

平成 29 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26400274

研究課題名（和文）曲がった時空における粒子ダイナミクス

研究課題名（英文）Particle dynamics in curved spacetimes

研究代表者

Baiotti Luca (Baiotti, Luca)

大阪大学・理学研究科・特任准教授（常勤）

研究者番号：00574047

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：開発されたコードは、磁場を与えられた連星中性子星の合体のシミュレートするために使われました。シミュレーションのデータの解析したら、粒子が加速されるところ、続いてガンマ線を生成する場所でありうる、漏斗のような磁場構造の形成を観察した。加速された粒子自体の順調なシミュレーションはまだできていない。この研究の継続の焦点とする予定がある。漏斗のような磁場構造が、採用された状態方程式、質量比、および初期磁場方位からむしろ独立して現れることを見出した。

研究成果の概要（英文）：The code we built was used to simulate binary neutron star mergers endowed with magnetic fields. We observed the formation of an organized magnetic field structure, which may be the place where particles are accelerated and subsequently produce gamma rays. Satisfactory simulations of the accelerated particles themselves have not been performed yet, and will be the focus of the continuation of this research. We found that the organized magnetic field structure appears rather independently of the adopted equation of state, mass ratio, and initial magnetic field orientation.

研究分野：一般相対性理論的天体物理

キーワード：中性子星 一般相対性理論 シミュレーション 磁場

1. 研究開始当初の背景

Advanced LIGO による重力波の革新的な検出により、2 つのブラックホールで構成されるコンパクトバイナリシステムの合体から、他の重力波源の近い将来の検出可能性がさらに高まっています。これは 2 つの中性子星または中性子星とブラックホールのいずれかで構成されるバイナリを含む。

ソーラー・マス・バイナリー・ブラックホールの合体は電磁信号を放出することは期待されていないが、連星中性子星および中性子星とブラックホールのシステムは非常に強力である (ショート・ガンマ線バーストのような) コリメート放出から、より等方的なもの (いわゆるキロノバ/マクロノバのようなもの) までの様々な EM 対応物の源であると思われる。

特に、ショート・ガンマ線バーストが連星中性子星または中性子星とブラックホールの合体によって供給される可能性は、観測証拠によって裏付けられている。連星中性子星または中性子星とブラックホールの合体によるショート・ガンマ線バーストと重力波の同時検出は、これらの連星に合体がショート・ガンマ線バーストの中央エンジンに動力を与えているという明確な証拠となる。さらに、この関連は、中性子星の中身の状態方程式に強い制約を与える可能性がある。

ショート・ガンマ線バーストにおけるガンマ線放射を記述する有力な理論モデルのひとつは、降着円盤によって囲まれた回転するブラックホールからの相対論的ジェットの打ち上げに基づいている。ジェットは、ニュートリノ - 反ニュートリノ放出または Blandford-Znajek メカニズムなどの磁気メカニズムを介して開始されることがあります。連星中性子星の合体の完全な一般相対論的シミュレーションは、合併がブラックホールの形成を力学的時間スケールでもたらずこれらのケースでは、太陽質量の 10 分の 1 という大規模なディスクが容易に形成できることを示している、相対論的ジェットの放出 発生しているかどうかはまだ調査中です。

これは、連星中性子星の合体の完全相対論的磁気流体力学シミュレーションを実施する際の努力を増加させており、最初のシミュレーションは数年前にさかのぼる。

高エネルギー粒子は、パルサー、マグネタ、または連星中性子星の合体のような多くの天体物理系で生成され、多くの場合観察される。例えば、パルサーは磁気圏の相対論的エネルギーまで粒子を加速している。他に、連星中性子星には、相対論的に拡大する電子 - 陽電子風や磁気流体力学的波によって X 線、ガンマ線シグネチャが生成する可能性がある。そのメカニズムに関してはまだ色々わかっていない。以上のような電磁放射が重力放

射とともに観測できたら、コンパクトな天体とその周りに発生する高エネルギー粒子のダイナミクスと性質について有効な情報が得られることが望み薄ではないと思われる。

2. 研究の目的

目的はコンパクトな天体から発生する高エネルギー粒子を調べることであり、これを得るために、連星中性子星の一般相対論的電磁流体力学シミュレーションをする必要がある。そのシミュレーションのデータから、高エネルギー粒子がどこから、どの条件のもと、発生するかの示唆になる。

3. 研究の方法

高エネルギー粒子の発生場所を探るために、連星中性子星の一般相対論的電磁流体力学シミュレーションを走らせた。そのシミュレーションのデータから、高エネルギー粒子がどこから、どの条件のもと、発生するかという示唆がわかった。我々のコードは有限差分で、アインシュタイン方程式と一般相対論的流体方程式と磁気流体方程式を解く。コードはアインシュタインツールキットというスーパーコンピューティングの数値的相対論のための公的に利用可能なルーチンの集まりを利用する。その中には、メッシュリファインメントを実装するドライバも含んでいる。

最も細かいグリッドは、インスピラント中に各中性子星をカバーし、合体後、結果として得られる超質量高速回転中性子星をカバーするより大きなものに統合される。完全流体の状態方程式を使用した走行で約 222m の最高グリッドで、H4 状態方程式を使用して約 186m の分解能を採用しました。この選択は、両方の場合において両中性子星がほぼ同じグリッドポイント数によってカバーされるようになされている。外部境界は、完全流体状態方程式の場合では約 1400km、H4 状態方程式の場合では約 1200km の距離に設定した。すべてのシミュレーションでは、計算コストを削減するために赤道面全体にわたって鏡映対称を設定した。

初期条件としては、磁化された、準円形の、非回転の連星中性子星モデルを進化させた。すべてのモデルは合体まで ~3-6 軌道を回る。合体の時間は、重力波の信号における最大振幅の時間として定義された。

4. 研究成果

開発されたコードは、磁場を与えられた連星中性子星の合体のシミュレートするために

使われました。シミュレーションのデータの解析したら、粒子が加速されるところ、続いてガンマ線を生成する場所でありうる、漏斗のような磁場構造の形成を観察した。加速された粒子自体の順調なシミュレーションはまだできていない。この研究の継続の焦点とする予定がある。漏斗のような磁場構造が、採用された状態方程式、質量比、および初期磁場方位からむしろ独立して現れることを見出した。果たしてシミュレーションの分解能不足の生で、結果からジェットが見えていない。次のステップはサブグリッドモデルを含むさらに詳細なシミュレーションを走らせることによって、高エネルギー粒子の発生する地域を明確に示すことである。もう一つの重要な要素は、有限温度の状態方程式とニュートリノ放射の使用である。これらは質的に異なる結果を生み出すことはないが、合体後の段階と重力波排出量のより正確な記述を提供する。

詳しくは、高質量連星中性子星システムの合体後に形成された磁場構造、すなわち合体後に力学的時間スケールでブラックホールを生成するシステムの研究を開始した。特に、等質量システムの合体を研究するために他のグループによって最近使用された2つの異なる状態方程式(完全流体とH4)に焦点を当てた。等しくない質量の連星中性子星を含み、初期磁界方向を変更することによって、これらの以前の調査を拡張した。

これまでの研究と比較して、合体後に整列したポロイダル磁場が形成されるかどうかをよりよく理解するために、磁場構造を研究するためのより体系的な方法を紹介しました。これは、相対論的ジェットの形成の可能性とショートガンマ線バーストの中央エンジンに重要な影響を及ぼす。

これまでのすべてのシミュレーションでは、等質量系と完全流体または区分的多面体系の2つの状態方程式しか考慮されていなかった。本研究では、その制限を超えた。

シミュレーションは、最初の磁場、すなわち $\sim 10^{12}G$ に対して妥当な値から始まる。

この研究の主な成果は、降着円盤に囲まれたブラックホールの形成後に構造のある磁場構造の形成を観察することである。これは、状態方程式、質量比、および初期磁場の方向とは無関係に起こります。

初期の磁場配向は大きな差異を生じないが、初期磁場方位がそれぞれの中性子星に異なるという構成は、最小の磁気エネルギーにつながる構成であり、低密度漏斗と高位漏斗を分離する円錐構造に沿った磁場の最小値は、磁界増幅が一般的に最も効率的であることが分かっている。最大の磁場は、H4状態方程式で展開された不等質量モデルで得られます。理由は、合体からできた超質量高速回転中性子星の寿命がはかに長いからで、より大きな磁界増幅を可能にする。

シミュレーションで各モデルの重力波も計

算した。すべてのモデルに対して、Advanced Virgo と Advanced LIGO の両方によって検出できる。また、H4 状態方程式のモデルでは、超質量高速回転中性子星の振動による信号の合体後のピークも Advanced LIGO と Advanced Virgo によって検出できるほど強力であることがわかった。検出された場合、このピークは中性子星の状態方程式を制約する上で非常に重要な役割を果たす可能性がある。

他に、磁界方向の影響が重力波の信号に影響を与えるかどうかを調べた。この影響は最小限であることがわかった。合体中に磁場がはるかに大きな値に増幅されると、その結論は変化する可能性がある。

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 3 件)

1. Kawamura, T., Giacomazzo, B., Kastaun, W., Ciolfi, R., Endrizzi, A., Baiotti, L., and Perna, R.

Physical Review D 94 (2016) 064012 pp. 1-22

DOI: [10.1103/PhysRevD.94.064012](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.064012)

査読有

2. Takami, K., Rezzolla, L., and Baiotti, L.

Physical Review D 91 (2015) 064001 pp. 1-26

DOI: [10.1103/PhysRevD.91.064001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.064001)

査読有

3. Baiotti, L.

Proceedings of CCP2015, Journal of Physics: Conference Series Volume 759 (2016) pp. 1-8

DOI: [10.1088/1742-6596/759/1/012004](https://doi.org/10.1088/1742-6596/759/1/012004)

査読有

6. 研究組織

(1)研究代表者

バイオッティルカ

(BAIOTTI Luca)

大阪大学理学研究科 特任准教授

研究者番号：00574047