

科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」 研究概要
〔令和4年度事後評価用〕

令和4年6月30日現在

機関番号：14301

領域設定期間：平成29年度～令和3年度

領域番号：2905

研究領域名（和文）重力波物理学・天文学：創世記

研究領域名（英文）Gravitational wave physics and astronomy: Genesis

領域代表者

田中 貴浩 (TAKAHIRO Tanaka)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：40281117

交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,072,150,000円

研究成果の概要

研究分野：重力波物理学、天文学

キーワード：宇宙物理 / 重力波 / X線天文学 / 光学赤外線天文学 / 理論天文学 / 宇宙物理学 / ブラックホール / 中性子星 / 超新星爆発 / 重元素合成 / 重力理論 / 星形成 / X線天文学 / 星生成

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、重力波観測の開始という歴史的な時期にあった。重力波という全く新しい観測手段が得られることによる物理学・天文学の進展に対する波及効果は大きい。これまでの実績として、KAGRAのための基本的なデータ解析の準備の完了、フォローアップ体制の組織化が既に進んでいた。米国のLIGOに加え、現時点においても、キロメートルサイズの重力波検出器は他にVirgoとKAGRAのみである。したがって、本領域期間中に有効な観測データを出せるようになるKAGRAの存在は国際的な観点からも非常に重要である。その際に、単にKAGRAが重力波観測データを発信するというだけでなく、その波及する研究分野の開拓においても世界をリードする研究を発信することが重力波物理学・天文学(=重力波観測によって開始する新しい研究)の創成にとって重要であると考えられた。

2. 研究の目的

本領域では、重力波データ解析、重力波源となる天体(重力波対応天体)の多波長観測、理論的研究が三位一体となり、重力波物理学・天文学の流れを力強く推し進め、新領域を創成する。

重力波直接観測から波及する研究分野の開拓においても世界をリードする研究を発信することが本領域の最重要課題である。加えて、次世代の重力波物理学・天文学を担う若い世代の研究者の育成を進める。これらを総合して「重力波物理学・天文学を創成する」。

本領域は、関連する異なる分野の研究者間の密接で、かつ、継続的な連携を可能にし、重力波物理学・天文学創成の国際的な競争で優位に立つことに寄与するものである。

3. 研究の方法

重力波物理学・天文学の幕開けという好機をとらえて、(1)重力波データの総合的解析と(2)重力波検出から広がる新しい物理学・天文学の二つの側面から重力波物理学・天文学を推進する。(1)では重力波データ解析の基盤を形成することに加えて、理論とデータ解析が密接に連携して、標準的な枠組みを越えた重力波検出手法の開発、重力波

解析手法の開発をおこない、重力波データから物理的情報を引き出す。(2)では重力波観測と直接的に関係を持って発展していく研究分野を観測的研究と理論的研究が一体となり重点的に推進する。具体的には、一般相対論を超えた重力理論、重力波源となるブラックホールや中性子星からなる連星形成シナリオ、ガンマ線バーストの起源とその放射機構、 r -過程元素と呼ばれる重元素の起源、超新星爆発の機構の解明である。これらの研究を推進することによって、KAGRA を擁する日本が、重力波物理学・天文学の創成にあたり、世界的に重要な役割を担うことができる。重力波検出による飛躍的進展が見込まれ、かつ、世界をリードする研究遂行能力があると見込まれるテーマに絞り計画研究を組織し推進した。

4. 研究の成果

重力波イベントのフォローアップ観測における成果：

はじめて重力波により検出された連星中性子星合体イベントである GW170817 に関して、日本のフォローアップ観測グループである J-GEM による観測により、重力波イベントの光赤外線対応天体の初観測に成功し、X線領域では MAXI が全世界で最も早い観測を行い上限値を得、Swift では急激に減光するキロノバ起源の紫外線放射が発見するとともに、早期X線のより深い上限値を得た。理論的研究においても、横から見た相対論的ジェットを考えることで、GW170817 に付随する通常より数桁暗いガンマ線バーストと特異な残光を同時に説明できることを世界に先駆けて示し、このシナリオの正しさはその後の観測によって証明された。さらに、数値相対論による連星中性子星合体の高精度シミュレーションを基礎に、すべての r -過程元素の原子構造計算を系統的に行い導出した吸収係数を取り入れた輻射輸送計算を行い、中性星連星合体からの現実的な光赤外線放射スペクトルを予測することに成功した。この研究によって精度の高まった理論予測と、J-GEM によって進められた連星中性子星合体 GW170817 の光赤外線による追跡観測結果とを組み合わせ、 r -過程元素が合成されていることを証明する証拠を掴んだ。中性子星を構成する高密度核物質の性質を明らかにすることも重力波観測から得られる重要な知見である。数値相対論の手法を駆使し、連星中性子星の潮汐変形の効果を取り入れた独自の精度の高い重力波波形モデルを構築し、この新しいモデルにもとづく潮汐変形率に対する観測的制限に関する独自のデータ解析結果を発表した。その他にも、GW170817 に関連する理論的研究は多数ある。

KAGRA-GEO600 の共同観測における重力波データ解析：

2020 年 4 月に KAGRA は第 3 期国際共同観測 (03) に参加した。しかし、コロナ禍の影響で LIGO、Virgo が観測期間を短縮したため、LIGO、Virgo との共同観測とはならなかった。しかし、GEO600 との間の共同観測は実現した。この共同観測により得られた重力波観測データの解析を行うための解析チームが LVK Collaboration 内に結成され、そのメンバーとして、計画研究 B01 代表者の田越、分担者の Kipp Cannon、研究員(研究協力者)の上野、内潟、成川、譲原、計画研究 C01 の分担者の端山、研究員(研究協力者)の Man Leong Chan が主要メンバーとして参加し、中心的役割を果たした。田越はチーム全体の代表となりプロジェクト全体を統括した。基本的な解析をすべて行った上で、本プロジェクトでは観測期間中に発生した 4 つのガンマ線バーストの時刻と方向に特化した連星合体探索とバースト重力波探索も行われた。これらの解析の遂行がつつがなく行われたことは、KAGRA が国際重力波検出器ネットワークの一員として、天文学天体物理学的成果に貢献できることを示す上で重要な結果である。解析結果を報告した論文は PTEP に掲載決定となっている (PTEP2022, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac073>)。

重力波で検出された多数の連星ブラックホール合体イベントに関係する成果：

本領域の期間内に 80 以上の連星ブラックホール合体イベントが重力波により観測された。これらに関する重力波データ解析の研究成果として、LIGO/Virgo によって報告された連星ブラックホールイベントを用い、LIGO/Virgo が行っていない新たな重力理論のテストをおこない解析結果を発表した。LIGO/Virgo は理論モデルの予測に依存しないテストを優先しておこなっている。これに対して、本研究では物理的に強く動機づけられた拡張重力理論のモデルを取り上げ、モデルに即した重力波波形を理論的に予測し、その波形予測にもとづく独自の解析を行うことにより複数の意味のある新しいモデルに対する制限を得た。

モデルに依存した重力理論の検証を推し進める上で、他の観測的制限を満足する現象論的な理論の枠組みを拡張する理論研究が要求される。この側面においても、あらゆる致命的な不安定性を排除した bigravity 理論、minimal theory of bigravity (MTBG) を

世界で初めて発見した。MTBGは、初期宇宙を含めた様々な状況に適用可能で、重力子の質量項がダークエネルギーに代わり、宇宙膨張を加速させ、重力波観測によって重力子の質量をテストする理論的基礎を与えるだけでなく、ダークエネルギー問題へのヒントにもなりえる。また、宇宙論的な背景時空上では全ての vector-tensor 理論を普遍的に記述できる有効場の理論を構成することにも成功した。

重力波により観測された連星ブラックホールはこれまでの観測で知られていたブラックホール候補天体に比べて質量の大きなものが多いことが明らかになってきた。これらの重力波源となる連星ブラックホールの起源を明らかにすることも大きな研究目標の一つである。連星ブラックホール形成の過程は、孤立した環境での連星の形成過程と単独星として生まれたものが星団中での力学相互作用により連星となる過程に大別することができる。前者に関しては、輻射フィードバック、磁場の影響などを取り入れた大規模シミュレーション、後者に関しては連星形成率の星団の質量や初期質量分布、星の進化の金属量などへの依存性について飛躍的に理解が進展した。得られた知見は多岐にわたるが代表的なものを上げれば、前者について初代星は数10太陽質量同士の大質量連星として形成されやすいことが明らかになった。後者については、これまでは球状星団などの大質量星団でのみ力学的連星形成過程が重要であると考えられてきたが、散開星団のような低質量の星団(星団の総質量が太陽の一万倍以下)であっても、ブラックホールや中性子星のようなコンパクト星に進化する以前の主系列星の段階における星団内での力学的相互作用によって連星形成が進む過程が無視できず、この過程が連星形成の重要なチャンネルのひとつであり得ることが示された。

超新星爆発からの重力波とニュートリノ：

計画研究C02の監修のもと、スーパーカミオカンデ(SK)ニュートリノ検出器の改修に成功した。これにより、SKにガドリニウムを装填し、背景ニュートリノを初めて観測可能になる準備が整った。理論面では超新星爆発の数値シミュレーションの進展があり、スーパーカミオカンデの観測への準備となる長時間の超新星シミュレーションの枠組みやニュートリノ放出の解析式が整備された。超新星爆発を起こさずにブラックホールが形成される場合に放出されるニュートリノを評価するシミュレーションにも成功した。重力波信号に対する予言としては、超新星コアにおける衝撃波不安定性を起源とする重力波の円偏光成分の存在が理論的に予測され、この発見を基礎とした新たなデータ解析手法が開発され、重力波データ解析に適用する準備も整っている。

重力波イベントの電磁波対応天体の探索：

第三期重力波観測03に際しては、迅速な解析と速報のためのシステムを開発して電磁波対応天体の探査を精力的に行った。木曾観測所の超広視野CMOSカメラTomo-e Gozenの観測システム及び即時解析システムを整備した。また、西はりま天文台「なゆた望遠鏡」の可視光中低分散分光器MALLSの波長分解能向上と感度向上を実施、広視野グリズム分光器に偏光モードを新たに付け加えた。かなた望遠鏡では自動観測システムの整備を行い、チベットのHinOTORI望遠鏡の観測システムを整備して、本格観測を開始した。すばる望遠鏡では、HSCのデータ解析システムを整備した。これらの観測装置群を用いて、重力波定常観測第三期(03)では23件の重力波アラートに対して追跡観測を実施した。03では世界のいずれの追跡観測においても電磁波対応天体を同定することはできなかったが、最速でアラート後17分で追跡開始ができることを実証し、いくつかのイベントに対しては、電磁波放射強度の上限値を求めることに成功した。

次世代の観測装置の開発：

ハンガリーと共同で重力波天体候補のショートガンマ線バーストの精度良い位置決定を目指すCAMELOT計画を立ち上げ、2機の衛星を打ち上げ、ガンマ線バーストの検出に成功した。また、紫外線領域で突発天体の発生を監視すること、および、追跡観測を行うための超小型衛星を開発し、2022年度中の打上げを計画している。ガンマ線観測衛星計画HiZ-GUNDAMを、JAXAのプリプロジェクト候補移行審査に合格させ、正式にHiZ-GUNDAMプリプロジェクトチームを発足させることができた。せいめい望遠鏡に接続する可視3色高速撮像分光装置TriCCSを改良し、TriCCSの最も長い波長帯の検出器を量子効率の高いCMOSセンサーに交換し、ほぼ予想通りの感度向上が確認された。TriCCSは、せいめい望遠鏡の共同利用観測と、京都大学時間観測に使用できる装置として公開されて観測運用を行っており、重力波源の電磁波対応天体の可視光撮像フォローアップ観測の準備が整えられた。

若手育成：

計画研究の枠に縛られず必要な時期に海外渡航ができるように総括班会議によって審議して補助を決定する仕組みをとった。総括班による若手海外派遣は 22 件であり、長期の派遣には滞在レポートを依頼し、ホームページ上には 15 件の記事(うち 13 件が若手)が掲載されている。また、若手領域メンバーから 18 件の昇格人事があった。

その他：

本領域の前半における科学的成果は” Gravitational wave physics and astronomy in the nascent era” と題する Progress of Theoretical and Experimental Physics のレビュー論文としてまとめられ、Editors’ choice に選定された。のべ 43 件の国際研究集会を開催した。コロナ禍の中ではオンライン領域セミナーを計 25 回開催した。

5. 主な発表論文等 (受賞等を含む)

[査読論文]

M. Arimoto et al., Gravitational wave physics and astronomy in the nascent era, Progress of Theoretical and Experimental Physics, ptab042, 査読有

Hiroyuki Nakano, Tatsuya Narikawa, Ken-ichi Oohara, Kazuki Sakai, Hisa-aki Shinkai, Hirotaka Takahashi, Takahiro Tanaka, Nami Uchikata, Shun Yamamoto, * Takahiro S. Yamamoto, Comparison of various methods to extract ringdown frequency from gravitational wave data, arXiv:1811.06443, Physical Review D, 査読有, 99, 124032, 2019

Sasaki Misao, Suyama Teruaki, Tanaka Takahiro, Yokoyama Shuichiro, Primordial black holes—perspectives in gravitational wave astronomy, Classical and Quantum Gravity, 査読有, 35, 63001, 2018

Oost Jacob, Mukohyama Shinji, Wang Anzhong, Constraints on Einstein-aether theory after GW170817, Physical Review D, 査読有, 97, 2018

Yuki Hagihara, Naoya Era, Daisuke Iikawa, , Naohiro Takeda, Hideki Asada, Condition for directly testing scalar modes of gravitational waves by four detectors, Physical Review D, 査読有, 101, 4, 041501, 2020

Sugimura, K., Matsumoto, T., Hosokawa, T., Hirano, S., & Omukai, K., The Astrophysical Journal Letters, 査読有, Volume 892, pp.L14-L18, 2020

Kumamoto, J., Fujii, M. S., & Tanikawa, A., Merger rate density of binary black holes formed in open clusters, 2020, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 495, Issue 4, pp.4268-4278, 2020

R. Abbott et al., First joint observation by the underground gravitational-wave detector, KAGRA, with GEO 600, PTEP, 査読有、2022, 掲載決定済、<https://doi.org/10.1093/ptep/ptac073>

Kawaguchi Kyohei, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke, Frequency-domain gravitational waveform models for inspiraling binary neutron stars, Physical Review D, 査読有, 97, 044044 (2018)

K. Ioka and T. Nakamura, Can an off-axis gamma-ray burst jet in GW170817 explain all the electromagnetic counterparts?, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 043E02 (2018)

N. Kawai, H. Negoro, M. Serino, T. Mihara, K. Tanaka, T. Masumitsu and S. Nakahira, X-ray upper limits of GW150914 with MAXI, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 69, 84 (2017)

Abbott B. P., *LV Collaboration, Yoshida Michitoshi, Tanaka Masaomi, Tominaga Nozomu, Kawabata S. Koji, Sako Shigeyuki, et al., Multi-messenger observations of a binary neutron star merger, The Astrophysical Journal Letters, 査読有,

Tanaka Masaomi, Utsumi Yousuke, Mazzali Paolo A., Tominaga Nozomu, Yoshida Michitoshi, Sekiguchi Yuichiro, Morokuma Tomoki, Motohara Kentaro, Ohta Kouji, Kawabata S. Koji, et al., Kilonova from post-merger ejecta as an optical and near-Infrared counterpart of GW170817, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 69, 2017

Takiwaki Tomoya, Kotake Kei, Foglizzo, Thierry, Insights into non-axisymmetric instabilities in three-dimensional rotating supernova models with neutrino and gravitational-wave signatures, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 508, 966-985, 2021

Takeda Mei, Hiranuma Yuta, Kanda Nobuyuki, Kotake Kei, Kuroda Takami, Negishi Ryo, Oohara Ken-ichi, Sakai Kazuki, Sakai Yusuke, Sawada Takahiro, Takahashi Hirotaka, Tsuchida Satoshi, Watanabe Yukinobu, Yokozawa Takaaki, Application of the Hilbert-Huang transform for analyzing standing-accretion-shock-instability induced gravitational waves in a core-collapse supernova, Physical Review D, 査読有, 104, 084063, 2021

Abe K., et al., First gadolinium loading to Super-Kamiokande, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 査読有, 1027, 166248, 2022

Nagakura Hiroki, Iwakami Wakana, Furusawa Shun, Okawa Hirotada, Harada Akira, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi, Matsufuru Hideo, Imakura Akira, Simulations of Core-collapse Supernovae in Spatial Axisymmetry with Full Boltzmann Neutrino Transport, The Astrophysical Journal, 査読有, 854, 136, 2018

[受賞]

- B03 田中雅臣, 第17回(令和2年度)日本学術振興会賞(2020年12月)
- A01, B02 郡和範, 井岡邦仁ら, 第25回(2020年)日本物理学会論文賞(2020年1月)
- A02 須山輝明, 第13回木村利栄理論物理学賞(2019年9月)
- B03 吉田道利ら, 平成31年度文部科学大臣表彰科学技術賞(2019年9月)
- A03 藤井通子, 2019年度島津奨励賞(2019年12月10日)
- C02 山田章一, 住吉光介ら, 第6回成果報告会 HPCI 利用研究課題優秀成果賞(2019年11月)
- B01 久徳浩太郎, 第14回(2020年)日本物理学会若手奨励賞(2019年11月)
- B03 田中雅臣, 富永望ら, 2019年度日本天文学会 欧文研究報告論文賞(2019年9月)
- A02 本橋隼人, アメリカ中西部4州合同優秀論文賞(2019年5月)
- B03 関口雄一郎, 第12回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞(2018年12月)
- A01 西澤篤志, 素粒子奨励学会2018年度(第13回)中村誠太郎賞(2018年12月)
- B01 柴田大, 2018年度仁科記念賞(2018年11月)
- A02 小林努, 第33回西宮湯川記念賞(2018年11月)
- C01 滝脇知也, 第7回自然科学研究機構若手研究者賞(2018年6月)
- B01 柴田大, 2017年度(第22回)林忠四郎賞(2018年3月)
- C01 諏訪雄大, 第11回(2017)物理学会若手奨励賞(2017年10月)

[書籍]

- 田中雅臣, マルチメッセンジャー天文学が捉えた新しい宇宙の姿: 宇宙の物質の起源に迫る, 講談社, 2021年12月
- 向山信治, SGCライブラリ「一般相対論を超える重力理論と宇宙論」, サイエンス社, 2021年7月
- 住吉光介, 原子核から読み解く超新星爆発の世界, 共立出版, 2018年10月
- 柴田大, 久徳浩太郎, 重力波の源, 朝倉書店, 2018年8月
- 田中貴浩, 深化する一般相対論: ブラックホール・重力波・宇宙論, 丸善出版, 2017年11月