

機関番号：30107

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540236

研究課題名 (和文) TeV ガンマ線連星系における衝突恒星風モデルと降着モデルの評価

研究課題名 (英文) Colliding-Wind vs. Accretion Models for TeV Gamma-ray Binaries

研究代表者

岡崎 敦男 (OKAZAKI ATSUO)

北海学園大学・工学部・教授

研究者番号：00185414

研究成果の概要 (和文)：超高エネルギーガンマ線を放射する連星系の示す複雑な活動性の起源を統一的に理解するために、性質の異なる3つの超高エネルギーガンマ線連星系に対して、衝突恒星風モデルと降着モデルに基づく3次元数値シミュレーションを行った。詳細なシミュレーションの結果、それぞれの系における相互作用の3次元非定常構造が、これまでにない精度で明らかになった。また、Be星をもつ連星系では、Be星ガス円盤の密度が系の振る舞いに大きな影響を及ぼすことを見出した。

研究成果の概要 (英文)：We carry out 3-D numerical simulations of three very-high-energy gamma-ray binaries with different system and observational characteristics in order to have a unified view/understanding of the origin of various complicated activity in these gamma-ray binaries. Our simulations reveal 3-D time-dependent interaction features in unprecedented details. In systems with Be stars, the interaction structure strongly depends on the density of the Be disk.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：理論天文学、ガンマ線天文学、大質量連星系、数値シミュレーション、Be星、恒星風、高エネルギー放射

1. 研究開始当初の背景

近年、世界各地にチェレンコフ光望遠鏡アレイが建設され、ガンマ線天文学は本格的なイメージング観測時代へと入った。それに伴い、多くの天体が高エネルギーガンマ線を放

射していることが明らかになってきた。特に、最近では超高エネルギーガンマ線 (TeVガンマ線。1TeV=10¹²eV) を放射する天体が、高エネルギー粒子加速の現場として注目されてい

る。それらの天体の多くは活動銀河核と超新星残骸・パルサー 星雲であるが、連星系からも TeVガンマ線が検出されている。

本研究開始時点で、持続的にTeVガンマ線を放射している連星系は3天体 (PSR B1259-63, LS I +61 303, LS 5039) あり、それらはいずれも大質量星(10太陽質量以上の星)とコンパクト天体からなる連星系である。これらのうち2つの系 (PSR B1259-63とLS I +61 303) がBe星 (星の周囲にガス円盤を持つ大質量星) を持ち、1つの系が0型星を持つ。後述のように3つの系はそれぞれ性質が異なるので、これらの天体における相互作用を明らかにすることは、高エネルギー粒子加速機構の多様性を理解する上で重要である。

残念ながら、現状では、これらのTeVガンマ線連星系における相互作用はほとんど解明されていない。3つの系のうちコンパクト天体の性質が明らかになっているのはPSR B1259-63(パルサー) だけであり、他の2つの系 (LS I +61 303 と LS 5039) では、コンパクト天体が中性子星なのかブラックホール なのか解っていない。コンパクト天体の性質が解っていない系では、衝突恒星風モデル [パルサー風とBe星 (円盤状のガスを持つ大質量星) または0型星の恒星風の衝突] と降着モデル (Be星ガス円盤または0型星恒星風のブラックホールへの降着) が提案されているが、決着がつかない。さらに、TeVガンマ線連星系では連星軌道の離心率が大きく、しかも Be星を持つ系では Be星ガス円盤との相互作用も考慮する必要があるため、相互作用が非常に複雑であり、このことも信頼に足る動的モデルの構築を妨げている。

2. 研究の目的

研究の最終的なゴールは、超高エネルギーガンマ線 (TeVガンマ線) 連星系の示す複雑な活動性の起源を統一的に理解することである。

性質の異なる個々の天体の研究を通して、なぜある天体で重要な物理が別の天体では重要ではないのか、またそれらの物理がどのようにTeVガンマ線を含めた放射へとつながっているのかということを経験的に理解したい。そのためには、(1) 個々の天体において重要な相互作用(恒星風の衝突、Be星ガス円盤からの降着、Be星ガス円盤とパルサー風の衝突など)を考慮した3次元数値シミュレーションを行い、(2) シミュレーションのデータと粒子加速等のモデルを使って電波からTeVガンマ線までの多波長スペクトルと光度曲線を求め、(3) それらを観測と比較することが必要である。

本研究の目的は、上記全体構想の1番目、個々の天体の複雑な相互作用を3次元数値シミュレーションにより明らかにすることである。

3. 研究方法

(1) 流体プログラム

流体シミュレーションにはSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法を用いた。SPH法は、粒子法の一つで、流体を離散的な”流体素片” で表す。粒子法なので、様々な配位を簡単に実現できる強みがある。また、各粒子(”流体素片”)は常にほぼ同数の近傍粒子を持つようにそのサイズが調整されるので、密度の高い領域は自動的にサイズの小さい多くの粒子、すなわち高い空間分解能で表されるという利点がある。さらに、空間微分が解析的に計算できる点もSPH法を扱いやすいものとしている点の一つである。

(2) 対象天体とモデル

本研究で扱うのは性質の異なる3つの超高エネルギーガンマ線連星系である。それらはPSR B1259-63 (Be星とパルサー風をもつ中性子星の連星系)、LS I +61 303 (Be星とコン

コンパクト天体の連星系。コンパクト天体の性質は不明)、LS 5039 (0型星とコンパクト天体の連星系。コンパクト天体の性質は不明) であり、Be星と呼ばれる円盤状のガスを持つ系 (PSR B1259-63とLS I+61 303)については、Be星ガス円盤も含めたモデル化を行う。

Be星ガス円盤は、星から放出されたガスが粘性により拡散することにより形成される (Lee et al. 1991)。その時間尺度は軌道周期やパルサー風とBe星恒星風の移動の時間尺度よりもはるかに長いので、Be星をもつ系に対しては、衝突恒星風モデルのシミュレーションの場合でも、まず、パルサー風とBe星恒星風の無い状態で、パルサーの重力による影響だけを考慮して、Be星ガス円盤の形成・進化シミュレーションを行う。そして、Be星ガス円盤が十分に発達した段階で、パルサー風とBe星恒星風を開始して、パルサー風・Be星恒星風・Be星ガス円盤の相互作用のシミュレーションを行うことにする。

Be星を持たない系 (LS 5039) については、0型星恒星風のコンパクト天体への降着シミュレーション、あるいは0型星恒星風とパルサー風の衝突シミュレーションを行う。

4. 研究成果

(1) PSR B1259-63 (Be星と中性子星の連星系。周期3.4年、離心率0.87)

超高エネルギーガンマ線連星系のプロトタイプと見なされているPSR B1259-63のシミュレーションでは、パルサー風の運動エネルギーとして、このパルサーのスピンダウンにより失うエネルギー 8.2×10^{35} erg/s (観測から求められた値)を採用した。Be星恒星風による質量放出率とガス円盤を通しての質量放出率はあまりよく分かっていないので、それぞれ 10^{-9} - 10^{-7} 太陽質量/yrと 4×10^{-9} - 4×10^{-7} 太陽質量/yrの範囲で調べた。

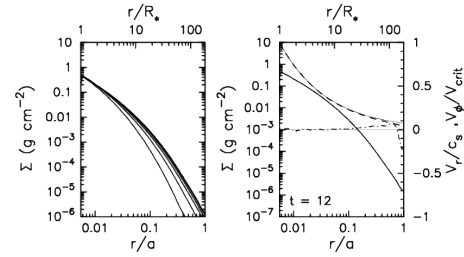


図1. 超高エネルギーガンマ線連星PSR

B1259-63 におけるBe星ガス円盤の形成・進化。

左：面密度の時間変化。分布は下から $t=2, 4, 6, \dots, 12$ 軌道周期。下： $t=12$ 軌道周期でのBe星ガス円盤の構造。実線は面密度、波線はケプラー速度で規格化した回転速度、一点鎖線は動径方向の速度のマッハ数。

(i) Be 星ガス円盤の形成・進化のシミュレーション

パルサー風と Be 星星周物質の相互作用のシミュレーションを行う準備として、まず Be 星の周囲にガス円盤を形成するシミュレーションを行った。Be 星では、星の赤道面から放出されたガスが、粘性により拡散し、ガス円盤を形成する。その時間尺度は非常に小さな円盤でも数年、大きく広がった円盤なら数十年を要する。図1は、形成開始から12軌道周期 (約40年) の間の Be 星ガス円盤の進化 (左図) と12軌道周期後の円盤の構造 (右図) を表している。ガス円盤の進化の様子と構造は理論から予想されるものと良い一致を示している。

(ii) パルサー風・Be 星恒星風・Be 星ガス円盤の相互作用のシミュレーション

図2は、ガス円盤を通しての質量放出率が 4×10^{-8} 太陽質量/yrの場合 (ガス円盤の内縁の密度 $\rho_0=10^{-10}$ g/cm³の場合。左図) と 4×10^{-7} 太陽質量/yrの場合 ($\rho_0=10^{-9}$ g/cm³の場合。右図) のシミュレーションから得た、近星点付近での相互作用のスナップショットである。図はいずれも連星軌道面上の密度を表している。

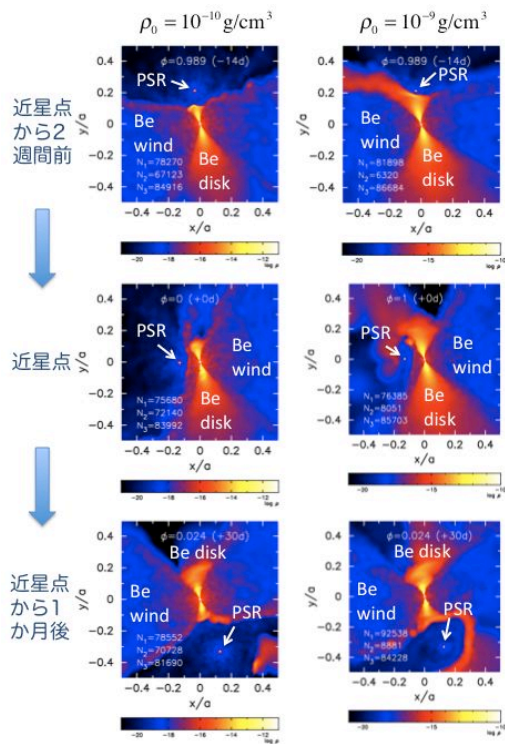


図 2. 超高エネルギーガンマ線連星 PSR B1259-63 におけるパルサーと Be 星の近星点前後の相互作用。左図: $\rho_0 = 10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$ の場合。右図: $\rho_0 = 10^{-9} \text{ g cm}^{-3}$ の場合。Be 星恒星風の質量放出率は 10^{-8} 太陽質量/yr で固定。Be 星ガス円盤の密度により、相互作用の様子が大きく異なることがわかる。

図から、ガス円盤の密度が低い場合にはパルサー風により外側の領域がはぎ取られるのに対し、密度が高い場合にはガス円盤の物質の慣性が大きく、パルサー風によってはぎ取られないことが分かる。結果として、後者の場合には、パルサーは近星点の少し前にはガス円盤と衝突し、近星点通過から約1か月後にはガス円盤の物質をゆっくりシェル状に広げていく。

このように、シミュレーションで明らかになったパルサー風とBe星ガス円盤の相互作用は非常に複雑なものである。それに対し、パルサー風とBe星恒星風の境界面は解析的な式でよく表される。

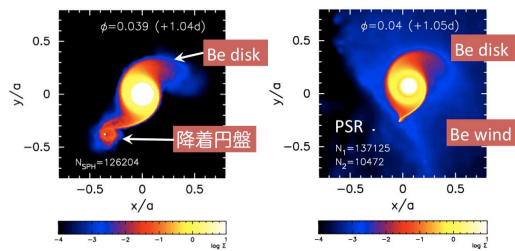


図3. 超高エネルギーガンマ線連星LS I+61 303の2つのモデル計算結果。上: 降着モデル、下: パルサー風モデル。軌道位相はいずれの図でも近星点から1日後。

(2) LS I +61 303(Be星と中性子星かブラックホールの連星系。周期26.5日、離心率0.72)

パルサー風モデルと降着モデルのどちらが正しいかの決着をつけるべく、両モデルに対して、3次元数値シミュレーションを行った。パルサー風モデルのシミュレーションでは、はじめに Be 星ガス円盤の形成・進化シミュレーションを行い、十分に成長した Be 星ガス円盤を得た後、パルサー風と Be 星恒星風を導入したシミュレーションを行った。

結果を図 3 に示す。上のパネルは降着モデルのシミュレーション、下のパネルはパルサー風モデルのシミュレーションの結果である。位相は近星点から 1 日後である。図からわかるように、この系では Be 星恒星風が強く、それに守られた Be 星ガス円盤はパルサー風の影響をあまり受けない。そのため、両モデルに基づくシミュレーションにおいて、Be 星ガス円盤の形状の違いは比較的小さい。しかし、このわずかな差でも、可視光高分散分光観測を行うことができれば、どちらのモデルが観測を説明できるかがわかるだろう。

(3) LS 5039 (O 型星と中性子星かブラックホールの連星系。周期 3.9 日、離心率 0.24)

一般に、大質量星の恒星風は、星の近傍では星からの光子を吸収し加速され、その速度分布は、 β 速度則と呼ばれる関数系で近似される

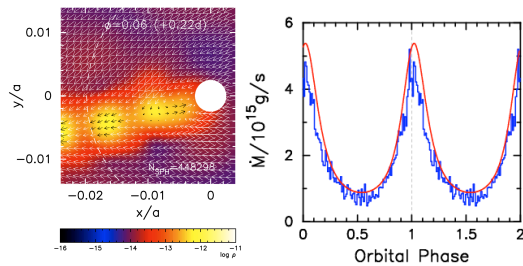


図4. 超高エネルギーガンマ線連星LS 5039に対する3次元降着シミュレーションの結果。左：コンパクト天体（図の白丸）の周囲にできる流れのパターン。波線の円はBondi-Hoyle降着半径を表す。右：コンパクト天体への降着率の位相依存性。青い線はシミュレーション、赤い線はBondi-Hoyle-Littleton降着率を表している。両者は良い一致を示している。

（観測と合うのは $\beta \sim 1$ ）。LS 5039 はコンパクト天体が O 型星の半径の 2-3 倍の近さにあるので、恒星風の加速の効果を取り入れることが重要である。放射の効果を直接取り入れることは難しいので、本研究では、 $\beta=1$ を実現するポテンシャルを O 型星に対して用いることで、放射の効果を近似的に取り入れた。

図 4 は、そのようなポテンシャル下での O 型星恒星風のコンパクト天体へ降着の 3 次元シミュレーションの結果を示している。左図は、コンパクト天体 (3.7 太陽質量のブラックホール) の周囲の流れのパターンを表している。シミュレーションで採用したブラックホールの半径は軌道長半径の 0.0025 倍である(この半径は、3.7 太陽質量のシヴァルツシルト半径よりもずっと大きい、近星点における Bondi-Hoyle 降着半径よりも十分小さいので、降着率に影響しない)。

図 4 の右図は降着率が軌道位相にどう依存するかを表している。ヒストグラムがシミュレーション、なめらかな実線が解析解 (Bondi-Hoyle-Littleton 降着率) である。図から両者が良い一致を示すことが分かる。また、得られた降着率は観測される超高エネルギーガンマ線のフラックスと矛盾しないことがわかった。

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 5 件)

Okazaki, A.T., Nagasaki, S., Naito, T., Kawachi, A., Hayasaki, K., Owocki, S.P., Takata, J.

“Hydrodynamic Interaction between the Be Star and the Pulsar in the TeV Binary PSR B1259-63/LS 2883”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 63 巻, 印刷中 (2011) (査読あり)

Moritani, Y., Nogami, D., Okazaki, A.T., 他 5 名

“Drastic Spectroscopic Variability of the Be/X-ray Binary A0535+262/V725 Tau during and after the 2009 Giant Outburst”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 63 巻, 印刷中 (2011) (査読あり)

Oktariani, F., Okazaki, A.T., Kato, S.

“Excitation of Trapped g-Mode Oscillations in Warped Disks around Black Holes”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 62 巻, p709 (2010) (査読あり)

Oktariani, F., Okazaki, A.T.

“Global Disk Oscillations in Binary Be Stars”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61 巻, p.57 (2009) (査読あり)

Okazaki, A.T., Owocki, S.P., Russell, C.M.P., Corcoran, M.F.

“Modelling the RXTE light curve of η Carinae from a 3D SPH simulation of its binary wind collision”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 388 巻, p. L39 (2008) (査読あり)

[学会発表] (計 8 件)

Okazaki, A.T.

“Simulations of accretion in binaries formed by an OB star plus a compact object”, Workshop on Variable Galactic Gamma-Ray Sources, 2010年12月1日、ハイデルベルグ (ドイツ)

岡崎敦男

“Interaction between the Be star and the compact companion in TeV gamma-ray binaries”, 日本天文学会, 2010年9月23日, 金沢 (石川)

Okazaki, A.T.

“Interaction between the Be star and the compact companion in TeV gamma-ray binaries”, 国際天文学連合シンポジウム No.272 “Active OB Stars”, 2010年7月23日, パリ (フランス)

Owocki, S.P., Okazaki, A.T.

“Modeling TeV gamma-rays from LS 5039: An active OB star at the extreme”, 国際天文学連合シンポジウム No.272 “Active OB Stars”, 2010年7月23日, パリ (フランス)

岡崎敦男

“Wind accretion in the gamma-ray binary LS 5039”, 日本天文学会, 2009年9月14日, 山口 (山口)

Okazaki, A.T.

“3-D Numerical Simulations of Colliding Winds in Eta Carinae and WR 140”, 国際天文学連合総会ジョイントディスカッション13, 2009年8月13日, リオデジャネイロ (ブラジル)

岡崎敦男

“TeVガンマ線連星B1259-63/SS 2883からの高エネルギー放射モデル I: パルサーとBe星ガス円盤の潮汐相互作用シミュレーション”, 日本天文学会, 2009年3月27日, 堺 (大阪)

Okazaki, A.T.

“The accretion regime of LS 5039: 3-D SPH simulations”, The INTEGRAL Workshop, 2008年9月10日, コペンハーゲン(デンマーク)

[その他]

ホームページ

<http://harmas.arc.hokkai-s-u.ac.jp/~okazaki/research-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡崎 敦男 (OKAZAKI ATSUO)
北海学園大学・工学部・教授
研究者番号: 00185414

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし