

領域略称名：重力波天体  
領域番号：2402

平成29年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」

(領域設定期間)

平成24年度～平成28年度

平成29年6月

領域代表者 (京都大学・名誉教授・中村 卓史)

# 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	6
2. 研究領域の設定目的の達成度	8
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	11
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	12
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	13
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	16
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	20
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	22
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	26
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	27
11. 総括班評価者による評価	28

**研究組織** (総括：総括班, 計画：総括班以外の計画研究, 公募：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 総括	240103001 重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開の総括的研究	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	中村 卓史	京都大学・名誉教授	11
A01 計画	24013002 重力波天体の X 線・ $\gamma$ 線放射の探索	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	河合 誠之	東京工業大学・理工学研究科・教授	9
A02 計画	24013003 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	吉田 道利	広島大学・宇宙科学センター・教授	8
A03 計画	24013004 超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	ヴァギンス マーク	東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任教授	8
A04 計画	24013005 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	神田 展行	大阪市立大学・理学研究科・教授	8
A05 計画	24013006 重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	田中 貴浩	京都大学・理学研究科・教授	9
統括・支援・計画研究 計 6 件					
A01 公募	25103507 重力波と電磁波の同時検出を目指した全天監視型 X 線撮像検出器の開発	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	米徳 大輔	金沢大学, 数物科学系, 准教授	1
A02 公募	25103502 天文観測用高感度 CMOS センサの開発	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	酒向 重行	東京大学, 理学(系)研究科(研究院), 助教	2
A02 公募	25103503 新しいミリ波サブミリ波観測技術によるガンマ線バースト初期残光の探索	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	田村 陽一	東京大学, 理学(系)研究科(研究院), 助教	4

A02 公募	25103508 広視野望遠鏡を利用した重力波天体の光学観測	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	阿部 文雄	名古屋大学, 太陽地球環境研究所, 准教授	4
A02 公募	25103509 特殊減光フィルタを用いた近赤外線で明るい重力波源の観測	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	永山 貴宏	鹿児島大学, 理工学研究科, 准教授	1
A02 公募	25103515 超高頻度サーベイ観測による短時間突発天体の検出	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	田中 雅臣	国立天文台, 理論研究部, 助教	1
A03 公募	25103501 KamLAND による近傍超新星爆発の観測	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	石徹白 晃治	東北大学, ニュートリノ科学研究センター, 助教	1
A03 公募	25103513 ガドリニウムの熱中性子吸収反応でのガンマ線の相関測定	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	作田 誠	岡山大学, 自然科学研究科, 教授	3
A04 公募	25103504 非ガウスノイズを取り入れた重力波データ解析方法の研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	横山 順一	東京大学, 理学(系)研究科(研究院), 教授	2
A04 公募	25103506 重力波に関する新知見を導き出す超高精度解析技術とその高速計算組み込み技術の開発	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	廣林 茂樹	富山大学, 大学院理工学研究部(工学), 教授	1
A04 公募	25103516 低温干渉計型重力波検出器における突発性雑音低減	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	辰巳 大輔	国立天文台, 光赤外研究部, 助教	3
A05 公募	25103505 強い重力場での修正重力理論の検証に向けた理論的研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	須山 輝明	東京大学, 理学(系)研究科(研究院), 助教	1
A05 公募	25103510 ブラックホールー磁場中性子星合体に関する数値的研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	木内 建太	京都大学, 基礎物理学研究所, 研究員	1

A05 公募	25103511 ニュートリノ駆動型超 新星爆発からの重力波	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	諏訪 雄大	京都大学, 基礎物理学研究所, 准教授	2
A05 公募	25103512 コンパクト天体連星合 体における質量放出と R 過程元素合成による 電磁波放射	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	関口 雄一郎	京都大学, 基礎物理学研究所, 研究 員	1
A05 公募	25103514 マグネター星震学に向 けた基礎理論	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	小畷 康史	広島大学, 理学(系)研究科(研究院), 教授	1
A01 公募	15H00773 高感度軟ガンマ線観測 による重力波天体キロ ノバでの重元素合成の 探査	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	寺田 幸功	埼玉大学, 理工学研究科, 准教授	6
A01 公募	15H00780 超小型衛星の複眼配置 で展開する重力波対応 天体の X 線撮像による 同定	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	米徳 大輔	金沢大学, 数物科学系, 教授	1
A01 公募	15H00785 重力波天体の即時精密 X 線分光観測に向けた 基盤構築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	山田 真也	首都大学東京, 理工学研究科, 助教	1
A02 公募	15H00774 可視光同時撮像による 重力波天体の同定と出 現環境の研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	土居 守	東京大学, 大学院理学系研究科(理 学部), 教授	2
A02 公募	15H00781 MOA II 1.8m 望遠鏡に よる重力波天体の追観 測	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	阿部 文雄	名古屋大学, 宇宙地球環境研究所, 准教授	4
A02 公募	15H00784 多様な時間スケールを 持つ突発電波天体の観 測	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	新沼 浩太郎	山口大学, 創成科学研究科, 准教授	7
A02 公募	15H00788 重力波源の可視光対応 天体探査	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	田中 雅臣	国立天文台, 理論研究部, 助教	1

A04 公募	15H00778 ブラックホール準固有振動がもたらす重力波の観測	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	宗宮 健太郎	東京工業大学, 理学院, 准教授	1
A04 公募	15H00779 超解析精度技術を応用した重力波の解析システムの開発とその評価に関する研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	廣林 茂樹	富山大学, 大学院理工学研究部(工学), 教授	2
A04 公募	15H00787 重力波データ解析における統計的方法論の整備	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	間野 修平	統計数理研究所, 数理・推論研究系, 准教授	2
A05 公募	15H00772 重力波検出器を用いた重力相互作用におけるパリティ破れの探索に向けた理論的研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	浅田 秀樹	弘前大学, 理工学研究科, 教授	1
A05 公募	15H00776 巨大ブラックホールの起源の理論的研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	細川 隆史	東京大学, 大学院理学系研究科(理学部), 助教	3
A05 公募	15H00777 修正重力理論におけるコンパクト天体からの重力波	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	須山 輝明	東京大学, 大学院理学系研究科(理学部), 助教	1
A05 公募	15H00782 コンパクト天体連星合体における $r$ 過程元素合成と電磁波放射	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	関口 雄一郎	東邦大学, 理学部, 講師	1
A05 公募	15H00783 傾斜したスピンを持つブラックホールと磁場中性子星合体に関する数値的研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	木内 建太	京都大学, 基礎物理学研究所, 特定研究員	1
A05 公募	15H00789 3次元シミュレーションを用いた超新星からの重力波放出の予言	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	滝脇 知也	国立天文台, 理論研究部, 助教	1
公募研究 計 32 件					

## 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。

応募時には以下のような全体構想であったが、後で述べるように実際に本領域の期間中の2015年9月14日に、**世界初の重力波の直接観測**がなされたので、**今読み返すと隔世の感**があるとともに**我々の構想に基づく予想が極めて正しかった**ことを証明している。

応募時の全体構想をなるべく**文章をそのまま**で以下のように紹介する。領域は目前に迫った重力波観測の時代に、**他の観測との連携体制を構築し、新しい宇宙物理学**を開くことを全体構想としていた。

**その根拠は以下の3点であった。**

### 1. 重力波は存在する!

重力波はアインシュタインが一般相対性理論にもとづいて理論的にその存在を予言した。重力波とは光速で重力による潮汐力の効果が伝わる波である。観測的には連星中性子星の電波パルサー PSR1913+16 の軌道周期 (約28000秒)が1年間に76.94マイクロ秒短くなることがハルスとテラーによる電波観測により確かめられたことにより1989年に重力波の存在が証明された。一般相対性理論によると、連星のように加速度運動している系は重力波を放出してエネルギーを失い、連星間の距離が短くなるとともに公転周期が短くなる。PSR1913+16 の場合、一般相対性理論による理論値と観測値との差は実に僅か 0.1%であった。1993年にハルスとテラーはこの業績によってノーベル物理学賞を受賞した。

### 2 しかし重力波の伝搬と振幅(時空の歪み)はまだ実験的に確かめられていない!

PSR1913+16により重力波の生成が一般相対論の予言通りであることが確かめられはしたが、重力波が理論通りに宇宙空間を伝搬することは確かめられてはいない。すなわち、連星中性子星 PSR1913+16から放出されているはずの約 14000秒周期(=公転周期/2)の重力波による時空の歪みが直接検出された訳ではなく、波動としての位相の伝搬速度や振幅も確かめられていない。このことは一般相対性理論の検証の上で重要なポイントである。宇宙ニュートリノの観測を例にとると、地下実験で検出される太陽ニュートリノが太陽内部核反応の理論の予言値の半分しかないことがニュートリノ振動という大発見を導いた。重力波の場合も宇宙空間での伝搬が理論通りでなければ、ニュートリノ振動のように新しい物理学のフロンティアが現れ、その学術的な意味は測りしれない。一方、重力波が検出されれば、連星中性子星合体や超新星爆発などの破局的な天体现象や、ブラックホールが生成される現場の観測が可能になる。今までの観測手法では深部を見ることができなかった強い重力場で一般相対性理論に支配された天体现象について、宇宙物理学の研究の新しい局面を開くと期待される。

### 3.本格的な重力波観測の時代の幕開けは目前!

米国の LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) と仏・伊連合による Virgo 等のレーザー干渉計は現在、距離約 6000万光年での連星中性子星の合体からの重力波を検出可能であるが、その検出確率は 300年に1回程度でありこのままでは重力波の直接観測は期待できない。そこで、LIGO と Virgoは2015年を目途に検出可能な重力波の振幅を1桁下げ、2016年には連星中性子星の合体からの重力波を年間10イベント程度の検出率で観測を開始する予定である。我が国では「最先端研究基盤事業」に選定された「宇宙線研究所の大型低温重力波望遠鏡(LCGT = Large Cryogenic Gravitational wave Telescope)計画」は腕の長さ3 kmのトンネルを神岡鉱山で掘削し、2013年から2014年にかけて常温で観測をしたのち、2014年から低温鏡により感度高度化を進めて 2016年を目途に LIGOや Virgoと同程度の感度に達する予定である。

#### 上の3点を根拠にして5つの計画研究からなる領域を構成した。

A01では、重力波天体のガンマ線・X線放射を観測するために大立体角X線観測装置を開発するとともに既存の観測衛星を用いて重力波源候補天体現象の観測研究を行う。A02では、A01とも密接に連携して重力波源の可視・赤外線・電波観測をするため可視赤外線広視野観測システムの構築、全地球的観測網の整備、電波観測による重力波天体を含む激変天体の観測体制の整備を行う。A03では、ベテルギウスからアンドロメダ銀河までで起きる超新星爆発に伴うニュートリノ事象に感度を持つ検出器の開発を行う。A04 はデータ解析で、理論が与えたテンプレートと観測データを高速で比較して重力波源と波形を突き止めることにより、到来方向の速報をA01とA02に出し追跡観測を促す。また、ガンマ線、X線、可視・赤外線、ニュートリノ 観測との比較を可能にする重力波のデータ解析もする。A05 は重力波の源・波形の理論で、すでに候補となっている波源の詳しい研究以外にも**全く新しい波源**を考えるのも課題である。

#### この体制で以下のような成果を約束した。

米国、欧州と日本の大型干渉計型重力波検出器は 2016 年にも、連星中性子星の合体等からの重力波を直接観測する情勢である。重力波形と発生源の同定から、一般相対論的に強い重力場での物理現象を究めるのが本領域の目的である。そのために 1)ガンマ線バースト等の**重力波天体からの X線・ガンマ線放射**を探索する。2)**光赤外・電波での対応事象**を探索するために**探索ネットワーク**を構築する。3)神岡鉱山内の水チェレンコフ検出器を改造して、**重力波信号とニュートリノ信号の同時観測**が可能となるようにする。4)電磁波・ニュートリノ等の多様な同時観測が可能になるように、**重力波イベント速報体制**をつくる。5)**新重力波源候補**も含めて予想される重力波波形並びに電磁波・ニュートリノの対応事象の理論的研究を行う。以上の計画研究を密接に推進して、**目前に迫った重力波観測の時代に、宇宙物理学の新展開を期す。**

## 2. 研究領域の設定目的の達成度（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、どの程度達成できたか、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の達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

### 人類初検出の重力波イベントの予言的中：

2016年2月13日にaLIGOは人類初の重力波の直接観測に2015年9月14日に成功したと発表した。重力波源は2つの太陽質量の30倍程度のブラックホール連星の合体に伴うものでありGW150914と呼ばれるが、質量がブラックホール候補のX線星の2倍以上あるのでほとんどの研究者には予想外であり、意外であった。しかし本領域が2015年6月に大阪で開催した国際会議で領域代表者等が宇宙で最初にできた初代星では、典型的な質量が太陽質量の30倍程度のブラックホール連星が形成され、それが現在合体すると主張し、aLIGOの2015年9月からの観測で検出されると予言した。この予言は会議の総括セッションでも大変注目された。予言はまさに的中したが、GW150914と同様のブラックホール連星の合体は2017年1月4日にも検出されたので、まぐれ当たりの予言ではないと思われる。

### 国際的重力波の追観測への貢献：

計画研究A01とA02では予定を1年早めて2015年からaLIGOとの協定(MOU)の下で追観測を実施した。2016年11月から始まったaLIGOの2回目の観測とA01/A02の追観測は予算を繰り越して現時点(2017/6/7)でも実施中である。引き続き大きな成果を期待したい。またA03も発見された重力波イベントに付随する事象の探索を行った。

### KAGRAのデータ解析と理論への貢献：

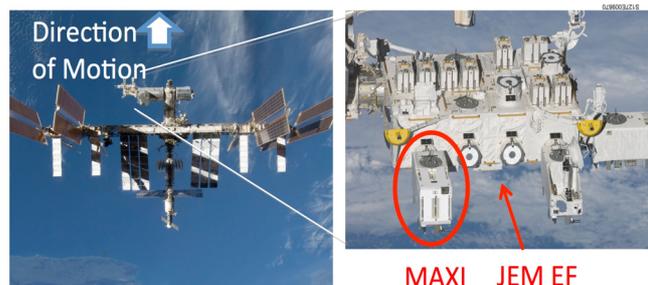
A04では日本のKAGRA実験のデータ受信と解析を達成した。A05では上述の重力波源の予想を始め最前線の研究を推進した。

以上のように、領域全体として当初の設定目的を十分に達成し、一部では予想を上回る成果を得た。

### 計画研究A01「重力波天体からのX線・γ線放射の探索」

目的は、中性子星連星合体や超新星などの天体現象において重力波にほぼ同期して出現するX線・ガンマ線対応天体を探索することと、重力波発生に関わる天体である中性子星、ブラックホール、およびガンマ線バーストを多様な手段で観測することによって、宇宙における重力波発生の物理的過程や発生源となる天体の起源を明らかにすることである。LIGO-Virgo Science Collaborationと覚書を結んでLIGOから重力波発生の速報を受け取り、ISS上で全天X線監視装置MAXIおよびCALETガンマ線バーストモニターCGBMにより対応するX線・ガンマ線源を探索し、複数のイベントに対して上限値を得た。LIGO 01で検出された重力波はブラックホールの合体のため、電磁波放射が検出されなかったことは意外ではないが、本研究によって開発した重力波源の大きな誤差領域から新X線源を迅速に探索するシステムは、今後、重力波望遠鏡の感度が向上して中性子星連星合体が検出された場合に活用される。また、突発的な重力波のX線対応天体をより効率良く検出するための軟X線大立体角カメラを主要観測装置とするWF-MAXIの概念検討と実験室モデル開発を行い、ISS搭載ミッションとしての解を得て概念検討書、システム仕様書等を完成させ、本計画研究としての目標を達成した。この計画は平成26年に宇宙科学研究所小規模ミッション公募に応募したが、不採択となったため設計を見直し(中間評価指摘事項への対応)、共用バスを用いて低コストを実現した結果、平成27年の再応募では宇宙理学委員会の審査でプロジェクト化が推薦された。一方、ブラックホール連星、中性子星の観測研究においてはMAXI, Swift, Fermi等を用いた実施をし、多数の新天体の発見と同定、GRBの観測などを国際コミュニティに速報するとともに、データを公開し、解析結果を学術誌に発表した。

公募研究では、重力波対応X線突発天体探索を目的として、X線撮像観測器の開発、性能検証、超小型衛星搭載の開発、連星中性子星で合成された重元素からの核ガンマ線の推定、数値計算を用いた将来の高感度ガンマ線検出器の概念設計、重力波天体のX線精密分



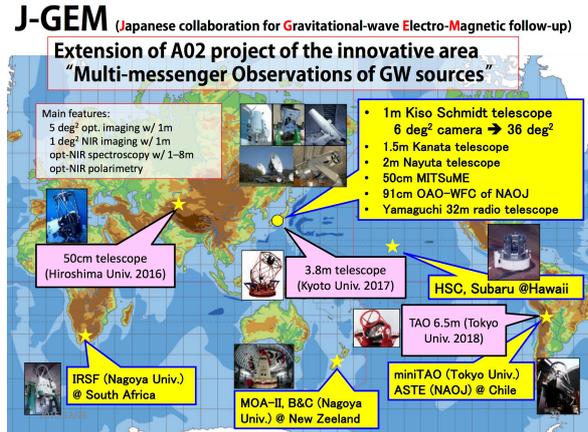
ISSおよびMAXIが取り付けられたJEM EF(日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォーム)の地球周回軌道上の写真。MAXIはISSの軌道周期92分ごとに全天のX線源を走査・探索する。

光、突発天体観測、精密分光などの研究が行われた。

### 計画研究 A02 「天体重力波の光学赤外線対応現象の探索」

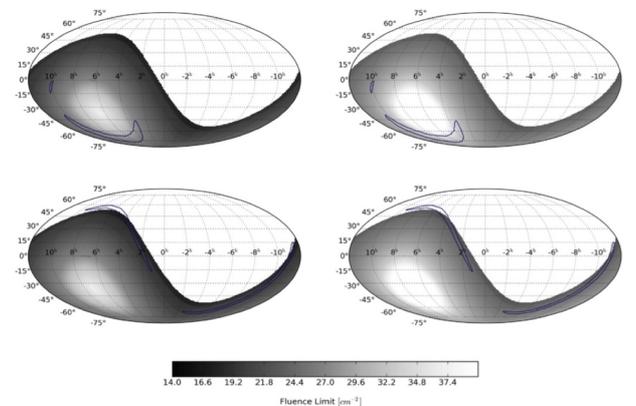
A02 では、重力波の光赤外・電波対応現象を探索するための探索ネットワークの構築を目指した。そのために、(1)木曾観測所シュミット望遠鏡に搭載する超広視野 CMOS カメラ Tomo-e の開発、(2)国立天文台岡山天体物理観測所の 91cm 望遠鏡を改造し、近赤外線広視野カメラ OAO-WFC の開発および運用、(3)岡山天体物理観測所の 188cm 望遠鏡および建設中の 3.8m 望遠鏡用の面分光装置の開発、(4)50cm ロボット望遠鏡および可視三色同時カメラの開発と中国・チベットへの設置、の 4 つの装置開発計画を進めることにより、広視野撮像・分光、多波長観測、他地域観測網の整備を行うこととした。同時に、世界に散らばる日本の望遠鏡群の協調による探索ネットワークを作り、世界の重力波検出器からのアラートを受けて即時追跡観測が行えるシステムを構築する計画であった。

装置開発計画の(2)および(3)については完全にその目的を達成し、いずれも現在は開発が終了して定常運用状態となっている。装置計画(1)については、Tomo-e のプロトタイプ製作および試験観測・定常運用に成功し、CMOS カメラの天文応用に大きな可能性を拓くとともに、実機製作への基礎開発をすべて終了することができた。装置計画(4)では、望遠鏡+観測装置をチベットの観測サイトまで運搬・仮設置するところまで完了した。仮設置時に行った試験観測により、国内設置の 1m 望遠鏡に匹敵する感度を達成していることを確認した。ただし、主に中国の国内事情により、平成 26 年度よりチベットへの入国が著しく制限された状況が続いており、望遠鏡の本格設置にまでは至っていない。一方、A02 が中心となって構築した重力波の電磁波対応現象探索のための地上観測施設ネットワーク J-GEM (Japanese network of Gravitational wave Electro-Magnetic follow-up observations) は、米欧の重力波望遠鏡、LIGO および Virgo の合同研究チームと研究協定 (MoU) を結び (平成 26 年 4 月 5 日)、LIGO・Virgo の初期運用 (01) における重力波検出に対応して、実際に電磁波追跡を行うことに成功した。LIGO による人類初の重力波検出である GW150914 および 2 番目の重力波イベント GW151226 について、電磁波探索観測を実施した。GW151226 では、すばる望遠鏡も駆使しておよそ 1000 平方度に及ぶ天域を探索した。LIGO の二回目の定常運用 (02) でも探索観測を継続した。01 での二つの追跡観測結果については査読論文として発表した。実際に複数の重力波イベントの追跡探索観測を実施できたことは、計画立案当初に目指したレベルを大きく超えた成果である。装置計画の達成度合いに若干の遅れが見られるが、それにはメーカーの素子製作遅れ、政治的事情などやむを得ない事情が絡んでおり、「重力波イベントの電磁波探索を実施する」という大目標を達成したことと合わせて、計画研究 A02 の目標はほぼ達成されたと言えることができる。



### 計画研究 A03 「超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究」

計画研究 A03 では、神岡鉱山内に設置された既存の水チェレンコフ検出器を、近傍で超新星爆発が起こった時に、重力波との相関信号を検出できるように世界最先端の超新星ニュートリノ検出器に改造することであった。スーパーカミオカンデ近くの地下 1000m に設置された 200 トン水チェレンコフ検出器は、もともとはガドリニウム塩を水チェレンコフ検出器に溶解する効果を研究するための調査開発用テスト検出器として設計された。ガドリニウムはニュートリノ反応によって発生した中性子を高い効率で検出できることから、様々な物理目的に対して有効である。特に超新星ニュートリノに対しては、電子ニュートリノ事象と反電子ニュートリノ事象を弁別できることから、超新星爆発メカニズムの解明にとって重要な情報を与える。2014 年 10 月より EGADS 検出器は満水状態になり、段階的に硫酸ガドリニウムを溶解した。2015 年 4 月には目標であった 0.2% の導入に成功し、この時点で EGADS 検出器は世界初の



スーパーカミオカンデにおける 1.6GeV-100PeV エネルギー領域の 90% C.L. Fluence limit。単位は  $[cm^2]$ 。GW150914(上段), GW151226(下段), ニュートリノ信号 (左), 反ニュートリノ信号 (右)

ガドリニウム水チェレンコフ検出器として運用を開始した。検出器は高精度で校正され、データ取得は中断することなく1日24時間行われており、近傍で超新星爆発が起こることを待っている状態にある。以上の通り、EGADSを最先端の超新星ニュートリノ検出器に改造し、安定運用するという当初の目的は達成された。またLIGOによる重力波イベントGW150914およびGW151226については、スーパーカミオカンデを用いてニュートリノ信号との相関解析を行った。信号は検出されなかったが、3.5MeVから100PeVに渡る広いエネルギー領域において、上限値を与えた。

公募研究では、超新星爆発前兆ニュートリノの研究、ガドリニウムのガンマ線生成の実験が行われた。

#### 計画研究 A04「多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究」

A04では、日本における重力波検出実験KAGRAのデータ解析を推進し、実際の観測データを解析することが第1の目的であった。また同時に、電磁波やニュートリノ観測との連携、若手研究者の育成等も含んでの体制づくり、そして、重力波天体事象のサイエンスについての研究も掲げられた。これらの目的は概ね達成できたと言える。重力波データ解析の推進については、2015年3-4月に行われたKAGRAの観測データを、岐阜県神岡のKAGRAトンネル坑内から3秒間の遅延で連続転送に成功し、その後本領域の研究期間終了後もデータ転送は継続している。また、日本の研究者が主体となったデータ解析ライブラリKAGALIも第1版が作成された。KAGRAの観測データの解析も実行された。実際の重力波事象のデータ解析の機会



A04で導入した計算システム。仮想プライベートネットワークでKAGRAデータ転送系と連結。

は、米国LIGOの初観測によってもたらされた。LIGOは初観測事象GW150914の発表と同時にその観測データを公開し、我々も間髪を入れずにそれを解析し、発表の翌日には独自に重力波波形を抽出した。LIGO公開データを用いた研究は、単純な探索にとどまらず、新しい時間-周波数解析手法を用いたブラックホール準固有振動などの解析や、重力波源パラメータ決定精度の検討などが試みられた。本領域の期間内に期待通りに重力波が検出され、そのデータをA04が検証できたのは予想以上の成果であり、単なる探索実行を超えて、どのようにして重力波イベントのサイエンスを引き出すかの研究も進んだと言える。また多数の解説や一般向けの説明にも大いに活躍した。これらの挑戦的な試みは、A04で雇用した若手研究員も積極的に取り組んだ。データ解析に携わる若手（ポスドク、大学院生）も増え、人材育成面でも順調であったと言える。

公募研究では、非ガウス性雑音の扱いについての数理的な取り扱いについての研究、突発的な雑音の源について実験的な研究、新しい信号の解析手法を重力波波形に用いる研究が進められた。こうした研究は、物理学と工学や情報学との融合的な研究でもある。

#### 計画研究 A05「重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究」

A05では重力波観測から成果を出すために理論家の果たす役割は今まで以上に重要であるという認識にたち、既存の重力波源の詳しい理論的研究に加え、全く新しい重力波源の追求をおこなった。具体的には5つの重点項目を立てて取り組んだが5の研究成果に説明するように、それぞれに特筆すべき成果を挙げた。特に、30太陽質量のブラックホールからなる連星が初代星を起源とする連星進化の計算によって、もっとも観測されやすい重力波源である可能性があることを指摘した論文は、LIGOチームによるGW150914の起源を議論した論文においても驚くべき観測との一致であると引用されている。総査読付き発表論文数は100を越えており、その中には、引用数が既に100を越えるものもあり、引用数が50を超えるものは7件ある(spires)。

また、採用したPDは現時点で全員研究活動を続けており、うち3名は准教授(1)、特任助教(2)の職を得ることに成功した。加えて、計画研究A05では毎年合宿を開き、計画研究全体の裾野を広げることにとめてきた。合宿はA04などの他の計画研究と合同で開かれることもしばしばあり、研究成果に示すように複数のデータ解析や観測の計画研究との共同研究による論文の発表にも繋がった。また、多数の国際研究会の主催、共催を通じて重力波周辺分野の理論研究推進に貢献した。

### 3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

計画研究 A01 の MAXI による観測において、軌道上の観測装置の経年変化が生じたが、週三回のチーム TV 会議および 1~2 ヶ月ごとに行われる対面チーム会議で観測装置の状態と観測結果への影響を検討し、比例計数管に印加する電圧の調整と校正データの更新を随時行って、X 線源の位置決定など科学的成果への影響を最小限にとどめた。A01 の広天域軟 X 線監視装置 WF-MAXI の開発においては、ISS 搭載ミッションとして概念設計の検討を実施して、JAXA 宇宙科学研究所の小規模プロジェクト公募に平成 26 年 2 月に応募したが、重力波の検出発表 2 年前に行われた宇宙理学委員会の審査において、重力波対応天体探索は高リスクである一方、確実に期待される成果に対しては費用が高すぎる（資金上限は年度あたり 10 億円という制限に対して約 40 億円/5 年）ことを大きな理由として採択にいたらなかった。これに対しては、この公募後に開発された ISS 共用バスを活用して低コスト化した設計を実施し、翌平成 27 年に総額 10 億円未満の枠で再度小規模プロジェクトに応募し、宇宙理学委員会の審査の結果プロジェクト化が推薦され、本研究の目的であるミッション開発（概念検討と観測装置の試作・評価まで）は達成した。（当初計画から、搭載品詳細設計・製作・ミッション実施は本研究の成果に基づき、本研究の枠外の JAXA 資金で実施することを想定）

計画研究 A02 においては、超広視野 CMOS カメラ Tomo-e の開発に当たって、CMOS センサを供給するメーカーにセンサ開発の遅れが生じた。Tomo-e で使用するセンサは一般販売品と異なるため開発コストもかかり、当初予定よりも装置開発に遅れとコスト増が生じた。そこで、まず 8 個のセンサによるプロトタイプを製作し、読み出し回路やソフトウェア開発を前倒するとともに、プロトタイプによる試験観測・定常運用で性能の洗い出しをして実機開発に繋げる方策を取った。また、50cm ロボット望遠鏡については、平成 26 年度より中国側の政治事情により、チベットへの外国人の入境が著しく制限される事態が生じて望遠鏡・装置の搬入・設置が大幅に遅れた。これについては中国国家天文台や紫金山天文台、および日本大使館とも協力してチベット政府への交渉を続け、ようやく平成 28 年 9 月に望遠鏡・装置をチベットの観測サイトに仮設置するところまでこぎつけた。その後、また入境許可が出ない状況が続いている。

#### 4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価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。

##### <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>

（採択時の審査結果においては、特に指摘を受けた事項はない。）

##### <中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況>

計画研究 A01 においては、中間審査において「WF-MAXI が国際宇宙ステーション搭載不採択となり、計画の見直しが必要」との指摘を受けた。この指摘の対象になったミッション提案は、平成 25 年末に発出された JAXA 宇宙科学研究所の小規模プロジェクト公募の資金区分 A（総額数十億円以下、各年度 10 億円未満）に応募したものだが、重力波検出が公表される 2 年前の平成 26 年に行われた宇宙理学委員会の審査において、重力波対応天体探索は高リスクである一方、確実に期待される成果に対しては費用（約 40 億円/5 年）が高すぎることを大きな理由として採択にいたらなかった。これに対しては、この公募後に開発された ISS 共用バスを活用して低コスト化した設計を実施し、平成 27 年に資金区分 B（総額 10 億円未満）枠で再度小規模プロジェクトに応募し、宇宙理学委員会の審査の結果プロジェクト化が推薦され、本研究の当初目的であるミッション開発（概念検討と観測装置の試作・評価）を一応達成した。

ただし、宇宙科学研究所全体のプログラム見直しの中で結局は 10 億円近い規模の新規プロジェクトの実施は困難になり、WF-MAXI プロジェクト化は見送られ、小規模プロジェクトの公募自体平成 27 年度には発出されなかった。平成 28 年度の JAXA 「小規模計画」公募では 総費用上限が 2 億円へと大幅に引き下げられたため、WF-MAXI を再度提案することは諦め、MAXI が発見した天体を同じ ISS に搭載予定 NASA のミッション NICER が追跡するという OHMAN (Onboard Hookup of MAXI-NICER) を代わりに提案し、現在審査を受けている。このように所期性能をもつ常時広天域 X 線監視ミッションを新たに JAXA のプログラムで実施することが困難になったため、本研究で開発した軟 X 線カメラと硬 X 線モニターの海外ミッションでの搭載機会を探るとともに、重力波対応高エネルギー放射探索という目標を超小型衛星で実現するために観測域を紫外線に変更してミッション成立性を検討した。その概念設計案は平成 28 年度衛星設計コンテストにおいて大賞を獲得した。

中間審査では計画研究 A02 に関して、装置開発の遅れが指摘された。これは主に、(1)50cm ロボット望遠鏡の中国チベットへの設置、(2)木曾超広視野 CMOS カメラの開発遅延、の二項目についてであった。

(1)については、望遠鏡・装置は平成 26 年度には完成しており日本での試験は終了していたが、平成 26 年 9 月よりチベットへの外国人の入境規則が厳格化したため、遅延が生じたものである。中国国家天文台や日本大使館などを通じて交渉を重ね、望遠鏡・装置については平成 28 年 3 月にチベット・阿里に輸送することができた。さらに平成 28 年 6 月にはチベット・ラサマでは入境が許可され、チベット科学技術庁への協力要請をした。この結果、平成 28 年 9 月にチベット・阿里に入境が許可され、阿里サイトにある中国国家天文台ドームへの望遠鏡の仮設置をして、ファーストライトを迎えることができた。この後、またチベットへの入境許可が停止される事態が続いているが、交渉の結果、平成 29 年度秋に入境できる見込みとなった。この時にドーム設置と望遠鏡の本格設置を行い事業が完成する。そのために平成 28 年度の補助金の一部を繰り越した。

(2)については、メーカー側の都合により CMOS センサの開発・納入が遅れ、また当初予想よりもセンサ価格が高額となったため遅延が生じたが、予算の範囲内で 8 個のセンサを使ったプロトタイプ製作を行った。この製作過程で、実機の筐体、センサ配置機構、読み出しシステム、解析ソフトウェア、データマネジメントシステムなどを完成することができた。プロトタイプを用いた試験観測・定常運用にも成功し、性能評価と問題点の洗い出しを行うことができ、予算面の手当さえあればすぐに実機製作にかかるところまで到達した。平成 28 年度からは別予算の獲得を通じて実機製作にかかっている。

## 5. 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）

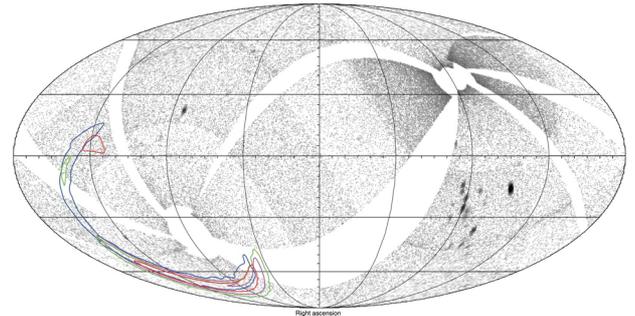
本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

### 計画研究関連

(A01) 全天 X 線監視装置 MAXI により、太陽質量の約 30 倍のブラックホール 2 個の合体によって生じた重力波イベント GW150914 に対する X 線対応天体の探索を行った。LIGO による誤差領域を 90% 以上カバーしたが、新しい X 線源は検出されず、上限値を得た。この上限値は、将来、LIGO あるいは KAGRA によって検出される中性子星連星の合体が予想されるように短いガンマ線バーストを伴えば、“Extended X-ray Emission”を検出するのに十分な感度に相当する。

広天域を覆う視野で重力波対応 X 線放射を監視するミッション WF-MAXI のミッション設計検討を実施し、概念検討書等を完成させた。その主観測装置となる軟 X 線大立体角カメラ SLC を開発し、試作品を製作した。またこのために新規開発した CCD 素子の宇宙利用に関わる性能評価を行った。副観測装置である硬 X 線モニター HXM も信号処理 ASIC を新規開発して試作品を製作し、性能評価を実施した。

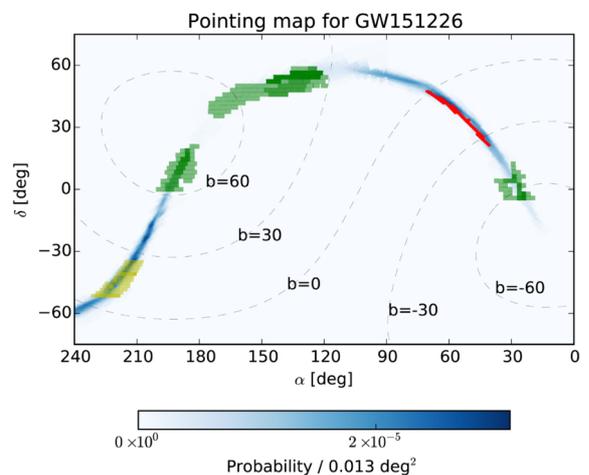
MAXI による突発天体の監視からは、新種の大光度軟 X 線新星 MAXI J0155-744、観測史上最上位の強さを持つ GRB130427A の観測、MAXI カタログ、新しいブラックホール連星の発見などの成果を上げた。



GW150914 発生後の 90 分間（ISS の軌道 1 周回）で得られた MAXI による全天画像。天球図内の左下の等高線は LIGO による誤差領域を表す。

(A02) 平成 28 年 9 月に 50cm ロボット望遠鏡を中国・チベットに仮設置し、現地でのファーストライトおよび試験観測に成功した。平成 27 年 11 月に木曾超広視野 CMOS カメラ Tomo-e のプロトタイプが完成し、木曾観測所にて 3 ヶ月に渡る試験観測を実施した。平成 27 年 4 月に面分光装置が完成し、岡山天体物理観測所にて共同利用観測を実施、ショートガンマ線バーストの追跡観測を試みた。平成 27 年 3 月に赤外線広視野カメラ OAOWFC が完成し定常運用に入った。平成 25 年 4 月に J-GEM を結成し、平成 26 年 4 月に重力波検出器 LIGO および Virgo の開発チームと研究協力協定を交わし、LIGO、Virgo の検出した重力波イベントに対して電磁波追跡観測を実施する国際フォローアップチームの一員となった。その後、平成 26 年 9 月に開始された LIGO の第一定常運用

(01) において、人類初の重力波の直接検出である GW150914、および、それに続く GW151226 の二つのイベントについて、J-GEM を駆使した光赤外線フォローアップ観測を実施した（図）。これらの試みは重力波フォローアップへの重要な貢献と認められ、Abbott et al. (2016a), Abbott et al. (2016b), Morokuma et al. (2016), Yoshida et al. (2017) の 4 つの論文として発表された。特に GW151226 においては、1000 平方度に及ぶ領域を観測し、すばる望遠鏡による観測領域は I バンドで 24 等に到達する深さで観測することに成功し、このイベントに関しては世界で最も深いデータを得ることができた。



GW151226 の位置確率分布（青色。濃い青ほど確率が高い）。横軸は赤経、縦軸は赤緯。J-GEM 共同研究によって、木曾シュミット望遠鏡（緑）、すばる望遠鏡（赤）、MOA-II 望遠鏡（黄色）を用いて合計 1000 平方度に及ぶ範囲のフォローアップ観測に成功した。

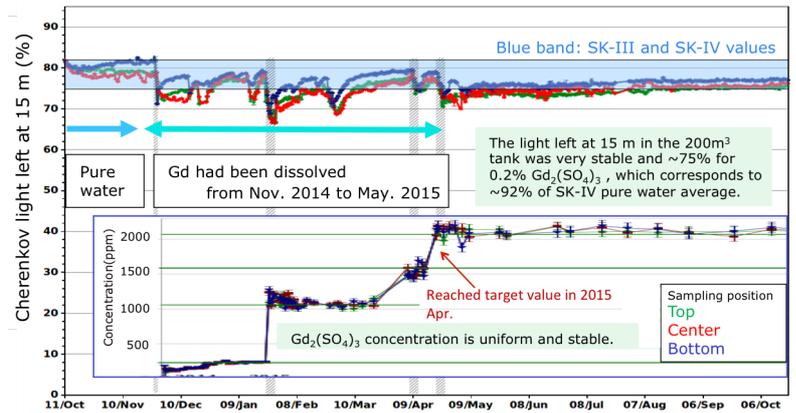
(A03) 世界で最も先進的な水チェレンコフ型超新星ニュートリノ検出器を開発し、継続的に運用してきた。特に水純化システムは絶えず改善を続け、それによりスーパーカミオカンデの超純水と同等の透明度を達成した。（図）このことは超新星ニュートリノの検出を高い効率で行うことを可能にする。水の透明度の向上は水チェレンコフ検出器の成功の鍵のため、その影響は EGADS だけに止まらない。実際、本研究により達成した EGADS 実験の結果に基づいて、2015 年 6 月にスーパーカミオカンデ実験でのガドリニウムの充填

が正式に承認された。

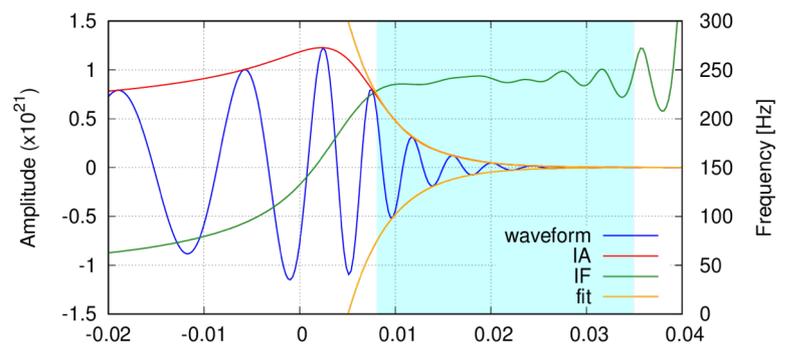
**(A04)** 重力波観測データの低遅延解析システムを構築した。KAGRA の観測データを低遅延 (~3 秒) で転送するシステムを構築し、2016 年 3 月~4 月に行われた KAGRA の最初の観測運転以降、実際にデータの連続転送を行っている。またこの解析システムは、重力波探索解析を実行する環境としても機能している。日本独自の解析ライブラリの開発や、国内の数機関に分かれた計画研究のメンバーが効率的に共同研究できるような仮想ネットワーク化環境なども構築した。データ解析の若手研究者も育成した。これらを通じて、日本の重力波データ解析の中核として機能できたことは大きな成果である。重力波の初観測に関しては、LIGO 実験の公開した重力波観測データを解析し、我々の新しい解析手法の実際のイベントへの適用 (K. Sakai et al. (2016)) などの成果も得られた。重力波検出器データのガウス性 (T. Yamamoto et al, 2016) や多チャンネル相関の解析 (H. Yuzurihara et al, 2016) では、情報学 (統計学) の公募研究者とも協力した研究がなされた。

**(A05)** 5つの重点項目を立てて取り組んだ。それぞれにおける、大きな成果を挙げると、

(1) 「様々な重力波源の探査と重力波波形の解明」については、初代星起源の 30 太陽質量ブラックホール (BH) 連星の存在を連星進化のモデル計算にもとづき予言した。この成果は LIGO チームによる GW150914 の起源を議論した論文のなかで、右に引用したように特別な扱いで紹介された。また、将来の宇宙重力波アンテナをもちいることで、そのような BH 連星の起源が明らかにできることを示した。また、最初の重力波イベントである GW150914 が原始 BH である可能性について、無理のない原始 BH 起源の連星形成のシナリオにもとづいても、既存の宇宙背景放射の観測などと矛盾しないことを示し、Phys. Rev. Lett. 誌の Editor's suggestion に選ばれた (A05: 田中と公募研究: 須山らの共同研究)。(2) 「超新星爆発の物理」に関しては、ボルツマン方程式を差分化してニュートリノ輸送を数値的に解くコードの開発を行い、爆発する軸対称超新星モデルを構築した。特に、慣性系と物質の局所静止系をハイブリッドに扱い、相対論的效果を全て近似なしに扱う方法を新たに提案した。一方、ニュートリノ輸送に近似はあるものの一般相対論的かつ 3 次元のシミュレーション結果に基づき、高速自転するコアにおける流体力学不安定性の成長で形成される回転する 1 本腕からの重力波を計算し、coherent network analysis により、天の川銀河内であれば KAGRA を含む 4 台の第 2 世代重力波検出器を用いることで円偏向を検出でき、コアの回転の証拠とすることを明らかにした。(3) 「電磁波等との同時観測から得られる物理」に関しては中性子星連星合体時に、ブラックホール・中性子星合体からの質量放出は非等方的であることを示した。一方、連星中性子星の合体では、等方的な質量放出に加え、相対論的な物質が全方向に放出されることを示し、それが星間物質を掃く時にできる衝撃波からの放射を電波から X 線にわたって求めた。加えて、ニュートリノ放射、粒子加速に関する様々な可能性を検討した。(4) 「新しい重力波観測・データ解析法の提案」に関しては、古在機構による連星進化における軌道平均法の問題点を示し、重力波観測による残留離心率の観測可能性を指摘した。(5) 「宇宙論・修正重力理論の観点からの重力波研究」においては、近年注目されている質量を持つ重力子が存在するがゴースト不安定性を生じず、宇宙論的なシナリオとしても整合的な双重力理論において、重力波振動という現象が起こることを発見し、そのようなモデルが他の観測と矛盾しないことを示した。



EGADS における水の透明度。縦軸は 15m での減衰率を表す。青いバンドはスーパーカミオカンデ純水での測定値。EGADS がスーパーカミオカンデの透明度を実現していることを表す。挿入図はガドリニウムの濃度を示す。



GW150914 の数値相対論波形をヒルベルト=ハン変換で解析した例。瞬時振幅 (IA), 瞬時周波数 (IF) といった量で波形を評価する。

separations). However, if one assumes that the properties of PopIII massive binaries are not very different from binary populations in the local universe (admittedly a considerable extrapolation), then recently predicted BBH total masses agree astonishingly well with GW150914 and can have sufficiently long merger times to occur in the nearby universe (Kinugawa et al. 2014). This is in contrast to the predicted mass properties

## 公募研究関連

(A01) 公募研究 25103507 では、重力波対応 X 線突発天体探索を目的として、シリコン・ストリップ素子を用いた X 線撮像観測器の開発を行い、試作品を製作して撮像性能を検証した。これを発展させて公募研究 15H00780 において超小型衛星搭載のための開発を進めた。公募研究 15H00773 では連星中性子星で合成された重元素からの核ガンマ線の推定を完了させ、300 キロ電子ボルト以上の軟ガンマ線帯域が合成元素の直接的証拠を検出できる帯域だと同定した。「ひとみ」による軟ガンマ線観測は実現しなかったが、数値計算を用いた将来の高感度ガンマ線検出器の概念設計に着手した。公募研究 15H00785 では重力波天体の X 線精密分光のため、計画中の DIOS 衛星のファスト-リポインティング機能の概念設計を行い、突発天体観測のための低コスト双方向通信実現可能性を確認し、現行のイリジウム衛星を用いた運用シミュレーションも行った。並行して、精密分光に向けた超電導検出器の高レート耐性をビームラインで実験して測定し、数 kHz のレートまで処理できることがわかった。

(A02) Tomo-e のプロトタイプ製作および試験観測・定常運用に関して、カメラには公募研究 25103502 によって開発された高速読み出しシステムが応用されている。

公募研究 25103515 では中性子星合体からの放出物質における輻射輸送シミュレーションを行い、光赤外放射の明るさの予想を観測チームに提供した。

(A03) 公募研究 25103501 では、KamLAND において近傍超新星爆発へ備えたデータ取得系の改良を行なった。近傍天体に限れば KamLAND は超新星爆発以前の核燃焼段階からのニュートリノを検出可能であることを定量的に示すことにも成功した。また公募研究 25103503 では、J-PARC/MLF の熱中性子ビームと高精度エネルギー分解能をもつ Ge 検出器群 (ANNRI) を使い、35 億個の Gd 熱中性子捕獲反応の  $\gamma$  線データを取得し、0.2 MeV から 9.0 MeV に渡る  $\gamma$  線のエネルギー分布の導出に成功した。

(A04) 公募研究 25103504 では非ガウス性雑音の扱いについての理論的、数学的な取り扱いについて新しい提案がなされた。また 25103516 では突発的な雑音の源について実験的な方法での同定や扱いについて研究された。これらの知見は観測データの雑音評価について有用なものである。25103506, 15H00779 では非調和解析 (NHA) と呼ばれる信号の解析手法を重力波波形の解析に用いることが検討された。15H00787 ではデータ解析に統計学の応用が研究された。こうした研究は、物理学と工学や情報学との融合的な研究である。また 15H00778 ではブラックホール準固有振動からの重力波の解析研究が進められた。

(A05) 短いガンマ線バースト (SGRBs) の残光におけるジェットブレイクの観測は、ジェットが 10 度以下の小さな開き角を有することを示している。連星中性子星合体による質量を数値解析し、噴出質量が太陽質量の 0.01 倍であれば、閉じ込められ、必要な開き角を実現することを明らかにした。また、解析の結果は、失敗した SGRB、または、低輝度の新しいタイプのイベントの集団が存在することを示唆している (公募研究 25103512, 15H00782, 15H00783)。連星ブラックホール合体による重力波事象は、原始ブラックホール (PBH) の合体によって説明できることを指摘した。PBH がダークマターの一部を構成するだけで、期待される PBH 合体率を説明可能であり、このシナリオが宇宙マイクロ波背景スペクトル歪みによって、近い将来に検証可能であることを示した (公募研究 15H00777)。

## (領域内の共同研究、横断的な研究、分野を融合した研究)

A05, A04 の共同研究では、種族 III 星起源の理論計算の KAGRA での観測可能性を、最終的な重力波検出器の感度では年間約 100 イベントくらいになることを示した。これはすでに見つかった aLIGO による観測と無矛盾である。また、ショートガンマ線バーストに Yonetoku 関係式を適用することで中性子星合体レートを見積もることで、aLIGO や KAGRA で観測される可能性が十分に高いことを示す論文、双重力理論における重力波振動が aLIGO や KAGRA による重力波観測によって見つかる可能性のあるパラメータ領域が実際に存在することを示す論文 (T. Narikawa, et al, 2014) などを発表した。超新星爆発に関して、ニュートリノ検出 (A03)、重力波 (A04)、超新星の理論 (A05) が協力した。ニュートリノ検出と重力波バースト波形のタイミングを比較することで、超新星のコアの回転の有無が判断できる (T. Yokozawa et al, 2015) という可能性を示した。電磁波観測である A01, A02 と A04 の間で重力波アラートについての技術的な相談については A04, A05 から数名が J-GEM に参加して助言をしている。

公募研究などを通じて行われた分野を融合する研究では、広視野カメラの開発において天文学と精密工学 (Kitagawa, Y., et al., 2016)、時系列信号処理について情報学と物理学 (M. Kaneyama et al, 2013, 2014 他)、雑音信号の統計的扱いについてやはり情報学と物理学 (T. Yamamoto et al., 2016, H. Yuzurihara et al., 2016)、X 線天体に関して天文学と重力波物理理論 (D. Yonetoku et al., 2013, 2014, 2015) といった成果が学術論文となった。

## 6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（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。

### 主な論文：計画研究

- ▲Matsushita, M.; Yatsu, Y.; Arimoto, M.; Matunaga, S. et al., "Hardware Development and In-orbit Demonstration of the Electrical Power System for High-powered Micro-satellite TSUBAME", Transactions of the JSASS 60 (2017) 2, p.109-115, DOI:10.2322/tjsass.60.109, 査読有
- ▲Yamanaka, M., Nakaoka, T., Tanaka, M., Maeda, K., Yoshida, M., 他 36 名 "Broad-lined Supernova 2016coi with a Helium Envelope", The Astrophysical Journal 837 (2017) 1, DOI:10.3847/1538-4357/aa5f57, 査読有
- ▲Yoshida, M., Utsumi, Y., Ohta, K., Motohara, K., Yanagisawa, K., 他 33 名, "J-GEM follow-up observations of the gravitational wave source GW151226", Publications of the Astronomical Society of Japan 69 (2017) 9, DOI:10.1093/pasj/psw113, 査読有
- ▲\*神田展行, "重力波事象と電磁波による同時観測・追観測への期待", 天文月報 Vol.110, No.1 (2017) 6-13 査読無
- ◎▲\*Kazuki Sakai, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Hirotaka Takahashi, "Analysis of the real gravitational wave data GW150914 with the Hilbert-Huang transform", ICIC Express Letters II(I) (2017) 45-52 査読有
- ▲\*Hisa-aki Shinkai, Nobuyuki Kanda, Toshikazu Ebisuzaki, "Gravitational waves from merging intermediate-mass black holes: II Event rates at ground-based detectors", Astrophys. J. Vol.835, No.2 (2017) 276, DOI:10.3847/1538-4357/835/2/276, 査読有
- ▲\*Naoki Seto, Koutarou Kyutoku, "Forecasting Tidal Disruption Events by Binary Black Hole Roulettes", Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 151101, DOI:10.1103/PhysRevLett.118.151101, 査読有
- ▲\*Maselli, A., Kawai, N., Sakamoto, T., Serino, M., Yatsu, Y., Yoshii, T., et al., "GRB 130427A: A Nearby Ordinary Monster", Science, 343, (2014), 48-51, DOI:10.1126/science.1242279 査読有
- ▲\*Morii, M., Tomida, H., Kimura, M., Negoro, H., Serino, M., Kawai, N., Mihara, T., Sugizaki, M., Sakamoto, T., Tsunemi, H., Ueda, Y., Ueno, S., Yoshida, A. et al., "Extraordinary Luminous Soft X-Ray Transient MAXI J0158-744 as an Ignition of a Nova on a Very Massive O-Ne White Dwarf", The Astrophysical Journal, 779 (2013), 118-13 pp. DOI:10.1088/0004-637X/779/2/118, 査読有
- ▲\*Negoro, H., Serino, Motoko, Kawai, N., Mihara, T., Tomida, H., Ueno, S., Sakamoto, T., Tsunemi, H., Ueda, Y., Yoshida, A., Matsuoka, M. et al., "The MAXI/GSC Nova-Alert System and results of its first 68 months", Publications of the Astronomical Society of Japan, 68 (2016), S1-24 pp. DOI:10.1093/pasj/psw016, 査読有
- ▲\*Serino, M., Sakamoto, T., Kawai, N., Yoshida, A., Mihara, T., Negoro, H., Tomida, H., Tsunemi, H., Ueda, Y., Ueno, S. et al., "MAXI observations of gamma-ray bursts", Publications of the Astronomical Society of Japan, 66 (2014), 8714, DOI: 10.1093/pasj/psu063, 査読有
- ▲\*Hiroi, K., Ueda, Y., Kawai, N., Matsuoka, M., Mihara, T., Negoro, H., Sakamoto, T., Tomida, H., Tsuboi, Y., Tsunemi, H., Ueno, S., Yoshida, A., et al., "The 37 Month MAXI/GSC Source Catalog of the High Galactic-Latitude Sky", The Astrophysical Journal Supplement, 207, 36-12 pp. (2013), DOI:10.1088/0067-0049/207/2/36 査読有
- ▲\*Kawai, Nobuyuki, Tomida, Hiroshi; Yatsu, Yoichi; Mihara, Tatehiro; Ueno, Shiro; Kimura, Masashi; Arimoto, Makoto; Serino, Motoko; Sakamoto, Takanori; Tsunemi, Hiroshi; Kohmura, Takayoshi; Negoro, Hitoshi; Ueda, Yoshihiro; Morii, Mikio; Tsuboi, Yoko; Ebisawa, Ken; Yoshida, Atsumasa, "Wide-field MAXI: soft x-ray transient monitor on the ISS", Proceedings of the SPIE, 9144, 91442P-9pp. (2014), DOI:10.1117/12.2057188 査読無
- ◎▲Kitagawa, Y., Yamagata, Y., Morita, S.-y., Motohara, K., Ozaki, S., Takahashi, H., Konishi, M., Kato, N. M., Kobayakawa, Y., Terao, Y., Ohashi, H., "Fabrication of a wide-field NIR integral field unit for SWIMS using ultra-precision cutting", Proceedings of SPIE, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II 9912 (2016) ID:991225, DOI:10.1117/12.2231931, 査読無
- ▲Kumar, B., Pandey, S. B., Eswaraiah, C., and Kawabata, K. S. "Broad-band polarimetric investigation of the Type II-plateau supernova 2013ej", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 456 (2016) 3157, DOI:10.1093/mnras/stv2720, 査読有
- ▲Morokuma, T., Tanaka, M., Doi, M., Fujisawa, K., Kawabata, K. S., Yoshida, M., Ohta, K., 他 18 名, "J-GEM follow-up observations to search for an optical counterpart of the first gravitational wave source GW150914", Publications of the Astronomical Society of Japan 68 (2016) L9, DOI:10.1093/pasj/psw061, 査読有
- ▲Abbott, B. P., \*Singer, L., Yoshida, M., Ohta, K., Motohara, K., Yanagisawa, K., Kawai, N.; Negoro, H.; Mihara, T.; Tomida, H., Ueno, S., 他 1563 名, "Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914", The Astrophysical Journal 826 (2016) L13, DOI:10.3847/2041-8205/826/L13, 査読有
- ▲Abbott, B. P., \*Singer, L., Yoshida, M., Ohta, K., Motohara, K., Yanagisawa, K., Kawai, N.; Negoro, H.; Mihara, T.; Tomida, H., Ueno, S., 他 1563, "Supplement: Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914 (2016, ApJL, 826, L13)", The Astrophysical Journal Supplement Series 225 (2016) 8, DOI:10.3847/0067-0049/225/1/8, 査読有
- ▲K. Abe, \*Yusuke Koshio, et. al. (Super-Kamiokande collaboration), "Search for neutrinos in Super-Kamiokande associated with gravitational-wave events GW150914 and GW151226", The astrophysical journal, letters 830 (2016) L11, DOI:10.3847/2041-8205/830/1/L11, 査読有
- ▲\*H. Sekiya, "The Super-Kamiokande Gadolinium Project", Proceedings of Science PoS(ICHEP2016) (2016) 982 査読有
- ◎▲Kipp Cannon, 端山和大, \*伊藤洋介, 高橋弘毅, "重力波の初検出と情報処理技術 -LIGO と KAGRA で活用されている情報処理技術-", 情報処理 57 (5) (2016) 428-433 査読無
- ◎▲\*Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hirotaka Takahashi, Yuichiro Sekiguchi, Hideyuki Tagoshi, and Masaru Shibata, "Analysis of gravitational waves from binary neutron star merger by Hilbert-Huang transform", Phys. Rev. D 93 (2016) 123010,

DOI:10.1103/PhysRevD.93.123010, 査読有

23. ©▲\*Takahiro Yamamoto, Kazuhiro Hayama, Shuhei Mano, Yousuke Itoh, and Nobuyuki Kanda, "Characterization of non-Gaussianity in gravitational wave detector noise", *Phys. Rev. D* 93 (2016) 082005, DOI:10.1103/PhysRevD.93.082005, 査読有
24. ©▲\*Hirotaka Yuzurihara, Kazuhiro Hayama, Shuhei Mano, Didier Verkindt, and Nobuyuki Kanda, "Unveiling linearly and nonlinearly correlated signals between gravitational wave detectors and environmental monitors", *Physical Review D* 94 (2016) 042004-1-042004-7, DOI:10.1103/PhysRevD.94.042004, 査読有
25. ▲Kazuhiro Hayama, \*Takami Kuroda, Ko Nakamura, Shoichi Yamada, "Circular Polarizations of Gravitational Waves from Core-Collapse Supernovae: A Clear Indication of Rapid Rotation", *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016) 151102, DOI:10.1103/PhysRevLett.116.151102, 査読有
26. ▲\*Tomoya Kinugawa, Hiroyuki Nakano, Takashi Nakamura, "Possible confirmation of the existence of the ergoregion by the Kerr quasinormal mode in gravitational waves from a Population III massive black hole binary", *PTEP* 2016 (2016) 310, DOI:10.1093/ptep/ptw012, 査読有
27. ▲Takashi Nakamura, Masaki Ando, Tomoya Kinugawa, \*Hiroyuki Nakano, Kazunari Eda, Shuichi Sato Mitsuru Musha, Tomotada Akutsu, Takahiro Tanaka, Naoki Seto, "Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes", *PTEP* 2016 (2016) 930, DOI:10.1093/ptep/ptw127, 査読有
28. ▲\*Tomoya Kinugawa, Akinobu Miyamoto, Nobuyuki Kanda, Takashi Nakamura, "The detection rate of inspiral and quasi-normal modes of Population III binary black holes which can confirm or refute the general relativity in the strong gravity region", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 456 (2016) no.1, 1093-1114, DOI:10.1093/mnras/stv2624, 査読有
29. ▲\*Y. Zhang et al. (Super-Kamiokande collaboration), "First measurement of radioactive isotope production through cosmic-ray muon spallation in Super-Kamiokande IV", *Physical Review D* 93 (2016) 12004-1-12, DOI:10.1103/PhysRevD.93.12004, 査読有
30. ▲\*Eda, Kazunari; Shoda, Ayaka; Kuwahara, Yuya; Itoh, Yousuke; Ando, Masaki, "All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna", *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 1 (2016) 011F01/1-8, DOI:10.1093/ptep/ptv179, 査読有
31. ▲Konishi, M., Motohara, K., 他 36 名, "ANIR: Atacama near-infrared camera for the 1.0 m miniTAO telescope", *Publications of the Astronomical Society of Japan* 67 (2015) 4, DOI:10.1093/pasj/psu148, 査読有
32. ▲Maeda, K., Nozawa, T., Nagao, T., and Motohara, K., "Constraining the amount of circumstellar matter and dust around Type Ia supernovae through near-infrared echoes", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 452 (2015) 3281, DOI:10.1093/mnras/stv1498, 査読有
33. ▲Kuncarayakti, H., Maeda, K., Bersten, M. C., Folatelli, G., Morrell, N., Hsiao, E. Y., Gonzalez-Gaitan, S., Anderson, J. P., Hamuy, M., de Jaeger, T., Gutierrez, C. P., and Kawabata, K. S., "Nebular phase observations of the Type-Ib supernova iPTF13bvn favour a binary progenitor", *Astronomy and Astrophysics* 579 (2015) A95, DOI:10.1051/0004-6361/201425604, 査読有
34. ▲Yamanaka, M., Kawabata, K. S., Yanagisawa, K., Yoshida, M., 他 29 名, "OISTER Optical and Near-Infrared Observations of Type Ia Supernova 2012Z", *The Astrophysical Journal* 806 (2015) 191, DOI:10.1088/0004-637X/806/2/191, 査読有
35. ▲\*L. M. Magro, "EGADS approaching GADZOOKS!", *EPJ Web Conf.* 95 (2015) 4041 1-6 査読有
36. ▲\*Ono, Kenji; Eda, Kazunari; Itoh, Yousuke, "New estimation method for mass of an isolated neutron star using gravitational waves", *Physical Review D* 91 (2015) 84032/1-8, DOI:10.1103/PhysRevD.91.084032, 査読有
37. ▲\*T.Yokozawa, M.Asano, T.Kayano, Y.Suwa, N.Kanda, Y.Koshio, M.Vagins, "Probing the rotation of core-collapse supernova with a concurrent analysis of gravitational waves and neutrinos", *The Astrophysical Journal* 811 (2015) 86(12pp), DOI:10.1088/0004-637X/811/2/86, 査読有
38. ▲\*Tatsuya Narikawa, Koh Ueno, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka, Nobuyuki Kanda, Takashi Nakamura, "Detectability of bigravity with graviton oscillations using gravitational wave observations", *Phys. Rev. D* 91 (2015) 62007, DOI:10.1103/PhysRevD.91.062007, 査読有
39. ▲K. Abe, \*Masashi Yokoyama et. al. (Hyper-Kamiokande collaboration), "Physics potential of a long-baseline neutrino oscillation experiment using a J-PARC neutrino beam and Hyper-Kamiokande", *PTEP* 2015 (2015) 053C02-1-35, DOI:10.1093/ptep/ptv061, 査読有
40. ©▲\*Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Yukitsugu Sasaki, Hirotaka Takahashi, Jordan B. Camp, "On Completeness and Orthogonality of Intrinsic Mode Functions to Search for Gravitational Waves", *ICIC Express Letters Part B : Applications Vol.6 No.2* (2015) pp. 343-349 査読有
41. ▲Totani, T., Aoki, K., Hattori, T., Kosugi, G., Niino, Y., Hashimoto, T., Kawai, N., Ohta, K., Sakamoto, T., and Yamada, T., "Probing intergalactic neutral hydrogen by the Lyman alpha red damping wing of gamma-ray burst 130606A afterglow spectrum at z = 5.913", *Publications of the Astronomical Society of Japan* 66 (2014) 63, DOI:10.1093/pasj/psu032, 査読有
42. ▲Hatsukade, B., Ohta, K., Endo, A., Nakanishi, K., Tamura, Y., Hashimoto, T., and Kohno, K., "Two gamma-ray bursts from dusty regions with little molecular gas", *Nature* 510 (2014) 247, DOI:10.1038/nature13325, 査読有
43. ▲\*Hideyuki Tagoshi, Chandra Kant Mishra, Archana Pai, K. G. Arun, "Parameter estimation of neutron star-black hole binaries using an advanced gravitational-wave detector network: Effects of the full post-Newtonian waveform", *Phys. Rev. D* 90, Issue 2, (2014) 024053. (26 pages), DOI:10.1103/PhysRevD.90.024053, 査読有
44. ▲\*Tomoya Kinugawa, Kohei Inayoshi, Kenta Hotokezaka, Daisuke Nakauchi, Takashi Nakamura, "Possible Indirect Confirmation of the Existence of Pop III Massive Stars by Gravitational Wave", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 442 (2014) 2963-2992, DOI:10.1093/mnras/stu1022, 査読有
45. ©▲\*Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hirotaka Takahashi, Yuta Hiranuma, Takashi Wakamatsu, Jordan B. Camp, "Towards constructing an Alert System with the Hilbert-Huang Transform -Search for signals in noisy data-", *Innovative Computing, Information and Control, Express Letters Part B : Applications* 5 (2014) 285-292 査読有
46. ▲\*K. Eda, Y. Itoh, S. Kuroyanagi and J. Silk, "New Probe of Dark-Matter Properties: Gravitational Waves from an Intermediate-Mass Black Hole Embedded in a Dark-Matter Minispike", *Physical Review Letters* 110 (2013) 221101-1-5, DOI:10.1103/PhysRevLett.110.221101, 査読有
47. ©▲\*Hirotaka Takahashi, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Yuta Hiranuma, Jordan B. Camp, "On Investigating EMD Parameters to Search for Gravitational Waves", *Advances in Adaptive Data Analysis* 5 (2013) 1350010-1-20, DOI:10.1142/S1793536913500106, 査読有
48. ▲\*Soichiro Isoyama, Ryuichi Fujita, Norichika Sago, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka, "Impact of the second-order self-forces on the dephasing of the gravitational waves from quasicircular extreme mass-ratio inspirals", *Physical Review D* 87 (2013) 24010, DOI:10.1103/PhysRevD.87.024010, 査読有
49. ▲Hayashida, M., Kawabata, K. S., Yoshida, M., 他 90 名, "The Structure and Emission Model of the Relativistic Jet in the Quasar 3C 279 Inferred from Radio to High-energy gamma-Ray Observations in 2008-2010", *The Astrophysical Journal* 754 (2012) 114, DOI:10.1088/0004-637X/754/2/114, 査読有

50. ▲\*M. Vagins, "Detection of Supernova Neutrinos", Nuclear Physics Proceedings Supplement 229-232 (2012) 325(6pp), DOI:10.1016/j.nuclphysbps.2012.09.051, 査読有  
(他、計 425 件。内、査読有国際誌 324 件、査読無国際誌 40 件、査読有国内誌 35 件、査読無国内誌 26 件)

### 主な論文：公募研究

1. ▲Jung, Y. K. et al. (including Abe, F.), "Binary Source Microlensing Event OGLE-2016-BLG-0733: Interpretation of a Long-term Asymmetric Perturbation", *The Astronomical Journal*, 153 (2017) id. 129, 1-7, DOI:10.3847/1538-3881/aa5d07, 査読有
2. ▲Asahi Ishihara, Yusuke Suzuki, Toshiaki Ono, Hideki Asada, "Finite-distance corrections to the gravitational bending angle of light in the strong deflection limit", *Phys. Rev. D*, 95 (2017) 044017(7pages), DOI:10.1103/PhysRevD.95.044017, 査読有
3. ▲Takahiro Nagayama, "A local attenuation filter for accurate photometry of near-infrared bright stars", *Proceedings of the SPIE*, 9912 (2016) id. 991237 6 pp., DOI:10.1117/12.2232593, 査読無
4. ▲Soichiro MORISAKI, \*Jun'ichi YOKOYAMA, Kazunari EDA, Yousuke ITOH, "Toward the detection of gravitational waves under non-Gaussian noises II. Independent component analysis", *Proceedings of the Japan Academy ser B*, 92 (2016) 336-345, DOI:10.2183/pjab.92.336, 査読有
5. ▲\*Sho Fujibayashi, Takashi Yoshida, and Yuichiro Sekiguchi, "Alpha-constrained QSE Nucleosynthesis in High-entropy and Fast-expanding Material", *The Astrophysical Journal*, 818 (2016) 96, DOI:10.3847/0004-637X/818/1/96, 査読有
6. ▲Chon, S., Hirano, S., Hosokawa, T., & Yoshida, N., "Cosmological Simulations of Early Black Hole Formation: Halo Mergers, Tidal Disruption, and the Conditions for Direct Collapse", *The Astrophysical Journal*, 832 (2016) 134, 22pp., DOI:10.3847/0004-637X/832/2/134, 査読有
7. ▲HEATES Collaboration, \*Tadashi Hashimoto, Shinya Yamada, "Beamline Test of a Transition-Edge-Sensor Spectrometer in Preparation for Kaonic-Atom Measurements", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 27 (2016) 1-4, DOI:10.1109/TASC.2016.2646374, 査読有
8. ▲\*Maeda K., \*Terada Y., "Progenitors of type Ia supernovae", *International Journal of Modern Physics D*, 25 (2016) id. 1630024, DOI:10.1142/S021827181630024X, 査読無
9. ▲Sako, Shigevuki, et al., Tomonori; Urakawa, Seitaro; Usui, Fumihiko; Watanabe, Junichi; Yamaguchi, Jumpei; Yoshikawa, Makoto, "Development of a prototype of the Tomo-e Gozen wide-field CMOS camera", *SPIE*, 9908 (2016) 0, DOI:10.1117/12.2231259, 査読無
10. ▲Misao Sasaki, \*Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, Shuichiro Yokoyama, "Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914", *Physical Review Letters*, 117 (2016) 1,5, DOI:10.1103/PhysRevLett.117.061101, 査読有
11. ▲\*Sotani, Hajime; Takiwaki, Tomoya, "Gravitational wave asteroseismology with protoneutron stars", *Physical Review D*, 94 (2016) id.044043, DOI:10.1103/PhysRevD.94.044043, 査読有
12. ▲Morokuma, T., Tominaga, N., Tanaka, M., Yasuda, N., Furusawa, H., Taniguchi, Y., Kato, T., Jiang, J., Kuncarayakti, H., Morokuma-Matsui, K., Ikeda, H., Blinnikov, S., Nomoto, K., Kokubo, M., Doi, M., "An Effective Selection Method for Low-Mass Active Black Holes and First Spectroscopic Identification", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68 (2016) 40 (10pp), DOI:10.1093/pasj/psw033, 査読有
13. ▲\*Yoshida, Kazuki; Yonetoku, Daisuke; Sawano, Tatsuya; Ikeda, Hirokazu; Harayama, Atsushi; Arimoto, Makoto; Kagawa, Yasuaki; Ina, Masao; Hatori, Satoshi; Kume, Kyo; Mizushima, Satoshi; Hasegawa, Takashi, "Development of wide-field low-energy x-ray imaging detectors for HiZ-GUNDAM", *Proceedings of the SPIE*, 9905 (2016) 99050M, 11pp, DOI:10.1117/12.2231370, 査読無
14. ▲\*Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, and Keisuke Taniguchi, "Dynamical mass ejection from the merger of asymmetric binary neutron stars: Radiation-hydrodynamics study in general relativity", *PRD*, 93 (2016) 124046, DOI:10.1103/PhysRevD.93.124046, 査読有
15. ▲Masaya Hasegawa, Kazuki Sakashita, Kousei Uchikoshi, \*Shigeki Hirobayashi, Tadanobu Misawa, "Removal of salt-and-pepper noise using a high-precision frequency analysis approach", *IEICE transactions on information and systems (in press)*, Vol. E100-D, No. 5, pp. 1097-1105 (2017) 査読有
16. ©▲\*Kagawa, Yasuaki; Yonetoku, Daisuke; Sawano, Tatsuya; Toyonago, Asuka; Nakamura, Takashi; Takahashi, Keitaro; Kashiya, Kazumi; Ioka, Kunihito, "X-Raying Extended Emission and Rapid Decay of Short Gamma-Ray Bursts", *The Astrophysical Journal*, 811 (2015) 42836, DOI:10.1088/0004-637X/811/1/4, 査読有
17. ▲\*Jun'ichi Yokoyama, "Toward the detection of gravitational waves under non-Gaussian noises I. Locally optimal statistic", *Proceedings of the Japan Academy ser B*, 90 (2014) 422-432, DOI:10.2183/pjab.90.422, 査読有
18. ▲\*Hiroki Nagakura, Kenta Hotokezaka, Yuichiro Sekiguchi, and Masaru Shibata, "Jet Collimation in the Ejecta of Double Neutron Star Mergers: A New Canonical Picture of Short Gamma-Ray Burst", *The Astrophysical Journal Letters*, 784 (2014) L28, DOI:10.1088/2041-8205/784/2/L28, 査読有
19. ▲\*Iwa Ou, Takatomi Yano, Yoshiyuki Yamada, Takaaki Mori, Tsubasa Kayano, Makoto Sakuda, Atsushi Kimura, and Hideo Harada, "Measurement of the Energy, Multiplicity and Angular Correlation of Gamma-rays from the Thermal Neutron Capture Reaction  $Gd(n, \gamma)$ ", *JPS Conference Proceedings*, 1 (2014) 013053-1-6, DOI:10.7566/JPSCP.1.013053, 査読有
20. ▲Kojima, Yasufumi; Kato, Yugo E., "Numerical simulation of oscillating magnetospheres with resistive electrodynamics", *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2 (2014) id.023E01, DOI:10.1093/ptep/ptu014, 査読有
21. ▲\*Yohsuke Takamori, Hirotada Okawa, Makoto Takamoto, and Yudai Suwa, "An alternative numerical method for the stationary pulsar magnetosphere", *Publ. Astron. Soc. Japan*, 66 (2014) 25, DOI:10.1093/pasj/pst026, 査読有
22. ▲Umehata, H., Tamura, Y., et al., "AzTEC/ASTE 1.1-mm survey of SSA22: Counterpart identification and photometric redshift survey of submillimetre galaxies", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 440 (2014) 3462-3478, DOI:10.1093/mnras/stu447, 査読有
23. ©▲\*Yonetoku, Daisuke; Nakamura, Takashi; Sawano, Tatsuya; Takahashi, Keitaro; Toyonago, Asuka, "Short Gamma-Ray Burst Formation Rate from BATSE Data Using  $E_p$ - $L_p$  Correlation and the Minimum Gravitational-wave Event Rate of a Coalescing Compact Binary", *The Astrophysical Journal*, 789 (2014) 65-69, DOI:10.1088/0004-637X/789/1/65, 査読有
24. ▲\*Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, Tomohide Wada, "High resolution numerical-relativity simulations for the merger of binary magnetized neutron stars", *PRD*, 90 (2014) 41502, DOI:10.1103/PhysRevD.90.041502, 査読有
25. ©▲\*Tsutsui, Ryo; Yonetoku, Daisuke; Nakamura, Takashi; Takahashi, Keitaro; Morihara, Yoshiyuki, "Possible existence of the  $E_p$ - $L_p$  and  $E_p$ -Eiso correlations for short gamma-ray bursts with a factor 5-100 dimmer than those for long gamma-ray bursts", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 431 (2013) 1398-1404, DOI:10.1093/mnras/stt262, 査読有
26. ▲K. Asakura (including \*K.Ishidoshiro) et al., "STUDY OF ELECTRON ANTI-NEUTRINOS ASSOCIATED WITH GAMMA-RAY BURSTS USING KAMI-LAND", *The Astrophysical Journal* 806 (2015) 86, DOI:10.1088/0004-637X/806/1/87, 査読有  
(他、計 156 件。内、査読有国際誌 148 件、査読無国際誌 2 件、査読有国内誌 6 件、査読無国内誌 0 件)

## 主な著書・雑誌記事など

- ・ 山田章一 「超新星」 日本評論社 2017年 279頁
- ・ 田中雅臣 「星が「死ぬ」とはどういうことか」 ベレ出版 2015年 202頁
- ・ 田越秀行, 中村卓史 「重力波の初の直接検出とその意義」 日本物理学会誌 Vol. 71, No. 4, 210-211, 2016年
- ・ 神田展行 「重力波の発見：一般相対性理論の100年後の証明」 パリティ Vol. 31, No. 6, 40-42, 2016年
- ・ 梶田隆章, 田越秀行 「重力（観測）-KAGRA 稼働と重力波実測へ向けて-」 数理科学 605 巻 39-44, 2013年
- ・ 田中貴浩, 「一般相対論, その世紀と現在」 パリティ, 2015年度(12回連載)

## 国内学会発表

2012年 計画研究 10件 2013年 計画研究 39件/公募研究 19件 2014年 計画研究 42件/公募研究 42件  
2015年 計画研究 44件/公募研究 48件 2016年 計画研究 81件/公募研究 67件

## 国際会議発表

2012年 計画研究 14件 2013年 計画研究 68件/公募研究 19件 2014年 計画研究 47件/公募研究 18件  
2015年 計画研究 71件/公募研究 26件 2016年 計画研究 92件/公募研究 47件

## 国際研究集会の主催

- ・ RESCEU SYMPOSIUM ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION, JGRG22, 東京大学, 2012/11/12-16
- ・ Gravity and Cosmology 2012, 京大基研, 2012/11/18-12/22
- ・ Asia Pacific School/Workshop on Gravitation and Cosmology 2013, The Ocean Suites Jeju Hotel, 2013/2/19-22
- ・ Long-term workshop on gravitational waves and numerical relativity, 京大基研, 2013/5/19-6/22
- ・ The 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 弘前大, 2013/11/5-8
- ・ New Perspectives on Cosmology, APCTP, Pohang, Korea, 2013/11/25-29
- ・ 2014 Asia-Pacific School and Workshop on Gravitation and Cosmology, Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, 2014/2/17-21
- ・ The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24), Kavli IPMU, the University of Tokyo, 2014/11/10-14
- ・ The 3rd Workshop on Large Aperture Millimeter/Submillimeter Telescopes in the ALMA Era (LSTWS2015), 国立天文台, 2015/3/10-11
- ・ International School of Gravitational Physics, Kyoto, 2015 (, 京大基研, 2015/3/25-28
- ・ Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW) 2017, 大阪市 (大阪国際会議場), 2015/6/17-20
- ・ Molecule-type workshop on "Radiation Reaction in General Relativity", 京大基研, 2015/6/22-7/10
- ・ Numazu Workshop 2015: Challenges of modeling supernovae with nuclear data, Mishima, Shizuoka, Japan, 2015/9/1-4
- ・ The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG25), 京大基研, 2015/12/7-11
- ・ The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG26), Osaka City University, 2016/10/24-28
- ・ Workshop on Supernova at Hyper-Kamiokande, 東京大学・小柴ホール, 2017/2/12-13

## 領域シンポジウム・研究会

- ・ 領域シンポジウム (各年度に1回づつ計5回開催、参加者数80~110名)
- ・ 領域研究会 (計14回開催、参加者数40~60名)
- ・ 新学術3領域(重力波天体・地下素核研究・中性子星核物質)合同シンポジウム「多面的アプローチで解きあかす宇宙と天体」 7月24-25日 於 東北大
- ・ 計画研究 A05 合宿 2013年1月7日-1月9日 KKR 熱海
- ・ 「コンパクト連星の合体と電磁波対応天体」 2013年2月14日-2月15日 京大基研
- ・ 第12回 DECIGO ワークショップ 2013年10月27日 東大
- ・ A04/05 Joint Camp 2014年2月22日-2月24日 KKR 城崎玄武
- ・ 第13回 DECIGO ワークショップ 2014年10月26日 京大
- ・ A04/05 Joint Camp 2015年1月8日-10日 瀬波温泉
- ・ コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域 2015年2月12日-14日 京大基研
- ・ A05 Camp 2016年1月7日-9日 KKR 伊豆長岡千歳荘
- ・ A05 Camp 2017年1月7日-9日 湖邸滋びわこクラブ

## 一般向けアウトリーチ

- ・ 一般相対性理論100年記念講演会(計15会場, のべ2500名)
- ・ 日本物理学会 市民科学講演会 (中村, 神田ほか)
- ・ 一般・高校生・大学生向け解説 web(電子本) 中村卓史

## 7. 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、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、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。

### 計画研究の関係

計画研究は、重力波天体が放射すると期待する電磁波（X線、ガンマ線：A01、可視光、赤外線、電波：A02）、ニュートリノ（A03）を観測する計画と、重力波観測データそのものから事象を探索する計画（A04）、そしてそれらの理論的研究を行う計画（A05）から構成した。これらの各研究と、横断的な研究を進めてきた。

重力波天体について、その事象を捉えるには、まず、

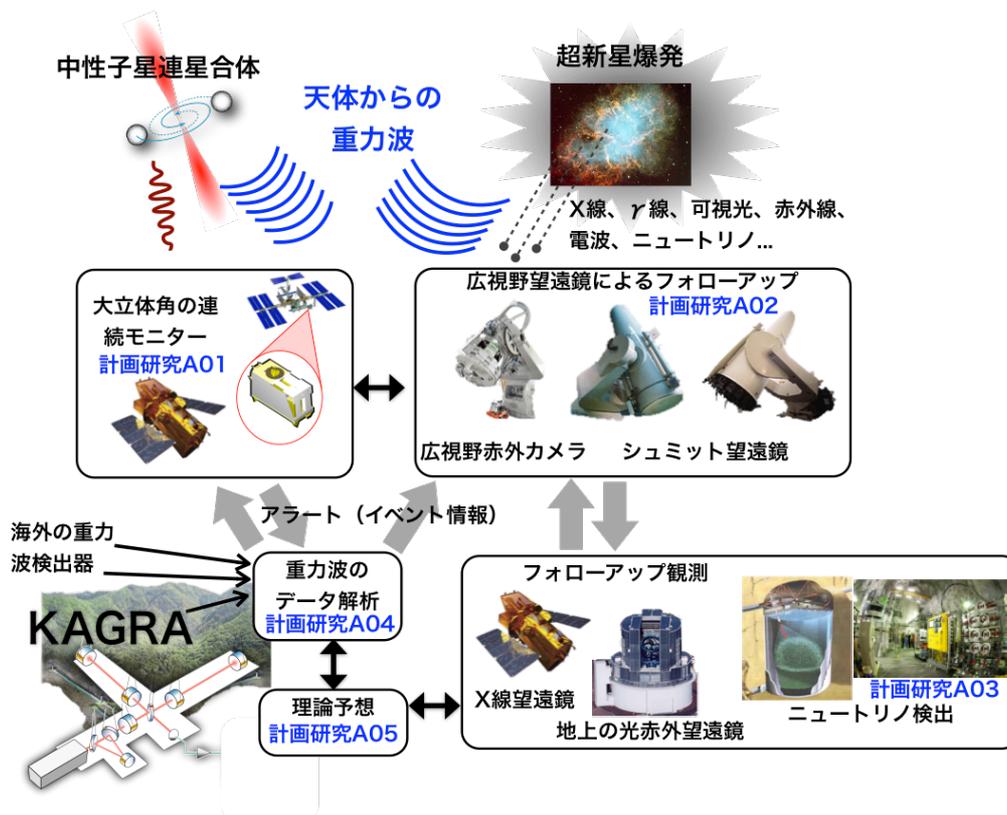
#### [1] 重力波観測データの素早い解析

が必要である。しかし重力波検出で示唆される到来方向は精度が低く、どのようにして追観測に結びつけるかが本領域の研究組織の構成に強く関わっている。すなわち、到来方向決定精度が低い重力波源を特定するには、以下の二つのステップが必要である。

#### [2] 常時監視：大天域を常に監視し重力波と同期して発生する電磁波現象を待ち受ける

#### [3] 即応観測：高感度の望遠鏡で重力波到来方向を直ちに観測する

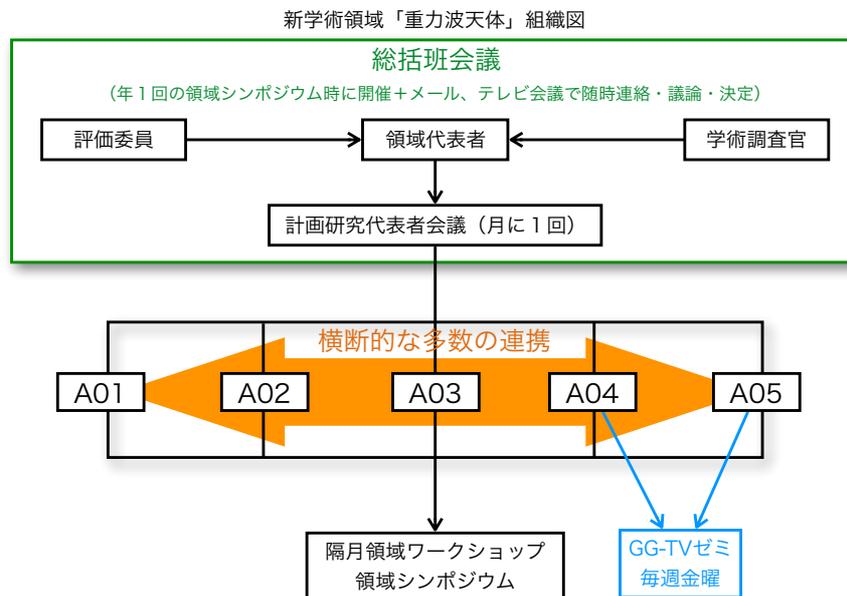
まずX線領域が、（特に中性子星を含む連星の合体による）重力波発生に対応して明るい突発現象が期待されるとともに、適切な感度で大天域を監視することが技術的に可能である。このX線での常時監視[1]を行うのが計画研究A01の最も重要な目標で、対応天体が検出されれば、A02班の地上望遠鏡による即応観測へ結びつけることができる。一方、新たな突発X線源が出現したときに、重力波観測単独での有意検出レベル以下の信号（A04）、あるいは地上光学観測（A02）、ニュートリノ（A03）等にも対応する信号を探索し、総合的に有意性が認められるイベントを探すことも可能になる。[1]のために、LIGOとの覚書にもとづき、重力波検出報告への対応観測の結果は、他のグループと共有している。またA04では日本の重力波検出実験KAGRAと連携している。これらのすべての根拠となるのがA05による理論研究である。下図にこの概念を示す。



## 総括班・運営体制と、計画研究間の協力関係

総括班では研究は行わず、組織としての領域の有機的な機能を推進するのが主な仕事である。具体的には総括班の研究実施計画は以下の通りであった。まず、大阪市立大学に事務局を設置した。専属の秘書を雇い、パソコン関連ソフト、TV会議システム等を購入した。24年8月末には領域のkickoff会議を京大で開催し、領域の全体的な研究方針を策定した。重力波天体の多様な観測という大目標をすみやかに達成するように全体の方針を策定した。また国内外の研究動向にすみやかに対応した。領域の進行状況のチェックとしては、月例の代表者会議にて、逐次各計画の進行状況を把握した。2-3ヶ月に一度は各計画研究に関連したテーマで1-2日間のシンポジウムを開催し、face to face または TV 会議で領域内の全てのメンバーの情報交換に努めた。計画研究間の企画・調整を行い、各計画研究の方針も確認し、全体および他の計画研究との整合性を保つよう努めた。研究成果の発表に関する支援としては、領域シンポを毎年開催した。また、海外での国際会議への研究者の派遣、ホームページの立ち上げと更新・維持などを行った。その他の研究支援・国際共同研究、国際協力に関する策定・支援としては、海外の関連する研究との情報交換や協力関係を検討し、LIGO との MOU 等必要なものを進めた。予算としては TV 会議システムの備品費、旅費、秘書の雇用の費用と消耗品費が主なものであった。研究の進展の自己評価のために連携研究者を中心とした評価委員会を設置し、毎年の領域シンポ中に開催した。

また総括班では、一般向けの活動も組織的におこなった。1915年11月25日にアインシュタインが現在使われているアインシュタイン方程式に到達した。そこで領域代表者は一般相対性理論誕生100周年を記念して全国で市民講演会を開くことを領域内ならびにJGWCという国内の一般相対論のコミュニティに提案した。費用を節約するため会場は大学の講義室、講師謝金なしのボランティアベース、旅費が必要な講師には旅費のみを領域が援助するという形で行った。ポスターは基礎物理学研究所に作成していただき、学会や一般向け雑誌などを通じて全国的に宣伝をおこなった。会場は全国15箇所、延参加人数は2500人であった。各地の新聞でも取り上げられ、大変盛況であった。ホームページは現在も、<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/Gmunu100/> にあり、講演会の写真や記録を保存している。



## 計画研究、公募研究の連携状況

上述の隔月領域研究会、毎年の領域シンポジウムでは、計画研究だけでなく公募研究も参加し、多数の発表が行われた。また、計画研究 A04 と 05 では合同で合宿形式のセミナーを毎年行い、これには関連する公募研究も多数参加した。その結果として、多くの共著論文が書かれ、分野を融合する研究論文も15件に上る。

## 8. 研究経費の使用状況（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記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

**(A01)** 経費は主に以下の三つに費やされた。1) 研究員の雇用。MAXI の観測運用・データ解析、及び WF-MAXI の観測装置開発に貢献した。2) WF-MAXI 開発。システムの設計検討、カスタマイズした CCD 素子や信号処理 ASIC、及び観測装置試作品(軟 X 線カメラ SLC と硬 X 線線モニター HXM) 試作。3) MAXI のデータ解析用計算機とデータ保存装置。開発された MAXI の重力波対応天体探索システムによって、GW150914 等の重力波イベントに対する探索を実施した。今後の重力波イベントに対しても効率的に探索を行い、重力波天文学コミュニティーに迅速に結果を通報する仕組みを構築した。WF-MAXI は ISS ミッションとしてプロジェクト化に至っていないが、開発した SLC と HXM は様々な性能評価を行っており、機会があれば短時間で搭載提案できるように準備している。

**(A02)** 冷却 CCD カメラ、天体望遠鏡、赤道儀、三色同時撮像装置、NAS 装置は、50cm ロボット望遠鏡およびその観測装置の構成物品であり、日本で組立調整を行って、中国チベット阿里サイトに仮設置されており、中国国家天文に保管を依頼している。平成 29 年 9 月に本格設置して観測を開始する予定である。コンピューター、データストレージ、フィルターは国立天文台岡山天体物理観測所にて広視野赤外線カメラにおいて使用されている。光ファイバーは京都大学が面分光装置を開発するために購入し、現在は岡山天体物理観測所で使用されている。東京大学では Tomo-e を開発するための研究員を雇用した。平成 26、27 年度は臨時に開発要員として研究員を雇用した。京都大学では面分光ユニットを開発し観測を実施するための研究員を雇用した。広島大学で 50cm ロボット望遠鏡開発のための特任助教を雇用した。また、岡山天体物理観測所で広視野赤外線カメラ開発のための研究補助員を雇用した。

**(A03)** 経費は主に以下の 3 点に費やされた。1) EGADS 検出器における水純化システム 2) 線源や光源など検出器校正に必要な装置 3) デッドタイムフリーの電子回路。1)により、ガドリニウムを溶解した水が、スーパーカミオカンデの超純水と同レベルという予想以上に高い透明度を達成した。2)により、中性子検出効率は 86%と測定され、予測値と非常に良い一致をみた。3)の開発はずでに終了しており、H29 の繰越経費を用いて EGADS 検出器に導入する予定である。

**(A04)** KAGRA 実験の観測データを蓄積、解析するための計算機システム、および若手研究員の雇用のための費用に大きく用いられた。計算機システムは、データの安全性や A04 メンバーが自由な開発環境で作業できるようにした仮想プライベートネットワークを導入した。計算能力やデータ容量は、研究の進行と KAGRA の運転に合わせて順次増強され、最終的には数ヶ月の KAGRA データの蓄積に十分な 288TiB の容量、760 コアの CPU を有する。これによって、KAGRA のデータ解析を最低限保証できた。若手研究員は、2 年目以降は常時 4 名、計 7 名を雇用した。そのうち 1 名は東京大学宇宙線研究所の特任助教、3 名は学術振興会 PD 研究員、博士を取得した大学院生 1 名も東京大学宇宙線研究所の研究員に採用された。このように本分野の若手の育成に大いに貢献した。

**(A05)** 研究経費の主な使途は研究員の雇用である。合計で 8 名の研究員を雇用したが、その後も皆、研究職に就いている。特に、中野寛之は龍谷大・准教授に就職、西澤篤志は名古屋大学 KMI・特任助教、野沢真人は京都大学基礎物理学研究所特任助教のポジションを得た。その他の支出の多くは、研究会の開催と海外からの招聘である。

研究集会件数は主催、共催を合わせると 22 件(うち、国際研究集会 13 件)である。海外からの招聘は述べ 10 名以上になる。100 万円規模の計算機を 4 台購入し、数値コード開発に用いた。

**(総括班)** 総括班では研究会開催のための旅費と、領域の事務のために秘書を雇用した。開催した研究会は、領域全体によるものだけでも 20 回と、領域の活性化に大いに役立った。また旅費圓場などで国内開催にかかわった国際研究集会も 13 件ある。

・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細 (計画研究において購入した主要な物品 (設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。) について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価 (円)	金額 (円)	設置(使用)研究機関
24	X線 CCD (2個)	S12937-C700(X)-G1	1	13,965,000	13,965,000	宇宙航空研究開発機構
	冷却 CCD カメラ	APOGEE社 ALTA U42-MB-HC	2	6,998,250	13,996,500	広島大学
	エレクトロニクスモジュール	岩通計測 (株) 特製	1	8,400,000	8,400,000	東京大学
	重力波データ解析システム	富士通 RX350S7, RX200S7 ほか一式	2	3,301,200	6,602,400	大阪市立大学、大阪大学
25	CCD カメラ	特注品	1	15,435,000	15,435,000	宇宙航空研究開発機構
	設計・試作 X線 CCD	S12937-C700(X)-G2	2	4,987,500	9,975,000	宇宙航空研究開発機構
	広視野 X線 CCD カメラ	特注品	1	3,996,000	3,996,000	宇宙航空研究開発機構
	天体望遠鏡	口径 50cm リッチークレチアン光学系 田中光化学工業	1	9,993,900	9,993,900	広島大学
	赤道儀	60EL 赤道儀 昭和機械製作所	1	7,843,500	7,843,500	広島大学
	観測装置	可視三色カメラ筐体	1	3,500,000	3,500,000	広島大学
26	重力波データ解析計算機増設システム	PRIMAGY RC2540M1 x7 ほか	1	13,489,200	13,489,200	大阪市立大学
	重力波データ解析計算機増設ハードウェア	PRIMAGY RX2540M1 x6 ほか	1	9,838,800	9,838,800	大阪大学
	コンピュータ	HPC システムズ社製ハイパフォーマンスコンピュータ	2	1,350,000	2,700,000	京都大学基礎物理学研究所
	重力波検出器診断用計算機	RC Server Calm III	1	2,222,640	2,222,640	大阪市立大学
27	重力波計算機ストレージ装置増設	144TiB RAID, 富士通 ETERNUS DX100	2	6,912,000	13,824,000	大阪市立大学
	重力波データ解析計算機増設追加ノード	E5-2630v3, 富士通 RX2540 M1	2	2,095,200	4,190,400	大阪市立大学
28	重力波データ解析サーバ増設	PRIMAGY RX250 M2 x6, SH1580ATD	2	9,423,000	18,846,000	大阪市立大学

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成24年度】

・旅費

総括班：600万円。領域開始にあたってのキックオフ会議、隔月での研究会、毎年開催する領域シンポジウムに使用した。

・人件費・謝金

総括班：185万円領域の事務のために事務局（大阪市立大学）にて秘書を1名雇用した。  
計画研究 A05:人件費のうち約550万円、研究員を雇用開始し集中的な研究をスタートさせた。

・その他

計画研究 A02:広視野赤外線カメラ OAOWFC のドーム改修を行った。

【平成25年度】

・旅費

総括班：310万円。隔月での研究会、毎年開催する領域シンポジウムに使用した。

・人件費・謝金

総括班：230万円。領域の事務のために事務局（大阪市立大学）にて秘書を1名雇用した。  
計画研究 A04:計4名の若手研究員（博士研究員3名、特任助教1名）を雇用（計1968万円）  
計画研究 A05:人件費のうち約1100万円、主に研究員を雇用し集中的な研究を推進した。

・その他

計画研究 A02:広視野赤外線カメラ OAOWFC の制御ソフトウェアの開発を行った。

【平成26年度】

・旅費

総括班：国際会議 GPPAW(Gravitational Wave Physics and Astronomy, 重力波物理と天文ワークショップ)を開催予定であったが、諸般の事情により開催を翌年度の2015年6月とした。そのため、海外からの招待講演者の旅費として300万円繰越した。（実際の執行はH27年度）  
毎年開催する領域シンポジウム、定例研究会の参加者旅費に360万円を使用した。

・人件費・謝金

総括班：230万円。領域の事務のために事務局（大阪市立大学）にて秘書を1名雇用した。  
計画研究 A04:計4名の若手研究員（博士研究員3名、特任助教1名）を雇用（計1964万円）  
計画研究 A05:人件費のうち約1300万円、研究員を雇用し集中的な研究を推進した。

・その他

計画研究 A04：計算機システムにおける、導入費用（システムエンジニアの作業など）とメンテナンス費用。  
計画研究 A02:50cm ロボット望遠鏡付属部品の一部を中国に輸送した。

【平成27年度】

・旅費

総括班：345万円。隔月での研究会、毎年開催する領域シンポジウムに使用した。

・人件費・謝金

総括班：230万円。領域の事務のために事務局（大阪市立大学）にて秘書を1名雇用した。  
計画研究 A04:計4名の若手研究員（博士研究員3名、特任助教1名）を雇用（計1777万円、年度途中で特任助教が他機関へ転出のため、前年度よりやや少ない額）  
計画研究 A05:人件費のうち約1400万円、研究員を雇用し集中的な研究を推進した

・その他

計画研究 A04： 計算機システムにおける、導入費用（システムエンジニアの作業など）とメンテナンス費用。

計画研究 A02: 50cm ロボット望遠鏡および観測装置の中国への輸送を行った。

【平成 28 年度】

・旅費

計画研究 A04: 国際会議 GPPAW2016 へ 10 名派遣。350 万円

・人件費・謝金

総括班：230 万円。領域の事務のために事務局（大阪市立大学）にて秘書を 1 名雇用した。

計画研究 A04: 計 4 名の若手研究員（博士研究員 4 名）を雇用（計 1897 万円）

計画研究 A05: 人件費のうち約 1300 万円、研究員を雇用し集中的な研究を推進した。

・その他

計画研究 A04： 計算機システムにおける、導入費用（システムエンジニアの作業など）とメンテナンス費用。

(3) 最終年度（平成 28 年度）の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

A01 では、共用バスを用いて国際宇宙ステーション（ISS）に搭載する軟 X 線カメラを開発してきたが、H28 年度に発出された JAXA の小規模プロジェクトの公募では予算枠が大幅削減にされており、ISS 搭載の可能性が事実上閉ざされた。そのため、予算を繰越しして海外ミッションなどの新たな搭載機会にすぐに対応できるように、より広い熱環境での動作の検証、低電力動作、あるいは超小型衛星に搭載するためのミッション要求の見直しなど、新たな設計の検討を行うこととした。また、LIGO 02 重力波観測が当初の予定よりもずれ込んで開始が 2016 年末まで遅れ、2017 年夏まで観測が行われることになったため、MAXI などによる重力波対応 X 線天体の探索も、LIGO のスケジュールに合わせて実施する。

A02 では、平成 28 年度中に、50cm ロボット望遠鏡の中国チベット阿里サイトへの本格設置を行って初期調整・試験観測を行って本格観測を開始する予定であった。しかし、平成 26 年 9 月より外国人のチベットへの入境許可が厳格化して、入境申請が通らなくなった。中国国家天文台、在中国日本大使館などを通じて交渉した結果、平成 28 年 9 月ようやく入境して望遠鏡の仮設置を行ったが、また入境申請が拒否され、平成 28 年度中に望遠鏡の本格設置を行うことが不可能となった。その後、平成 29 年 9 月頃に入境が許可される見込みが出てきたため、望遠鏡設置費用およびそのための渡航費用として研究費の繰越しを行った。

A03 では、2014 年 5 月の EGADS タンクの建設の際、構造支持ワイヤが錆びるアクシデントが発生した。これは納入されたワイヤが、我々が発注したステンレス鋼でなく、鉄製のものであったためであり、その原因はワイヤの製造元と代理店間のミスコミュニケーションによるものである。そのため 2014 年 6 月から 11 月まで実験を中断し、錆を除去する必要があった。除去後、実験の運転が再開されたが、プロジェクトのスケジュール全体が半年以上遅れてしまった。それ以降は、実験は予定通り進んでおり、H27 年度には EGADS タンクに目標の 0.2%硫酸ガドリニウムの充填に成功した。水質は予想以上に高く、検出器は過去 2 年間、安定して稼働している。しかし H26 年度の遅延はそのまま継続しており、H28 年度を目標とした一部の支出を H29 年度に行う必要があった。主な目的は、DAQ エレクトロニクス、オンライン計算機、水システムのアップグレードである。

## 9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

人類初検出された重力波イベントは GW150914(2015年9月14日に発見された、GW(Gravitational wave: 重力波))と呼ばれ、太陽質量の30倍程度のブラックホール連星であるが、本領域では理論の計画研究がすでに2014年に宇宙で最初にできた初代星起源を予言していて、GW150914に見事に一致した。この事実は、LIGOのGW150914の発見論文でも大きく引用され高く評価された。また最終年度には、別の起源の可能性として、宇宙初期の密度揺らぎに伴う原始ブラックホール説を提案し、ダークマターの新しい候補にもなり得るので、世界的に注目されている。また、星団系でのブラックホール合体説も提案された。世界的にも多くの起源説が唱えられているが、どの説が正しいかは、ブラックホールの自転角運動量の分布と赤方偏移分布の決定が必須であり、我が国の将来計画DECIGO(DECi hertz Interferometer Gravitational wave Observatory)のような0.1Hz帯の宇宙重力波干渉計の建設が必須となった。これらの進展はこの領域の名に相応しい「宇宙物理の新展開」である。

A01班の行っている全天X線監視装置MAXIの観測結果は、既知天体の強度に関しては毎日リアルタイムで光度曲線を更新してWebサイトで全世界に公開しているうえに、天空の任意の座標・時期に対して対話的にスペクトルや光度曲線を作成できるオンデマンド解析システムもMAXIのウェブサイト開設した。その結果、全世界の天文コミュニティに広く利用されて、MAXIの装置を開設した論文Matsuoka, M. et al. "The MAXI Mission on the ISS: Science and Instruments for Monitoring All-sky X-Ray Images", Publ. Astron. Soc. Japan 61, 999 (2009)は2013年日本天文学会欧文研究報告論文賞を2014年3月に受賞し、230件を超える引用は現在もさらに伸びつつある。また、2016年には米国宇宙航行学会・宇宙科学振興会「ISS Research and Development Award on Innovation in Earth and Space Science」をMAXIチームが受賞し、A01分担者の三原が代表して授与式に出席した。

世界の重力波フォローアップ観測チームの中で、J-GEMは最も組織化されたチームであるとLIGOチームから高く評価されている。GW151226のフォローアップ観測では、すばる望遠鏡を用いて他のフォローアップチームの観測より1.5~2等級深い追跡観測(約24等級)を行うことに成功し、重力波の可視対応現象の研究に大きな貢献をした。

超広視野CMOSカメラTomo-eの開発は、低雑音・広視野のCMOSセンサを初めて天文学に応用したもので、超広視野・高頻度観測という、これまでの天文学では実現の難しかった新しい分野を切り開いていく可能性を示し、時間軸天文学に大きな影響を与えた。

東京大学木曾観測所シュミット望遠鏡を用いた突発天体の広視野探査では、取得されたデータを即時にウェブ上に公開し、市民が突発天体の発見に関われる仕組みを構築した。実際に小中学生、高校生からアマチュア天文家まで30名程度が参加し、市民が発見した17個の超新星を連名で国際天文学連合に報告している。この取り組みはオープンサイエンスの例として2015年8月23日の日本経済新聞に掲載されたほか、参加者から史上最年少での超新星発見がなされたことから、中日新聞(2015年3月4日)やThe Japan Times(2015年3月13日)に取り上げられた。

本研究により成功した先端技術を用いた超新星ニュートリノ検出器は、次世代の同様の検出器に対しても大きな影響を与えることになった。例えばスーパーカミオカンデは、今後、本研究で開発された技術を用いて同様の改造がなされることが決定した。また、将来的には、現在提案されているハイパーカミオカンデなどのプロジェクトでも同様の技術が用いられることが検討されている。

重力波実験KAGRAのデータ解析は、本領域のA04が中心となって推進してきた。結果的に、今日、日本で重力波観測データでの研究が継続できているのは、本領域の貢献が多大である。初検出された重力波の公開データも解析し、我々によって新しい手法を用いた論文が出版された。

さらに、総括班でも一般向けにも有益な活動をおこなった。領域代表が執筆した電子本「最後の1秒間」(A4 75ページ)や重力波の音などをwebに無料で公開した。開設以来の約半年でwebページに9000回以上のアクセス、電子本pdfに2200回以上のダウンロードがあり、一般市民、報道関係者らに多く閲覧されている。

一般向け講演会では、日本物理学会における市民講演会(2016年9月・宮崎市・中村(領域代表)、2016年3月・仙台市・神田(A04代表))、市民講演会「西宮湯川記念科学セミナー」(2017年1月・西宮市・中村)も行った。2015年10月~2016年3月にかけては、「一般相対性理論誕生100年記念市民講演会」を日本中の計15カ所で開催した。この講演会には延べ2500名が参加した。

## 10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

A01 で雇用した研究員のうち、1 名が早稲田大学講師、1 名が JAXA の別プロジェクトの研究開発員に採用された。また、任期付き助教（青山学院大学）であった分担者の坂本が准教授（青山学院大学、2017 年 4 月）に採用・昇任した。

A02 で雇用した研究員は、2 名が別の科研費研究員として広島大学で採用され、2 名が機関研究員として国立天文台および東京大学で採用された。平成 26、27 年度に臨時雇用した研究員は、それぞれ、技術補佐員、特任研究員として東京大学で雇用された。

A03 で雇用した研究員のうち、1 名（スペイン人）が東大宇宙線研究所の特任助教に採用された。またこれまでに 3 人（アメリカ人、日本人、スペイン人）の大学院生が博士号を取得している。以上の通り、本研究は国際的な規模での若手研究者の成長に貢献している。

A04 では雇用した研究員のうち、1 名が研究機関の特任研究員に、2 名が学術振興会研究員（国内）、1 名が学術振興会研究員（海外）に採用された。また本研究の中で博士論文を書いた学生の内、1 名が研究機関の研究員に新たに雇用された。修士論文においては計 5 名が学内（東大、長岡技科大、大阪市大）における優秀者の表彰を受けている。また採択時点で助教（大阪大学）であった田越が准教授（大阪市大、2015 年 4 月～）に採用・昇任した。

A05 では、合計で 8 名の研究員を雇用したが、その後も皆、研究職に就いている。特に、中野寛之は龍谷大・准教授に就職、西澤篤志は名古屋大学 KMI・特任助教のポジションを得た。

公募研究関連でも、代表者の昇任などがある。例えば、金沢大学・米徳は、最初に公募研究に採択された時点では准教授であったが、2016 年 1 月に教授に昇任した。

## 11. 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。

各研究分野ごとに、総括班評価担当者によるコメントを記す。

### 計画研究 A01「重力波天体からの X 線・ $\gamma$ 線放射の探索」

（評価者：伊藤好孝・名古屋大学宇宙地球環境研究所・教授）

X 線・ $\gamma$  線観測との連携観測を目指す A01 班については、全天 X 線観測装置 MAXI により GW150914 の X 線追観測が行われ、X 線源は見つからなかったものの近い将来の中性子連星合体からの信号探索体制が整備された事は評価できる。MAXI については、他の様々な成果も上げている。もうひとつの目的である WF-MAXI の開発については、大立体角 X 線カメラの要素開発やシステム仕様書作成など成果を上げたものの、国際宇宙ステーション搭載不採用を受けて当初計画の変更を余儀なくされた事は残念である。代替案となる OHMAN 計画や紫外線超小型観測衛星の提案、また公募研究で成果を上げた様々な X 線追観測のアイデアについて継続的に検討を続け、X 線・ガンマ線による連携観測体制をさら強化して行くことが望まれる。

### 計画研究 A02「天体重力波の光学赤外線対応現象の探索」

（評価者：渡部潤一・国立天文台天文情報センター・教授）

順調に稼働を開始した KAGRA によって、今後の国際的に重力波の発生源の特定は現実味を帯びつつある。そのような状況下、国際的に光学赤外線や電波によって、重力波源天体を同定し、また追跡観測することで、その全容を解明することはきわめて重要である。本研究では、想定される重力波の検出に呼応し、わが国での緊急観測態勢および追跡観測網の整備を目指したもので、時宜を得た整備がなされている。計画研究の吉田グループ（A02）は、これまでのガンマ線バーストに呼応する観測・追跡網を参考にしながらも、ガンマ線に比べても決定位置精度が低いことが想定される点を鑑みて、広視野撮像観測という日本の光・赤外線天文学のお家芸を駆使している。特に、天文学では極めて斬新な CMOS センサーを活用した広視野撮像装置の開発を公募研究（酒向ら）とともに進め、その観測頻度を上げて高い時間分解能で観測する手法（田中ら）を開発した。これらは世界的にも例がなくユニークな方向性として高く評価できる。これに対応した形で、岡山や鹿児島（永山ら）の広視野近赤外線カメラ、ミリ波サブミリ波での検出の可能性の検討（田村ら）、さらにアジア地区のネットワークを生かして、中国に設置予定の 50 cm 望遠鏡と三色同時カメラの開発を遂行し、また同じ経度帯に存在する名古屋大学のニュージーランドにある望遠鏡などでの観測態勢を整えた。手薄になりがちなソフト開発（重力波アラート対応システム、大量データ解析パイプライン）の開発や、関連する国内の望遠鏡のネットワークを通じての観測網を整備し、海外関係機関と協定書を結ぶなど、すべての面において順調に進んだことは、きわめて高く評価してよい。今後は、本研究で得た装置やノウハウを実際の重力波の検出に合わせ、適用して新しい天文学が開けることを望む。

### 計画研究 A03「超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究」

（評価者：梶田隆章・東京大学宇宙線研究所・教授）

本計画研究の大きな目標は、神岡鉱山内に設置された既存の 200 トンの水チェレンコフ検出器を、近傍で超新星爆発が起こった時に、重力波との相関信号を検出できるよう世界最先端の超新星ニュートリノ検出器に改造することであった。特に、ニュートリノ反応と、反ニュートリノ反応の区別を行い、超新星爆発メカニズムの解明に貢献することが求められた。この目的の達成のために、0.2%の硫酸ガドリニウムを水中に溶解させ、反電子ニュートリノ反応（反電子ニュートリノ + 陽子 → 陽電子 + 中性子）で発生した中性子をガドリニウムに吸収させ、その際に出る合計 8 MeV のガンマ線を検出する測定器とすることを目指した。この中でも特に困難が予想されたのが、硫酸ガドリニウムを溶解させつつ、水の純度を保って、高い透過率を維持することである。この困難を克服するためには、水中から硫酸ガドリニウム以外の不純物を全て取り除きつつ、硫酸ガドリニウムを残す必要があり、通常の純水装置では不可能である。このことを純水装置への多くの工夫によって成し遂げたことは、誠に素晴らしく、非常に高く評価される。更にその後は水チェレンコフ装置を運転し続け、近傍超新星爆発起源のニュートリノの探索を連続して行っていること、また、本計画研究で達成された技術が、より大きなスーパーカミオカンデでも利用されることが承認されたことも、本計画研究の成果として高く評価される。なお、LIGO による重力波イベント GW150914 および GW151226 において、ニュートリノ信号は観測されなかったものの、スーパーカミオカンデを用いて重力波とニュートリノ信号との相関解析を行ったことは、今後の重力波とニュートリノの共同観測の第一歩となるもので、評価されるべきである。

## 計画研究 A04「多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究」

(評価者：坪野公夫・東京大学・名誉教授)

計画研究 A04 の主目的は、1. 重力波のデータ解析体制の構築とその運用、2. 他の観測手段との連携体制の確立、である。これにより、本領域の中核テーマとなる「重力波事象」の検出を担うと同時に、各研究計画を横断する形で重力波データからのサイエンスの抽出を図ろうとしている。

### 1. 重力波のデータ解析体制

重力波データ解析の推進については、ソフトウェアおよびハードウェア両面からの研究開発が必要であった。まずソフトウェアについては、日本の研究者が主体となったデータ解析ライブラリ KAGALI の第 1 版が作成されるなど、着実な進歩が見られた。ハードウェアに関しては、2015 年 3-4 月に行われた KAGRA の観測データを岐阜県神岡の KAGRA トンネル坑内から各解析拠点まで連続転送することに成功するなど、実戦に耐えうるシステムの構築がなされた。KAGRA の実際の観測データが処理され、重力波事象の探索が実行されたことは、ハード、ソフトを含めたデータ解析体制全体の構築とその運用が実現されたことを示している。また、LIGO が初検出した重力波イベント GW150914 の公開データを発表直後に解析し、信号波形を正しく抽出できたことは、幸運とは言えデータ解析の実力を示すできごとであった。

KAGRA の初観測や LIGO の重力波初検出の機会をとらえた本グループによる重力波研究の一般への普及活動は注目されるべきであり、これにより一般の人たちが重力波を正しく認識することに広く貢献した。

これからの課題としては、KAGRA の検出感度が initial LIGO レベルに到達するまではまだ時間がかかることがある。それまでの間のデータ解析グループの活動維持の方策を今後検討する必要があると思われる。

### 2. 他の観測手段との連携体制の確立

ニュートリノと重力波を用いた超新星爆発イベントの研究、修正重力理論と重力波検出など、他の計画研究と横断した取り組みもなされた。このほか、他の観測手段との同時観測・フォローアップ観測のための連携体制確立の準備も進んでいるが、これが本格的に動き始めるまでにはもう少し時間がかかると思われる。

## 計画研究 A05「重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究」

(評価者：佐々木節・京都大学基礎物理学研究所・教授)

理論研究においては、計画研究 A05 班の当初の目標は十分に達成している。特に、LIGO が発見した 30 太陽質量のブラックホール連星を初代星形成論から LIGO の発見以前に予言していたことは素晴らしい。また、同連星がインフレーション宇宙を起源とする原始ブラックホール連星である可能性を指摘し、宇宙論的にも電磁波観測と重力波観測の連携の重要性を明らかにしたことや、修正重力理論の検証に関して、重力子振動を起こす理論への新たな観測的制限を導出したことも特筆に値する。他にも、ニュートリノ輸送の高精度数値コードの開発や、中性子星連星の合体時に起こる電磁波対応天体の一連の研究で世界をリードする成果を上げている。計画研究との連携や公募研究における優れた成果としては、ショートガンマ線バーストの重力波源としての性質の明確化やニュートリノ輸送計算の高精度化による超新星爆発の重力波源としての定量化などがあげられる。若手育成も順調に進み、大学院生が中心となった共著論文も数多く発表されている。研究会の主催やサポートを通して関連分野の若手の育成にも大きく貢献をした。また、計画研究 A05 班で雇用した博士研究員は、全員次の研究職を得ており、内 2 名は任期なしの教員ポストに採用されている。