

領域略称名：重力波創世記
領域番号：2905

令和元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）」
に係る中間評価報告書

「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

令和元年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

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	7
2. 研究の進展状況	9
3. 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	12
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	13
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	16
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	21
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	23
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	24
9. 総括班評価者による評価	25
10. 今後の研究領域の推進方策	27

研究組織 (総：総括班, 計：総括班以外の計画研究, 公：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
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	4
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・計画研究 計9件					
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・総合理工学研究科・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	東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教	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	名古屋大学・基礎理論研究センター・特任助教	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	国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・研究員	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 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 ～ 令和元年度	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・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现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・光赤外研究部・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 渉	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	国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・基礎科学特別研究員	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	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・基礎科学特別研究員	1
公募研究 計 29 件					

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募研究領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

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)の流れを力強く押し進め、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 は2019年から本格観測段階に入る予定である。その後程なく、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予定である。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る。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る。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いる(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がある。

【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っている。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る。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る(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(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ている。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。現実には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える。

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発展と世界的な成果が期待できるものと考ええる。**

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・還元できるものにするに繋がる。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。

2. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する〕（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

計画研究 A01 重力波データ解析による重力理論の検証

〈当初の設定目標・研究期間内にどこまで明らかにするか〉 研究の目標は、重力の標準理論である一般相対論を越えた拡張重力理論に対する重力波波形の理論予測にもとづき、重力波データから新しい制限を導出することである。

〈現在までの進展〉 BH 連星合体からの重力波は 2018 年までの観測で 10 のイベントが検出されている。連星合体からの重力波波形は一部の不定性を除き理論的に予測でき、重力理論の検証が可能である。このような着想のもと、拡張重力理論における重力波波形を予測し重力波データを解析することで、一般相対論からのずれの検出、あるいは、重力理論に対する制限を得るという研究を隔週のミーティングを持ちながら進めている。本研究が始まるまではこのような野心的なデータ解析を日本で組織することはなされていなかった。本領域の最初の 2 年間で解析のための計算機の導入、基本的な解析ツールの開発を終えて、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。先行する LIGO/Virgo の解析では具体的なモデルに依存しない解析が中心に進められている。我々は、重力波データからより多くの情報を引き出すことを目指し、理論的に整合性があるが、モデルに依存しない解析では見落とされるものを綿密に精査することを目指している。具体的には、スカラーテンソル理論で、パルサー観測による制限を回避する小さな質量を持ったスカラー場の理論に対する制限、ブラックホールのホライズン境界条件が修正を受けている可能性を示唆するブラックホールエコーの再解析などをおこなった。加えて、ブラックホールが一般相対論で記述できていることを決定的なものとするブラックホール準固有振動の同定の手法の優劣を、5 つの異なる解析手法を比較するという形で論文にまとめた。

さらに、基礎となる理論的な研究としては、現在では標準的となっている田中らが提案した初期宇宙起源のブラックホール連星形成のシナリオに関して、質量の分布に対する新たな予言を与える研究、研究協力者である西澤らによる、GW170814 イベントを用いた重力波伝播に対する制限の研究などの成果を挙げている。

計画研究 A02 重力波物理学・天文学における重力理論研究の新展開

〈当初の設定目標・研究期間内にどこまで明らかにするか〉 研究の目標は、重力理論の検証に向け、天文学的・宇宙論的観点からの重力波の研究を総合的に推進するものである。人類が重力波という新しい観測手段を得た今、重力理論の検証に向け、天文学的・宇宙論的観点からの重力波の研究を推進すべきである。近年、重力理論はこれまでにない広い枠組みの中で理解されるようになってきており、新しい重力現象を、理論側から提唱できる可能性が高まっている。そこで、重力波観測が重力理論の発展を促す可能性、そして理論予言がさらなる実験の発展の動機付けとなる可能性を追求するべく、研究を推進してきた。

〈現在までの進展〉 実際、2017 年 10 月に発表された GW170817 の観測結果により、本計画研究には大きな進展があった。例えば、アインシュタイン・エーテル理論について GW170817 を含む様々な観測や理論的整合性からの制限を総合的に精査したり、重力波観測から得られた制限を満たすようなものだけに絞ってスカラーテンソル理論の様々な側面（相対論的天体の構造、許されるパリティ対称性の破れ方、大規模構造の観測から得られる相補的制限など）を調べることができた。また、Chern-Simons 修正重力理論における遅い自転をする弱場天体での逐次解の構成法を開発して GPB 実験からのモデルパラメータへの制限を付ける研究や、暗黒物質がコヒーレントなスカラー場である仮説を将来の重力波干渉計を用いて検証する方法の研究などは、理論予言から実験の発展を促す可能性を追求するものである。さらに、階層的 3 体系における重力波の影響を解析し、パルサーの近星点移動曲線に古在・リドフ振動に伴う屈折が現れることを示すなど、新しい物理現象を指摘することもできた。

計画研究 A03 ブラックホール連星形成過程の理論的研究

〈当初の設定目標・研究期間内にどこまで明らかにするか〉 重力波源天体であるブラックホール (BH) 連星の起源を、数値シミュレーションを中心とした理論的研究により解明する。特に I) 孤立環境での大質量星同士の連星形成、II) 高密度星団での捕獲による連星形成、各々からの BH 連星形成シナリオの当否を以下の研究を実行して明らかにする。

①孤立大質量連星形成: 磁気散逸を考慮した 3 次元輻射磁気流体数値シミュレーションにより、宇宙初期に特有な低金属量環境において形成されうる大質量連星の統計的性質を解明する。

②大質量連星の BH 連星への進化: 上記①により得られた連星の性質を用いて、低金属量環境において誕生する BH 連星の性質と、その頻度分布を統計的に予言する。

③星団の力学進化： 星団に対する重力多体シミュレーションを①と②で得られる低金属量連星の形成・進化モデルと組み合わせ、星団中で形成される BH 連星の特徴を解明する。

〈現在までの進展〉 これまでの計画研究前半の年度では、主として数値計算コードの開発と整備が予定通りに進展してきた。今後はこれらのコードを用いて、当初計画どおり順次シミュレーションを実行する態勢が整った。特に研究①～③全てについて、進化が重元素量等の各種パラメータにいかにか依存するか大規模かつ系統的な計算が開始されつつある。最終的には、構築したBH連星モデルと飛躍的に増大する重力波観測のデータを比較することで、BH連星形成シナリオの峻別を目指す。

計画研究 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

〈当初の設定目標・研究期間内にどこまで明らかにするか〉 B01 班では、(1)コンパクト連星合体解析コードを開発し KAGRA データの解析を行うこと、(2)中性子星(NS)連星合体、中性子星(NS)-ブラックホール(BH)連星合体の数値相対論計算を行い、高精度の波形モデルの作成を行い、重力波検出器データに適用する、(3)パルサーやマグネターからの重力波の探索を行い、パルサーやマグネターの物理に関する制限を行うことを目指している。

〈現在までの進展〉 KAGRA データ解析の準備に関しては、まず探索パイプラインについては、連星合体重力波解析パイプライン `gstlal` によって KAGRA データを解析するための技術的問題点の洗い出しを行い、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は、ベイジアンパラメータ推定パイプラインを用いて、データ解析を行う準備を行い、その応用として、LIGO によって発見された連星中性子星合体 GW170817 の観測データについて独自の解析を行った。数値相対論については、連星中性子星合体の高精度シミュレーションを数多く実行し、それに基づき、中性子星の潮汐変形率を取り入れた新しい解析的な重力波波形モデルの構築を行った。その波形モデルを LIGO によって発見された連星中性子星合体 GW170817 の観測データに適用して、潮汐変形率への新しい制限を現在行っている。また、連星中性子星合体後に出来る磁場を持つ中性子星のシミュレーションや、連星中性子星合体にもなう物質放出のシミュレーションを行い、合体後の電磁放射について観測を概ね説明することに成功した。パルサーやマグネターについては、連続重力波解析の準備を行い、KAGRA データの解析テストを行った。また、マグネターフレアによる重力波放射に関連する事柄として、マグネター磁気圏に関する研究を行った。

計画研究 B02 高エネルギー観測で探る重力波天体

〈当初の設定目標・研究期間内にどこまで明らかにするか〉 重力波検出器 LIGO/Virgo の速報に直ちに対応して、Swift、MAXI そして CALET のデータを解析し、重力波源に同期した電磁波対応天体の有無についてできる可能な限り早く明らかにする。加えて、天の川銀河を含む近傍宇宙におけるブラックホールの人口統計調査を進める。

〈現在までの進展〉 Swift、MAXI そして CALET とともに人間の手を介さずに自動的にデータを解析するパイプラインを構築した。MAXI においては、重力波イベントの発生した瞬間の観測状況と観測視野を確認して、重力波と同期した X 線放射の有無を調べ、さらに 92 分間の 1 周回で全天スキャンが完了した段階で、誤差領域全体中の新しい X 線源の有無を調べる。また、可視光や紫外線帯での電磁波対応天体探査を目的とする観測システムの開発を進めた。

ブラックホールの統計調査の基礎データベースになるのが、X 線探査によって得られるブラックホールカタログである。そこで、全天 X 線監視装置 MAXI の全データを用いた X 線カタログの作成を進め、完成させた。また、既知の銀河系内の恒星質量ブラックホールは、すべて X 線連星として観測されたものであるが、その大部分はランジェントとして一時的に X 線放射する「X 線新星」である。その頻度や数を調査するために MAXI による X 線全天監視を継続した。

理論的研究としては、連星中性子星合体からの電磁波放射の理論的研究を進めた。また、高速電波バースト (FRB) およびガンマ線バースト (GRB) についての研究を進めている。FRB の理論モデル構築、およびすばる望遠鏡による追観測を目指していたが、双方について着実な進展があり、論文を出版した。

計画研究 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

〈当初の設定目標・研究期間内にどこまで明らかにするか〉 本研究の目的は、最新の重力波望遠鏡 (LIGO、Virgo、KAGRA) による重力波検出に対応して日本の光赤外線観測ネットワーク J-GEM を駆使して即時フォローアップ観測を行い、重力波源の光赤外線対応天体を検出すること、そして、その観測から中性子星合体の元素合成の様子を明らかにすることで、宇宙における r-過程元素の起源を解明することである。

〈現在までの進展〉 平成 29 年度の研究期間開始直後から、J-GEM に含まれるすばる望遠鏡、かなた望遠鏡、なゆた望遠鏡、木曾観測所などにおける観測の実行体制と、迅速なデータ解析体制の整備を行った。

この観測ネットワークによって、平成 29 年 8 月に初めて検出された中性子星合体からの重力波イベント GW170817 に対して追観測を行い、重力波天体の光赤外線対応天体の初観測に成功した。観測された電磁

波放射の性質を、本研究課題による数値相対論シミュレーションと輻射輸送シミュレーションの結果と比較することで、中性子星合体 GW170817 で間違いなく r-過程元素合成が起こり、0.03 太陽質量程度の元素が放出されたことが明らかとなった。これは宇宙における重元素の起源の解明に向けた大きな一歩である。今後の重力波観測によって宇宙における中性子星合体の頻度が明らかになるとともに、電磁波対応天体の観測を積み重ねることで、中性子星合体が常に同様の r-過程元素合成を行っているのかを検証できれば、宇宙の重元素の起源を解明できると考えられる。

計画研究 C01 重力波天文学で解き明かす超新星爆発の物理

<当初の設定目標> 超新星(重力崩壊型)の爆発メカニズム及び重力波放出の物理過程は、積年の研究にも関わらず未だ完全には明らかにされていない。本研究では、スーパーコンピューターを駆使した超新星爆発の数値シミュレーションを行い、爆発時に放射される重力波の放射過程の物理機構を明らかにする。この知見に基づき、超新星を起源とする重力波の検出に向けたデータ解析法・パイプラインを構築し、理論から予測される重力波シグナルの観測可能性を精査する。LIGO、Virgo を始めとする現在稼働中の干渉計に加え、本課題の研究期間中に観測開始する KAGRA において超新星爆発を起源とする重力波の探索を行う。

<現在までの進展・研究期間内にどこまで明らかにするか> 当初の達成目標を果たすため、これまでほぼ研究計画通りに研究テーマを進展させ成果を得てきた。これまで得られた具体的取組と成果のハイライトは、**(1) 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を発見、(2) 超新星重力波とニュートリノの同時観測から探査可能な超新星エンジンの物理的特徴を具体的に指摘・新たな超新星重力波解析法の構築、(3) ブラックホール形成を伴う大質量星の一般相対論的 3D シミュレーションに世界に先駆けて着手したこと**である。これらの成果のほとんどは、レター論文として発表されたものであり、着実に科学的インパクトのある成果を創出できたと考えている。今後は、引き続き超新星シミュレーションコードを改良し重力波の定量的予測をアップデートするとともに、得られた重力波波形を用いながら、現在 LIGO と国際共同研究で開発を進めている全天探査パイプラインを用いて、KAGRA を含む国際重力波観測網から、世界に先駆けて超新星を起源とする重力波の探索を行う計画である。

計画研究 C02 ニュートリノ放出を用いた超新星爆発現象の解明

<当初の設定目標・研究期間内にどこまで明らかにするか> 研究の目標は、理論と実験を連携させて、次の銀河系超新星爆発によって放出されるニュートリノを可能な限り最善の観測をし、爆発メカニズム、前駆天体、核物理に関する情報の抽出を最大化する準備をすることである。これを行うには、世界で最も先進的な超新星数値シミュレーションが必要である。状態方程式やニュートリノ反応などの核物理のデータを使用し、2次元および3次元のシミュレーションにおいて6次元位相空間ボルツマン方程式を解くことによって、超新星ニュートリノの時間分布とエネルギースペクトルの詳細な予測が可能になる。このような複雑な計算モデルを検証するために、我々は本研究期間中にガドリニウム(Gd)添加によりスーパーカミオカンデ(SK)検出器を強化する予定である。これにより、SK は、ナノ秒スケールの時間分解能で個々の超新星ニュートリノ相互作用をリアルタイムでタグ付けおよび識別することが可能になり、世界最先端の超新星ニュートリノ検出器に生まれ変わることになる。その結果、過去に起こった超新星爆発による寄与が積算された超新星背景ニュートリノが初めて観測可能になる。Gd を添加した SK は、超新星ニュートリノデータを30年以上に渡り安定して収集し続けることになるが、これはその最初のデータということになる。

<現在までの進展> 本研究期間の前半に、C02 は理論的および実験的両方の面で大きな進歩を遂げた。理論面では SK でニュートリノ信号を予測するための基本データを作成するため、新しい数値計算モデルが作成され、計算が実行された。実験面では2018年におこなわれたGd添加に向けたSKの大改装は、検出器内部で延べ3000人/日以上を伴う、多大な国際的な取り組みであった。2006年以来、検出器の排水と修理が行われたのは今回が初めてである。主な作業は1) SKタンク内の長期にわたる漏水の修理、2) 検出器の内部の清掃(すなわち、錆除去およびステンレス鋼表面の再不動態化)、3) 前回のメンテナンス以降に故障した光電子増倍管の交換、4) Gdを含む水を効率よく循環させるためにタンク内に追加の配管を設置、の4つであった。これらすべての作業は完了し、Gdに対応した検出器は純水で補充され、2019年初頭に通常の日データ収集を再開した。Gdの添加の正確なタイミングは、T2K実験のビームスケジュールに大きく左右されるものの、2020年より遅くなることはないと言われており、本領域の研究期間内に、世界初の超新星背景ニュートリノを観測することになる予定である。

3. 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（2ページ以内）

審査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、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

（1）元素合成や高密度物質に関しては、原子核物理学の研究者を本格的に取り込んだ計画にする方が、研究上はもちろん、世界的な優位性を保つ意味でも意義が大きい。計画研究への追加などを検討してはどうか。

連星中性子星合体からの重力はイベント GW170814 の発見により、核物質の状態方程式に対する重力波データからの制限も得られている。本領域においても、独自のより精度の高い数値相対論波形の研究が進み、LIGO/Virgo とは独立した解析が進められている。このような中、指摘を受けたように原子核物理学との結びつきはこれまで以上に重要になってきている。

採用時のヒアリングにおいて、B01 分担者の柴田大氏は、ポスト京プロジェクトの格子 QCD、原子核、宇宙の統合グループの代表者であり、分野をつなぐ滞在型研究会も実績あるとしていた。また、原子核物理学の研究課題を公募研究として採用すると説明した。

実際、原子核分野の研究者に応募を促すことで 3 つの原子核物理学に関係の深い課題が C02 公募研究として採択された。これらの公募研究による高密度核物質の状態方程式の研究は、ニュートリノ信号や重力波信号を予測するシミュレーションにおける、核物理学に由来する不定性を調べるために利用されることになる。加えて、2018 年 6 月に開かれた Area workshop Early Summer 2018 においては、福島健二氏に“Neutron Star Equation of state: theory”と題する講演を、2018 年 11 月に開かれた 2nd annual symposium においては大西明氏に“Nuclear matter symmetry energy and neutron star properties--- Neutron star radius from gravitational wave vs nuclear experiments --”と題する招待講演を依頼し、分野の枠を超えた波及効果が生まれるように努めてきている。計画研究 A03 においても原子核反応を詳細に考慮した恒星進化計算を行って進化トラックを構築したが、この計算を実行するためには原子核物理に精通している研究者の協力が必要だったため、実際に東京大学の吉田敬氏に協力を仰いで計算を完了させることができた。結果として、大質量星連星から BH 連星への進化トラックを、特に重元素量の極めて低い場合に初めて系統的に構築することに成功した。

（2）計画書に記載はあるが、KAGRA の感度向上計画に遅れが生じた場合などのリスク管理に関する考え方について、より具体的に説明願いたい。

これに対して、ヒアリングでは半年程度の遅延に対しては、データ解析パイプラインの準備を万全に整えて、データ取得後の研究を加速することで対応するとともに、1 年の遅延がある場合には KAGRA のデータを必要としない研究に集中することで、「影響は限定的、世界的な成果を出せる」とした。KAGRA のデータを必要としない研究とは、(1) 重力波イベントのアラートにもとづき進める フォローアップ観測から広がるサイエンス、(2) 独自の解析手法を開発し、LIGO/Virgo の公開重力波データを用いた解析を世界に先駆けて発表することによる 重力波データ解析から広がるサイエンス などである。実際、前項目 2 に示したように (1) や (2) に該当する研究の実績をこの間に残してきた。

KAGRA は当初示していた予定表によれば、2020 年はじめに LIGO/Virgo との共同観測に加わることができればよいと考えられていたが、計画は順調に進んでおり、2019 年の秋から KAGRA が共同観測に参加することが予定されていると聞いている。中間評価ヒアリングの時点では、状況はより明らかになると考えられる。それを受けて、LIGO/Virgo と KAGRA の間でのデータ共有のための準備も着実に進んでおり、すでに LIGO/Virgo からのデータ転送が行われている。依然として現時点では、KAGRA の感度が向上しないリスクを払拭し切れてはいないものの、われわれが当初描いていたリスク回避の対策は依然として有効である。

（3）すでに進行している大型装置計画「大型低温重力波望遠鏡（KAGRA）計画において、第 2 フェーズ」との関連を明確にするため、より詳しく説明願いたい。

この点について、ヒアリングにおいて、本新学術領域がソフト面を、KAGRA 計画本体はハード面をカバーしており、相補的な役割にあるという点を説明した。**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本領域の最重要課題である。**KAGRA から独自性の高い成果を出すためには、研究員を雇用するとともに、他分野からの新規参入を促すことで、重力波データ解析を強力に補強して推進する必要がある。このことは同時に将来の人材育成にも重要な役割を果たす。加えて、理論研究者が真剣にデータ解析から抽出すべき新しい理論的側面を示すことに注力し、データ解析に参画すべき時期であり、その為の枠組みとして本領域の果たす役割は大きい。本領域と KAGRA の双方にまたがる存在として重力波データ解析チームがある。本領域には KAGRA のデータ解析グループがほぼ全面的に参加している。

4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する] (3 ページ以内)

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

計画研究 A01

新しい重力波データ解析の提案と適用 データ重力波実データを用いて、モデルに依存しない拡張重力理論の解析には含まれない、スカラー場が小さな質量を持つ場合のスカラーテンソル理論に対する新たな制限を得た(arXiv:1905.11859)。また、ブラックホール事象の地平面が修正を受けていることを示すブラックホールエコー現象の存在が示唆されていたが、新しいデータを加え、より物理的に適切な波形を用いた再解析を行った結果、その存在の兆候がないことを示した(arXiv:1906.00838)。

ブラックホール準固有振動に対するモックデータチャレンジ ブラックホール形成後の準固有振動の振動数をより正確に決定し、一般相対論の検証、および、ずれの検出を目的とし、擬似データを作成し5つの異なる手法による決定精度を比較評価する研究を行った。これまで、さまざまな準固有振動の振動数決定手法が提案されてきたが、公正な比較が行われておらず、手法の優劣がつかない状況であったが、様々な手法を実装している本計画研究の強みを活かし、様々な手法の現状における優劣を明らかにした(arXiv:1811.06443、Phys. Rev. D 掲載決定)。

計画研究 A02

GW170817 の観測結果による重力理論の進展 2017年10月に発表されたGW170817の観測結果を受けて、本計画研究には大きな進展があった。例えば、アインシュタイン・エーテル理論についてGW170817を含む様々な観測や理論的整合性からの制限を総合的に精査したり(Phys. Rev. D97, 124023 (2018))、重力波観測から得られた制限を満たすようなものだけに絞ってスカラーテンソル理論の様々な側面（相対論的天体の構造、許されるパリティ対称性の破れ方、大規模構造の観測から得られる相補的制限など）を調べることができた(Phys. Rev. D97, 104012 (2018))。

理論予言から実験への示唆を与えた研究 Chern-Simons 修正重力理論における遅い自転をする弱場天体での逐次解の構成法を開発してGPB実験からのモデルパラメータへの制限を付ける研究(Class. Quant. Grav. 36, 105006 (2019))や、暗黒物質がコヒーレントなスカラー場である仮説を将来の重力波干渉計を用いて検証する方法の研究(arXiv:1811.05003)などは、理論予言から実験の発展を促す可能性を追求するものである。

天体物理における新しい物理現象の指摘 階層的3体系における重力波の影響を解析し、パルサーの近星点移動曲線に古在・リドフ振動に伴う屈折が現れることを示した(Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 486, L52 (2018))。

計画研究 A03

大質量連星からBH連星への進化過程 金属量の極めて低い進化トラックを初めて系統的に構築し、連星種族合成計算や重力N体計算を行う準備を整えることができた(論文執筆中)。

孤立した大質量連星の形成過程 連星形成に重要な角運動量の輸送を支配する磁場拡散について、鍵となる電離度の進化を精度よく決定するモデル化の開発に成功した(Nakauchi et al. 2019として投稿中)。数値シミュレーションの研究も並行して行い、磁場も重元素も無いときには連星を含む星数 ~ 10 程度の小星団が形成される可能性が高いことが示された(Susa 2019として論文受理)。

高密度星団の形成とその力学進化 これまで注目されてこなかった散開星団でのBH連星形成と合体率を調べた。意外なことに、この過程で発生するBH合体率は支配的であると信じられていた球状星団での合体率と同程度であり、散開星団でのBH連星形成が重要であることが明らかになった(Kumamoto et al. 2019として出版済)。これは従来の予想をくつがえす驚くべき結果である。

計画研究 B01

数値相対論等の理論的知見にもとづくデータ解析 連星中性子星合体、中性子星ブラックホール連星合体、パルサー、マグネターからの重力波の数値相対論シミュレーションによる重力波波形や、理論的知見を、重力波データ解析へ生かして、計画後半の KAGRA の観測運転によって得られる実際のデータの解析へ適用することを目的として研究を進めている。現在までのところ、データ解析のためのソフトウェアの開発整備を順調に進めており、また、必要な計算機資源の増強整備も進んでいる。

数値相対論による重力波源の研究 多数の連星中性子星合体シミュレーションが順調に行われ、波形モデル構築が進められている。最初の波形モデルとして、周波数領域における新しい波形モデルが構築された(Phys. Rev. D97, 044044 (2018))。この新しい波形モデルは、合体直前については最新の高精度の数値相対論の結果と一致し、低周波数領域では SEOBNRv2T という準解析的波形モデルに一致するように作られたものである。適用可能な周波数帯域は 10Hz から 1000Hz にわたり。潮汐変形率 Λ が 300 から 1900 の場合には、新しい波形モデルと数値相対論と SEOBNRv2T を合わせた波形モデルとの位相の差は、0.1 ラジアン以内と非常に高精度なものである。実データ解析が進行中である。

計画研究 B02

中性子星連星合体イベント GW170814 の追観測 MAXI は X 線領域では全世界で最も早い観測を行い、上限値を求めた。Swift による電磁波対応天体の追観測では、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。また、Chandra による追観測により X 線対応天体を発見し、ガンマ線バーストの放射源となる相対論的ジェットが発生していたことを明らかにした(PASJ, 70, 1 (2018))。

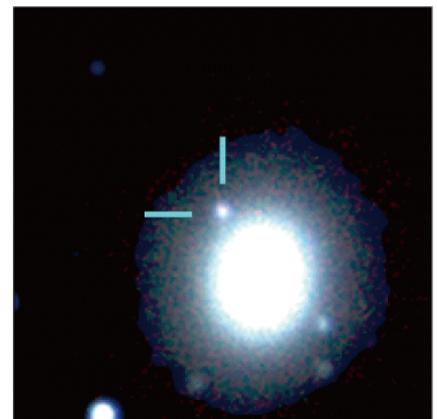
連星中性子星合体イベント GW170817 とその電磁波対応天体についての理論的考察 特に、横から見た相対論的ジェットを考えることで、通常より暗いガンマ線バースト GRB170817A と特異な残光を同時に説明できることを示した。この理論は世界に先駆けて arXiv に発表された(PTEP2018, 043E02)。相対論的ジェットの存在はその後電波の観測で確認された。また、マクロノバ・キロノバのエネルギー源として中心エンジンの多様な可能性を考察した。ジェットからの高エネルギーニュートリノについても見積もりを行った。

高速電波バースト(FRB)およびガンマ線バースト(GRB)についての研究 FRB の連星中性子星合体説に基づく理論モデルをシミュレーションデータに基づいて構築した。すばる望遠鏡による FRB の追観測で、可視光残光への制限を得た。GRB を用いた再電離研究について、再電離シミュレーションデータを用いて、将来の GRB から得られる再電離の物理量の系統誤差などを調べた。

ブラックホールや、連星中性子星の前駆天体となる X 線連星の統計調査 MAXI 搭載ガススリットカメラ(GSC) が 2009 年-2016 年の 7 年間に取得したデータを解析し、X 線カタログを完成させ、2 本の論文として発表した(Hori et al. 2018, Kawamuro et al. 2018)。本カタログは 4-10 keV 帯をカバーした全天カタログとして過去最高の感度を実現しており、計 896 天体を含む。また MAXI が発見したブラックホール X 線連星の X 線および多波長観測の結果を論文としてまとめた。

計画研究 B03

重力波イベント GW170817 の光赤外線対応天体の観測 中性子星合体からの重力波イベント GW170817 に対して J-GEM による追観測を行い、重力波天体の光赤外線対応天体の初観測に成功した(Utsumi et al. 2017, PASJ, 69, 101; Tominaga et al. 2018, PASJ, 70, 28)。観測された電磁波放射の性質と数値シミュレーションの比較から、中性子星合体 GW170817 で確かに r-過程元素合成が起こり、0.03 太陽質量程度の元素が放出されたことが明らかとなった(Tanaka et al. 2017, PASJ, 69, 102)。



計画研究 C01

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を発見

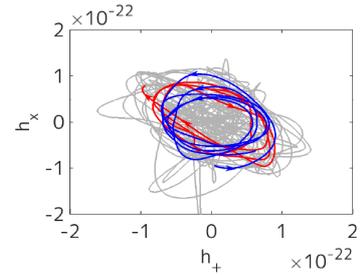
超新星爆発のダイナミクスと重力波の放射機構を明らかにするために、スーパーコンピュータを駆使した大質量星(15 太陽質量)の重力崩壊の大規模 3 次元(3D)シミュレーションに基づき、その重力波シグナルを詳細に解析した(Hayama et al. MNRAS Letters, 2018)。その結果、爆発開始前の超新星コアで発達する様々な流体不安定性の発達の度合いが、重力波波形を特徴づけることを明らかにした。特

に「SASI」と呼ばれる衝撃波のグローバルな変形が引き金となって生成される重力波が円偏光成分(右図)を持つことを指摘した。

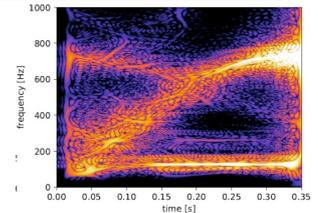
高速自転を伴う超新星における重力波とニュートリノシグナルの変動タイムスケールの相関を発見 高速自転する大質量星(27 太陽質量)の超新星爆発から予測される重力波・ニュートリノ放射についても 3D シミュレーションに基づく解析を行った(Takiwaki & Kotake, MNRAS Letters (2018))。本成果のハイライトとして、特に水平面から見たときニュートリノシグナルが、ニュートリノ球の回転周期と近い周波数で時間変動することを発見したことが挙げられる。このニュートリノ灯台効果に加え、非軸対称モードが生成する重力波の周波数がニュートリノシグナルと強い相関を持つことも指摘した。

<公募研究>以下の成果は C01 と公募研究の共同研究で得られた成果である。

超新星重力波の新たな時間・周波数空間解析法の構築 超新星重力波の時間・周波数空間における特徴を明瞭に引き出す手法としてウィグナー・ビイレ(WV)解析を導入し、中性子星の固有振動モード、更には衝撃波不安定性に関する情報が重力波スペクトルから読み取れることを指摘した(Kawahara et al. (2018), ApJ. 右図参照)。これらマルチモードの重力波の観測が重要なのは、右図で左下(50Hz)から右上(800Hz)に上がっていく周波数成分で、これは原始中性子星の浮力振動数(原始中性子星の質量と半径)に依存しているからである。さらに、w1 モードと呼ばれる固有振動モードを観測することで、両者の情報を独立に取り出せる可能性を指摘した(Sotani et al. PRD. (2017))。



超新星の 3D シミュレーションに基づく重力波の円偏光の様子。SASI の発達に伴い円偏光成分(太線)が生成されることを示す。



超新星重力波(15 太陽質量)のスペクトログラム。WV 解析により、様々なモード(明るい部分)の特徴的周波数がクリアに峻別可能になった。

計画研究 C02

スーパーカミオカンデ(SK)ニュートリノ検出器の改修 おそらく最も重要で、かつ労力と時間を要した C02 の成果は、C02 の監修のもと、H30 年度中に SK ニュートリノ検出器の改修に成功したことである。H30 年 5 月から H31 年 1 月までの間、タンク内での作業量は何千人日にも及んだ。この作業により、SK のタンクを満たすは水にガドリニウムを装填する準備が整った。

SK での超新星ニュートリノデータベースを用いた解析手法の提案 C02 活動のもう一つの成果として、SK 及び C02 超新星理論メンバーの間の共同研究の最初の論文が H31 の初期に投稿された(Suwa et al. arXiv:1904.09996)。この論文では超新星ニュートリノデータベースを用いた SK でのニュートリノイベント数の予測が論じられた。特に、ニュートリノ信号の違いを区別し、また中心の中性子星情報を取り出すために、後方時間プロットという手法でデータを解析することを新たに提案した。

超新星背景ニュートリノの理論予測 C01 との共同研究として、8-100 太陽質量の親星による広範囲な超新星シミュレーションからの超新星背景ニュートリノを用いて、観測されるイベント数を予測した(Horiuchi et al. 2018)。広範囲に渡る大質量星のコンパクトネスとニュートリノバーストの結果を調べることで、将来的な SK とハイパーカミオカンデでの超新星背景ニュートリノの検出によって、ブラックホールが形成される親星の質量閾値が明らかになる可能性を指摘した。

5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開發表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください。）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

<発表論文>

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 51 件（査読有 52 件、査読無 0 件）

A01-1（計画・田中） 計 15 件（査読有 15 件、査読無 0 件）

- ▲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, The Phys. Rev. D, 査読有, 掲載決定
- ▲*Soichiro Isoyama, Ryuichi Fujita, Hiroyuki Nakano, Norichika Sago, Tanaka Takahiro, “Flux-balance formulae” for extreme mass-ratio inspirals, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2019, 013E01, 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
- ▲Kocsis Bence, *Suyama Teruaki, Tanaka Takahiro, Yokoyama Shuichiro, Hidden Universality in the Merger Rate Distribution in the Primordial Black Hole Scenario, The Astrophysical Journal, 査読有, 854, 41, 2018
- ▲*Loutrel Nicholas, Tanaka Takahiro, Yunes Nicols, Spin-precessing black hole binaries in dynamical Chern-Simons gravity, Physical Review D, 査読有, 98, 064020, 2018

A01-2（計画・瀬戸） 計 8 件（査読有 8 件、査読無 0 件）

- ▲*Nishino Yuki, Seto Naoki, 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 5 件（査読有 5 件、査読無 0 件）

- Ebisuzaki Toshikazu, Katori Hidetoshi, Makino Jun’ ichiro, Noda Atsushi, *Shinkai Hisaaki, Tamagawa Toru, INO: Interplanetary network of optical lattice clocks, International Journal of Modern Physics D, 査読有, 1940002, 2019

A01-4（計画・大原, 高橋） 計 5 件（査読有 5 件、査読無 0 件）

- ▲*Sakai Kazuki, Oohara Ken-ichi, Nakano Hiroyuki, Kaneyama Masato, Takahashi Hiroataka, 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・西澤） 計 10 件（査読有 10 件、査読無 0 件）

- ▲*Nishizawa Atsushi, Kobayashi Tsutomu, Parity-violating gravity and GW170817, Physical Review D, 査読有, 98, 2018
- ▲*Arai Shun, Nishizawa Atsushi, Generalized framework for testing gravity with gravitational-wave propagation. II. Constraints on Horndeski theory, Physical Review D, 査読有, 97, 2018

A01-6（計画・八木） 計 9 件（査読有 9 件、査読無 0 件）

- ▲*Berti Emanuele, Yagi Kent, Yang Huan, Yunes Nicols, Extreme gravity tests with gravitational waves from compact binary coalescences: (II) ringdown, General Relativity and Gravitation, 査読有, 50, 2018

他 10 名（うち公募研究 3 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 107 件（査読有 107 件、査読無 0 件）

A02-1（計画・向山） 計 29 件（査読有 29 件、査読無 0 件）

- ▲Fujita Tomohiro, Kuroyanagi Sachiko, Mizuno Shuntaro, Mukohyama Shinji, Blue-tilted primordial gravitational waves from massive gravity, Physics Letters B, 査読有, 789, 215219, 2019
- ▲Oost Jacob, Mukohyama Shinji, Wang Anzhong, Constraints on Einstein-aether theory after GW170817, Physical Review D, 査読有, 97, 2018

A02-2（計画・前田） 計 10 件（査読有 10 件、査読無 0 件）

- ▲Aoki Katsuki, Maeda Kei-ichi, Misonoh Yosuke, Okawa Hirotsada, Massive graviton geons, Physical Review D, 査読有, 97, 2018

A02-3（計画・浅田） 計 3 件（査読有 3 件、査読無 0 件）

- ▲Ono Toshiaki, Ishihara Asahi, Asada Hideki, Gravitomagnetic bending angle of light with finite-distance

corrections in stationary axisymmetric spacetimes, Physical Review D, 査読有, 96, 2017

A02-4 (計画・須山) 計 8 件 (査読有 8 件、査読無 0 件)

1. ▲Ringeval Christophe, Suyama Teruaki, Stochastic gravitational waves from cosmic string loops in scaling, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 査読有, 2017, 027-027, 2017

他 11 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 A03 ブラックホール連星形成過程の理論的研究 総計 58 件 (査読有 58 件、査読無 0 件)

A03-1 (計画・大向) 計 7 件 (査読有 7 件、査読無 0 件)

1. ▲*Matsukoba R., Takahashi S., Sugimura K., Omukai K., Gravitational stability and fragmentation condition for discs around accreting supermassive stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Vol. 484, pp. 2605-2619, 2019

A03-2 (計画・須佐) 計 4 件 (査読有 3 件、査読無 0 件)

1. ▲ *Susa H., Merge or survive: Number of Population III stars per minihalo, The Astrophysical Journal, 査読有, 印刷中, 2019

A03-3 (計画・町田) 計 8 件 (査読有 8 件、査読無 0 件)

1. ▲*Higuchi K., Machida M.N., Susa H., Evolution of magnetic fields in collapsing star-forming clouds under different environments, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Vol. 475, pp. 3331-3347, 2018

A03-4 (計画・細川) 計 10 件 (査読有 10 件、査読無 0 件)

1. ▲*Chon S., Hosokawa T., Yoshida N., 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 8 件 (査読有 8 件、査読無 0 件)

1. ▲*Fujii M. S., Tanikawa A., Makino J., The detection rates of merging binary black holes originating from star clusters and their mass function, PASJ, 査読有, Vol. 69, pp. 94-108, 2017

A03-6 (計画・谷川) 計 10 件 (査読有 10 件、査読無 0 件)

1. ▲*Kumamoto J., Fujii M. S., Tanikawa A., Gravitational-Wave Emission from Binary Black Holes Formed in Open Clusters, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 印刷中, 2019, DOI: 10.1093/mnras/stz1068

A03-7 (計画・吉田) 計 5 件 (査読有 5 件、査読無 0 件)

A03-8 (計画・松本) 計 6 件 (査読有 6 件、査読無 0 件)

他 8 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 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 34 件 (査読有 34 件、査読無 0 件)

B01-1 (計画・田越) 計 5 件 (査読有 5 件、査読無 0 件)

1. ◎Jia Dongbao, Yanagisawa Kenta, Ono Yuta, Hirobayashi Kanna, Hasegawa Masaya, Hirobayashi Shigeki, Tagoshi Hideyuki, Narikawa Tatsuya, Uchikata Nami, Takahashi Hirotaka, Multiwindow Nonharmonic Analysis Method for Gravitational Waves, IEEE Access, 査読有, 6, 4864548655, 2018

B01-2 (計画・小島) 計 2 件 (査読有 2 件、査読無 0 件)

2. ▲Kojima Yasufumi, Twisted magnetosphere with quadrupolar fields in the exterior of a neutron star, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 477, 35303538, 2018

B01-3 (計画・木内) 計 13 件 (査読有 13 件、査読無 0 件)

1. ▲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, 2018
2. ▲Kiuchi Kenta, Kawaguchi Kyohei, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke, Sub-radian-accuracy gravitational waveforms of coalescing binary neutron stars in numerical relativity, Physical Review D, 査読有, 96, 2017

B01 (公募・久徳) 計 8 件 (査読有 8 件、査読無 0 件)

1. ▲Chakravarti Kabir, Gupta Anuradha, Bose Sukanta, Duez Matthew D., Caro Jesus, Brege Wyatt, Foucart Francois, Ghosh Shaon, Kyutoku Koutarou, Lackey Benjamin D., et al., Systematic effects from black hole-neutron star waveform model uncertainties on the neutron star equation of state, Physical Review D, 査読有, 99, 2019
2. Seto Naoki, Kyutoku Koutarou, Prospects of the local Hubble parameter measurement using gravitational waves from double neutron stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 475, 41334139, 2018

他 9 名 (うち公募研究 1 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 92 件 (査読有 92 件、査読無 0 件)

B02-1 (計画・河合) 計 6 件 (査読有 6 件、査読無 0 件)

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

B02-2 (計画・上田) 計 2 件 (査読有 2 件、査読無 0 件)

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

B02-3 (計画・深沢) 計 1 件 (査読有 1 件、査読無 0 件)

1. ▲ Abbott, B. P.; Fukazawa, Y.; Kawai, N.; Mihara, T.; Negoro, H.; Sakamoto, T.; Ueda, Y.; Yoshida, A.; Yatsu, Y.; et al. “Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger”, Astrophys. J. Letters (査読有り), 848, L12, (2017).

B02-4 (計画・井岡) 計 8 件 (査読有 8 件、査読無 0 件)

1. ▲ Ioka, K.; Nakamura, T., “Can an off-axis gamma-ray burst jet in GW170817 explain all the electromagnetic counterparts?”, Progress of Theoretical and Experimental Physics (査読有り), Vol.2018, Issue 4, id.043E02, 2018.

2. ▲ Ioka, K.; Matsumoto, T.; Teraki, Y.; Kashiyama, K.; Murase, K., “GW 150914-like black holes as Galactic high-energy sources”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (査読有り), Vol.470, Issue 3, p.3332-3345, 2017

B02-5 (計画・谷津) 計 1 件 (査読有 1 件、査読無 0 件)

1. *Kasliwal, M. M.; Nakar, E.; Singer, L. P.; Yatsu, Y. et al., “Illuminating gravitational waves: A concordant picture of photons from a neutron star merger”, Science (査読有り), 358, pp. 1559-1565, (2017).

B02-6 (計画・坂本) 計 2 件 (査読有 2 件、査読無 0 件)

1. ▲*Troja, E.; Piro, L.; Sakamoto, T.; et al., “The X-ray counterpart to the gravitational-wave event GW170817”, Nature (査読有り), 551, pp. 71-74, (2017).

B02-7 (計画・芹野) 計 3 件 (査読有 3 件、査読無 0 件)

1. ▲Serino, M.; Kawai, N.; Negoro, H.; Mihara, T.; Masumitsu, T.; Nakahira, S., “X-ray upper limits of GW151226 with MAXI”, Publications of the Astronomical Society of Japan (査読有り), 69, 85, (2017).

他 13 名 (うち公募研究 3 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 77 件 (査読有 77 件、査読無 0 件)

B03-1 (計画・吉田) 計 11 件 (査読有 11 件、査読無 0 件)

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

2. ▲ *Utsumi Yousuke, Tanaka Masaomi, Tominaga Nozomu, Yoshida Michitoshi, Barway Sudhanshu, Nagayama Takahiro, Zenko Tetsuya, Aoki Kentaro, Fujiyoshi Takuya, Furusawa Hisanori, 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

3. ▲ *Utsumi Yousuke, Tominaga Nozomu, Tanaka Masaomi, Morokuma Tomoki, Yoshida Michitoshi, Asakura Yuichiro, Finet Francois, Furusawa Hisanori, Kawabata Koji S, Liu Wei, et al., A challenge to identify an optical counterpart of the gravitational wave event GW151226 with Hyper Suprime-Cam †, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70, 2017

B03-2 (計画・田中) 計 26 件 (査読有 26 件、査読無 0 件)

1. ▲ *Kawaguchi Kyohei, Shibata Masaru, Tanaka Masaomi, Radiative Transfer Simulation for the Optical and Near-infrared Electromagnetic Counterparts to GW170817, The Astrophysical Journal, 査読有, 865, L21, 2018

2. ▲ *Tanaka Masaomi, Utsumi Yousuke, Mazzali Paolo A., Tominaga Nozomu, Yoshida Michitoshi, Sekiguchi Yuichiro, Morokuma Tomoki, Motohara Kentaro, Ohta Kouji, Kawabata Koji S., 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・関口) 計 4 件 (査読有 4 件、査読無 0 件)

1. ▲ *Fujibayashi Sho, Sekiguchi Yuichiro, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru, Properties of Neutrino-driven Ejecta from the Remnant of a Binary Neutron Star Merger: Pure Radiation Hydrodynamics Case, The Astrophysical Journal, 査読有, 846, 114, 2017

2. ▲ *Shibata Masaru, Fujibayashi Sho, Hotokezaka Kenta, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Tanaka Masaomi, Modeling GW170817 based on numerical relativity and its implications, Physical Review D, 査読有, 96, 2017

他 14 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 C01 重力波天文学で解き明かす超新星爆発の物理 総計 26 件 (査読有 26 件、査読無 0 件)

C01-1 (計画・固武) 計 6 件 (査読有 6 件、査読無 0 件)

1. ▲*Kotake Kei, Takiwai Tomoya, Fischer Tobias, Nakamura Ko, Martinez-Pinedo Gabriel, Impact of Neutrino Opacities on Core-collapse Supernova Simulations, The Astrophysical Journal, 査読有, 853, 170, 2018

C01-2 (計画・神田) 計6件 (査読有6件、査読無0件)

1. ▲*Inoue Yuki, Haino Sadakazu, Kanda Nobuyuki, Ogawa Yujiro, Suzuki Toshikazu, Tomaru Takayuki, Yamanmoto Takahiro, Yokozawa Takaaki, Improving the absolute accuracy of the gravitational wave detectors by combining the photon pressure and gravity field calibrators, Physical Review D, 査読有, 98, 2018

C01-3 (計画・滝脇) 計4件 (査読有4件、査読無0件)

1. ▲*Takiwaki Tomoya, Kotake Kei, Anisotropic emission of neutrino and gravitational-wave signals from rapidly rotating core-collapse supernovae, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 査読有, 475, L91-L95, 2018

C01-4 (計画・端山) 計4件 (査読有4件、査読無0件)

1. ▲*Hayama Kazuhiro, Kuroda Takami, Kotake Kei, Takiwaki Tomoya, Circular polarization of gravitational waves from non-rotating supernova cores: a new probe into the pre-explosion hydrodynamics, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 査読有, 477, L96L100, 2018

C01-5 (計画・諏訪) 計1件 (査読有1件、査読無0件)

1. ▲*Suwa Yudai, Yoshida Takashi, Shibata Masaru, Umeda Hideyuki, Takahashi Koh, On the minimum mass of neutron stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 481, 33053312, 2018

C01-6 (計画・中村) 計4件 (査読有4件、査読無0件)

1. ▲*Katsuda Satoru, Morii Mikio, Janka Hans-Thomas, Wongwathanarat Annap, Nakamura Ko, Kotake Kei, Mori Koji, Muller Ewald, Takiwaki Tomoya, Tanaka Masaomi, et al., Intermediate-mass Elements in Young Supernova Remnants Reveal Neutron Star Kicks by Asymmetric Explosions, The Astrophysical Journal, 査読有, 856, 18, 2018

C01 (公募・河原) 計1件 (査読有1件、査読無0件)

1. ▲*Kawahara Hajime, Kuroda Takami, Takiwaki Tomoya, Hayama Kazuhiro, Kotake Kei, A Linear and Quadratic Time-frequency Analysis of Gravitational Waves from Core-collapse Supernovae, ApJ, 査読有, 867, 126, 2018

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37件 (査読有37件、査読無0件)

C02-1 (計画・ヴァギンズ、小汐) 計2件 (査読有2件、査読無0件)

1. Abe K., Bronner C., Hayato Y., Ikeda M., Iyogi K., Kameda J., Kato Y., Kishimoto Y., Marti Ll., Miura M., et al., Search for Neutrinos in Super-Kamiokande Associated with the GW170817 Neutron-star Merger, The Astrophysical Journal, 査読有, 857, L4, 2018

2. Abe K., Bronner C., Pronost G., Hayato Y., Ikeda M., Iyogi K., Kameda J., Kato Y., Kishimoto Y., Marti Ll., et al., Search for an Excess of Events in the Super-Kamiokande Detector in the Directions of the Astrophysical Neutrinos Reported by the IceCube Collaboration, The Astrophysical Journal, 査読有, 850, 166, 2017

C02-2 (計画・住吉、松古、原田) 計12件 (査読有12件、査読無0件)

1. ▲Harada Akira, Nagakura Hiroki, Iwakami Wakana, Okawa Hirotsada, Furusawa Shun, Matsufuru Hideo, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi, On the Neutrino Distributions in Phase Space for the Rotating Core-collapse Supernova Simulated with a Boltzmann-neutrino-radiation-hydrodynamics Code, ApJ, 査読有, 872, 181, 2019

2. ◎▲Matsufuru Hideo, Sumiyoshi Kohsuke, Simulation of Supernova Explosion Accelerated on GPU: Spherically Symmetric Neutrino-Radiation Hydrodynamics, Lecture Notes in Computer Science, 査読有, 440455, 2018

3. ▲Nagakura Hiroki, Iwakami Wakana, Furusawa Shun, Okawa Hirotsada, 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

4. ▲Horiuchi Shunsaku, Sumiyoshi Kohsuke, Nakamura Ko, Fischer Tobias, Summa Alex, er, Takiwaki Tomoya, Janka Hans-Thomas, Kotake Kei, 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, 2017

C02-3 (計画・山田、中里) 計7件 (査読有7件、査読無0件)

1. Ken' ichiro Nakazato, Toshio Suzuki, Makoto Sakuda, Charged-current scattering off the 160 nucleus as a detection channel for supernova neutrinos, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2018

C02 (公募・堀内、安藤、諏訪、古澤) 計9件 (査読有9件、査読無0件)

他8名

<書籍>

田中貴造, 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

真貝寿明, 現代物理学が描く宇宙論、共立出版、2018

小林努, 相対性理論、日本評論社、2017

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

<雑誌等>

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

浅田秀樹、天体の軌道決定法と最小二乗法、数理科学、2017 年 12 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

住吉光介・千葉敏、宇宙の大イベント超新星爆発とその鍵を握るニュートリノ

—ニュートリノ輸送計算が明かす物質創生の筋道—、日本原子力学会誌「アトモス」、2018. 12

他 15 件

<新聞等>

米“fox news”、2018/8/2 瀬戸直樹らの共同研究の記事が掲載された:

<https://www.foxnews.com/science/e-t-phone-earth-how-neutron-star-crashes-could-help-aliens-call-us>

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— (新聞掲載 131 件)

https://subarutelescope.org/Pressrelease/2017/10/16/j_index.html

2017 年 9 月 1 日 中日新聞「スーパーカミオカンデ改造中・太古の宇宙より鮮明に」

2018 年 9 月 16 日 日経新聞「スーパーカミオカンデタンク公開」

他 144 件

<主催シンポジウム等>

- ・領域全体, Area workshop 2019 Early Summer, Osaka City University, 2019/06/29 (予定)
- ・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 WS 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
- ・A03, 初代星・初代銀河研究会 2018, 茨城, 2018/11/19-21
- ・領域全体, 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, JGRG28, Rikkyo Univ., 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
- ・C02, Physics of Core-Collapse Supernovae and Compact Star Formations, Waseda Univ., 2018/03/19-21
- ・領域全体, Annual Area Symposium, Kashiwa campus of the Univ. of Tokyo, 2018/03/05-07
- ・A02, The second workshop on gravity and cosmology by young researchers, YITP, Kyoto Univ., 2018/03/03-04
- ・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
- ・A03, 初代星・初代銀河研究会 2017, 呉, 2018/02/10-12
- ・C01, GWASNe2018, NA0J, 2018/01/29-30
- ・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, The 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

<アウトリーチ活動>

- ・領域ホームページ <https://gw-genesis.scphys.kyoto-u.ac.jp>
- ・一般向け講演会 領域主催市民講演会 “ついに「見えた」重力波天体” 京都市 2018/12/9
講演者：東北大学・准教授 田中雅臣
- ・一般向け講演会 領域主催市民講演会「重力波物理学・天文学の展開 ～ブラックホールをめぐる宇宙の謎～」新潟県長岡市、2019/2/17
内潟那美(新潟大学・研究員)「ブラックホール委からのこだま?! ～重力波で探るブラックホール～」を講演
細川隆史(京都大学・准教授)「重力波を探る宇宙最初の星とブラックホール」を講演
他 127 件
- ・イベント 京都大学 京都大学アカデミックデイ 2018 に出展 (2018/9/22) し、アカデミックデイ賞を受賞。
- ・スーパーカミオカンデ一般公開(2017/11/4)
- 他 1 件

6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

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 中性子星の潮汐変形率の決定

連星中性子星合体重力波GW170817の詳細な再解析を進めている。その結果、Hanford検出器とLivingston検出器との潮汐変形率の推定結果に矛盾があることを指摘した(図2左)。また、解析に用いる高周波数カットオフを変化させることで、推定結果が大きく変動することから、Livingston検出器の高周波数帯のデータが潮汐変形率の決定に使用できないことを指摘した(図2右)[日本物理学会 第74回年次大会(2019/3/14-17)「GW170817の再解析」, 成川達也他]

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

これまでの超新星重力波のスペクトログラム解析においては、時間・周波数空間においてマルチモードの特徴を持つ重力波の特徴を明瞭に分解することが困難であった。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、公募研究計画で開発を行ったウィグナー・ヴィエ解析を適応した結果、原始中性子星の振動モードに起因する重力波、衝撃波不安定性に起因する重力波とその倍音成分を分解することに成功した。また計画研究A01班と連携して、重力波を特徴的な基底に分解して瞬時周波数を抽出するのに秀でたヒルベルト・ファン解析の開発も現在進行中である。

<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80件を超える引用がある。また、ブラックホールの質量分布に特徴的な振る舞いが現れ、他のシナリオとの区別がつくことを示した。[Class. Quant. Grav. 35 (2018) 063001, Astrophys. J. 854 (2018) 41]

④ A01-A03-公募研究 相関統計解析を用いてBH連星の起源に迫る研究 西澤(A01, A3(公募))はブラックホール連星の母銀河との関連について調べ、現在、母銀河の性質と連星形成シミュレーション(大向、細川による低金属環境での連星形成および谷川、藤井による星団中での連星形成)の結果を組み合わせた大規模な統計解析に取り掛かる準備を進めている。[進行中]

⑤ B01-B03 中性子星合体からの電磁波放射に関する理論研究 GW170817観測された光赤外線放射(キロノバ)のモデル化により、赤外線を強く放つ成分(質量 $M=0.03$ 太陽質量、速度 $v=0.1c$ 程度)と可視光を強く放つ成分($M=0.02$ 太陽質量、 $v=0.2c$ 程度)の二成分が存在することが示唆された。これは中性子星合体で考えられる動的な質量放出($M=0.01$ 太陽質量、 $v=0.2c$ 程度で赤外線が強い)や合体後の円盤からの放出($M>0.03$ 太陽質量、 $v=0.05c$ 程度で、可視光が強い)と対応していないため、数値相対論と観測の矛盾とし

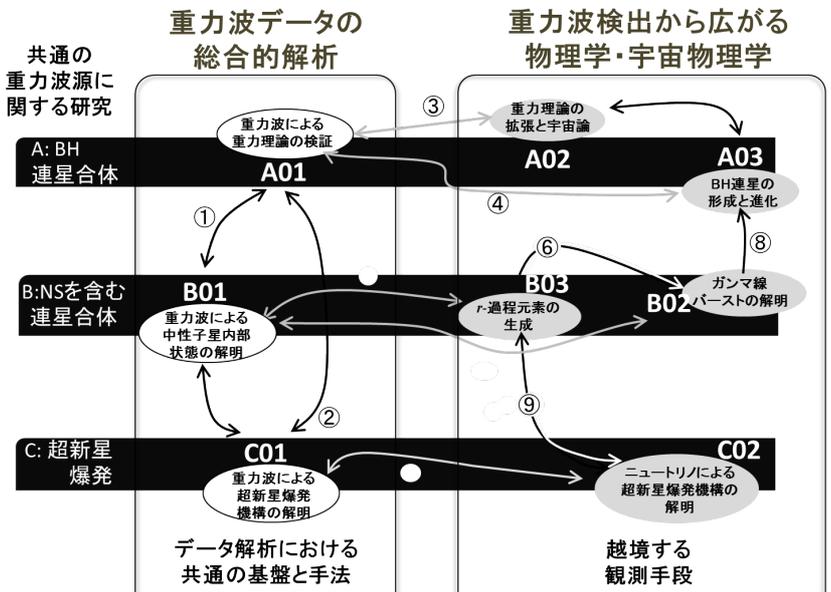


図1：研究組織図

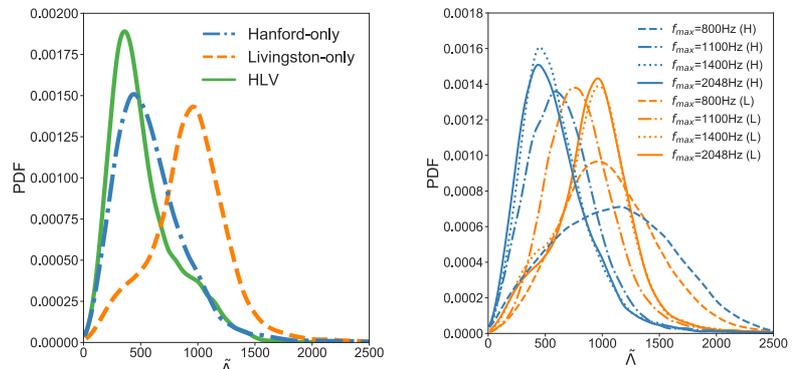


図2:GW170817重力波データから推定された潮汐変形率の事後確率分布

て問題視されていた(Metzger 2017 など)。しかし、観測を再現する単純なモデル化では、二つの成分からの放射を足しているだけで、複数成分の放出物質で輻射が発生し、再吸収されることを加味していない。そこで、B01 と B03 が連携して、数値相対論計算で予想される放出物質の多次元構造を加味した輻射輸送計算を行い、数値相対論シミュレーションで予想される構造が GW170817 で観測された性質を自然に説明できること、すなわち数値相対論と観測に矛盾はないことを示した。[Kawaguchi, Shibata, Tanaka 2018, ApJ, 865, L21]

⑥ B02-B03 X線・ガンマ線衛星の再解析データの共有と可視近赤外検索データの即時確認 重力波源の電磁波対応天体の即時多波長データ解析を見据えて、フレアを起こしたブレーザーに対するX線・ガンマ線の人工衛星データを再解析してデータを共有し、可視赤外線追跡観測の方針決定に役立てる取り組みを行ったほか、広島大学ではB03が中心となって進めている03ランにおけるJ-GEMの重力波アラートの当番対応を、同一機関に所属するB02がサポートする連携体制を整えるなどした。

B02-B03 突発天体探査紫外線衛星の設計 B02のメンバーを中心として、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が進んでおり、B03のメンバーが中性子星合体からの電磁波放射の性質を踏まえて要求性能を定義し、設計に関して連携している。

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]

⑦ 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 重力波とニュートリノのシグナル観測を連動して行うための理論的な研究を行いつつ、それを観測グループと密接な議論を行いながらシグナル予測のデータ蓄積を行なっている。まず、両者の計算データを合わせて超新星背景ニュートリノの予測を行い原始中性子星の代わりにブラックホールが形成される割合を観測から導くことを提案した。また、2次元と3次元空間の超新星計算の系統的な研究による網羅的な重力波・ニュートリノシグナル予測と元素合成などの観測への影響、2次元空間における精密なニュートリノ輻射輸送による超新星爆発メカニズムの解明とニュートリノシグナル予測を合わせて相補的な研究が行われて、観測グループへのデータ提供と観測シグナルから物理現象を引き出すための理論と観測の連動研究を進めている。加えて、公募研究においては、中性子星合体の数値シミュレーションへの応用をにらんだ状態方程式データテーブルの構築が進められている。

<その他の連携>

⑧ 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

檜山(A03公募研究)によって、近接大質量連星で起こるブラックホール形成に伴い、青くて速いUVトランジェントが予言された。この結果に基づき、B02班の河合氏、井岡氏、谷津氏らと共同で超小型衛星に搭載されるUV検出器(雲雀)を用いた観測によるこの種のトランジェントの検出可能性とサイエンスの検討を行った。

⑨ B03(公募研究)-C02 宇宙化学進化と超新星ニュートリノ

C02で検出を目指している超新星背景ニュートリノの強度は、大質量星が爆発せずブラックホールになる割合に依存している。この割合に対して、辻本(B03公募研究)が中心となり、元素合成、さらに銀河の化学進化の観点から制限を与えることを目標に議論を開始している。

⑩ A03(公募研究)-C01 近接大質量連星における超新星爆発と中性子星形成モデル化

檜山(A03公募研究)の研究を発展させ、C01班の諏訪氏と共同で、近接大質量連星における中性子星形成と関連する超新星爆発の性質を理論的に系統的に調べている。特に、生まれたての近接中性子星連星の発見を目指し、現在、このような系へのフォールバック降着とその結果生じる多波長電磁波放射の理論モデルの構築を行っている。

○ B03-公募研究 J-GEM ネットワークの機能強化

木曾観測所を用いた広視野探査観測(諸隈智貴)、MOAを用いた広視野探査観測(阿部文雄)が連携して観測を行っている。また、MAGNUM2m望遠鏡を用いた追観測(峰崎岳夫)もネットワークに組み込む準備を行っている。

○ 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

前田啓一(B03公募研究)による輻射輸送計算によって、B03が推進する木曾観測所 Tomo-e Gozen カメラによる高頻度突発天体探査観測の戦略が最適化され、さらに京都大学せいめい望遠鏡による追観測の体制が構築されている。2019年4月にはTomo-e Gozenで発見された突発天体の即時観測がせいめい望遠鏡で行われた。

7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

総括班会議には分担者となっている計画研究代表者のみではなく、各計画研究から一名以上の若手研究者が参加し領域の運営に関わっている。総括班会議においては、参加者全員が対等な立場で意見を出し合うとともに、実際の運営の一部を若手研究者に任せている。

研究面においては、発表研究論文の多くが若手研究者との共著論文である。また、海外での研究の発展の状況に応じて、若手研究者を派遣して共同研究を進めることが重要と考えられ、大学院生を含む若手研究者の長期派遣は、将来を担う国際的な場面で活躍できる人材育成にもつながる。このような考えから、総括班会議の議論を経た上で、6件の短期滞在派遣をおこない、その報告の記事も領域ホームページで公開している。また、海外への学会発表のためなどの派遣の領域全体での総数は89件ののぼり、大学院生・ポスドクの研究会や学会、国際会議での研究発表を推進している。

研究会やスクールを通じての若手研究者育成という観点では、領域シンポジウムや領域ワークショップで多くの若手研究者の発表を促してきた。また、A02を中心として、国内外の若手研究者育成を主な目的の一つとして実績を上げているJGRG研究会の開催を領域として支えてきた。同時に、研究テーマが互いに関連はあるが多岐にわたる計画研究A02では、JGRGなどの研究会を通じた若手研究者のはたらきで有機的に繋げることに努めてきた。加えて、国際スクール「2019 Asian-Pacific Winter School and Workshop on Gravitation and Cosmology」をサポートし、アジア太平洋地区の若手研究者育成に貢献した。次世代の重力波データ解析を担う人材育成の観点では、B01班代表の田越秀行とポスドクとして雇用されている譲原浩貴は、2018年3月と2019年3月に、宇宙線研究所が行っているスプリングスクールにて、全国から集まった大学3年生に対して重力波データ解析の実習の指導員を行い、将来の本分野の研究者育成に努めてきた。

また、各計画研究で雇用している研究員も、それぞれの計画研究推進の中で重要な役割を果たしている。例を挙げると、【A01】計画研究の中心的課題である重力波データ解析の実装に大きく貢献し、次世代の重力波研究を担う基礎を築いているのみならず、隔週で開かれるミーティングの司会進行を担当し、マネジメント能力とともに課題遂行のための大局的観点を鍛えている。【A02】優秀な若手研究者を博士研究員として雇用した。雇用開始から現在までに、学術的価値の高い論文を数多く執筆し、国際的に活躍している。【A03】宇宙初期における(孤立した)大質量星ならびにそれらの連星の形成過程の研究で用いる先進的な数値計算コード開発に多大な貢献をした。【B01】若手研究者3名をポスドクとして雇用しており、日本における重力波データ解析の推進に極めて重要な役割を担っている。【B03】特任助教として雇用されている笹田真人氏は、J-GEMの取りまとめ役をつとめ、観測の方針決定や各観測所への指示を行っている。その結果、2019年4月に観測された重力波イベントGW S190408an, GW S190412m (ブラックホール合体)で、アラートから数時間以内の観測が実現された(Murata et al. 2019, GCN 24064; Tanaka et al. 2019, GCN 24113)。また、国際研究会においても、J-GEMの取り組みグループを代表して紹介している (Fifth KAGRA International Workshop, Italy, Feb. 14-15, 2019)。研究員に限らず若手研究者の役割は重要であり、たとえば、【A03】の3つの主要プロジェクトのうち「大質量星連星からBH連星への進化過程」、「高密度星団の形成とその力学進化」の2つはともに若手の研究分担者である藤井通子氏と谷川衝氏が主導して進めている。これまでに散開星団でのBH連星形成と合体率の重要性を初めて指摘するなど独自の成果が上がっている。【C02】では大学院生が主要目標であるSK-Gdの実現に取り組んでいる。Charles SimpsonとAlex Goldsackの二人は昨年のSKタンク内での作業に深く関わるとともに、それぞれ、シリコン燃焼星からのSKによる超新星爆発前に放出されるニュートリノの検出感度についてSKの逆ベータ事象の即時識別のためのコード開発に取り組み、超新星爆発の早期アラート発信に向けて大きく貢献している。

アウトリーチ活動においても若手研究者が重要な役割を果たしている。2019年2月に開かれた市民講演会ではポスドク研究員を講師に抜擢した。2018年9月22日に京都大学で開催されたアカデミックデイでは、本領域のポスドク2名が加わり出展し、投票上位2件に送られるアカデミックデイ賞を獲得した。

若手研究者のアクティビティーの高さを示す客観的事実として、多くの若手研究者の受賞や昇格がある：八木絢外氏(A01研究協力者)2019年度「The IUPAP GRG Young Scientist Prize」、柴田大氏(B01研究協力者)2018年度仁科記念賞、関口雄一郎氏(B03研究分担者)第12回(2018年度)木村利栄理論物理学賞、小林努氏(A02研究協力者)第33回西宮湯川記念賞、滝脇知也氏(C01研究分担者)、第7回自然科学研究機構若手研究者賞受賞、他11件。昇格としては、諏訪雄大氏(京都産業大理学部准教授着任(2018年)、端山和大氏(研究分担者、福岡大学理学部准教授着任(2018年))など、他4件の常勤職への昇格がある。

8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

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る。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 ポスドク研究員として、平成30年度から2名の雇用を行ってきた。また、平成29年度に大規模データサーバを導入し、KAGRAおよびLIGO/Virgoからのデータへのアクセスを容易にするプラットフォームを整えた。平成30年度には高速のデータ解析のための計算機サーバーも導入し運用を開始した。これらを用いた解析が進むことで、現在我々が進めているような重力理論の検証という立場の解析が可能である。

計画研究 A02 協力研究者1名を、博士研究員として雇用した。国際的に活躍する優秀な若手研究者を採用できたため、本計画研究の進捗が大幅に加速した。また、重力波研究の若手を育成するために、これまで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を上げているJGRG研究会と連携をとった。

計画研究 A03 計画研究内の会合は数ヶ月おきに行われる複数の計画研究を包括する領域シンポジウムやワークショップの際に可能であり、そのおかげでA03独自の会合は半年に一度のペースで十分に円滑な運用ができた。海外の研究協力者との打ち合わせのときは国際活動支援の予算から旅費サポートを受けた。

計画研究 B01 宇宙線研究所に重力波データ解析専用の計算機群を設置した。今後、KAGRA稼働後は主データシステムと接続される計画である。B01では、初年度に1名、2年目には3名の重力波データ解析の研究員を雇用している。不足気味なマンパワーを補って、高速データ処理を可能とする研究組織を作ることができた。

計画研究 B02 研究費の大きな割合をポスドク（4人）の雇用にあてられているほか、データ解析のための計算機やデータ保存装置の購入、および研究打合せおよび研究成果発表のための旅費に使用した。また海外からの招聘研究者への旅費／滞在費にも用いた。

計画研究 B03 H29年度は、西はりま天文台（兵庫県立大学）に設置されている可視中低分散分光器(MALLS)の本格的な運用のために必要な資材を購入した。平成30年度には、すばる望遠鏡HSCによって取得されるデータを解析するための専用システムを構築した。これによって、重力波の電磁波対応天体の候補を1日以内に選び出す態勢を整えることができた。

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 ニュートリノ検出の大規模実験施設であるスーパーカミオカンデ(SK)にガドリニウムを充填するため、必要となる設備を順次購入した。SKタンク内の水にガドリニウムを加入するよりも前に、分解したガドリニウムを集積・除去する大規模システムを神岡鉱山に準備する必要があったためである。H30年度の予算はこのシステムの最終的な組み立てとインストールのための費用として有効に使用された。これでガドリニウム注入のための手順も最終段階を迎えた。

9. 総括班評価者による評価（2 ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

総括班評価者の方には領域発足当初から評価者をお願いしている。領域シンポジウム、領域全体会議への案内を送り、領域シンポジウムでの総括班会議に出席して頂き、領域の運営に対してコメントを頂いている。横山氏には A 班を、土居氏と大橋(隆)氏には B 班、鈴木氏には C 班を中心に意見を頂いた。加えて、重力波データ解析の観点から A01-B01-C01 を中心に大橋(正)氏に評価を頂いた。以下に評価コメントを記す。

【横山順一氏 東京大学大学院理学系研究科 教授】 計画研究 A01-A03 は、主として連星ブラックホールからの重力波を用いた重力理論の検証と連星ブラックホールそのものの起源に関する研究課題を中心としている。具体的な研究テーマは多岐に亘るが、それらの扇の要となっているのが A01 である。A01 はまた、重力波のデータ解析を中心とした B01 と密接に関わっているため、この計画研究の成功自体が本新学術領域の成功の鍵となっており、A01 に研究資源を重点的に投入するよう資金配分を見直すことが必要であると考えられる。

A02 は重力波観測を用いた重力理論の研究を本来の課題とするが、それに囚われず、多くの分担者・協力者を擁し、非常に活発に研究発表を行い、国内外から高い評価を受けている。これからの課題としては、闇雲に新しい重力理論に手を出すのではなく、長い目で見て真に必要なとされる研究を行うことであろう。研究費の使途は概ね妥当であるが、海外から著名な研究者を招聘し、各分担者や関連研究者を巡回して共同研究を行うようなプログラムを実施したらよいのではないかと考える。

A03 は連星ブラックホールの形成過程を三つの素過程に分けて主として数値シミュレーションを用いて研究する計画である。各サブグループはそれぞれ注目すべき研究成果を挙げているが、本研究計画の残りの期間にこれらを総合し、KAGRA 等の観測によって当否が明らかにできるような連星ブラックホール形成史の理論構築が実現することを期待する。

A02 は JGRG 研究会と提携して国内外からの招待講演者の招聘経費の一部を本経費から負担しており、また A03 は毎年初代星研究会を開催している。これらはわが国の当該分野の研究の底上げに大きく貢献するだけでなく、巡り巡って本研究計画自体に対しても有効に作用しているといえ、研究費の使途としては極めて賢明なものであるといえる。今後もこれらを継続することを期待したい。

【土居守氏 東京大学大学院理学系研究科 教授】 B 班は中性子星を含む連星合体の観測研究を中心とした研究である。研究開始直後に大変近い距離に中性子星合体现象（重力波源 GW170817）が発生したため、研究は全体として当初の期待を大きく上回る成果を得ている。以下各班の評価を記す。

B01 に関しては、KAGRA にむけての連星合体解析コード開発とデータ解析のためのソフトウェア開発、および計算機資源の拡充が進んでいる。数値相対論による連星合体重力波波形の計算において、中性子星の潮汐変形率を取り入れた新しい解析的な重力波波形モデルの構築に成功、GW170817 への適用も進めている。パルサー、マグネターからの重力波については、連続重力波解析の準備と KAGRA データの解析テストを行い、また、マグネター磁気圏に関する研究を進めた。KAGRA の本格観測が始まると追い込みが必要となると予想されるが、全体としてほぼ計画通りに順調に進んでいる。

B02 に関しては、MAXI による重力波対応 X 線源の探索システムの高度化を進め、またフェルミ衛星の重力波追加観測での運用協力を実施した。電磁波が観測された連星中性子星合体 GW170817 では、MAXI は世界で最も早く X 線の上限值をもたらした。また Swift や Chandra を用いた紫外線・X 線の観測では、キロノバの生成と、相対論的ジェットの出現を示唆する観測に成功した。高速電波バースト (FRB) およびガンマ線バースト (GRB) 等についての研究も並行して進んでおり、全体としては、GW170817 のおかげで当初の期待を大きく上回る成果を得たと言える。

B03 に関しては、J-GEM による重力波源の光赤外線追加観測の体制は順調に整備されつつある。木曾観測所の広視野高速カメラ、チベットの HINOTORI がたちあがり、他の望遠鏡の観測装置も改良や追加、あるいは自動化が行われつつある。GW170817 においては、Hyper Suprime-Cam 等による観測に成功した。また世界の様々な観測データをもとに質量放出過程と光赤外線放射を記述するモデルの構築に成功、論文として発表した。今後はより詳細なモデルの構築と、観測の効率の向上や安定運用の体制整備が望まれるが、全体として順調に計画が進行している。

【大橋隆哉氏 首都大学東京理工学研究科 教授】 B01 に関しては、2019 年後半に予定される KAGRA の観測に備えて、データ解析パイプラインを開発したほか、GW170817 の LIGO データを独自に解析し、Livingston と Hanford のデータ間に潮汐変形率のくい違いを見つけ、また中性子星合体における新たな波形モデルを作ったことなどは評価される。KAGRA の観測からただちにサイエンスの結果を出せるよう引き続き準備するとともに、重力波のラジオメトリ探索コードを開発するなど研究の対象を広げることも期待する。

B02に関しては、MAXIがいち早くGW170817イベントのX線上限値（1日間で26 mCrab）を与えたことは、X線全天モニターを日本が持つことの強みであり評価される。さらに、多様なブラックホールの起源を探るためのMAXIカタログ作成、ガンマ線バーストの統計的研究、ブラックホール天体のX線観測、また中性子星合体の理論的考察など幅広く研究を進めている。X線ガンマ線観測という手段で、KAGRAの観測開始後も領域へ独自の貢献を行っていくことを期待する。

B03に関しては、中性子星合体の光学対応天体の観測は、2019年4月に科学技術分野の文部科学大臣表彰を受賞した結果であり、新学術領域研究全体としても特筆すべき成果である。研究班としては中性子星合体における電磁波放射やr過程元素である放出物の化学組成の計算、J-GEMネットワークの整備なども着々と進めており、今後の重力波イベントの発生に対して機動力のある光赤外線観測を行っていくことを期待する。

総括班と領域全体に関しては、領域シンポジウム、全体会議、合宿形式の研究会などの開催、ホームページでの発信、ニュースレター発行など、領域全体の連携を深める活動やアウトリーチ活動を着実に実施している。また原子核物理など他分野との連携へ向けた取り組み、若手の海外派遣、海外からの研究者招へいなど、領域の裾野の拡大や国際化へも力を入れている。今後KAGRAの本格的な活動へ向けて、本領域が中心となって国際的な重力波研究をリードしていくことを期待する。

【鈴木英之氏 東理大理工物理 教授】 重力崩壊型超新星爆発に伴う重力波を扱う計画研究C01に関しては、大規模な3次元数値シミュレーションを行い、爆発機構として重要な役割を果たすSASIと重力波の円偏光成分の関係を指摘し、また重力波とニュートリノの同時観測などによって超新星コアの情報を引き出すさまざまな解析手法を検討している。これらの研究が、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連携によって進められており、新学術領域研究課題として適切に実施されていると言える。また、研究グループごとに超新星シミュレーションの結果が異なる状況を改善すべく世界的な共同研究が始まったことや、大質量星のブラックホール形成を一般相対論的3次元数値シミュレーションによって詳しく調べようとする研究の着手など、今後の発展にさらに大きな魅力を感じることができる。

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、世界で最も性能の高い検出器であるSuper-Kamiokande(SK)の改修が順調に進んでおり、本研究課題の期間内にガドリニウムを加えることで、超新星ニュートリノの観測精度向上が実現できそうである。また、ニュートリノに対する6次元位相空間の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、まず軸対称系を対象とした研究を着実に進めている。京コンピュータの後継となる富嶽でのより大規模な研究に向けて順調に進んでいると言える。また、実験系研究者と理論系研究者の共同研究や領域内の計画研究間(C01+C02)の共同研究も行われている。

残りの研究期間では、中性子星合体時の重力波観測から得られる状態方程式に対する知見を活用して、さらなる研究成果を期待したい。

【大橋正健氏 東京大学宇宙線研究所 教授】 A01に関しては、連星ブラックホールの合体という一般相対性理論の検証には最適のイベントが既に10以上観測されていることで、この研究課題の進展は著しいものがある。これは、周辺に物質が存在しないおかげで、純粋に時空の物理で記述されるからである。特に、合体前後の重力波形には重力理論の検証を可能にする多くの情報が含まれているはずである。重力理論に対する独自の制限を与える結果が出てきていることを筆頭に、現在も精力的に研究が進められているが、今後もさらにそれを発展させ、是非、大きな研究成果を上げてほしい。これは過大な期待ではなく、この研究グループにはその力があると考えている。

B01に関しては、いよいよ連星中性子星の合体イベントが観測できるようになってきた。ここには時空の物理だけでなく、中性子星の状態方程式や原子核理論など数多くの情報が含まれており、重力波観測がトリガーを引く宇宙物理学にとって非常に重要な研究対象である。2019年度中にKAGRAは国際共同観測03に参加予定であり、重力波源の方向特定に寄与できる日も近くなっている。連星中性子星合体から時間をおかずに電磁場観測が始まれば、そこでどのような物理過程が進んでいるかを検証できるようになるため、この研究課題も進展するはずである。それに貢献しようという当該研究グループの準備は順調であり、数値相対論による世界最高精度の重力波波形を用いた解析が進んでいることが、特に高く評価できる。

C01に関しては、今後の重力波観測で、最も待ち望まれているのが、超新星爆発からの重力波を検出することであろう。これは非対称性から生まれる重力波を如何に予測し、観測と照らし合わせるかという重力波天文学最大のチャレンジになる可能性がある。そのバースト波動的な波形を予測するための計算機群が順調に整備されつつあり、数値計算により円偏モードの存在を予言し、独自の解析手法を発展させている点など、データ解析に関する研究も着実に進化していると判断できる。全体として、計画通り進んでいると評価する。

10. 今後の研究領域の推進方策（2 ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

〈基本的な研究戦略〉 基本的な研究戦略はこれまでと変わらない

【**優位性の活用**】 KAGRA が観測を開始することにより LIGO-Virgo-KAGRA からの重力波データが得られるという強みを最大限に活かす。また、本領域の基礎となる前新学術領域で進められた重力波データ解析と多波長フォローアップ観測の体制を大いに活用する。

【**主な重力波源**】 本領域の継続期間内に観測される可能性が高い重力波源に焦点を絞り、(A) BH 連星の物理、(B) NS を含む連星の物理、(C) 超新星の物理の 3 つの班を構成し、推進する。同一の重力波源を対象とする各班内では、計画研究間の垣根を超えて密接に連携する。

【**理論とデータ解析の連動**】 それぞれの班において、理論とデータ解析の密接な連携で、先駆的な重力波データ解析の準備を進め重力波データからの物理的情報を最大限に引き出す。

【**新しい物理学・天文学の創成**】 下図に示したように重力波観測から広がる研究テーマを厳選し、重力波観測から波及する研究分野を推進する。重力波天体のフォローアップ観測と理論研究が一体となり研究を進める。また、既存の観測機器の活用で最大限の成果の達成を目指す。

以上を踏まえて、**領域推進に当たってのビジョンとして、以下の 3 つを掲げてきた。**

【**相乗効果**】 本領域は、宇宙論、星形成、銀河の化学進化などさまざまなテーマを取りこんでいる。これらの分野は重力波と密接な連携なしにも、これまで発展してきた。しかし、重力波とそのフォローアップ観測という新たな宇宙観測の手段を我々が手にしつつある今、それぞれの研究を重力波との関係で見直すことで全く違った視点が生まれてくる。このためには異なる分野の研究者間の継続的な議論を通じて相互の理解を深めることが必須である。この相乗効果こそが、本領域の狙いであり、班や計画研究の構成にもその点を反映させている。

【**国際競争力**】 本領域の成功には重力波物理学・天文学の創成という共通の意識を徹底することが第一である。国際的優位性を持つこの領域が、確固たる成果をあげることは日本の重力波研究の成功のために不可欠の要素である。そのため、各計画研究は、研究成果が国際的に認知されるような研究であるかどうかを互いに厳しい目で評価し、改善点について忌憚ない意見を出し合う。また、国際活動支援班を中心に積極的に人材派遣を行い、海外の動向を調査、報告し、最新の情報を領域内で共有するとともに、必要な海外機関との連携を推進する。

【**人材育成**】 領域の発展のために、公募研究、研究員の雇用を活用して連携する研究者を拡大する。特に、研究員には領域の全体会議等に主体的に関与してもらうことで、将来を担う人材の育成につなげる。また、将来を見据えた領域の発展のために、各計画研究に事務担当として若手研究者を起用し、領域運営にも関わる。

〈今後の展開として新しい点〉 重力波観測 LIGO/Virgo O3 がすでに開始されている。これまでの観測 O1, O2 以上の頻度で多くの重力波候補イベントが報告されており、フォローアップ観測が進められている。実際のイベントの解釈と、その後のフォローアップ観測の戦略を考える上で領域全体の会議、および、総括班会議の役割はさらに増すことになる。このような状況の中で、すでに、フォローアップ観測の中心を担う B 班を軸とした第一回目の全体ワークショップを 6 月末に予定している。加えて、平成 31 年度秋には、いよいよ KAGRA による実際の重力波観測データの取得が開始される予定である。LIGO/Virgo とのデータ共有が開始されれば、最新のデータをいち早く解析する機会を得ることになる。それに向けて効率を最大化するように連携を強化していく必要がある。A01, B01, C01 の重力波データ解析にかかわる各計画研究共同のミーティングを頻繁に開催し、これに対応する。

〈**公募研究の活用**〉 公募研究としては以下のような研究に重点をおきたい。まず、科学的目標が散漫にならないように計画研究に含めなかった、1) さまざまな重力波源の検出手法の開発、2) 超大質量星崩壊からの重力波、3) 超巨大 BH の形成、4) 本領域に含まれない電波などの観測機器を用いた重力波天体の探査、5) BH シャドウによる BH 時空の探査、6) 将来の重力波対応天体観測の進展に向けた基礎的開発、等の研究。また、計画研究の内容をさらに広く、あるいは、深く捉えた場合に広がる関連研究分野、例えば、1) 新奇な重力波源の提案、2) NS における原子核物理、3) 連星進化のモデルの研究、4) 位置天文学から BH 連星を探査、などがある。この他にも、今後、関連性が深まり連携が必要とされる研究テーマが次々と提案されると期待される。重力波研究の爆発的進展の時期において、世界的な研究が本領域から生み出されることが目的であり、そのような観点から独創性と国際的競争力に富む計画を採用したい。また、領域全体として、重力波検出から広がる新しい物理学・天文学の創出というキーワードのもとに有機的につながる研究を重視する。

〈総括班、および、各計画研究の推進方策として、特記すべき事項〉

【総括班】総括班会議を毎月開催し、各計画研究代表者と事務局代表が計画研究間の連携のあり方をはじめ、運営の重要事項について議論し、領域全体の研究が発展するように方針を策定する。また、各計画研究の進捗状況についての報告と相互評価、全体会議、および、領域シンポジウム等の企画、内容と日程の調整、反省などをおこなう。加えて、総括班は派遣、招へい、小研究会採択などを決定する。国際会議等への派遣に関しては、全体会議の場でのハイライトの報告を義務付け、領域全体に情報を還元する。

全体会議を3回開催し、包括的なレビュー、最近の進展、展望の報告を受け、領域構成員全員で議論を深める。また、領域シンポジウムを、各計画研究の成果報告を中心に、招待講演者によるレビューなどを含め、3日間の日程で開催する。

国際活動支援としては、1)組織的な人材派遣(国際会議・ワークショップをリストアップし、重要度の高い会議に確実に人員を派遣する。派遣された人は全体会議の場で責任を持って会議の内容を咀嚼し報告) 2)重要な成果の公表の促進 3)共同研究推進のための人材派遣 4)有力な海外の研究者の招聘 5)海外の動向の調査・分析、の5つの活動を推進する。アウトリーチ活動は各計画研究と連携し推進し、総括班が領域内の全ての情報を集約する。領域の目的説明、および、活動報告を含むHPを作成し内容を充実させるとともに、入門セミナーの企画、解説記事の依頼、講演会の企画を総括班会議で決定する。

【重力波データ解析に関わる研究(A01-B01-C01)】これまでの活動に加え、KAGRAの観測網への参加によって新たに必要となるLIGO/Virgoグループとのデータ共有、KAGRA実データから重力波検出と重力理論の検証にも対応する。KAGRAがLIGO/Virgoとデータ共有を進める中、どのような形で国際的な共同研究に加わるのか大筋が見えてきた段階である。その際に本計画研究も存在感を示すことができるようにするために、疑似データや過去のデータを用いて、理論的知見にもとづく新しい解析の提案の優位性を示す論文をまとめ、戦略的にアピールしていく。

【A班(A01-A02-A03)】日本では拡張重力理論が盛んに研究されており、世界をリードする業績を挙げている。本領域では重力波観測に触発された重力理論・宇宙論の研究の新展開を目指す(A02)。孤立した大質量連星形成、星団中の連星形成それぞれについてこれまでの計画研究で整備した数値計算コードを用いて大規模かつ系統的なシミュレーションを行う。最終的な目標はBH連星形成シナリオの峻別であるので、シミュレーション結果と重力波観測データを具体的に比較し、効率よく各シナリオを特定する方法論をデータ解析のグループと連携して確立する。シミュレーションの計算量が膨大になった場合は有効かつ最低限必要な計算設定を構築しなおすことによって、臨機応変に問題に対処する(A03)。今後、BH連星合体重力波イベントは少なくとも1年間に10程度以上は検出される。これらの実データを用いてさらに広いクラスの重力理論のテストを実行するとともに、イベントの質量分布やスピンの分布などを解析し、BH連星の起源を解き明かすこといつなげる。

【B班(B01-B02-B03)】理論研究では、GW170817で得られた知見を踏まえ、中性子星合体直後の動的な質量放出と、その後の降着円盤からの質量放出の全体像を明らかにすることを目標とし、数値相対論シミュレーションを行う。また、その結果を用いて輻射輸送計算を行い、実際の観測量との関係を明らかにする。また、重力波イベントからの電磁波放射の理論解釈と今後の予言、GRBとの関連、ブラックホールの起源や分布に関する考察を継続する。観測研究では、重力波の第三期観測O3で検出される重力波イベントのMAXI、Fermi、Swift、CALETや地上の望遠鏡によるフォローアップ観測を行う。重力波観測の休止期間には、J-GEMネットワークのさらなる観測機能強化を行う。特に、電磁波対応天体の搜索観測に用いる共通データ管理システムの増強と、すばる望遠鏡Hyper Suprime-Camのデータ解析の自動化に向けたシステム開発を行う。

【C班(C01-C02)】新たなデータ解析法の応用：様々な質量をもつ親星に対して行った新たな3D超新星シミュレーションから得られた重力波波形に対して詳細な解析を行い、波形の特徴を精査する。また、新しいニュートリノ反応率を用いた数値コードを用い、高速自転星の超新星シミュレーションを実行し、重力波シグナルの円偏光強度について調べ、その観測可能性・ニュートリノシグナルとの相関を定量的に明らかにする。上記の研究で得られる系統的データを用い、まずLIGOの公開データ、更にはKAGRAを始めとする次世代干渉計のデータにおいて、超新星重力波の系統的探索を世界に先駆けて行うと同時に、近傍の超新星イベントに備える(C01)。2018年度中にスーパーカミオカンデの改良工事が終了し、今後はガドリニウムを導入したオペレーションを開始する予定である。これにより雑音事象を劇的に削減することが可能となり、世界初の超新星背景ニュートリノの発見を目指す。また理論面では超新星背景ニュートリノおよび近傍の超新星からのニュートリノバーストの観測シグナルを予測するために、超新星爆発の数値シミュレーションをより網羅的に行なっていく(C02)。