

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人 日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 29 年度

受付番号 268

氏 名

川口 恭平

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： ポツダム （国名： ドイツ国 ）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。
重力波観測に向けた中性子星連星合体の数値相対論による研究
3. 派遣期間： 平成 29 年 4 月 1 日 ～ 平成 30 年 3 月 11 日
4. 受入機関名及び部局名
マックスプランク研究所(重力物理学)
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意（A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入**

も可）

（研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等）

（注）「6. 研究発表」以降については様式 10－別紙 1～4 に記入の上、併せて提出すること。

海外特別研究員 所期の目的の遂行状況及び成果

本研究課題では中性子星を含む連星合体からの重力波の観測に向けた理論的整備として、重力波波形の予測と現象論的波形モデルの導出を行った。また同時に、これまでの派遣者の研究経験と成果を活かし、派遣先研究所の研究員と共同で中性子星連星合体に伴う電磁波対応天体の研究も行った。派遣期間中、偶然にも研究対象である、ふたつの中性子星連星合体からの重力波と電磁波が同時観測された。派遣先研究所がこれら観測を行う国際チームの重要な拠点であったことを活かし、このイベントの解析にも参加し、論文の執筆を行った。これらの研究の他にも、重力波のデータ解析に関して独自の観点から物理的情報を抜き出す方法の研究も行った。本派遣は、派遣者の就職にともなってその期間が短縮されたが、上記のように派遣の当初の目的は達成され、十分な成果があったと考えられる。以下にそれぞれの具体的な成果をまとめる。

重力波波形の予測と現象論的波形モデルの導出

本研究課題の主目的は、中性子星を含む連星合体からの重力波波形予測と現象論的波形モデルの導出である。2つの中性子星（連星中性子星）やブラックホール・中性子星といった中性子星を含む連星（中性子星連星）の合体過程において、中性子星は伴星の潮汐力の影響により変形する。中性子星の変形は連星の軌道進化に影響を与え、その効果が重力波波形に反映される事が知られている。中性子星の変形の度合いは中性子星の状態方程式によって特徴付けられるため、重力波観測による潮汐変形度と質量の同時測定により、中性子星を構成する高密度核物質の状態方程式を制限する事ができる。しかしながら地上重力波干渉計のメインターゲットである連星合体からの重力波は極めて微弱なものであるため、検出器雑音の中から重力波の信号を抜き出すためには理論的に予測した波形と信号の相関をとることでその検出感度を向上させる必要があり、そのため精緻な重力波理論波形を整備することが重力波観測の本質的な前提となっている。

そこで本研究課題では中性子星を含む連星合体からの理論的な重力波波形作成とテンプレート整備に向けた現象論的重力波波形モデルの構築にむけ、

1. 数値相対論を用いた正確な中性子星連星合体からの重力波波形の生成

2. 中性子星を含む連星合体からの現象論的重力波波形モデルの構築
の2ステップからなる研究を行った。

まずステップ1として、正確な重力波波形、特に潮汐変形の効果が最も顕著になる合体直前の波形を正確に予測する為に、一般相対論的效果を近似無しで取り入れた流体シミュレーション、数値相対論シミュレーションを行った。特に高い精度の予測を行うために計算コードの並列化、高速化を行い、これまでに無い高い解像度の計算による波形予測を行った。この成果は K.Kiuchi et al. 2017 として Physical Rev. D 誌に出版されている。

さらにステップ2としてこの研究を進め、現象論的な波形モデル導出を行った。波形モデル導出にあたっては合体の十分前（低周波領域）から合体までの一貫した波形データが必要であるが、上記数値相対論シミュレーションでは高々合体直前~30 周期分の波形しか計算できない。そこで当初の予定通り、合体直前の波形として数値相対論シミュレーション、合体の十分前（低周波領域）の波形に関しては派遣先研究所で势力的に研究されている Effective-One-Body モデルによる波形を用いたハイブリッド波形を作成し、波形モデル導出に用いた。この Effective-One-Body モデルによる波形作成に際して、海外特別研究員として派遣され、派遣先の研究員と密接に議論できた意義は大きい。この一連の研究によって、これまでにない精度の中性子星の潮汐変形の効果を考慮した重力波波形モデルが導出された。この成果は K. Kawaguchi et al. 2018 として Physical Rev. D に出版されている。現在は、導出されたモデルの適用範囲の拡張とテストを目指す研究を行いつつ、後述の連星中性子星合体の重力波イベントについてこのモデルを用いた解析を共同で進めている。

電磁波対応天体 (kilonova/macronova) の研究

中性子星をふくむ連星の合体時には中性子過剰な物質が放出される可能性があり、こうした放出物質の中で合成された放射性重元素の崩壊熱を熱源として突発的に近赤外から可視光帯域の電磁波で光る kilonova/macronova と呼ばれる現象が理論的に考えられている。これら連星合体に伴う電磁波放射の観測は重力波観測から得られる情報を補完しその科学的成果を最大化する意味で必要不可欠なものであり、派遣者も過去にその光り方と連星のパラメータの関係を調べる研究を行ってきた。今回の派遣では、こうした研究の成果を活かし、派遣

者のこうした研究に興味を持ってくれた研究者と共同して、観測的情報から連星のパラメータを読み取る解析の枠組みの構築を目指す研究を行った。この成果は M. Coughlin et al. 2017 として *Astrophysical Journal* に出版された。さらに 2017 年 8 月 17 日には、ふたつの中性子星連星合体からの重力波が重力波観測の国際チーム (LSC; LIGO & Virgo Collaboration) によって成され、さらにはその数多くの観測チームによって電磁波対応天体が観測されたが、派遣者はこうした研究背景を活かし、LSC の kilonova/macronova に関する論文 (BP Abbot et al. 2017) の執筆チームの一人としてコミュニティに貢献した。現在は国立天文台の田中雅臣氏と共同で、数値相対論シミュレーションの結果に基づいた輻射輸送計算による本イベントの電磁波対応天体の理論的考察の研究を行っており、近々その成果を論文として投稿する予定である。(2018 年 4 月現在)

独自の重力波データ解析手法の模索と検証

天体のスピンの軌道運動の軸と揃っていない場合、連星は歳差運動する事が知られている。こうした歳差運動するコンパクト天体からの重力波はブラックホール時空、特にブラックホールスピンに関する情報を多く含むが、一方で非常に複雑な振る舞いを示す事が知られており、その重力波波形から物理的情報を抽出することは容易ではない。同様に、重力波が軌道運動の軸から傾いた方向から観測された場合においても、特に合体直前の波形においては、様々な周波数のモードが混ざる事により波形が複雑な振る舞いをする事が知られている。

派遣者はこういった複雑な振る舞いをする重力波に関して、これまで考えられてきたマッチドフィルター法—考えられる理論的波形と信号を逐一比較し信号に含まれている波形を抽出する方法—とは別のアプローチによる解析手法を提案した。この手法により、原理的には、観測によって得られる重力波は、歳差運動の効果と歳差運動の効果を含まない単純な波形の 2 つに近似的に分離する事ができる事を示した。特にこの新しく提案した手法では、マッチドフィルター法とは異なり、連星の歳差運動や位相進化にモデルを仮定することなく信号から直接それらの情報を抽出することができることを示した (K. Kawaguchi et al. 2018)。現在この手法については重力波の信号が雑音に比べて十分大きいという仮定をしているため、今後、より現実的な設定のもと本手法の有用性の検証を行う予定である。