

領域略称名：重力波創世記  
領域番号：2905

令和4年度科学研究費助成事業  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
に係る研究成果報告書（研究領域）兼  
事後評価報告書

「重力波物理学・天文学：創世記」

領域設定期間

平成29年度～令和3年度

令和4年6月

領域代表者 京都大学・大学院理学研究科・教授・田中 貴浩

# 目 次

## **研究組織**

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	3

## **研究領域全体に係る事項**

3 交付決定額	8
4 研究領域の目的及び概要	9
5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	11
6 研究目的の達成度及び主な成果	13
7 研究発表の状況	18
8 研究組織の連携体制	23
9 研究費の使用状況	24
10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	26
11 若手研究者の育成に関する取組実績	27
12 総括班評価者による評価	28

**研究組織**

(令和4年3月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

**1 総括班・総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	17H06357 重力波物理学・天文学：創世記 (総括班)	平成29年度 ～ 令和3年度	田中 貴浩	京都大学・大学院理学研究科・教授	8
A01 計	17H06358 重力波データ解析による重力理論の検証	平成29年度 ～ 令和3年度	田中 貴浩	京都大学・大学院理学研究科・教授	5
A02 計	17H06359 重力波物理学・天文学における重力理論研究の新展開	平成29年度 ～ 令和3年度	向山 信治	京都大学・基礎物理学研究所・教授	4
A03 計	17H06360 ブラックホール連星形成過程の理論的研究	平成29年度 ～ 令和3年度	大向 一行	東北大学・大学院理学研究科・教授	6
B01 計	17H06361 中性子星を含む連星、パルサー、マグネターからの重力波による宇宙物理学の研究	平成29年度 ～ 令和3年度	田越 秀行	東京大学・宇宙線研究所・教授	5
B02 計	17H06362 高エネルギー観測で探る重力波天体	平成29年度 ～ 令和3年度	河合 誠之	東京工業大学・理学院・教授	8
B03 計	17H06363 重力波源の光赤外線対応天体観測で迫る中性子星合体の元素合成	平成29年度 ～ 令和3年度	吉田 道利	国立天文台・ハワイ観測所・教授	7
C01 計	17H06364 重力波天文学で解き明かす超新星爆発の物理	平成29年度 ～ 令和3年度	固武 慶	福岡大学・理学部・教授	4
C02 計	17H06365 Studying supernova explosions via their neutrino emissions	平成29年度 ～ 令和3年度	ヴァギンズ マーク	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授	5
総括班・総括班以外の計画研究 計 9 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	18H04572 ブラックホール連星の起源の 解明に向けた統計的手法の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	大栗 真宗	東京大学・大学院理学系 研究科・助教	1
A01 公	18H04583 重力波データ解析に向けたブ ラックホール時空からの重力 波波形の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	藤田 龍一	京都大学・基礎物理学研 究所・研究員	1
A01 公	18H04591 重力波データ解析における相 関ノイズのインパクトとその 低減方法	平成 30 年度 ～ 令和元年度	姫本 宣朗	日本大学・生産工学部・准 教授	1
A02 公	18H04579 原始ブラックホール合体によ る重力波から探る原始密度揺 らぎと重力理論の性質	平成 30 年度 ～ 令和元年度	山口 昌英	東京工業大学・理学院・教 授	1
A02 公	18H04587 素粒子モデルの新しい検証手 段としての重力波物理学	平成 30 年度 ～ 令和元年度	兼村 晋哉	大阪大学・大学院理学研 究科・教授	1
A02 公	18H04589 重力波で探る重力セクターで のパリティの破れとアクシ オンダークマター	平成 30 年度 ～ 令和元年度	早田 次郎	神戸大学・大学院理学研 究科・教授	1
A02 公	18H04590 相転移が引き起こす重力波か ら探る新しい物理	平成 30 年度 ～ 令和元年度	波場 直之	島根大学・学術研究院理 工学系・教授	1
A02 公	18H04594 原始ブラックホールの存在の 検証方法についての理論研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	郡 和範	大学共同利用機関法人高 エネルギー加速器研究機 構・素粒子原子核研究所・ 准教授	1
A03 公	18H04570 初代銀河と共存する初代星の 形成メカニズムの理論的研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	矢島 秀伸	筑波大学・計算科学研究 センター・准教授	1
A03 公	18H04573 大質量星連星における動的潮 汐相互作用	平成 30 年度 ～ 令和元年度	檜山 和己	東京大学・大学院理学系 研究科・助教	1
A03 公	18H04581 多様な天体の相関統計解析で 迫るブラックホール連星の起 源	平成 30 年度 ～ 令和元年度	西澤 篤志	東京大学・大学院理学系 研究科・助教	1

A03 公	18H04592 連星ブラックホール形成の解明に向けた孤立ブラックホールの輻射磁気流体力学計算	平成 30 年度 ～ 令和元年度	大須賀 健	筑波大学・計算科学研究センター・教授	1
A03 公	18H04596 重力波起源天体の形成過程の解明	平成 30 年度 ～ 令和元年度	岩澤 全規	神戸大学・理学研究科・特命准教授	1
B01 公	18H04584 さそり座 X-1 の専用モニタリング小型衛星による定常重力波への挑戦	平成 30 年度 ～ 令和元年度	榎戸 輝揚	京都大学・白眉センター・特定准教授	1
B01 公	18H04595 ブラックホール・中性子星連星合体からの高精度重力波波形の計算	平成 30 年度 ～ 令和元年度	久徳 浩太郎	京都大学・大学院理学研究科・准教授	1
B02 公	18H04571 軟ガンマ線で探る銀河系内重力波天体残骸の探査	平成 30 年度 ～ 令和元年度	寺田 幸功	埼玉大学・理工学研究科・准教授	1
B02 公	18H04574 (廃止) 連星中性子星合体による $r$ プロセス元素宇宙線	平成 30 年度 ～ 平成 31 年度	小宮 悠	東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員	1
B02 公	18H04580 ガンマ線トリガー検出器のフライトモデルの開発と全方位突発天体監視	平成 30 年度 ～ 令和元年度	米徳 大輔	金沢大学・数物科学系・教授	1
B03 公	18H04575 Tomo-e Gozen カメラによる重力波可視対応天体超広視野即時探査観測	平成 30 年度 ～ 令和元年度	諸隈 智貴	東京大学・大学院理学系研究科・助教	1
B03 公	18H04576 光赤外線対応天体観測のための新拠点の整備	平成 30 年度 ～ 令和元年度	峰崎 岳夫	東京大学・大学院理学系研究科・准教授	1
B03 公	18H04582 ニュージーランドにおける重力波天体の光学的追観測	平成 30 年度 ～ 令和元年度	阿部 文雄	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・客員准教授	1
B03 公	18H04585 多次元・多波長輻射輸送手法の開発で切り開く爆発天体現象研究のフロンティア	平成 30 年度 ～ 令和元年度	前田 啓一	京都大学・大学院理学研究科・准教授	1
B03 公	18H04593 矮小銀河星化学組成および短寿命放射性 $r$ 核種で迫る中性子星合体の元素合成	平成 30 年度 ～ 令和元年度	辻本 拓司	国立天文台・JASMINE プロジェクト・助教	1

C01 公	18H04577 新しい重力波の時間周波数解析法で探る超新星爆発メカニズム	平成30年度 ～ 令和元年度	河原 創	東京大学・大学院理学系研究科・助教	1
C02 公	18H04569 包括的ニュートリノ原子核反応の記述	平成30年度 ～ 令和元年度	堀内 涉	北海道大学・理学研究院・講師	1
C02 公	18H04578 超新星背景ニュートリノにおけるスターバースト銀河とブラックホール形成の寄与	平成30年度 ～ 令和元年度	安藤 真一郎	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・客員科学的研究員	1
C02 公	18H04586 中性子星冷却期と後期ニュートリノ放出	平成30年度 ～ 令和元年度	諏訪 雄大	京都産業大学・理学部・准教授	1
C02 公	18H04597 重力波天体現象解明のための高密度高温核物質状態方程式	平成30年度 ～ 令和元年度	古澤 峻	東京理科大学・理学部第一部物理学科・助教	1
C02 公	18H04598 コンパクト天体現象における高温・高密度核物質状態方程式の系統的研究	平成30年度 ～ 令和元年度	富樫 甫	九州大学・理学研究院・学術研究員	1
A01 公	20H04725 重力波を用いた宇宙の小スケール密度ゆらぎ測定の基礎研究	令和2年度 ～ 令和3年度	大栗 真宗	東京大学・大学院理学系研究科・助教	1
A01 公	20H04726 重力波データ統計解析に基づく重力理論の検証	令和2年度 ～ 令和3年度	西澤 篤志	東京大学・大学院理学系研究科・助教	1
A01 公	20H04731 機械学習を用いた信号検出とパラメータ推定	令和2年度 ～ 令和3年度	中平 勝子	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授	1
A01 公	20H04732 K A G R Aにおけるリアルタイムモニタリングのための高精度重力波検出技術の開発	令和2年度 ～ 令和3年度	長谷川 昌也	富山大学・学術研究部工学系・助教	1
A02 公	20H04727 原始ブラックホールと重力波	令和2年度 ～ 令和3年度	佐々木 節	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授	1
A02 公	20H04745 重力波観測と統合的な重力理論の探求	令和2年度 ～ 令和3年度	小林 努	立教大学・理学部・教授	1
A02 公	20H04746 修正重力理論におけるブラックホール摂動と重力波	令和2年度 ～ 令和3年度	木村 匡志	立教大学・理学部・助教	1

A02 公	20H04749 有質量重力子理論によって生成される原始重力波の現象論とその背後にある物理	令和2年度 ～ 令和3年度	水野 俊太郎	八戸工業高等専門学校・総合科学教育科・准教授	1
A02 公	20H04750 原始ブラックホールで探る新しい宇宙論	令和2年度 ～ 令和3年度	郡 和範	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授	1
A03 公	20H04724 輻射流体計算で解き明かす初期宇宙の高密度星団形成	令和2年度 ～ 令和3年度	矢島 秀伸	筑波大学・計算科学研究センター・准教授	1
A03 公	20H04739 重力波源となる大質量星連星の形成条件とその母銀河との関係解明	令和2年度 ～ 令和3年度	小林 将人	東北大学・理学研究科・学術研究員	1
B01 公	20H04723 銀河形成シミュレーションを用いた銀河の特異速度と重力レンズの影響の除去	令和2年度 ～ 令和3年度	高橋 龍一	弘前大学・理工学研究科・准教授	1
B01 公	20H04728 連続重力波から探る連星系の中性子星の内部構造	令和2年度 ～ 令和3年度	藤澤 幸太郎	東京大学・大学院理学系研究科・特任助教	1
B01 公	20H04743 超小型衛星とMAXI-NICE R連携による定常重力波源の観測網の構築	令和2年度 ～ 令和3年度	岩切 渉	中央大学・理工学部・助教	1
B02 公	20H04734 重力波の電磁波対応天体を観測するための可視光・近赤外線多色同時撮像カメラの製作	令和2年度 ～ 令和3年度	森鼻 久美子	名古屋大学・教養教育院・講師	1
B02 公	20H04751 連星中性子星合体に伴うガンマ線放射の理論研究	令和2年度 ～ 令和3年度	伊藤 裕貴	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員	1
B02 公	20H04752 コンパクト連星合体におけるショートガンマ線バーストジェットの伝播の研究	令和2年度 ～ 令和3年度	水田 晃	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員	1
B03 公	20H04730 天の川銀河における近接連星重力波源探査	令和2年度 ～ 令和3年度	鈴木 尚孝	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任助教	1
B03 公	20H04736 せいめい望遠鏡の可視光多色同時撮像カメラを使った重力波源電磁波対応天体探査	令和2年度 ～ 令和3年度	松林 和也	京都大学・大学院理学研究科・特定助教	1

B03 公	20H04737 せいめい望遠鏡を用いた連星 中性子星形成に至る超新星の 観測研究	令和2年度 ～ 令和3年度	前田 啓一	京都大学・大学院理学研 究科・准教授	1
B03 公	20H04744 重力波源からのガンマ線バー ストを観測する衛星搭載赤外 線望遠鏡の開発	令和2年度 ～ 令和3年度	津村 耕司	東京都市大学・理工学部・ 准教授	1
B03 公	20H04754 南天における重力波対応天体 の可視光近赤外線多波長観測	令和2年度 ～ 令和3年度	鈴木 大介	大阪大学・大学院理学研 究科・助教	1
C01 公	20H04747 超新星爆発の後期ニュートリ ノについての包括的理論研究	令和2年度 ～ 令和3年度	諏訪 雄大	東京大学・大学院総合文 化研究科・准教授	1
C01 公	20H04748 超新星重力波検出に向けた現 実的な超新星重力波テンプレ ートの作成	令和2年度 ～ 令和3年度	中村 航	福岡大学・理学部・助教	1
C01 公	20H04753 重力波星震学に基づく原始中 性子星状態方程式の制限	令和2年度 ～ 令和3年度	祖谷 元	国立研究開発法人理化学 研究所・開拓研究本部・研 究員	1
C02 公	20H04742 重力波の理論計算へ向けたク ォーク＝ハドロン相転移の色 分子動力学による導出	令和2年度 ～ 令和3年度	安武 伸俊	千葉工業大学・情報科学 部・准教授	1
公募研究 計 55 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 研究領域全体に係る事項

### 3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 29 年度	217,230,000 円	167,100,000 円	50,130,000 円
平成 30 年度	299,650,000 円	230,500,000 円	69,150,000 円
令和元年度	295,880,000 円	227,600,000 円	68,280,000 円
令和 2 年度	301,860,000 円	232,200,000 円	69,660,000 円
令和 3 年度	279,175,000 円	214,750,000 円	64,425,000 円
合計	1,393,795,000 円	1,072,150,000 円	321,645,000 円

## 4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

### 1) 応募時における研究の学術的背景

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(=重力波観測によって開始する新しい研究)の流れを力強く推し進め、新領域を創成する。**以下に領域提案時における背景を説明する。

**【重力波初検出とフォローアップ体制】**2015年9月に米国の重力波観測チーム LIGO は初の重力波の直接検出に成功した(Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 061102)。今後の観測数の爆発的増加(数年で~100 イベント)は間違いなく、日本の重力波検出器である KAGRA も本格観測段階に入ることが予定され、LIGO/Virgo(Virgo は仏伊の共同プロジェクト)との共同観測とデータ共有も開始されることが予定されていた。重力波観測において、観測技術の向上と同時に、微弱な重力波信号から物理情報を引き出すデータ解析手法の向上が不可欠である。基本となるデータ解析の技術は既に整備され、2016年はじめの KAGRA 試運転(iKAGRA)で取得された実データの解析も実際に進められていた。新しい独自の重力波解析法を提案する上で重要となる**重力波源と波形に関する理論研究も、一般相対論の数値シミュレーションによる研究をはじめとし、既に多くの実績を挙げてきていた。**重力波対応天体のフォローアップ観測は波源の理解を進める鍵となるが、そのための**観測ネットワークの構築**に関しては J-GEM に代表される組織化が日本において進んできていた(Publ. Astron. Soc. Jap. 68 (2016) L9, ApJ. Suppl. 225 (2016) 8)。日本は KAGRA 計画を推進しているだけでなく、すばる望遠鏡/HSC やスーパーカミオカンデに代表される重力波源の候補天体(重力波対応天体)に対する強力な多様な観測手段を有し、世界をリードする能力を有していた。

**【30 太陽質量ブラックホール(BH)連星合体からの重力波検出の波及効果】**重力波という新しい宇宙の観測手段を得たことによる研究の広がりには既に起こりつつあった。初検出された重力波は BH 連星合体を波源とするものであった。この発見により、30 太陽質量程度の大質量 BH からなる連星の存在が確実となった。そのため、連星形成・進化の理論は大きく見直されようとしていた。このような**大質量 BH の形成**には、重元素による汚染の少ない原初の元素組成比を持った環境での星形成が不可欠だと考えられるが、そのような初代星形成における多次元輻射流体シミュレーションがすでになされてきていた(ApJ 824 (2016) 119)。星団形成における N 体/SPH シミュレーションを用いた連星形成の先駆的研究も進みつつある状況であった(ApJ 817 (2016) 4)。これらの例が示すように、重力波観測を契機に、これまでの研究が再評価され、新たな展開を引き起こしつつあった。連星合体の重力波波形からは、**重力理論の新たな検証も可能となる。**重力理論拡張に対する制限はダークエネルギーなどの宇宙論の問題解決へと繋がると期待される。

**【中性子星(NS)連星合体検出への期待】**重力波イベントの頻度の理論的推定からは、NS を含む連星合体からの重力波検出も近い将来であると期待されていた。NS を含む連星合体は継続時間の短い、**短ガンマ線バーストの起源**として有力視されており、同定されれば、謎の多いガンマ線バーストに対する理解が急速に進むと期待された。また、NS を含む連星合体の観測は、ウランや金、プラチナなどの **r**-過程(中性子過剰環境化でベータ崩壊がおこるよりも急速に進行する元素合成過程)により生成される元素の起源を探る上にも革新をもたらすと期待された。後に、連星中性子星合体イベントの観測があり、この期待は現実のものとなった。

**【超新星爆発機構の解明への期待】**更に、我々の銀河系内で超新星爆発が起こる頻度は百年に1度程度と見積もられ、そのような超新星からの重力波は検出可能であると期待される。重力波波形検出とニュートリノの詳細なスペクトルや光度曲線の観測という**超新星深部に対するふたつの強力な観測手段**を用いて、近傍での超新星爆発が観測されれば、**超新星爆発機構の革命的な理解の発展**が期待できる。

### 2) 対象とする学問分野

本領域は「**②当該領域の格段の発展・飛躍的な展開を目指すもの**」に該当する。

現在、**重力波観測の開始という歴史的な時期**にある。重力波という全く新しい観測データ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**が既に進んでいる。この好機をとらえて、**(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と理論が一体となり推進する。このことによって、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する。

さらに、主として関係する重力波源の違いにより、**A 班**(主としてBH連星合体からの重力波に関する研究)、**B 班**(NSを含む連星合体)、**C 班**(超新星爆発)の3つの班を構成する。これらの重力波源は本新学術領域の継続期間内に観測される可能性が高いとみなされる重力波源である。**本提案は、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。**

	A 班：BH 連星合体	B 班：中性子星を含む連星合体	C 班：超新星爆発
重力波データの総合的解析	A01: 重力波データ解析による重力理論の検証	B01: 中性子星を含む連星, パルサー, マグネターからの重力波による宇宙物理学の研究	C01: 重力波天文学で解き明かす超新星爆発の物理
重力波検出から広がる物理学・天文学	A02: 重力波物理学・天文学における重力理論研究の新展開	B02: 高エネルギー観測で探る重力波天体	C02: ニュートリノ放出を用いた超新星爆発現象の解明
	A03: ブラックホール連星形成過程の理論的研究	B03: 重力波源の光赤外線対応天体観測で迫る中性子星合体の元素合成	

当然ながら、上記の(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・天文学の間には密な連携が必要である。特に、同一の重力波源に関わる研究を進める3つの班内での密接な連携を保つことに大きな意義がある。また、強い重力波源となる現象は、ほぼ例外なく強重力が関与するコンパクトな天体に付随する現象であるといえる。この点で、班をまたいでも、多くの共通する物理が貫いており、重力波データ解析手法やさまざまな観測手段も、必ずしもひとつの科学的目標に特化したものではない。ここに、総合的な領域を形成する意義がある。

### 3) 本領域の重要性・発展性

本領域は、「1、国際的優位性を有する(期待される)もの」に該当する。

初検出をした米国のLIGOに加え、現時点において、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本領域の最重要課題である。**

「日本発」の成果を出すという観点で、重力波データ解析、重力波対応天体の多波長観測、理論的研究のそれぞれについて、以下のような優位性があると考えられる。

**重力波データ解析** KAGRA計画に向けて、日本では独自のデータ解析グループが組織され、LIGOのデータ解析の技術を導入しながらも、実データの独自解析を進めるための準備を整えている。

**重力波対応天体の多波長観測** 重力波対応天体観測のためには観測のネットワークの構築が必要だが、J-GEMという組織が構築されており、超新星に対しては電磁波によるフォローアップ観測だけでなく、超新星ニュートリノに対して世界で最も感度の高いスーパーカミオカンデを用いることができる。今後、スーパーカミオカンデでは、ガドリニウムを注入するという新しい技術の導入で、反電子ニュートリノの識別が可能になり、さらにこの優位性が向上すると期待される。

**理論的研究** 相対論に関する研究では国際的にみても日本の存在感は高い。とりわけ、重力波データ解析と密接に関連する一般相対論の数値シミュレーションやBH摂動、拡張重力理論、超新星爆発の3次元シミュレーションにおいても、成果を挙げている。

したがって、3つの計画研究(A01, B01, C01)による重力波データ解析と理論研究の融合による重力波データの総合的解析、および、5つの計画研究(A02, A03, B02, B03, C02)による理論、観測の垣根を超えた重力波検出から広がる新しい物理学・天文学の組織的な研究推進には飛躍的發展と世界的な成果が期待できるものと考えられる。

### 4) 研究期間終了後に期待される成果等

本領域に期待される究極の研究成果は、重力理論の検証、BHの起源、ガンマ線バーストの正体、 $r$ -過程元素の起源、超新星爆発の機構等の重要な課題について、重力波検出から物理学・天文学の理解を進めることである。これは、研究の成果を明白に社会に説明・還元できるものことに繋がる。また、**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**」ことが期待される成果である。

## 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### (審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

**指摘事項** 「一方で、今後、国際的な競争が激化すると予想されるため、世界的な情報の共有、共同研究体制の確立、人材の育成など重要な役目を担うことになる国際活動支援班には、新たな観測手段の計画立案への支援など国際的な動向を踏まえた速やかな対処が求められる。さらに公募研究を活用して、若手の海外長期派遣による共同研究の構築などを積極的に行い、重力波研究における我が国のプレゼンスをより一層高める工夫が必要である。」

毎月の総括班会議での議論を経て、海外渡航、研究会開催補助等を決め、以下のような実績を挙げてきた。

1) 若手の長期派遣の実績は項目 11 に示す。

2) 海外との共同研究の具体的実績

重力波定常観測第二期 (O2) において、米国の重力波望遠鏡 LIGO、欧州の重力波望遠鏡 Virgo と研究協力協定を結び、それぞれの望遠鏡からの重力波アラート及び関連情報を配信してもらう協定を取り交わした。O2 においては、重力波アラートは秘密情報であったため、この協定のおかげで、中性子星合体 GW170817 のアラートを受け取ることができ、即時に追跡観測を開始することができた。また、この協定を結んだ世界の 70 の観測施設との情報共有を行い、現象の全体像を把握することができた。また、MAXI は X 線望遠鏡 Swift 衛星および ISS 上の NICER の運用チームと緊密に共同研究を実施している。MAXI で発見した突発天体を Swift の X 線望遠鏡および NICER で追跡するプログラムを実施し、多数のブラックホール X 線連星の発見・同定・詳細観測を実現した。同じ ISS 上にある NICER に地上への通信を介さず、軌道上で完結した即応追跡観測するプログラム OHMAN は、NASA でも高く評価され日米双方で資金を得て開発が行われ、2022 年に運用を開始した。また、広島大は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の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。

理論的な研究においても、例えば、超新星コアにおける降着衝撃波不安定性から生じる重力波を世界に先がけて予言し (Kuroda et al. 2016, ApJL)、多くの海外の研究グループへその波形を提供した。詳細な解析について共同研究が実現し、Lin, Zidu et al. 2020 (PRD) をはじめとする多くの成果に結実した。

3) PTEP レビュー論文を領域メンバーの多数が著者となり執筆した。本論文は Editor's choice に選定された。

4) 領域ワークショップを年に 3 回、毎年の領域シンポジウム、2022 年 4 月には国際シンポジウムの開催などをおこなうことで共同研究の拡大、人材の育成に貢献してきた。

5) 新たな観測手段に関するものとして、公募研究で以下のような多数の計画を支援してきた。

Tomo-e Gozen カメラによる重力波可視対応天体超広視野即時探査観測、MAGNUM 望遠鏡と可視赤外線多波長カメラ (MIP) の観測体制の整備、可視光・近赤外線多色同時撮像カメラ、HiZ GUNDAM、MAXI-NICER 連携として国際宇宙ステーション (ISS) 上で直接 MAXI の突発天体の情報を直接 NICER に送信する OHMAN 計画、ガンマ線トリガー検出器のフライトモデルの開発、ガンマ線バーストを観測する衛星搭載赤外線望遠鏡、明るい中性子星 X 線連星を連続観測して、定常的重力波観測のための情報を得る Ninjasat の開発。

6) 国際活動支援の予算による新たな観測手段の支援については、研究ではなく事前調査的なことを通じての国際活動支援になる。ただし、中間評価後、コロナの影響で派遣はほとんどできない状態にあった。そのような状況の中にあっても、上に挙げたハンガリーと共同でガンマ線バースト検出超小型衛星を開発した CAMELOT 計画の他、紫外線での重力波対応天体や超新星爆発初期衝撃波放射を捉えることを目的とした超小型衛星をカリフォルニア工科大と共同で構想を立てた。本研究の他に国内のパートナーと資金を見つけ、2022 年度内の打ち上げを目指して開発を行っている。定期的にかリフォルニア工科大とネット上でセミナーを実施し、観測計画も相談している。

### (中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

**指摘事項** 「1) 一方、ブラックホールの質量が予測より大きかったなど、思いがけない結果も得られているが、十分に対応しきれていない印象がある。予定調和的な成果を上げるだけでなく、想像力を巡らせ、まったく新しい可能性を創出するという意識も持って研究を進めていただきたい。2) また、目標設定とそれに向けた進捗が不明瞭である。マイルストーンを明確に設定し、研究の過程で修正する点は修正し、新たに導入すべきことは躊躇なく導入して研究を実施するなど、領域代表者のマネジメントに期待したい。」

1) の点については、ブラックホール質量が予測より大きかったことについては、現在ではすでに特に驚きでもなくなっている。なぜ、近傍で見つかっているブラックホールの質量が小さいものに限られているのかは、金属量の多い環境では大きなブラックホールはほとんどできないと理解されている。

当初の予定した計画も、理論と観測がタッグを組んで臨機応変に研究を発展させることを目指すものであった。予定調和的な成果を着実に挙げることもおろそかにすることなく、さらに新奇な研究の発展を生み出すという意識をもって研究を進めるように総括班会議において議論を行った。結果として、以下に例示するように多数の当初予定していなかった研究の進展があった。

i) 連星合体における拡張重力理論の兆候を捉えるという観点で畳みこみニューラルネットを用いた機械学習をデータ解析に取り入れたが、このことで研究の可能性が広がり、連続重力波サーチに関する新しい手法を提案するに至った (Yamamoto & Tanaka 2020)。

ii) ダスト冷却による分裂により小質量星の集団が形成されると考えられてきた、強い輻射場を受けた低金属度ガス雲中での星形成過程の数値シミュレーションを行った結果、実際には星団の中心の天体は他の分裂片の降着により中間質量ブラックホールへと成長可能であることが解明された (Chon & Omukai 2020)。次に同様の数値シミュレーションを外部輻射場が強くない通常の状態にも適用したところ、これまで信じられてきたようにダスト冷却が効率的となる重元素量で星の典型的な質量が急に小さくなるのではなく、星の質量分布に小質量成分が出現して、2成分となり、重元素量の増加とともに大質量成分の割合が減少していくという画期的な描像が得られた (Chon, Omukai & Schneider 2021)。こうして得られた宇宙初期の星の初期質量関数を用い、さらに独自に開発した連星種族合成モデルを組み合わせることで、期待される重力波イベント率を計算したところ、現在の観測値と整合的であることが示された (Tanikawa et al. 2022)。

iii) 高速自転している場合に、これまで予想されていなかった機構で超新星爆発が起こることを発見した (Takiwaki & Kotake, MNRAS Letters, 2018)。さらに詳細なデータ解析を行い、その機構をトリガーするのが中性子星においては未発見であった Rossby 波不安定性であることを突き止めた。さらに中性子星がさらにクォーク星になる場合の重力波を世界で初めて予言した。

2) の点について、本新学術領域は重力波観測を起点として広がる創成期にある広範な物理学・天文学の分野を全方位的に発展させることが目的である。一つのサイエンスゴールがあり、それに向かって知識を集約するというものとは異なる。複数の大目標があり、すべて重要である。以下では、これらの大目標に対して、どのような目標を立てて取り組み、実際に、どれだけの成果を上げたかは次項目 6 の (1) に記載すべき内容であるが、以下の表にまとめる。

	最も主たる目標	対応する成果
A01	一般的な重力理論の検証を越えるテストを理論的波形モデルの構築から進め、実データに適用する。	複数の実データに新しい解析を適用した論文を発表し、世界初となる制限を導いた。
A02	重力波の物理を通じて重力や宇宙の本質に迫り、一般相対論を超える重力理論の構築	一般的な理論的枠組みを構築することに成功した。
A03	ブラックホール連星の形成過程の理論シミュレーションによる解明	主要な形成チャンネルに関して、飛躍的に理解が深まった。
B01	中性子星を含む連星合体重力波の検出と、その重力波波形から物理的情報を取り出すための理論的研究とデータ解析研究を行う	KAGRA-GE0600 の共同観測のデータ解析に加え、数値相対論による独自理論波形を用いた解析を実現した。
B02	重力波イベント発生時に迅速に MAXI のデータを解析して対応天体の有無、その推定位置を全世界に向けて速報するための解析パイプラインを開発する。	開発は O3 に間に合い、ほぼ全ての重力波イベントに対して、重力波検出通知受信後数時間以内に GCN に上限値等を速報した。
B03	重力波の電磁波対応天体を検出し中性子星合体の元素合成の様子を調べ、素早い中性子捕獲反応 ( $r$ -過程) による合成元素の起源を解明する。	中性子星合体 GW170817 の光赤外線検出および追跡観測に成功し、理論計算を組み合わせ、 $r$ -過程元素が合成されている証拠を得た。
C01	超新星爆発時に生じる重力波の理論予言と観測のためのデータ解析手法を開発する。	3次元シミュレーションを 20 モデル以上用いて、標準的な重力波モードの振幅を予言し、生成メカニズムを明らかにした。
C02	理論と実験を両立させ、次の超新星爆発の観測から、爆発機構、始原天体、核物理学的な成分に関する情報を最大限に引き出すことである。	スーパーカミオカンデへのガドリニウム添加による検出能力の向上が進み、観測との比較で必要とされる理論予言も整備された。

## 6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

### (1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

**計画研究 A01** 重力波観測の実データを用いた新しい重力理論の検証方法の提案と実装を目標に掲げた。LIGO-Virgo-KAGRA の共同研究による解析では、基本的に個別の理論に適応させた解析をおこなうのではなく、汎用的なモデル化を用いてパラメータ空間を制限するというアプローチが採用されている。そのために、多くの理論的に動機づけの強いモデルが検証されていない。本計画研究では、計画研究 A02 とも連動し、LIGO-Virgo-KAGRA の共同研究で行われていない理論主導の先進的なデータ解析を実現する。この取り組みは以下の3段階からなる：1) 拡張されたモデルがこれまでの観測で制限されていないかを精査する段階、2) モデルが予言する重力波波形に対する修正を計算する定式化をおこない、理論波形を構築構築する段階、3) 得られた理論波形を実際に観測された重力波データに適用する段階。結果として、BH エコー解析、パリティを破る重力理論の検証、質量を持つ粒子が媒介する第五の力の存在の検証に関して、上記の3段階のすべてを完遂するに至った。

**計画研究 A02** A02 班は、重力波の物理を通じて重力や宇宙の本質に迫り、一般相対論を超える重力理論の構築を目標の一つに掲げて研究をしてきた。そのための一般的な理論的枠組みを構築することに成功した。その他の多くの研究成果と合わせて当初の目標は達成できた。

**計画研究 A03** A03 班は主要な重力波源であるブラックホール連星の形成過程の理論シミュレーションによる解明を目標として研究してきた。こ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。それぞれに関して、後述の(2)で述べるように飛躍的に理解が深まった。

**計画研究 B01** B01 班では、中性子星を含む連星合体重力波重力波の検出と、その重力波波形から物理的情報を取り出すための理論的研究とデータ解析研究を行うことを目標とした。KAGRA は2020年4月に、ドイツにあるレーザー干渉計重力波検出装置 GEO600 との共同観測を行なった。この観測は LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) Collaboration の共同観測として行われたものであり、この解析を中心となり進め、論文として発表するに至った。独自の理論波形の構築と、それを用いた実際のデータ解析の実行という目標も達成した。

**計画研究 B02** 飛翔体を用いた紫外線、X線、ガンマ線による重力波対応天体の観測を行うことで、重力波対応天体の起源を解明することを目標に掲げた。対応天体の観測に関しては、GW170817 に対する様々な観測に成功し、多数の成果を挙げた。それと共に、理論的研究においても、世界の研究の流れを作った重力波対応天体からのガンマ線放射シナリオの提案など、十分な成果を挙げた。

**計画研究 B03** 目標は、重力波の電磁波対応天体を検出し中性子星合体の元素合成の様子を調べ、素早い中性子捕獲反応すなわち  $r$ -過程による合成元素の起源を解明することである。このため、1) 中性子星合体の数値相対論シミュレーションと輻射輸送計算とを組み合わせ、中性子星合体からの光赤外線放射に対する世界で最も精緻な予言を提供し、観測結果から元素の放出量を測定する基盤を構築する。2) 日本の光赤外線観測ネットワーク J-GEM によって重力波天体の探査観測を実施し、重力波天体の電磁波対応天体を同定することで、重力波天体の詳細な位置、距離、周辺環境、放出物質の量と化学組成を明らかにする。という目標に掲げた。

1)の理論的研究では、当初の目論見通り詳細な数値相対論シミュレーションを行い、全  $r$ -過程元素の原子構造計算を系統的に行って吸収係数を求め、輻射輸送計算を行って中性子星合体からの放射スペクトルを予測することに成功した。2)の観測的研究では、中性子星合体 GW170817 の光赤外線検出および追跡観測に成功し、理論計算を組み合わせ、 $r$ -過程元素が合成されている証拠を掴んだ。このイベント以降も観測システムを改良・整備し、さらなる中性子星合体の電磁波対応天体の検出を目指した。以上より、最初に設定した目標はほぼ達成することができた。より多くの重力波天体追跡観測は今後の課題となる。

**計画研究 C01** 超新星爆発の機構の解明を目的とし、以下の3つの課題を設定した。まず課題1は多様な親星を初期条件とし、世界最高水準の3次元数値シミュレーションを実行する。放出される重力波の波形の特徴を予言し、コンパクト天体形成過程の初期条件依存性を明らかにする。課題2はシミュレーションで得られた超新星起源の重力波に特化したデータ解析法を構築する。課題3は LIGO, VIRGO, KAGRA の干渉計のデータを用いて超新星起源の重力波を探索する。本研究領域の期間中に上記全ての課題を達成した。

**計画研究 C02** 本研究の究極の目標は、理論と実験を融合させ、次に起こる銀河内での超新星爆発を可能な限り観測し、爆発機構、始原天体、核物理学的な成分に関する情報を最大限に引き出すことである。期間中に近傍での超新星爆発は起こらなかったが、重力崩壊で生じる背景ニュートリノを捉えるためのスーパーカミオカンデへのガドリニウム添加が進み、データを集積している。また、理論面では超新星のシミュレーションコードの改良が進み、ニュートリノ光度曲線の理論予測が進んだ。

### (2) 本研究領域により得られた成果

**計画研究 A01** 新たな理論波形予測に基づいた実データ解析の実装に至った成果は以下のものである。

**BH エコー解析**：まず、連星 BH 合体において、最大のアノマリーとしてエコーの存在が報告されている。第一報後、他グループの追解析では、信号を検出しないと報告されている。我々はいち早く、第一報のデータ解析で用いられた理論波形が物理的描像に矛盾することを指摘し、物理的描像に基づく理論波形を提案した。さらに、その波形を用いた解析をおこない、物理的信号は検出されないと結論した。

**パリティを破る重力理論の検証**：パリティを破る修正重力の効果は静的な問題では現れないため、太陽系での検証などの制限は弱く、重力波を用いた検証が有効である。右巻きと左巻きの偏波の伝播が異なる。A02 の小林氏らは通常の重力波解析で信号が検出されていることから弱い制限を得ていたが、実データ解析をおこなうことで実に 7 桁も強い制限をパラメータにつけることに成功した。

**質量を持つ粒子が媒介する第五の力の存在**：LVK の解析においても第五の力が引き起こす双極子放射の有無に関してはテストがされている。しかし、典型的なスカラー・テンソル理論に対して、ビッグバン元素合成からスカラー場の質量に下限が与えられている。LVK の解析では質量の存在を無視した波形での解析しかなくされていない。一般に、双極子放射を起こす粒子が質量を持つ場合の実データ解析をおこない、世界初となる制限をつけた。

その他にも、ブラックホールと考えられている合体する連星を構成する天体の潮汐変形度を調べることで、一般相対論の予言からのずれがないかを検証する解析や、テンソルモード以外の偏波モードが存在しないかの解析などもおこなった。

新しい重力波データ解析手法の開発の側面としては、疑似データによる手法の性能比較をおこなった。背景として、様々なデータ解析手法が提案されているが、その有効性を比較検討する研究は皆無であった。そこで、連星 BH 合体後のリングダウン信号から BH 準固有振動の振動数と減衰率を推定する課題で、様々な手法の比較を試みた。理論的に波形がどう修正を受けるかがわかっているなら、マッチドフィルタリング法が最適であるが、そうではない場合、自己回帰モデルによる推定や機械学習による推定の方が優秀な成績を示す場合があり、多様な手法による解析結果を比較検討する有用性を示した。

【公募研究】大栗氏は、重力波の伝搬の波動光学効果を詳しく調べ、これにより小質量ダークマターハローや原始ブラックホールを検出できるかどうかを検討した。その結果、波動光学効果により周波数依存する振幅と位相の分散が検出されれば、1 太陽質量から 10 の 4 乗太陽質量という、これまで未開拓の小質量ダークマターハローの存在量を制限しようという興味深い結果を得た。

**計画研究 A02** A02 班代表者は、若手研究者 2 名を含む共同研究者とともに、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ることもできるので、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、A02 班代表者は 3 名の若手研究者とともに、宇宙論 background 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成功した。Scalar-tensor 理論を記述する有効場の理論は、EFT of inflation あるいは EFT of dark energy と呼ばれていて Planck team などによる解析にも採用されているが、それは A02 班代表者が共同研究者とともに以前構成した ghost condensation の有効場の理論を Minkowski から膨張宇宙に拡張したものである。今回の研究では、ghost condensation をゲージ化した理論を、Minkowski から膨張宇宙に拡張することにより、EFT of vector-tensor theories を構成した。この EFT は、ダークエネルギー理論を観測から制限するのに有用と考えられる。

A02 班分担者の須山は、原始ブラックホール連星の合体イベントが観測された場合、その合体率から未だ観測的に未解明の短波長原始密度揺らぎのパワースペクトルを再構築する方法を提案した (JCAP 04 (2021) 031)。この研究は、公募研究 (山口昌英) や若手研究者 (Ying-li Zhang) を共著者に含む共同研究である。重力波観測の実データを使って、極小スケールの原始密度揺らぎの大きさに制限を与えた (ApJL 910, (2021), L4)。これまで原始ブラックホールが未観測であることに基づく制限があったが、それとは全く独立な方法に基づく新しい制限である。また、この制限に基づいて、非常に軽い原始ブラックホールの存在可能性に対し、ホーキング放射に依拠する既存の制限に拮抗する独立な制限を与えた。この成果は、重力波観測が初期宇宙モデルの検証にも使える段階に入ってきたことを示すものである。これは LIGO チーム所属の若手研究者 (Shasvath Kapadia) を共著者に含む共同研究である。また、ダークマターが標準模型粒子とわずかに相互作用する軽いスカラー場である場合、稼働中あるいは将来の重力波レーザー干渉計で検出可能であることを示した (PRD 100 (2019), 123512)。この種のダークマターは従来のダークマター探索ではカバーできなかったものであり、重力波レーザー干渉計がダークマター探索の新手法として使えることを示したものである。この研究は、大学院生 (森崎宗一郎) との共同研究である。

【公募研究】近年、一般相対論を超える重力理論として、縮退高階スカラー・テンソル (DHOST) 理論が多くの研究者の注目を集めている。A02 班公募研究の小林は、DHOST 理論において、宇宙論的密度揺らぎの 1 ループパワースペクトルや、ブラックホール準固有振動の評価を世界で初めて行った。

**計画研究 A03** 孤立した環境での連星の形成過程に関しては、宇宙の初代星は典型的に大質量で、その質量は原始星からの輻射フィードバックにより決定されると考えられているが、これまでの数値シミュレーションでは複数の原始星が生まれる際にも中心星のみを光源として取り扱っており、連星形成時の最終的な質量を予言することが出来なかった。そこで研究代表者と研究分担者の細川らは若手研究者らとともに複数光源からの輻射輸送を解く数値計算コードを開発したうえ、初代星形成の輻射流体シミュレーションを実施した (Sugimura et al. 2020)。それにより初代星は数 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を明らかにした。しかし、その連星間距離は 1000 天文単位以上と大きい傾向があ

り、それらがブラックホールへと進化しても重力波源となりえないことが判明した。

上記の問題に関して研究代表者は若手研究者らとともに初代星の連星形成過程における磁場による角運動量輸送の影響を磁気流体シミュレーションにより調べた(Sadanari et al. 2021)。その結果、磁場の効果で確かに角運動量が輸送されるものの、連星間距離を近づけるよりも、円盤形成を妨げることで連星形成を妨げる傾向にあることがわかった。これは、現在の星形成とは異なる (Saiki & Machida 2020)。この差は、現在の星形成の際にはある密度範囲で磁場が散逸することに起因する可能性がある。そこで研究代表者と研究分担者の須佐は若手研究者とともに中間的な低金属度ガスからの星形成の際の磁場散逸過程に関して、詳細に化学反応および輻射過程を調べ、ダスト量が現在の10万分の1程度以上存在する場合には磁場散逸領域が出現することを示した(Nakauchi, Omukai & Susa 2019, 2021)。

星団中での力学相互作用による連星形成に関しても、研究分担者の藤井と谷川は若手研究者らと広い範囲の質量の星団に対して重力多体シミュレーションを実施することで、その形成効率を調べた。その結果、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ものの、散開星団的な低質量のもの(太陽の一万倍以下)でもこの過程は起こりうることを示された(Kumamoto, Fujii & Tanikawa 2019)。さらにこのような小質量星団は宇宙史の中で多数形成されてきたと考えられることから、ブラックホール連星合体イベントの主要な成分である可能性があることも指摘した(Kumamoto, Fujii & Tanikawa 2020)。

さらに研究分担者の谷川、藤井らは星の初期質量関数の違いが星団内でのBH合体率に与える影響についても重力多体シミュレーションにより調べた(Wang, Tanikawa & Fujii 2021, 2022)。その結果、これまで初期に大質量星が多い場合には多くのブラックホールが形成されるため、BH合体率も多くなると予想されていたが、実際には大量のブラックホールによる力学的な影響により星団内の星が平均的に高い運動エネルギーを持ち、連星形成自体が起こりにくくなり、BH合体率が低くなることが分かった。

上記以外に特筆すべきものは、研究分担者の谷川らによる低金属度における連星種族合成モデルの構築があげられる(Tanikawa et al. 2022)。ゼロから太陽金属度までの広範囲にわたり自身で星の進化を計算し、シームレスな連星種族合成モデルを再構築した。さらにこのモデルをChon et al. 2021による種族II星の初期質量関数と組み合わせ、重力波イベント率を求め、観測と整合的であることも示した。

**計画研究 B01** KAGRA/LIGO/Virgo のデータを用いた重力波検出を行うことが主要な研究目標であった。2020年4月KAGRAとGEO600間の共同観測では、データ解析を行うため解析チームがLVK Collaboration内に結成された。メンバーとしてはLVKから20名程度参加したが、それにはB01班からは代表者の田越、分担者のKipp Cannon、研究員(研究協力者)の上野、内潟、成川、譲原、C01班からは分担者の端山、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、上野とKipp Cannonは連星中性子星合体重力波の全天探索、内潟、成川はKAGRAとGEOデータの突発性雑音の発現頻度の計算や観測可能距離の評価などを担当した。C01のMan Leong Chanは詳細な波形を仮定しないバースト重力波の全天探索を担当した。その他、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重要な結果であり、論文はPTEPに掲載された(PTEP2022, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac073>)。

B01班の数値相対論グループでは連星中性子星合体とそれにより発生する重力波の高分解能数値相対論計算をまとめた。これは連星合体の最終段階の部分の15から16週の運動を計算した誤差0.1ラジアンの高精度の波形である(PRD96, 84060, 2017)。この結果に基づき連星中性子星連星合体の周波数空間での波形モデルを構築した(PRD97, 044044, 2018)。この最新の波形モデルを用いてGW170817とGW190425の再解析を行った。そして、様々な波形モデルによる結果の違いを調べ、潮汐変形率は波形モデルに依存した小さな違いが生じることがわかった(Physical Review Research, 1, 33055, 2019)。GW170817のデータを独自に再解析し、中性子星の潮汐変形率への制限を行った結果、LIGOハンフォードデータとリビングストーンデータから得られる潮汐変形率の事後確率分布の形がかなり異なることを明らかにした(Physical Review Research, 2, 43039, 2020)。

**【公募研究】**久徳はブラックホール・中性子星連星の合体シミュレーションに必要な初期条件の、特にバンクチャー法と呼ばれる定式化において、離心率を0.1%以下まで低減する方法を開発した。これにより、高精度の重力波波形の導出が可能となり、中性子星の状態方程式を十分に小さい系統誤差で読み取れるようになると期待される。

**計画研究 B02** 2017年に発生した連星中性子星合体イベントGW170817に対して、MAXI, CALET, Chandra, Swift, Fermi LATを用いて紫外線、X線、ガンマ線帯における観測を実施した。SwiftはGW170817の紫外線領域で急速に減光する電磁波対応天体を発見し、キロノバ放射の解明に大きく貢献した。多波長にわたる観測成果は、光赤外観測を担当するB03班とともに論文として発表されている。また、現在も継続して観測が行われているGW170817のChandraによるX線対応天体の観測から中性子星合体で放出される相対論的ジェットの構造に対して新たな知見を与えた。

理論研究としては、GW170817で同時に起きたガンマ線バーストに対して、ジェットを横から見ているというoff-axisモデルを提唱し、その後の観測で証明された。そのジェットの形状をガンマ線バーストの残光から逆解きすると、予想以上に多様な形状が許されることが分かった。また、ジェットが連星合体時に飛び散る物質中を伝搬して高温のコクーンが作る過程を調べ、将来の観測に備えた。さらに、飛散物質が再び中心のブラックホールに降着して、GW170817の数日後のX線超過を説明するフォールバック

クモデルを提唱した。連星中性子星合体と高速電波バーストの関係について新たな示唆を得るため、連星中性子星合体からの残光放射についての最新の理論モデルを構築した。GW170817の残光について、それまで知られていた解と本質的に異なるパラメータ領域の解が存在していることを発見した。高速電波バーストの電波追観測への示唆や、高エネルギーガンマ線放射の可能性について新たな知見を得た。O3においても、迅速な解析と速報のためのシステムを開発して上記の観測装置による電磁波対応天体の探査を精力的に行った。対応天体発見には結びつかなかったが、観測結果を論文として出版した。

上記に加えて、MAXIに関わる成果として、期間を通じて全天X線監視を継続し、この5年間で14のX線新星を発見した。MAXI等のデータを用いた天体の質量の見積りと観測的な特徴からは新天体のうち10個がブラックホールを含むX線連星である可能性が高い。さらに、同じ国際宇宙ステーション上にあるNICERに地上を介さずに直接速報を届けて追跡観測を行うためのシステムOHMANを開発し、試験運用まで行い、2022年に稼働し始めた。また、MAXI搭載ガススリットカメラの7年間のデータを用いて、低銀緯領域のX線源カタログを作成した。これは、今後の銀河系内X線連星研究の基礎となるものである。一方、銀河系外の超高光度X線源の一つから周期的なディップ現象を発見し、その起源に制約を与えた。Chandra衛星のアーカイブを系統的に解析することで、超高光度X線源を含む銀河系外X線連星カタログを構築した。

次世代の観測装置の開発を進め、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したり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。

**計画研究 B03** 【計画研究】中性子星合体GW170817に対して、すばる望遠鏡、IRSF望遠鏡、MOA-II望遠鏡およびB&C望遠鏡を用いた追観測を行うことに成功した。すばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC)を用いた観測により、GW170817の電磁波対応天体AT2017gfoの他に対応天体の可能性がないことを明らかにした。また、すばる望遠鏡多天体赤外線観測装置などを用いた追観測によってAT2017gfoが可視光では急速に減光する一方で、近赤外線ではゆっくりと暗くなることを示した。この観測結果を受けて、中性子星合体の輻射輸送シミュレーションを行い、中性子星合体が $r$ -過程で重元素を合成して輝く「キロノバ」シナリオで観測データが説明できることを示し、中性子星合体で確かに $r$ -過程元素が合成されていることを初めて明らかにした。また、観測と理論の比較から、放出された物質が0.03太陽質量程度であること、幅広い質量範囲の元素が合成されたことを明らかにした。

観測装置開発として、木曽観測所の超広視野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(O3)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。O3では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。

数値相対論の枠組みで、粘性効果、磁気流体、ニュートリノ輻射輸送を組みこんだ数値コードを開発し、連星中性子星のインスパイラルから合体後の進化のシミュレーションを行い、合体直後にブラックホールが形成される場合に重力波イベントGW170817の観測結果と整合的であることが明らかにした。

また、全 $r$ -過程元素に対して原子構造計算を系統的・網羅的に行って、中性子星の質量の違いによって生じるキロノバの多様性を予測した。さらに高階電離まで計算を発展させて、中性子星合体から1時間後のキロノバの性質を調べ、その放射スペクトルを予想することに成功した。これらの研究はB02班との共同研究である。

【公募研究】長年理論的に予測されていたものの確固たる銀河系外対応天体が知られていなかった「電子捕獲型超新星」の有力候補を発見した。このタイプの超新星は重力崩壊型超新星の中でも最も軽い親星の爆発である。爆発前に連星進化により水素外層が剥がれていた場合には「Ultra Stripped-Envelope Supernovae (USSNe)」と呼ばれるタイプの超新星になると考えられ、連星中性子星の前駆天体として有力視されている現象である。この研究はC01班、C02班との共同研究である。

また、星の化学組成、銀河の化学進化という独自の視点から $r$ -過程元素の起源に迫り、中性子星合体起源説で銀河系ディスクおよび銀河系ハローの $r$ -過程元素の化学組成を無矛盾に説明できることを突き止めた。さらに、中性子星とブラックホール連星による $r$ -過程元素合成が、 $r$ -過程元素の化学進化を理解する上で重要な役割を担っていることを明らかにした。

観測装置開発では、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。

**計画研究 C01** C01の計画研究の課題(1-I)では質量、自転、磁場を変えた3次元の超新星爆発のシミュレーションを行った。それにあたり世界最先端のニュートリノ反応率を採用した(Kotake et al. 2018)。また、国際コード比較プロジェクトに参画し計算結果が正当化できた(O'Connor et al. 2018)。質量の

大きい親星を採用した計算は Kuroda et al. 2017, 高速自転のモデルは Takiwaki & Kotake 2018, Shibagaki et al. 2020, 2021、磁場の効果を考えた MHD 計算は Kuroda et al. 2020, Matsumoto et al. 2020 にて計算し、それぞれ爆発機構と特徴的な重力波について議論した。さらに大質量星の Si/O 燃焼フェイズを 3 次元シミュレーションすることにより、現実的な流体の初期配位を作った (Yoshida et al. 2019, 2021a, 2021b)。また爆発後の元素合成も計算し、理論計算と光学観測と接続した。爆発的要素合成については, Eichler et al. 2018, Nakamura et al. 2019,  $r$ -過程元素合成については Nishimura et al. 2017 にまとめた。C01 の計画研究の課題(1-ロ)では大質量星の爆縮によるブラックホール形成をシミュレーションすることに成功した (Kuroda et al. 2018)。これは一般相対性理論の方程式をフルに解いており、記念碑的な論文である。さらに興味深い場合としてクォーク星ができる場合のシミュレーションも行い、世界に先駆けてその場合の重力波放出を予言した (Kuroda et al. 2022)。

C01 の計画研究の課題(2)では重力波に特化したデータ解析法を構築した。超新星爆発では幅広い周波数の重力波が放出される。こうした解析では波形のフーリエ変換が基本的な手法となるが、単純な離散フーリエ変換では周波数の解像度と時間の解像度を同時には高くできない関係があり、問題に合わせて適切な解像度を手動で調節する必要がある。ヒルベルトファン法ではその解像度の調整に悩まされず、極めて高い周波数の解像度で重力波を解析することができる (Takeda et al. 2021)。実際にシミュレーションで得られた波形を解析し、定在降着衝撃波不安定性による重力波と基本モードの重力波の分解に成功した。超新星爆発では様々な流体不安定性が起こり、特徴ある重力波が放出される。その情報をさらに精査するためには、重力波の偏光の情報を使うのが有意義である。Hayama et al. 2018 では世界に先駆けて円偏光の重力波を解析した。Chan et al. 2021 では実際のアンテナパターンと実際のパイプラインを用いて円偏光重力波の検出可能性を議論した。また課題 3 として KAGRA のデータ解析パイプラインを構築し、低遅延および高遅延での二つのラインにおけるストレージと解析サーバーを準備し、KAGRA のデータ解析を準備した。実際の重力波探索は Abott et al. 2020 にて行われ、Szczeptańczyk et al. 2021 でより高度な探査に向けた準備がなされている。C01 は後者における理論波形データを提供している。

【公募研究】Kawahara et al. 2018 が世界に先駆けてウィグナー・ビレ法を採用した重力波解析を提案した。この手法では通常の離散フーリエ変換と違い、時間と周波数空間の解像度として適切なものが自然に選ばれる。また、重力波の偏光の解析に向いており、今後のデータ解析において主力になることが期待される。他に Sotani et al. 2017, 2019, 2020abc, 2021 においては線形解析を用いてシミュレーションデータを再解析し、シミュレーションだけではわかりにくい重力波の生成メカニズムを物理的な観点から検証し、中性子星の基礎振動モードから普遍的に重力波が放出されることを明らかにした。また、重力波の周波数から中性子星の質量や半径を見積もる公式を提案した。

**計画研究 C02** 重力波の主要な発生源の一つは、コア崩壊型超新星爆発である。SN1987A で観測されたことで有名な SN ニュートリノは、劇的な内部ダイナミクスに対する重要なプローブとなる。最初の星が崩壊するとき放出されたニュートリノは星の重力崩壊に関する情報も持つ。銀河系内の爆発では、ニュートリノ放出の観測によって、GW の発生源が中性子星への崩壊であるかブラックホールへの崩壊であるかを区別することもできる。

実験面では、本助成期間中の主な研究成果は、特別に開発した超高純度硫酸ガドリニウム八水和物 (Gd<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·8H<sub>2</sub>O) の第一バッチ、13.2 トンの準備 (2017-2019 年度) および最終 (2020 年度) のスーパーカミオカンデ [SK] への搭載である。2002 年に C02 サブグループの研究代表者によって初めて提案されたこの革新的な検出器の改良は、水中で逆  $\beta$  崩壊 (IBD) により発生する中性子をタグ付けすることにより、超新星ニュートリノ (特に非常に遠くの爆発によって作られたもの) に対してより高い感度を実現する。これにより、超新星残骸のニュートリノに対するバックグラウンドが約 1 万分の 1 に減少する。

20 年近く前から、スーパーカミオカンデにガドリニウムを追加して超新星ニュートリノの検出能力を強化することは、神岡をはじめとする日本や世界での集中的な研究開発の原動力になってきた。現在、ガドリニウムがようやく検出器に入り、SK のガドリニウムを含んだ水の透明度も良好で、計画通りに新しいデータが継続的に収集されている。

また、200 トンの神岡実験棟 EGADS は、世界で最も低遅延な超新星ニュートリノ検出器に生まれ変わった。この検出器は、現在進行中の天の川の爆発を、検出器内で最初のニュートリノが相互作用してから数秒以内に自動的に一般に警告を出すことができるようになった。

理論面では、ボルツマン・流体コードによる超新星コアバウンス後の進化の 3 次元シミュレーションに初めて成功した。「京」などの高性能計算機を用いて、3 次元即発対流の特徴やそれに伴うニュートリノ角度分布の非対称性を明らかにした。また、状態方程式の違いにより、対流の初期発生における核組成の役割を明らかにした。スーパーカミオカンデの観測への準備として、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を整備した。

超新星ニュートリノのライトカーブを提供するために、若手研究者を中心とした理論・実験の両メンバーを組み合わせた強力な協力体制を確立した。このような SK/理論合同ニュートリノ光度曲線会議は、双方にとって非常に実りあるものとなっている。超新星数値シミュレーションから SK で予想されるニュートリノ事象数を提供する手順を構築し、一連の超新星シミュレーションに対して超新星ニュートリノ光度曲線の標準特性を提供した。

## 7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和4年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

### <発表論文>

**全研究項目横断** M. Arimoto et al., Gravitational wave physics and astronomy in the nascent era, Progress of Theoretical and Experimental Physics, ptab042, 査読有

**研究項目 A01 重力波データ解析による重力理論の検証** 総計 122 件（査読有 122 件、査読無 0 件）

**A01-1（計画・田中）** 計 33 件（査読有 33 件、査読無 0 件）

1. \*Takahiro S. Yamamoto, Takahiro Tanaka, Use of an excess power method and a convolutional neural network in an all-sky search for continuous gravitational waves, Physical Review D, 査読有, 103, 084049, 2021,
2. \*Kei Yamada, Tanaka Takahiro, Parametrized test of parity-violating gravity using GWTC-1 events, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2020 (2020) 9, 093E01
3. \*Nami Uchikata, Hiroyuki Nakano, Tatsuya Narikawa, Norichika Sago, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka, Searching for black hole echoes from the LIGO-Virgo Catalog GWTC-1, Physical Review D, 査読有, 100, 062006, 2019,
4. Hiroyuki Nakano, Tatsuya Narikawa, Ken-ichi Oohara, Kazuki Sakai, Hisa-aki Shinkai, Hiroataka 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
5. Misao Sasaki, \*Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, Shuihiro Yokoyama, Primordial black holes--perspectives in gravitational wave astronomy, Classical and Quantum Gravity, 査読有, 35, 63001, 2018

**A01-2（計画・瀬戸）** 計 21 件（査読有 21 件、査読無 0 件）

1. \*Yuki Nishino, Naoki Seto, The Search for Extra-Galactic Intelligence Signals Synchronized with Binary Neutron Star Mergers, The Astrophysical Journal, 査読有, 862, L21, 2018

**A01-3（計画・真貝）** 計 11 件（査読有 11 件、査読無 0 件）

1. Masao Takamoto, Ichiro Ushijima, Noriaki Ohmae, Toshihiro Yahagi, Kensuke Kokado, Hisa-aki Shinkai, Hidetoshi Katori, Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks, Nature Photon, 査読有, 14, 411-415, 2020

**A01-4（計画・大原,高橋）** 計 9 件（査読有 9 件、査読無 0 件）

1. Kazuki Sakai, Ken-ichi Oohara, Hiroyuki Nakano, Masato Kaneyama, Hiroataka Takahashi, Estimation of starting times of quasinormal modes in ringdown gravitational waves with the Hilbert-Huang transform, Physical Review D, 査読有, 96, 2017

**A01-5（計画・八木）** 計 43 件（査読有 43 件、査読無 0 件）

1. \*Deep Chatterjee, Abhishek Hegade K. R., Gilbert Holder, Daniel E. Holz, Scott Perkins, Kent Yagi, Nicolás Yunes, Cosmology with Love: Measuring the Hubble constant using neutron star universal relations, Physical Review D, 査読有, 104, 083528, 2021

**A01-6（計画/公募・西澤）** 計 29 件（査読有 29 件、査読無 0 件）

1. \*Hiroki Takeda, Soichiro Morisaki, Atsushi Nishizawa, Pure polarization test of GW170814 and GW170817 using waveforms consistent with modified theories of gravity, Physical Review D, 査読有, 103, 064037, 2021
2. Atsushi Nishizawa, Tsutomu Kobayashi, Parity-violating gravity and GW170817, Physical Review D, 査読有, 98, 2018

他 14 名（うち公募研究 6 名、本領域雇用の研究員を含む）

**研究項目 A02 重力波物理学・天文学における重力理論研究の新展開** 総計 225 件（査読有 225 件、査読無 0 件）

**A02-1（計画・向山）** 計 78 件（査読有 78 件、査読無 0 件）

1. Katsuki Aoki, Mohammad Ali Gorji, Shinji Mukohyama, Kazufumi Takahashi, The effective field theory of vector-tensor theories, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 査読有, 2201, 059, 2022
2. Oost Jacob, Shinji Mukohyama, Wang Anzhong, Constraints on Einstein-aether theory after GW170817, Physical Review D, 査読有, 97, 2018

**A02-2（計画・前田）** 計 16 件（査読有 16 件、査読無 0 件）

1. Haruka Suzuki, Priti Gupta, Hirotsada Okawa, Kei-ichi Maeda, Post-Newtonian Kozai-Lidov Mechanism and its Effect on Cumulative Shift of Periastron Time of Binary Pulsar, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 500, 査読有, 2, 1645, 2020

**A02-3（計画・浅田）** 計 14 件（査読有 14 件、査読無 0 件）

1. 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

**A02-4（計画・須山）** 計 21 件（査読有 21 件、査読無 0 件）

1. Rampei Kimura, Teruaki Suyama, Masahide Yamaguchi, Ying-Li Zhang, Reconstruction of Primordial Power Spectrum of curvature perturbation from the merger rate of Primordial Black Hole Binaries, Journal of Cosmology and

Astroparticle Physics, 査読有, 2104, 031, 2021

他 18 名 (うち公募研究 9 名、本領域雇用の研究員を含む)

**研究項目 A03 ブラックホール連星形成過程の理論的研究** 総計 115 件 (査読有 115 件、査読無 0 件)

A03-1 (計画・大向) 計 13 件 (査読有 13 件、査読無 0 件)

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

A03-2 (計画・須佐) 計 7 件 (査読有 7 件、査読無 0 件)

1. \*H. Susa, Merge or Survive: Number of Population III Stars per Minihalo, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 877, pp.99-108, 2019

A03-3 (計画・町田) 計 22 件 (査読有 22 件、査読無 0 件)

1. \*M. N. Machida, S. Basu, The First Two Thousand Years of Star Formation, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 876, pp.149-163, 2019

A03-4 (計画・細川) 計 12 件 (査読有 12 件、査読無 0 件)

1. \*S. Chon, T. Hosokawa, N. Yoshida, Radiation hydrodynamics simulations of the formation of direct-collapse supermassive stellar systems, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Vol. 475, pp. 4104-4121, 2018

A03-5 (計画・藤井) 計 13 件 (査読有 13 件、査読無 0 件)

1. \*J. Kumamoto, M. S. Fujii, A. Tanikawa, 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

A03-5 (計画・藤井) 計 22 件 (査読有 22 件、査読無 0 件)

1. \*A. Tanikawa, H. Susa, T. Yoshida, A. A. Trani, T. Kinugawa, Merger Rate Density of Population III Binary Black Holes Below, Above, and in the Pair-instability Mass Gap, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 910, pp. 30-67, 2021

他 12 名 (うち公募研究 6 名、本領域雇用の研究員を含む)

**研究項目 B01 中性子星を含む連星、パルサー、マグネターからの重力波による宇宙物理学の研究**

総計 94 件 (査読有 94 件、査読無 0 件)

B01-1 (計画・田越) 計 34 件 (査読有 34 件、査読無 0 件)

1. R. Abbott et al., First joint observation by the underground gravitational-wave detector, KAGRA, with GEO 600, PTEP, 査読有、2022, 063F01, 2022 <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac073>

B01-2 (計画・伊藤) 計 24 件 (査読有 24 件、査読無 0 件)

1. T. Akutsu et al., Application of independent component analysis to the iKAGRA data, PTEP, 査読有, 2020, 053F01, 2020

B01-3 (計画・小鷦) 計 12 件 (査読有 12 件、査読無 0 件)

1. Yasufumi Kojima, Shota Kisaka, Kotaro Fujisawa, Magnetic field sustained by the elastic force in neutron star crusts, MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY, 査読有, 511, 480, 2022

B01-4 (計画・川口) 計 23 件 (査読有 23 件、査読無 0 件)

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

B01-5 (計画・Cannon) 計 13 件 (査読有 13 件、査読無 0 件)

1. R. Abbott et al., Observation of Gravitational Waves from Two Neutron Star-Black Hole Coalescences, Astrophysical Journal Letter, 査読有, 915, L5, 2021

他 13 名 (うち公募研究 5 名、本領域雇用の研究員を含む)

**研究項目 B02 高エネルギー観測で探る重力波天体** 総計 156 件 (査読有 151 件、査読無 5 件)

B02-1 (計画・河合) 計 22 件 (査読有 21 件、査読無 1 件)

1. 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

B02-2 (計画・三原) 計 10 件 (査読有 10 件、査読無 0 件)

1. M. Tominaga, S. Nakahira, M. Shidatsu, M. Oeda, K. Ebisawa, Y. Sugawara, H. Negoro, N. Kawai, M. Sugizaki, Y. Ueda and T. Mihara, Discovery of the Black Hole X-Ray Binary Transient MAXI J1348-630, The Astrophysical Journal Letters, 査読有, 899, L20, 2020

B02-3 (計画・根来) 計 11 件 (査読有 11 件、査読無 0 件)

1. M. Shidatsu, S. Nakahira, K. L. Murata, R. Adachi, N. Kawai, Y. Ueda and H. Negoro, X-Ray and Optical Monitoring of State Transitions in MAXI J1820+070, The Astrophysical Journal, 査読有, 874, 183, 2019

B02-4 (計画・坂本) 計 18 件 (査読有 17 件、査読無 1 件)

1. \*E. Troja, L. Piro, T. Sakamoto, et al., The X-ray counterpart to the gravitational-wave event GW170817, Nature, 査読有, 551, 71-74, 2017

B02-5 (計画・深沢) 計 9 件 (査読有 7 件、査読無 2 件)

1. B. P. Abbott, Y. Fukazawa, N. Kawai, T. Mihara, H. Negoro, T. Sakamoto, Y. Ueda, A. Yoshida, Y. Yatsu, et al., Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 848, L12, 2017

**B02-6 (計画・井岡)** 計 27 件 (査読有 27 件、査読無 0 件)

1. \*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

**B02-7 (計画・有元)** 計 11 件 (査読有 10 件、査読無 1 件)

1. M. Ajello, M. Arimoto, Y. Fukazawa, et al., A Decade of Gamma-Ray Bursts Observed by Fermi-LAT: The Second GRB Catalog, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 878, 52, 2019

**B02-8 (計画・上田)** 計 19 件 (査読有 19 件、査読無 0 件)

1. T. Kawamuro, Y. Ueda, N. Kawai, T. Mihara, H. Negoro, S. Oda, T. Sakamoto, M. Serino, M. Sugizaki, A. Yoshida, et al., The 7-year MAXI/GSC X-Ray Source Catalog in the High Galactic Latitude Sky (3MAXI), *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 査読有, 238, 32, 2018

他 16 名 (うち公募研究 6 名、本領域雇用の研究員を含む)

**研究項目 B03 重力波源の光赤外線対応天体で迫る中性子星合体の元素合成** 総計 112 件 (査読有 111 件、査読無 1 件)

**B03-1 (計画・吉田)** 計 20 件 (査読有 20 件、査読無 0 件)

1. B. P. Abbott, \*LV Collaboration, Michitoshi Yoshida, Masaomi Tanaka, Nozomu Tominaga, S. Koji Kawabata, Shigeyuki Sako, et al., Multi-messenger observations of a binary neutron star merger, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 848, L12, 2017
2. \*Yousuke Utsumi, Masaomi Tanaka, Nozomu Tominaga, Michitoshi Yoshida, Barway Sudhanshu, Takahiro Nagayama, Tetsuya Zenko, Kentaro Aoki, Takuya Fujiyoshi, Hisanori Furusawa, et al., J-GEM observations of an electromagnetic counterpart to the neutron star merger GW170817, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 69, 2017

**B03-2 (計画・田中)** 計 30 件 (査読有 30 件、査読無 0 件)

1. \*Masaomi Tanaka, Daiji Kato, Ediminas Gaigalas, Kyohei Kawaguchi, Systematic opacity calculations for kilonovae, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 496, 1369, 2020
2. \*Masaomi Tanaka, Yousuke Utsumi, Paolo A. Mazzali, Nozomu Tominaga, Michitoshi Yoshida, Yuichiro Sekiguchi, Tomoki Morokuma, Kentaro Motohara, Kouji Ohta, S. Koji Kawabata, 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

**B03-3 (計画・富永)** 計 24 件 (査読有 24 件、査読無 0 件)

1. \*Nozomu Tominaga, Masaomi Tanaka, Tomoki Morokuma, Yousuke Utsumi, S. Masaki Yamaguchi, Naoki Yasuda, Masayuki Tanaka, Michitoshi Yoshida, et al., Subaru Hyper Suprime-Cam survey for an optical counterpart of GW170817, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 70, 28, 2018

**B03-4 (計画・関口)** 計 14 件 (査読有 14 件、査読無 0 件)

1. \*Kousuke Sumiyoshi, Sho Fujibayashi, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, Properties of neutrino transfer in a deformed remnant of a neutron star merger, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 907, 92, 2021

**B03-5 (計画・川端)** 計 22 件 (査読有 22 件、査読無 0 件)

1. \*Tatsuya Nakaoka, Keiichi Maeda, Masayuki Yamanaka, Masaomi Tanaka, Miho Kawabata, Takashi Moriya, S. Koji Kawabata, Nozomu Tominaga, et al., Calcium-rich transient SN 2019ehk in a star-forming environment: Yet another candidate for a precursor of a double neutron-star binary, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 912, 30, 2021

他 16 名 (うち公募研究 9 名、本領域雇用の研究員を含む)

**研究項目 C01 重力波天文学で解き明かす超新星爆発の物理** 総計 73 件 (査読有 73 件、査読無 0 件)

**C01-1 (計画・固武)** 計 53 件 (査読有 53 件、査読無 0 件)

1. \*Kanji Mori, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Shunsaku Horiuchi, Shock revival in core-collapse supernovae assisted by heavy axionlike particles, *Physical Review D*, 査読有, 105, 063009, 2022

**C01-2 (計画・神田)** 計 35 件 (査読有 35 件、査読無 0 件)

1. \*Mei Takeda, Yuta Hiranuma, Nobuyuki Kanda, Kei Kotake, Takami Kuroda, Ryo Negishi, Ken-ichi Oohara, Kazuki Sakai, Yusuke Sakai, Takahiro Sawada, Hirota Takahashi, Satoshi Tsuchida, Yukinobu Watanabe, Takaaki Yokozawa, 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

**C01-3 (計画・滝脇)** 計 30 件 (査読有 30 件、査読無 0 件)

1. \*Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, 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

**C01-4 (計画・端山)** 計 34 件 (査読有 34 件、査読無 0 件)

1. \*Chan Man Leong, Kazuhiro Hayama, Estimate of the detectability of the circular polarization signature of supernova gravitational waves using the Stokes parameters, *Physical Review D*, 査読有, 103, 103024, 2021

C01 (計画・公募・中村) 計 10 件 (査読有 10 件、査読無 0 件)

1. \*Ko Nakamura, Three-dimensional supernova simulation of SN 1987A progenitor with implications for multi-messenger signals, EPJ Web of Conferences, 査読有, EPJ Web of Conferences 260, 11020, 2022

C01 (公募・祖谷) 計 11 件 (査読有 11 件、査読無 0 件)

1. \*Hajime Sotani, Hajime Togashi, Neutron star mass formula with nuclear saturation parameters, Physical Review D, 査読有, 105, 063010, 2022

C01 (公募・河原) 計 3 件 (査読有 3 件、査読無 0 件)

1. \*Hajime Kawahara, Kento Masuda, Transiting Planets Near the Snow Line from Kepler. I. Catalog, The Astrophysical Journal, 査読有, 157, 218, 2019

他 7 名 (本領域雇用の研究員を含む)

**研究項目 C02 Studying supernova explosions via their neutrino emissions** 総計 72 件 (査読有 72 件、査読無 0 件)

C02-1 (計画・ヴァギンズ、小汐) 計 9 件 (査読有 9 件、査読無 0 件)

1. K. Abe, et al., First gadolinium loading to Super-Kamiokande, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 査読有, 1027, 166248, 2022
2. K. Abe, et al., Search for Neutrinos in Coincidence with Gravitational Wave Events from the LIGO-Virgo O3a Observing Run with Super-Kamiokande Detector, The Astrophysical Journal, 査読有, 918, 78, 2021
3. LI Marti., et al., Evaluation of gadolinium's action on water Cherenkov detector systems with EGADS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 査読有, 959, 163549, 2020
4. C. Simpson, et al., Sensitivity of Super-Kamiokande with Gadolinium to Low Energy Antineutrinos from Pre-supernova Emission, The Astrophysical Journal, 査読有, 885, 2, 2019
5. K. Abe, et al., Search for Neutrinos in Super-Kamiokande Associated with the GW170817 Neutron-star Merger, The Astrophysical Journal, 査読有, 857, L4, 2018

C02-2 (計画・住吉、松古、原田) 計 37 件 (査読有 37 件、査読無 0 件)

1. Akira Harada, Hiroki Nagakura, Wakana Iwakami, Hirotsada Okawa, Shun Furusawa, Kohsuke Sumiyoshi, Hideo Matsufuru, Shoichi Yamada, The Boltzmann-radiation-hydrodynamics simulations of core-collapse supernovae with different equations of state: the role of the nuclear composition and the behavior of neutrinos, The Astrophysical Journal, 査読有, 902, 150, 2020
2. Yudai Suwa, Kohsuke Sumiyoshi, Ken' ichiro Nakazato, Yasufumi Takahira, Yusuke Koshio, Masamitsu Mori, Roger Wendell, Observing supernova neutrino light curves with Super-Kamiokande: expected event number over ten seconds, The Astrophysical Journal, 査読有, 881, 139, 2019
3. Hiroki Nagakura, Walama Iwakami, Shun Furusawa, Hirotsada Okawa, Akira Harada, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada, Hideo Matsufuru, Akira Imakura, Simulations of Core-collapse Supernovae in Spatial Axisymmetry with Full Boltzmann Neutrino Transport, The Astrophysical Journal, 査読有, 854, 136, 2018
4. Shunsaku Horiuchi, Kohsuke Sumiyoshi, Ko Nakamura, Tobias Fischer, Alex Summa, Tomoya Takiwaki, Hans-Thomas Janka, Kei Kotake, Diffuse supernova neutrino background from extensive core-collapse simulations of 8-100Msun progenitors, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 475, 1363-1374, 2018

C02 (公募・堀内、安藤、諏訪、古澤、富樫、安武) 計 26 件 (査読有 26 件、査読無 0 件)

他 10 名

<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、S G C 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

他 7 件

<雑誌等>

田中雅臣、中性子星合体のマルチメッセンジャー観測、パリティ 2019 年 1 月号、2019 年 1 月

田中貴浩、重力波がもたらす新しい物理学と天文学、数理科学 2018 年 12 月号、2018 年 12 月

吉田道利、重力波源の電磁波追跡観測—その意義、天文月報 2018 年 2 月号、2018 年 1 月

須山輝明、田中貴浩、横山修一郎、LIGO で検出された重力波は原始ブラックホールから？、日本物理学会誌、2017 年 10 月

他 14 件

<新聞等>

A01、アインシュタイン ノーベル賞受賞から 100 年、読売新聞、2021 年 8 月 13 日

C02、スーパーカミオカンデタンク公開、日経新聞、2018 年 9 月 16 日

B03、国立天文台：重力波天体が放つ光を初観測—日本の望遠鏡群が捉えた重元素の誕生の現場—

[https://subarutelescope.org/Pressrelease/2017/10/16/j\\_index.html](https://subarutelescope.org/Pressrelease/2017/10/16/j_index.html)、新聞掲載計 131 件、2017 年 10 月 16 日

他 19 件

### 〈主催シンポジウム等〉

- ・領域全体, Symposium on Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, Kyoto Univ. and online, 2022/04/25-29
- ・領域全体, Area workshop 2022 Winter, Kyoto Univ. and online, 2022/01/24
- ・A01-A02-A03, Group A camp, Kyoto Univ. and online, 2022/01/23-24
- ・領域全体, 30th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan: JGRG30, online, 2021/12/6-10
- ・C01-C02, Probe into core-collapse Supernovae via Gravitational-Wave and neutrino signals, online, 2021/12/1-2
- ・領域全体, Multi-messenger Astrophysics of Explosive Transients -Area workshop 2021 Autumn-, online, 2021/10/14
- ・領域全体, Fourth Annual Area Symposium, online, 2021/02/22-24
- ・A01-A02-A03, Group A camp, online, 2021/02/6-7
- ・領域全体, ONLINE Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, online, 2020/11/23-27
- ・領域全体, Third Annual Area Symposium, Konan University, 2020/02/10-12
- ・A01-A02-A03, Group A camp, Biwako Club, 2020/01/12-13
- ・領域全体, Area Workshop 2020 Winter, Biwako Club, 2020/01/11
- ・領域全体, 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan: JGRG29, Kobe Univ., 2019/11/25-29
- ・領域全体, Area Workshop 2019 Autumn, Fukuoka University, 2019/10/24
- ・C01-C02, 4M-COCOS: Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae, Fukuoka University, 2019/10/21-23
- ・領域全体, Area workshop 2019 Early Summer, Osaka City University, 2019/06/29
- ・領域全体, China-Japan HinOTORI: First Collaboration Meeting, NAOC, Beijing, China, 2019/03/28-29
- ・領域全体, Area workshop 2019 Winter, Nagaoka University of Technology, 2019/02/19
- ・A01-A02-A03, Group A camp, Nagaoka University of Technology, 2019/02/18-19
- ・領域全体, 2019 YITP Asian-Pacific Winter School and Workshop on Gravitation and Cosmology, YITP, Kyoto University, 2019/02/11-15
- ・領域全体, Second Annual Area Symposium, YITP in Kyoto Univ., 2018/11/26-28
- ・領域全体, 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan: JGRG28, Rikkyo University, 2018/11/5-9
- ・領域全体, Area workshop 2018 Autumn, Toyama International conference center, 2018/10/10
- ・C01-C02, Deciphering multi-Dimensional nature of core-collapse SN via GW and neutrino signature(SNeGWv2018), Toyama International conference center, 2018/10/8-10
- ・領域全体, Area Workshop 2018 Early Summer, TITECH, 2018/06/07
- ・A01-B01-C01, 01 Discussion Meeting on GW data analysis, Biwako club, 2018/06/02-03
- ・領域全体, Annual Area Symposium, Kashiwa campus of the Univ. of Tokyo, 2018/03/05-07
- ・領域全体, YKIS2018a Symposium: General Relativity - The Next Generation -, YITP, Kyoto Univ., 2018/02/19-23
- ・領域全体, Gravity and Cosmology 2018, YITP, Kyoto Univ., 2018/01/29-3/09
- ・A01-A02-A03, Group A boot camp, 2017/12/08-09
- ・領域全体, Area Workshop 2017 Autumn, Tohoku Univ., 2017/12/7
- ・領域全体, 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, JGRG27, Hiroshima, 2017/11/27-12/1
- ・領域全体, KICKOFF workshop, Kyoto Univ., 2017/09/22-23

他 9 件

### 〈アウトリーチ活動〉

- ・領域主催市民講演会第4回, オンライン, 2022/4/16  
滝脇知也(国立天文台・准教授) “超新星爆発からの重力波、検出への期待”
- ・領域主催市民講演会第3回, オンライン, 2021/4/3  
細川隆史(京都大学・准教授) “重力波を探るブラックホールの起源”  
田中貴浩(京都大学・教授) “一般相対論から重力波物理学への道のり”
- ・領域主催市民講演会第2回, 新潟県長岡市, 2019/2/17  
内瀧那美(新潟大学・研究員) “ブラックホールからのこだま?! ~重力波で探るブラックホール~”  
細川隆史(京都大学・准教授) “重力波で探る宇宙最初の星とブラックホール”
- ・領域主催市民講演会第1回, 京都府京都市, 2018/12/9  
田中雅臣(東北大学・准教授) “ついに「見えた」重力波天体”

他 106 件

## 8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

全体像が俯瞰できるように、領域シンポジウムを毎年開催するとともに、A, B, Cでの各班は領域ワークショップを毎年共同で組織し(R2年度はコロナ禍で延期)、また、重力波データ解析に関わるA01-B01-C1の合同ワークショップを開くなどの連携をとり研究を進めてきた。また、関係する研究会は領域内にホームページなどを通じて周知し、分野を超えた交流を促進してきた。

図1に領域の研究組織図中に以下に示す主な研究組織間の連携を番号で示した。研究協力者、公募研究を含む構成メンバーのリストは本新学術領域ホームページ (<https://gw-genesis.scphys.kyoto-u.ac.jp>) を参照頂きたい。

### <重力波データ解析間での連携>

① A01-B01 中性子星、ブラックホールの潮汐変形率の決定 中性子星の状態方程式を調べる手法を、連星ブラックホールを用いた重力理論検証に応用。

② A01-C01-公募研究 超新星重力波の新しい時間周波数解析法の開発 C01班が実行した超新星3Dシミュレーションから得られた重力波波形に対して、信号抽出法が共同で進められた。

### <A, B, Cの各班内の連携>

③ A01-A02 連星ブラックホールの起源としての原始ブラックホール 原始ブラックホールを起源とするシナリオを中心として執筆したレビュー論文はすでに450件を超える引用がある(Class. Quant. Grav. 35 (2018) 063001)。

④ B01-B03 中性子星合体からの電磁波放射に関する理論研究

網羅的な重元素データを使った輻射輸送シミュレーションが可能となり、数値相対論に基づく放出物質の多次元構造を加味した現実的なキロノバのシミュレーションを行った。その結果、AT2017gfoの光度曲線の解釈を提供し(Kawaguchi et al. 2018, ApJ, 865, L21)、さまざまな質量の中性子星合体に対し、理論予想を与えた(Kawaguchi et al. 2020, ApJ, 889, 171)。

⑤ B02-B03 すばる望遠鏡によるGW170817の観測 ガンマ線バーストなどの電磁波対応天体についての理論的知識を提供することで貢献した(Tominaga et al. 2018)。

### X線・ガンマ線衛星の再解析データの共有と可視近赤外搜索データの即時確認

突発天体探査紫外線衛星の設計 B02を中心として進める重力波天体からの超初期紫外線放射を捉えるための広視野紫外線衛星の設計において、B03のメンバーが要求性能の定義や、設計に関して連携した。

⑥ C01-C02 超新星の数値シミュレーションによる爆発メカニズム解明 観測シグナルから物理現象を引き出すための連動した研究を進めている。また、超新星背景ニュートリノの予測を行い、中性子星ではなくブラックホールが形成される割合を観測から導く手法を提案した。

### <その他の連携>

⑦ B03-C02 超新星爆発シミュレーションで用いられているボルツマン輻射輸送コードによる、連星中性子星合体シミュレーションで用いられているモーメント法に基づく近似的な輻射輸送計算のキャリブレーション。

⑧ B03-C01 USSNeの理論的研究。

⑨ A03(公募研究)-B02 BH形成に伴うトランジェント現象の観測可能性の検討

○ B03-公募研究 J-GEMネットワークの機能強化

○ B03-公募 Tomo-e Gozenカメラと輻射輸送計算(公募研究 前田啓一)との連携に基づいた京都大学せいめい望遠鏡による変動天体観測体制の構築

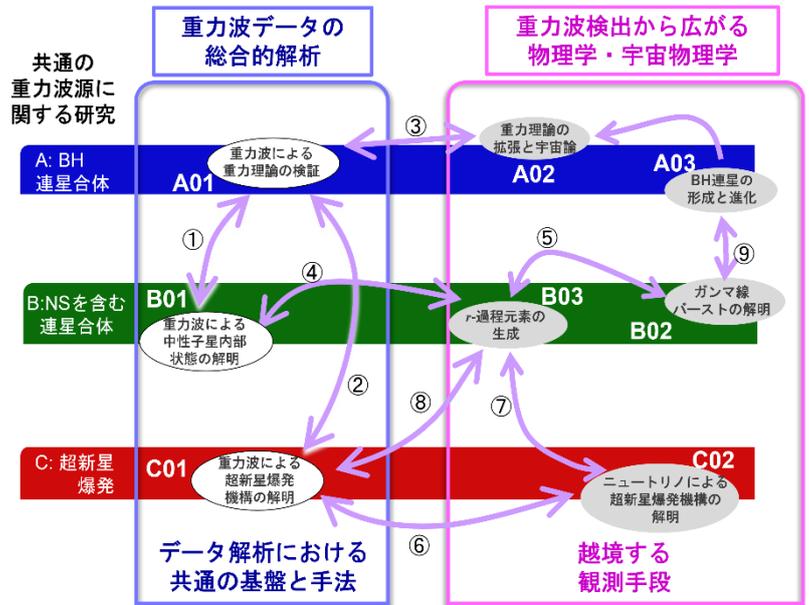


図1：研究組織図

## 9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

**総括班** 総括班会議を通して、派遣や招へい、研究会開催支援などを決定することで研究費の効率的な使用に努めてきた。領域内の連携を深めるために領域ワークショップをシンポジウムと合わせて1年に4回というペースで開催することを当初から計画していたが、これらのワークショップは計画通りに遂行されている。その結果として、計画研究の枠を超えた研究成果も多数挙がっている。KAGRA の LIGO/Virgo との共同観測の準備に関わるコアメンバーとして参加し、LIGO/Virgo とのデータ共有体制の構築や、今後の共同研究に関する情報も（KAGRA 関係者には）十分に共有される体制ができていく。また、中国のチベットのアリ天文台に HinOTORI 望遠鏡が 2018 年 10 月に最初の科学的イメージングデータの取得に成功した。総括班はこれらの活動も支援した。

**計画研究 A01** 理論的な背景を理解した上で、創意工夫を取り入れて重力波データ解析を推進することが求められた。これまで、理論的研究を中心におこなってきた若手研究者を重力波解析にコンバートし研究員として雇用することで新たな人材発掘をおこなってきた。そのような中で、内潟氏は今や重力波データ解析の重要な戦力となっている。山田氏は企業就職となったが、研究員として在籍期間中には、本研究を推進するために鍵となる貢献を果たし、就職後も継続中の研究に関しては意欲をもって取り組んでいる。

一方で、重力波データ解析には大容量のデータを高速で処理する計算機が必要となる。そのような計算機を各自が保有することは困難であるので、共用の計算機を設置し、データや解析プログラム、中間段階の処理済みデータ等を共用することで、計画研究全体として効率的に解析が進められるように整備を進めてきた。インフラの整備に関しては、シニアスタッフが中心となり、若手の負担が増えないようにつとめた。

**計画研究 A02** 新型コロナウイルスの感染拡大により、当初予定していた海外の研究者の招聘や海外での共同研究が遂行不可能になったため、博士研究員の採用のための人件費を拡充した。また、研究費の繰越もした。招聘のためのビザの発給がされない時期が続いたが、その期間にも（一部の時期を除き）雇用のためのビザは発給されたので、海外から優秀な若手研究者を採用できて研究費を効果的に使用できた。また、分担者が代表者の所属する京都大学基礎物理学研究所に長期出張をすることで、実効的に予算を活用している。実際、滞在中に修正重力理論に関する新しい共同研究をスタートし、その成果が得られつつある（現在1編の学術論文を投稿中である）。また、新型コロナウイルスの感染状況が芳しくない時期でも自宅等で大学院生（研究補助）が計算等を継続できるよう、ノート型 PC を購入したことで、ほぼ遅滞なく研究が遂行できた。また、オンライン会議やオンライン研究打ち合わせのための設備等を整備するため、物品購入の予算も拡充した。日本の相対論分野の最も主要な会議である JGRG についても中心となってサポートしてきた。

**計画研究 A03** 経費の主要部分は毎年3名の若手研究者雇用に使用した。それ以外にも、以前から毎年開催されている宇宙初期の星形成に関する「初代星・初代銀河研究会」を後援し、特にこの科研費期間中は重力波関係の招待講演者を積極的に呼ぶことで、分野間の交流を促すことに役立った。

**計画研究 B01** 本研究課題遂行のため、研究員として東京大学宇宙線研究所で3名、東大ビックバン宇宙国際研究センターで1名の合計4名を雇用した。研究員はデータ解析の研究に従事し、連星中性子星合体からの重力波の解析や KAGRA の共同観測データの解析などを行い重要な貢献をした。4名のうち3名は若手研究者であり、若手研究者育成にも寄与した。また B01 班では、コア数約 400 コア、ストレージ 100TB の計算機クラスタを導入し、本研究課題の多くの研究で利用された。

**計画研究 B02** ポスドク研究員を4機関で雇用し、X線・ $\gamma$ 線観測ミッションの観測運用・データ解析、および理論研究を効率的に進めた。物品では、高性能計算機およびデータ保存装置を各機関で購入し、

MAXI、CALET、Fermi 等のデータからの速報用パイプライン、オフラインでの詳細解析、公開データ作成等のために稼働させている。さらに、次世代 X 線 $\gamma$ 線観測装置のためのセンサー開発、突発天体観測用衛星システム検討などにも支出した。

また、研究成果の発表のために、国内外の研究会出席に旅費を使用した。研究期間の終わりには、海外からも研究者を招聘し、MAXI の成果をとりまとめるための国際会議を計画していたが、新型コロナウイルス感染症蔓延のために、実施は繰越となっている。

**計画研究 B03** 物品費に 6069 万円、旅費に 874 万円、ポスドク人件費に 7315 万円、その他に 1506 万円を使用した。物品費の主な用途は、観測データ解析のための計算機（総額 2840 万円）、データサーバ（総額 350 万円）、シミュレーション計算機（136 万円）、観測装置開発費（1061 万円）となっている。また、ポスドク研究者 4 名を雇用した。観測データサーバと観測データ解析計算機は、すばる HSC データの迅速な解析と、Tomo-e Gozen のデータ解析と保管のために使われ、それぞれの膨大なデータを効率よく解析して変動天体を素早く検出する能力の向上を諮ることができ、重力波定常観測第三期（03）の追跡観測の重要な基盤となった。観測装置開発費は、Tomo-e Gozen、なゆた望遠鏡観測装置、かなた望遠鏡観測装置、HinOTORI 望遠鏡などの開発・整備のために使用され、それぞれの観測装置・望遠鏡を改修あるいは完成させることができた。こうして整備した観測装置群で、03 の追跡観測を行った。シミュレーション計算機は、小規模なワークステーションで、本格的なスーパーコンピューターでのシミュレーションの下準備やコード開発、データの整理などに使用した。ポスドク研究者 4 名は、いずれも重力波追跡観測を主たる業務とし、観測ネットワークの構築と統率、観測装置開発、データ解析ソフト開発、観測実施などに活躍し、計画研究の推進の要となった。

**計画研究 C01** 本計画研究の主要なテーマである超新星重力波の検出と波形解析という課題のために、1 年目に専用のクラスタ計算機（東大）を導入した。この計算機は C01 が主導して LIGO と国際共同研究で開発を進めている、ストークスパラメータを用いた世界初の全天探査パイプラインに用いる。計算機の実際の構築は、ポスドク（2 年目より雇用、外国人若手）が中心となって進められた。また近く実現する観測に備えて A01、B01、KAGRA と連携して、世界の観測データへの効率的なデータアクセスと、共同利用を前提とした運用体制を整備した。

**計画研究 C02** 多くの割合が計算機資源の確保に使われた。これには 2 つの基本的な形態があった。

1) 実験面では、EGADS とスーパーカミオカンデのリアルタイムデータ処理能力を向上させるため、より強力なオンラインコンピュータ（一連の POWERWULF™ ZXR1 CLUSTER 計算エンジン）が購入された。両検出器のガドリニウム搭載と相まって、オンライン計算能力の向上は、検出効率の改善（19%→50%）、および、データ処理の高速化をもたらし、超新星の可能性を示す信号に対する警報応答時間の短縮（10 分以上→10 秒）を可能にした。

2) 理論面では、「京」でコア崩壊型超新星の爆発シミュレーションを行う時間が確保された。さらに、異なるスケールでの理論計算研究を可能にするために、大容量のディスクストレージなどのローカルな計算資源を増強し開発環境を整備した。

最後に、10%程度を、SK と EGADS がガドリニウムを積んだ世界有数の超新星ニュートリノ検出器として正常に動作するために必要な神岡の様々な水のろ過設備の購入とそのメンテナンスに使用した。

繰越予算について

繰越がある研究課題は、B03 以外すべての計画研究と総括班であり、合計 108,095,344 円である。主な使途の内訳は研究員の雇用が 6 件（うち 1 件はプログラムマネージャー）、計算設備増強 3 件、出張および招へい旅費複数件である。

## 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各段の発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

「②当該領域の各段の発展・飛躍的な展開を目指すもの」を選択した。

### 重力波天文学の創成

人類初の中性子星合体からの可視赤外線放射を検出し、その強度変化を2週間に渡って追跡することに成功した。そのデータから、中性子星合体において中性子が豊富なガスが高速で放出され、その中で中性子捕獲反応が進行し、不安定な重い原子核の崩壊に伴う熱で可視光赤外線で輝く「キロノバ」が実現していることが明らかとなった。そして、詳細な輻射輸送シミュレーションによって、このキロノバの中で、金やプラチナなどを含む  $r$ -過程元素が合成されている証拠を掴んだ。これは全く新たな研究分野を拓く成果であり、その後、膨大な数の関連研究がなされることとなった。中性子星合体の現実的な輻射輸送シミュレーションのために網羅的な重元素データを構築し、全元素の性質を取り入れたキロノバの計算を可能にした。このデータは重元素プラズマの基礎的なデータでもあるため、核融合科学研究所の原子分子データベースに貢献している。

また、MAXI、Fermi、Swift、Chandra を用いた GW170817 の紫外線、X線、 $\gamma$ 線による電磁波対応天体の発生直後から数年後にわたる観測と、その理論的解析により、連星中性子星合体现象における重元素生成と相対論的ジェット形成に関して重要な知見を得ることができた。

重力波が、物理学・天文学を牽引する手段として広く注目されていることは間違いない。理科年表には新たに重力波の項目が追加され、執筆を田中、および、真貝が担当した。また、Progress of Theoretical and Experimental Physics にレビュー論文を依頼され、本領域全般を包括するレビューを執筆、PTEP の Editor's choice に選定された。

### 重力波データ解析の強化

KAGRA/LIGO/Virgo のデータを用いた重力波観測を行うことも主要な研究目標であった。KAGRA は2020年4月に、ドイツにあるレーザー干渉計重力波検出装置 GEO600 との共同観測を行なった。この観測は LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) Collaboration の枠組みの共同観測として行われたものであり、その観測データは3つのコラボレーションで共有され、従ってデータ解析も共同で行われた。データ解析を行うために解析チームが LVK Collaboration 内に結成された。メンバーとしては LVK から20名程度参加したが、それには B01 班からは代表者の田越、分担者の Kipp Cannon、研究員(研究協力者)の上野、内潟、成川、譲原、C01 班からは分担者の端山、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。これらの解析は、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重要な結果となった(PTEP2022, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac073>)。

加えて本領域では、研究員雇用や公募研究の募集を通じて他分野からの重力波データ解析への進出を積極的に促した。電子情報通信学会でブースを開き、重力波データ解析の可能性についてもアピールするなどの活動をおこなった。その結果、公募研究として他分野からの新規参入を得た。

### 重力波が拓く物理の新しい展開

全く新しい、世界クラスの検出装置であるガドリニウム搭載スーパーカミオカンデの実現に貢献した。このアップグレードによって、重力波天体形成と密接に関係する超新星背景ニュートリノのみならず、多くの新しい物理学の開拓に役立つ。理論的な発展としては、A02 班が構築した有効場の理論は、宇宙論 background では全ての vector-tensor 理論を普遍的に記述できるため、ダークエネルギー理論を観測から制限するのに有用で、観測と理論を繋ぐ架け橋の役割が期待される。また、本研究領域の期間に重力崩壊型超新星爆発の重力波の理論は飛躍的に発展した。重力は数値シミュレーションを用いて予言されるが、それまで簡単のため多く用いられてきた2次元軸対称の仮定の計算から現実的な空間3次元の計算に完全に刷新された。その他にも当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果は枚挙にいとまがない。

コロナ禍が広がった2020年からは、JGRG webinar を創設した。これは重力波研究に限らず、学生を含む若手を中心に発表と議論の場を設け、発表後に発表者ごとのブレイクアウトルームを設けて1時間以上の議論の時間を持つという新しい取り組みである。この活動は本新学術領域の名前を冠するものではないが、領域代表の田中が起案し、本領域に関わる若手研究者が中心メンバーとして関わってきた。

## 11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和4年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

### 若手育成のための派遣

研究者の海外派遣は143件（うち1週間以上の派遣：98件）である。このうち総括班によって採択し派遣したものは29件であり、うち22件が若手研究者派遣である。若手研究者が計画研究の当初予算配分の枠に縛られずに、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。長期の派遣には滞在レポートを依頼し、HP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、外国の著名な研究者と直接交流する機会を持つためには招聘も有効であるが、領域全体で70件の国外からの招聘実績があった。上記はR2年度、R3年度はコロナのために派遣や招聘に関しては実績を残すことができなかった上での数字である。

### 領域研究会等の開催

領域研究会においては、多くの著名な外国人研究者を講演に招いた。結果、本領域で雇用していた若手研究者と外国人研究者の間にコネクションを作ることができた。研究会において若手研究者の実績は外国人研究者に認められ、実際に雇用されることに繋がった。領域研究会以外にも、重力波研究の若手を育成するために、既に宇宙論やブラックホール物理学分野で若手育成に実績のあるJGRG研究会と連携をとった。コロナ禍以前は、主に海外からの招待講演者の旅費・滞在費と若手参加者の旅費・滞在費を補助した。コロナ禍にあっては、オンライン開催に必要な経費を補助した。また、初代星・初代銀河研究会を毎年開催し、若手の発表と議論の場を設けるとともに、レビュー講演を通じて教育にも努めた。

### 各種観測的研究における人材の育成

可視光・赤外線による観測においては、USSN候補の観測的研究であるNakaoka et al. (2021; PD研究員が主導)など、大学院生やPD研究員が主導した研究を多数発表している。X線・ $\gamma$ 線突発天体の監視と観測装置の健康状態の監視などの運用には、学生とポスドク研究員が中心的な役割を果たし、幅広い観測とデータ解析技術の習得に役立った。また、本研究の一部を学生の学位論文の課題とし、学生の研究業績の形成に役立った。また、データ解析のみならず、検出器や超小型衛星システム開発も行うことにより、天体観測研究のみならず幅広い理工学分野で活躍できる人材育成を行なった。またいくつかの装置での国際協力運用にも若手が参画した。

### 重力波データ解析に関わる人材の育成

周辺の研究分野から重力波解析へのコンバートをおこない、研究員として積極的に採用をした。特に、B01班では、KAGRAとGEOの共同観測データの解析をおこなう役割を果たしたが、その主要なタスクに若手研究者を割り当て、責任を果たしてもらったことで、若手研究者の育成に努めた。具体的には、連星中性子星合体探索を研究員の上野、KAGRAとGEOデータのノイズ特性評価、および、KAGRAの観測データを一般公開するためのタスクを内潟、成川が担当した。内潟は理論研究を行っていたが、本領域で初めてA01班の研究員として採用し、重力波データ解析を学び、B01班に移り活躍した。A01班ではグループミーティングを隔週で定期的におこない、若手が取り組むべき課題が見いだせるように議論を重ね、若手研究者が各テーマのリーダーとして解析を行った。

### 理論研究における人材の育成

すべての方面において、若手研究者が論文発表、国際会議発表などで業績を積むことができるよう配慮した。また若手研究員がいることで学生が色々学べる機会が多くなるという効果もあった。A02班の博士研究員の雇用経費は1名分だが、5名の優秀な若手研究者を雇用し、1名が国内の大学の准教授に就任、1名は学術振興会外国人特別研究員に就任、1名は国内の特定助教に採用が決定、1名は海外の博士研究員に採用が決定した。残りの1名は現在雇用中である。A03では、3名の若手研究者雇用枠を確保し育成に努めた。彼らはこのプロジェクトにおいて多大な成果をあげ、それにより常勤職を含むより待遇のよいポジションに転出している。次のポストを比較的容易にみつけることができたのは、採用した人材が優秀であっただけでなく、代表者や分担者との共同研究を通じて十分な育成ができたことによる。

全体として若手領域メンバーから18件の昇格人事があった。

## 12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### 大橋正健氏（東京大学宇宙船線研究所教授）：A01-B01-C01

**A01:** これまでにBH連星合体からの重力波はLIGOとVirgoの観測で約90イベントが検出されている。これらの観測データを用いて、ブラックホール時空の解析さらには重力理論の検証を行おうとしており、実際に、実データを使ったいくつかの研究成果の発表に至っている。特に、スカラー・テンソル理論に関する研究や、ブラックホール準固有振動の同定の手法の比較を論文にまとめる等、活発な活動を行っている。さらに、初期宇宙起源のブラックホールの質量の分布に対する研究や重力波伝播に対する制限の研究などの理論的研究でも成果をあげている。

**B01:** KAGRAデータ解析について、まず、探索パイプラインの技術的問題点の洗い出しや実際のKAGRAデータの解析テストを行った。また、パラメータ推定パイプラインについても研究を行っている。特筆すべきことは、KAGRAとして最初となる、GEO600との共同観測データをもちいて近傍で発生したガンマ線バースト（マグネターの可能性が高い）に付随する重力波の解析を行ったことで、これを論文としてまとめたことは高く評価できる。

**C01:** 今後の近傍での超新星爆発に備え、それを起源とする重力波の探索に必要な研究を進めている。具体的には、超新星重力波に円偏光成分を発見したこと、超新星重力波とニュートリノの同時観測における物理的特徴の指摘と超新星重力波解析法の構築、およびブラックホール形成を伴う大質量星の一般相対論的3Dシミュレーションへの着手である。これらの成果は、レター論文として発表されており、着実に科学的インパクトのある成果を創出している。したがって、今後の発展も十分に期待できる。

### 横山順一氏（東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター教授）：A01-A02-A03

本研究計画は、連星ブラックホールの形成機構に関してさまざまな側面から研究を遂行すると同時に、この信号がもたらす基礎物理法則へのインパクト、すなわち一般相対論がどこまで正しいか、換言すると拡張重力理論特有の信号にどこまでの制限が課されるかを精査し、それぞれにおいて成果を挙げた。

まず、A03班は連星ブラックホールの形成過程として、孤立した環境での連星形成と単独星から生成したブラックホールが星団中の相互作用によって連星となる場合の双方について網羅的な解析をし、双方の基礎過程を明らかにすることに成功したことは高く評価できる。その質量分布関数についても今後の観測的検証に堪えうるような結果が得られた。

A01班の新理論探索のための重力波データ解析の研究については、LVKのこうしたデータ解析が真に基礎理論に根ざしたものではない点に着目し、個別のもっともらしい拡張理論を直接解析する手法の開発を行った。こうしたアプローチは一般相対論を越える重力理論の深い理解があってはじめて可能になるものであり、A02班との協力も相俟って日本が独自性を発揮できた研究成果であったといえる。なお、A02班の行った理論研究は、重力波物理学の範疇に入らないものも少なくなかったが、非常に多くの論文を発表しており、今後世界をあっ、と言わせるような圧倒的な研究成果に結実して欲しい。

A01-A03班を通じて多くの若手研究者を雇用したが、その分優秀な人材の確保に苦労した側面もあり、本研究計画の終了後のキャリアパスを描くことが必ずしも容易でなかった点は否めない。若手研究者の安定雇用はわが国の科学が健全な発展をする上で喫緊の課題であり、これは本研究計画の評価とは別に解決されなければならない問題である。

### 大橋隆哉氏（東京都立大学学長）、土居守氏（東京大学天文学教育研究センター教授）：B01-B02-B03

B班はブラックホールや中性子星を含む連星系の形成と合体の研究を中心とする。研究開始直後に大変近距離に中性子星合体现象（重力波源GW170817）が発生、当初の期待を大きく上回る成果を得た。以後は重力波源の電磁波による検出は世界的にもなされなかったが、04に向けた準備や理論的研究が進展した。以下各班の評価を記す。

**B01:** 2020年4月のKAGRA-GEO600共同観測において、KAGRA/LIGO/Virgo Collaborationがデータ解析を進める上で、本研究グループが中心となって活動した。感度の点から重力波イベントが検出されなかったことは止むを得ないが、今後の国際チームによる重力波観測へ向けて日本が役割を担っていること

が示された。また、連星中性子星合体が出す重力波の詳細な波形モデルを作り、潮汐変形率を制限できることを示した点も評価される。

**B02:** 中性子星合体イベント GW170817 に対し、MAXI を含む X 線、ガンマ線、紫外線観測をもとに、キロノバ放射の解明、ガンマ線放射モデルの提唱、残光の理論モデルの構築など優れた成果をあげた。電磁波が観測された GW170817 では、MAXI は世界で最も早く X 線の上限値をもたらした。他天体に対しても MAXI 関係では、ブラックホール連星を含む X 線ノバの発見、7 年間のデータに基づく X 線源カタログの作成、NICER による自動追観測システムの開発など着々と成果を上げた。高速電波バースト (FRB)、ガンマ線バースト (GRB) 等についての研究も並行して成果をあげており、全体としては、GW170817 のおかげで当初の成果をほぼ達成したと言える。ハンガリーと共同の CAMELOT 計画によるガンマ線バースト観測超小型衛星の打ち上げなど、国際協力の面でも精力的に研究を進めた。

**B03:** GW170817 を多くの望遠鏡から光学・赤外線観測を行い、キロノバにより  $r$ -過程元素が合成されることをはじめて明らかにしたことは高く評価される。木曾観測所、西播磨「なゆた望遠鏡」、広島「かなた望遠鏡」、チベット HinOTORI 望遠鏡などの観測システムを整備し、03 で追跡観測を実施したことは今後につながる結果である。理論的には詳細な数値相対論シミュレーションを行い GW170817 において  $r$ -過程元素が合成されていることを示した。また  $r$ -過程元素の原子構造計算を行って吸収係数を求めるなど、理論モデルもさらに発展させた。公募研究でも、電子捕獲型超新星の候補発見、銀河内の  $r$ -過程元素の起源の解明などよい成果をあげた。全体として当初設定した目標をほぼ達成したと評価できる。

### 総括班と領域全体

毎年の領域シンポジウムと年 4 回の領域ワークショップの開催、領域内の研究連携促進、さらには国際協力による重力波共同観測体制の整備など、コロナウイルスによる制限がある中でよく活動したと評価される。今後も日本が、KAGRA をはじめとするさまざまな手段による観測と理論研究を併せて、重力波物理学・天文学を国際的にリードしていくための基盤を作ることができたと考えられる。

### 鈴木英之氏 (東京理科大学教授): C01-C02

重力崩壊型超新星爆発に伴う重力波放出を扱う計画研究 C01 に関しては、さまざまな視点に着目した大規模な 3 次元数値シミュレーションを実行している。その際、他の研究グループとの計算コード比較やニュートリノ反応率の精密化などに加え、燃焼殻の非球対称性を考慮した初期モデルの構築など、計算結果の信頼性を高め、爆発機構の解明に迫る研究を進めてきた。重力波のデータ解析を行う実験系研究者と超新星シミュレーションを行う理論系研究者の間でしっかり連携もとれており、新学術領域研究課題として適切に実施されたと言える。また、大質量星のブラックホール形成過程を一般相対論的 3 次元数値シミュレーションによって詳しく調べ始めた点など、今後の発展に大きな魅力を感じる。一方、超新星ニュートリノをテーマの中心とする計画研究 C02 に関しては、Super-Kamiokande (SK) にガドリニウム (Gd) を加えた SK-Gd 実験が順調に始まり、超新星ニュートリノの観測精度が向上した。現在も Gd が追加されつつあり、近い将来、世界初の超新星背景ニュートリノの観測が期待される。また理論系研究者と実験系研究者が nuLC コラボレーションとして協力関係を築き、近傍超新星が起こった場合のニュートリノ観測から、誕生した中性子星の情報を引き出す手法などに関する共同研究を発展させたことは素晴らしいことである。ニュートリノに対するボルツマン方程式を直接差分して数値シミュレーションを行う世界最先端の研究プロジェクトも、ニュートリノ振動の Fast mode に影響するニュートリノ角度分布の非対称性の研究など着実に進んでいる。

また、C01, C02 に関連した 10 件の公募研究の中にも、計画研究のメンバーと密接に連携が図られたものも多く、新学術領域としてうまく機能していたと評価できる。