学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第2回シンポジウム 講演予稿 2011年1月

# 10-NA16

# 超高エネルギーガンマ線連星系の高エネルギー放射モデル

岡崎 敦男(北海学園大学工学部)

#### 概要

超高エネルギーガンマ線(E>100 GeV)を出す連星系は、最近のガンマ線天文 学の進展により注目されてきているが、系の複雑な相互作用の解明が難しく、まだ高 エネルギー放射機構はあまりよく理解されていない。本研究ではこれらの連星系に対 し、3次元大規模流体シミュレーションを行うことにより、その複雑な相互作用の様 子を初めて明らかにした。また、用いた流体コードの並列化を高めた。今後、今回得 られたデータをもとにして高エネルギー放射スペクトルを計算し、それを観測と比較 してモデルの適否を判断する。

#### 1. 研究の目的と意義

1.1. 研究の背景

近年、世界各地にチェレンコフ光望遠鏡アレ イ(図1)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、多くの天体が超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。その中でも特に興味深いのが "超高エネルギーガンマ線連星系"と呼ばれる 新しいクラスの天体である。



**図 1.** チェレンコフ光望遠鏡アレイ。写真は南半 球に設置されている H.E.S.S.

これまでに発見された超高エネルギーガンマ 線連星系(4例)は、いずれも大質量星(太陽 よりも10倍以上重い星)とコンパクト星(中 性子星かブラックホール)からなる連星系であ る。そのため、共通の高エネルギー放射機構が あるのではないかという視点から盛んに研究が 行われているが、系の複雑な相互作用にはばま れ、まだ解明にはいたっていない。超高エネル ギーガンマ線連星系における高エネルギー放射 機構を明らかにすることは、この分野の研究者 にとって大きな挑戦となっている。

現在、超高エネルギーガンマ線連星系にお ける相互作用はまだほとんど解明されていな い。コンパクト天体の性質が明らかになってい るのは、プロトタイプと見なされている系で ある B1259-63(中性子星)だけであり、他の 系ではコンパクト天体が中性子星なのかブラッ クホールなのかさえ解っていない。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(パルサー風と呼ばれる相対論的粒子の 流れと大質量星からの強い恒星風あるいは大質 量星の周囲の物質の衝突により衝撃波が生じ、 そこで荷電粒子が加速され、超高エネルギーガ ンマ線が放射されるとするモデル)と降着モデ ル (大質量星からの恒星風あるいは大質量星の 周囲の物質をブラックホールが降着する時に、 外向きのジェット流が生じ、そこから超高エネ ルギーガンマ線が放射されるとするモデル)が 提案されているが、決着がついていない。さら に、超高エネルギー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 星と呼ばれる タイプの星を持つ系では星の周囲に円盤状に存 在するガス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。

### 1.2. 研究の目的

本研究の主な目的は、超高エネルギーガンマ 線連星に対して、3次元大規模流体シミュレー ションと粒子加速、高エネルギー放射機構のモ デル計算を組合せるという世界で初めてのアプ ローチを導入することにより、それらの天体に おける相互作用と高エネルギー放射機構を明ら かにすることである。研究自体は一般化を目指 しているが、本申請研究に関しては単年度の課 題であることを考慮し、対象を超高エネルギー ガンマ線連星系のプロトタイプと見なされてい る系 (B1259-63) と相互作用の種類および高エ ネルギー放射機構に関して大きな論争がある 系 (LSI+61 303) の2天体に絞り、確実な成果 を目指す。

また、本研究で用いる計算コードは、 Open/MPを用いて並列化されているため、こ れまでは利用できる計算機資源が共有メモリ を使える範囲にとどまっていた。しかし、本 研究では非常に大規模な数値シミュレーショ ンを行いたいので、複数ノードを用いた計算 を行えるように計算コードを改良する。また、 出力される膨大なデータを処理し、結果をわ かりやすく表示することが、結果の物理的理 解のために必要である。このように、計算 コードの高並列化と可視化手法の開発も本研 究の重要な目的である。

## 1.3. 研究の意義

本研究は、超高エネルギーガンマ線連星系に 対して初めて3次元動的モデルを提供するとい う独創的なものである。超高エネルギーガンマ 線連星に対して、3次元大規模流体シミュレー ションを行い、その結果を基にして粒子加速、 高エネルギー放射機構のモデル計算を行う。流 体シミュレーションでは、連星系の軌道要素を 考慮し、さらにBe 星周囲のガス円盤も含めた3 次元計算を行う。このような詳細なシミュレー ションを行っているのは我々のグループだけで ある。さらに、シミュレーション結果に基づく 高エネルギー放射モデルの計算を行うというア プローチも世界で初めてのものなので、本研究 はこの分野の研究を大きく前進させるはずであ る。また、本研究で得られる知識や開発する手 法は十分に一般的なものなので、他の大質量連 星系やガス円盤を持つ様々な天体に対しても容 易に適用できる。

さらに、我々の開発してきた計算コードは他 の研究グループ [デラウェア大学 (アメリカ)、 サウサンプトン大学 (イギリス)、ウェストオ ンタリオ大学 (カナダ)] にも利用されており、 その他にも利用を希望する研究グループがあ る。本研究で行う計算コードの高並列化と可 視化手法の開発は、それらのグループの研究 にも大きく役立つものである。

# 2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究の基礎をなすのは、Smoothed Particle Hydrodynamics法(以下、SPH法)という粒子 法の一種を用いた大規模3次元流体シミュレー ションである。超高エネルギーガンマ線連星系 における相互作用を高精度で計算するために は大きな粒子数(数十万個~100万個)が必要 となり、そのような計算を軌道周期数周分にわ たり実施するには大きな計算機資源を必要とす る。そのために、JHPCN の計算機資源を利用 したく、拠点共同研究に応募した次第である。 大世同研究の研究体制はN下の通り

平六时间九切侧九	
氏名	所属(役割)
岡崎 敦男	北海学園大学工学部
	(研究の統括・計算コー
	ドの開発と数値計算)
大宮 学	北海道大学情報基盤セ
	ンター (計算コードの
	高度並列化・可視化手
	法の開発)
河内 明子	東海大学理学部(高エ
	ネルギー放射モデルの
	開発)
高田 順平	香港大学理学部(高エ
	ネルギー放射モデルの
	開発)
内藤 統也	山梨学院大学経営情報
	学部(高エネルギー放
	射モデルの開発)
長滝 重博	京都大学基礎物理学研
	究所(高エネルギー放
	射モデルの開発)
早崎 公威	北海道大学理学研究院
	(計算コードの開発と
	数値計算
Stanley P. Owocki	デラウェア大学バート
	ル研究所(ガンマ線連
	星系における相互作用
	のモデル化)
L	I

# 研究成果の詳細

3.1. 流体計算プログラムについて

前述のように、流体計算プログラムは SPH 法を用いている(例えば、Monaghan 1992)。 SPH 法は、粒子法の一種で、流体を離散的な"大きな論争がある系 (LSI+61 303) に対して、3

流体素片"で表す(図2参照)。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。



図 2. SPH 法の概念図。各粒子には空間的な広が りがあり、各点の物理量(例えば、密度)は近傍 粒子からの寄与の和として求められる。

SPH法はこのように優れた方法だが、粒子法 であることによる欠点もある。強い衝撃波領域 で粒子が双方向へすり抜けるという流体らしか らぬ振る舞いをしないように、ある程度大きな 人工粘性を必要とするのである。そのために、 SPH 法では空間的に小さなゆらぎは強制的に 減衰させられる傾向にある。よって、その利用 は解くべき問題の特質を良く考慮して行うこと が重要である。本研究課題で扱う相互作用には 強い衝撃波も含まれる。したがって、計算結果 を見るときには微細な構造ではなくグローバ ルな特徴に注目してほしい。

3.2. 相互作用のモデル

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系 (B1259-63) と相互作 用の種類および高エネルギー放射機構に関して

次元大規模数値シミュレーションを行った。こ れらの系は、いずれも Be 星と呼ばれる円盤状 のガスを持つ大質量星とコンパクト天体の連 星系なので、本研究では Be 星のガス円盤も含 めたモデル化を行った。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 間尺度はパルサー風と Be 星恒星風の衝突の時 間尺度よりもはるかに長いので、本研究では、

- 1. 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・進化の SPH シミュレーションを行い、
- 2. 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

という2段階のシミュレーションを行うことに より、超高エネルギーガンマ線連星系の相互作 用を調べた。

両天体の3次元シミュレーションで共通に用 いた仮定は次の通りである。

人工粘性: パルサー風と Be 星からの恒星風 を含めたシミュレーションでは標準的な 値 ( $\alpha_{SPH} = 1$ ,  $\beta_{SPH} = 2$ )を用いた。ここ で、 $\alpha_{SPH}$ と $\beta_{SPH}$ は SPH 法で用いられる 人工粘性項を制御するためのパラメータ である。 $\alpha_{SPH}$ は粒子間の速度差に比例す る項の係数であり、 $\beta_{SPH}$ は粒子間の速度 差の2乗に比例する項の係数である。前者 はシアー粘性とバルク粘性に対応し、後 者は粒子が互いにすり抜けることを防止 するための項である。

> 一方、Be 星ガス円盤の形成・進化のシ ミュレーションでは、シアー粘性の係数 が 0.1 になるように人工粘性パラメータ  $\alpha_{\rm SPH}, \beta_{\rm SPH}$ を各時刻の各点で調節した。

- 加熱と冷却: 粘性により散逸された運動エネ ルギーが各点で媒質を加熱するものとし た。また、冷却関数として光学的に薄い 場合のものを用いた。
- パルサー風: 実際には相対論的なパルサー風 を、相対論的パルサー風と同じ運動量を 持つ 10<sup>4</sup> kms<sup>-1</sup> の非相対論的パルサー風 で近似した。また、パルサー風にはパル サーと Be 星の重力の影響はないものと仮 定した。
- Be **星恒星風**:一定の終端速度で進む恒星風 をモデル化するため、Be 星恒星風にはパ ルサーと Be 星の重力の影響はないものと 仮定した。
- 3.2.1. 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 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 $\dot{E}_{\rm PSR}$ 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 $8.2 \times 10^{35} \, {\rm erg s}^{-1}$  (観測から求め られた値)を採用した。また、Be 星恒星風に よる質量放出率 $\dot{M}_{\rm wind}$ とガス円盤を通しての質 量放出率 $\dot{M}_{\rm disk}$ として、それぞれ $10^{-9} \, M_{\odot} \, {\rm yr}^{-1}$ と $4 \times 10^{-9} \, M_{\odot} \, {\rm yr}^{-1}$ を用いた。ここで、 $M_{\odot}$ は 太陽質量(1.989 ×  $10^{33} \, {\rm g}$ )を表す記号である。

この系の構造としては、図3に見られるよう に、Be 星ガス円盤が連星軌道の長軸から109°、 軌道面から45°傾いているものを採用した。こ れは電波やX線の観測と矛盾しない配位であ る。

(1) 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



**図 3.** 超高エネルギーガンマ線連星 B1259-63 のモ デルとして採用した系の構造 (Okazaki 2011)。

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4は、形成開始から11.5軌道周期後(約40 年後)のBe星ガス円盤を表している。ガス円 盤が変形しているのは、中性子星(パルサー) の重力によるものである。この時点で、星の半 径の数十倍以上に広がった円盤が形成されて いる。

(2) 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

シミュレーション結果を紹介する前に、パル サー風と Be 星恒星風のつくる衝撃波面の位置 と形状について、簡単なモデルを使って考えた い。簡単のために、軌道運動の効果は無視し、 パルサー風と Be 星恒星風はともに球対称であ ると仮定する。

パルサー風と Be 星周囲の物質との相互作用 面の形は、ガス円盤領域を除き基本的に、次式 で与えられるパルサー風と Be 星恒星風の運動 量の比ηで決定される。

$$\eta = \frac{\dot{E}_{\rm PSR}}{\dot{M}_{\rm wind}V_{\rm wind}c}.$$
(1)

ここで、 $V_{\text{wind}}$ はBe星恒星風の速度である。Be 星恒星風の典型的な速度は =  $10^3 \text{ km s}^{-1}$ なの で、この値を上式に代入すると、 $\eta \simeq 4.3$ を得る。

軌道運動や衝撃波による加熱を無視した単純



図 4. 超高エネルギーガンマ線連星 B1259-63 にお ける Be 星の形成・進化のシミュレーションの結果 得られた Be 星ガス円盤の構造。上:軌道面に垂直 な方向から見た柱密度分布。下:軌道の短軸方向 に見た柱密度分布。パルサーは近星点に位置して いる。

な 2 次元モデルを考えると、パルサー風と Be 星恒星風の動的圧力 (ram pressure) の釣り合 う面は、Be 星からの距離が以下の式の *d* で表 される位置にあり

$$d = \frac{D}{1 + \sqrt{\eta}} \approx 0.33 D \tag{2}$$

(Stevens et al. 1992; Canto et al. 1996; ここ で、D は両星間の距離)、Be 星の側に次の角 度 (half opening angle) で広がる円錐状の形と なる

$$\theta = 2\left(\tan^{-1}\eta\right)^{1/4} \approx 69^{\circ} \tag{3}$$

(Gayley 2009)。以下に見るように、この単純 な解析は、実際のシミュレーションに見られる パルサー風と Be 星恒星風の境界の位置と形状 をよく説明する。



**図 5.** 超高エネルギーガンマ線連星 B1259-63 におけるパルサーと Be 星の相互作用の様子。パルサー風により大質量星の恒星風と星周円盤が大きく変形していることがわかる。

図5は、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5で、上のパネルは連星軌道面上の密度を表 しているのに対し、下のパネルは連星軌道面 に垂直な方向から見た柱密度の分布を表して いる。図から、パルサー風が Be 星恒星風を圧 している様子がわかる。また、パルサー風によ り、Be 星ガス円盤は外側の領域がはぎ取られ ていることもわかる。このように、シミュレー ションで明らかになった相互作用は複雑である が、Be 星ガス円盤を除けば、基本的にはパル サー風と Be 星恒星風の相互作用面は上式 (2) と(3) で表されることが解る。

 3.2.2. 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)

衝突恒星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。 衝突恒星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6に示す。上のパネルは降着モデル のシミュレーション、下のパネルは衝突恒星風 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。



**図 6.** 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:衝 突恒星風モデル。軌道位相はいずれの図でも近星 点から1日後。

3.3. 高度並列化について

前述のように、本研究で用いる計算コード は、Open/MPを用いて並列化されていた。そ のため、これまでは利用できる計算機資源が共 有メモリを使える範囲にとどまっていた(北海 道大学情報基盤センターのSR11000の場合は1 ノード16CPU)。しかし、本研究では非常に大 規模な数値シミュレーションを行いたいので、 複数ノードを用いた計算を行えるように計算 コードを部分 MPI 化した<sup>1</sup>。その結果、4ノー ドを用いた並列計算で、1ノードの場合の計算 の約2倍の速さになった。

## 4. これまでの進捗状況と今後の展望

申請時に記した本研究課題の目的のうち、主 要な目的だった超高エネルギーガンマ線連星系 の研究については3次元流体シミュレーション の部分がほぼ終了した、現在1本目の論文を 投稿中である(§5参照)。今後は、シミュレー ションのデータを用いて高エネルギー放射のを 計算する予定である。

もう一つの目的である高度並列化について は、最も処理の重い2つのサブルーチンを MPI 並列化するとともに、他のいくつかのサブルー チンのチューニングを行った。SPH 法で用い られる近傍粒子の計算が大規模並列化困難なた め、現在の並列化は4ノード使用にとどまって いるが、それでも計算速度は以前の Open/MP だけを用いた並列化に比べ約2倍となった。今 後は、より大規模な並列化を試みるとともに、 より大きな粒子数のシミュレーションを行うた めに、メモリ分割にも取り組みたいと思う。

最後の目的である可視化手法の開発につい ては、まだ着手できていない。今後の検討課題 である。

# 5. 研究成果リスト

本研究課題に関して行った研究成果は以下の通りである。

- 1. 査読論文
  - Okazaki, A. T., Nagataki, S., Naito, T., Kawachi, A., Hayasaki, K., Owocki, S. P., Takata, J. 2011, "Hydrodynamic Interaction in the TeV Binary PSR B1259-63/SS 2883", Publication of the Astronomical

コードの MPI 化作業では、日立製作所のお世話に なった。

Society of Japan, 投稿中

- 2. 国際会議集録論文
  - Okazaki, A. T., Nagataki, S., Naito, T., Kawachi, A., Hayasaki, K., Owocki, S. P., Takata, J. 2011, "Interaction between the Be star and the compact companion in TeV γ-ray binaries", In: International Astronomical Union Symposium No. 272, C. Neiner, G. Wade, G. Meynet, G. Peters 編集, 印刷中
- 3. 国際会議における発表
  - Okazaki, A. T., Nagataki, S., Naito, T., Kawachi, A., Hayasaki, K., Owocki, S. P., Takata, J. "Interaction between the Be star and the compact companion in TeV γ-ray binaries", International Astronomical Union Symposium No. 272 (2010年 7月, パリ)
  - 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11月、ハイデルベルグ)
- 4. 国内学会における発表
  - 岡崎敦男、長滝重博、河内明子、内藤 統也、早崎公威、Stanley P. Owocki、 高田順平「Interaction between the Be star and the compact companion in TeV gamma-ray binaries」,日本天文 学会(2010年9月、金沢)

#### 参考文献

- Canto, J., Raga, A. C., & Wilkin, F. P. 1996, Astrophysical Journal, 469, 729
- Gayley, K. G. 2009, Astrophysical Journal, **703**, 89
- Lee, U., Saio, H., Osaki, Y., 1991, Monthly Notices of the Rpyal AAstronomical Society, 250, 432
- Monaghan, J. J. 1992, Annual review of astronomy and astrophysics, 30, 543
- Okazaki, A. T., Nagataki, S., Naito, T., Kawachi, A., Hayasaki, K., Owocki, S. P., Takata, J. 2011, Publication of the Astronomical Society of Japan, submitted
- Stevens, I. R., Blondin, J. M., Pollock, A. 1992, Astrophysical Journal, 386, 265