

11-NA16

超高エネルギーガンマ線連星系における相互作用と高エネルギー放射

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よく理解されていない。本研究では、昨年度に引き続き、これらの連星系のプロトタイプである PSR B1259-63 に対し、SPH 法を用いた 3 次元大規模流体シミュレーションによりその複雑な相互作用の様子を明らかにするとともに、シミュレーションで得られたデータを用いて超高エネルギーガンマ線を含む非熱的放射を計算した。さらに、限られた粒子数のもとで高空間精度な降着流計算を可能にするため、Particle Splitting と呼ばれる手法を取り入れ、超高エネルギーガンマ線連星系と Be/X 線連星系における降着流のテストシミュレーションを行った。シミュレーションについては、PSR B1259-63 に関するものは計画を達成した。Particle Splitting 法を用いた降着流シミュレーションについても計画をほぼ達成したが、子供粒子の配置等に改善の余地がありそうである。降着シミュレーションに基づく高エネルギー放射計算と複雑な相互作用の可視化については、今後の課題として残されている。

1. 研究の目的と意義

1.1. 研究の背景

近年、世界各地に撮像型チェレンコフ光望遠鏡 (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 ($E > 100 \text{ GeV}$) 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。それらの天体の中に“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がある。



図 1. 撮像型チェレンコフ光望遠鏡。写真は南半球に設置されている H.E.S.S. (The High Energy Stereoscopic System)

これまでに発見された超高エネルギーガンマ線連星系は 5 天体しかない。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 (中性子星かブラックホール) からなる連星系である。このグループの天体に共通の相互作用と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、コンパクト天体の正体が明らかになっているのが 1 天体 (PSR B1259-63) だけという事情もあり、まだ解明には

いたっていない。また、コンパクト天体の正体が明らかな系 (PSR B1259-63。コンパクト天体は中性子星。パルサー風と呼ばれる相対論的粒子の流れを持つ) でも、大質量星の周囲に円盤状に存在するガスとパルサー風の相互作用を考慮する必要があるため、相互作用が非常に複雑なものとなっている。このような要因が信頼に足る動的モデルの構築を妨げてきた。超高エネルギーガンマ線連星系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は、この分野の研究者にとって大きな挑戦となっている。

1.2. 研究の目的

我々の研究の最終的なゴールは、超高エネルギーガンマ線連星系の相互作用と高エネルギー放射機構を統一的に理解することである。そのために、3 次元大規模数値シミュレーションを行い、その計算結果に基づいて高エネルギー放射を計算して、観測と比較しようとしている。このような手法で超高エネルギーガンマ線連星系の本質に迫ろうとするのは世界で初めての試みである。

我々は、平成 22 年度の拠点共同研究 [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」(代表: 岡崎敦男)] において、超高エネルギーガンマ線連星系のプロトタイプとみなされている系 (PSR B1259-63) の 3 次元大規模数値シミュレーションを初めて行い、この系における相互作用の詳細を明らかにした。この系では、軌道離心率が 0.87 と極めて大きく、連星の距離が時間とともに大きく変動する。そのような

系の理解には3次元動的モデルの構築が必須であるが、これまでの研究は2次元シミュレーションに限られていた。そのような状況で、3次元シミュレーションを実現した意味は大きい。しかしながら、超高エネルギーガンマ線連星系の示す多様性を理解するには、他の系についての研究も必要であるが、平成23年度にはそれらの系についてはほとんど時間を割くことができなかった。

計算機科学面では、平成22年度には、計算に用いる流体コードの部分MPI化を行い、実効性能を2倍に高めることができた。また、流体コードに放射冷却の効果を計算する部分を組み込み、さらに恒星風が加速される効果を外部ポテンシャルの導入により近似的に取り入れた。しかし、並列化の規模はまだ小規模なレベルに留まっている。また、当初計画していたことのうち、可視化手法の開発には取り組めなかった。さらに、高エネルギー放射の計算については、1天体(PSR B1259-63)に対して暫定的な結果を得たところで時間切れとなった。

そこで、平成23年度には、昨年度の研究成果と課題を考慮して、以下の研究を行う計画を立てた(項目の先頭につけたAPは主に計算科学面の取り組み、CSは主に計算機科学面の取り組みを表す)。

1. (AP) 平成22年度に引き続き、PSR B1259-63に対する流体シミュレーションとそのデータを用いた高エネルギー放射の計算を行う。
2. (CS) 計算コードのさらなる並列化をすすめるとともに、高空間精度を持つシミュレーションを可能にするために粒子分割の手法を取り込む(「研究の意義」参照)。
3. (AP) 他の高エネルギー連星系に対し、上記2で改良したコードを用いて、3次元大規模数値シミュレーションを行う。また、シミュレーションデータを用いて、高エネルギー放射を計算する。
4. (CS) 平成22年度に引き続き、可視化手法の開発に取り組む。

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(PSR 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+61303, LS 5039)の3天体に絞ることにした。

1.3. 研究の意義

前述のように、超高エネルギーガンマ線連星系で、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、決着がつかない。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。

本課題では、昨年度に引き続き超高エネルギーガンマ線連星系に対して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った。コンパクト天体の性質が解っていない系に対しては、衝突恒星風モデルと降着モデルの双方のモデルに立ったシミュレーションを行った。前者は昨年度PSR B1259-63に対して行ったタイプの計算である。後者では、降着領域の空間精度を上げる必要があり、そのためにParticle Splittingと呼ばれる手法を計算コードに組み込んだ。これは、特定の領域(本研究の場合はコンパクト天体近傍の領域)に入った粒子を、いくつかの小さな粒子に分割し、空間精度を上げるという方法である。この手法は、宇宙論的星形成分野で用いられているが、連星系の降着シミュレーションに適用されたことはなく、この点でも新しい研究である。また、本研究で得られた知識や手法は十分に一般的なものである。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)、MPIR(ドイツ)、サンパウロ大学(チリ)]にも利用されている。本研究で行った計算コードの改良は、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

本研究は、超大規模数値計算系応用分野の共同研究であり、その基礎をなすのは、Smoothed Particle Hydrodynamics法(以下、SPH法)という粒子法の一つを用いた大規模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。

計算には北海道大学情報基盤センターのSR 11000(平成23年4月~7月)とSR 16000(平成23年11月~平成24年3月)を用いた(平成23年8月~10月は機種更新のため使用不可)。

本共同研究の研究体制は以下の通り。

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)

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

3.1. 研究成果の詳細について

3.1.1. 研究手法

流体計算プログラム

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、粒子法の一つで、流体を離散的な“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。

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

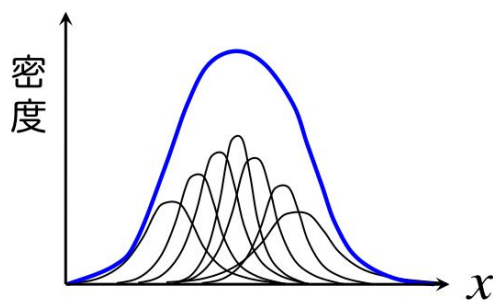


図2. SPH法の概念図。各粒子には空間的な広がりがあり、各点の物理量(例えば、密度)は近傍粒子からの寄与の和として求められる。

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。

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(PSR 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, LS 5039)に対して、3次元大規模数値シミュレーションを行った。PSR B1259-63についてはパルサー風を持つことがわかっているので、パルサー風モデルに基づくシミュレーションした。LSI+61 303とLS 5039についてはモデルに決着をつけるためにパルサー風モデルと降着モデルのそれぞれに基づくシミュレーションを実施ことにした(本報告書作成の段階で、LS 5039のパルサー風モデルシミュレーションは未実施)。また、これらの系のうち、PSR B1259-63とLSI+61 303は、Be星と呼ばれる円盤状のガスを周囲に持つ大質量星とコンパクト天体の連星系なので、これらの系に対しては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、Be星を持つ超高エネルギーガンマ線連星系をパルサー風モデルに基づいてシミュレーションするには、

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、このような系での相互作用を調べた。

一方、降着モデルに基づくシミュレーションでは、(パルサー風はないので、パルサー風との相互作用を計算する必要はないが) コンパクト天体への降着流を高精度で計算することが重要になる。そのために、後述する Particle Splitting と呼ばれる手法を用いて、コンパクト天体の重力圏に入った粒子を分割し、粒子数を増やすことにより空間精度を高めることを試みた。

Particle Splitting 法

コンパクト天体の性質が解っていない系に対しては、衝突恒星風モデルと降着モデルの双方のモデルに立ったシミュレーションを行うが、後者の場合に降着領域の空間精度を上げるために、Particle Splitting と呼ばれる手法を数値流体コードに組み込んだ。これは、特定の領域(本研究の場合はコンパクト天体近傍の領域)に入った粒子を、質量・運動量・エネルギー等を保存するように、いくつかの子供粒子に分割し、空間精度を上げるという方法である。このようにすることにより、全体の粒子数をあまり増やすことなく、降着円盤を高精度で計算できるようになる。この手法は、星形成分野で用いられているが (Kitsionas & Whitworth 2002)、連星系の降着シミュレーションに適用されたことはなく、この点でも新しい研究である。

具体的には、降着シミュレーションの場合に降着天体の重力圏(ロッシュ半径)に入った SPH 粒子(親粒子)を 13 個の子供粒子で置きかえた。各子供粒子は親粒子の $1/13$ の質量と $1/13^{1/3}$ の大きさ(smoothing length)を持つ。13 個の子供粒子は、親粒子がいた位置を中心として、粒子間隔が子供粒子の大きさの 1.5 倍となる六方最密充填構造になるように配置した。これらの設定は Kitsionas & Whitworth (2002) に従ったものである。簡単のために、各子供粒子は親粒子と同じ速度成分を持つように設定した。

3.1.2. 研究成果

以下に、パルサー風モデルに基づくシミュレーションによる成果と降着モデルに基づくシミュレーションによる成果について述べる。パルサー風モデルに基づくシミュレーションは中間報告の時点ですでに完了していたので、その成果については基本的に中間報告に記述したものと同一である。一方、中間報告の時点では Particle Splitting 法の組み込みができていなかったため、降着モデルに基づくシミュレーション(Particle Splitting 法を適用している)による成果はすべて中間報告以降に得

られたものである。

パルサー風モデルに基づくシミュレーション

(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)

平成 22 年度に行った PSR B1259-63 計算では、計算時間の節約のために、速度が大きく、そのために timestep 短いパルサー風の粒子数を Be 星恒星風や Be 星ガス円盤の粒子数に比べてかなり少なくしていた。高エネルギー放射がパルサー風側の衝撃波領域から放射されることを考えると、パルサー風の計算精度の粗いことは問題になり得る。そこで、今年度のシミュレーションでは、パルサー風の粒子数を前年度のシミュレーションに比べて 10 倍多くして、パルサー風の空間精度を向上させた。そして、それらのシミュレーションで得られたデータを用いて、高エネルギー放射計算を行った。

この系の構造としては、図 3 に見られるように、Be 星ガス円盤に対する法線が連星軌道の長軸から 19° 、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。

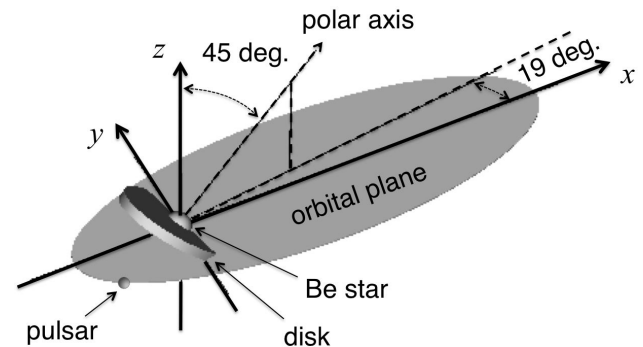


図 3. 超高エネルギーガンマ線連星 PSR B1259-63 のモデルとして採用した系の構造 (Okazaki et al. 2011)。Be 星ガス円盤に対する法線は連星軌道の長軸から 19° 、軌道面から 45° 傾いている。

(i) 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 4 は、ガス円盤を通しての質量放出率 \dot{M}_{disk} が $4 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ の場合 ($\rho_0 = 10^{-9} \text{g cm}^{-3}$ 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。左図は連星軌道面上の密度を表している。図から、ガス円盤の密度が高いために慣性が大きく、パルサー風によって簡単には押しやられない／はぎ取られないことが分かる。その結果、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。また、右図から、パルサー風と Be 星ガス円盤・Be 星恒星風との衝突により、パルサー風が熱化(運動エネルギーが内部エネルギーに転化)しているこ

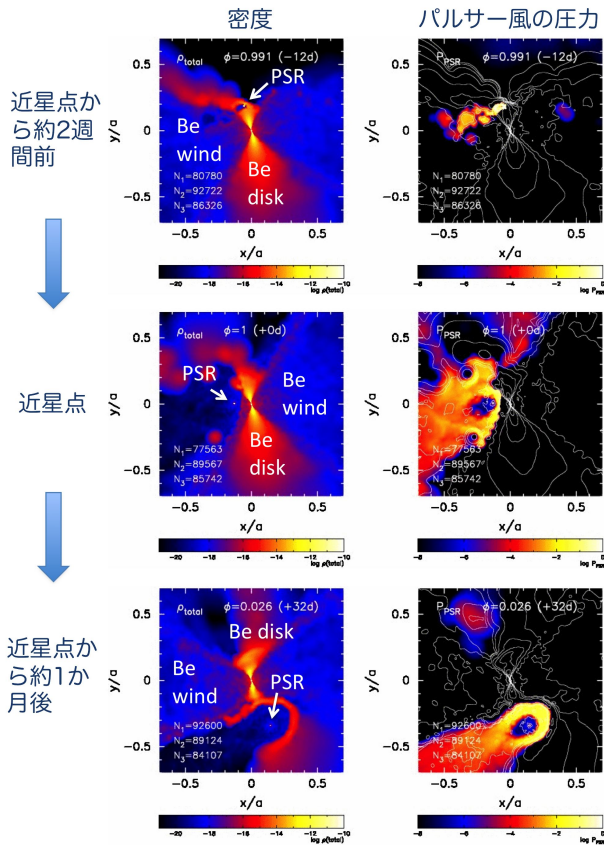


図 4. 超高エネルギーガンマ線連星 PSR B1259-63 におけるパルサーと Be 星の近星点前後の相互作用の様子を表すスナップショット。左図：面密度分布、右図：パルサー風の圧力分布。図は上から、近星点通過 12 日前、近星点通過時、近星点通過 32 日後。Be 星ガス円盤の内縁の密度が $\rho_0 = 10^{-9} \text{g cm}^{-3}$ 、Be 星恒星風の質量放出率が $10^{-8} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ の場合の計算。図を見やすくするため、右図には密度コントアを重ねた。図の N_1 、 N_2 、 N_3 はそれぞれ、Be 星恒星風、パルサー風、Be 星ガス円盤の粒子数。

とがわかる。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。

(ii) シミュレーション・データを用いた放射計算

パルサー風と Be 星ガス円盤および Be 星恒星風が衝突すると、接触不連続面をはさんで衝撃波領域が形成される。特に、パルサー側の衝撃波領域では電子が非常に大きなローレンツ因子 ($\sim 10^{5-8}$) を持つエネルギーにまで加速され、非熱的放射を出すと考えられる。非熱的放射の機構は、電波から X 線までのエネルギー領域ではシンクロトロン放射、超高エネルギーガンマ線のエネルギー領域では、相対論的電子が Be 星の放出する光子をたたく逆コンプトン散乱である。

この衝撃波領域での粒子加速と非熱的放射についての考え方を、(i) で述べた 3 次元シミュレーションに適用した結果が図 5 である (Takata et al. 2011)。上図は

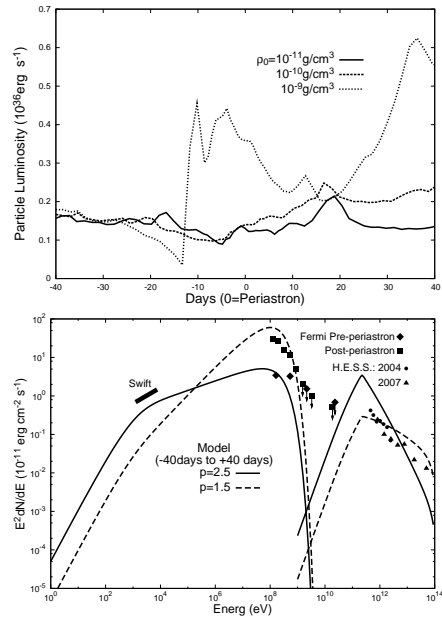


図 5. 超高エネルギーガンマ線連星 PSR B1259-63 のシミュレーション・データを用いて計算した非熱的放射。上図：X 線光度曲線 (近星点 40 日前から 40 日後まで)。下図：X 近星点 40 日前から 40 日後までを平均したスペクトル。X 線光度曲線 (上図) では、Be 星ガス円盤内縁の密度 ρ_0 が異なる 3 つのモデルを比較してある。 $\rho_0 = 10^{-11} \text{g cm}^{-3}$ 、 $10^{-10} \text{g cm}^{-3}$ 、 10^{-9}g cm^{-3} は、それぞれ、ガス円盤を通しての質量放出率 $\dot{M}_{\text{disk}} = 4 \cdot 10^{-11} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 、 $4 \cdot 10^{-10} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 、 $4 \cdot 10^{-9} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ に対応する。スペクトル (下図) に表示されているシンボルは観測値。(Takata et al. 2011)

X 線の光度曲線、下図は超高エネルギーガンマ線の光度曲線である。横軸は近星点から何日前あるいは後であるかを表している。計算は、シミュレーション領域を $100 \times 100 \times 100$ の一様なグリッドに分割し、各グリッドでのパルサー風の内部エネルギーが粒子加速に使われると仮定して行った。電子のエネルギー分布の冪は -2.5 (下図では冪が -1.5 の場合も比較のために表示してある)、ローレンツ因子は $10^5 - 10^8$ 、磁場のエネルギーの全内部エネルギーに占める割合は 0.1 を採用した。

観測される光度曲線は近星点の前後でそれぞれピークを持つ二山構造を示すが、本研究により初めて、そのような光度曲線は Be 星ガス円盤の密度がある値以上になると自然に生じることが示された。

(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 0.537)

平成 22 年度は、計算時間のほとんどを PSR B1259-63 のシミュレーションにつき込んだため、LS I +61 303 については、Be 星ガス円盤の密度やパルサー風のエネルギーを固定し、さらに Be 星ガス円盤が連星軌道と共平面をなす場合に対してのみシミュレーションを行った。今年度は、Be 星ガス円盤の密度やパルサー風のエネル

ギーを変えたり、Be 星ガス円盤が連星軌道に対して傾いている場合について調べている。

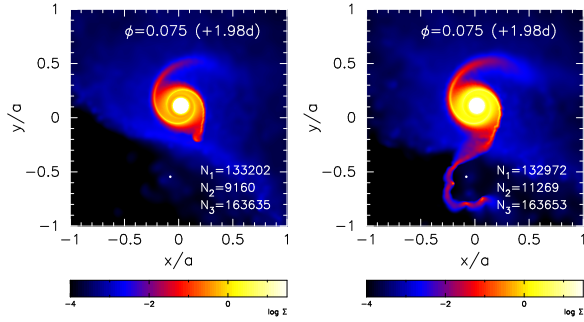


図 6. 超高エネルギーガンマ線連星 LS I+61 303 のパルサー風モデルに基づくシミュレーション結果から、近星点通過 2 日後の面密度分布。左図: Be 星ガス円盤内縁の密度 $\rho_0 = 10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$ の場合、右図: $\rho_0 = 3 \times 10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$ の場合。図の中央下寄りの白い小点がパルサー。

結果の一例を図 6 に示す。左図は、Be 星ガス円盤内縁の密度 $\rho_0 = 10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$ の場合（昨年度実施したシミュレーション）で、右図は、Be 星ガス円盤の密度を 3 倍にしたシミュレーション（今年度実施）の結果からとったものである。どちらの図も位相は近星点から 2 日後のものである。図から、Be 星ガス円盤の密度が 3 倍異なるだけで、パルサー風の Be 星ガス円盤に与える影響の大きさが大きく異なることがわかる。近星点直後の時期に可視光高分散分光観測を行えば、このような Be 星ガス円盤の形状が観測を説明できるかどうか、ひいてはパルサー風モデルの成否が判別できるだろう。

降着モデルに基づくシミュレーション

先に述べたように、超高エネルギーガンマ線連星系では、PSR B1259-63 以外の系ではコンパクト天体の正体がわかっていないので、降着モデルに基づくシミュレーションも行い、パルサー風モデルと降着モデルのどちらが観測と整合するか調べなければならない。また、大質量 X 線連星系の最大グループである Be/X 線連星系 (Be 星と中性子星との連星系) は超高エネルギーガンマ線連星系の有望な候補天体であるが、これらの天体からの高エネルギー放射機構の研究のためにも、降着シミュレーションを高空間精度で行うことは重要である。

本研究では、超高エネルギーガンマ線連星系 LS 5039 と Be/X 線連星系 4U 0115+63 に対して、particle splitting 法を用いた降着シミュレーションを行った。

(1) 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)

O 型星の恒星風がコンパクト天体に降着する様子を Particle Splitting のある場合とない場合で比較した。恒星風の降着は、恒星風がコンパクト天体の重力により下

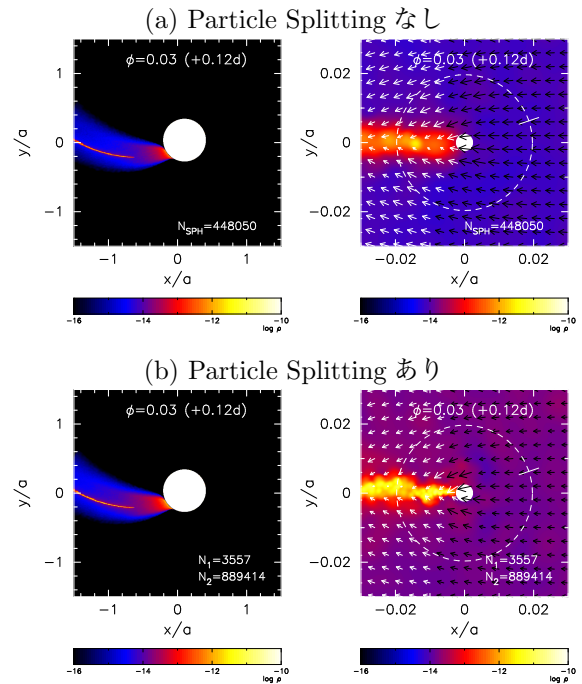


図 7. 超高エネルギーガンマ線連星 LS 5039 の降着モデルシミュレーションにおける Particle Splitting の効果: (a) Particle Splitting なし、(b) Particle Splitting あり。近星点通過直後の恒星風の密度分布。左図は O 型星を中心として計算領域全体を表示しており、右図はコンパクト天体を中心にしてその近傍を表したものである。空間スケールは軌道長半径で規格化されている。右図の破線はコンパクト天体の降着半径を表している。

流側に収束し、そこからコンパクト天体に向かって落下することで起こる。このような現象のシミュレーションはできるだけ高い空間精度で行うことが重要である。空間精度の低いシミュレーションでは、下流側で十分な散逸が起らず、得られる降着率は本来のものよりも低くなってしまふ。そこで、今回のシミュレーションでは、できるだけ高い空間精度を得るために、コンパクト天体の方向にのみ恒星風を放出した。得られた結果を図 7 に示す。図 7(a) は通常のシミュレーション、図 7(b) は Particle Splitting を取り入れたシミュレーションである。左図からわかるように、Particle Splitting は大きな構造には影響しない。しかし、コンパクト天体近傍の密度分布 (右図) には、コンパクト天体の重力圏内で粒子数が 13 倍になった効果ははっきり現れている。恒星風の降着では下流側の流れが不安定だが、その様子が Particle Splitting を用いたシミュレーションでとらえられているのに対し、通常のシミュレーション (上図) では空間精度が不足しているため、不安定流を再現できていない。

(2) 4U 0115+63 (Be 星と中性子星の連星系。周期 24.3 日、離心率 0.34)

Be/X 線連星系では Be 星ガス円盤の外縁から中性子

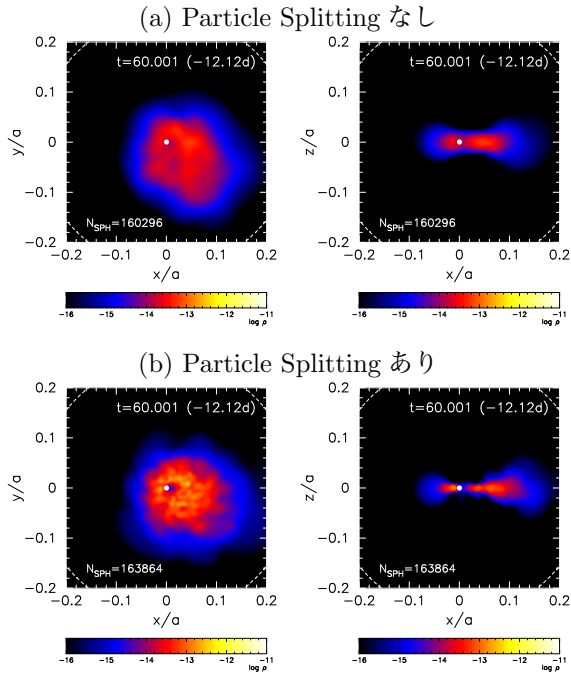


図 8. Be/X 線連星 4U 0115+63 のシミュレーションにおける降着円盤の構造：(a)Particle Splitting なし、(b)Particle Splitting あり。左図は軌道面上の密度分布、右図は軌道面に垂直で軌道長半径に沿った面上の密度分布。連星の相は遠星点。

星へ物質が輸送される。Be 星ガス円盤では半径とともに密度が急速に低下するので、外縁からの質量輸送を高精度で計算することは莫大な粒子数を用いない限り難しい。今回、このような低密度領域での Particle Splitting の効果を、代表的な Be/X 線連星系である 4U 0115+63 に対するシミュレーションで調べてみた。

図 8 は、2 通りのシミュレーションからコンパクト天体近傍（降着円盤）だけを抜き出して表示したものである。左図は軌道面上の密度分布、右図は軌道面に垂直で軌道長半径に沿った面上（降着円盤の断面）の密度分布を表している。もともとかなり低い空間精度の領域なので、Particle Splitting を行っても、降着円盤の構造に大きな変化が見られるわけではない。しかし、図 8(a) と (b) を詳しく比較すると、Particle Splitting により空間精度が高くなる効果が現れていることがわかる。例えば、降着円盤の厚みは外に行くほど大きくなるが、その様子を図 8(b)（右図）にうかがうことができる。

図 9 は、これらのシミュレーションから得られた降着率の時間変化を示している。図 9 から、Particle Splitting の効果により降着率のノイズが大きく減少していることがわかる。これは、Particle Splitting による粒子数の増加が降着円盤の粒子数を増やし、それにより降着円盤内縁付近の解像度が高くなったことによるものである。

このように、調べたい領域が低密度領域であった場合にも、Particle Splitting を適用することで、空間精度が

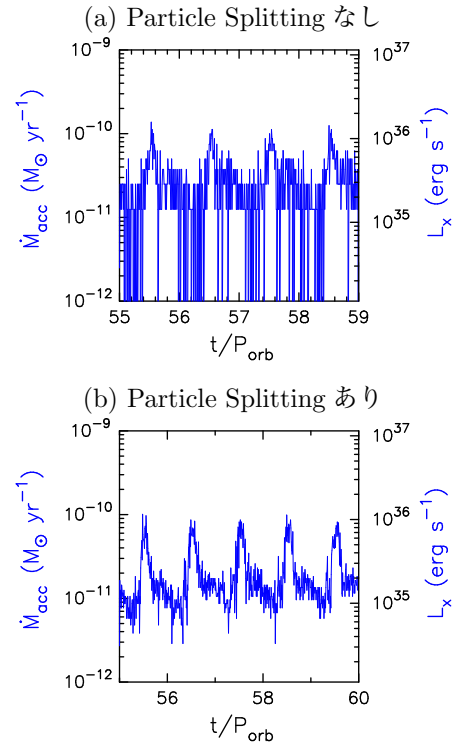


図 9. Be/X 線連星 4U 0115+63 のシミュレーションにおける降着率の時間変化：(a)Particle Splitting なし、(b)Particle Splitting あり。5 軌道周期にわたる降着率（左軸）とそれが中性子星へ落下した場合に期待される X 線光度（右軸）が表示されている。

向上し、より信頼できる結果が得られることになる。

3.2. 当初計画の達成状況について

本研究の申請書に記載した研究計画は、(a) 超高エネルギーガンマ線連星系のパルサー風モデルに基づく 3 次元大規模シミュレーションを実施し、それに基づいた高エネルギー放射計算を行うとともに、並行して、(b) 流体コードへ Particle Splitting 法を組み込み、(c) シミュレーションにより検証するとともに、シミュレーション・データを用いて高エネルギー放射を計算し、(d) それらを可視化するための手法を開発することであった。

計画 (a) については、パルサー風モデルに基づくシミュレーションを行い、それに基づく高エネルギー放射を計算し、その成果 2 つの査読論文として発表したもので、計画を 100% 達成したと言える。計画 (b) については、SPH コードに Particle Splitting の手法を組み込む作業が終了したので、子供粒子の配置のしかたや速度の与え方に改善の余地があることを考慮しても、計画をほぼ（約 80%）達成したと言って良いと思う。

計画 (c) については、Particle Splitting 法を組み込んだコードのシミュレーションによる検証は終了したが、そのデータを用いた放射計算は未実施である。したがって、達成度は約 50% である。

表 1. 計画の達成状況

計 画	達成度 (%)
(a) パルサー風モデルの大規模シミュレーションと放射計算	100
(b) Particle Splitting 法の組み込み	80
(c) 改良コードのシミュレーションによる検証とそれに基づく放射計算	50
(d) 可視化手法の開発	10

計画 (d) については、SPH 法のための可視化ツールである SPLASH2 というパッケージ (Price 2007) と IDL を用いて、データの表示方法について検討しているところであり、進捗の程度はわずか (達成度約 10%) である。

4. 今後の展望

申請時に記した本研究課題の計画のうち、主要な計画の 1 つだったパルサー風モデルに基づく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と放射計算を組み合わせるより現実的なスペクトルと光度曲線を求めるという世界で初めての枠組みがほぼ完成した。今後は、連星系の持つ個性が系の放射にどのように影響するかを理解するために、さまざまなパラメータに対して計算を行っていきたいと考えている。もう 1 つの主要な計画だった Particle Splitting 法を用いた局所的高空間精度化についてもコーディングが終了したので、これからはさまざまな天体への応用へと進んでいきたいと考えている。また、本研究での放射計算は高エネルギー放射に特化していたが、Be 星ガス円盤からの可視光や赤外線放射の計算 (モンテカルロ法を用いた放射輸送計算) もシミュレーション・データを用いて行っていきたいと考えている。

可視化手法の開発については、本研究開始時からの懸案であるが、まだ SPLASH2 と IDL を用いてどれだけのことがやれるか試している段階にあり、展望というほどのものは描けていない。

5. 研究成果リスト

本研究課題に関する今年度の研究成果は以下の通りである。

1. 学術論文

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/LS 2883”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63**, 893
 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, “Modeling high-energy light curves of the PSR B1259-63/LS 2883 binary based on 3-D SPH simulations”, *Astrophysical Journal*, **750**, 70

2. 国際会議における発表

Okazaki, A. T. “Modeling gamma-ray binaries with Be stars”, Be/X-ray Binary Workshop 2011 (2011 年 7 月, バレンシア)

Okazaki, A. T. “Dynamics of Circumstellar Disks in Be-Star Binaries”, Workshop on Circumstellar Dynamics at High Resolution (2012 年 2 月, イグアスの滝)

3. 国内学会における発表

岡崎敦男「Accretion vs. Pulsar Wind Models for the TeV Gamma-ray Binary LS I +61 303」, 日本天文学会 (2011 年 9 月, 鹿児島)

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
 Kitsionas, S., Whitworth, A.P. 2002, *Monthly Notices of the Rpyal Astronomical Society*, **330**, 129
 Lee, U., Saio, H., Osaki, Y., 1991, *Monthly Notices of the Rpyal Astronomical 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, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63**, 893
 Price, D. 2007, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, **24**, 159
 Stevens, I. R., Blondin, J. M., Pollock, A. 1992, *Astrophysical Journal*, **386**, 265
 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, *Astrophysical Journal*, **750**, 70