

課題名 (タイトル) :

磁気流体力学によるブラックホール・中性子星連星合体の数値相対論シミュレーション

利用者氏名 : 久徳浩太郎

所属 : 理論科学連携研究推進グループ・階層縦断型基礎物理学研究チーム

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

ブラックホール・中性子星連星の合体は(1)重力波源、(2)ショートガンマ線バーストの起源天体、(3)r 過程元素の供給源として期待されている。重力波は一般相対論により予言される時空を伝わる波で、2015年9月にアメリカのLIGOにより初めての検出が行われ、広く注目を集めている。ショートガンマ線バーストは、2秒以下に太陽が一生で放出するのと同等のエネルギーを解放する、宇宙最大の爆発の一種であり、現代の宇宙物理学における最大の未解決問題の一つに数えられる。r 過程元素とは金やプラチナ、レアアースなどの鉄より重く中性子過剰な重元素のことで、その合成が宇宙のいつどこで行われたかはやはり天体核物理の未解決問題である。

これらの解明には実際の連星合体を重力波や電磁波など多様な手段で観測し、それを理論予言と比較することが決定打であり、そのために正確な合体の計算が重要である。過去にも多くの理論計算が行われてきたが、合体に対する磁場の効果はまだまだ理解が進んでいない。連星の合体後には中性子星の磁場が大きな役割を果たすことが知られているが、磁気流体力学では小スケールでの振舞が系のダイナミクスを支配するため、正確な振舞の導出には高解像度計算が本質的に重要である。特に最近、スーパーコンピュータ「京」の2000ノード以上を用いた超高解像度計算により、合体後に残るブラックホール降着円盤の少なくとも1モデルから、非常に高解像度の場合のみ大量の質量が放出されることが明らかになった。このような質量放出はr 過程元素の生成量やそれに付随する電磁波放射の明るさと直接関係するため、信頼できる予言が求められている。しかし、「京」などによる超高解像度計算を多数のモデルに対して実行するのは容易でない。実際の天文観測と比較可能な系統的計算には、グリッド構造を

工夫するなどにより、より一般的なスパコンで計算できることが望ましい。問題は、それが実際に可能なのか、それとも本質的に「京」クラスのスパコンが必要なのである。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本課題では、HOKUSAI の 200 ノード程度を用いてブラックホール・中性子星連星合体の大規模磁気流体力学数値相対論計算を行った。特に、高解像度で計算する領域をブラックホール近傍のなるべく最小限に留めるため、合体直前までは磁場の効果を含めない Adaptive mesh refinement (AMR) 数値相対論コードで計算し、そのデータを補間しつつ磁場を印加することで新たな「初期条件」を生成し、Fixed mesh refinement (FMR) の磁気流体力学数値相対論コードによる計算につなぐ手法を開発した。補間手法については Q16312 に譲る。

ブラックホール・中性子星連星のモデルとして、連星ブラックホールからの 2 例目の重力波である GW151226 の片方の質量に対応した 7.5 太陽質量を、本研究のブラックホール質量に選んだ。これは過去の計算よりも現実的なパラメータを設定したとすることができる。ブラックホールのスピン (自転角運動量) には上限の 75% を選び、中性子星は質量が 1.35 太陽質量、半径が 13.6km のモデルを用意した。過去の研究により、このパラメータでは中性子星が合体直前に潮汐破壊され、大質量の降着円盤ができ、また物質が力学的に放出されることも期待できる (実際に確認した)。解像度 (最高 160m) や印加する磁場強度 (最高 10 の 16 乗ガウス = 10 の 12 乗テスラ)、その他の数値計算に関するパラメータは複数パターンに変更して計算を行った。

磁気流体力学計算には、「京」向けにチューニングされた FMR コードを用いた。このコードについては昨年度の簡易利用により、「京」と同程度の実行効率 12% 程度が実現されることを確認し

ている。本研究課題では軌道面に関する対称性を課さない場合の 3 次元計算を、 $x, y, z$  それぞれに対し 6 ノード、合計 216 ノードによる MPI 並列で実行した。各ノードでは 32 コアを用いた OpenMP 並列を行い、全体の計算はハイブリッド並列で実行している。

合体前の AMR 計算に関しても、高速化のため、また AMR から FMR への補間をより高精度化することを目指し、MPI と OpenMP とのハイブリッド並列化したコードで、特に計算負荷の軽い連星中性子星に対して複数実行した。これは 1 モデルを 32 コア (各 32 ノード) で実行している。こちらの計算の方が使用するノード数が少なく、流れるまでの待ち時間の都合も含め、突発的なノードダウンに対して頑強であったことを付記しておく。

### 3. 結果

磁場を 10 の 16 乗ガウスで印加した 160m 解像度計算の場合には、大質量の物質が降着円盤から放出されることを明らかにした。具体的には、磁場を考慮しない場合には太陽質量の 5%程度が力学的に放出され、20%程度が降着円盤になる。この降着円盤の内部でその差動回転により磁場が増幅され、効率的に駆動された乱流的な流れが小スケールで (我々の計算の場合は数値的なものであるが、現実にも存在するはずの粘性によって) 散逸し、高まった熱的な圧力によって太陽質量の 1%程度が追加で放出されることがわかった。これは即ち、磁場を考慮した場合のブラックホール・中性子星連星合体に伴う電磁波放射は、過去の純粋に流体力学的な計算による予想より明るくなるであろうことを示唆している。これに対し解像度が低い場合には、十分に小スケールの運動を解像できず磁場の増幅が不十分であること、乱流的な運動の熱化が弱いことによってこのような質量放出は駆動されなかった。これは過去の計算と整合的である。一方、過去の「京」による計算では片側 60km 程度の非常に広い範囲で高解像度を用いた計算を行っていたのに対し、本計算ではブラックホール質量が増えて空間スケールも長くなっているにも関わらず、片側 40km 以下の効率的なグリッド配置でも解像度さえあれば

磁場による質量放出が起こることを確認できた。これは 3 次元の計算であることを考えれば計算コストが 1/4 程度で済ませられることを示唆しており、今後のさらなる系統的計算に向けても有意義な成果である。ただし「京」による別のモデルに対する計算では解像度を上げるとより多くの質量が放出されることがわかっており、今回の成果が収束した結果を与えているかどうかについては結論できない。今回の計算結果は磁場増幅や Poynting 流束などについても解析してまとめた。

一方、今回開発した手法の問題点として、AMR から FMR にデータを移して計算を始めた直後に、ミリ秒以下の短時間ではあるが、系の重力的束縛を逃れて放出される可能性のある物質が本来の 10 倍近くに増えて見えてしまう時期があることもわかった。過渡的な時期を過ぎると AMR ずっと計算し続けた結果と同じ値に落ち着くため、この影響は無視できると考えているが、計算の信頼性を下げることが事実である。この原因はデータの補間に伴う流体量の非物理的な振舞いによるものと考えられ、より高解像度の計算では影響が少なくなると期待される (広義の収束性)。そこで、補間に伴う特に流体部分の振舞いをよく調べるため、計算の軽い連星中性子星で高解像度の AMR 計算を行い、補間に伴う誤差の系統性を調べると共に、同時に得られる重力波などの収束性解析を行っている。(この計算に注力することにした理由には、216 ノードの磁気流体計算は走るまでに時間がかかることがあり、ノードが落ちたときの影響も広範囲に及ぶため、少ないノードで計算できるこちらの方が計算機資源を有効に使いそうだったこともある)

### 4. まとめ

ブラックホール・中性子星連星合体の磁気流体数値相対論計算を実行し、中心付近を高解像度で計算した場合に、増幅された磁場による質量放出が起こることを確認した。特に、ブラックホールの質量が重力波 GW151226 として観測されたものと同程度に現実的な大きさの場合でも質量放出が起こりそうであることを明らかにした。この現象が「京」のような大型スパコンでなくても解像

しうるという結果は、今後の一般的なスパコンによるブラックホール・中性子星連星合体の研究にとって有望な結果である。

合わせて、AMR から FMR へのより正確なデータの変換手段を調べるため、AMR コードによる連星中性子星合体の高解像度計算を行った。今後このデータを用いて、データ変換の解像度依存性を精査しつつ、同時に計算結果を重力波など様々な信号のより精密な導出に役立てたい。

5. 今後の計画・展望

2017 年度は理研では客員になってしまうが、(一般あるいは簡易) 利用を許可していただけるのであれば、連星合体に関する高精度計算を続けていきたいと考えている。