

領域略称名：加速宇宙

領域番号：2705

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)」に係る中間評価報告書

「なぜ宇宙は加速するのか？- 徹底的究明将来への挑戦 -」

(領域設定期間)

平成27年度～平成31年度

平成29年6月

領域代表者 (東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授・村山 斉)

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	6
2. 研究の進展状況	8
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	11
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	12
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）	15
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	20
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	22
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）	23
9. 総括班評価者による評価	24
10. 今後の研究領域の推進方策	26

研究組織

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	15H05887 なぜ宇宙は加速するの か？ - 徹底的究明と将来への挑戦 -	平成27年度～ 平成31年度	村山 斉	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究 機構・特任教授	11
Y00 支援	15K21733 なぜ宇宙は加速するの か？ - 徹底的究明と将来の挑戦	平成27年度～ 平成31年度	村山 斉	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究 機構・特任教授	10
A01 計画	15H05888 インフレーション宇宙 のメカニズムとその物理の多角的検証	平成27年度～ 平成31年度	佐々木 節	京都大学・基礎物理学研究所・教授	8
A02 計画	15H05889 宇宙の揺らぎと構造の 進化、その背後にある物理の究明	平成27年度～ 平成31年度	高橋 史宜	東北大学・理学研究科・准教授	6
A03 計画	15H05890 ダークエネルギーの理論モデル構築とその観測的検証	平成27年度～ 平成31年度	杉山 直	名古屋大学・理学研究科・教授	5
B01 計画	15H05891 宇宙マイクロ波背景放射の広天域観測で探る加速宇宙と大規模構造	平成27年度～ 平成31年度	羽澄 昌史	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・教授	10
B02 計画	15H05892 広天域深宇宙のイメージングによる加速宇宙の暗黒成分の研究	平成27年度～ 平成31年度	宮崎 聡	国立天文台・先端技術センター・准教授	10
B03 計画	15H05893 広天域銀河分光サーベイによる加速宇宙の究明	平成27年度～ 平成31年度	高田 昌広	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究 機構・教授	8
B04 計画	15H05894 次世代超大型光学赤外線望遠鏡 TMT と高分散分光器による宇宙の加速膨張の直接検出	平成27年度～ 平成31年度	臼田 知史	国立天文台・TMT 推薦室・教授	10

C01 計画	15H05895 究極理論からの加速宇宙の解明	平成27年度～ 平成31年度	大栗 博司	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・主任研究員	4
D01 計画	15H05896 多波長宇宙論データを用いた究極的物理解析ツールの開発	平成27年度～ 平成31年度	小松 英一郎	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・客員上級科学研究員	3
統括・支援・計画研究 計11件					
E01 公募	16H01085 銀河形成シミュレーションで迫るダークマターの正体	平成28年度～ 平成29年度	岡本 崇	北海道大学・理学研究科・助教	1
E01 公募	16H01092 新しい重力理論の探求と修正重力理論の観測的検証に関する理論研究	平成28年度～ 平成29年度	成子 篤	東北大学・理学研究科・助教	1
E01 公募	16H01093 テラスケール新物理と初期宇宙の進化とのつながりに関する理論的研究	平成28年度～ 平成29年度	柿崎 充	富山大学・大学院理工学研究部・助教	1
E01 公募	16H01094 宇宙初期ゆらぎの量子性と情報量	平成28年度～ 平成29年度	南部 保貞	名古屋大学・理学研究科・准教授	1
E01 公募	16H01095 膨張宇宙におけるホログラフィー原理の検証	平成28年度～ 平成29年度	浦川 優子	名古屋大学・高等研究院(理)・特任助教	1
E01 公募	16H01098 宇宙マイクロ波背景放射における揺らぎの非線形進化	平成28年度～ 平成29年度	平松 尚志	立教大学・理学部・博士研究員	1
E01 公募	16H01099 Cosmic acceleration by means of a massive graviton	平成28年度～ 平成29年度	DEFELICE, Antonio	京都大学・基礎物理学研究所・准教授	1
E01 公募	16H01102 初期特異点のない新しい宇宙モデルとその観測的検証	平成28年度～ 平成29年度	小林 努	立教大学・理学部・准教授	1

E01 公募	16H01103 複数場インフレーションモデルの検証に関する理論的研究	平成28年度～ 平成29年度	横山 修一郎	立教大学・理学部・助教	1
E02 公募	16H01086 銀河古成分恒星系の動力学に基づく暗黒物質構造の解明	平成28年度～ 平成29年度	千葉 柁司	東北大学・理学研究科・教授	2
E02 公募	16H01087 I a型超新星の早期多色測光による親星の研究	平成28年度～ 平成29年度	土居 守	東京大学・大学院理学系研究科・教授	1
E02 公募	16H01088 時間変動を用いた低質量ブラックホール探査	平成28年度～ 平成29年度	諸隈 智貴	東京大学・大学院理学系研究科・助教	1
E02 公募	16H01089 Halo assembly bias systematics in interpreting cosmic acceleration	平成28年度～ 平成29年度	MORE, Surhud	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任助教	1
E02 公募	16H01101 最遠方電波銀河の探査による初期宇宙での大質量銀河および原始銀河団の研究	平成28年度～ 平成29年度	長尾 透	愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授	1
E02 公募	16H01106 天文コムを利用した視線速度精密測定のためのデータ取得・解析法の研究	平成28年度～ 平成29年度	神戸 栄治	国立天文台・岡山天体物理観測所・専門研究職員	7
E02 公募	16H01107 ミリ波からサブミリ波領域における機能性高放射率材料の開発	平成28年度～ 平成29年度	高田 卓	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教	1
E02 公募	16H01108 陶磁器焼成技術を応用したミリ波光学素子の開発	平成28年度～ 平成29年度	高山 定次	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授	3

E02 公募	16H01110 偽偏光を作らない光学系「超伝導ミラー」の開発研究	平成28年度～ 平成29年度	田島 治	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	4
E02 公募	16H01111 Probing Black Hole-galaxy Co-Evolution: Clues From the Early Universe	平成28年度～ 平成29年度	SCHRAMM, Malte	国立天文台・TMT推進室・特任研究員	1
E03 公募	16H01090 次世代分光観測で拓く暗黒物質探査の新展開	平成28年度～ 平成29年度	林 航平	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員	5
E03 公募	16H01096 ボイド構造の精密モデリングと宇宙論検証への応用	平成28年度～ 平成29年度	西澤 淳	名古屋大学・高等研究院・特任講師	5
E03 公募	16H01097 加速宇宙観測における等方な非一様性による系統誤差と宇宙原理の観測的検証	平成28年度～ 平成29年度	柳 哲文	名古屋大学・理学研究科・助教	1
E03 公募	16H01100 超高強度レーザー場によるディラトン探索へ向けた究極真空系の基礎研究	平成28年度～ 平成29年度	本間 謙輔	広島大学・理学研究科・助教	1
E03 公募	16H01104 機械学習による測光的赤方偏移計測方法の研究	平成28年度～ 平成29年度	中野 淳	金沢工業大学・工学部・教授	3
公募研究 計24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。

研究領域名：「なぜ宇宙は加速するのか？-徹底的究明と将来への挑戦-

研究期間：平成 27 年度～平成 31 年度

領域代表者所属・職・氏名：東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授・村山斉

補助金交付額（直接経費、千円）：

平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	平成 31 年度	合計
237,800	215,100	213,300	221,000	218,800	1,106,000

研究の学術的背景：ニュートン以来、重力は万有引力であると考えられてきた。アインシュタインの一般相対性理論でもこれは同じである。一方、宇宙は極初期と現在の 2 つの時期で加速膨張しているという観測的な証拠が得られている。引力で宇宙膨張を減速させるはずの重力が、どのようにして膨張を後押しし加速させるのか、その物理機構は分かっていない。これは、現代物理学の根幹を揺るがす問題である。

Ia 型超新星の光度と赤方偏移の観測の結果、現在の宇宙は加速膨張していることが報告され、この発見に 2011 年のノーベル賞が与えられた。加速膨張を引き起こす未知のエネルギー源はダークエネルギーと呼ばれるが、その正体は不明である。一方、宇宙の極初期に爆発的な加速膨張があったというインフレーション理論は、宇宙背景放射（CMB）の観測衛星 WMAP 以降のデータで次々と検証され、まだ直接の証拠はないものの、状況証拠が出そろった段階である。WMAP の結果を踏まえ、インフレーション理論に 2013 年のグロバー賞と 2014 年のカブリ賞が与えられた。つまり、宇宙の極初期と、現在とで宇宙膨張が加速しているという観測的な証拠が確立してきている。なぜ宇宙膨張は加速するのか？ インフレーション、アインシュタインの宇宙定数という「理論」が「説明」に使われているものの、様々な不自然さを抱えており、到底満足できる説明とは言えない。

一方、銀河や銀河団に代表される宇宙の大規模構造は、インフレーション中に生成された量子揺らぎが種となり、宇宙の質量密度の大部分を占めるダークマターの引力の作用で揺らぎが増幅されて形成された。しかし、加速膨張は揺らぎをならず方向に働くため、大規模構造はダークマターとダークエネルギーとの競争によって発展してきた。すなわち、大規模構造と加速膨張の研究は、同じコインの表と裏として深く関わり合う。

以上の問題について、本領域の研究者らはそれぞれに理論的、観測・実験的な側面から活発に研究を進めてきた。具体的には、CMB の B モード偏光の探索を進めており、重力レンズ効果による B モード偏光の発見に成功した。すばる望遠鏡による深宇宙のイメージング（撮像）サーベイのための超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) を製作し、5 ヶ年計画（H31 年まで）のサーベイが始まった。また、すばる分光サーベイのための多天体分光器の設計が終わり、装置の建設も始まった。一方、量子重力理論、一般相対性理論、修正重力理論、インフレーション、ダークマターおよびダークエネルギーの模型、構造形成、さらに大規模データを扱う解析の手法に関し、それぞれ専門の研究者がいる。個別の研究の枠を超え、物理と天文の両方の知見を結集し、理論と観測・実験を新しいデータ解析の手法で結びつける必要がある。

本研究では、この物理学の根本に関わる問題の徹底的な究明のため、現在実行しうる最高の観測・実験（CMB B モードと銀河イメージング・分光サーベイ）を、互いに相補的な形で有機的に結びつけて行い、同時に将来の更なる観測に向けて開発と実現可能性の検証を行う。一方、様々なプロジェクトに跨がるデータ解析の手法を開発し、インフレーション、宇宙の構造と揺らぎ、ダークエネルギーの三つのサイエンスに結びつけていく。そして宇宙の加速膨張の全貌を究明することにより、当該研究領域の格段の発展・

飛躍的な展開を実現する。

対象とする学問分野：本領域は天文学（特に光学赤外線天文学、電波天文学、理論天文学）、物理学（特に素粒子、宇宙物理、相対論・重力の各々理論、実験）、さらには統計科学などの広範な基礎研究分野に跨がる。これらは主として理工系の数物系科学に含まれることから、理工系を審査区分として選択した。

本領域の目的である宇宙の加速膨張の究明には、上に挙げたような広範な既存の学問分野の融合が必須である。天文学と物理学は、近年までは独自の発展を遂げてきた。物理学が基本法則・原理の解明を目指してきたのに対し、天文学は宇宙の多様性、すなわち天体の発見とその理解を追求してきた。しかし、最近では、特に宇宙論研究の進展に伴い、両者の融合が国際的に急ピッチで進められて来ている。本領域では、すばる望遠鏡を用いた広天域宇宙サーベイと、スペースからの CMB 観測という他の追従を全く許さない新たな観測計画を武器に、我が国が世界をリードすることで当該領域の格段の発展・飛躍的な展開を実現する。現代物理学の根幹を揺るがす宇宙の加速膨張という大きな謎を究明する過程では、物理学と天文学の実験・観測研究と理論研究、さらには統計科学を高いレベルで統合し、新たな観測結果と理論モデルの提案、両者を結びつける究極ともいえる解析手法の開発、結果として、革新的・創造的な学術研究の実現および発展が見込まれる。

本領域の重要性と発展性：宇宙の加速膨張についての研究は 2011 年のノーベル賞、2013 年のグローバー賞、2014 年のカブリ賞を見てもわかる通り、国際的に非常に重要視されている。残念ながら我が国では、近年まで加速膨張の実験的・観測的研究は立ち遅れていた。しかし、日本が建設したすばる望遠鏡の超広視野・大口径を活かした深宇宙のイメージングと分光のサーベイを行う「すみれ」計画が立ち上がり、一気に世界トップに躍り出ることが可能になった。特にイメージングと分光を同じ望遠鏡で行い、二つを合わせることで格段に系統誤差を抑え、更に相補的な情報で理論的な仮定をせずに結果を引き出すことができるのは、現在すばる望遠鏡でのみである。これは国際的に例がない新規性がある。

また、CMB の研究は我が国では近年殆ど行われていなかったが、戦略的に POLARBEAR、QUIET 実験に参加しノウハウを得た上で、次世代の Simons Array や衛星実験の LiteBIRD では我が国のチームが、装置の面でも解析の面でもリーダーシップを発揮している。特に LiteBIRD 計画は欧米の計画とは異なり、インフレーション起源の B モード偏光の探査に特化したデザインになっており、国際的に例がない独創性がある。これに触発されて最近では米国でも PIXIE という同様の計画が議論され始めた程である。

一方、理論の側面では本領域の研究者らは量子重力理論の候補である超弦理論、CMB の非等方性の理論、密度揺らぎの摂動的計算の理論、コンピュータ・シミュレーション、インフレーションの模型、ダークマターの現象論等で先駆的な研究をしてきており、十分に国際的優位性がある。データ解析についても素粒子実験や CMB の大規模データを中心的に解析した経験者があり、やはり十分に国際的優位性がある。

しかし、こうした個別の研究は今までバラバラに行われており、これらを全て結びつける総合的なアプローチは我が国では行われて来なかった。加速膨張の物理機構の解明には、天文学と物理学を融合する研究、理論と実験・観測を繋ぐ解析が必要であり、上に述べた国際的優位性を活かすことで、当該学問分野の飛躍的な発展を実現する。

そして、2020 年代に稼働する超大型光学赤外線 30m 望遠鏡などの、既に動き始めた巨大計画を前にして、更に飛躍的に宇宙の加速膨張の物理の究明を進めるために、どのような手法があり、どういう装置が必要で、技術的に可能なのか、さらなる研究開発が必要である。これらの開発研究を通じて、本研究期間が終了後の発展に繋げていくことができる。

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「インフレーション宇宙のメカニズムとその物理の多角的検証」

多角的にインフレーション理論を研究し、インフレーションの起源等の根源的問題の答えに可能な限り近づくことを目的とする。具体的な目標は（1）単一場インフレーションモデルの精密な解析、（2）超弦理論等に基づいたモデルの構築、（3）泡宇宙モデル等における曲率揺らぎの初期条件の解明、（4）これらの成果に基づいたモデルの観測的検証条件の明確化と、より精密な制限である。上記それぞれのテーマに関する主な成果は以下の通りである。（1）LIGO 実験により GW150914 で検出されたブラックホール連星がインフレーション起源である可能性を示した。インフレーション後の再加熱期における重力的粒子生成が予想以上に効率的であることを発見した。（2）超対称性理論モデルにおける宇宙論的ドメインウォール問題を解決した。最も一般的なスカラー・テンソル理論の枠組みで、特異点のない宇宙モデルはすべて勾配不安定性を持つことを示した。（3）観測が示唆する CMB スペクトルの双極的非対称性が、泡宇宙モデルでは無矛盾に説明できることを示した。（4）原始揺らぎの非線形進化も含めたすべての偏光を考慮した CMB 揺らぎの定式化を完成した。将来の銀河分布の観測は、CMB によるものより強い原始非ガウス性への制限を与えることを示した。

計画研究 A02「宇宙の揺らぎと構造の進化、その背後にある物理の究明」

宇宙の階層構造の素地を作り上げたダークマターの正体を解き明かし、その背後にある物理法則を究明することを目的とする。具体的にはダークマターに関して（1）原始密度揺らぎ、（2）生成および素粒子論的性質、（3）構造形成、（4）加速宇宙との関係、について明らかにする。上記研究テーマごとの主な成果は以下の通りである。（1）ダブルインフレーションモデルに基づき原始ブラックホールがダークマターとなるシナリオを構築した。また隠れたモノポールの Witten 効果によってアクシオン等曲率揺らぎおよび存在量が抑制されることを示した。（2）ダークマターの対消滅が与える元素合成および宇宙背景輻射温度揺らぎに対する影響を評価し、新たな制限を得た。隠れた光子との運動項混合に基づくダークマターと大統一理論の関係を明らかにした。（3）ダークマターの重力的クラスタリングに関して新しい解析的計算手法を開発し、従来は困難であった場合においてもパワースペクトル等の統計量を高速に理論予言することが可能になった。すばる望遠鏡の観測データに基づき系統的探索を行った結果、2つの新しい矮小銀河を発見し、ダークマターの性質に制限を与えた。（4）インフラトンとダークマターの統一モデルを提唱し、予言されるアクシオンダークマターが将来の太陽アクシオン探索実験およびレーザー実験で検証可能であることを示した。

計画研究 A03「ダークエネルギーの理論モデル構築とその観測的検証」

修正重力理論モデルの提案と検討、およびその観測的な制限について行なってきた。修正重力理論モデルの提案と検討については、国際学術誌への論文発表としての成果も数多く得られている。とくに、一般的な修正重力理論のセットであるホルンデスキー理論をさらに拡張し、理論の予言する宇宙の構造形成に関連する揺らぎの成長率が、観測と合うレベルで小さくできることを示したのは大きな成果である。観測的な制限については、スカラー・テンソル理論についてのこれまでにない厳しい制限を得ることに成功している。計画班メンバー間のシナジーとして、野尻が提案する位相的場の理論に基づくダークエネルギーのモデルに対し、本研究費で雇用した博士研究員が中心となってこのモデルの詳細検討を行い、宇宙論からの制限と整合性を持つかどうかを調べる研究を行い論文としてまとめており、計画研究班内のシナジーが進んでいる。二年目を終えた段階としては、極めて活発な研究論文発表が実現しており、順調に研究が推移している。

計画研究 B01「宇宙マイクロ波背景放射の広天域観測で探る加速宇宙と大規模構造」

B01の目的は、宇宙マイクロ波背景放射（CMBと略す）の偏光度を広域に渡り精密観測し、加速宇宙の本質を実験物理学の立場から探求することである。特に、現代宇宙論最大の課題であるインフレーション宇宙仮説の検証をかつてない精度で行う事が主たる狙いである。また、重力レンズ効果に起因するCMB偏

光度を観測し、ニュートリノや宇宙の暗黒成分等に関するユニークな情報を得る事も重要な目的である。研究期間内に（１）地上望遠鏡Simons Array (SA) による観測結果を得ること、（２）LiteBIRDに代表される2020年代の衛星計画の技術成熟度を高めるため、ブレッドボードモデル (BBM) の設計・開発・試験を行うこと、の二点を達成する。

SAについては三台の望遠鏡が設置され、受信機製作と試験が着実に進んでいる。前景放射除去のために当初予定の90、150、220GHzに加え、270GHzの観測も行う事を決定した。さらに、POLARBEAR 実験で取得した偏光変調器を用いたデータの解析結果を発表し、数分角の分解能を持つ地上望遠鏡でインフレーションの検証に必要な広天域大角度観測が実現可能であることを世界で初めて示した。衛星観測の技術開発では、LiteBIRD 衛星の要求分析・概念設計、宇宙用偏光変調器の基礎開発、宇宙線の影響を緩和する新しい超伝導検出器デザインとその試験装置開発等を進めた。さらに理論家との共同研究により、LiteBIRD 衛星で観測可能な新しい物理量の提案、観測精度・意義に関する論文を発表し、本領域の相乗効果を示した。

計画研究 B02 「広天域深宇宙のイメージングによる加速宇宙の暗黒成分の研究」

平成28年度末までの段階で、HSCによる広視野サーベイ観測は130晩が完了した。観測した天域の広さは、400平方度に達し、重力レンズ解析で重要なフィルター(HSC-*i*バンド)のシーングの中央値は0.56秒角と極めて良好である。深さは当初予定通り、同バンドで26等級に達し、広さ・深さ・結像性能ともに、世界でも一線級のデータが取得できた。

画像解析システムは、本計画研究のメンバーが中心となり開発を続けてきているが、平成28年度は画像解析ソフトウェアと質量マッピング解析エンジンを組み合わせて、分散解析の試験を行い、プロトタイプが完成した。また、画像上の各種情報(非常に明るい星に近い、複数の天体が重なっている、宇宙線の秘跡が残る等)を保存するマスキレイヤーの充実をはかり、天体情報の高速検索を実現した。さらには、画像ビューアー(hscMap)の機能の充実及び高速化に成功し、数10平方度の鳥瞰図から、1秒角(数画素)領域の拡大まで、マウススクロールだけで容易に行えるようになった。hscMapの開発は、当初研究計画になかったが、画像閲覧の効率化の必要性を認識し、新たに行ったものである。

さらに、これまでの技術検討を踏まえ、平成29年度から開発を開始するCMOSの暫定仕様が決まった。CMOS読み出し回路のフロントエンド部(高速デジタル入出力回路)の開発をメーカーとともにに行った。

計画研究 B03 「広天域銀河分光サーベイによる加速宇宙の究明」

本計画研究の一つの目的は、同じ天域の銀河イメージングおよび分光サーベイデータを組み合わせ、銀河バイアス不定性などを観測的に除去し、宇宙論パラメータをより正確に制限する手法を開発することである。初年度は、スローン・デジタル・スカイ・サーベイ(SDSS)から構築した銀河団カタログを用い、その重力レンズ効果と空間分布の測定から、銀河団内の数100kpcスケールの内部構造と周辺の数10Mpcスケールのダークマターの分布の関係に相関があることを発見した。この結果は、査読雑誌Phys. Rev. Lett.に発表され、その重要性から注目論文(Editor's suggestion)に選ばれた。この他にも銀河分光サーベイから測定できる精密な宇宙論観測量との比較を念頭に、多数のN体シミュレーションのデータに基づく高精度理論モデルの構築を進めている。

すばる超広視野多天体分光器(Prime Focus Spectrograph)の赤外線カメラの開発についても、プリンストン大学、ジョンズホプキンス大学の研究者と協力して、非常に需要の高い高感度近赤外線検出器H4RGをTeledyne社から購入でき、検出器の性能評価を行った。具体的には、検出器の制御システムおよび画像データ開発ソフトを開発・改良し、各ピクセルの電荷許容量、パッドピクセルマップなど基本的な性能を確認した。

計画研究 B04 「次世代超大型光学赤外線望遠鏡 TMT と高分散分光器による宇宙の加速膨張の直接検証」

光コムによる高分散分光器によって、宇宙の加速膨張を直接検証することを目指し、装置開発と理論的な考察を同時並行で進めている。波長校正技術に関する開発研究においては、堅牢性に優れたモード同期ファイバレーザを基に発生させた可視光を、光共振器で切り出すための検討と実験を行った。発生した可視光コムの間隔周波数は100MHzであり、これを高分散分光器に適用可能な20GHz以上の間隔に切り出すためには、精密な共振器長制御と波長分散の管理が必要である。そのために必要な共振器ミラーの設計、調達を行うとともに、計算機シミュレーションおよび予備実験を行った。また、公募研究(16H01106、

16H01111) に関連して、岡山天体物理観測所への光コム設置などの結果により、本テーマで開発すべき光コムシステムの仕様をほぼ決めることができた。これらの研究は光学と天文学の研究者の共同研究での成果であり、融合領域の研究と言え、今後成果の発表が期待できる。

宇宙の加速膨張の直接検出の理論的検討においては、密度揺らぎの影響を評価したところ、特異加速度の効果が最も大きい、効果は $z < 1.5$ で 5% 程度、 $z > 3$ で 3% 以下であることが分かった。現時点では密度パラメータとハッブル定数の測定誤差 (5%) による誤差が大きく、 $z > 3$ でも 30% になることが分かった。また、プランク衛星による温度揺らぎのデータと BAO のデータをもとに、重力定数の時間変化の新しい制限 (0.2% 以下) を与えた。一方、観測的実現性の検討においては、銀河団による大離角レンズクェーサーを用いた多視線分光観測の可能性を検証し、その結果を学術論文として発表した。このユニークな観測手法はクェーサーそのものの観測のみならず、小スケールでの銀河間物質 (IGM) の 3 次元構造の解明にも利用することができる。視線方向および横断方向の情報を同時に取得する必要がある IGM トモグラフィーに大きく貢献する技術であるといえる。現在 B03 で検討中のプログラムの発展的研究となる。

計画研究 C01 「究極理論からの加速宇宙の解明」

超弦理論を中心とする究極的な理論から加速宇宙についての考察を進めている。例えば、ホログラフィー原理や情報理論の手法を使って、超重力理論の低エネルギー的性質に制限をつける可能性を追求している。特に、場の量子論のエントロピー不等式から、一般相対論のエネルギー正值定理を拡張する新しいタイプのエネルギー正值定理を証明した。また、超軽量アクシオン場がダークマターであった場合に、マイクロ Hz 重力波干渉計を使って観測できる可能性を明らかにした。AdS/CFT 対応を超えるホログラフィック理論の一般的な性質についての系統的な解析も発表している。また、アクシオンと呼ばれる粒子のダークマターとしての性質等、宇宙論についての解析も行った。さらに、観測的宇宙論による方法と量子論的過程に着目した研究の二つのアプローチから研究を進めている。

公募研究の 16H01095 は、インフラトンのポテンシャルに、弦理論から期待されるモジュラー不変性を課した場合、観測できる大きさの原始重力波を生成することは困難であることを示し、別の公募研究 16H01094 は、量子宇宙論における境界条件の確率分布を十分長いインフレーションが起きるとい条件のもとに数値的に求めた。

計画研究 D01 「多波長宇宙論データを用いた究極的物理解析ツールの開発」

初年度の目標は、対数正規分布に従う物質密度場を生成するシミュレーションコードを完成させ、その密度分布から B02 や SKA で得られる重力レンズのシミュレーションデータを作成し、さらに密度分布をポアソン統計に従ってサンプリングすることで B03 や SKA で得られる銀河分布のシミュレーションデータを作成することであった。宇宙論的連続の方程式を用いれば、密度場から速度場も計算できる。銀河の赤方偏移に速度場の影響を加えれば、観測可能な赤方偏移空間における銀河分布を作成できる。これらは達成でき、それぞれのシミュレーションデータを生成するコード (lognormal_galaxies と lognormal_lens) を研究代表者のウェブサイト (<http://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/~komatsu/codes.html>) 上で世界に公開した。平成 28 年度の目標は、得られたそれぞれのシミュレーションデータから、ダークエネルギーの状態方程式パラメータ w の事後確率分布を求めるソフトウェアを書くことであった。これも完成した。この結果より、もし暗黒エネルギーが宇宙定数 ($w = -1$) であるならば、PFS の銀河サーベイから期待されるニュートリノ質量和への上限値は 95% の信頼度で $\Sigma m_\nu < 0.1$ 電子ボルト (eV) であることがわかった。これは、ニュートリノ質量の構造が、いわゆる通常の階層構造 (normal hierarchy) なのか、反転した階層構造 (inverted hierarchy) なのかを見極めるのに適した精度である。もし PFS から $\Sigma m_\nu < 0.1 \text{ eV}$ が得られれば inverted hierarchy を棄却できる。逆に、 $\Sigma m_\nu > 0.1 \text{ eV}$ であれば PFS によって初めてニュートリノ質量の絶対値を観測的に決定できる。どちらの結果も、天文宇宙観測から素粒子物理学の理解を大きく進展させる融合領域の相乗的な結果になる。

これらの計画研究班の研究に加え、領域内の研究者と公募研究の研究者とのあいだの自発的な議論、交流を契機として、異なる分野、専門の研究者による共同研究が実現し、多くの査読論文の発表を発表できた (4. 主な成果発表、5. 研究成果の公表の状況を参照)。このように領域全体であらゆる相乗効果が実現し、目標としている研究、領域の展開は順調に推移していると言える。

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。

H27 採択新学術審査結果所見からの引用

（留意事項）：総括班及び理論関係の各計画研究の予算に関しては、妥当性が一部不明瞭であるため、再度精査の上、効率的な計画を立て交付申請されたい。

対応策：

指摘事項を受け、より効率的な予算執行のために総括班及び理論関係の各計画研究班の予算に関してその妥当性を検討した。総括班については、文字通り「総括」のためなので研究補助ではなく、事務連絡交通費など、新学術領域全体の運営に関わる経費を執行している。また間接経費を有効活用して事務補佐員を採用し、この報告書など領域全体に関わる事務を幫助している。2017年度に関しては、国際研究会の開催を予定しているの、著名な研究者、競合する宇宙論実験プロジェクトの代表研究者の招聘に必要な旅費の経費を計上している。理論班（計画研究 A01 - A03）の予算に関しては、再度予算を見直し、給与を本領域の経費と大学の運営費あるいは国際活動班の経費から支給することによって、各研究費予算の節約を図った。また、実験プロジェクトが国際共同研究に基づいているが、海外のパートナー研究機関と共同で優秀な博士研究員を雇用するなどの工夫を図り、人件費の節約ができたと同時に、雇用した研究員が領域の研究者と海外の研究機関を結ぶハブ的な役割を果たし、領域の研究の発展、相乗効果に貢献している。それ以外の経費は、各メンバーの旅費、あるいは計算機の購入などに充てている。領域内の研究者は極めて順調に研究成果（計 270 編以上の査読論文）を挙げており、その成果発表のための旅費としてこの予算は必ずしも潤沢ではないものの、格安航空券の利用や一部を所属機関の運営費によるサポートを利用することによって、本研究費の予算を節約し、効率的な執行を行った。パソコンに関しても、既存の使用可能なリソースを活用することにより、計算速度の観点から最新機種に切り替える必要がある場合にのみ購入するなど必要最低限の支出にとどめた。

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。

本領域では、実験、理論、また多角的なアプローチを駆使し、初期宇宙、現在の宇宙の加速膨張の起源、物理を解明することを目的とする。以下では、新領域であるからこそ、すなわち異なる研究分野、専門の研究者らの交流・シナジーによる研究成果について述べる。他の成果については計画研究の報告書を参照されたい。

（1）すばる望遠鏡超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam による大規模宇宙観測データの全世界公開：HSC Public Data Release 1（計画研究 A02、A03、B02、B03、D01 が関係）

他の 8m 級望遠鏡と比較して、すばる望遠鏡は広視野（一度に観測できる空の領域）を有し、その高い結像性能と併せて、統計的天文学、宇宙論の研究には最高の望遠鏡である。この利点を最大限活用し、計画研究 B02、B03 の研究者を中心として、2014 年 3 月から超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam（HSC）を用い、大規模な宇宙のイメージングサーベイを行っている。宇宙の観測では、光速は有限であるため、宇宙空間で遠くに存在する、すなわち暗い銀河を観測することは、過去の宇宙に存在する銀河の姿を見ることと等価である。すばるの大口径の威力により、HSC サーベイは、減速膨張にある宇宙の銀河から、約 70 億年前に加速膨張に変遷してきた宇宙に存在する銀河を同時に見渡すことができる。

2014 年 3 月の開始以来、これまで順調に、世界で最も「広く、深い」宇宙のイメージングサーベイのデータを収集している。新領域 B02 班の研究者らが中心になり、2017 年 2 月 27 日に、この HSC 大規模サーベイの第一期データ（2014 年 3 月から 2015 年 11 月まで、すばる 61.5 晩相当のデータ）を全世界に公開することができた（HSC-SSP PDR1）。天体の画像、画像解析の測定量（天体の位置、星、銀河などの分類、各波長フィルターでのフラックス、天体の大きさなど）、その測定誤差を公開しただけでなく、膨大なデータ、天体カタログを容易に解析することを可能にする専用のデータベースやユーザーインターフェイスも同時に公開した。図 1 は公開した画像データのごく一部であり、複数の波長フィルターのデータを組み合わせ、各ピクセルの擬似カラーを施した画像データを示す。総データ量は約 80 テラバイトと膨大で、まだ全体の 6 分の 1 のデータにも関わらず既に約一億個の銀河のカタログを作成することに成功した。例えば、広天域銀河サーベイで有名な米国のスローン・デジタル・スカイ・サーベイ（SDSS）は同等サイズの天体カタログを作成するのに 10 年以上の歳月を要した。この事実はすばる HSC の威力を如実に示しており、世界中の天文学者の注目を集めている。

HSC-SSP 国際共同研究の研究者グループは、この初期 HSC データから得られた初期サイエンス成果について、日本天文学会刊行の欧文研究報告誌（Publication of the Astronomical Society of Japan）の特集号に発表する予定である。2017 年 5 月 18 日の時点で、すでに 36 編の論文が投稿されている。そのほとんどの論文に本領域の研究者が関与している。図 2 は、その一つの成果であり、HSC データを用い、遠方の銀河像を精密に測定することにより、ダークマターの 3 次元分布（空間方向および赤方偏移方向）を復元した結果である（Oguri et al. arXiv:1705.06792）。このダークマター分布は銀河分布と良い相関を示しており、ダークマターが特に密集した領域に星、銀河が形成され、多数の銀河の分布が宇宙の大規模構造を形成してきたという冷たいダークマターの構造形成モデルを定性的に支持している。これらの HSC プロジェクトは、日本、台湾、プリンストン大学の

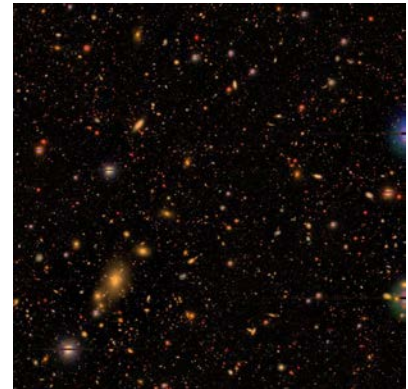


図 1: HSC-SSP 銀河サーベイの COSMOS 領域（ろくぶんぎ座方向）の擬カラー合成画像。

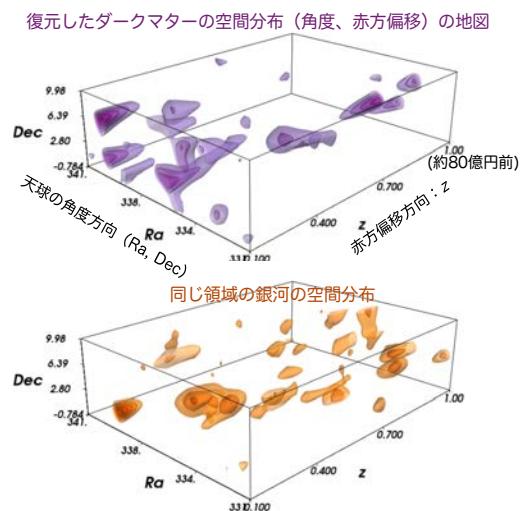


図 2: 上図は HSC-SSP データの重力レンズ測定から復元したダークマターの空間分布 (Ra, Dec の天球方向と奥行き方向)。奥行き方向は宇宙の過去の姿でもあり、80 億年前の宇宙まで見渡している。下図は、同じ領域の銀河の空間分布。

国際共同研究で行っているが、本領域の補助金の支援により、若手研究者の積極的な交流を促進し、将来の宇宙論研究を担う若手研究者の育成に務めている。また、本領域の中堅研究者あるいは経験ある研究者が中心になり、円滑に国際共同研究を運営している。これまでのところ、データ取得、データ解析、また国際共同研究の運用は極めて順調に進んでいると言える。

(2) 原始ブラックホール研究成果と新展開(計画研究 A01、A02、B02、B03 が関係)

2015年2月に米国を中心としたLIGO-Virgoチームによる重力波検出という大ニュースは、アインシュタインの一般相対論を直接的に証明する世紀の大発見であり、物理学の業界だけでなく、一般ニュースでも大きく取り上げられた。さらに驚きなのは、この重力波源が太陽の約30倍の質量を持つブラックホール同士の連星の合体ということである。このような巨大ブラックホールは、大型星(OB星)の進化の結果として形成される必要があるが、巨大星の連星の進化は良く分かっていない。また、宇宙年齢内に巨大ブラックホール連星を合体させるためには、数0.1AU(地球太陽間距離の10分の1程度)で2つの巨大ブラックホールを形成する必要がある。逆に言えば、LIGOの重力波検出が示唆するのは、未だ合体していない、大量のブラックホールの連星で銀河、宇宙が埋め尽くされているということである。

このLIGO重力波問題に関して、計画領域A01のグループの若手研究者らが中心となり、LIGO重力波のニュース直後にミニワークショップを京都大学基礎物理学研究所で開催し、いち早くLIGO重力波の問題、ブラックホール連星の起源について議論する場を持った。そこでの議論が契機となり、LIGO巨大ブラックホール連星が宇宙初期に生成された「原始」ブラックホールによって説明できるというシナリオを提唱し、この論文は物理業界で権威あるPhys. Rev. Lett.に発表された(Sasaki, Suyama, Tanaka & Yokoyama, Phys. Rev. Lett., 117, 061101, 2016)。原始ブラックホールとは、高温、高密度だった宇宙初期に密度ゆらぎが特に大きい領域が重力崩壊を起こした結果として形成されたブラックホールである。このような原始ブラックホールが宇宙初期に多数形成され、その後の重力相互作用で連星を形成し、LIGOの重力波源になったというシナリオである。この新理論の提案は反響が大きく、NHKの朝のニュースでも取り上げられ、計画研究A01の研究分担者である東京大学ビッグバン宇宙国際研究センターの須山輝明助教が出演し、理論の発見、またその観測的検証の重要性を解説した。

さらに、原始ブラックホールが大量に生成されれば、それらは重力のみで他の粒子と相互作用しなないので、ダークマターの有力な候補にもなり得る。計画研究A02の研究分担者東京大学川崎雅裕教授、また修士課程の学生らの研究グループは、原始ブラックホールの種になる原始ゆらぎを生成できる、さらに形成した原始ブラックホールの存在量がダークマターを同時に説明できるインフレーションのモデルを提案した(Inomata, Kawasaki et al., arXiv:1701.02544, 現在査読中)。図3は、このモデルが予言する原始ブラックホールの質量スペクトルである。図が示すように 10^{20}g (太陽質量の10兆分の1)程度の原始ブラックホールが生成できれば、ダークマターの存在量(縦軸)を説明できることを示し、またこれまでの観測的な制限と矛盾しない可能性があることを示している。

新領域内の研究者間の交流、議論を契機とし、上述の理論研究からモチベーションを受け、計画研究B03、B02班に所属する研究者、博士課程の学生らが、すばる望遠鏡のデータを用い、これら原始ブラックホールの存在を観測的に検証する研究を立ち上げている。上述したすばる望遠鏡の新超広視野カメラHSCは、約780kpcの距離にある近傍の巨大渦巻き銀河であるアンドロメダ銀河(M31)のバルジ、ディスク領域(星が分布する主な領域)を一度に観測することを可能にする。このHSCのアドバンテージに着目し、研究者グループはM31

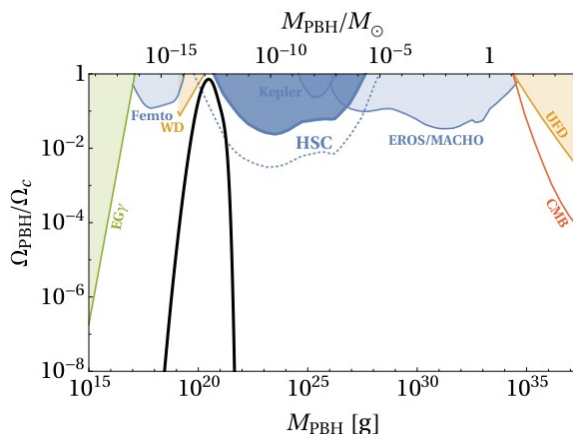


図3: 原始ブラックホールを生成するインフレーション宇宙モデル(Inomata et al. 2017)。このモデルでは黒の実線で示される質量範囲の原始ブラックホールが生成され、またダークマターの総量(縦軸の値)を説明できる。

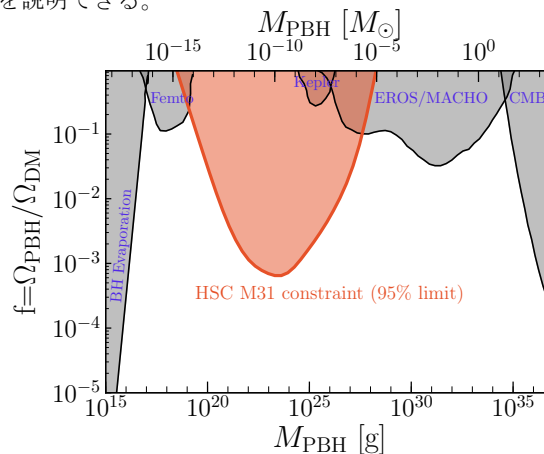


図4: 赤色の塗りつぶされた領域は、すばるHSCのアンドロメダ銀河のマイクロ重力レンズ探査から得られた原始ブラックホールがダークマターに占める割合が95% CL以上で棄却される領域(Niikura, Takada et al. in prep.)。灰色の領域は、他の観測の上限値の結果。

の時間空間で高密度なイメージングデータを取得した。その目的は、もし原始ブラックホールが天の川あるいは M31 のハロー領域のダークマターの主要成分を占めている場合に、その原始ブラックホールが引き起こす M31 の星へのマイクロ重力レンズ効果を探索することである。アインシュタインの重力レンズ効果は、重力によって引き起こされるため、ブラックホールの「存在」を直接的に検証できる。本領域研究の発足後にプリンストン大学の研究者らと協力し、この M31 の観測データの解析法を開発し、実際に約 10,000 以上の時間変動する星の候補を見つけることに成功した。しかし、原始ブラックホールによる重力レンズ効果の有力な候補天体は見つからなかった。図 4 は、すばる HSC の M31 の重力レンズ効果の探索による、原始ブラックホールの存在量の上限値の結果を示している。たった一晩のデータにも関わらず、 $M_{\text{PBH}}=[10^{-14}, 10^{-6}]M_{\text{sun}}$ の 8 桁にも及ぶ質量の範囲で、世界最高の上限值を得ることに成功している (Niikura, Takada, et al. プレプリント: arXiv:1701.02151)。他の観測の結果と組み合わせると、単一質量の原始ブラックホールがダークマターの全てを占めるシナリオを棄却している。

このように新学術領域に属する異なる分野、専門の研究者間の交流を契機として、原始ブラックホールという特定の研究テーマについて、インフレーション宇宙の理論模型、ダークマター候補の理論模型、LIGO 重力波の対応天体の起源、さらにそのシナリオのすばる望遠鏡の観測的検証という研究が多角的に発展してきている。この例はまさに新学術領域の研究の成果であり、その理念、また補助金の支援を受けた研究会、研究交流なしには実現し得なかった。また、研究グループに所属する大学院生が、これらのエキサイティングな研究を行う機会を受け、博士研究員も含め、若手研究者の育成の機会になったことも強調しておく。

(3) 矮小銀河からのダークマター対消滅断面積の制限の改善 (計画研究 A02、B03、B04 が関係)

ダークマターの正体の解明は物理学の最重要課題である。この問題に迫る一つの手法として、宇宙空間に存在するダークマター粒子同士が対消滅し、放出される 2 次的ガンマ線を探索する方法がある。このとき、ダークマターが密集していると考えられる領域、例えば天の川銀河の中心、近傍の矮小銀河などの領域の方向がダークマター対消滅の信号が強い領域になる。特に、矮小銀河はメンバー星の運動、またその空間分布の観測から、ダークマターが支配的な天体であることが分かっている。すなわち、矮小銀河の方向から特に強い起源が不明 (対応天体が未同定) のガンマ線が発見されれば、ダークマターからの信号である可能性が高い。現在のところ、未同定のガンマ線は発見されていないが、逆にダークマターの質量、対消滅断面積を制限する強力な手法になる。しかし、これを行うには、矮小銀河に付随するメンバー星

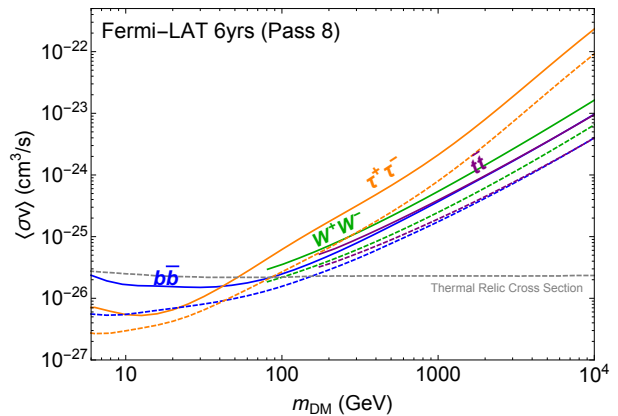


図 5 : 矮小銀河のダークマターの空間分布の非球対称性を考慮し、Fermi 衛星 6 年間のデータから、ダークマター対消滅の断面積を制限した結果。点線は、宇宙背景放射の観測で得られているダークマターの総量を説明するのに必要な断面積。

の視線速度を分光観測から測定し、重力とメンバー星の運動学的関係からダークマター分布を推定する必要がある。これまでの研究では、ダークマターの空間分布に球対称分布のモデルを仮定するのが通常であった。本領域の研究計画 A02、B03、また公募研究の研究者のグループ、特に素粒子物理、超弦理論、宇宙物理の理論的研究者、また天文分光観測を専門とする天文学者のグループは、非球対称分布モデルを仮定し、それぞれの矮小銀河のダークマターの空間分布を構築し直した。図 5 に示されるように、研究グループは、この改善した方法に基づき NASA の Fermi ガンマ線衛星の 6 年間の観測データを再解析し、ダークマター対消滅の散乱断面積の制限を再評価した (Hayashi, Ichikawa, Matsumoto, et al., MNRAS, 461, 2914, 2016)。

さらに関連した研究として、従来の天文分光観測は矮小銀河の中心領域のメンバー星の運動からダークマターの分布を推定するのが通例であったが、メンバー星の運動学的な軌道最大半径を十分に含む領域におけるメンバー星の運動を調べることで、また矮小銀河に重力的に付随しない手前あるいは背景の星を分離することがダークマターの分布を正確に推定する上で極めて重要なことを指摘した (Ichikawa, Ishigaki et al., MNRAS, 468, 2884, 2017)。計画研究 B03 の研究グループが中心に進めるすばる望遠鏡の広視野主焦点分光装置 Prime Focus Spectrograph (PFS) により、矮小銀河のダークマターの空間分布の理解が大きく進展することを指摘した。これらの研究は、天文学、素粒子物理学、理論、観測研究を専門とする研究者間の交流により実現した研究であり、本領域の成果と言える。さらに、公募研究の研究者、博士課程大学院生、博士研究員が中心となって進めた研究であり、若手研究者の育成にも繋がったことも付記しておく。

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）（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。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。また、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。また、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。

- (1) 主な論文リストについて（一部を除き査読あり）。ここに挙げる論文以外の論文（受理済みを含む）は領域全体で（公募研究含む）合計 270 編を超える（2017 年 6 月 1 日時点）。

領域代表者 村山 斉

- ▲“Matter Power Spectrum in Hidden Neutrino Interacting Dark Matter Models: A Closer Look at the Collision Term”, T. Binder, L. Covi, *A. Kamada, H. Murayama, T. Takahashi, N. Yoshida, JCAP, 1611, 043 (2016)
- ▲“SIMP Spectroscopy”, Y. Hochberg, *E. Kuflik, H. Murayama, JHEP, 1605, 090 (2016)
- ▲“How to use the Standard Model effective field theory”, B. Henning, *X. Lu, H. Murayama, JHEP, 1601, 023 (2016)
- “Model for Thermal Relic Dark Matter of Strongly Interacting Massive Particles”, Y. Hochberg, *E. Kuflik, H. Murayama, et al., Phys. Rev. Lett., 115, 021301 (2015)

計画研究 A01 「インフレーション宇宙のメカニズムとその物理の多角的検証」（49 編中 13 編を記載）

- ▲“Correlated primordial spectra in effective theory of inflation”, *J. O. Gong, M. Yamaguchi, Phys. Rev. D95, 083510 (2017)
- ▲“Multitracer technique for galaxy bispectrum: An application to constraints on nonlocal primordial non-Gaussianities”, *D. Yamauchi, S. Yokoyama, K. Takahashi, Phys. Rev. D95, 063530 (2017)
- ▲“Linear perturbation analysis of hairy black holes in shift-symmetric Horndeski theories: Odd-parity perturbations”, *K. Takahashi, T. Suyama, Phys. Rev. D95, 024034 (2017)
- ▲“Consistency relation and inflaton field redefinition in the delta N formalism”, G. Domenech, *J. O. Gong, M. Sasaki, Phys. Lett. B, 769, 413-417 (2017)
- ▲“Effects of electrically charged dark matter on cosmic microwave background anisotropies”, *A. Kamada, K. Kohri, T. Takahashi, N. Yoshida, Phys. Rev. D95, 023502 (2017)
- ▲“Strongly scale-dependent CMB dipolar asymmetry from super-curvature fluctuations”, C. Byrnes, *G. Domenech, M. Sasaki, T. Takahashi, JCAP, 1612, 020 (2016)
- ▲“Constraints on primordial black holes from Galactic gamma-ray background”, B. J. Carr, K. Kohri, *Y. Sendouda, J. Yokoyama, Phys. Rev. D94, 044029 (2016)
- ▲“Constraints on mixed dark matter from anomalous strong lens systems”, *A. Kamada, K. T. Inoue, T. Takahashi, Phys. Rev. D94, 023522 (2016)
- ▲“Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914”, M. Sasaki, *T. Suyama, T. Tanaka, S. Yokoyama, Phys. Rev. Lett., 117, 061101 (2016)

- ▲“Acausality in Nonlocal Gravity Theory”, *Y. I. Zhang, K. Koyama, M. Sasaki, G. B. Zhao, JHEP, 1603, 039 (2016)
- ▲“Viable Chaotic Inflation as a Source of Neutrino Masses and Leptogenesis”, *K. Nakayama, F. Takahashi, T. T. Yanagida, Phys. Lett. B, 757, 32-38 (2016)
- ▲“CMB Constraint on Dark Matter Annihilation after Planck 2015”, M. Kawasaki, *K. Nakayama, T. Sekiguchi, Phys. Lett. B, 756, 212-215 (2016)

計画研究 A02 「宇宙の揺らぎと構造の進化、その背後にある物理の究明」（53 編中 10 編を記載）

- ▲“The ALP miracle: unified inflaton and dark matter”, R. Daido, F. Takahashi and *W. Yin, to appear in JCAP, [arXiv:1702.03284
 - ▲“Evidence for a Dusty Dark Dwarf Galaxy in the Quadruple Lens MG 0414+0534”, *K. T. Inoue, S. Matsushita, T. Minezaki and M. Chiba, Astrophys. J. 835, L23 (2017)
 - ▲“Gauge Coupling Unification with Hidden Photon, and Minicharged Dark Matter”, R. Daido, F. Takahashi and *N. Yokozaki, Phys. Lett. B 768, 30 (2017)
 - ▲“Primordial black holes as dark matter in supergravity inflation models”, M. Kawasaki, A. Kusenko, *Y. Tada and T. T. Yanagida, Phys. Rev. D 94, 083523 (2016)
 - ▲“Thermal Relic Dark Matter Beyond the Unitarity Limit”, *K. Harigaya, M. Ibe, K. Kaneta, W. Nakano and M. Suzuki, JHEP 1608, 151 (2016)
 - ▲“CMB Constraint on Dark Matter Annihilation after Planck 2015”, M. Kawasaki, *K. Nakayama and T. Sekiguchi, Phys. Lett. B 756, 212 (2016)
 - ▲“The QCD Axion from Aligned Axions and Diphoton Excess”, T. Higaki, *K. S. Jeong, N. Kitajima and F. Takahashi, Phys. Lett. B 755, 13-16 (2016)
 - ▲“Anisotropies of gravitational-wave standard sirens as a new cosmological probe without redshift information”, *T. Namikawa, A. Nishizawa and A. Taruya, Phys. Rev. Lett. 116, 121302 (2016)
 - ▲“Constraints on the neutrino parameters by future cosmological 21 cm line and precise CMB polarization observations”, *Y. Oyama, K. Kohri and M. Hazumi, JCAP 1602, no. 02, 008 (2016)
 - ▲“Revisiting Big-Bang Nucleosynthesis Constraints on Dark-Matter Annihilation”, M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi and *Y. Takaesu, Phys. Lett. B 751, 246 (2015)
- 計画研究 A03 「ダークエネルギーの理論モデル構築とその観測的検証」（22 編中 12 編を記載）
- ▲“Instabilities in Horndeski-Yang-Mills inflation”, Jose Beltran Jimenez, Lavinia Heisenberg, Ryotaro Kase, Ryo Namba, Shinji Tsujikawa, Phys. Rev. D95, 63533 (2017)
 - ▲“Planck constraints on scalar-tensor cosmology and

- the variation of the gravitational constant”, *J. Oba, K. Ichiki, T. Chiba, N. Sugiyama, Phys. Rev. D93, 122002 (2016)
3. ▲“Reconstruction of CMB temperature anisotropies with primordial CMB induced polarization in galaxy clusters”, *G.-C. Liu, K. Ichiki, H. Tashiro, N. Sugiyama, MNRAS Lett., 460, L104-L108, (2016)
 4. ▲“Screening fifth forces in generalized Proca theories”, *A. De Felice, L. Heisenberg, R. Kase, S. Tsujikawa, Y.-li Zhang, G.-B. Zhao, Phys. Rev. D93, 104016 (2016)
 5. ▲“Cosmology in generalized Proca theories”, *A. De Felice, L. Heisenberg, R. Kase, S. Mukohyama, S. Tsujikawa, Y.-li Zhang, JCAP, 6, 48 (2016)
 6. ▲“Cosmic microwave background and inflation in multi-fractional spacetimes”, *G. Calcagni, S. Kuroyanagi, S. Tsujikawa, JCAP, 8, 39 (2016)
 7. ▲“Effective gravitational couplings for cosmological perturbations in generalized Proca theories”, *A. De Felice, L. Heisenberg, R. Kase, S. Mukohyama, S. Tsujikawa, Y.-li Zhang, Phys. Rev. D, 94, 44024 (2016)
 8. ▲“Anisotropic cosmological solutions in massive vector theories”, *L. Heisenberg, R. Kase, S. Tsujikawa, JCAP, 11, 8 (2016)
 9. ▲“Absence of solid angle deficit singularities in beyond-generalized Proca theories”, *L. Heisenberg, R. Kase, and S. Tsujikawa, Phys. Rev. D94, 123513 (2016)
 10. ▲“Cosmology with a successful Vainshtein screening in theories beyond Horndeski”, *R. Kase, S. Tsujikawa, A. De Felice, Phys. Rev. D93, 24007 (2016)
 11. ▲“Singular Accelerated Evolution in Massive F(R)F(R) Bigravity”, *S. Nojiri, S. D. Odintsov, Phys. Rev. D92, 124059 (2015)
 12. ▲“Cosmological disformal transformations to the Einstein frame and gravitational couplings with matter perturbations”, *S. Tsujikawa, Phys. Rev. D92, 64047 (2015)
- 計画研究 B01** 「宇宙マイクロ波背景放射の広天域観測で探る加速宇宙と大規模構造」 (35 編中 10 編を記載)
1. ▲“Performance of a continuously rotating half-wave plate on the POLARBEAR telescope”, *S. Takakura, Y. Chinone (11 番目), M. Hasegawa (21 番目), M. Hazumi (23 番目), N. Katayama (30 番目), T. Matsumura (40 番目), H. Nishino (42 番目), O. Tajima (51 番目), 他 45 名, JCAP, 05,008 (2017)
 2. ▲“Broadband Corrugated Horn Array with Direct Machined Fabrication”, *S. Sekiguchi, M. Sugimoto, S. Shu, Y. Sekimoto, K. Mitsui, T. Nishino, N. Okada, K. Kubo, T. Takahashi, T. Nitta, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 7(1), 36–41 (2017)
 3. ▲“Making maps of Cosmic Microwave Background polarization for B-mode studies: the POLARBEAR example”, *D. Poletti, Y. Chinone (11 番目), M. Hasegawa (20 番目), M. Hazumi (21 番目), N. Katayama (27 番目), O. Tajima (47 番目), 他 43 名, Astron. Astrophys. 600, A60 (2017)
 4. ▲“Radiation Tolerance of Aluminum Microwave Kinetic Inductance Detector”, *K. Karatsu, A. Dominjon, T. Fujino, T. Funaki, M. Hazumi, F. Irie, H. Ishino, Y. Kida, T. Matsumura, et al., J. Low Temp. Phys. 184, 540 (2016)
 5. ▲“Dual-double slot antennas fabricated with single superconducting film for millimeter wave camera”, *M. Naruse, T. Nitta, K. Karatsu, M. Sekine, S. Sekiguchi, Y. Sekimoto, T. Noguchi, T. Taino, H. Myoren, Int. J. Infrared, Millimeter, Terahertz Wave, 37(2), 128–136 (2016)
 6. ▲“Millimeter-wave broadband antireflection coatings using laser ablation of subwavelength structures”, *T. Matsumura, H. Ishino et al., Applied Optics Vol. 55, Issue 13, pp. 3502-3509 (2016)
 7. ▲“Testing statistics of the CMB B-mode polarization toward unambiguously establishing quantum fluctuation of the vacuum”, *M. Shiraishi, C. Hikage, R. Namba, T. Namikawa, M. Hazumi, Phys. Rev. D94, 043506 (2016)
 8. ▲“LiteBIRD: Mission Overview and Focal Plane Layout”, *T. Matsumura, Y. Chinone (6 番目), M. Hasegawa (18 番目), M. Hazumi (21 番目), N. Katayama (38 番目), H. Nishino (70 番目), O. Tajima (100 番目) 他 113 名, J. Low. Temp. Phys. 184, no.3-4, 824-831 (2016)
 9. ▲“POLARBEAR Constraints on Cosmic Birefringence and Primordial Magnetic Fields”, *Peter A. R. Ade, Y. Chinone (9 番目), M. Hasegawa (24 番目), M. Hazumi (26 番目), N. Katayama (35 番目), T. Matsumura (50 番目), H. Nishino (55 番目), O. Tajima (78 番目) 他 78 名, Phys. Rev. D92 123509 (2015)
 10. ▲“Modeling atmospheric emission for CMB ground-based observations”, *J. Errard, Y. Chinone (11 番目), M. Hasegawa (23 番目), M. Hazumi (25 番目), N. Katayama (33 番目), T. Matsumura (45 番目), H. Nishino (49 番目), O. Tajima (68 番目) 他 78 名, Astrophys. J. 809 (2015) 63
- 計画研究 B02** 「広天域深宇宙のイメージングによる加速宇宙の暗黒成分の研究」 (14 編中 11 編を記載)
1. ▲“An Optically-Selected Cluster Catalog at Redshift $0.1 < z < 1.1$ from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S16A Data”, *M. Oguri, et al., S. More (6 番目), M. Takada (12 番目), S. Miyazaki (18 番目), M. Tanaka (20 番目), Y. Komiyama (22 番目), T. Usuda (25 番目), Publ. Astron. Soc. Japan, in press (2017) [arXiv:1701.00818]
 2. ▲“A New Quadruple Gravitational Lens from the Hyper Suprime-Cam Survey: the Puzzle of HSC J115252+004733”, *A. More, C.-H. Lee, M. Oguri, et al. S. More (8 番目), Y. Komiyama (10 番目), S. Miyazaki (12 番目), M. Tanaka (17 番目), T. Usuda (18 番目), N. Yasuda (19 番目), MNRAS, 465, 2411-2419 (2017)
 3. ▲“Interpreting the Strongly Lensed Supernova iPTF16geu: Time Delay Predictions, Microlensing, and Lensing Rates”, *A. More, S. H. Suyu, M. Oguri, S. More, C.-H. Lee, Astrophys. J., 835, L25 (2017)
 4. ▲“The Mass Distribution of the Unusual Merging Cluster Abell 2146 from Strong Lensing”, *J. E. Coleman, L. J. King, M. Oguri, et al., MNRAS, 464, 2469-2480 (2017)
 5. ▲“The BOSS Emission-Line Lens Survey. IV. Smooth Lens Models for the BELLS GALLERY Sample”, *Y. Shu, et al. (including M. Oguri), Astrophys. J., 833, 264 (2016)
 6. ▲“A Pseudo-Spectrum Analysis of Galaxy-Galaxy Lensing”, *C. Hikage, M. Oguri, MNRAS, 462, 1359-1370 (2016)
 7. ▲“A Spectroscopically Confirmed Double Source

- Plane Lens System in the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program**, *M. Tanaka, et al. (including M. Oguri, Y. Komiyama, S. Miyazaki), *Astrophys. J.*, 826, L19 (2016)
8. ▲“**Catalog of Ultra-diffuse Galaxies in the Coma Clusters from Subaru Imaging Data**”, *M. Yagi, J. Koda, Y. Komiyama, H. Yamanoi, *Astrophys. J. Suppl.*, 225, 11 (2016)
 9. ▲“**The BOSS Emission-Line Lens Survey. III. Strong Lensing of Ly α Emitters by Individual Galaxies**”, *Y. Shu, A. S. Bolton, C. S. Kochanek, M. Oguri, et al., *Astrophys. J.*, 824, 86 (2016)
 10. ▲“**Measuring the Distance-Redshift Relation with the Cross-Correlation of Gravitational Wave Standard Sirens and Galaxies**”, *M. Oguri, *Phys. Rev. D*93, 083511 (2016)
 11. ▲“**Precise Strong Lensing Mass Modeling of Four Hubble Frontier Field Clusters and a Sample of Magnified High-Redshift Galaxies**”, *R. Kawamata, M. Oguri, M. Ishigaki, K. Shimasaku, M. Ouchi, *Astrophys. J.*, 819, 114 (2016)
- 計画研究 B03 「広天域銀河分光サーベイによる加速宇宙の究明」 (29 編中 10 編を記載)**
1. ▲“**Large-scale tidal effect on redshift-space power spectrum in a finite-volume survey**”, *K. Akitsu, M. Takada, Y. Li, *Phys. Rev. D*95, 083522 (2017)
 2. ▲“**Reconstruction of halo power spectrum from redshift-space galaxy distribution: cylinder-grouping method and halo exclusion effect**”, *T. Okumura, M. Takada, S. More, S. Masaki, *MNRAS*, in press, arXiv:1611.04165 (2017)
 3. ▲“**Arrival Time Differences between Gravitational Waves and Electromagnetic Signals due to Gravitational Lensing**”, *R. Takahashi, *The Astrophys. J.*, 835, 103 (2017)
 4. ▲“**Detection of the Splashback Radius and Halo Assembly Bias of Massive Galaxy Clusters**”, *S. More, H. Miyatake, M. Takada, et al., M. Oguri (12 番目), *MNRAS*, 825, 39 (2016)
 5. ▲“**Detection of stacked filament lensing between SDSS luminous red galaxies**”, *J. Clampitt, H. Miyatake, B. Jain, M. Takada, *MNRAS*, 457, 2391 (2016)
 6. “**The Subaru FMOS galaxy redshift survey (FastSound). IV. New constraint on gravity theory from redshift space distortions at $z \sim 1.4$** ”, *T. Okumura, et al., S. More (9 番目), A. Taruya (10 番目), S. Tsujikawa (11 番目), T. Matsubara (17 番目), R. Takahashi (21 番目), N. Tamura (23 番目), N. Yaşuda (25 番目), *Publ. Astron. Soc. Japan*, 68, 38 (2016)
 7. ▲“**Separate universe consistency relation and calibration of halo bias**”, *Y. Li, W. Hu, M. Takada, *Phys. Rev. D*93, 063507 (2016)
 8. ▲“**Evidence of Halo Assembly Bias in Massive Clusters**”, *H. Miyatake, S. More, M. Takada, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 116, 041301 (2016)
 9. ▲“**Geometrical constraint on curvature with BAO experiments**”, M. Takada & O. Dore, *Phys. Rev. D*92, 123518 (2015)
 10. ▲“**Detection of universality of dark matter profile from Subaru weak lensing measurements of 50 massive clusters**”, H. Niikura, M. Takada, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan*, 67, 10324 (2015)

計画研究 B04 「次世代超大型光学赤外線望遠鏡 TMT と高分散分光器による宇宙の加速膨張の直接検証」 (4 編中 3 編を記載)

1. ◎“**次世代超大型望遠鏡 TMT**”, 白田智史, 光技術コ
ンタクト誌 2017 年 3 月号, 日本オプトメカトロニク
ス協会 (査読無)
2. ▲“**A Note on Geodesics in the Hayward Metric**”, *T. Chiba and M. Kimura, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 043E01 (2017)
3. ▲“**Multi-Sightline Observation of Narrow Absorption Lines in Lensed Quasar SDSS J1029+2623**”, *T. Misawa, C. Saez, J. C. Charlton, M. Eracleous, G. Chartas, F. E. Bauer, N. Inada, H. Uchiyama, *The Astrophysical Journal*, 825, (2016)
4. ▲“**Reconstructing the inflation potential from the spectral index**”, *T. Chiba, *PTEP*, 7, 1-10, (2015)

計画研究 C01 「究極理論からの加速宇宙の解明」 (38 編中 15 編を記載)

1. ▲“**Shortening Anomalies in Supersymmetric Theories**”, J. Gomis, Z. Komargodski, *H. Ooguri, N. Seiberg, Y. Wang (Princeton U.), *JHEP*, 1701 067 (2017)
2. ▲“**Chiral dark sector**”, R. T. Co, *K. Harigaya, Y. Nomura, *Phys. Rev. Lett.*, 118, 101801 (2017)
3. ▲“**An analytic halo approach to the bispectrum of galaxies in redshift space**”, *K. Yamamoto, Y. Nan, C. Hikage, *Phys. Rev. D*95, 023512 (2017)
4. ▲“**Gravitational Positive Energy Theorems from Information Inequalities**”, N. Lashkari, J. Lin, *H. Ooguri, B. Stoica, M. Van Raamsdonk, *PTEP*, 12, 12C109 (2016)
5. ▲“**Bulk Local States and Crosscaps in Holographic CFT**”, Y. Nakayama, *H. Ooguri, *JHEP*, 1610, 085 (2016)
6. ▲“**Reflections on Conformal Spectra**”, H. Kim, P. Kravchuk, *H. Ooguri, *JHEP*, 1604, 184 (2016) 184
7. ▲“**Oscillating Chiral Tensor Spectrum from Axionic Inflation**”, *I. Obata and J. Soda, *Phys. Rev. D* 94, 044062 (2016)
8. ▲“**Oscillating Chiral Tensor Spectrum from Axionic Inflation**”, *I. Obata and J. Soda, *Phys. Rev. D* 94, 044062 (2016)
9. ▲“**MHz Gravitational Waves from Short-term Anisotropic Inflation**”, *A. Ito and J. Soda, *JCAP*, 1604, 035 (2016)
10. ▲“**Chiral primordial gravitational waves from dilaton induced delayed chromonatural inflation**”, *I. Obata and J. Soda, *Phys. Rev. D*93, 123502 (2016)
11. ▲“**Flat-space quantum gravity in the AdS/CFT correspondence**”, *Y. Nomura, F. Sanches, S. J. Weinberg, *Phys. Rev. D*93, 064049 (2016)
12. ▲“**Axion isocurvature and magnetic monopoles**”, Y. Nomura, S. Rajendran, F. Sanches, *Phys. Rev. Lett.*, 116, 141803 (2016)
13. ▲“**A composite model for the 750 GeV diphoton excess**”, *K. Harigaya, Y. Nomura, *JHEP*, 03, 091 (2016)
14. ▲“**Light chiral dark sector**”, *K. Harigaya, Y. Nomura, *Phys. Rev. D*94, 035013 (2016)
15. ▲“**Finger-of-God effect of infalling satellite galaxies**”, *C. Hikage, K. Yamamoto, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 455, L77-L81(2015)

計画研究 D01 「多波長宇宙論データを用いた究極的物理解析ツールの開発」 (15 編中 6 編を記載)

1. ▲“AKARI near-infrared background fluctuations arise from normal galaxy populations”, *K. Helgason, [E. Komatsu](#), MNRAS, 467, L36-L40 (2017)
 2. ▲“Constraining the EoR model parameters with the 21cm bispectrum”, *H. Shimabukuro, S. Yoshiura, [K. Takahashi](#), [S. Yokoyama](#), [K. Ichiki](#), MNRAS, 468, 1542-1550 (2017)
 3. ▲“Studying topological structure of 21-cm line fluctuations with 3D Minkowski functionals before reionization”, *S. Yoshiura, H. Shimabukuro, [K. Takahashi](#), [T. Matsubara](#), MNRAS, 465, 394-402 (2016)
 4. ▲“Expected constraints on models of the epoch of reionization with the variance and skewness in redshifted 21cm-line fluctuations”, *K. Kubota, S. Yoshiura, H. Shimabukuro, [K. Takahashi](#), Publ. Astron. Soc. Jap., 68, 61 (2016)
 5. ▲“Probing primordial non-Gaussianity consistency relation with galaxy surveys”, *D. Yamauchi, [K. Takahashi](#), Phys. Rev. D93, 123506 (2016)
 6. ▲“21cm-line bispectrum as method to probe Cosmic Dawn and Epoch of Reionization”, *H. Shimabukuro, S. Yoshiura, [K. Takahashi](#), [S. Yokoyama](#), [K. Ichiki](#), MNRAS, 458, 3003-3011 (2016)
- (2) ホームページについて
以下の領域ホームページを作成し、活用している。
<http://acceleration.ipmu.jp/>
さらに幾つかの研究機関毎にもホームページを設置しており、上記のホームページからリンクされている。
- (3) 研究会、研究成果発表について
【シンポジウム・研究会の開催】
大小、様々な形式の研究会・ワークショップを開催してきている。これまで領域全体で16件を開催。以下にはそのうち10件のみを記載
1. “Photo-z Workshop for Large Surveys 2017”, 2017 May 17-19 (参加者約40名、そのうち海外から30名) <http://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/photo-z-workshop-for-large-surveys-2017/>, Tohoku Univ., Sendai, Japan
 2. “HSC collaboration meeting”, 2017 May 15 - 17 (参加者約90名、そのうち海外から約30名) <http://hscsurvey.pbworks.com/w/page/116793060/HSC%20collaboration%20meeting%202017%20May>, Tohoku Univ., Sendai, Japan
 3. “POLARBEAR/Simons Array 共同研究会議”, 2017年3月27日～30日 (参加者40名) <http://research.kek.jp/group/cmb/PBF2F2017Mar/>, 高エネルギー加速器研究機構 (つくば)
 4. “定期領域全体シンポジウム”, 2017年3月8日～10日 (参加者約120名) <http://indico.ipmu.jp/indico/event/126/>, 高エネルギー加速器研究機構 (つくば) (ほぼ全て英語で行った)
 5. “若手による重力・宇宙論研究会”, 2017年3月1日～3日 (参加者42名) <http://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/contents/seminar/detail.php?SNUM=52218>, 京都大学基礎物理学研究所
 6. “PFS collaboration meeting”, 2016 Dec 12-16 (参加者約100名、そのうち日本から23名) <http://sumire.pbworks.com/w/page/111043063/PFS%20collaboration%20meeting%20at%20JHU%2C%20December%2012-16%2C%202016>, Johns Hopkins U., Baltimore, USA,
 7. “第5回観測的宇宙論ワークショップ”, 2016年11月24日～26日 (参加者約60名) <http://home.hiroshi-ma-u.ac.jp/obscosm5/>, 広島大学(東広島)
 8. “秋の学校「理論と観測から迫るダークマターの正体とその分布」”, 2016年11月9日～11日 (参加者51名) <http://www.tuhep.phys.tohoku.ac.jp/dmautumn/>, 国立天文台 (三鷹)
 9. インフレーション宇宙の課題”, 2016年3月10日 (参加者20名) http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~accel_a01/files/YITP-X-15-5_report.pdf, 京都大学基礎物理学研究所 (京都)
 10. “領域発足シンポジウム”, 2015年9月20日～21日 (参加者約110名) <http://indico.ipmu.jp/indico/event/75/overview>, 東京大学カブリ IPMU (柏) (会議は全て英語で行った)
- 【学会発表】
国内、国外の研究会で研究成果を積極的に発表している。これまで約150を超える学会発表を行っている。以下では、国際会議での招待講演(約50件)のうち、研究代表者の10件の招待講演のみを記載する。
1. “Signatures from inflationary massive gravity”, [M. Sasaki](#), Testing Gravity 2017, 2017, January 25 - January 28, SFU harbor Center, Vancouver, Canada. (招待講演)
 2. “Studying the Birth and the Fate of the Universe Using Multi-Object Spectroscopy” [H. Murayama](#), SPIE, 2016, Jun 27, Durham, England (招待講演)
 3. “Cosmological roles of axions within the reach of future experiments”, [E. Takahashi](#), CERN-EPFL-Korea Theory Institute, New Physics at the Intensity Frontier, 2017, Feb 20 - Mar 3, CERN, Switzerland (招待講演)
 4. “Small Scale Density Perturbations”, [N. Sugiyama](#), MIAPP (Munich Institute for Astro- and Particle Physics) workshop “Cosmic Reionization”, 2016, April 4 - April 29, Garching, Germany (招待講演)
 5. “Cosmology and Particle Physics with LiteBIRD”, [M. Hazumi](#), Madrid 2016 Workshop on CMB polarization, Large-Scale Structure, and 21 cm surveys, June 21, 2016, Madrid, Spain (招待講演)
 6. “The Hyper Supreme-Cam (HSC) wide survey”, [S. Miyazaki](#), Follow-up of wide-area X-ray surveys: Science, Facilities, Programs, 2016 Apr 25 - Apr 27, Ringberg Castle, Bavaria, Germany (招待講演)
 7. “SuMIRE: Subaru imaging and spectroscopic galaxy survey”, [M. Takada](#), Cross-correlation Spectacular with LSST: Exploring Synergies Between LSST and External datasets to Discover Fundamental Physics, 2016 May 22 - 25, Brookhaven National Lab. & Stony Brook Univ., USA (招待講演)
 8. “Thirty Meter Telescope (TMT) Project Status”, [T. Usuda](#), 10th East-Asia Meeting on Astronomy (EAMA), September 26 - 30, 2016, Hoam Faculty House, Seoul, Korea (招待講演)
 9. “Symmetry of Quantum Gravity”, [H. Ooguri](#), Simons Symposium on Quantum Entanglement, Elmau, Germany (May 1 - 5, 2017) (招待講演)
 10. “From initial conditions to structure formation, and back”, [E. Komatsu](#), COSMO-16, August 8-12, 2016, the University of Michigan, Ann Arbor, USA (基調講演)
- 【書籍】
1. “宇宙の誕生と終焉”, [松原隆彦](#), SBクリエイティブ, 192ページ (2016)
 2. “宇宙の始まり、そして終わり”, [小松英一郎](#)・[川端裕人](#), 日本経済新聞出版社, 298ページ (2015)

【報道発表】

領域内で得られた研究成果は積極的にプレス、あるいは報道を通して発信している。以下はそのごく一部。

1. NHK 番組「村山斉の宇宙をめぐる大冒険」2017年1月6日(金)午後10時から60分番組で放送。<https://www.nhk.or.jp/docudocu/program/92346/2346076/> 反響が大きく再放送の要望の声が多数寄せられた
2. 「観測成功の重力波、起源は原始ブラックホールの衝突か」などのタイトルでNHK朝のニュース「おはよう日本」などで紹介。<http://www9.nhk.or.jp/kabun-blog/200/250339.html> 2016年8月3日に報道。その他phys.orgなどの他国のホームページでも紹介 <https://phys.org/news/2016-07-ligo-gravitational-primordial-black-holes.html> 新聞各紙(朝日など)
3. すばる望遠鏡の宇宙サーベイの成果の宣伝。「超広視野主焦点カメラ HSC による大規模観測データ、全世界に公開開始」2017年2月27日(ハワイ現地時間)に国立天文台 (<http://www.nao.ac.jp/news/topics/2017/2/0170228-subaru.html>)、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 (http://www.ipmu.jp/ja/20170228-HSC_data_release)、プリンストン大学(<http://web.astro.princeton.edu/news/first-public-data-release-hyper-suprime-cam-subaru-strategic-program>)からプレスリリース。毎日新聞(2017年2月28日)、日本経済新聞(2017年2月28日、3月1日)、産経新聞(2017年3月1日)、読売新聞(2017年4月13日)、他新聞15誌に掲載
4. TBS「別冊アサ(秘)ジャーナル」でTMT計画とTMTで目指すサイエンスについて臼田知史が紹介。2016年8月29日。<http://www.tbs.co.jp/asa-j/>
5. 産経新聞平成28年1月11日に、「原始宇宙の急膨張を検証」という記事において、計画研究 B01 班の LiteBIRD 計画が紹介され、計画研究代表の羽澄昌史の談話が掲載された。
6. 国産技術で宇宙観測を“巨大鏡”開発に挑む」というタイトルでTMT計画について、NHKの朝のニュース「おはよう日本」などで紹介。2015年10月20日に報道。<http://www.nhk.or.jp/shutoken/ohayo/report/20151020.html>
7. 千葉梶司氏(A02班)らの研究グループがすばる望遠鏡 HSC によるデータを用いて、銀河系に付随する極めて暗い衛星銀河を発見し、プレスリリースを行った。2016年11月21日。https://www.naoj.org/Pressrelease/2016/11/21/j_index.html
8. すばる望遠鏡プレスリリース「すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam が描き出した最初のダークマター地図」https://www.naoj.org/Pressrelease/2015/07/01/j_index.html NHK ニュース(2015年7月3日8:45-9:00)で会見の様子を放映、毎日新聞(2015年7月3日)、日本経済新聞(2015年7月3日)、朝日新聞(2015年7月11日)、読売新聞(2015年7月19日)、他新聞7誌、およびニュートン(2015年10月号)に掲載

【アウトリーチ活動】

積極的にアウトリーチ活動も行っており、研究成果を社会へ還元するだけでなく、次世代の科学を担う高校生、中学生への啓蒙活動にも力を入れている。90回以上の活動のうち、以下にはそのごく一部を記載する。

1. ナレッジキャピタル超学校 特別企画; 国立大学附置研究所・センター長会議第1部会シンポジウム「解き明かされる宇宙の秘密」(2016年10月6日開催)

において、佐々木篤が「宇宙の中と外」と題して講演を行った。参加者は250名。<http://kc-i.jp/activity/chogakko/kokuritsu/vol01/>

2. 一般相対論誕生100年記念市民講演会の一環で実施されたつくば会場でのKEK公開講座「アインシュタインの一般相対性理論提唱から100年目の理論と実験」(2015年1月21日、KEKつくばキャンパス)において、郡和範が「宇宙のはじまり、現在、未来」と題して講演を行った。幅広い年齢層の200名以上の参加者があった。<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/Gmunu100/reports.html#tsukuba>
3. 1月16日、杉山直、竹下通りアンパカ.TVスタジオ、サイエンス・カフェ「ガリレオ・ガリレイ」(ANP ACA.TV) “宇宙論の最前線”
4. 「科学と音楽の饗宴2015」(2015年11月15日開催)の中で、羽澄昌史が「宇宙のビッグバンとそれ以前」と題して講演を行った。幅広い年齢層から約700名の参加者があった。<https://www2.kek.jp/kyoen/2015/>
5. 第23回自然科学研究機構シンポジウム“現代天文学のフロンティア”(2017年3月5日)で宮崎聡が「広視野天体探査で調べるダークマターの分布」と題して講演。273名の参加があった。
6. 大栗博司が科学監修を務めた3D ドームシアター映像作品『9次元からきた男』(<http://www.miraikan.jst.go.jp/sp/9dimensions/>)の一般上映が、2016年4月より日本科学未来館で始まった。この作品は、同年6月にチェコ共和国ブルノ天文台で開催されたフルドーム・フェスティバルに15カ国から出品された66作品の中から、国際審査委員会によって、国際プラネタリウム協会の2016年度最優秀教育作品賞に選ばれた。また11月には、先端映像協会のベスト・プラクティス賞をソニーのPlayStation VRと同時に受賞し、2017年3月にはVFX-Japanアワードの先導的視覚効果部門最優秀賞にも選ばれた。この作品は、米国デンバーの自然科学博物館やドイツのカール・ツァイス本社プラネタリウム、ギリシアのアテネ・プラネタリウム、仙台天文台、アスペン物理学センターでも上映された。総合誌『文藝春秋』2016年5月号の立花隆のエッセイで「こういう映画を見てこんなに興奮してワーワー語り合いを始める科学少年たちの様子を見て、日本の将来はまだまだいけると思い始めていた」「ああ、この子供たちの中から将来の湯川秀樹や小林・益川が生まれてくるにちがいないと思ったのだ」と評価され、また、2016年6月27日の朝日新聞朝刊で、「科学的正確さにも気を配っている」と紹介され、7月2日の毎日新聞では、「これはお見事」「こんな表現方法があったのか」と絶賛された。
7. 兵庫県西宮市の西宮湯川記念事業の30周年を記念した「科学でひらく未来の扉～西宮湯川記念賞受賞者中学校訪問教室～」の一環として、小松英一郎が西宮市立大社中学校で「僕は天文学者」というタイトルで全校生徒対象に講演を行った(2015年11月30日)。講演のスライドは <http://www.mpa.mpa-garching.mpg.de/~komatsu/presentation/taisha.pdf>

【受賞】

領域内の研究者の受賞のうち一件のみを記載

1. “日本天文学会 第20回 林忠四郎賞”, 宮崎聡, 2016年3月15日

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。

各計画研究の研究代表者で構成される総括班は、戦略的な定期会議（ミーティングあるいは電話会議）、また領域に関係する研究会、ワークショップの度に総括班のメンバー同士で打ち合わせの場を持った。各年度に一度は領域全体のシンポジウムも開催し、総括班メンバーと領域評価者で、領域戦略会議を開催した。これらの領域戦略会議では、各計画研究の進捗状況の情報を共有し、課題の洗い出し、また領域研究、特に複数の計画研究グループ間の連携の促進について議論してきた。さらに、大学院生・博士研究対象のスクール形式の会合、若手研究者を取り込んだ、新しいアイデアの喚起、また多角的アプローチの模索することを目的としたワークショップ、研究会の開催を推奨してきた。

公募研究については、各研究計画に紐付けした形式で採用はせず、理論的研究 (E01)、観測・実験的研究 (E02)、複合的研究 (E03) と大きな枠組みで組織し、領域内の研究者との自由な共同研究を推奨した。自発的に派生した共同研究の成果が多く発表され、また新しい研究の展開もあったので、この取り組みは成功したと言える。本領域の研究者と公募研究の共同研究は、これまで **270 編以上**の査読論文が出版（あるいは受理）されている。

以下では、各計画研究について、他の計画研究および公募研究との調和について記す。（共同で開催したワークショップ等については、異なる計画計画について重複して記述はしない）

計画研究 A01 「インフレーション宇宙のメカニズムとその物理的多角的検証」

- 若手研究者中心、またブレインストーミング的な議論を推奨するミニワークショップを開催し、領域内の研究者間の共同研究を推奨している。「LIGO 重力波」、「インフレーションと宇宙」などトピックにフォーカスし、課題、新しいアイデア等を掘り起こす。この会合は非常に良く機能しており、ワークショップの議論が契機となり、複数の査読論文の発表に至っている。
- 実験班 B01、B02、B03 班の研究者とは研究の進捗状況について情報を交換し、宇宙論データの現状、また理論のテストの可能性などについて常に意識している。

計画研究 A02 「宇宙の揺らぎと構造の進化、その背後にある物理の究明」

- A02、B02 班の共同で、若手研究者育成を目的として、ダークマターに関する秋の学校「理論と観測から迫るダークマターの招待とその分布」を2016年11月9日～11日に国立天文台で開催した（46名の参加者）。実際のすばる HSC 観測データを用いた実習も行い、大変好評であった。
- A02、B02、B03 班の共同で、宇宙論の現状、展望を議論する場として、毎年研究会を開催している。2015年度は「第4回観測的宇宙論ワークショップ」を2015年11月28日～30日に京都大学基礎物理学研究所で開催した（約60名以上の参加者）。昨年度は「第5回観測的宇宙論ワークショップ」を2016年11月24日～26日に広島大学で開催した（約60名の参加者）。経験ある研究者のレビュー講演だけでなく、大学院生も含めた若手研究者に発表、議論の場を設けるように努めた。
- この計画研究でも、公募研究の研究代表者とは密に連携を取りながら、共同研究を推進している。

計画研究 A03 「ダークエネルギーの理論モデル構築とその観測的検証宇宙」

- B04 班の研究者と協力して、プランク衛星の宇宙背景放射の観測データからスカラー・テンソル重力理論の検証を行った。

計画研究 B01 「宇宙マイクロ波背景放射の広天域観測で探る加速宇宙と大規模構造」

- B01、B02 班に所属する研究者ら中心となり、銀河サーベイ、宇宙背景放射の重力レンズ効果の相互相関を測定し、ニュートリノ質量などの宇宙論パラメータを制限することを目的とした共同研究を行うため、定期的な電話会議の場を設けている。
- 宇宙論の理論家との共同研究により、LiteBIRD 衛星で観測可能な新しい物理量の提案、観測精度・意義に関する論文を発表することができた (Shiraishi, Hikage, Namba, Namikawa, & Hazumi, Phys. Rev. D94, 043506)。

計画研究 B02 「広天域深宇宙のイメージングによる加速宇宙の暗黒成分の研究」

- B02、B03、A03 班の研究者が中心となり、すばる HSC 銀河イメージングサーベイの共同研究国際会議を2016年8月23日～25日に東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構で開催した。さらに今年度も2017年5月15日～17日に東北大で共同研究会議を開催した。プリンストン大学、台湾の研究者も交え、共同研究の研究打ち合わせの場を持った。
- B02 班の研究者が中心となり、B03、A03 班の研究者も交え、世界中で稼働中、あるいは計画中の広天域銀河イメージングサーベイをリードする研究者を招聘し、測光的赤方偏移の手法の現状、課題を議論するための研究会を東北大で2017年5月17日～18日に開催した。競合する銀河サーベイに関する情報交換の場が持て、新領域研究者間で方針、対策を議論できた。
- B03 班の研究者と共同で、プリンストン大学ですばる HSC データを用いた重力レンズ効果の測定、またそのサイエンスを議論するためのワークショップを2017年2月6日～8日に開催した。

- すばる HSC サーベイは、個別のデータによる天文学ではなく、サーベイ天文学、ビッグデータによる天文学・宇宙論を可能にする。この分野の大学院生、若手研究者、研究者の発掘、また研究レベルの底上げを目的とし、毎年「HSC 画像解析講習会」を行い、B02 の研究者が中心になって開発した、データベース、ユーザーインターフェースの使い方の講習会を開いている。
- さらに公募研究の代表者、データサイエンスを専門とする金沢工業大学の中野準教授と B02 班の研究者の共同研究も立ち上がった。B02 班が中心に進めるすばる HSC イメージングサーベイはビッグデータであるが、最重要課題は正確な測光的赤方偏移の推定法の開発である。中野氏は機械学習の手法を用い、銀河の多色画像を統計処理することで、銀河の測光的赤方偏移を推定する全く新しい手法を開発している。B02 班の天文学者とデータサイエンスの研究者が綿密な研究打ち合わせを通し、すでにソフトウェアの開発、また成果も出始め、論文執筆の準備を始めている。ビッグデータの統計解析は世界の潮流であり、それに先駆けて、新たな研究分野を開拓しようとしている。

計画研究 B03 「広天域銀河分光サーベイによる加速宇宙の究明」

- B03、B02 班の研究者が中心となり、若手研究者の育成、またすばる銀河サーベイに貢献できる研究者の発掘を目的として、2015 年 7 月 9 日～11 日に国立天文台で「すばる PFS によるサイエンス検討会」を開催した（約 60 名の参加者）。
- A02、B03、B02、D01 班の研究者が中心となり、広天域すばる分光サーベイ計画（2020 年から開始）の科学目標、サーベイデザインを議論するための共同研究会議を定期的で開催している。2015 年 12 月 14 日～18 日にフランスマルセイユ天体物理研究所、2016 年 9 月 5 日～9 日にプリンストン大学、2016 年 12 月 14 日～18 日にジョンスホプキンス大学で開催し、海外の共同研究者も含め、綿密な研究打ち合わせの場を持った。本領域の研究者が中心になり、国際共同研究を推進している。
- A01、A02、A03、B02、B03 班に属する研究者が中心となり、2016 年 6 月 13 日～17 日の期間に、インフレーション、宇宙背景放射、宇宙の構造形成の研究の世界的権威であるプリンストン高等研究所の Matias Zaldarriaga 氏を招聘し、議論・情報交換の場を京都大学基礎物理学研究所で持った。若手研究者も集め、ワークショップも開催した。

計画研究 B04 「次世代超大型光学赤外線望遠鏡 TMT と高分散分光器による宇宙の加速膨張の直接検証」

- B03、B02 班らの研究者と協力して、すばる PFS 分光サーベイによる広天域スケールの銀河間ガスのマッピングの測定と、TMT (30m 望遠鏡) による特定の銀河まわりの小スケールのガス分布の測定がどのように相補的になるか、また銀河形成の物理に迫れるかの議論を行っている。また、その銀河形成の知見が銀河間中性水素の空間分布の測定から行う宇宙論の制限をどのように改善できるかという問題について、関係者で議論を進めている。

計画研究 C01 「究極理論からの加速宇宙の解明」

- 各計画研究の研究者と積極的に情報交換、議論の場を持ち、弦理論などトップダウン的なシナリオの帰結、また宇宙データからの観測可能性について、弦理論、素粒子、宇宙の多角的観点から相互に検討する機会を持つことに努めている。例えば、C01 班の野村泰紀氏が宇宙の曲率の測定の重要性、特に弦理論が予言する多宇宙シナリオ (multiverse) は一般に負の曲率の宇宙を予言することを領域のミーティングの場で強調した機会があった。これが契機となり、B03 班の高田昌広氏がカリフォルニア工科大学の Olivier Dore 氏らと協力して、将来の広天域銀河サーベイによる曲率測定の原理的な精度の限界の評価の研究に繋がった (Takada & Dore, Phys. Rev. D92, 123518, 2015)。

計画研究 D01 「多波長宇宙論データを用いた究極的物理解析ツールの開発」

- B01、B02、B03 班らの研究者らが進める宇宙背景放射、銀河イメージング・分光サーベイを統一的に解析できる手法を開発している。さらに、疑似宇宙論データをシミュレーションするソフトウェアの開発にも成功しており、本領域の宇宙論サーベイの模擬データを作成し、定量的にその宇宙論パラメータの推定の精度を評価している。特に、ニュートリノの質量を決定できる可能性があり、今後この研究はさらに発展すると期待される。

これ以外にも様々なレベル（個別、グループ、また公募研究および計画研究の研究者、国外の研究者）での共同研究が自発的に派生している。分野・専門を超え、多角的、また相乗的に新たな研究の流れ、展開が起こる土台・基盤が確立できつつある。

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。

本領域では、次世代の物理学、天文学を担う若手育成のための様々な取組を行っている。本領域に関与する研究者の殆どが、40代以下の研究者であり、まさに若手・中堅研究者が中枢・実働部隊であり、また彼らに最高の研究環境を用意することが必須である。主な取組としては（1）大学院生、博士研究員を対象にした研究会の開催、（2）若手研究者に国際共同研究あるいは研究プロジェクトの機会を積極的に提供し、確実に研究成果を出させ、また会議でも発表の機会を与える、（3）必要があれば国際共同研究のネットワークを使いキャリアパスの確保に努める、（4）優秀な若手研究者も採用し、相互間の刺激を通じた若手研究者レベルの底上げをする、（5）著名な研究者を招聘し、研究の最先端と分野をリードする世界レベルの研究者に触れる機会の提供などである。

特に、本領域の研究に従事していた若手研究者のなかでキャリアパスの良い例としては、

- B03 班の博士研究員奥村哲平氏(カブリ IPMU) → 台湾の中央研究院天文及天文物理研究所の Associate Research Fellow (准教授相当)に 2017 年 1 月に着任。
- A01 班に所属していた、学術振興会 PD 成子篤氏 (東工大) → 東北大助教に 2017 年 4 月に着任。
- B01 班の博士研究員服部香里氏 (カブリ IPMU) → 産総研のテニュアトラック研究員に 2016 年 4 月に着任。
- カブリ IPMU の博士研究員斎藤俊氏 → ドイツのマックスプランク天体物理学研究所の博士研究員に 2017 年 3 月に着任。
- 学術振興会 PD 林航平氏 (カブリ IPMU) → 北京のカブリ天体物理研究所の博士研究員に 2016 年 10 月に着任。
- 井上優貴氏が総研大高エネルギー加速器科学研究科で博士 (理学) を取得 → 台湾アカデミアシニカ研究員に 2016 年 4 月に着任。

などがある。また、優秀な博士研究者の確保もできている。米国エール大学のバリオン音響振動実験の宇宙論で世界的に活躍する Nikhil Padmanabhan 教授の下で Ph. D. を取得した砂山朋美氏を B03 班の博士研究員に採用できた。また、物理学会の高エネルギー物理学奨励賞 (若手賞) を受賞した桜井雄基氏を B01 班の博士研究員に採用できた。さらに、宇宙論究極解析の D01 班は真喜屋龍氏を博士研究員として雇用し、ドイツマックスプランク研究所と国内の研究機関の研究者を結ぶハブ的な役割を果たし、極めて順調に研究が進んでいる。同様のコンセプトで、B03 班の研究者と密接な共同研究者である、海外で活躍する有能な若手研究である、カリフォルニア工科大学の博士研究員の宮武広直氏をカブリ IPMU の客員准科学研究員 (併任研究員) に採用し、カリフォルニア工科大学と領域の研究者 (B01、B02、B03) の橋渡しをする役割を担っている。同じく、北京カブリ天体物理学研究所の博士研究員林航平氏も IPMU の客員准科学研究員に採用し、進展が著しい中国の研究者と計画研究 B03 班の研究者との間の共同研究の立ち上げのために動き出しているところである。このように、本領域は、シニアな研究者、中堅研究者、また機動性の高い、また研究の中核である若手研究者が各々の役割を効率的に果たし、国際共同研究を含め、理論・実験の研究を相乗効果的に進めるのを助けている。

本領域の各研究機関には多数の大学院生も所属しており、一流の研究者との交流、またエキサイティングな研究成果に触れる機会に恵まれ、勉学に励み、また順調に経験を積んでいる。

さらに、国際研究会などの機会には若手研究者に発表の機会を与え、知名度の向上、また研究成果の正当な評価、など、宇宙論研究の将来を担う若手研究者のキャリアパスの向上を見据え、研究プロジェクトの貢献に見合う評価がされるように注意を払っている。

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。

総括班については、事務連絡交通費など、新学術領域全体の運営に関わる経費を執行している。また間接経費を有効活用して事務補佐員を採用し、この報告書など領域全体に関わる事務を幫助している。領域代表研究者、および総括班のメンバーが所属する東京大学カブリ IPMU は国際研究所であるため、外国の研究者の招聘、国際会議の運営など様々な面で領域の運営の助けになっている。

理論班（計画研究 A01 - A03）、究極理論（C01）および究極解析班（D01）については、効率的な計画を立て、経費の執行に努めている。各計画研究の研究に専従する博士研究員の雇用は必須であるが、各研究機関の運営費交付金、あるいは国際活動班との経費の併用により、有能な博士研究員の確保に最善の努力を払い、良い人材が確保できている。必要な計算機等については、各研究機関の計算機あるいは共同利用計算機などを利用することにより経費を節約している。その他に経費は、研究成果の発表、研究会、ワークショップの運営、また研究打ち合わせなどに執行している。

本領域の経費の大部分は実験・観測の計画研究班（B01 - B04）に執行されている。計画研究 B01 の主な物品購入としては、超伝導センサーの試験システムとしての冷凍機システム（KEK に設置）と人工衛星の概念設計のための各種ソフトウェア（電磁界解析、熱解析、CAD など）が挙げられる。冷凍機システムは、共同利用が可能であり、B01 に属する複数機関の研究者が今後使用する予定である。ソフトウェアに関しても、共同利用が可能である。その他の研究費の主な用途は、研究員 5 名の雇用である。JAXA 宇宙科学研、国立天文台、岡山大、カブリ IPMU、KEK にそれぞれ研究員がいて、彼らの現場での密なコミュニケーションが、本計画研究を進める上での推進力となっている。以上から、購入物品はよく活用されており、研究費は効果的に使用されている。

計画研究 B02 班は、現在稼働中のすばる HSC イメージングサーベイの大規模データを精密に解析し、また全世界に公開するためのデータベース、ユーザーインターフェイスを整備するために必要な計算機、データストレージ、また博士研究員の雇用に経費を執行した。日本、世界の天文コミュニティーに責任を負う共同研究機関である国立天文台の計算機資源、マンパワーの助けを最大限活用し、80 テラバイトに及ぶ大規模データ、また約 1 億個にも及ぶ天体のカタログを公開することができた。また、HSC プロジェクトは、日本、台湾、プリンストン大学の研究者グループによる国際共同研究で進めているが、研究打ち合わせ、共同研究会議のための出張旅費にも経費を執行した。

計画研究 B03 班は、すばる HSC イメージングサーベイと、計画中のすばる広視野多天体分光器 PFS による分光サーベイデータを組み合わせた宇宙論を行うことが目標の一つである。PFS プロジェクトについては、現在装置開発の段階にあるが、この装置を用いて、どのような宇宙論・銀河進化・銀河考古学のサーベイを行うかという問題、つまりサーベイデザインの検討中である。この研究に専従する博士研究員として、米国イェール大学で Ph.D. を取得した有能な人材を確保でき、その人件費に経費を充てている。また、この PFS プロジェクトも米国（プリンストン大学、ジョンズ・ホプキンス大学、カリフォルニア工科大学）、台湾、中国、ドイツマックスプランク研究所、フランスマルセイユ天体研究所、ブラジルなどの研究者軍団の国際共同研究で進めているが、研究打ち合わせ、共同研究会議の開催のための出張旅費に執行した。この新学術経費は、この国際共同研究の円滑な運用の多大な助けになっている。これに平行して、B03 班の研究者らは、プリンストン大学、ジョンズ・ホプキンス大学の研究者と協力して、本領域の経費で Teledyne 社から光赤外線検出器 H4RG を購入し、検出器の性能評価を行っている。この H4RG は、例えば NASA の衛星計画 WFIRST も使用を計画しており、需要が非常に高く、計画通りに検出器の確保ができたことは非常に大きな進展である（PFS 計画に遅れが出ていない）。

計画研究 B04 班は、光コムによる高分散分光器によって、宇宙の加速膨張を直接検証することを目指し、装置開発と理論的な考察を同時並行で進めている。本領域の経費により、必要な共振器ミラーの設計、調達を行うとともに、計算機シミュレーションおよび予備実験を行った。これらの開発・検討に専任的に従事する博士研究員を雇用し、その人件費に経費を執行した。

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。

これまで定期的な総括班戦略会議ミーティング、また複数の電話会議を開催してきた。そのなかの2回のミーティングで、総括班評価者を招いて、各計画研究代表者が当該計画研究の進捗状況を報告し、議論する場を設けてきた。このミーティングにより、総括班メンバーが最新の現状、課題を共有するとともに、総括班評価者から研究・運営に関する有益な評価・助言を頂いてきた。評価担当の総括班メンバーは以下の3名の方である。

評価者の氏名と所属・職・専門分野（五十音順、敬称略）

河野孝太郎（東京大学・教授・電波天文学）

前田恵一（早稲田大学・教授・理論宇宙物理学）

山田亨（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・教授・銀河天文学）

評価者は、その豊かな見識に基づいてこれまで様々な有益な助言を領域の研究活動に対しておこなっており、領域として、非常に心強く思っている。今後もより一層コミュニケーションをはかって領域の発展にとって有用な情報を供給していただけるよう努力していく。以下に、今回の中間評価に関しての、評価者による評価・助言を記す。

評価者による評価・助言

本研究は、現代宇宙論最大の謎である2つの宇宙の加速機構（宇宙初期の加速膨張の起源および現在の宇宙の加速膨張の理解）を明らかにするべく立ち上げられた新学術領域である。そのために理論および観測・実験の両面から相補的な研究を行うという点に大きな特徴がある。領域計画書にあるように、研究対象を3つ（インフレーション、揺らぎと構造、ダークエネルギー）に分け理論班を配置し、計画されている4つの観測・実験においてそれぞれの対象に対応する成果目標を設定している。これは従来の観測・実験と理論の単なる連携による研究より、より広い2次元面的な5行3列の行列構造によりお互いの相関を考えながら研究を遂行するというこれまでにない手法を取っている点が非常に評価できる。

これまでの研究業績に関しては、各分野の第一線で活躍している研究者を集めているので、個々の研究者の業績としては非常にめざましい成果が得られており、研究業績としては文句の付け所がない。ただ新学術領域として考えたとき、研究者個々の業績ではなく、領域のグループとして取り組んだ成果やグループ化したことによる問題解決のための新しい課題の創出のようなものが必要と思われるが、これまでのところ、成果は得られつつあるものの、まだ十分ではないだろう。とくに、この新学術領域の最大の特徴と考えられる成果目標を示した5行3列の行列構造に対して、各研究班の相関（複数の研究班のメンバーが著者になっている論文の割合など）を見ることで、どの研究協力が本研究で効果的かわかるであろう。一つの疑問として、本研究では2つの加速膨張を課題に挙げているが、それらの加速機構の間に何らかの関連があるのか、それとも2つの大きな謎を一つの学術領域で取り扱っているだけなのか。本研究により各々の課題を解決することでその関連性が見つかり、重力の本質が明らかになれば非常に面白い。

一方、本新学術研究の大きな特色のひとつは、実際に物理学と天文学の知見を結集し、また、理論と観測・実験とを新しいデータ解析の方法で結びつけることを目指すところである。実際、すばる望遠鏡超広視野カメラ HSC による大規模観測とデータ解析に基づく宇宙論や暗黒物質の研究については、本新学術研究からも非常に大きな貢献を行っている。ここまでの主要な成果として、まず、HSC による大規模宇宙観測データ世界公開が達成されているが、ここにおいて、非常に膨大な大規模なデータ処理、画像解析、データベース構築、物理情報の抽出などの各側面で、本研究の成果が大きく寄与している。米国プリンストン大学や台湾 ASIAA のグループをはじめとする国際協力やまた、若手研究者の積極的な研究への参加も活発である。特に、精密な画像解析と重力レンズを用いた暗黒物質を主とする質量分布を解析するための

基本的な解析ツールを構築し、初期成果として質量分布を高い精度で求めることに成功していることは高く評価される。これらは、暗黒物質についての、理論・観測を融合した重要な研究成果であり、また、大規模データの解析および運用を可能とする手段の開発・マスキングも含む詳細な画像処理などで本研究の成果が活かされたものである。今後のより大規模になる銀河分布および物理量の解析からは、より本格的な精密宇宙論への応用が期待される。さらに理論と観測を融合させた研究成果として、原始ブラックホールへの興味がクローズアップされた。これは、本研究の進行中に生じた米国 LIGO チームによる重力波の初検出が大きな刺激となっているが、原始ブラックホールの生成や質量についての理論的研究、近傍銀河 M31 の天文観測からマイクロ重力レンズ効果を通じた原始ブラックホールの質量・存在量への制限など、今後、より重層的な研究展開が見込める興味深い研究成果も得られている。本新学術研究の目指すところとしている理論・観測など異なる分野の研究者の密な研究交流の中から、インフレーション理論に基づく予測と観測的な制限をあわせて議論することによって、興味深い成果が得られており、この点は高く評価したい。これは、同じく成果として述べられている矮小銀河の観測からの暗黒物質の性質を求める研究についても同様である。

同じ天文学観測に基づく研究である広域分光サーベイによる加速膨張の研究、TMT と高分散による加速膨張の研究では、それぞれ、すばる望遠鏡主焦点広視野分光器 PFS と TMT の高分散観測のキーとなる技術である光コムシステムの開発研究が進められた。光コムシステムの研究では要素技術についての知見を獲得する基礎的な実験的研究、シミュレーションが行われている。基礎研究として必要な段階とも理解するが、実験的研究でどのような成果が得られ、それがどのように装置仕様の策定に結びついたのかが、報告書からは十分に明確ではない。開発予算を使用する課題でもあるので、実験的研究の成果の吟味と今後の開発における見通しとを明確にして、後半の研究を推進することが期待される。

本新学術領域が取り組む2つの宇宙加速機構のうち、宇宙初期の加速機構を、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の B モード偏光観測により明らかにしようとする研究においては、地上観測と将来の衛星観測実現に向けた開発研究が推進されている。QUIET や POLARBEAR-1 実験での実績を踏まえ、より大規模な Simons Array の建設がチリ・アタカマにおいて進められており、検出器開発や読み出し回路の開発に若干の遅れがみられるものの、概ね当初の計画に沿った進捗が得られていると評価できる。また、高精度な偏光観測を行う上で鍵となる要素の一つ、偏光変調器の評価を、POLARBEAR-1 実験で実際に取得したデータに基づいて行い、大角度スケールでのノイズを大幅に除去できることを初めて実証できたことは、地上観測による原始重力波起源の B モード偏光検出に向けた大きな成果であると共に、衛星観測における要素技術の開発成果としても価値の高いものである。理論班との共同研究として、LiteBIRD 衛星を含む将来の衛星計画で行うべき観測を新たに定義する成果を発表できたことも素晴らしい。

LiteBIRD 衛星の技術成熟度を高める研究開発として導入を予定している CMB 観測機器性能評価システムについては、前景放射を考慮した焦点面性能の仕様を再検討する必要が生じている。米国側と協調してその後の検討が進められつつあり、予算執行についても適切に対応がなされていると評価するが、同時進行中の関連する大型科研費を含め、複数の新規開発と観測運用とを平行して進めることとなるため、最終年度までに達成すべき試験評価項目についても、残り時間を考慮して優先順位をつけ、特に重要な項目から、着実に実施することを期待したい。また、本テーマにおいて常に問題となる前景放射除去の高精度化についても、Simons Array への搭載が決まった 270GHz 帯を含め、実際の観測データに基づき、検証が更に進むことを期待する。熱的・運動的 SZ 効果など前景放射自体も研究対象として多様な発展が見込まれる。

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。

「4. 主な研究成果」「5. 研究成果の公表の状況」から明らかのように、これまで270編を超える査読論文が発表（受理）され、極めて順調に推移している。これは、領域の研究「加速宇宙」がエキサイティングな研究テーマであること、かつ優秀な研究者を確保できたことを反映している。このモーメンタムを維持し、さらに発展するために以下の方策で領域を運営する。また、競合する実験プロジェクトの情勢、また研究の最先端を理解するために、宇宙の加速宇宙膨張の物理（インフレーションおよびダークエネルギー）と宇宙の構造形成（ダークマターおよびニュートリノ）の研究で著名な研究者、また他の実験プロジェクトの代表者を招聘し、国際研究会を主催する。

総括班：本領域の研究を確実に達成するために、強力なマネジメントを発揮し、理論、実験の計画研究班間の連携・シナジー（協奏）を促進し、また定期的な戦略会議を開催し、進捗状況を共有し、課題があれば、解決策を見いだす。また、公募研究も有効に活用し、多角的な相乗効果を推奨する。若手研究者の育成のために、総括班がリードし、スクール、ワークショップ、研究会を開催する。また、領域全体の研究に関する国際研究会を開催する。これまで領域内の研究は自発的に派生し、多くの成果が出たものの、これまでは定期会議を十分に持てなかった。今後は電話会議も活用し、最終年度に向け、また集大成の研究成果を出すために、定期戦略会議を開催するように努める。

理論班（A01-A03班）：理論班は多くの成果を上げている。「インフレーション」、「ダークマター」、「ダークエネルギー」の理論モデルの構築、またその解明に向けた新しい手法の提案の研究を進め、実験班に研究目標の重要性を説き、モチベーションを与え、多角的なアプローチの研究を展開する。

計画研究B01「宇宙マイクロ波背景放射の広天域観測で探る加速宇宙と大規模構造」：計画研究としての目標（様式2-3各計画研究に係る事項B01に関する書類を参照）を達成することを基盤とし、それに加えて他の計画研究との連携による相乗効果を示す論文を生産していく。特にA01及びD01との連携を強化し、観測結果からインフレーション理論への制限を得る方法についての共同研究を今まで以上に強力に展開していく。領域全体シンポジウムを契機として、現在4つのサブプロジェクトが進行中であり、この程度の数を常に維持していく。

計画研究 B02「広天域深宇宙のイメージングによる加速宇宙の暗黒成分の研究」：上述したように2017年2月にすばる HSC 大規模サーベイのデータを全世界に公開できた。2017年度は、この HSC データを用いた重力レンズ精密測定から、宇宙論パラメータ（ダークエネルギーの状態方程式、ニュートリノ質量）を制限する研究を進める。さらに、最終年度までに完了する HSC 全データを用いた重力レンズ宇宙論解析に必要な理論整備を理論班と協力して進める。

HSC の検出効率の時間変化を監視・記録する較正装置は完成し、2016年度に測光の較正システムを構築する予定であったが、すばる望遠鏡のミラーハッチの故障という不可避な外的要因により、実現できなかった。較正システムは、2017年度の晩夏から初秋にかけて予定されている主鏡の再蒸着期に設置することで、遅れを取り戻せる。新型 CMOS の第一回試作も平成 2017 年度に行い、CMOS 読み出し回路は、残っている駆動ソフトウェアの開発を素子開発と並行して、最終的にはセンサーと組み合わせ読み出せるようにする予定である。

計画研究 B03「広天域銀河分光サーベイによる加速宇宙の究明」：HSC イメージングデータおよび SDSS 分光サーベイのデータを組み合わせた宇宙論解析を行い、宇宙論パラメータの制限を行う。また、これに平行して、宇宙の構造形成の N 体シミュレーションの大規模データベースを構築し、将来の精密宇宙論デ

ータの精度に足る宇宙論観測のモデル構築を行う。

すばる PFS の赤外線カメラの開発については、引き続きプリンストン大学、ジョンズ・ホプキンス大学の研究者と協力して進める。特に、2017 年度以降は PFS による分光データの自動高精度・高速データ解析ソフトウェアを開発する。また、国際共同研究のパートナー研究機関の研究者と協力して、PFS 銀河分光サーベイのデザイン、科学目標を決定する。このとき理論班、D01 班と協力して研究を進める。

計画研究 B04 「次世代超大型光学赤外線望遠鏡 TMT と高分散分光器による宇宙の加速膨張の直接検証」：堅牢性、高速制御性に優れたエルビウム添加光ファイバーの光コム、可視近赤外領域の波長安定化レーザー、光コム切り出し共振器、そして可視光発生部からなる光コムシステムの設計・製作を行い、動作チェック後は、すばる望遠鏡に装置を移動し、高分散分光器 HDS に搭載する。すばる望遠鏡への搭載後は、観測を行いつつ、TMT に導入すべき次の光コムシステムの仕様を検討する。これに平行して、TMT 望遠鏡を用いた宇宙の加速膨張の直接観測を行う際の不定性などを調べ、最適な手法を検討する。

計画研究 C01 「究極理論からの加速宇宙の解明」：超弦理論に基づくトップダウン的な観点から、インフレーションあるいは現在の加速宇宙の物理を探究する。また、積極的に理論班、実験班と交流し、宇宙論観測への宇宙の初期条件、量子重力の痕跡の探究、またその観測的検証の可能性を提言する。

計画研究 D01 「多波長宇宙論データを用いた究極的物理解析ツールの開発」：宇宙背景放射、銀河イメージング、銀河分光サーベイデータを「同時」に解析し、宇宙論情報を最大限引き出すことを可能にする手法を開発する。B01、B02、B03 班と協力して、これを実際のデータに適用し、宇宙論パラメータを制限する。

国際支援班 Y00：本領域の実験・観測プロジェクトが全て国際共同研究であるので、国際支援班の活動、役割も極めて重要である。国際共同研究パートナー機関と本領域の研究機関の橋渡し役を果たす若手研究者を確保し、円滑に共同研究を進め、またパートナー研究機関との連携をさらに強化する。また、大学院生、若手研究者をパートナー機関に長期派遣し、人材交流のパイプを強化し、長期的な基盤を確保する。外国人博士研究員も雇用し、相互的な協力関係を確立する。

公募研究の役割：公募研究と計画研究の連携により、新しい研究の展開が派生している。例えば、B02 のすばるビッグデータとデータサイエンスの研究者の共同研究が始まり、新たな展開が大きく期待できる。また、弦理論、素粒子物理学、天文学の研究者の共同研究が立ち上がり、矮小銀河のダークマター分布の復元の改善、またそれが示唆するダークマターの素粒子的制限の再考、という研究成果が発表された。このように公募研究の機会を最大限活用し、計画研究ではカバーできない、新たな研究の展開、また相補的な研究を推奨する。総括班がこれらの研究活動をモニターし、必要があれば、ワークショップなどを企画し、共同研究発足の場を提供する（これまでのところ幸い自然発生的に共同研究が派生している）。