

学 位 論 文 題 名

3D SPH Simulations of Accretion Flow
around the Neutron Star in Be/X-Ray Binaries(Be/X 線連星系における中性子星周囲の降着流の
3 次元 SPH シミュレーション)

学位論文内容の要旨

宇宙における恒星の 7 割以上が連星または多重星を成している。連星とは、二つの恒星が重力相互作用によって互いに引き合いながら周期運動をする系であり、それらのなかには様々な活動現象を示すものがある。なかでも X 線連星系は、中性子星またはブラックホールと伴星から成り、激しい X 線放射現象を示す。これらの現象は、中性子星やブラックホールなどの強重力源が伴星からガスを引き込む(降着)ことによって、ガス円盤(降着円盤)を形成し、重力エネルギーを X 線として解放することで起こる。したがって、X 線連星系における様々な活動現象は、伴星からのガスの輸送過程や降着円盤の構造に大きく依存する。天体現象のエネルギー源は主に核エネルギーと重力エネルギーがあり、活動銀河中心核や X 線連星系等に見られる強重力源と降着円盤の組み合わせは重力エネルギーの効率的な解放機構を担う。したがって、X 線連星系における様々な X 線活動の機構を解明することは宇宙物理学において最重要課題の一つとなっている。

一般に、X 線連星系は伴星の質量が $1M_{\odot}$ 以下の低質量 X 線連星系と、 $10M_{\odot}$ 以上の大質量 X 線連星系の 2 種類に分かれる。特に、Be/X 線連星系は大質量 X 線連星の中でも最大のグループを構成し、B 型輝線星(Be 星)とその周囲を取り囲むガス円盤(Be ガス円盤)、及び中性子星からなる連星系であり、軌道は広く離心率は大きい。Be/X 線連星系は、周期的な X 線増光現象(Type I X 線アウトバースト)と非周期的大規模 X 線増光現象(Type II X 線アウトバースト)の 2 種類の間欠的な X 線増光現象を示し、いずれも Be ガス円盤からガスが中性子星へ降着することに起因する。低質量 X 線連星系と異なり、Be/X 線連星系は伴星である Be 星自身のガスではなく Be ガス円盤から中性子星へ物質が輸送される。さらに、連星の軌道は円ではなく楕円であるため、ガスの輸送機構は低質量 X 線連星系に比較してよりいっそう複雑なものになる。したがって、中性子星へのガスの降着過程を解析的に解くことは困難であり、数値シミュレーションこそが有効である。加えて、Be ガス円盤から中性子星へと輸送されるガスは角運動量を持つために中性子星周囲に降着円盤を形成すると期待されるが、その降着過程の詳細はよく分かっていない。

本研究では、時間変動する質量輸送を考慮し、Be 星の軌道運動は時間変動する外場ポテンシャルと仮定して三次元 SPH(Smoothed particle hydrodynamics)法(Bate et al. 1995)を用いて中性子星周囲の降着流を調べた。ところで、系のサイズを a とすると中性子星のサイズは $\sim 10^{-7}a$ であり、7 桁も異なる領域の構造を解像することは、現在の計算機では不可能である。そこで、計算領域を中性子星の重力圏内に限定するために Okazaki ら(2002)の求めた Be ガス円盤から中性子星重力圏への質量輸送率を境界条件として用いた(図 1 右)。また、内部境界としての中性子星半径は中性子星表面よりもずっと大きいが中性子星への降着率を十分な精度で計算できる程度には小さくした。

SPH 法とは、粒子法の一つで、宇宙物理学における非軸対称問題を解くために考案された(Lucy 1977; Gingold & Monaghan 1977)。SPH 法では、流体を広がりのある粒子の集合とみなし、物理量は SPH 粒子の存在する点で代表する。さらに、任意の位置での物理量は周辺に存在する SPH 粒子からの寄与によって決定される。格子法に対して有利なのは、計算可能な動的領域が広く、境界条件の設定も容易であるという点である。本研究の計算可能な動的領域と適切な境界条件の設定から考えると、SPH 法はその特徴を生かす意味で最適な数値計算方法である。

シミュレーションに用いたモデルは、Okazaki et al. (2002)と同じく Be/X 線連星系の中でも軌道周期が短く(周期: $P_{\text{orb}} = 24.3$ 日、軌道長半径: $a = 6.6 \times 10^{-12}$ cm)、比較的離心率の小さい($e = 0.34$)典型的な天体である 4U 0115+63 の軌道要素を用いた。この系では Type II X 線アウトバーストは示すが、Type I X 線アウトバーストは示さないという特異な系であることが観測によって分っている。一般に、中性子星周囲の降着流は重力エネルギーによって加熱され、放射によってエネルギーを失う。このエネルギー収支の過程をポリトロップ方程式の導入によって近似した。また、降着円盤では乱流に起因する粘性によって角運動量が輸送されると仮定した。この降着円盤モデルの進化と構造はシャクラ・スニアエフの粘性パラメーター(Shakura & Sunyaev 1973)によって特徴づけられる。本研究では、ポリトロップ指数、乱流粘性などの物理パラメーターと計算の正当性を評価するために SPH 粒子数及

び内部境界を変えて8通りの計算をそれぞれ10周実行した。
シミュレーションの結果、以下のことを明らかにした。

(a) Be 星ガス円盤から流入するガスが中性子星の周囲に非定常降着円盤を形成することが分かった (図2)。降着円盤の方位角方向の速度は軌道位相に依存せずほぼケプラー回転している、一方で動径速度は著しい連星軌道位相依存性を示す。近星点近傍においては円盤の外縁部で超音速になり、他の軌道位相では円盤全域に渡って亜音速にな

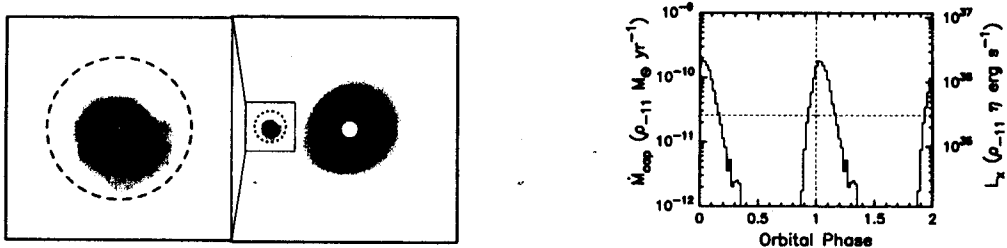


図1: Be/X 線連星の概念図 (左図) と質量輸送率の連星軌道位相依存性 (右図)。点線で描かれた円は中性子星の有効重力半径を示す。左図の右側のパネルは、近星点で Be 星ガス円盤の外縁部からガスが中性子星の有効重力半径内に輸送される様子を示している (Okazaki et al. 2002)。中央の白丸は Be 星、その周囲に Be ガス円盤、四角で囲まれた領域は、本研究によって中性子星周囲に非定常降着円盤が形成される様子を示した図。左側のパネルは、右パネルの四角で囲まれた領域の拡大図。右図において、左側の軸は質量輸送率に対応する X 線光度を示している。 ρ_{-11} は Be ガス円盤中の最大密度を典型的な値 ($10^{-11} \text{ g cm}^{-3}$) で規格化した量。 $\eta = 1$ は降着率からのエネルギー変換率を表す。

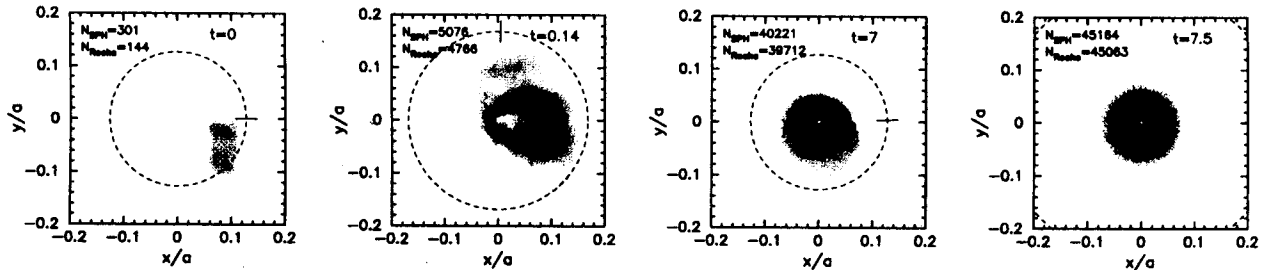


図2: 中性子星周囲の降着流のスナップショット。左から一番目の図はシミュレーションの初期状態、左から二番目の図は円環状に中性子星へと降着していく様子、それ以外の二つの図は7周目の近星点と遠星点での降着円盤の図を表している。 t は軌道周期で規格化した計算時間を表す。点線で描かれた円は中性子星の有効重力圏を示している。 N_{SPH} は SPH 粒子数を表し、 N_{Roche} は有効重力圏内に入った SPH 粒子数を表す。

る。このため、近星点近傍では降着円盤の外縁部は盛り上がる。また、降着円盤は、近星点通過後に収縮し、遠星点に向かって膨張する。これは、粘性によって外側に広がろうとする降着円盤に対して、逆向きのトルク (共鳴トルク) が近星点で最も強く働くためである。このことから、この現象は離心楕円軌道連星における降着円盤に特有のものであることが分かった。

(b) 中性子星周囲の降着流の進化が、降着円盤の形成過程と形成後の二段階に分かれることが分かった (図3 (a))。進化の第一段階は、初期のリング構造から、粘性によって広がって降着円盤の形成へと向かう (図2)。第二段階は、Be ガス円盤からの質量輸送によって降着円盤に物質が蓄積されて成長していく段階である。

(c) Be ガス円盤から中性子星重力圏への質量輸送率は近星点でピークを持つが (図1 右)、中性子星への降着率は近星点通過後と遠星点手前の2個所でピークを示すことが分った (図3 (a))。一つ目のピークは Be 星による共鳴トルクによって円盤全体が収縮することによる降着率の増加であり、二つ目のピークは粘性による降着率の増加を示している。シミュレーションの内部境界を通過した物質がすべて中性子星へ降着すると仮定すると X 線光度は $\sim 10^{35} \text{ erg/s}$ になる。しかし、図3 (b) に見られるように、降着流から得られた中性子星の磁気半径が中性子星の共回転半径の外側に位置することから、この系では降着流が中性子星に到達することができないことが分かる。このことは、この系 (4U 0115+63) では通常時における X 線活動は見られないという観測結果を説明する。

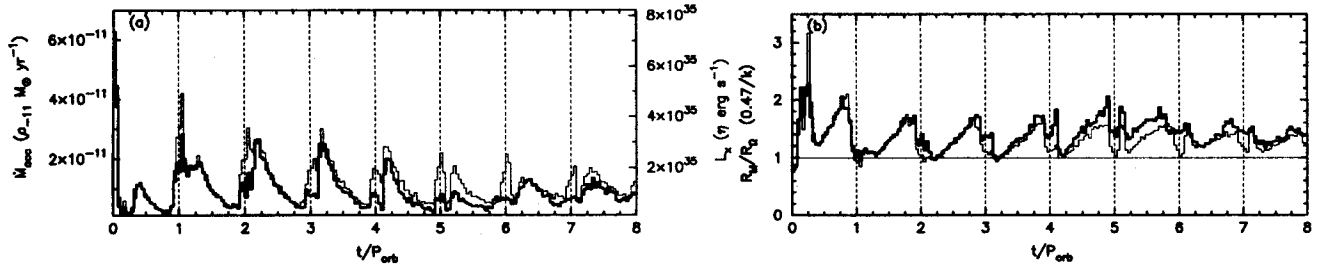


図 3: 降着率と磁気半径の時間発展。図 (a) は、降着率と降着率に対応する X 線光度を表している。線の太さは内部境界条件の違いを表す。太い線は中性子星の半径を $r_{\text{in}} = 3.0 \times 10^{-3} a$ 、細い線は $r_{\text{in}} = 5.0 \times 10^{-3} a$ とした場合の計算結果を表す。図 (b) は中性子星の共同回転半径で規格化した磁場半径を表す。線の太さの定義は上記と同様。

学位論文審査の要旨

主査	教授	藤本正行
副査	教授	加藤幾芳
副査	助教授	兼古昇
副査	教授	羽部朝男
副査	助教授	根本幸児
副査	教授	小笹隆司
副査	助教授	岡崎敦男（北海学園大学工学部）

学位論文題名

3D SPH Simulations of Accretion Flow around the Neutron Star in Be/X-Ray Binaries

(Be/X 線連星系における中性子星周囲の降着流の
3次元 SPH シミュレーション)

Be/X 線連星系は、間歇的に X 線を放射する天体であり、輝線を伴う B 型星と中性子星からなる系と考えられている。X 線の発生機構としては、前者の星周円盤から後者への中性子星へ流入したガスが、中性子星表面へ降着に伴う重力エネルギーの解放によるものと考えられている。流入したガスは中性子星の周りに降着円盤を形成すると考えられるが、この系は楕円軌道であるため、ガスの流入率が時間変動し、また、Be 星による潮汐力も周期的に変動、複雑な挙動を示すことになる。重力エネルギーは核エネルギーと並んで天体現象のエネルギー源であり、その解放機構の解明は天体物理学の基本的な課題であるが、Be/X 線の天体は、最近、X 線衛星の観測の進展によって、その振る舞いが明らかになり、重力エネルギー解放機構の解明に重要な手がかりを与えると期待されている。

本研究は、Be/X 連星系で中性子星の重力圏内に流入したガスの運動を解き、観測との比較を通して、重力エネルギーの解放機構である降着円盤の構造と進化を明らかにし

ようとするものである。この場合、時間変動するガスの流入率、および、外場のもとでの降着流という複雑な問題を解くことになり、手段としては数値計算を用いることになる。著者は、3次元粒子法 (SPH) の計算コードをこの問題に適用できるように改造し、中性子の重力圏内で流入ガスがどのように中性子星へ降着していくかを調べた。その結果、粘性の時間尺度くらいで降着円盤が形成されること、降着円盤のなかでガスの一部は角運動量を失って中性子星表面へ降着していくこと、中性子星へのガスの流入率と中性子星表面への降着率の関係を求めたこと、また、潮汐相互作用による角運動量の輸送は力学的であるのに対し、ガスの流入率による変動は粘性による角運動量輸送を通しておきるため、中性子星のガスへ降着率は、近星点通過と軌道半ばの2つのピークを持つことを明らかにした。

これまでの降着円盤の研究では、定常的な場合については研究されてきた。しかし、非定常降着円盤に関しては、先行研究が少なく、特に、Be/X 線については、最初の研究である。本研究では扱ったのは、まだ、少数の例ではあるが、この研究を通して、その形成、構造、進化に関して新しい知見を得た。これは、今後、Be/X 線星の解明のみならず、および、降着円盤の研究の発展方向への展望を与えることに大きく貢献するものと考えられる。

よって、著者は、北海道大学博士 (理学) の学位を授与される資格あるものと認める。