

学 位 論 文 題 名

Study of Two-Dimensional Accretion Disks at the Sub-Eddington Luminosity

(エディントン光度付近の二次元降着円盤の研究)

学位論文内容の要旨

活動的なX線天体、原始星、銀河核など、重力の強い天体周辺に円盤構造が形成され、その円盤が重力エネルギーの解放、エネルギースペクトル形成の点で重要な役割を果たしていることが、この20年間の理論的及び観測的研究により明らかになった。これらの円盤構造に関する研究の多くは、問題の複雑さ、及び解析の困難さより、円盤に垂直な方向の物理量については平均化した値で置き換えた円盤半径方向の一次元近似モデル (Shakura and Sunyaev, 1973) によって調べられてきた。これらのモデルは、激変星のメカニズムの解明など、多くの知見をもたらし、現在でもこの一次元モデルによる研究が行われている。

近年、観測技術の進展によってX線領域や電波領域などで、双極方向に激しいジェットを放出する天体が詳しく観測されており、このような天体は降着円盤を伴っており、中心天体から円盤の垂直方向にジェットを放出している様子が明らかになったものの、ジェットの加速・収束のメカニズムは明らかになっていない。このような天体は、大きな質量降着率 ($\dot{M}$) を持つと期待されているが、理論的な側面からは、円盤の質量降着率が Eddington critical accretion rate ($\dot{M}_E$) 付近や、それ以上になると円盤の厚さが大きくなり、一次元近似のモデルが適用できない、という問題がある。

これらの円盤構造を解析するためには、二次元での解析が不可欠であるが、解析的に二次元構造を求めることは不可能であり、数値計算においても輻射輸送方程式を含み、精度よく効率的に解くことにおいては、コンピュータの性能が飛躍的に向上した現在においてもなお、計算の複雑さや、計算時間が多くかかることなどから、二次元数値計算はそれほど多くないのが現状である。Kley and Hensler (1987), Kley (1989), Kley and Lin (1993) は、二次元粘性流体の数値解法を試み、これら活動的な天体への応用を進めた。彼らの方法は、天体では非常に重要な役割を果たす輻射エネルギーの輸送も基本的に考慮するコードであるが、計算方法において不十分である。そこで、計算方法としては基本的に彼らの方法を踏襲し、かつ連立方程式を解く上でいくつかの改良を含め、輻射エネルギー輸送と結びついた粘性流体のコードの開発を行った。円盤構造を考える上で、角運動量の輸送に不可欠な粘性の導入は、現在もなおその起源は明らかでないが、降着円盤形成の点で当初仮想的に考えられてきた、磁気粘性に起源を求めることができる α モデルを採用した。基本式は、密度、運動量、ガスの内部エネルギー、輻射エネルギー密度に対する6個の偏微分方程式で構成される。これらの偏微分方程式は差分式に置き換えられ、適切な初期条件、境界条件の下に円盤及び周辺の物理状態の時間変化が調べられ

る。ここで用いる差分法は、陽的差分法、陰的差分法とが混在したものである。陽的差分法では、Courant 条件によって時間ステップを大きくとることができないだけでなく、粘性項、エネルギー式の段階での解の安定性について多くの問題が生じるため、これらの段階では陰的差分法を採用した。陰的差分法では、大規模な一次元連立方程式を解く必要があり、精度よく、また効率的に解を得るために新たにコードを開発し、適用した。

このように開発されたコードを用いて、中心天体が中性子星であり、質量降着率が $\dot{M}_E$ 近辺での降着円盤構造を解析した。中性子星周辺に形成される降着円盤は、radiation pressure 及び electron scattering が優勢であるが、このような円盤は粘性に α モデルを採用した場合は熱的に不安定であることがいわれてきた (Shakura and Sunyaev 1976, Hoshi 1979)。しかし、 $\dot{M}_E$ 程度の質量降着率を持つ円盤に対し、円盤内部の advection によってエネルギーが運ばれ、定常な解を持つ *slim accretion disk* の存在が Abramowicz et al. (1988) によって明らかになった。

この研究の目的は、中性子星周辺に形成される降着円盤に対して、このように安定な *slim accretion disk* が現実 to 得られるか、またそのような円盤はどのような特徴を持つのかを解明し、 $\dot{M}_E$ 近辺での降着円盤構造を求めることである。さらに、具体的な応用として、X線天体 SS433 への適用を試みた。

SS433 では、光速の 0.26 倍という高速な X 線ジェットが 10^{12} cm 以上もの長さにわたって放出されており、その中心天体はブラックホールか中性子星であるか明らかになっていない。

中性子星は半径を 10^7 cm, 1.4 太陽質量とし、計算領域は中心天体の 10 倍程度の赤道面と回転軸とで囲まれる四分半円とした。初期条件として円盤領域は Shakura and Sunyaev (1973) より得られる円盤構造を用い、円盤周辺領域は光学的に薄い希薄なガスで満たした。円盤最外縁から $\dot{M} = 2.0 \dot{M}_E$, $0.5 \dot{M}_E$ のガスを流し込み、適切な境界条件の下で時間変化を計算した。得られた結果は以下の通りである。

1. Radiation pressure 及び electron scattering が優勢な、熱的に安定・準定常な円盤構造が得られた。この円盤は、advection によって運ばれる熱エネルギーが輻射によるエネルギーの放出に匹敵する状況であり、*slim accretion disk* に属するものである。
2. 得られた円盤は対流に対して不安定であり、全体にわたって convection が発生している。特に、円盤内側では、円盤赤道面から円盤表面まで convection cell が伸びている。これは対流現象が円盤垂直方向のエネルギー運搬メカニズムに重要な役割を果たしていることを示している。
3. 円盤垂直方向の物理量の変化が無視できない程に幾何学的に厚い、光学的に厚い円盤が得られ、円盤の角速度は、非常に狭い中心星と円盤の境界層を除いて、ケプラー速度を示す。
4. 回転軸方向に沿って、非常に高温・希薄、光学的に薄い高速のジェットが形成され、このジェットは輻射圧によって加速されており、光速の 0.3 倍の速さを持つ。また、計算されるエネルギーフラックスと SS433 の観測で得られている値とよい相関を示している。本研究では、ジェットの根元の狭い領域を考えているため、断定はできないものの、SS433 が、 $\dot{M}_E$ をはるかに上回る質量降着率を持った中性子星と降着円盤とで形成されている可能性があることを示しているものである。

学位論文審査の要旨

主査	教授	藤本正行
副査	教授	河本昇
副査	助教授	加藤幾芳
副査	助教授	兼古昇
副査	助教授	羽部朝男

学位論文題名

Study of Two-Dimensional Accretion Disks at the Sub-Eddington Luminosity

(エディントン光度付近の二次元降着円盤の研究)

降着円盤は、重力源である中心天体に角運動量をもったガスが流入するとき、中心天体の周縁に形成される。この降着円盤は、重力エネルギーの解放の基本的な装置として、銀河の中心核から近接連星系の X 線源や矮新星、原始星などに至る活動的な天体で、遍く重要な役割を果たしていると考えられている。降着円盤の構造、エネルギー解放機構の研究には、その複雑さのため、従来、円盤は幾何学的に薄く、局所的な重力エネルギーの開放と輻射による放出が釣り合うという仮定のもとに、動径方向の物理量の変化だけを記述するという近似を採用した、標準円盤モデルが利用されてきた。しかし、降着率が、降着ガスが中心天体に到達したときに開放される全重力エネルギーが輻射で運ばれるとしたときの上限＝エディントン光度に対応する臨界値に近づいた時、また、中心天体がコンパクトで円盤内で輻射圧がガス圧に比して優勢になる場合には、標準円盤モデルは熱的な不安定を引き起こし、幾何学的に厚くなり、仮定が破れることが指摘されてきた。また、観測的にも、近年の技術進展によって、円盤に垂直方向に放出されるジェット等、標準理論の枠組みでは理解できない現象が明らかにされている。これらのことは、標準理論を超えて、動径方向のみならず、円盤に垂直方向も考慮した 2 次元の構造解析の必要性を示唆している。しかしながら、この問題では、粘性流体力学の方程式と、輻射によるエネルギー輸送を同時に解かねばならないが、これらの緩和時間は大きく異なるため、数値計算技術の面からも、難しい課題であり、これまで、研究はそれほど多くはない。特に、輻射圧が優勢になる場合の数値的な解は、未だ、手がけられない。

本研究では、上記に述べた輻射が優勢になる場合に当たる、近接連星系の X 線源天体のモデルである、中性子星にエディントン限界付近の高降着率でガスが降着す

る場合の降着円盤の構造について、数値的な解法を試みている。このため、これまで、試みられていた扱いを改良し、流体力学的な構造と輻射輸送を、それぞれ、陽解法と陰解法で扱うことによって、数値な解を求める輻射・流体力学的な数値計算コードを開発し、降着円盤の構造、流れの様子、エネルギーの輸送機構を求めることに成功している。結果は、降着率がエディントン限界以上の場合では、円盤内部でのエネルギー輸送は、対流によって支配され、また、円盤の上方から動径方向外向きにガス流吹き出し、また、回転軸に沿ってジェットが噴出することによって、輻射放出はエディントンの限界光度以下に留まる構造になることを示した。これは、エディントン限界降着率近傍で、開放された重力エネルギーがガスの運動によって運ばれるとしてその存在が予言されていた、スリム・ディスクのモデルの構造を具体的に求めた最初の計算である。この計算結果は、観測との関連では、光速の0.3倍のジェットが、差し渡し 10^{12} cm にわたってX線で観測されているSS433天体への適用の可能性が示唆されている。

以上に述べた意味で、この研究は、降着円盤を研究するための数値計算のコードを開発し、中心星が中性子星の場合について、モデルを数値解を求めることによって、降着円盤の構造、その重力エネルギー解放機構としての役割について、理論的な理解を進め、活動的な天体現象の解明に大切な寄与をなしたと判断される。よって、著者は、北海道大学博士(理学)を授与される資格があるものと認める。