

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：30107

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03619

研究課題名（和文）星周円盤を持つ大質量X線連星系に見られる新しいタイプの降着流

研究課題名（英文）A new type of accretion flow in high-mass X-ray binaries with circumstellar disks

研究代表者

岡崎 敦男 (Okazaki, Atsuo)

北海学園大学・開発研究所・特別研究員

研究者番号：00185414

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：大質量X線連星系の最大グループであるBe/X線連星系は、Be星と呼ばれる星周円盤を持つ恒星と中性子星の連星系である。本研究では、星周円盤が連星軌道面に対して傾いている場合に生じる降着流のシミュレーションを行い、Be星星周円盤がほぼ連星軌道の短軸まわりに大きく傾いている場合に、近星点の前と後に起こる2つの降着流が衝突することにより、降着流の方向が軌道周期に同期した歳差運動を示すことを見いだした。また、星周円盤が連星軌道面に対して傾いている場合にBe星恒星風が降着流に及ぼす影響を調べ、多くのBe/X線連星系で静穏時には降着流が恒星風により剥ぎ取られてしまう可能性が高いことを見いだした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、X線連星系の主要グループの1つであるBe/X線連星系において、星周円盤が軌道面に対して傾斜している場合に生じる複雑な相互作用を明らかにした点にある。特に、星周円盤が軌道面に対して傾斜している場合に生じる降着流の挙動を3次元シミュレーションにより調べ、傾斜した円盤が降着流の早い歳差運動を引き起こすことを見いだした。この発見は降着流の物理に対する新しい理解をもたらすものである。また、恒星風が降着流に与える影響を定量的に評価し、多くのBe/X線連星系で恒星風が降着流を剥ぎ取る可能性が高いことを示した。これにより、降着流と恒星風の相互作用について新たな知見を提供した。

研究成果の概要（英文）：The Be/X-ray binary systems, the largest subgroup of high-mass X-ray binaries, consist of a neutron star and a Be star, which is a massive star with a circumstellar disk. In this study, we performed simulations of the accretion flow that occurs when the circumstellar disk is tilted relative to the binary orbital plane. We discovered that when the Be star's circumstellar disk is significantly tilted around the minor axis of the binary orbit, the two accretion flows occurring before and after periastron collide, causing the direction of the accretion flow to exhibit precession synchronized with the orbital period. Additionally, we examined the impact of the Be star's stellar wind on the accretion flow when the circumstellar disk is inclined relative to the orbital plane. Our findings suggest that in many Be/X-ray binary systems, the accretion flow is likely to be stripped away by the stellar wind during quiescent phases.

研究分野：天文学

キーワード：恒星風 降着円盤 X線連星

1. 研究開始当初の背景

大質量星とコンパクト天体（中性子星あるいはブラックホール）からなる大質量 X 線連星の最大グループは Be 星（星の周囲に星周円盤を持つ大質量星）と中性子星の連星系である。これら Be/X 線連星系は一般に大きな軌道離心率を持ち、その X 線放射は Be 星星周円盤のガスが接近した中性子星に捕獲されることにより生じ、突発的な X 線増光（アウトバースト）の形を取る。

Be/X 線連星系では X 線アウトバーストが近星点からずれた位相で起こることも多い。このことから、多くの Be/X 線連星系で、星周円盤が連星軌道面に対して傾斜していることが予想されている。一般に、星周円盤が傾いた系では、降着流の角運動量ベクトルは連星の軌道ベクトルと異なる角度をなすことが予想される。しかし、これまでの理論研究のほとんどは星周円盤が連星軌道と共平面をなす場合に対して行われており、傾斜した系の降着流についてはほとんどわかっていなかった。

2. 研究の目的

傾斜した星周円盤を持つ Be/X 線連星系における降着流の構造について次の 2 つの項目について調べる事が本研究の目的である。

(1) 大きな角度で起こる早い歳差運動機構の解明

本研究代表者は、最近、Be 星星周円盤が軌道面に対してある角度をなしている場合に、コンパクト天体（中性子星）の周囲につくられる降着円盤の方向が連星軌道周期で大きく歳差運動する現象を 3 次元数値シミュレーションにより見いだした。このような降着流が発見されたのははじめてのことであり、その構造や降着の物理を解明することは降着流の物理に関して新しい理解をもたらすので重要である。

(2) Be 星の恒星風が降着流に及ぼす影響の定量的評価

傾斜した星周円盤を持つ Be/X 線連星系では、中性子星への降着流に Be 星の恒星風が直接吹き付けるといふ、他の X 線連星系では起こらない状況が生じる。本研究では、そのような状況での恒星風と降着流の相互作用を理解するための第一歩として、恒星風の影響のもとで降着流が存在できる条件を求め、そして、得られた条件をいくつかの Be/X 線連星系に適用して、観測される特徴との比較を行う。

3. 研究の方法

(1) 3 次元数値シミュレーション

一般に、傾いた星周円盤とコンパクト天体の相互作用は複雑である。星周円盤はコンパクト天体から周期的な潮汐トルクを受けるだけでなく、古在・Lidov 機構により星周円盤の離心率が長い時間尺度で変動する (Martin et al., 2014)。さらに、Be/X 線連星系は軌道の離心率も大きい。そのような系における星周円盤とコンパクト天体の相互作用は本質的に非定常かつ非線形である。これらの現象を調べるために 3 次元流体シミュレーションを実施する。

(2) 解析的アプローチ

傾斜した星周円盤を持つ Be/X 線連星系における恒星風と降着流の相互作用を理解するための第一歩として、恒星風の影響下で降着流が存在できるための条件を、解析的なモデルを用いて導く。

4. 研究成果

傾斜した星周円盤を持つ Be/X 線連星系における降着流の構造について以下の成果を得た。

(1) 大きな角度で起こる早い歳差運動

一般に、星周円盤が大きく傾いている場合には、コンパクト天体による星周円盤ガスの捕獲が近星点の前後で 1 回ずつ起こるが、そのようにして捕獲されたガスが全体としてどのような降着流をつくるの

かはわかっていなかった。本研究では、Be 星周円盤が軌道面から大きく傾いている場合の中性子星への降着流の構造を 3 次元数値シミュレーションで調べた。シミュレーションは約 10^6 個の SPH 粒子を用いて行った。観測的によく調べられている A0535+262 ($25M_{\odot}$ の Be 星と $1.4M_{\odot}$ の中性子星の連星系。軌道周期 ~ 110 日、軌道離心率 0.47) をターゲット天体として、星周円盤の角度を何通りか変えてシミュレーションを実施した。その結果、Be 星周円盤がほぼ連星軌道の短軸まわりに大きく傾いている場合に、降着流の方向が軌道周期に同期して大きく歳差運動する現象が見られた (図 1)。この大きな角度で起こる早い歳差運動は近星点の前と後に起こる 2 つの降着流が衝突することにより生じる現象である。他の角度の場合には、これほどはっきりした方向の変化は見られなかった。

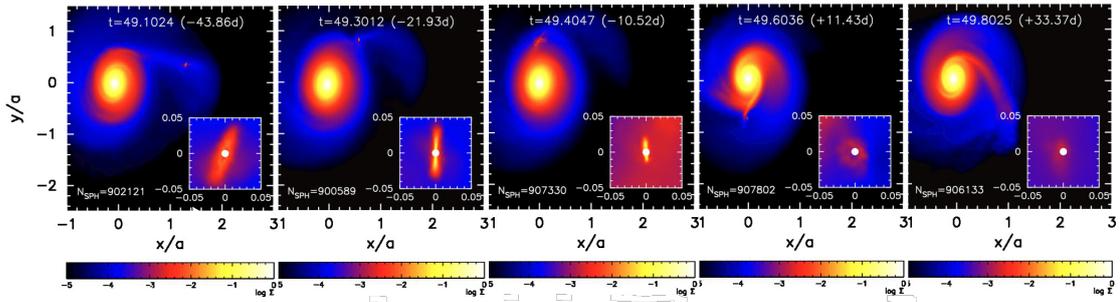


図 1 軌道面に対して 45° 傾斜した星周円盤を持つ Be/X 線連星系の降着流に見られる軌道位相に同期した歳差運動。5 つの異なる軌道位相に対して、軌道面に垂直な方向の面密度が、連星系全体と中性子星周囲の降着流 (挿入図) に対して表示されている。軌道位相は左から -0.4 , -0.2 , -0.1 , 0.1 , 0.3 。近星点は x 軸の負方向にある。

(2) Be 星恒星風が降着流に及ぼす影響

Be 星恒星風の降着流に対する効果を調べるために、恒星風と降着流のそれぞれに対して標準的な解析モデルを用い、両者の圧力 (恒星風の場合はラム圧) を比較した。具体的には、恒星風のモデルでは β 則と呼ばれる速度分布を仮定し、質量放出率は Björklund et al. (2021) のモデル計算結果を用いた。降着円盤のモデルとしては、標準降着円盤と移流優勢円盤の解 (例えば Kato et al., 2008) を代表的な降着モードとして採用した。そして、降着流外縁でのガス圧がその場所の恒星風のラム圧よりも大きい時にのみ降着流が存在できると仮定した。その条件を表したのが図 2 の縦軸 \dot{M}_{crit} である。図では 14 個の Be/X 線連星系のそれぞれに対して、標準降着円盤の場合と移流優勢円盤の場合に、どれだけの降着率が必要かを示している。比較のために、図 2 には中性子星磁気圏の回転による遠心力が降着を妨げる効果 (プロペラ効果) を乗り越えて降着するために必要な降着率 (\dot{M}_{gate}) も示した。両者を比較することで、各系で降着を妨げる主要な機構をすることができる。

図 2 から、いくつかの系では従来の考え通り中性子星磁気圏の回転によるプロペラ効果で説明できるが、多くの

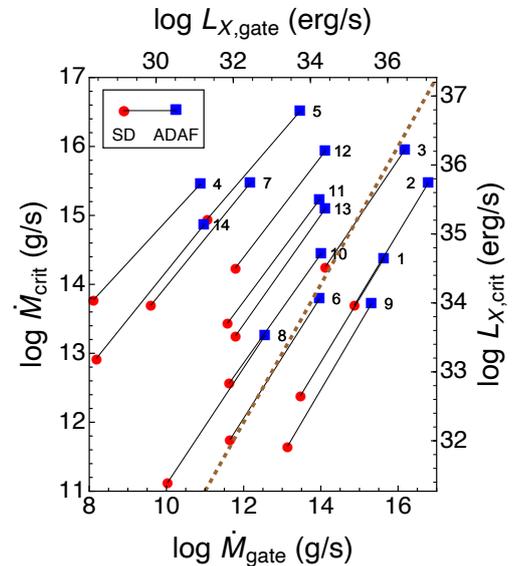


図 2 個々の系に対して中性子星磁気圏を超えて降着するために必要な降着率 (\dot{M}_{gate}) と恒星風の影響のもとでの降着に必要な降着率 (\dot{M}_{crit}) を、標準降着円盤 (SD) と移流優勢円盤 (ADAF) の場合に示したもの。破線より上にある系では恒星風効果が磁気圏効果よりも強い。

系で降着を妨げているのは恒星風による降着流の剥ぎ取りであることがわかる。この（これまで全く考えられていなかった）結果を検証するため、および恒星風-降着流相互作用のより詳細な振る舞いを調べるために、2つの系に対して3次元数値シミュレーションを行い、その結果について現在解析中である。

参考文献

Björklund, R., Sundqvist, J. O., Puls, J., & Najarro, F. 2021, *A&A*, 648, A36

Kato, S., Fukue, J., & Mineshige, S. 2008, *Black-Hole Accretion Disks — Towards a New Paradigm*
— (Kyoto University Press (Kyoto, Japan))

Martin, R. G., Nixon, C., Lubow, S. H., et al. 2014, *ApJL*, 792, L33

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Moritani, Y., Kawachi, A., Okazaki, A.T., 他	4. 巻 75
2. 論文標題 Novel application to estimate the mass-loss and the dust-formation rates in O-type gamma-ray binaries using near-infrared photometry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 607-618
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psad022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawachi, A., Moritani, Y., Okazaki, A.T., 他	4. 巻 73
2. 論文標題 Near-infrared brightening around the periastron passages of the gamma-ray binary PSR B1259-63 / LS 2883	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 545-551
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 岡崎敦男
2. 発表標題 Collision between the stellar wind and the accretion disk in misaligned Be/X-ray binaries
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsuo Okazaki
2. 発表標題 Periodic variations in the accretion disk orientation in misaligned Be/X-ray binaries
3. 学会等名 Be/X-ray Binaries Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡崎敦男
2. 発表標題 Understanding Optical and Near-Infrared Variability during the Periastron Passage of the Gamma-Ray Binary PSR B1259-63: Insights from 3D Simulations
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡崎敦男
2. 発表標題 Inhibition of Accretion by the Stellar Wind in Misaligned Be/X-ray Binaries
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Atsuo Okazaki
2. 発表標題 Be stars and disks
3. 学会等名 Variable Galactic Gamma-Ray Sources VI (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Atsuo Okazaki
2. 発表標題 Inhibition of Accretion by the Stellar Wind in Misaligned Be/X-ray Binaries
3. 学会等名 3,2,1: Massive Triples, Binaries and Mergers 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------