

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：30107

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540235

研究課題名(和文) 超高エネルギー連星系における相互作用と放射のダイナミクス

研究課題名(英文) Interaction and radiation in very high energy 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：超高エネルギーガンマ線連星系(1超電子ボルトよりも高いエネルギーのガンマ線を出す連星系)における活動性の起源とコンパクト天体の性質を解明するために、個々の系に対して3次元流体シミュレーションに基づく高エネルギー放射計算を行い観測と比較した。また、超高エネルギーガンマ線連星系の潜在的候補天体であるBe/X線連星系(Be星と中性子星の連星系)に見られる突発的なX線増光現象の起源について、3次元流体シミュレーションに基づき、新しいシナリオを提案した。

研究成果の概要(英文)：Based on 3D hydrodynamic simulations of individual VHE (very high energy) gamma-ray binaries, we have calculated high-energy emission from shocked regions and compared the resulting time-dependent model flux with observed X-ray light curves, in order to clarify the details of the interaction and the nature of the compact object. We have also proposed a new scenario for X-ray outbursts in Be/X-ray binaries, potential candidates for VHE gamma-ray binaries, based on 3D hydrodynamic simulations of these systems.

研究分野：天文学

キーワード：宇宙物理 X線天文学 ガンマ線天文学 恒星物理学 高密度天体

1. 研究開始当初の背景

近年、H.E.S.S.などの撮像型大気チェレンコフ光望遠鏡やFermiなどのガンマ線観測衛星の活躍により、多くの天体が超高エネルギーガンマ線(100 GeV以上のエネルギーのガンマ線)を放射していることが明らかになってきた。連星系の中にも超高エネルギーガンマ線を出すものがあり、そのような超高エネルギーガンマ線連星系はこれまでに5天体見つかっている。そのうちの3つがBe星(星の周囲にガス円盤を持つ大質量星)を持ち、2つがO型主系列星を持つが、それらの天体の活動性の起源とコンパクト天体の性質は、1つの系を除き、未解明である。コンパクト天体の性質が解っていない系では、パルサー風モデル[相対論的パルサー風とBe星またはO型星の恒星風の衝突]と降着モデル(Be星星周円盤またはO型星恒星風のブラックホールあるいは中性子星への降着)という競合するモデルが提案されている。モデルに決着がつかない理由の1つは、これらの連星系(特にBe星を持つ系)では、相互作用の空間構造が非常に複雑なものになるために、信頼に足る動的モデルの構築が最近まで困難だったことである。もう1つの理由は、降着流や相互作用するBe星星周円盤の詳細な構造に基づいた放射計算がなされてこなかったことである。

また、超高エネルギーガンマ線連星系の潜在的な候補天体として重要なBe/X線連星系(Be星と中性子星の連星系で、大質量X線連星系中で最大のサブクラス)は、突発的に大きなX線増光現象を示すことが特徴であるが、その具体的な機構の解明はこの分野における大きな挑戦となっている。

2. 研究の目的

以下の2つの目的を持って本研究を実施した。

(1) 超高エネルギーガンマ線連星系における活動性の起源とコンパクト天体の性質の解明

いくつかの超高エネルギーガンマ線連星系に対して、2つの競合するモデルに沿った3次元流体シミュレーションを行い、降着流や衝撃波領域の構造を求めるとともに、Be星(星周円盤を持つ大質量星)を持つ系ではBe星星周円盤への影響を調べる。そして、シミュレーションの結果を観測と比較して、それぞれの系の性質を明らかにする。

(2) Be/X線連星系における突発的なX線増光現象の起源の解明

超高エネルギーガンマ線連星系の潜在的候補天体であるBe/X線連星系(Be星と中性子星の連星系)に見られる大規模なX線増光現象がワープしたBe星星周円盤からのBondi-Hoyle-Lyttleton降着として理解できることを、3次元シミュレーションと放射計算により示す。

3. 研究の方法

(1) 超高エネルギーガンマ線連星系

コンパクト天体の性質が解っていない超高

エネルギーガンマ線連星系に対して、競合する2つのモデル(パルサー風モデルと降着モデル)に基づく3次元大規模数値シミュレーションを行い、それに基づき系からの放射を計算し、その軌道位相依存性を調べる。そして、得られた結果を観測と比較してモデルを検証し、コンパクト天体の性質に制限を与える。

(2) Be/X線連星系

超高エネルギーガンマ線連星系の潜在的な候補天体であるBe/X線連星系に見られる大規模X線増光現象の機構を解明するために、代表的な系に対して3次元大規模数値シミュレーションを行い、観測されるX線光度や光度曲線等と比較する。

4. 研究成果

(1) 超高エネルギーガンマ線連星系

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3次元SPHシミュレーションを実施し、さらにその結果を用いて、高エネルギー放射を計算した。このように3次元数値シミュレーションと放射モデルを組み合わせる超高エネルギーガンマ線の性質に迫ろうとするアプローチは世界で初めてのものである。

今回行ったシミュレーションと放射計算により、Be星星周円盤の密度が非常に高い場合には、パルサー風が星周円盤を簡単に吹き飛

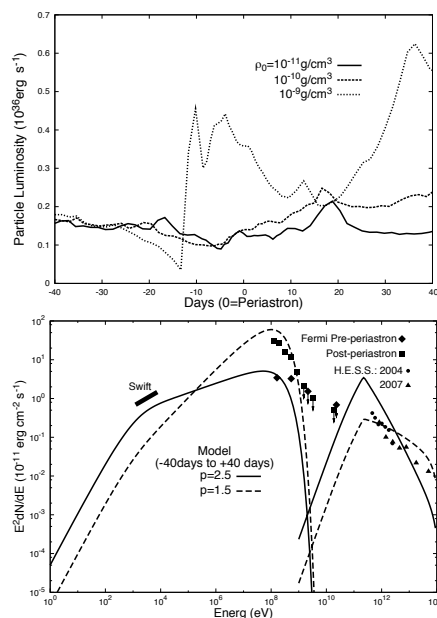
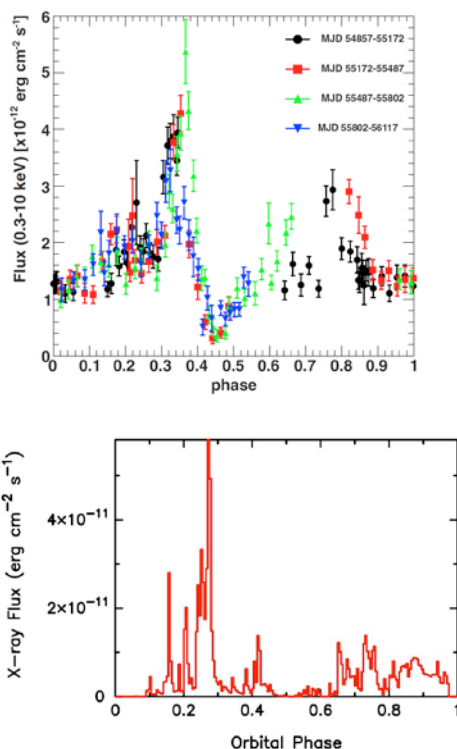


図1. 超高エネルギーガンマ線連星 PSR B1259-63 のシミュレーションに基づき得られた非熱的放射。上図: 近星点前後のX線光度曲線。Be星ガス円盤内縁の密度  $10^{-11} \text{g/cm}^3$ ,  $10^{-10} \text{g/cm}^3$ ,  $10^{-9} \text{g/cm}^3$  の3つのモデルを比較してある。下図: 上図の期間を平均したスペクトル。シンボルは観測値。(Takata et al. 2012)

ばすことができず、そのためにパルサーは近星点の前後で各 1 回、星周円盤に囲まれること、およびその時に X 線光度がピークを示すことが明らかになった (図 1 参照。Takata, Okazaki, et al. 2012)。これらの結果は観測をよく再現するものである。

② HESS J0632+057 (Be 星と正体不明のコンパクト天体の連星系；周期約 315 日、離心率 0.83)

この系は超高エネルギーガンマ線連星系の中でも最も謎に満ちた天体である。他の系と異なり、X 線光度曲線は遠星点の前後に各 1 回ピークを持つ。この奇妙な振る舞いを説明するために、我々は、パルサー周囲のガス圧がパルサー風の動圧よりも大きいときにはパルサー風が抑止されるという仮説を立て、その効果をコードに組み、シミュレーションを実施した。結果を図 2 に示す。観測された X 線光度曲線 (上図) の基本的な特徴をシミュレーションから得られた X 線光度曲線 (下図) が良く再現していることが分かる。この一致は、この系のコンパクト天体の正体が中性子星であること、および独特な X 線・ガンマ線光度曲線の起源がパルサー風と Be 星星周円盤の相互作用により引き起こされていることを示している (Okazaki et al. 2015, 準備中)。



超高エネルギーガンマ線連星 HESS J0632+057 の X 線光度曲線。上図：観測された光度曲線 (Aliu et al. 2014)。下図：シミュレーションから求めた光度曲線。両方の図とも横軸は軌道位相。位相 0 と 1 が近星点で、位相 0.5 が遠星点

③ LS 5039 (O 型星と正体不明のコンパクト天体の連星系；周期 3.9 日、離心率 0.35)

上記 2 天体と異なり、この系では O 型星の強い恒星風とコンパクト天体が相互作用している。周期は超高エネルギーガンマ線連星系の中では最も短い。我々はパルサー風モデルに沿って、この系に対する 3 次元 SPH シミュレーションを行い、恒星風の衝撃波領域から出る熱的 X 線の光度を計算した。そのレベルは現在運用されている X 線観測衛星では検出できないが、次期 X 線衛星 Astro-H では検出の可能性があるとこの系であった (Russell, Okazaki 2015, 準備中)。もし検出されれば、この系がパルサー風と恒星風が衝突している系であることを確立することになり興味深い。

(2) Be/X 線連星系

Be/X 線連星系の示す X 線増光現象には、近星点付近で数日間起こる小規模なもの、稀に発生し数十日間継続する大規模なもの 2 種類がある。それらのメカニズムについてはまだ分かっていないことが多い。我々は代表的な 2 つの系の 3 次元数値シミュレーションを行い、その結果に基づき、

- 前者の小規模な X 線増光現象は中性子星に捕獲された Be 星星周円盤のガスが放射効率の低い降着流 (RIAF) となることで生じる
- 後者の大規模な X 線増光現象は、軌道面から傾いた星周円盤からの Bondi-Hoyle-Lyttleton 降着により生じる

という新しいシナリオを提案した (Okazaki et al. 2013)。

また、軌道面から大きく傾いた Be 星星周円盤の進化を 3 次元数値シミュレーションで調べ、このようなガス円盤では Kozai-Lidov mechanism により円盤の離心率が長周期で振動すること、そしてその振幅は時間と共に減衰することを確認した。

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 11 件)

- ① Moritani, Y., Okazaki, A. T., Carciofi, A. C., Imada, A., Akitaya, H. 他 7 名, 2015, The Astrophysical Journal Letters, Vol. 804, article id. L32, 6 pp. (査読あり)  
DOI:10.1088/2041-8205/804/2/L32
- ② Escolano, C., Carciofi, A. C., Okazaki, A. T., Rivinius, T., Baade, D., Štefl, S., 2015, Astronomy & Astrophysics,

- Vol. 576, id.A112, 15 pp. (査読あり)  
DOI:10.1051/0004-6361/201425446
- ③ Tam, P. H. T., Li, K. L., Takata, J., Okazaki, A. T., Hui, C. Y., Kong, A. K. H., 2015, The Astrophysical Journal Letters, Vol. 798, article id. L26, 6 pp. (査読あり)  
DOI:10.1088/2041-8205/798/1/L26
- ④ Hayasaki, K., Sohn, B. W., Okazaki, A. T., Jung, T., Zhao, G., Naito, T., 2014, The Astrophysical Journal, Vol. 797, article id. 68, 9 pp. (査読あり)  
DOI:10.1088/0004-637X/797/1/68
- ⑤ Asai, K., Mihara, T., Matsuoka, M., Sugizaki, M., Nakahira, S. 他3名 (8番目), 2015, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 66, id. 79, 13 pp. (査読あり)  
DOI:10.1093/pasj/psu054
- ⑥ Hayasaki, K., Sohn, B. W., Okazaki, A. T., Jung, T., Zhao, G., Naito, T., 2014, The Astrophysical Journal, Vol. 790, article id. 62, 9 pp. (査読あり)  
DOI:10.1088/0004-637X/790/1/62
- ⑦ Madura, T. I., Gull, T. R., Okazaki, A. T., Russell, C. M. P., Owocki, S. P. 他4名, 2013, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 436, pp. 3820-3855 (査読あり)  
DOI:10.1093/mnras/stt1871
- ⑧ Moritani, Y., Nogami, D., Okazaki, A. T., Imada, A., Kambe, E. 他6名, 2013, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 65, Article No. 83, 25 pp. (査読あり)  
DOI:10.1093/pasj/65.4.83
- ⑨ Okazaki, A. T., Hayasaki, K., Moritani, Y., 2013, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 65, Article No. 41, 18 pp. (査読あり)  
DOI:10.1093/pasj/65.2.41
- ⑩ Haubois, X., Carciofi, A. C., Rivinius, Th., Okazaki, A. T., Bjorkman, J. E., 2012, The Astrophysical Journal, Vol. 756, article id. 156, 16 pp. (査読あり)  
DOI:10.1088/0004-637X/756/2/156
- ⑪ Takata, J., Okazaki, A. T., Nagataki, S., Naito, T., Kawachi, A., Lee, S.-H., Mori, M., Hayasaki, K., Yamaguchi, M. S., Owocki, S. P. 2012, The Astrophysical Journal, Vol. 750, article id. 70, 10pp. (査読あり)  
DOI:10.1088/0004-637X/750/1/70
- [学会発表] (計 13 件)
- ① Okazaki, A. T., “Flip-flopping pulsar model for the gamma-ray binary HESS J0632+057”, Variable Galactic Gamma-ray Sources III, 2015年5月5日, Heidelberg (Germany)
- ② 岡崎敦男, “Dynamical Modeling of the Be/BH Binary AGL J2241+4454”, 日本天文学会, 2015年3月19日、大阪大学 (大阪府豊中市)
- ③ Okazaki, A. T., “Quasi-cyclic variability of circumstellar disks around Oe/Be stars”, Magnetism and Variability in O Stars, 2014年9月19日, Amsterdam (The Netherland)
- ④ 岡崎敦男, “Change of pulsar state in the gamma-ray binary HESS J0632+057”, 日本天文学会, 2014年9月13日、山形大学 (山形県山形市)
- ⑤ Okazaki, A. T., “Current status of our understanding of Be disk physics”, Bright Emissaries: Be Stars as Messengers as Star Disk Physics, 2014年8月12日, London (Canada)
- ⑥ Okazaki, A. T., “Dynamical modeling of the Be/Gamma-ray sources HESS J0632+057 and AGL J2241+4454”, Be/X-ray Binary Workshop 2014, 2014年7月8日, London (Canada)
- ⑦ 岡崎敦男, “Interaction between a Pulsar Wind and a Be Star in the Gamma-ray Binary HESS J0632+057”, 日本天文学会, 2014年3月20日、国際基督教大学 (東京都三鷹市)
- ⑧ Okazaki, A. T., “3D Dynamical Modeling of Wind Accretion in Cyg X-3”, Suzaku-MAXI 2014 “Expanding the Frontiers of the X-ray Universe”, 2014年2月19-22日, 愛媛大学 (愛媛県松山市)
- ⑨ 岡崎敦男, “Thermal X-ray Emission from Stellar Wind Shocks in the VHE Gamma-ray Binary LS 5039”, 日本天文学会, 2013年9月11日、東北大学 (宮城県仙台市)
- ⑩ Okazaki, A. T., “Massive Binaries as VHE Gamma-ray Sources”, Massive

Stars-From  $\alpha$  to  $\Omega$ , 2013年6月11日,  
Rhodes (Greece)

- ⑪ Okazaki, A. T., “Optical line variability as a probe of the nature of gamma-ray binaries”, Variable Galactic Gamma-Ray Sources II, 2013年4月17日, Barcelona (Spain)
- ⑫ 岡崎敦男, “Cyclic X-ray Activity in Be/X-ray Binaries in the Context of Decretion Disk Evolution”, 日本天文学会, 2013年3月20日、埼玉大学 (埼玉県さいたま市)
- ⑬ Okazaki, A. T., “Accretion in High Mass X-ray Binaries”, 39th COSPAR Scientific Assembly, 2012年7月20日, Mysore (India)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

## 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

内藤 統也 (NAITO, Tsuguya)  
山梨学院大学・経営情報学部・教授  
研究者番号：50319084

河内 明子 (KAWACHI, Akiko)  
東海大学・理学部・教授  
研究者番号：70332591

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：