

学 位 審 査 報 告 書

(ふりがな) 氏 名	きゅうとく こうたろう 久徳 浩太郎
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 24 年 1 月 18 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
(学位論文題目) The black hole-neutron star binary merger in full general relativity: dependence on neutron star equations of state (完全に一般相対論的なブラックホール・中性子星連星の合体： 中性子星の状態方程式への依存性)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 柴田 大 教授 青山 秀明 教授 中村 卓史 教授

京都大学	博士（理学）	氏名	久徳浩太郎
論文題目	The black hole-neutron star binary merger in full general relativity: dependence on neutron star equations of state (完全に一般相対論的なブラックホール・中性子星連星の合体：中性子星の状態方程式への依存性)		
(論文内容の要旨)			
ブラックホールと中性子星からなる連星(以下ではブラックホール・中性子星連星)の合体は、2015 年頃から稼動が予定されている地上重力波検出器の最も有望な重力波源の一つであり、また未だに正体が謎とされるショートガンマ線バーストの母天体の有力候補である。このような背景において、ブラックホール・中性子星連星の合体に伴って放射される重力波の特徴を明らかにすること、および合体後に形成されるブラックホールと降着円盤の系の特徴を解明することが理論物理学者に求められている。ブラックホール・中性子星連星の合体過程は高度に非線形な一般相対論的現象である。したがって、一般相対論的な数値計算によってのみそれを理論的に調べるのが可能である。また合体現象は、ブラックホールと中性子星の質量、ブラックホールのスピン、中性子星の状態方程式に大きく依存することが予想される。したがって、合体過程の全貌を明らかにするには、これらのパラメータを広く取りながら、多くのパラメータに対して数値計算を行う必要がある。しかしながら、このような系統的な研究はこれまで世界的にも全く例がなかった。このような状況において、久徳氏はブラックホール・中性子星連星の完全に一般相対論的な数値計算を多数のパラメータに対して系統的に実行し、合体過程に関する知見をこれまでになく広く深いものにした。そして、観測されるであろう重力波の波形から中性子星のどのような性質が引き出せるかを明らかにし、さらには、ショートガンマ線バーストの母天体となりうる連星のパラメータに制限を与えた。 博士論文は以下のように構成されている。まず、第一章ではブラックホール・中性子星連星に関係する物理学的・天文学的側面を概説し、第二章では特に中性子星の状態方程式と中性子星の性質との関係を、現在の状態方程式への制限と関連付けて議論している。特に、中性子星の状態方程式が現在の天文観測からは十分に制限されておらず、重力波による系統誤差の少ない観測が重要なこと、さらにそれが実現する可能性が高いことを明確にしている。 第三章からは自身の研究内容が記述されている。まず第三章では、シミュレーションの初期条件の求め方を説明している。重力波観測を念頭に置いた一般相対論的な数値シミュレーションでは、その初期条件を正確に求めることが必須である。第三章ではそのような初期条件を計算する方法を詳述している。続いて、第四、五章では一般相対論的なシミュレーションの定式化、手法、およびシミュレーションによって得られた計算結果の解析法を記載している。 以上の準備の後、第六章、七章ではシミュレーションで得られた知見をまとめている。第六章ではブラックホールのスピンを考慮しない場合の、第七章はブラックホールのスピンを考慮した場合の結果がまとめられている。まず合体過程を中性子星の潮汐破壊が起きる場合と起きない場合との二種類に大別し、それがブラックホールと中性子星との質量比、中性子星のコンパクトネス、ブラックホールのスピンによって分類できることを示している。コンパクトネスは中性子星の状態方程式によって定まる量であるため、中性子星の状態方程式は合体過程に大きな影響を及ぼすことが明確にされている。次に重力波放射が潮汐破壊の有無によって定性的に異なる波形になることが示されている。具体的には、潮汐破壊が起これなければ中性子星はブラックホールに吸い込まれるため、重力波波形も連星ブラックホールの合体と似た波形になるが、潮汐破壊が起きるとその時点で放射が極端に抑えられるため、重力波の急激な減衰が見られることが明らかにされている。重力波スペクトルが減衰を示す特徴的な振動数であるカットオフ振動数を定義することによって潮汐破壊の強さの定量化を行い、潮汐破壊が起きる場合にカットオフ振動数が中性子星のコンパクトネスと強い相関を持つ。			

(続紙 2)

つことが明確に示されている。これは、中性子星の半径を重力波の観測から制限できることを明らかにしたと言える。また合体後の降着円盤及びブラックホールの性質についても詳細に示されている。特に降着円盤の質量は、潮汐破壊が起こる場合にはカットオフ振動数と同様に中性子星のコンパクトネスと強く関連し、ガンマ線バーストに必要な約 0.1 太陽質量以上の降着円盤が広いパラメータ領域、特にブラックホールのスピンの大きい場合に、形成されることが示されている。いずれに久徳氏によって得られた新しい知見である。

(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、重力波天文学や高エネルギー天文学に対して十分なインパクトがあり、宇宙物理学のみならず、中性子星の状態方程式という観点から原子核物理学に対しても大きな貢献をもたらすものと評価できる。過去に行われたブラックホール・中性子星連星の合体の研究には、一般相対論的なものはおろか、ニュートン重力あるいは相対論補正を加えた重力のもとでも、中性子星の状態方程式に対して系統的に計算を行い、合体過程や重力波の性質を明らかにしたものはなかった。また、重力波観測によって中性子星の半径や状態方程式が決定できることを定量的に明らかにした研究も過去にはなく、本論文の中で示された潮汐破壊の起こる条件の定量的な判定も重要な新しい知見である。発表論文 2 編は既に Physical Review D に掲載されており、英語も高い水準で書かれている。

本論文に関する審査会は平成 24 年 1 月 18 日に行われた。そこでは本論文に基づいて当該分野のレビュー及び手法の解説、新たに得られた知見の解説が行われた。プレゼンテーションも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。

以上をまとめると、本博士論文で得られた成果は重力波天文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、本博士論文を博士(理学)の学位を与えるのに相応しいものであると認める。

要旨公開可能日： 24 年 1 月 18 日以降