

jh140043-NA24

相対論的流体コードの開発と超高エネルギーガンマ線連星系への応用

岡崎 敦男 (北海学園大学工学部)

概要

我々のグループは、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) コードを用いて、世界に先駆けて超高エネルギーガンマ線を出す連星系の 3 次元シミュレーションを行ってきたが、シミュレーションの信頼性と効率性にいくつかの解決すべき課題があった。平成 26 年度には、それらの課題のうち、密度が大きく変化するところで計算精度が悪くなるという問題、およびパルサーと呼ばれる高速回転する中性子星からの相対論的な粒子の流れ (パルサー風) を同じ運動量流速を持つ非相対論的な流れで近似しているために広い領域での流れの形状を再現できないという問題を解決するようにコードを書き換え、それを超高エネルギーガンマ線連星系に適用することを計画し、年度前半の研究で前者の問題についてはコードの改良が終了し、テストシミュレーションも終了した。しかしその時点で、超ガンマ線連星系のシミュレーションにおいては、パルサー周囲のガス圧に応じてパルサー風が抑止される効果を取り入れることが必須であることを見いだしたので、そのようにコード改良しシミュレーションを行うことを最優先させた。結果として、パルサー風抑止効果を取り入れたシミュレーションを世界で初めて行うことができたが、当初の計画にあったコードの相対論化は準備の段階でとどまった。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名
北海道大学情報基盤センター

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野
超大規模データ処理系応用分野
超大容量ネットワーク技術分野
超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

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)	研究の統括とコードの改良・数値計算
大宮 学 (北海道大学情報基盤センター)	コードの並列化とチューニング
河内 明子 (東海大学理学部)	数値計算
早崎 公威 (Korea Astronomy and Space Science Institute)	コードの改良と数値計算
Christopher M. P. Russell (デラウェア大学、アメリカ)	コードの改良と数値計算

2. 研究の目的と意義

2.1. 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。これらの天体は大質量星と超強重力天体（中性子星あるいはブラックホール）からなる連星系だと考えられるが、ほとんどの系で超強重力天体の正体が分かっておらず、それらの系では相互作用や高エネルギー放射機構について未解明な状態が続いている。

我々は数年前から、3次元 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) コードを用いて、いくつかの超高エネルギーガンマ線連星系に対するシミュレーションを行い、相互作用の詳細を明らかにしてきた。これらの計算はこの分野では例の少ない3次元流体シミュレーションであり価値の高いものであるが、結果の信頼性と計算の効率性に関していくつかの解決すべき課題があった。前者については、計算全般に関わる問題として、(1) 密度が大きく変化するところで計算精度が悪くなることと、(2) 衝撃波領域で物質混合が起こりにくい、という問題があり、特殊相対論的シミュレーションに関わる問題として、(3) パルサー風を同じ運動量流速を持つ非相対論的な流れで近似しているために広い領域でコリオリ力の影響を強く受けてしまい、衝撃波面の形状が正しい形にならない (Bosch-Ramon et al. 2012) という課題があった。後者については、(4) MPI化が小規模で並列化の効率が悪いことが、より大規模なシミュレーションを行うことを困難にしていた。

2.2. 研究の目的

本研究課題の最終的な目的は、

1. これまで用いてきた SPH コードを、密度の大きく変化するところでも精度良く計算でき、(特殊)相対論的な流体を扱え、KH 不安定性を再現できるように書き換えるとともに、
2. 広範囲の MPI 並列化とチューニングを行い、
3. 改良した相対論的コードを用いて超高エネルギーガンマ線連星系の大規模数値シミュレーションを行い、観測量との詳細な比較を行う

ことである。そのためのコードの開発・改良は膨大な作業量になるので、研究に与える影響の大きさにより優先順位を付け、平成 26 年度は、コードを密度の大きく変化するところでも精度良く計算できるように改良（いわゆる $\text{grad-}h$ 補正項を導入）した後、(特殊)相対論化に特化して作業を行い、それを用いて超高エネルギーガンマ線連星系の大規模数値シミュレーションを行うことを目標とする計画を立てた¹。

2.3. 研究の意義

超高エネルギーガンマ線連星系における相互作用、およびそこから高エネルギー放射の物理を明らかにするためには、3次元動的モデルを構築し、それを観測結果と比較することが必須である。現在、3次元シミュレーション行っているのは我々の他に1グループだけであり、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を計算する手法についても我々が一歩先を行っている。しかし、前述のように、我々のモデルにはいくつかの解決すべき課題がある。本研究と来年度以降の研究によりそれらの課題を解決すれば、モデルと観測結果との詳細な比較が可能になる。そのようにして得られた3次元モデルは、超高エネルギーガンマ

¹ 実際の作業では、後述のように、 $\text{grad-}h$ 補正項を導入し、テストシミュレーションで効果を確認した後、超ガンマ線連星系シミュレーションにおいてより緊急の対応を必要とする改良点が明らかになったため、それへの対応とそれに基づくシミュレーションを優先して行った。その結果、コードの相対論化作業はどこをどのように書き換えるか方針を立てるところまでしか進まなかった。

線連星系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であるため、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)、NASA、サウサンプトン大学(イギリス)、サンパウロ大学(チリ)]にも利用されている。本研究で行う計算コードの開発・改良は、それらのグループの研究にも役立つものである。

3. 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、SPH法に基づく3次元流体コードである。高精度なシミュレーションを行うためには100万個以上の粒子が必要となり、そのような計算を非常に小さなタイムステップで何周もの連星軌道周期にわたって実施するには非常に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、ここに申請した次第である。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

新規課題のため、該当せず。

5. 今年度の研究成果の詳細

以下に、中間報告までに得られた成果 (§ 5.1) とその後得られた成果 (§ 5.2) について詳述する。

5.1. *Grad-h* 補正項の導入とテストシミュレーション

旧来の SPH 法による定式化では smoothing length h (粒子の大きさに対応する量) の場所による違いを無視していた (h の勾配をゼロとおいていた) ため、 h が大きく変化するところでは計算が不正確になっていた (例えば、Springel & Hernquist 2002)。そのため、現代的な SPH コードは h の勾配を考慮した定式化に基づいて書かれている。その

代表的なやり方が変分原理から基礎方程式を導く方法で、この方法を用いると自然に h の勾配を含む項 (*grad-h* 補正項と呼ばれる) が基礎方程式に含まれることになる (例えば、Rosswog 2009)。

我々のコードは *grad-h* 項を含んでいない旧来の定式化によっていたので、コードの変更のための具体的な作業手順を以下のように2段階に分けて行うことを計画した。

第1段階: 非相対論的な変分原理に基づく定式化に基づき、SPHコードを改良する。主な改良点は *grad-h* 項を含む形への書き換えである。書き換えが適切に行われたことを確認するためテストシミュレーションを実施する。

第2段階: 第1段階で用いた基礎方程式を相対論的なものに変更する。SPHコードの変更が終了したら、変更が適切に行われたことを確認するためテストシミュレーションを実施する。

平成26年度前半(中間報告までの期間)で、第1段階については、コードの変更、テストシミュレーションとも終了した²。テストシミュレーションは、

- Be 星周円盤の形成と伴星との潮汐相互作用 (衝撃波なし)
- 大質量連星系における恒星風の衝突 (強い衝撃波。2つの恒星風粒子の質量に大きな違いなし)
- 超高エネルギーガンマ線連星におけるパルサー風、星周円盤、恒星風の衝突 (強い衝撃波。3種類の粒子に非常に大きな質量の違いがある)

という3つの異なるタイプの系に対して行った。

以下に、テストシミュレーションの結果について述べる。

² 後述するように、相対論化作業を行わなかったため第2段階は未実施。

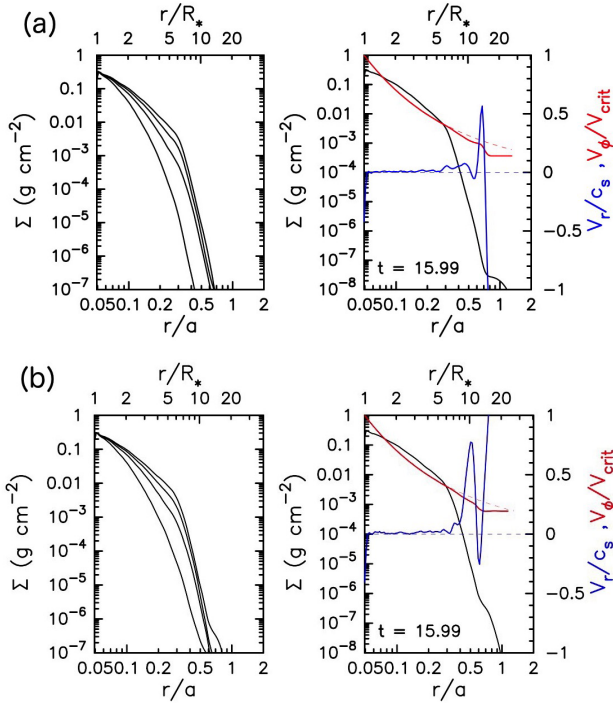


図 1. Be 星とブラックホールの連星 AGL J2241+4454 のシミュレーションにおける動径方向の物理量分布：(a) grad- h 補正項を無視した計算 vs. (b) grad- h 補正項を含んだ計算。左のパネルは面密度の変化（4 周期毎）、右パネルは 16 周期後の物理量。黒線が面密度、赤線が回転速度、青線が動径速度。

5.1.1. Be 星星周円盤の形成と伴星との潮汐相互作用のシミュレーション

連星系のパラメータとしては、最近初めて発見された Be 星とブラックホールの連星系 AGL J2241+4454 のものを使用した。Be 星とブラックホールの質量はそれぞれ太陽の 13 倍と 5.3 倍で、軌道周期は 60.37 日、軌道離心率 0.1 である。

grad- h 補正項を含まない場合のシミュレーションと含む場合のシミュレーションの比較を図 1–2 に示す。図 1 は動径方向の（＝方位角方向に平均し、 z 方向に積分した）物理量の分布を示している。図 1(a) は grad- h 項を含まない場合、図 1(b) は grad- h 項を含む場合である。左のパネルでは星周円盤形成の様子が 4 周期毎の面密度分布として表されており、右のパネルでは形成開始から 16 周期後の面密度（黒線）、回転速度（赤線）、動径速度

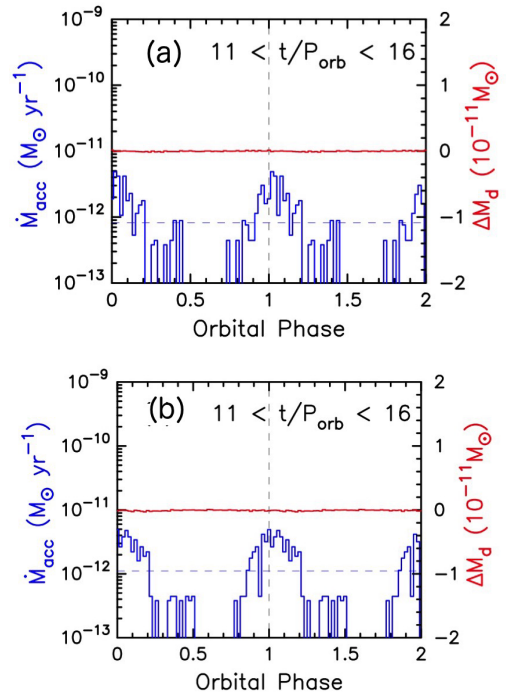


図 2. Be 星とブラックホールの連星 AGL J2241+4454 のシミュレーションにおけるブラックホールへの降着率の位相依存性：(a) grad- h 補正項を無視した計算 vs. (b) grad- h 補正項を含んだ計算。青実線は降着率、青破線は平均降着率、赤実線は星周円盤の質量。位相 0 と 1 は近星点

（青線）が示されている。2 つのシミュレーションの比較から、密度が緩やかに変化している領域では両者の間には差がほとんど見られないが、密度が急激に変化する領域では差が現れることが見て取れる（右のパネルの青線で表された動径速度分布）。

図 2 は 2 つのシミュレーションにおけるブラックホールへの降着率を比較している。図 2(a) は grad- h 補正項を含まない場合、図 2(b) は grad- h 補正項を含む場合である。図から、両者の結果は全体として似ているが、grad- h 補正項を含む場合の方がノイズが少なくなっていることが読み取れる。これもまた、grad- h 補正項を考慮することにより期待される効果である。

5.1.2. 衝突恒星風のシミュレーション

大質量星どうしの連星系ではそれぞれの恒星から高速で放出された物質（恒星風）が衝突し、そこ

から強い X 線が出ている。エータ・カリーナはそのような相互作用を示す代表的な連星系（周期 5.5 年、軌道離心率 0.9）である。この系に対して、2 つの恒星風の粒子の質量を同じにして、近星点近傍の軌道位相でシミュレーションを行ってみたが、grad- h 補正項を含まない場合と含む場合で明確な差は出なかった。

5.1.3. 超高エネルギーガンマ線連星におけるパルサー風、星周円盤、恒星風の衝突のシミュレーション

図 3 は、超高エネルギーガンマ線連星 PSR B1259-63 (Be 星と中性子星の連星系。周期 3.4 年、離心率 0.87) のシミュレーション開始からわずか 1 日後のスナップショットである。grad- h 補正項を含むシミュレーション(下図)は、grad- h 補正項を含まないシミュレーションに比べてパルサー風の動圧がかなり大きくなっており、Be 星星周円盤と恒星風を非常に素早く吹き払っている。grad- h 補正項を含んだシミュレーションでのパルサー風の動圧は理論的に予想される値よりもかなり大きくなっており、シミュレーションは図 3(b) の直後にクラッシュした。それに対して、grad- h 補正項を含まないシミュレーションでは衝撃波の形状は解析解と似たものになり、計算もクラッシュすることはなかった。

grad- h 補正項を含んだシミュレーションでパルサー風の動圧が強くなりすぎたのは、密度が極端に異なる 3 種類の媒質（密度が高い方から順に、Be 星星周円盤、Be 星恒星風、パルサー風）を極端に異なる粒子数（極端に異なる空間解像度）で表すために、粒子に極端に異なる質量（パルサー風粒子の質量は、恒星風粒子の質量の 1/100、星周円盤粒子の質量の 1/10000）を与えたためと考えられる。SPH 法では、各点での物理量は近傍粒子の寄与を足し合わせたものなので、そもそもこのように極端に異なる質量を持つ粒子を用いると媒質の境界での物理量が正しく表されない。現状のコードでは、物質混合がほとんどおこらないために異なる質量を持つ粒子の分布が分離しており、さらに

grad- h の効果も無視しているため、たまたま問題が起こっていなかったようだ。この問題の解決策としては、短期的には粒子数を大幅に増加すると共に密度の低い媒質の解像度を下げることにより、ほぼ等しい質量を持つ 3 媒質で計算することが考えられるが、長期的には密度によらない定式化 (Saitoh & Makino 2013) を用いてコードを書き換える方が良いだろう。新たに判明した大きな課題である。

5.2. 研究計画の変更：パルサー風を ON/OFF するスイッチの導入と超高エネルギーガンマ線連星シミュレーション

5.2.1. 計画変更の背景

我々は平成 25 年度から HESS J0632+057 と呼ばれる超高エネルギーガンマ線連星系のシミュレーションに取り組んできた。この系では、Be 星と呼ばれる星周円盤と恒星風を持つ大質量星と正体不明の強重力天体が、軌道周期が約 315 日、軌道離心率が 0.83 という非常に細長い軌道上を運動している。我々は、HESS J0632+057 では Be 星星周円盤が連星軌道面に対して傾いていて、そのような円盤とパルサー風の相互作用が遠星点付近で強くなるのだろうと考えシミュレーションを始めた。用いた粒子数は数十万個程度だが、パルサー風という高速の粒子の流れを短いタイムステップ（連星軌道周期の約 10^{-7} ）で約 3 軌道周期を追いかけるために、1 つのシミュレーションに約 3 か月を要し、平成 26 年度に入ってからようやくシミュレーションが終了した。しかし、シミュレーションを基に高エネルギー放射の光度曲線を計算して見たところ光度の極大が近星点直後に現れ、観測された光度曲線とまったく合わなかった。

Be 星を持つ超高エネルギーガンマ線連星系のシミュレーションは、その形状の複雑さのために、我々のグループ以外にはまだ誰もシミュレーション ZA できていないが、HESS J0632+057 では、高エネルギー放射光度が遠星点付近で極大になるという不可解な振る舞いを示すため（他の超高エネルギー

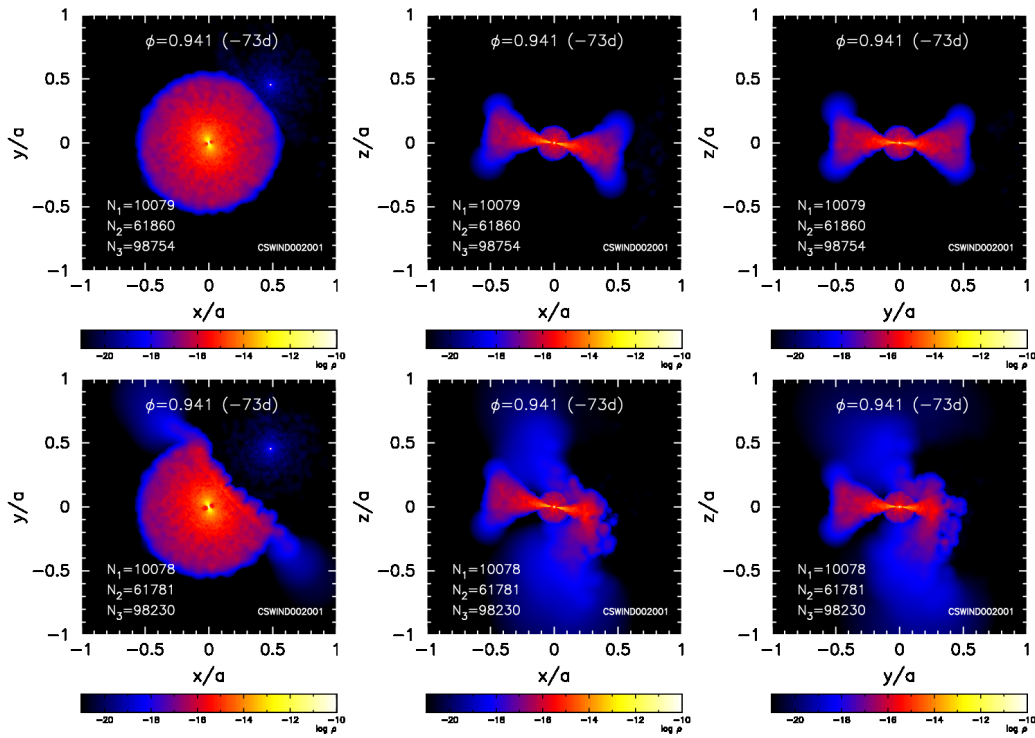


図 3. 超高エネルギーガンマ線連星 PSR B1259-63 におけるパルサーと Be 星の相互作用の様子を表すスナップショット：(a) grad- h 補正項を無視した計算 vs. (b) grad- h 補正項を含んだ計算。近星点は x 軸の負方向にあり、連星軌道は x - y 平面内にある。左パネル： x - y 面上の密度分布、中央パネル： x - z 面上の密度分布、右パネル： y - z 面上の密度分布。

ガンマ線連星系では近星点付近で極大になる) シミュレーションどころかおおまかなシナリオすら出されていなかった。そのような天体のシミュレーションを成功させることは、この分野の研究にとっても我々の研究の評価にとってもとても重要なことである。このように考え、コードの相対論化作業を一時棚上げし、この系のシミュレーションを成功させることを最優先することにした。

5.2.2. コードの改良とシミュレーション結果

検討の結果、近星点付近ではパルサー周囲のガスの圧力が高く、それによりパルサー風が抑止される可能性が高いことが分かり、その条件(を抑止期間も含めて定量的に表したものを)をコードに組み込むことにした。若干の試行錯誤の後、コードが正しく動くようになったので、数例のシミュレーションを行った。結果の一例を図 4 に示す。上のパネルは観測された X 線光度曲線で、下のパネルはシ

ミュレーションから求めた X 線光度を示している。下のパネルで、赤線はパルサー風を抑止する効果を組み込んだシミュレーション、紫色の線はその効果を含まない場合のシミュレーションである。図から、パルサー風が抑止される効果を取り入れたシミュレーションは観測の傾向をおおむね再現できていることが分かる。ちなみに、パルサー周囲のガス圧によりパルサー風が抑止される効果を組み込んだシミュレーションは世界で初めての試みである。その結果は、平成 27 年 5 月に開かれた国際会議で発表した。現在、論文を執筆中である。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

6.1. 今年度の進捗状況

本研究の計画書に記載した目的は、(1) 計算コードの特殊相対論化とテスト計算、(2) 相対論的計算コードの並列化とチューニング、(3) 相対論的コー

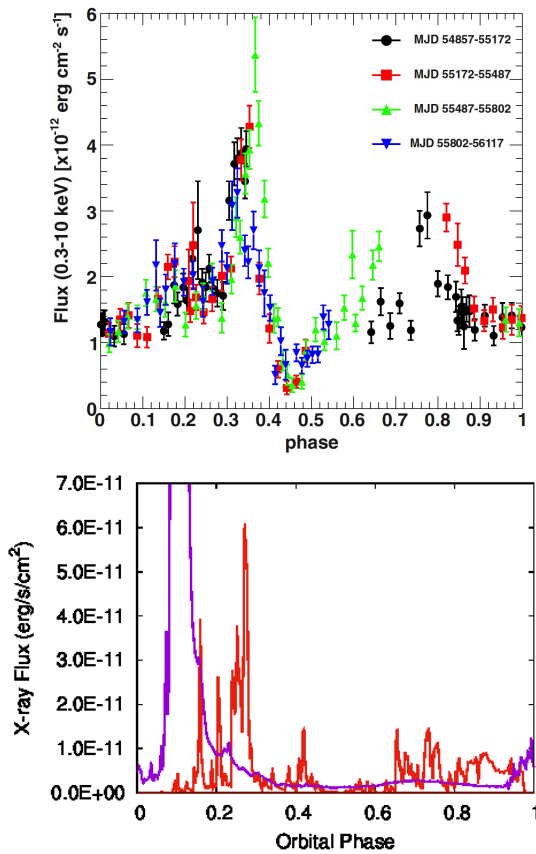


図 4. 超高エネルギーガンマ線連星 HESS J0632+057 の X 線光度曲線。上図：観測された光度曲線 (Aliu et al. 2014, Fig. 3)。下図：シミュレーションから求めた光度曲線。赤線はパルサー風を抑制する効果を組み込んだシミュレーション、紫色の線はその効果を含まない場合のシミュレーション。両方の図とも横軸は軌道位相。位相 0 と 1 が近星点で、位相 0.5 が遠星点。

ドの超高エネルギーガンマ線連星系への応用の 3 つである。さらに、(1) は smoothing length h の勾配を考慮した定式化に基づく改良と相対論化の 2 段階に分かれる。また、計画当初は、(1) に 50% の時間、(2) と (3) にあわせて 50% の時間をかけることになるだろうと考えていた。

平成 26 年度前半に (1) の前半段階が終了したが、その後、我々にとってより緊急なコード改良 (パルサー風抑制効果の導入。§ 5.2 参照) の必要性が生じたので、そちらの課題に集中して取り組んだ結果、相対論化作業は準備の段階でとどまることになった。したがって、その後に予定していた並列化

表 1. 計画の進捗状況

項目	当初計	新規計
	画の達	画の達
	成度	成度
	(%)	(%)
計算コードの相対論化とテスト計算	40	—
コードの並列化とチューニング	0	—
パルサー風抑制効果のコード化とテスト計算	—	100
超高エネルギーガンマ線連星への応用	0	100
全体	20	100

とチューニング、および相対論化したコードを用いた大規模計算も手つかずのままである。それらを考慮すると、当初の計画の達成度は表 1 のように 20% 程度である。

パルサー風が抑制される効果についてのコード改良とシミュレーションについてはどちらも計画を 100% 達成した (表 1)。

6.2. 今後の展望

前述のように、作業はコードの相対論化の手前で止まっている。それを再開する手はあるが、§ 5.1.3 で述べたように、パルサー風、恒星風、星周円盤の密度が極端に異なるため、それらを同程度の質量の粒子で表すには、非常に大きな粒子数を必要とする。今のままで、grad- h 補正項を組み込んだ方式を単純に相対論化するだけでは計算時間が長大になりすぎて実用にならない。そこで、計算効率を大きく上げるために、現行のコードではごく小規模にしか行っていない MPI 並列化をコード全体にわたりに行うべく、コードを見直す作業を最近始めた。

コード全体にわたる MPI 並列化作業が進展した後、相対論化作業に取りかかるつもりである。また、現行のコードで物質混合が起こりにくい問題は、Price (2007) が提唱した artificial conductivity

を導入することで解決しようと思う。

現在、平成 27 年度にコードの MPI 並列化と artificial conductivity 導入を行い、平成 28 年度に相対論化作業を行うことを考えている。

7. 研究成果リスト

本研究課題に関連した今年度の研究成果は以下の通りである。

(1) 学術論文

Moritani, Y., Okazaki, A. T., Carciofi, A. C., et al., 2015, “Probing the nature of the TeV γ -ray binary HESS J0632+057 by monitoring Be disk variability”, *Astrophysical Journal Letters*, **804**: L32

(2) 国際会議プロシーディングス

Okazaki, A. T., 2015, “Current status of our understanding of Be disk physics”, ASP Conference Series, Eds. A. Sigut & C. Jones, 印刷中

(3) 国際会議発表

Okazaki, A. T., “Dynamical modelling of the Be/Gamma-ray sources HESS J0632+057 and AGL J2241+4454”, Be/X-ray Binary Workshop 2014 (2014 年 7 月, バレンシア)

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, ロンドン(カナダ))(招待講演)

Okazaki, A. T., “Quasi-cyclic variability of circumstellar disks around Oe/Be stars”, Magnetism and Variability in O Stars (2014 年 9 月, アムステルダム)

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, ハイデルベルグ)

(4) 国内会議発表

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, 山形)

岡崎敦男 “Dynamical Modeling of the Be/BH Binary AGL J2241+4454”, 日本天文学会 (2015 年 3 月, 大阪)

(5) その他

なし

参考文献

Aliu, E., 2014, *Astrophysical Journal*, **780**: 168

Bosch-Ramon1, V., Barkov, M. V., Khangulyan, D., Perucho, M., 2012, *Astronomy & Astrophysics*, **544**, 59

Price, D. 2007, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, **24**, 159

Rosswog, S. 2009, *New Astronomy Reviews*, **53**, 78

Saitoh, T. R. & Makino, J., 2013, *Astrophysical Journal*, **768**: 44

Springel, V. & Hernquist, L. 2002, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **333**, 649