平衡曲線でも観測される光度曲線の特徴を再現可能であることを示した。

② 「降着円盤ダイナモにおける熱対流の影響」(Coleman et al. 2017)

磁気回転不安定性による磁気乱流が駆動する降着円盤では、乱流磁場からコヒーレントな方位角磁場の周期的な反転が生まれるという、いわゆるダイナモ活動が普遍的に見られることが特徴である。ところが、そこに熱対流が存在する場合には、周期的な反転が起きずに同じポラリティが継続することがわかっている(Hirose et al. 2014)。本研究では、この結果を示すシミュレーションデー

タを詳細に解析することにより、熱対流によって上方から逆向きの磁場が赤道面に運ばれてくることを発見した。すなわち、ポラリティの反転が抑制されるのは、このような流体力学的混合によってトロイダル磁場の消失が起こることが原因であることがわかった。このことは、まだ未解明の降着円盤ダイナモのメカニズムに対する手がかりとなる可能性がある。

(3) AM CVn 型星降着円盤

①「AM CVn 型星降着円盤における熱対流」(Coleman et al. 2018)

本研究では、AM CVn 型星の組成（水素をほとんど欠き、ヘリウム主体）に対する状態方程式とオパシティを新たに計算し、それに基づく現実的な熱力学のもとで、AM CVn 型星周囲の降着円盤の構造と安定性を調べた。その結果、研究代表者らが以前行った矮新星降着円盤の場合 (Hirose et al. 2014) と同様に、いわゆる S 字型熱平衡曲線（熱い解ブランチと冷たい解ブランチの双安定）を得、また、熱いブランチの低温側において熱対流が磁気乱流の α 値を強めているという結果を得た。一方、矮新星降着円盤の場合と異なる点として、熱いブランチにおいて熱対流が持続する解が存在すること（矮新星降着円盤の場合は、熱対流は間欠的に起こる）、冷たいブランチ解において理想 MHD が成り立つこと（矮新星降着円盤の場合は、殆どの場合成り立たない）、を発見している。さらに、熱対流が磁気乱流を強める度合いは、ガスの平均分子量と負の相関があることもわかった。

(4) 活動銀河核降着円盤

①「活動銀河核における軟 X 線超過とバルクコンプトン効果」(Kaufman et al. 2017)

輻射圧優勢降着円盤では、乱流やシア流のバルク速度が熱速度を超える。このバルク速度によるコンプトン効果（電子から光子へのエネルギー輸送）が、活動銀河核における軟 X 線超過へどのように寄与するかについて、輻射磁気流体力学計算結果をもとに調べた。その結果、中心天体の質量を 2×10^6 太陽質量、光度をエディントン光度の 2.5 倍と設定すると、ナローラインセイファート 1 型 (NLS1) の天体である RE1034+396 で観測されるスペクトルをうまくフィット出来ることがわかった。さらに、バルクコンプトン効果は一般に、ウィーンテールを高エネルギー側にシフトさせる、ガス温度を下げる、スペクトルを広くする、といった効果を持つことがわかった。また、NLS1 天体の軟 X 線超過の観測からうまくバルクコンプトン効果を分離できた場合、降着円盤乱流の物理に制約を加えることが可能であることも議論している。

②「磁気乱流によるバルク・コンプトン散乱のモデル化」(Kaufman et al. 2018)

これまでの AGN スペクトルに見られる軟 X 線超過をコンプトン散乱によってモデル化する

試みは、コンプトン散乱を起こす媒質と降着円盤との間の整合的な物理的關係に基づくものではなかった。したがって、モデルから求められたパラメータをもとに降着円盤の物理を議論することができなかった。これに対し、Kaufman et al. (2017) で示したように、輻射圧優勢降着円盤におけるバルク・コンプトン散乱については、降着円盤モデルと軟 X 線超過の間の整合的な議論が可能である。本研究では、Kaufman et al. (2017) をさらに発展させ、輻射圧優勢降着円盤の輻射磁気流体力学計算結果に基づいて、バルク・コンプトン散乱による軟 X 線超過の、降着円盤基本パラメータ（質量・光度・半径・ブラックホールスピンの依存性をモデル化した。

(5) 国内外における位置づけとインパクトおよび今後の展望

現実的な熱力学に基づく輻射磁気流体力学計算により、様々な降着円盤の熱力学を「統一的に」議論しているのは研究代表者らのグループのみである。

本研究では、これまでの磁気乱流に加え、新たに重力乱流が駆動する降着円盤の熱平衡曲線を第一原理から構築することが目的であった。これまで、降着円盤の重力不安定の非線形発展に関しては多くの研究がなされているが、可視光照射に加え、現実的なオパシティと状態方程式を採用し、かつ、3次元の輻射流体力学計算に成功したのは本研究が初めてである。実際、降着円盤の重力不安定は、トゥームレ値と呼ばれる無次元量で特徴づけられるが、そこには音速（温度）がパラメータとして入ってくる。したがって、温度を正確に求めることは、重力不安定の非線形発展を追う上で欠かせないが、これまで温度を決定する輻射輸送については単純化した取り扱いをする研究がほとんどであった。そして、そのような取り扱いでは、分裂条件として冷却時間が重要であるという結論が得られていた。

今回、本研究によって、現実的な熱力学に基づいて降着円盤における重力不安定の非線形発展を調べた結果、分裂条件として「局所的なトゥームレ値が 0.2 以下」が得られた。3次元ローカル計算から得られたこの結果が、同様の条件を 2次元グローバル計算から求めた Takahashi et al. (2016) と整合的であることは、ローカル/グローバルあるいは 2次元/3次元によらず、トゥームレ値が降着円盤の重力不安定の非線形発展を決める量として最も重要であることを示している。その意味で、長年議論が続いてきた、重力不安定による降着円盤の分裂条件の問題に最終決着がつけられたと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

① J Kaufman, O M Blaes, S Hirose, A simple

framework for modelling the dependence of bulk Comptonization by turbulence on accretion disc parameters, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 476, 5548-5578, 2018,

DOI:10.1093/mnras/sty540, 査読有

② Matthew S. B. Coleman, Omer Blaes, Shigenobu Hirose, and Peter H. Hauschildt, Convection Enhances Magnetic Turbulence in AM CVn Accretion Disks, The Astrophysical Journal, 857:52 (12pp), 2018,

DOI:10.3847/1538-4357/aab6a7, 査読有

③ Shigenobu Hirose, Ji-Ming Shi, Gravitoturbulence in irradiated protoplanetary discs, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 469, 561-578, 2017,

DOI:10.1093/mnras/stx824, 査読有

④ Matthew SB Coleman, Evan Yarger, Omer Blaes, Greg Salvesen, Shigenobu Hirose, Convective quenching of field reversals in accretion disc dynamos, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 467, 2625-2635, 2017,

DOI: 10.1093/mnras/stx268, 査読有

⑤ Jason Kaufman, OM Blaes, Shigenobu Hirose, The contribution of bulk Comptonization to the soft X-ray excess in AGN, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 467, 1734-1747, 2017,

DOI: 10.1093/mnras/stx193, 査読有

⑥ MSB Coleman, I Kotko, O Blaes, J-P Lasota, S Hirose, Dwarf nova outbursts with magnetorotational turbulence, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 462, 3710-3726, 2016,

DOI: 10.1093/mnras/stw1908, 査読有

⑦ Takashi Minoshima, Shigenobu Hirose, Takayoshi Sano, Dependence of the saturation level of magnetorotational instability on gas pressure and magnetic Prandtl number, The Astrophysical Journal, 808, 54, 2015,

DOI: 10.1088/0004-637X/808/1/54, 査読有

[学会発表] (計 14 件)

① Shigenobu Hirose, 3D radiation hydrodynamics simulations of gravito-turbulence in protoplanetary disks, JpGU-AGU Joint Meeting, 2017

② 廣瀬重信, 原始惑星系円盤における重力不安定の非線形発展, 日本天文学会秋季年会, 2017

③ 廣瀬重信, 中心星の照射を受ける原始惑星系円盤における重力乱流, 日本天文学会秋季年会, 2016

[その他]

ホームページ

<http://www.jamstec.go.jp/mat/j/members/shirose/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣瀬 重信 (HIROSE, Shigenobu)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・主任研究員
研究者番号：90266924

(2) 研究分担者

佐野 孝好 (SANO, Takayoshi)

大阪大学・レーザー科学研究所・助教
研究者番号：80362606