

京都大学	博士 (理学)	氏名	林 航大
論文題目	Black Hole-Neutron Star Mergers —Universal Evolution Picture Obtained by Seconds-long Numerical-Relativistic Neutrino-Radiation Magnetohydrodynamics Simulation— (ブラックホール・中性子星連星合体—ニュートリノ放射輸送磁気流体数値相対論シ ミュレーションによる普遍的描像—)		
(論文内容の要旨)			
<p>ブラックホールと中性子星の合体、特に中性子星が合体直前に潮汐破壊される現象は、現在稼働中の重力波望遠鏡に対する重要な重力波源であると共に、継続時間の短いガンマ線バーストの発生源や鉄よりも質量数の大きい重元素の生成源として有望視されている。また、潮汐破壊が起きる場合には、重力波に引き続いてキロノバのような高光度の電磁波が放射されるので、マルチメッセンジャー宇宙物理学における有望な観測ターゲットでもある。重力波観測は2015年の重力波の初検出から本格化し、また重力波と電磁波を同時観測するマルチメッセンジャー観測も2017年に連星中性子星の合体が初めて同時観測された時に始まったが、2020年代はこれらの観測に基づく研究がさらに発展すると考えられる。そうした中、得られた観測結果を解釈し、有用な情報を取り出すには、信頼性の高い理論モデルが必要不可欠である。本博士論文では、ブラックホールに中性子星が潮汐破壊される場合に焦点を当て数値シミュレーションを行うことによって、潮汐破壊現象およびその後形成される残存天体の時間発展を理論的に明らかにし、観測研究に必要な理論モデルを構築することを目的にしている。</p> <p>ブラックホールと中性子星の合体現象は強重力現象であり、一般相対論的な重力効果が重要な役割を果たす。したがって、理論研究には一般相対論的效果を考慮することが必須である。ブラックホールの質量が比較的小さい場合、あるいはその回転角運動量が大きい場合には、中性子星は合体直前に潮汐破壊されるが、潮汐破壊後は高密度の物質がブラックホール周りに降着円盤を誕生させる。中性子星は大抵の場合強い磁場を持つので降着円盤も同様に誕生時に強磁場を持つが、そのような場合には磁場の巻き込みや磁気回転不安定性により磁場強度が短時間(数十から数百ミリ秒)でさらに増大すると考えられる。すると降着円盤は磁気乱流状態になると推測されるが、その結果、実効的な粘性が生じ、その粘性効果によって角運動量輸送や熱生成が起きると考えられる。したがって、降着円盤の進化を明らかにするには精度の高い磁気流体計算が必須である。さらに乱流が発達すると粘性散逸により降着円盤は高温になる。高温かつ高密度の環境下ではニュートリノが大量に放射されるので、ニュートリノ放射による冷却効果も重要になる。したがって、合体および合体後の進化を正確に調べるには、一般相対論的な放射磁気流体計算が必要になるが、その基本方程式は非線形偏微分方程式であり、解析解を求めることは不可能である。そこで林氏は、数値シミュレーションを用いて必要となる全ての方程式を合体現象の全容解明に必要な時間だけ解くことにより、この現象の首尾一貫した描像を得ることに成功した。</p> <p>博士論文は以下のように構成されている。まず第1章で研究の背景を述べた後に、第2章ではブラックホールと中性子星の連星の合体において注目すべき現象や先行研究についてまとめられている。第3章から5章までが本論文のメインパートである。まず第3章では、基本方程式、シミュレーションの設定など、シミュレーション研究に必要な要素がまとめられている。第4章では、まず、2つのモデルに対する結果が</p>			

示されている。1つはブラックホールの質量が比較的軽く太陽の5.4倍の場合で、もう1つが太陽の8.1倍の場合である。どちらのモデルでも、ブラックホールのスピンパラメータを0.75と仮定し、中性子星の状態方程式を比較的硬めのものにとり、かつ質量は太陽の1.35倍としている。これらの設定では、中性子星は合体直前にブラックホールにより潮汐破壊される。その結果、ブラックホール周りには太陽質量の数十%の質量を持つ降着円盤が形成される。また、潮汐破壊時に太陽の数%の質量の物質が光速の10—40パーセントの速度で放出される。ここまでは先行研究でも分かっていたことだが、その後長時間にわたり降着円盤の進化を追い、注目すべき現象が起きることを示した点が、本論文の重要な点である。まず降着円盤内では、予想通り、磁気乱流が発達するが、その結果円盤は高温になり、高光度のニュートリノ放射が起きる。また同時に実効的粘性の効果で角運動量輸送が起き、降着円盤は徐々に膨らむ。降着円盤がコンパクトな間はニュートリノ光度が高く、粘性効果で発生する熱エネルギーはニュートリノ放射で即座に散逸してしまう。しかし、円盤が膨らむと温度が下がりニュートリノ放射効率は下がる。すると粘性加熱の効果は円盤風を引き起こすのに使われるようになり、最終的に第2フェーズの質量放出が起きる。これは合体後数百ミリ秒から1秒後に起き、潮汐破壊時に起きる質量放出とは全く異なる速度、組成の物質を放出する点でユニークだが、これらのことを明確に示したのはこの仕事が最初である。さらに、降着円盤内で増幅された磁場の一部は質量降着と共にブラックホールに落下し、ブラックホールを貫く磁場構造を誕生させる。特にブラックホールの回転軸方向は物質密度が低いので、ヘリカルな磁場形状を持つ磁気圏が形成されるが、ブラックホールを貫く磁場がブラックホールの回転エネルギーを引き抜くことにより、ジェット状の電磁波放射を引き起こす。林氏はその光度が、継続時間の短いガンマ線バーストの光度と同程度になることを見出した。このように、自然な初期設定から始めたシミュレーションで、ガンマ線バーストと解釈しうるエネルギー生成を示した計算結果は初めてのものであり、高く評価に値する。

第5章では、4章で得られた結果の正当性を確信すべく、中性子星に与える初期磁場の強度や形状を変化させたり、赤道面对称性の有無の効果調べたりするなどして、さらに多くのシミュレーションを実行している。その結果、4章で得られた結果は普遍的なものであることを確認し、本研究で得られた結果の説得力を高めている。また、(1)粘性テンソルを解析し、いわゆる粘性アルファパラメータが0.01-0.1のオーダーになることや系の非等方性が反映されて粘性テンソルには、非等方性があることを示した点、および(2)ジェットが形成される条件として局所的な条件を提案した点も新しい。

最後に、第6章では、本論文のまとめが簡潔に述べられている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本博士論文で記述されている物理的内容は、数値相対論、重力波天文学、マルチメッセンジャー宇宙物理学、高エネルギー宇宙物理学の分野に対して十分なインパクトがある。ブラックホール・中性子星連星の合体に対して、一般相対論、現実的な初期条件、中性子星に対する現実的な状態方程式、磁気流体効果、ニュートリノ放射効果全てを考慮した現実的かつ長時間におよぶシミュレーションはこの研究以前には実行されておらず、この点において、この研究は非常に先進的で独自性の高いものである。行われた現実的なシミュレーションにより、ブラックホールと中性子星連星の合体(潮汐破壊)および合体後の進化を首尾一貫して明らかにしたことによって、これに付随して起きると考えられる継続時間の短いガンマ線バースト、重元素合成、キロノバなどの研究に大きなインパクトを与えた。特に、合体時および合体後に物質放出が2段階で進むこと、その結果2種類の性質の異なる放出物質が存在すること、さらにブラックホールの回転運動エネルギーを磁場を介して抽出し、抽出したエネルギーを用いてガンマ線バーストのエネルギーに匹敵する絞られたジェットが形成されることを初めて明確に示した点は、特筆に値する。得られた結果は、今後のマルチメッセンジャー観測結果を理解する際に信頼できる指針を与える。

本論文に関する審査会は令和5年1月18日に行われた。そこでは、本論文にもとづいて、ブラックホール・中性子星連星の合体に関するレビュー、およびシミュレーションの設定と手法の解説、また本研究で新たに得られた知見に関する発表が行われた。プレゼンテーションは簡潔にして要領を得たものであり、質疑応答についても現在明らかになっている事実とまだ解明されていないことを明確に回答した。全体として審査会は円滑に行われ、質疑応答を含めて予定通りの時間内に完了した。

以上まとめると、本博士論文で得られた成果は、数値相対論、重力波天文学、マルチメッセンジャー宇宙物理学を始めとする関連分野において博士(理学)の学位を与えるのに質・量ともに十分なものであり、論文の体裁やプレゼンテーションについても学位に遜色の無いものである。以上の審査結果より、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：令和 年 月 日以降