

領域略称名：加速宇宙

領域番号：2705

令和2年度科学研究費助成事業
「新学術領域研究（研究領域提案型）」
に係る研究成果報告書（研究領域）兼
事後評価報告書

「なぜ宇宙は加速するのか？-徹底的究明と将来への挑戦-」

領域設定期間

平成27年度～令和元年度

令和2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・教授・村山 斉

目 次

研究組織

- | | | |
|---|----------------|---|
| 1 | 総括班・総括班以外の計画研究 | 2 |
| 2 | 公募研究 | 3 |

研究領域全体に係る事項

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

研究組織

(令和2年3月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

1 総括班・総括班以外の計画 10 研究

研究項目 [1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	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 ～ 令和元年度	村山 斉	東京大学・カブリ数物連 携宇宙研究機構・教授	3
Y00 国	15K21733 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 ～ 令和元年度	村山 斉	東京大学・カブリ数物連 携宇宙研究機構・教授	10
A01 計	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 ～ 令和元年度	佐々木 節	東京大学・カブリ数物連 携宇宙研究機構・特任教 授	4
A02 計	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 ～ 令和元年度	高橋 史宜	東北大学・理学研究科・教 授	4
A03 計	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 ～ 令和元年度	杉山 直	名古屋大学・理学研究科・ 教授	6
B01 計	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 ～ 令和元年度	羽澄 昌史	高エネルギー加速器研究 機構・素粒子研原子核研 究所・教授	6
B02 計	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 ～ 令和元年度	宮崎 聡	国立天文台・先端技術セ ンター・教授	10
B03 計	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 ～ 令和元年度	高田 昌広	東京大学・カブリ数物連 携宇宙研究機構・教授	4
B04 計	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証	平成27年度 ～ 令和元年度	臼田 知史	国立天文台・TMT プロジェ クト・教授	5
C01 計	15H05895 究極理論からの加速宇宙の解 明	平成27年度 ～ 令和元年度	大栗 博司	東京大学・カブリ数物連 携宇宙研究機構・特任教 授	4
D01 計	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 ～ 令和元年度	小松 英一郎	東京大学・カブリ数物連 携宇宙研究機構・主任研 究員	3
総括班・総括班以外の計画研究 計 11 件 (廃止を含む)					

2 公募研究

研究項目 [1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
E01 公	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	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關する 理論研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	成子 篤	東京工業大学・理学研究 科・助教	1
E01 公	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關する 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	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	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	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	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	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	16H01103 複数場インフレーションモデ ルの検証に關する理論的研究	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	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	1
E02 公	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	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	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・助教	1
E02 公	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	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	1
E02 公	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	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	1
E02 公	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	高エネルギー加速器研究 機構・素粒子研原子核研 究所・准教授	1
E02 公	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	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	1
E03 公	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	1
E03 公	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	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	16H01104 機械学習による測光的赤方偏 移計測計画の研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	中野 淳	金沢大学・工学部・教授	1

F01 公	18H04333 銀河形成シミュレーションで 探る衛星銀河サブハロー構造 のダークマターモデル依存性	平成30年度 ～ 令和元年度	岡本 崇	北海道大学・理学研究院・ 講師	1
F01 公	18H04336 Vlasov シミュレーションで迫 るニュートリノの宇宙大規模 構造形成への力学的影響	平成30年度 ～ 令和元年度	吉川 耕司	筑波大学・計算科学研究 センター・講師	1
F01 公	18H04337 大規模シミュレーションと次 世代超広視野分光観測で解き 明かすダークマターの正体	平成30年度 ～ 令和元年度	石山 智明	千葉大学・総合情報セン ター・准教授	1
F01 公	18H04338 恒星質量原始ブラックホール の検証に向けた理論研究	平成30年度 ～ 令和元年度	須山 輝明	東京工業大学・理学院・准 教授	1
F01 公	18H04339 赤方偏移21cm輝線観測を 用いたダークエネルギーの解 明	平成30年度 ～ 令和元年度	関口 豊和	東京大学・大学院理学系 研究科・特任助教	1
F01 公	18H04340 ガンマ線と大規模構造のクロ ス相関による暗黒物質粒子の 探査	平成30年度 ～ 令和元年度	安藤 真一郎	東京大学・カブリ数物連 携宇宙研究機構・客員科 学研究員	1
F01 公	18H04349 大規模構造の観測を通じた超 弦理論の検証	平成30年度 ～ 令和元年度	浦川 優子	名古屋大学・理学研究科・ 招聘教員	1
F01 公	18H04352 原始揺らぎの非ガウス性の符 号で検証する弦理論の基本原 理	平成30年度 ～ 令和元年度	野海 俊文	神戸大学・理学研究科・特 命助教	1
F01 公	18H04355 初期特異点のない宇宙創生シ ナリオの研究	平成30年度 ～ 令和元年度	小林 努	立教大学・理学部・教授	1
F01 公	18H04356 原始ブラックホール形成過程 の精査とその観測的検証	平成30年度 ～ 令和元年度	横山 修一郎	名古屋大学・基礎理論研 究センター・助教	1
F02 公	18H04342 HSCによるIa型超新星の 早期観測による親星の研究	平成30年度 ～ 令和元年度	土居 守	東京大学・大学院理学系 研究科・教授	1
F02 公	18H04343 遮蔽効果を有する新しいスカ ラー場の探索実験	平成30年度 ～ 令和元年度	神谷 好郎	東京大学・素粒子物理国 際研究センター・助教	1

F02 公	18H04345 遠方 I a 型超新星による宇宙膨張の測定	平成 30 年度 ～ 令和元年度	安田 直樹	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授	1
F02 公	18H04346 Molecular gas in high redshift star-forming galaxies with ALMA	平成 30 年度 ～ 令和元年度	SILVERMAN, John	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・准教授	1
F02 公	18H04353 物理定数恒常性測定の飛躍的精度向上に向けた、原子核のレーザー励起の実現	平成 30 年度 ～ 令和元年度	増田 孝彦	岡山大学・異分野基礎科学研究所・助教	1
F02 公	18H04354 高強度レーザー場による誘導共鳴散乱を介した e V 近傍質量域の暗黒場探索	平成 30 年度 ～ 令和元年度	本間 謙輔	広島大学・理学研究科・助教	1
F02 公	18H04360 セラミックス焼成技術を応用したミリ波光学素子の開発	平成 30 年度 ～ 令和元年度	高山 定次	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授	1
F02 公	18H04361 宇宙初期の加速膨張を検証可能にする革新的な超伝導検出器の開発	平成 30 年度 ～ 令和元年度	南 雄人	高エネルギー加速器研究機構・素粒子研原子核研究所・研究員	1
F02 公	18H04362 CMB 偏光観測望遠鏡のための偏光補正装置の開発	平成 30 年度 ～ 令和元年度	高倉 理	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特別研究員	1
F02 公	18H04363 ガス冷却でつくる広帯域・高透過率な CMB 光学系 - 反射防止のいらぬ断熱フィルター	平成 30 年度 ～ 令和元年度	小栗 秀悟	理化学研究所・光量子工学研究センター・基礎科学特別研究員	1
F03 公	18H04334 銀河系古成分恒星系の動力学構造の観測と理論に基づく暗黒物質の解明	平成 30 年度 ～ 令和元年度	千葉 柁司	東北大学・理学研究科・教授	1
F03 公	18H04335 高エネルギーガンマ線の偏光測定による量子重力理論の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	郡司 修一	山形大学・理学部・教授	1
F03 公	18H04347 最新のマイクロ波望遠鏡で探るインフレーション起源重力波と宇宙の暗黒成分	平成 30 年度 ～ 令和元年度	茅根 裕司	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・客員准科学研究員	1
F03 公	18H04348 すばる H S C のコズミックシア解析で探る宇宙の加速膨張	平成 30 年度 ～ 令和元年度	日影 千秋	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授	1

F03 公	18H04350 すばる超広視野銀河サーベイ の弱重力レンズ効果精密測定 で探る宇宙の加速膨張の起源	平成30年度 ～ 令和元年度	宮武 広直	名古屋大学・高等研究院 (理)・特任助教	1
F03 公	18H04357 宇宙シア解析の新たな方法の 研究とその実際の観測データ への応用	平成30年度 ～ 令和元年度	二間瀬 敏史	京都産業大学・理学部・教 授	1
F03 公	18H04358 数値計算と実験データの直接 比較による宇宙加速膨張モデ ルの検証	平成30年度 ～ 令和元年度	白崎 正人	国立天文台・科学研究部・ 特任助教	1
F03 公	18H04359 次世代暗黒物質探査に向けた 矮小銀河暗黒物質ハロー構造 の精密決定	平成30年度 ～ 令和元年度	林 航平	東京大学・宇宙線研究所・ 特別研究員	1
公募研究 計 52 件 (廃止を含む)					

- [1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究
[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	325,520,000 円	250,400,000 円	75,120,000 円
平成 28 年度	296,140,000 円	227,800,000 円	68,340,000 円
平成 29 年度	293,800,000 円	226,000,000 円	67,800,000 円
平成 30 年度	301,340,000 円	231,800,000 円	69,540,000 円
令和元年度	298,090,000 円	229,300,000 円	68,790,000 円
合計	1,514,890,000 円	1,165,300,000 円	349,590,000 円

4 研究領域の目的及び概要

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

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年のグローバー賞と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す方向に働くため、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、すでに重力レンズ効果によるBモード偏光の発見に成功している。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主焦点カメラHyper Suprime-Cam(HSC)を製作し、すばる史上最大のサーベイが進行中である(悪天候、コロナ等の影響でR3年度まで)。また、すばる分光サーベイのための多天体分光器の装置の建設も順調に進んでいる。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観測という他の追随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 年のグロウパー賞、2014 年のカブリ賞、2019 年のノーベル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より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 や衛星実験計画 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、当該学術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。

研究領域の目的および研究終了後に期待される成果等：研究期間中に Simons Array 計画から CMB の B モード偏光探索によるインフレーションのエネルギー・スケールについて、HSC による深宇宙のイメージングサーベイからダークエネルギーの時間変化について、そしてスローン・デジタル・スカイ・サーベイ分光銀河サーベイ (BOSS/eBOSS) とすばる次世代多天体分光器 Prime Focus Spectrograph の初期データから理論によらないダークエネルギーの結果を出せるはずであり、どれも世界トップレベルの感度を持つ。これを遂行するために、理論・データ解析を分野融合型に発展させ、多波長に渡るデータを結び合わせてサイエンス・アウトプットを最大化する。更に観測・実験からの結果が理論に跳ね返り、新しい学問分野を創成し、加速膨張の徹底的な究明を目指す。

本研究は宇宙の創成、運命、構成、法則全てに関わり、何千年にもわたる人類共通の根本的な疑問に答えていくものである。宇宙の加速膨張の全貌が解明されれば、天動説が地動説に転換したときの様に人類の宇宙観に大きな影響がある。哲学や宗教、人生観にも関わり、社会的意義は極めて高いと考える。社会的に大きなインパクトがありながら、誰でもが理解できる素朴な研究内容であり、広く人々の興味を喚起する。特に日本発の研究結果を発信することにより青少年の興味を喚起し、我が国の次世代を担う理系人材の育成に貢献することができる。こうして研究内容そのものを大きく超えて社会への波及効果が見込まれる。

5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

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

(審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

(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。

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」のための研究活動、例えば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。2018、2019年度に関しては、領域内ですばる Hyper Suprime-Cam の研究成果の宣伝も目的として、国際研究会を開催し、総括班の経費はその後方支援に使用した。理論班(計画研究 A01 - A03)の予算に関しては、博士研究員の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 800 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、既存の使用可能なり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。

(中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

(留意事項)：

- (1) 観測装置の研究開発を含む課題について、本研究領域の経費だけでは閉じず国際プロジェクトなど他の研究資金との協力によるケースがあると思われる。その場合、研究目的と資金の切り分けには留意して説明責任を果たす必要がある。
- (2) 研究項目 C01 及び D01 について、他の研究項目との有機的連携を促進するための工夫が望まれる。

上記の留意事項 (1)、(2) について以下のような対応を図った。

(1) 本領域の CMB 実験(計画研究 B01)、すばる Prime Focus Spectrogram (PFS)(計画研究 B03)は国際共同研究で進められている。計画研究 B01 の担当部分と国際共同研究パートナーが開発するコンポーネントとの切り分けは明確にした。その結果、計画研究 B01 の経費で期間内に行うとした開発計画は全て完了できた。具体的には、Simons Array では、受信機本体を本計画の経費で担当し、一方、望遠鏡及び受信機に搭載するセンサーを国際協力パートナーが担当した。LiteBIRD 衛星計画では、本計画では低周波望遠鏡を担当し、JAXA が衛星システム本体、国際共同研究パートナーが中・高周波望遠鏡を担当した。

B03 班の装置開発については、すばる多天体分光器 PFS のサブシステムの一つである赤外線分光器の開発を本領域の経費で負担した。波長帯で約 100nm から 126nm までをカバーする赤外線分光器により、赤方偏移で 1.5 から 2.4 までの銀河の 3次元地図を作成することが可能になり、これは宇宙膨張において減速膨張期から加速膨張期への変遷を測定できることを意味する。また、米国ローレンス・バークレー国立研究所が主導する、競合の Dark Energy Spectrograph Instrument (DESI)にはない性能であり、PFS に独自性、競争力を与える。特に、赤外線検出器については、現時点で世界最高感度の米国 Teladyne 社の H4RG を用いる。高額なだけでなく、需要過多、また安全保障の観点から入手困難であったが、プリンストン大学・ジョンズホプキンス大学の共同研究者と綿密に協力して購入、開発が順調にできた。このよ

うに PFS 国際プロジェクトのなかで赤外線分光器の開発という、経費の切り分けを行った。

(2) については、中間評価以降に意識的に研究項目間の有機的連携を促進し、大きな改善が得られた。まず、C01「究極理論」については、2018 年に研究代表者大栗博司が超弦理論の観点から「swampland (スワンプランド)」仮説を提唱した。スワンプランド仮説は、インフレーション模型の特性、またダークエネルギーは厳密な意味ではアインシュタインの定数ではあり得ない、という予言を与えた。この予言は、領域全て理論・実験・観測の全てに関係するため、多くの研究を生んだ。例えば、領域代表者村山 齊は共同研究者とともに、スワンプランド仮説がインフレーション模型の特性に示唆すること、またそのインフレーション模型が予言する原始重力波の振幅、ダークエネルギーが時間進化する程度を評価し、領域の実験計画である CMB 衛星計画 LiteBIRD、すばる HSC・PFS サーベイによってスワンプランド仮説が検証可能かを議論した。また、A02 の研究分担者である川崎雅裕らもスワンプランド仮説の下での初期宇宙での原始ブラックホール形成に対する示唆を議論した。このように、スワンプランド仮説は、超弦理論の観測的検証性を与えたという意味で重要であることは言うまでもないが、本領域の観測・実験に動機、目標を与え、多くの共同研究、連携を誘発した。

D01「究極物理解析」班の研究活動についても目覚ましい進展があった。D01 班の研究代表者小松英一郎、研究分担者、博士研究員らは、全ての実験班 B01 – B04 との共同研究を実現し、また実験・観測の解析、デザイン選定に有用な物理解析ツールを開発した。例えば、B01 CMB 班とは、CMB 観測の実験パラメータ（感度、角度分解能、天領域の広さ）のパラメータの関数として、どの程度の精度で CMB 偏光 B モードの観測から原始重力波パワースペクトルを再構築できるかを可視化したユーザーインターフェースのソフトを作成した(Hiramatsu et al. 2019)。B02, B03 班のすばる銀河イメージング・分光サーベイについては、期待される銀河の模擬カタログを作成するための高速プログラムを開発し、実際にすばる PFS プロジェクトの宇宙論サーベイのデザイン、検討に活用されている。B04 班の 30m 望遠鏡計画については、共同研究により、宇宙膨張の直接測定について、地球の固有運動の影響を定量的に調べた。このように D01 班と他の研究項目の有機的連携は実績を伴う改善が実現した。

6 研究目的の達成度及び主な成果

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

本新学術領域「加速宇宙」では、天文学と物理学の融合研究で、また理論、実験と観測の包括的なアプローチで、宇宙膨張の加速の原因を究明、また加速膨張に逆らって銀河・銀河団などの宇宙の構造の形成を引き起こすダークマターとの引力のせめぎ合いを理解することを目的とした。

本領域研究期間中に達成できた中で特筆すべき研究成果は、以下のものである。(1) 計画研究 C01 の代表の大栗博司らは、超弦理論の枠組みで、重力理論を量子論に整合的に組み込むことができないという「swampland」(スワンプランド) 仮説を提唱し、業界に活発な議論を巻き起こした。研究代表者村山斉らを含む、領域の研究者も、スワンプランド仮説が帰結する、宇宙初期、現在の宇宙の加速膨張を駆動するインフレーション、ダークエネルギーの性質を調べ、本領域が推進する将来の実験・観測による検証の可能性を議論した。(2) 宇宙初期の加速膨張インフレーションの物理機構により、原始ブラックホールが生成される可能性がある。領域の研究者らは、この原始ブラックホールが LIGO 重力波の対応天体の起源となり得ることを世界で初めて指摘した。また、すばる Hyper Suprime-Cam (HSC) のアンドロメダ銀河のデータを用い、重力マイクロレンズ現象を探索し、太陽系小天体の質量程度の原始ブラックホールの存在量を世界で初めて制限した。このように世界中を巻き込み原始ブラックホールの研究分野を新たに展開した。(3) すばる HSC の宇宙俯瞰サーベイの初期データの約 1000 万個の銀河の重力レンズ効果を精密に測定し、宇宙モデルの物理パラメータを約 4% の精度で測定し、ダークエネルギーの性質について観測的な制限を得た。本領域が目指した、日本が主導する国際共同研究で精密宇宙論が実現した。

(4) 本領域の研究で準備してきた次世代宇宙背景放射衛星計画 LiteBIRD が、JAXA 宇宙科学研究所の次期戦略的中型 2 号機の計画に選定された。(5) 宇宙背景放射地上実験、すばる多天体分光器、30m 級望遠鏡の超高分散分光観測に必須な基礎技術(光周波数コム)の装置開発を行い、国際共同研究を確実に進めた。本領域の目標がおおむね達成でき、また当初予想していなかった新たな研究の展開もあったと言える。

本領域では、宇宙極初期、現宇宙の加速膨張の物理を究明するために、サイエンステーマとして「インフレーションの物理」、「原始揺らぎの起源と構造形成」、「ダークエネルギーの物理」を立てた。この研究項目を戦略的に推進するために、「理論班」(A01-A03)、「実験班」(B01-B04)、「究極理論」(C01)、「究極物理解析」(D01)の計画研究を配置した。公募研究については、相補的、萌芽的な研究テーマを設け、領域内の相乗効果を図った。異なる計画研究班間に明確な境界を設けず、新学術領域の研究機会を活用し、異なる班、研究者間の有機的連携、共同研究を積極的に促し、「宇宙の加速膨張の謎」というビッグテーマに挑んだ。このため、以下の研究成果の報告では、計画研究毎ではなく、意図的に混合して、報告することにする。機器、装置開発については、各項目について報告する。5年間の研究期間内に 800 件を超える査読論文を發表することができた。なお、以下で参照する論文の引用数については、iNSPIRE あるいは ADS データベースに基づく(2020年6月16日時点)。

研究項目「究極理論」の swampland 仮説の提案とそれに関連する研究の進展 – 計画研究 C01「究極理論」は、トップダウン的にインフレーション、ダークエネルギーの加速膨張を自然に説明できる究極理論を探り、上記のサイエンスの協奏を促すことを目的とした。C01 の研究代表者の大栗博司、ハーバード大学の Cumrum Vafa と大学院生らは、(加速膨張の解である) 厳密なドジッター時空は超弦理論のトップダウン解として実現できないという予想を發表した(Obied, Ooguri et al. arXiv:1806.08362, 引用数 416; Ooguri et al. Phys. Lett. B, 2019, 引用数 257)。この予想は「swampland (スワンプランド)」仮説と呼ばれている。このスワンプランド仮説は、宇宙初期の加速膨張を引き起こすインフレーションモデルのパラメータに対して制限を与え、また現在の宇宙の加速膨張がアインシュタインの宇宙定数によるものではなく、時間進化するダークエネルギーのためである、という予言を与えた。iNSPIRE によれば、大栗らの論文は 2018 年度に發表された素粒子論の論文のなかで最も被引用件数が高い論文になっている。

スワンプランド仮説は、本領域に属する研究者らにも様々な活発な議論を巻き起こした。例えば、領域代表者の村山斉らは、現在の宇宙・素粒子データから仮説の修正を促し (Murayama et al, JHEP 12, 2018, 引用数 78)、さらに計画研究 B01 班が推進する宇宙背景放射偏光の地上実験 Simons Array、Simons Observatory、また衛星実験 LiteBIRD による原始重力波の探索、また計画研究 B02、B03 班が進めるすばる広天域イメージングサーベイおよび分光サーベイによるダークエネルギーの時間進化の探索により、

スワンプランド仮説が検証可能であることを示した (図 1 参照、Chiang, Leedom & Murayama, Phys. Rev. D 100, 2019, 引用数 25)。また、A01 班、B01 班、D01 班の研究者らが協力して、本領域の宇宙背景放射偏光の実験から期待される原始重力波の振幅、スペクトルを復元する精度を予言する手法、ユーザーインターフェースを開発した (Hiramatsu, Komatsu et al. Phys. Rev. D 97, 2018, 引用数 9)。このように、超弦理論のスワンプランド仮説に関する研究テーマは、初期宇宙、現宇宙の加速宇宙の理論研究だけでなく、実験、観測に目標を与え、融合的な研究の展開に大きく貢献し、予想以上の成果が達成できたとと言える。

研究項目「インフレーションの物理」 - 宇宙の極初期に起こったとされる「インフレーション宇宙」は、宇宙の平坦性問題の解決、宇宙構造の種である原始揺らぎの生成機構などを自然に説明し、また様々な宇宙論データを無矛盾に説明することに成功している。しかし、何がインフレーションを起こしたか? という最も基本的な問いに対する満足に足る答えは得られていない。計画研究 A01 は、多角的な観点からインフレーションの正体、物理に理論的に迫ることを目指し、計画研究 B01 は宇宙背景放射(CMB)の地上実験 Simons Array の CMB 偏光データでその物理に迫ることを目的とした。

インフレーションの理論研究については、様々な成果が出た。例えば、A01 研究代表者佐々木節らは、インフレーション宇宙にヒッグス場が共存する場合にその不安定性が問題であったが、ダークエネルギー (場) との相互作用で不安定性を回避できること、またそのシナリオがスワンプランド仮説と整合的であることを示した (Han et al., Phys. Lett. B 791, 2019, 引用数 48)。

さらに、領域発足当初は想定していなかった研究成果として、本領域の研究者が中心となり、世界中に活発な議論を巻き起こした原始ブラックホールの研究成果がある。原始ブラックホール(PBH)は、インフレーション、あるいは初期宇宙の物理機構を通して生成された可能性があり、ダークマターの有力候補の一つである。本領域が発足した 2015 年度には、米国のレーザー干渉計重力波実験 LIGO がブラックホール連星合体からの重力波を検出した結果が発表され、業界に大きな興奮を巻き起こした (2017 年ノーベル物理学賞)。重力波検出自体が歴史的偉業であるが、重力波源が太陽質量の約 30 倍程度のブラックホール同士の合体という事実が判明し、X 線連星の観測から知られていた 5 - 10 倍太陽質量のブラックホールしか存在しない、というそれまでの天文学の常識を覆す結果であった。この LIGO ブラックホール連星の形成過程、起源は大きな謎となり、天文学、宇宙物理学の業界で活発な議論が展開されている。A01 研究代表者の佐々木節と若手研究者らは、この LIGO 重力波検出の発表に速やかに反応し、LIGO 重力波対応天体が PBH である可能性を調べ、太陽質量の 30 倍程度の PBH がダークマター総量の数%程度だけ存在すれば、LIGO 重力波の観測結果を説明できることを指摘した (Sasaki et al., Phys. Rev. Lett. 117, 2016, 引用数 348)。この提案は、世界中の研究者に追随され、研究の大きな流れを作った。また、本領域の研究者らは、インフレーションの物理機構による PBH の生成には、一般に宇宙論的には短波長の原始重力波の生成を伴うことも明らかにし、将来の重力波観測により PBH シナリオの検証が可能であることを指摘した (例えば、Inomata et al, Phys. Rev. D, 95, 2017, 引用数 89)。筆頭著者の猪俣敬介は A02 班の研究分担者川崎雅裕が指導した大学院生 (当時; 2019 年博士号取得) である。

このように LIGO 重力波の検出は、重力波天文学の幕開けを起こした。2017 年には中性子連星合体からの重力波も検出され、フェルミガンマ線衛星をはじめとする電磁波観測も実現した。重力波と電磁波の到達時間の差 (2 秒程度) の観測結果から、宇宙の加速膨張の物理機構の可能性の一つである修正重力理論の多くが棄却され、本領域の研究者もその制限を発表した (Arai & Nishizawa, Phys. Rev. D, 2017, 引用数 73; Kase & Tsujikawa, Int. J. Mod. Phys. D, 2019, 引用数 63)。著者の新井舜は A03 計画研究「ダークエネルギー」の代表研究者杉山直 (名古屋大学) が指導した大学院生 (当時; 2019 年博士) である。

さらに、B03 班の代表研究者高田昌広、当時大学院生だった新倉広子 (2018 年博士) らのリードする研究グループは、PBH の観測的研究も行った。研究グループは、A01, A02, B02 班らの研究者と協力し

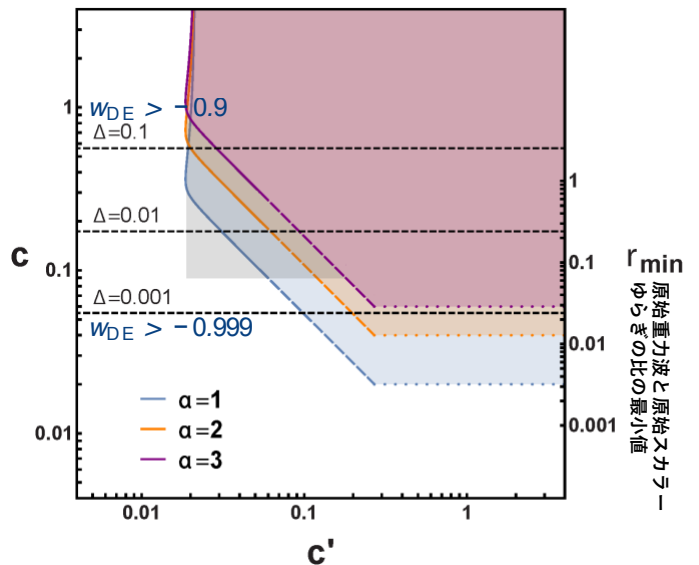


図 1: インフレーション模型に対するスワンプランド仮説のパラメータ(c, c')空間での制限。白抜き (色がついていない領域) が許されるパラメータの範囲。原始重力波の振幅 (r_{\min}) とダークエネルギーの状態方程式パラメータ (Δ) に示唆が与えられる。実際に LiteBIRD 実験、すばる HSC/PFS で観測可能な範囲にある (Chiang, Leedom & Murayama 2018)。

て、すばる HSC の威力に着目し、アンドロメダ銀河の約 9000 万個の星のモニター観測を遂行し、PBH の重力マイクロレンズを探索した (Niikura, Takada et al., Nature Astron. 3, 2019, 引用数 204)。重力レンズは電磁波で光らない重力源さえも見ることを可能にする手法であり、PBH の観測的探索を可能にする。M31 の HSC 重力マイクロレンズ探索の場合には、太陽系小天体質量程度の PBH が天の川銀河(我々の銀河)および M31 に存在するダークマターである場合、HSC 一晩の観測で約 1000 個程度の重力マイクロレンズ天体を発見できるはずであった。しかし、研究チームはたった一個だけの重力レンズマイクロレンズ候補天体を同定した。これは PBH がダークマター総量の約 $1/1000=0.1\%$ 以下しか存在できないことを意味する。図 2 がその結果を示し、すばる HSC により世界で初めて太陽系小天体質量 ($10^{-10}g$ 太陽質量) 程度の PBH の存在量を制限できた。これより小さい質量の場合は光の波としての干渉効果が無視できないことを A01 班の佐々木らが指摘し、理論的に観測結果を支えた。太陽系小天体よりも軽い PBH がダークマターである可能性が残されており、現在も活発な研究がなされている (例えば、Inomata et al., Phys. Rev D, 2017、引用数 80)。さらに、存在が指摘されている太陽系の第 9 惑星が地球質量程度の PBH である可能性なども指摘されており、様々な分野に波及効果があった。本領域の研究チームもさらに重力マイクロレンズ探索を行っており、今後のさらなる発展が期待される。

このように、本領域の研究者らの研究成果が契機となり、PBH の理論的、観測的研究、またインフレーション、重力波天文学、さらに太陽系第 9 惑星などの研究テーマに広がるなど、新しい研究分野の展開に大きく貢献したと言える。これも新学術領域による多分野、専門の研究者が集結し、交流することで可能になった研究成果と言える。また、これらの分野で多くの大学院生、若手研究者が活躍し、インパクトある研究成果を発表し、若手研究者の育成にも大きく貢献した。領域発足時には想定していなかった、予想以上の成果を達成できたと言える。

研究項目「ダークエネルギー、宇宙の構造形成」 - 現在の宇宙で観測される銀河、銀河団に代表される宇宙の構造は、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閉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してきたと考えられている。一方、宇宙の加速膨張は揺らぎをならす方向に働くため、宇宙の構造形成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。計画研究 A02, A03 は「原始揺らぎの起源、構造形成の物理、ダークエネルギーの物理」を理論的に研究することを目的とし、計画研究 B02, B3 は最先端のすばる銀河サーベイのデータを用いて、構造形成の現標準模型である「アインシュタインの宇宙定数および冷たいダークマターが支配的な構造形成モデル Λ CDM」を定量的に検証することを目的とした。

A02, A03 の研究者らは、インフレーション模型、ダークマター模型、ダークエネルギー、修正重力、

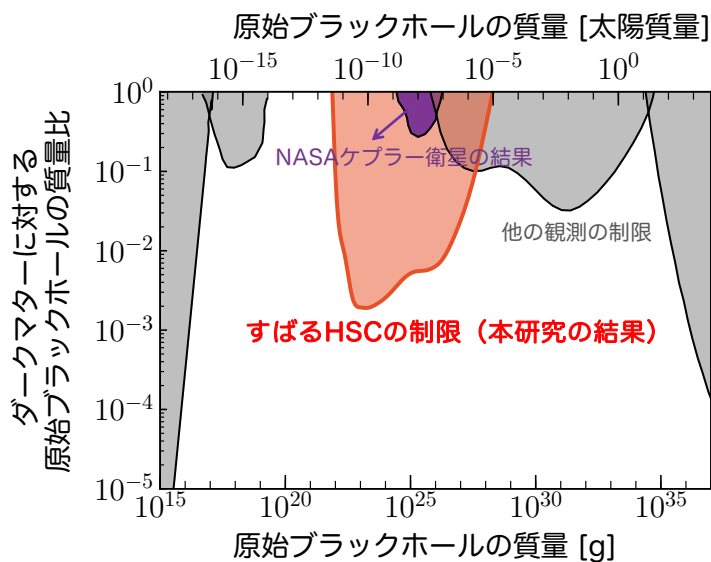


図 2: オレンジ色で塗られた領域は、本研究の HSC データによるアンドロメダ銀河の重力マイクロレンズ探索から得られた、原始ブラックホール (PBH) の存在が 95%CL で許されない領域。横軸は PBH の質量、縦軸はダークマター総量に対する PBH の存在比。グレーの領域は他の観測結果 (Niikura et al. 2019)。

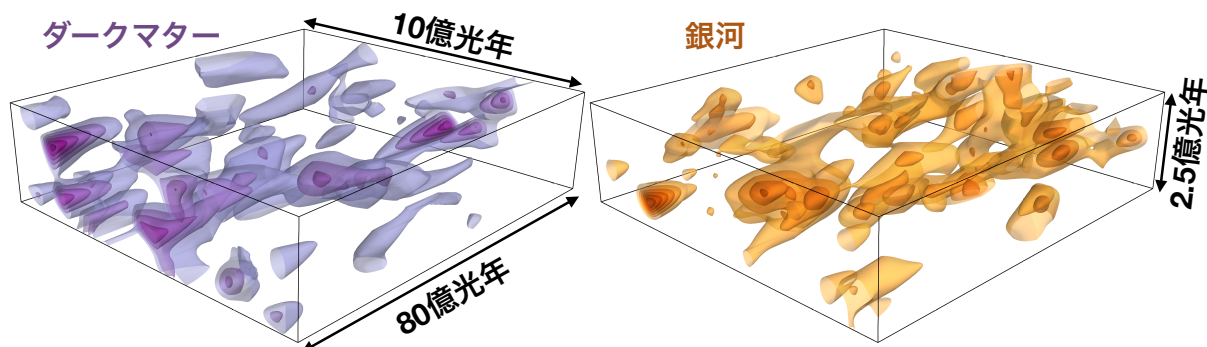


図 3: すばる HSC データの重力レンズ効果の測定から復元したダークマターの空間分布 (左) の観測結果、また同じ領域の銀河の空間分布 (右) を示す (Oguri et al. 2018)。

PBH など多くの研究成果を出した。例えば、A02 研究代表者の高橋史宜らは、インフレーションとダークマターをアクションで統一的に説明するモデルに成功した(Daido et al., JCAP 05, 2017, 引用数 49)。

主に A02, A03, B02, B03 の研究者らが関与した研究における大きな成果としては、すばる超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) のデータによる精密宇宙論の実現がある。本領域発足当時は、すばる史上最大(330 晩)の HSC による深宇宙イメージングサーベイが開始したところであった。すばる HSC は、200 名を超える日本、台湾、プリンストン大学の研究者らの国際共同研究で進められている。

すばる HSC は、8.2m 主鏡の大口径、高い結像性能(シャープな画像)、またその広い視野(一度に観測できる天域の広さ)のために、遠い(過去の宇宙にあることと等価)、暗い銀河までのイメージング(デジタル)画像を取得することを可能にする。このため、すばる HSC は圧倒的に高い効率で広天域に渡り、宇宙のイメージングデータを取ることを可能にし、このデータは銀河像の重力レンズ効果を測定するには現時点で世界最高の装置である。B02、B03 計画研究の研究者が中心になり、すばる HSC サーベイの初期データを解析し、重力レンズ効果の精密測定を実現し、様々なサイエンスを導出した。2018 年度には、査読雑誌日本天文学会欧文研究報告(Publications of the Astronomical Society of Japan)の特集号に、すばる HSC サーベイを用いた研究成果の 40 編の論文を掲載し、業界にインパクトを与えた。図 3 は、その結果の一つであり、約 1000 万個の銀河像の HSC データから重力レンズ効果を測定し、復元したダークマターの空間分布を示す(Oguri et al., PASJ 70, 2018, 引用数 25)。HSC データの性能により、約 80 億年前から現在にかけてのダークマターの空間分布について、世界最大の地図を作成することができた。また、図 2 の右図は、同じ領域の銀河分布を示す。宇宙の標準模型 Λ CDM が予言するように、ダークマターが空間的に集積する領域に銀河が形成されていることを観測的に確認した結果である。

さらに、すばる HSC の国際共同研究チームは、重力レンズ効果の精密測定と Λ CDM 理論モデルを定量的に比較することにより、宇宙論パラメータを測定した(図 3, Hikage et al. PASJ 71, 2019, 引用数 123)。

重力レンズ効果は微弱な信号であるため、非常に注意深い、詳細な物理解析が必要になる。HSC チームは、重力レンズ効果の高精度測定の手法の開発、HSC データを再現する end-to-end シミュレーションデータを作成し、系統誤差のテスト・較正手法の開発、数値宇宙論データも用いた正確な理論モデルの構築、など基盤研究の整備を系統的に行った。特に、重力レンズ効果から宇宙論パラメータを測定する際に、得られた結果が他の宇宙論観測・実験の先行研究の結果と一致した途端に物理解析を止めてしまうなどの「確証バイアス」を最大限避けるために、素粒子実験、医学の分野で用いられているブラインド解析を導入した。具体的には、HSC 銀河形状カタログの疑似カタログを用意し、それも同時に物理解析する、また物理解析の際にも得られた宇宙論パラメータの値を見ない、また他の宇宙論データの結果と比較しない、などの約束事をチーム内で決め、徹底的に踏襲した。様々な系統誤差のテスト、物理解析手法の多角的な検証などを経て、ロバストな宇宙論パラメータの測定結果を得ることができ、その結果をコミュニティに報告することができた。

図 4 は、すばる HSC のデータから宇宙論パラメータを高い精度(68%CL の範囲で S_8 の約 4% の精度)で測定できたこと、また HSC の宇宙論パラメータが他の欧米の重力レンズ効果の測定結果と統計精度の範囲内で良く一致していることを示している。しかし、すばる HSC、他の欧州の S_8 の結果は、宇宙背景放射衛星 Planck の結果と一致しない、つまり 2σ 程度の矛盾を示すことを確認した。HSC、欧米の重力レンズサーベイは、全て異なる天域のデータ、また異なるチームが解析した結果であり、全て独立である。この矛盾は、同定されていないデータの系統誤差による可能性はあるが、物理的には Λ CDM 標準モデルの綻び、つまり新しい物理の兆候を見ている可能性がある。さらに、HSC 研究グループは、現宇宙の加速膨張を引き起こしているダークエネルギーの状態方程式パラメータを制限し、HSC データはインシュタインの宇宙定数と矛盾しないことを確認した。さらに宇宙が少なくとも今後 1400 億年は加速膨張しながら存続し続けることも結論づけられる。これらの結果は、現在進行中の HSC サーベイで得られる

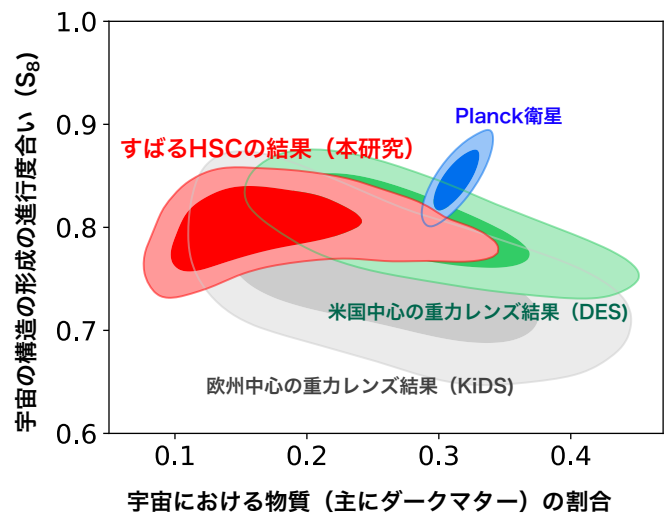


図 4: すばる HSC の重力レンズ効果の測定から得られた宇宙論パラメータの測定結果(Hikage et al. 2019)。現宇宙における物質(主にダークマター)のエネルギー密度の割合、宇宙の構造形成の進化の度合い(S_8)の結果を示す。赤の領域は、HSC の結果で 68%, 95%CL の領域。比較のため、宇宙背景放射衛星 Planck の結果、また欧米の重力レンズの結果を示す。

全データのたった約 10%のデータに基づいた結果であり、今後のさらなる進展が期待できる。

このように本領域の研究者が中心になり、日本が主導して進めているすばる HSC サーベイによる、日本発の精密宇宙論が実現した。この研究で多くの若手研究者が活躍し、確実に経験を積み、また世界最先端の研究成果の導出に貢献し、宇宙論の研究分野で日本の国際的な地位を確立したと言える。本領域の支援がなければ、実現し得なかった成果と言える。

以下、本領域の実験班の機器開発、基盤整備の成果を述べる（項目 9「経費の使用状況」も参照）。

B01「宇宙背景放射」 – 本領域の研究経費で、地上 CMB 実験 Simons Array (SA)の受信機をチリに移設し、試験観測に成功した。国際協力の相手側（米国）の研究遅延があったため、国際プロジェクトとしての全体目標には未達であるが、本計画研究の経費で担当するタスクは全て完了した。また、日本主導の次世代宇宙背景放射衛星計画 LiteBIRD の概念検討と基礎開発を行った。本領域の研究者らの地上 CMB 実験での実績、経験が評価され、LiteBIRD が宇宙科学研究所の次期戦略的中型 2 号機の計画に選定された。これは、本領域の支援、研究活動がなければ、実現し得なかった大きな進展と言える。

B02「次世代高速読み出し CMOS 撮像素子開発」 – 次世代の天文学、重力波宇宙論、多波長マルチメッセンジャー天文学などを見越し、さらなるすばる望遠鏡の性能向上を目指し、高速読み出し可能な CMOS 撮像素子の開発を目指した。本研究費の助成を受け、天体観測用大面積・低雑音・高速 CMOS の開発を浜松ホトニクスと共同で行った。従来の CCD とほぼ同寸法の 10000×2560 ピクセル(7.5 ミクロン角ピクセル)のプロトタイプの CMOS を作製することに成功した。今後試験観測を行い、性能評価を行う予定である。

B03「すばる次世代超広視野多天体分光器 PFS の光赤外線分光器の開発」 – すばる PFS は、HSC と組み合わせて、次世代のサーベイ天文学、観測的宇宙論を担う強力な装置である。この計画研究では、赤方偏移で 2.4 までの宇宙、つまり宇宙膨張が減速期から加速期に変遷する宇宙を見渡すことを可能にする PFS の赤外線分光器を開発することを目的とした。米国プリンストン大学、ジョンズ・ホプキンス大学と協力して赤外線分光器を製作した。特に、赤外線検出器としては、世界最高感度を達成し、また需要過多にある Teledyne 社の検出器 H4RG を購入でき、順調に作製・開発を進めることができた。2022 年からの PFS の科学運用を目指し、国際共同研究で進めている。

B04「30m 望遠鏡 TMT の超高分散分光器光コムの基礎開発」 – 宇宙の加速膨張の直接観測することを目指し、超高分散分光観測に必須な基礎技術、光周波数コム、の装置開発を行うことを目的とした。産業技術総合研究所研究者らと協力し、長期稼働に実績のある Er ファイバレーザを基に、精密粗調整可能な光共振器、可視光広帯域光発生法、およびレーザ・光共振器の自動安定化回復機構を新規開発することにより、最終的にモード間隔 30 GHz、可視光波長域の約 60%をカバーする世界で最も広い波長帯域の光コムの開発に成功した。今後試験観測等を通し、特に長期安定運用の実証実験を行う予定である。

D01「究極物理解析」 – 研究代表者小松英一郎、専任の博士研究員らは、各実験班(B01-B04)全てと共同研究を行った。特に、CMB、銀河サーベイ、TMT による宇宙膨張の直接観測のための物理解析手法、ソフトウェアを開発し、様々な相乗効果を生み出した。本科研費で開発したシミュレーションツール、ソフトウェアは、全て <https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/~komatsu/codes.html> で全世界に公開され、世界の他のグループにも使われている。

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和2年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

- (1) **主な査読論文:** 研究期間の5年間（2015—2019年度）に計800編（2020年6月時点）を超える査読論文を発表した。以下には、各計画研究、公募研究の主な論文を記載する。引用数については、ADSあるいはINSPIREから参照（2020年6月15日時点）。

研究代表者: 村山 齊

1. “**What does inflation say about dark energy given the swampland conjectures?**”, *C.-I. Chiang, J. M. Leedom, H. Murayama, et al., Phys. Rev. D 100, 043505-1-8 (2019) (査読有、引用数 25)
2. “**Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data**”, *C. Hikage, M. Oguri, et al. (including M. Takada, S. Miyazaki, H. Murayama, N. Sugiyama), Publ. Astron. Soc. Japan 71, 43 (1-44) (2019) (査読有、引用数 122)
3. “**Do We Live in the Swampland?**”, H. Murayama, *M. Yamazaki, T. T. Yanagida, JHEP 12, 032 (18pp) (2018) (査読有、引用数 78)
4. “**The Hyper Suprime-Cam SSP Survey: Overview and Survey Design**”, H. Aihara et al. (including N. Katayama, S. Miyazaki, H. Murayama, *M. Takada, N. Sugiyama) Publ. Astron. Soc. Japan 70 (SP1), S4 (1-15) (2018) (査読有、引用数 275)
5. “**First Data Release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program**”, H. Aihara et al. (including N. Katayama, S. Miyazaki, H. Murayama, *M. Takada, *M. Tanaka, N. Sugiyama), Publ. Astron. Soc. Japan 70 (SP1), S8 (1-34) (2018) (査読有、引用数 240)

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」（124 編中 5 編を記載）

1. “**Gravitational Waves Induced by non-Gaussian Scalar Perturbations**”, *R.-G. Cai, S. Pi, M. Sasaki, Phys. Rev. Lett. 122, 201101-1-8 (2019) (査読有、引用数 66)
2. “**Primordial black holes—perspectives in gravitational wave astronomy**”, M. Sasaki, *T. Suyama, T. Tanaka, S. Yokoyama, Class. Quant. Grav. 35, 063001 (76pp) (2018) (査読有、引用数 189)
3. “**Inflation in the mixed Higgs-R² model**”, M. He, A. Starobinsky, J. Yokoyama, JCAP 05, 064 (13pp) (2018) (査読有、引用数 41)
4. “**Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914**”, M. Sasaki, *T. Suyama, T. Tanaka, S. Yokoyama, Phys. Rev. Lett. 117, 061101-1-5 (2016) (査読有、引用数 345)
5. “**Generic instabilities of nonsingular cosmologies in Horndeski theory: A no-go theorem**”, *T. Kobayashi, Phys. Rev. D 94, 043511-1-6 (2016) (査読有、引用数 82)

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」（116 編中 6 編を記載）

1. “**Relic abundance of dark photon dark matter**”, P. Agrawal, *N. Kitajima, M. Reece, T. Sekiguchi, F. Takahashi, Phys. Lett. B 801, 135136 (10pp) (2020) (査読有、引用数 50)
2. “**Eternal Inflation and Swampland Conjectures**”, H. Matsui, F. Takahashi, Phys. Rev. D 99, 023533-1-6 (2019) (査読有、引用数 58)
3. “**QCD axion window and low-scale inflation**”, F. Takahashi, *W. Yin, A. H. Guth, Phys. Rev. D 98 015042-1-9 (2018) (査読有、引用数 48)
4. “**Double inflation as a single origin of primordial black holes for all dark matter and LIGO observations**”, *K. Inomata, M. Kawasaki, K. Mukaida and T. T. Yanagida, Phys. Rev. D 97, 043514-1-11 (2018) (査読有、引用数 53)
5. “**Primordial black hole abundance from random Gaussian curvature perturbations and a local density threshold**”, *C. M. Yoo, T. Harada, J. Garriga and K. Kohri, PTEP 2018, no.12, 123E01 (2018) (査読有、引用数 55)

6. **“The QCD Axion from Aligned Axions and Diphoton Excess”**, T. Higaki, *K. S. Jeong, N. Kitajima, F. Takahashi, Phys. Lett. B 755, 13-16 (2016) (査読有、引用数 168)

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」(60 編中 6 編を記載)

1. **“Scalar-field dark energy nonminimally and kinetically coupled to dark matter”**. *Ryotaro Kase and Shinji Tsujikawa. Phys. Rev. D 101, 063511-1-22 (2020) (査読有、引用数 10)
2. **“Holographic inflation”**. *S. Nojiri, S. D. Odintsov, E. N. Saridakis. Phys. Lett. B 797, 134829 (2019) (査読有、引用数 23)
3. **“Dark energy in Horndeski theories after GW170817: A review”**, *R. Kase, S. Tsujikawa, Int. J. Mod. Phys. D28, 05, 1942005 (78pp) (査読有、引用数 61)
4. **“Updated observational constraints on quintessence dark energy models”**, *J.-B. Durrive, J. Ooba, K. Ichiki, N. Sugiyama, Phys. Rev. D97, 043503-1-9 (査読有、引用数 18)
5. **“Planck 2015 Constraints on the Non-flat Λ CDM Inflation Model”**. *J. Ooba, B. Ratra, N. Sugiyama. ApJ, 869: 34 (8pp) (2018) (査読有、引用数 30)
6. **“Cosmology in generalized Proca theories”**, *A. De Felice, L. Heisenberg, R. Kase, S. Mukohyama, S. Tsujikawa, et al., JCAP 06, 048 (32pp) (2016) (査読有、引用数 104)

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」(55 編中 6 編を記載)

1. **“Updated Design of the CMB Polarization Experiment Satellite LiteBIRD”**, *H. Sugai et al. (including M. Hasegawa, M. Hazumi, H. Ishino, N. Katayama, K. Mitsuda, Y. Sekimoto), J. Low Temp. Phys. 199, 1107-1117 (2020) (査読有、引用数 9)
2. **“LiteBIRD: A Satellite for the Studies of B-Mode Polarization and Inflation from Cosmic Background Radiation Detection”**, *M. Hazumi et al. (including M. Hasegawa, H. Ishino, N. Katayama, K. Mitsuda, Y. Sekimoto), J. Low. Temp. Phys. 194, 443-452 (2019) (査読有、引用数 49)
3. **“The LiteBIRD Satellite Mission: Sub-Kelvin Instrument”**, *A. Suzuki et al. (including M. Hasegawa, M. Hazumi, K. Ichiki, N. Katayama, K. Kohri, T. Matsumura, O. Tajima), J. Low. Temp. Phys. 193, 1048-1056 (2018) (査読有、引用数 60)
4. **“A Measurement of the Cosmic Microwave Background B-mode Polarization Power Spectrum at Subdegree Scales from Two Years of POLARBEAR Data”**, The POLARBEAR Collaboration, P. A. R. Ade et al. (including M. Hasegawa, M. Hazumi, N. Katayama, T. Matsumura), ApJ 848, 121 (15pp) (2017) (査読有、引用数 55)
5. **“Testing statistics of the CMB B -mode polarization toward unambiguously establishing quantum fluctuation of the vacuum”**, *M. Shiraishi et al. (including M. Hazumi), Phys. Rev. D 94, 043506-1-17 (2016) (査読有、引用数 22)
6. **“Development of readout electronics for POLARBEAR-2 Cosmic Microwave Background experiment”**, *A. Suzuki et al. (including M. Hasegawa, M. Hazumi, N. Katayama), J. Low. Temp. Phys. 184, 805-810 (2016) (査読有、引用数 89)

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」(33 編中 6 編を記載)

1. **“Cosmological constraints from cosmic shear two-point correlation functions with HSC survey first-year data”**, *T. Hamana et al. (including S. Miyazaki, M. Takada, H. Murayama), Publ. Astron. Soc. Japan 72, 16 (32 pages) (2020) (査読有、引用数 26)
2. **“Two- and three-dimensional wide-field weak lensing mass maps from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S16A data”**, Publ. Astron. Soc. Japan 70 (SP1), S26 (14pp) (2018) (査読有、引用数 25)
3. **“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. (including M. Takada, S. Miyazaki, M. Tanaka, Y. Komiyama), Publ. Astron. Soc. Japan 70 (SP1), S20 (19pp) (2018) (査読有、引用数 62)

4. **“The Hyper Suprime-Cam software pipeline”**, *J. Bosch et al. (including H. Furusawa, M. Tanaka, S. Miyazaki), Publ. Astron. Soc. Japan 70 (SP1), S5 (40pp) (2018) (査読有、引用数 155)
5. **“Hyper Suprime-Cam: System design and verification of image quality”**, *S. Miyazaki et al. (including Y. Komiyama, S. Kawanomoto, H. Furusawa, T. Hamana, H. Murayama, M. Oguri, N. Sugiyama, M. Takada, M. Tanaka), Publ. Astron. Soc. Japan 70 (SP1), S1 (26pp) (2018) (査読有、引用数 144)
6. **“Kilonova from post-merger ejecta as an optical and near-Infrared counterpart of GW170817”**, M. Tanaka et al. (including H. Furusawa), Publ. Astron. Soc. Japan 69, 102 (7pp) (2017) (査読有、引用数 129)

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」 (69 編中 6 編を記載)

1. **“Dark Quest. I. Fast and Accurate Emulation of Halo Clustering Statistics and Its Application to Galaxy Clustering”**, *T. Nishimichi, M. Takada, et al, ApJ, 884, 29-1-47 (2019) (査読有、引用数 32)
2. **“Constraints on Earth-mass primordial black holes from OGLE 5-year microlensing events”**, *H. Niikura, M. Takada, et al., Phys. Rev. D, 99, 083503-1-18 (2019) (査読有、引用数 52)
3. **“Microlensing constraints on primordial black holes with Subaru/HSC Andromeda observations”**, *H. Niikura, M. Takada, et al., Nature Astron., 3, 524-534 (2019) (査読有、引用数 204)
4. **“Evidence of Halo Assembly Bias in Massive Clusters”**, *H. Miyatake et al. (including M. Takada), Phys. Rev. Lett. 116, 041301-1-5 (2016) (査読有、引用数 68)
5. **“Detection of the Splashback Radius and Halo Assembly Bias of Massive Galaxy Clusters”**, *S. More, H. Miyatake, M. Takada, et al. (including M. Oguri), MNRAS, 825, 39 (2016) (査読有、引用数 85)
6. **“The Weak Lensing Signal and the Clustering of BOSS Galaxies. II. Astrophysical and Cosmological Constraints”**, *S. More et al. (including M. Takada), ApJ 806, 2 (17pp) (2015) (査読有、引用数 97)

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」 (25 編中 6 編を記載)

1. **“The effect of our local motion on the Sandage-Loeb test of the cosmic expansion”**, *T. Inoue, E. Komatsu, W. Aoki, T. Chiba, T. Misawa, T. Usuda, Publ. Astron. Soc. Japan, 72, L1 (2020) (査読有)
2. **“Space gravitational-wave antennas DECIGO and B-DECIGO”**, *S. Kawamura et al. (including T. Chiba), Int. J. Mod. Phys. D, 28, 1845001 (2019) (査読有、引用数 7)
3. **“Direct Measurement of Quasar Outflow Wind Acceleration”**, *T. Misawa, M. Eracleous, J. C. Charlton, N. Kashikawa, ApJ, 870, 68 (2019) (査読有、引用数 4)
4. **“Low-noise 750MHz spaced ytterbium fiber frequency combs”**, *Y. Ma et al. (including K. Minoshima), Optics Letters, 43, 4136-4139 (2018) (査読有、引用数 3)
5. **“Mode-filtering technique based on all-fiber-based external cavity for fiber-based optical frequency comb”**, *Y. Nakajima, A. Nishiyama, K. Minoshima, Optics Express, 28, 4656 (2018) (査読有、引用数 1)
6. **“Offset-free optical frequency comb self-referencing with an f-2f interferometer”**, *S. Okubo, A. Onae, K. Nakamura, T. Udem, H. Inaba, Optica, 5, 188-192 (2018) (査読有、引用数 2)

計画研究 C01 「究極理論からの加速宇宙の解明」 (49 編中 6 編を記載)

1. **“Constraints on Symmetries from Holography”**, *D. Harlow, H. Ooguri, Phys. Rev. Lett. 122, 191601-1-6 (2019) (査読有、引用数 44)
2. **“Distance and de Sitter Conjectures on the Swampland”**, *H. Ooguri, et al., Phys. Lett. B 788, 10, 180-184 (2019) (査読有、引用数 254)
3. **“De Sitter Space and the Swampland”**, *G. Obied, H. Ooguri, L. Spodyneiko, C. Vafa, e-Print:1806.08362 [hep-th] (引用数 413)
4. **“Non-supersymmetric AdS and the Swampland”**, H. Ooguri, C. Vafa, Adv. Theor. Math. Phys. 21, 1787-1801 (2017) (査読有、引用数 176)
5. **“Chiral primordial Chiral primordial gravitational waves from dilaton induced delayed chromonatural inflation”**, *I. Obata, J. Soda, Phys. Rev. D 93, 123502-1-21 (2016) (査読有、引用数 43)
6. **“Weak gravity conjecture in the AdS/CFT correspondence”**, *Y. Nakamura, Y. Nomura, Phys. Rev. D 92, 126006-1-9 (2015) (査読有、引用数 43)

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」(51 編中 5 編を記載)

1. “Mitigating the impact of fiber assignment on clustering measurements from deep galaxy redshift surveys”, *T. Sunayama et al. (including M. Takada, E. Komatsu), JCAP, 06, 057 (17pp) (2020) (査読有)
2. “New constraints on the mass bias of galaxy clusters from the power spectra of the thermal Sunyaev-Zeldovich effect and cosmic shear”, *R. Makiya, C. Hikage, E. Komatsu, Publ. Astron. Soc. Japan 72, 26 (8pp) (2020) (査読有、引用数 6)
3. “Reconstruction of primordial tensor power spectra from B-mode polarization of the cosmic microwave background”, *T. Hiramatsu, E. Komatsu, M. Hazumi, M. Sasaki, Phys. Rev. D 97, 123511-1-8 (2018) (査読有、引用数 9)
4. “Finding the chiral gravitational wave background of an axion-SU(2) inflationary model using CMB observations and laser interferometers”, *B. Thorne, T. Fujita, M. Hazumi, N. Katayama, E. Komatsu, M. Shiraishi, Phys. Rev. D 97, 043506-1-18 (2018) (査読有、引用数 38)
5. “Generating log-normal mock catalog of galaxies in redshift space”, *A. Agrawal, R. Makiya, C. T. Chiang, D. Jeong, S. Saito, E. Komatsu, JCAP, 10, 003 (35pp) (2017) (査読有、引用数 14)

公募研究のなかで特に「加速宇宙」領域の共同研究に基づく目覚ましい成果の論文(113 編中 3 編を記載)

1. “Evidence for the Cross-correlation between Cosmic Microwave Background Polarization Lensing from Polarbear and Cosmic Shear from Subaru Hyper Suprime-Cam”, T. Namikawa, *Y. Chinone, *H. Miyatake, et al. (including M. Oguri, N. Katayama, M. Hasegawa, M. Hazumi, S. Miyazaki, H. Murayama, O. Tajima, M. Takada, M. Tanaka), ApJ 882, 62 (12pp) (2019) (引用数 7)
2. “The first-year shear catalog of the Subaru Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program Survey”, *R. Mandelbaum, *H. Miyatake, et al. (including T. Hamana, M. Oguri, M. Takada, S. Miyazaki, R. Takahashi, Y. Komiyama, M. Tanaka), Publ. Astron. Soc. Japan 70 (SP1), S25 (43pp) (2018) (引用数 101)
3. “Dark matter annihilation and decay from non-spherical dark halos in galactic dwarf satellites”, *K. Hayashi, et al., MNRAS 461, 2914-2928 (2019) (引用数 53)

(2) 学会発表: 600 件を超える国内・国際学会招待講演のうち一部を掲載

1. “Dark matter candidates and strategies for future” (plenary talk), H. Murayama, 国際会議 “16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics”, Sep 2019, Toyama, Japan
2. “Scalaron as a heavy field and PBH formation” (plenary talk), M. Sasaki, 国際会議 “String Phenomenology 2018”, July 2018, Warsaw, Poland
3. “Axion and Inflation” (招待講演), F. Takahashi, “New Physics at the Low Energy Scales NEPLES-2019”, Sep 2019, KIAS, Seoul, South Korea
4. “New Physics from Measurements of CMB Polarization in Space” (招待講演), M. Hazumi, 国際会議 “String Theory and Cosmology Conference GRC”, June 2019, Castelldefels, Spain
5. 「原始ブラックホールダークマターと重力レンズ」(招待講演)、高田昌広、日本物理学会 2019 年秋季大会シンポジウム「原始ブラックホール」、2019 年 9 月、山形大学
6. “Thirty Meter Telescope (TMT)” (招待講演), T. Usuda, 国際会議 “Subaru Telescope 20th Anniversary Conference”, Nov 2019, Kona, HI, USA
7. “Bound on Mellin Amplitudes” (招待講演), H. Ooguri, 国際会議 Strings 2019, July 2019, Brussels, Belgium
8. “Non-Gaussian gravitational waves from inflation” (招待講演、基調講演), E. Komatsu, 国際会議 “COSMO-18”, Aug 2018, Daejeon, South Korea

(3) 書籍

1. 「宇宙の始まりに何が起きたのか」、杉山直、講談社、2020
2. 「宇宙マイクロ波背景放射」、小松英一郎、日本評論社、2019
3. 「素粒子論のランドスケープ 2」、大栗博司、数学書房、2018
4. 「宇宙背景放射 「ビッグバン以前」の痕跡を探る」、羽澄昌史、集英社、2015

(4) 主催シンポジウム: 主催、共催の研究会のうち 2 つを掲載

1. 国際会議 “Accelerating Universe in the Dark”, 京都大学基礎物理学研究所、March 4-8 2019, 150 名

を超える参加者（約 30 名が海外からの参加者）があった。

2. 国際会議“Cosmic Acceleration”, 東京大学カブリ IPMU、Feb 17-19 2020, 100 名を超える参加者があった（約 10 名が海外から参加者。コロナ禍の影響を受け、キャンセルがあった）

- (5) **報道発表:** 領域内で得られた成果は積極的にプレスリリース、あるいは報道等を通して発信している。以下はそのごく一部

1. 「東大・阪大・東北大など、ダークマターが原始ブラックホールではない可能性が高いことを観測的に解明」、日本経済新聞、https://www.nikkei.com/article/DGXLRS506730_S9A400C1000000/
2. 「宇宙、膨張し続けても・・・ 「あと 1 4 0 0 億年は終わらず」 東大など」、日本経済新聞、<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO35759420W8A920C1CR0000/>
3. “What Does It Mean That Quantum Gravity Has No Symmetry?”, 米国 Forbes 誌 2019 年 6 月 29 日（大栗博司の量子重力理論の対称性に関する定理の証明について）
<https://www.forbes.com/sites/startwithabang/2019/06/29/ask-ethan-what-does-it-mean-that-quantum-gravity-has-no-symmetry/#55e9fd1b3dab>

- (6) **アウトリーチ活動:** 積極的にアウトリーチ活動を行った。本領域の研究成果は海外でも多く取り上げられている。下はその一部を掲載する

1. 本領域の主催・共催で、2018 年度、2019 年度にかけて、東京大学、愛媛大学、弘前大学、広島大学、東北大学、熊本大学で一般講演会を行った。各講演会で幅広い年齢層、多くの参加者があった。
2. 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。その後、大好評につき何度も再放送されている。
3. NHK 総合番組「チコちゃんに叱られる！」に大栗博司が出演、2019 年 4 月 19 日、20 日「重力って何？」
4. 柏キャンパス一般公開一般公開 2019 講演会「9 次元からきた男とは何者か」2019 年 9 月 24 日 大栗博司（東京大学カブリ IPMU 大講義室 参加者定員約 140 名、同時ライブ配信有）同講演内容の“The Man from the Nine Dimensions”で、2017 年から米国、インド、ドイツ等海外でも講演し 1,000 名以上が参加。国内他でも同時配信視聴者を除き約 340 名が参加。大栗博司が科学監修を務めたこのプラネタリウム作品の世界総来場者数は、約 81,600 名。
5. 小松英一郎は、株式会社ライブと後藤光学との共同制作で、全天周映像番組（フルドーム映画）「HORIZON～宇宙の果てにあるもの」を監修し、出演もした。これは世界初の、宇宙マイクロ波背景放射を真正面から扱ったフルドーム映画である。日本語版と英語版を制作し、日本語版は 2017 年より、北は仙台、南は鹿児島まで国内数々のプラネタリウムや科学館で上映された。英語版は、海外で開催されたフルドーム映画のコンペに出展し、Best Movie Award (FullDome Festival Brno 2018)、Best Documentary (Minsk International Fulldome Festival 2018)、Excellent Technology Award (JAAP International Short-Film Festival 2018) などの賞を与えられた。また、香港やモンテリオールなど、日本国外での上映も始まっている。後藤光学によるホームページは
<https://www.goto.co.jp/planetarium/program/horizon-～宇宙の果てにあるもの/>

- (7) 受賞

1. 2019 年 計画研究 B03 の密接な共同研究者であるプリンストン大学 James Gunn 名誉教授が京都賞（基礎科学部門）を受賞
2. 2019 年 C01 研究代表者 大栗博司が紫綬褒章受章
3. 2019 年 3 月 B02 研究分担者 大栗真宗が日本天文学会 **林忠四郎賞**を受賞
4. 2017 年 12 月 D01 研究代表者 小松英一郎他が**基礎物理学ブレイクスルー賞**
5. 2017 年 領域代表者 村山斉が**独フンボルト研究賞**を受賞
6. 2016 年 3 月 B02 研究代表者 宮崎聡が日本天文学会 **林忠四郎賞**を受賞
7. 2016 年 領域代表者 村山斉他が**基礎物理学ブレイクスルー賞**を受賞

8 研究組織の連携体制

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

	A01 インフレーション	A02 揺らぎと構造	A03 ダークエネルギー	C01 究極理論	D01 究極物理解析
B01 CMB	<ul style="list-style-type: none"> 原始重力波 SA 装置完成 LiteBIRD採択 	<ul style="list-style-type: none"> PBH (CMB τ) アクション 	<ul style="list-style-type: none"> 修正重力のGW 制限 Swampland H_0 tension/曲率 	<ul style="list-style-type: none"> Swampland インフレーション模型 アクション 宇宙の曲率 	<ul style="list-style-type: none"> 原始重力波によるCMB B-modeの検出可能性のUI
B02 すばるイメージング	<ul style="list-style-type: none"> PBH模型・制限 HSCによるΛCDMモデルの検証 CMB宇宙との矛盾 	<ul style="list-style-type: none"> 3次元DMマップ 重力レンズDMの総量 PBH DMのHSC制限 	<ul style="list-style-type: none"> HSC重力レンズのDE状態方程式の制限 宇宙寿命の下限 	<ul style="list-style-type: none"> Swampland DEの時間進化の予言 	<ul style="list-style-type: none"> 疑似HSC重力レンズマップ作成 lognormal解析ツール
B03 銀河分光	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙の曲率 原始揺らぎ制限の手法開発 	<ul style="list-style-type: none"> 矮小銀河のDM分布 銀河の固有運動 ニュートリノ質量 	<ul style="list-style-type: none"> BAO PFS開発 修正重力の検証 	<ul style="list-style-type: none"> Swampland 宇宙の曲率 DEの時間進化の予言 	<ul style="list-style-type: none"> 疑似PFS銀河マップ作成 PFS宇宙論検討 lognormal解析ツール
B04 TMT	<ul style="list-style-type: none"> PBHマイクロレンズのフォローアップ 	<ul style="list-style-type: none"> 矮小銀河、星ストリームの詳細分光 強重力レンズ天体の分光 	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙の加速膨張の直接検出 自然定数の時間変化 光コムの基礎開発 	<ul style="list-style-type: none"> Swampland DEの時間進化の予言 	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙膨張の直接検出への地球の運動の影響 Feasibility study
公募研究	<ul style="list-style-type: none"> アクション、高次スピン場による原始揺らぎ 	<ul style="list-style-type: none"> CMB PBとすばるHSCの重力レンズの相相関 矮小銀河のDM 	<ul style="list-style-type: none"> HSC宇宙論 HSC重力レンズの測定手法の開発 	<ul style="list-style-type: none"> Swampland 初期宇宙高次スピン場 	—

表 1: 各研究項目「理論班(A 班)」、「実験班(B 班)」、「究極理論(C01 班)」、「究極物理解析(D01 班)」公募研究間の接点のテーマで共同研究を行った。各接点での項目は主な成果を示す。赤字は主な研究成果を示す。

本領域「加速宇宙」は、研究項目「インフレーション」、「ダークマター」、「ダークエネルギー」のそれぞれに理論計画研究 (A 班) でその理論を研究し、また実験・観測の計画研究 (B 班) のそれぞれで実際の制限、成果の導出を目指した。また、横断的、網羅的にこれらの研究を展開するために「究極理論」(C01 班)、「究極物理解析班 (D01 班)」を配置した。表 1 では、理論班、究極班、実験・観測班、公募研究の各接点における研究成果の代表的なものを挙げる。異なる班、公募研究を跨がる共同研究について、少なくとも約 90 編の査読論文を発表した。

各計画研究班は、それぞれ各研究項目で研究成果を挙げたが、連携、共同研究によって実現した主な成果を挙げる。D01 班、A01 班、B01 班の研究者らが協力して、B01 班が推進する宇宙背景放射(CMB)の偏光の観測を想定し、どの程度の精度で原始重力波パワースペクトル (各波数での振幅) を再構築することができるかを調べた。さらに、CMB 実験の性能 (感度、角度分解能など) の関数として、原始重力波パワースペクトルの構築の精度を確認できるユーザーインターフェースを作成し、実験・観測のデザインに有効活用されている (項目 6「主な成果」参照)。究極理論班が提案したスワンプランド仮説についても、インフレーション、ダークエネルギーに関する様々な研究が展開された (項目 6 参照)。原始ブラックホール(PBH)の研究についても、その生成過程はインフレーション、また PBH はダークマター候補、さらに重力波対応天体の可能性もあるので、A01 班、A02 班、B01 班、B02 班、B03 班を跨ぎ広く共同研究、あるいは相乗効果により多くの研究成果が実現した (項目 6 参照)。最近では、A01 班、B03 班、大学院生らの共同研究で、超弦理論のマルチバース(multiverse)シナリオから動機付けされ、ダークマター、HSC 重力マイクロレンズ候補天体、LIGO 重力波対応天体、さらに銀河中心の巨大ブラックホールの種ブラックホールを統一的に説明でき得る PBH シナリオの共同研究が実現した (Kusenko, Sugiyama, Sasaki, et al., arXiv:2001.09160, Phys. Rev. Lett.投稿中)。また、すばる HSC サーベイで実現した精密宇宙論も多くの研究者を巻き込み、多くの研究成果が出た (項目 6 参照)。公募研究も各研究項目、計画研究に様々な連携、相乗効果をもたらした。例えば、B01 班、B02 班の観測・実験に関係する若手研究者がリードし、領域研究代表者、B01 班、B02 班、B03 班の研究者を巻き込み、宇宙背景放射 POLARBEAR と HSC イメージングデータの独立なデータを解析し、共通の宇宙構造からの重力レンズ効果の物理的相関を世界で初めて検出した (Namikawa et al., ApJ, 2019)。また、公募研究の研究者、A02 班、B03 班の研究者 (特に天文、素粒子、装置開発の研究者) らが協力して、矮小銀河におけるダークマター分布の理論研究、またすばる分光サーベイによる観測可能性の共同研究を行った (Hayashi et al., MNRAS, 2016)。このように、総括班のリードの下、様々な相乗効果、連携、共同研究が実現したと言える。

9 研究費の使用状況

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

総括班については、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、2018年度、2019年度には領域の研究成果が数多く出たので、各分野の著名研究者などを外国からも招聘し、国際研究会を開催した。総括班の経費は、その国際研究会の運営に執行した。領域代表研究者、および総括班の複数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た。

理論班（計画研究 A01-A03）、究極理論班（C01）および究極物理解析班（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、あるいは国際活動支援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た。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。計画研究 A03 班は研究費を繰り越しすることにした。これは令和2年3月に招聘を予定していた外国人研究者が、新型コロナウイルスの影響で招聘が延期になった。このため招聘の旅費を繰り越しすることにした。

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 班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使用した。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 宇宙科学研究所、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た。計画研究 B01 の経費で期間内に行うとした開発計画は全て完了できた(図1参照)。LiteBIRD 衛星計画では、本研究領域外の活動である国際調整も成功し、JAXA による計画の採択という結果が得られた。Simons Array プロジェクトについては国際協力の相手側（米国）の研究遅延があったため、国際プロジェクトとしての目標には未達であるが、試験観測データの取得に成功し、本計画研究の開発成果の論文発表を行うことができた。

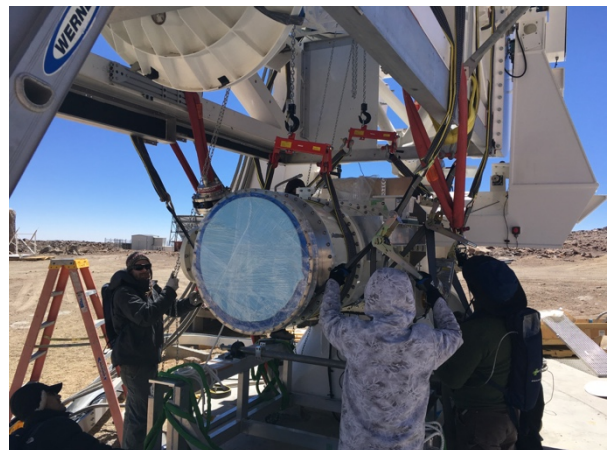


図1: チリ・アタカマ高地における、計画研究 B01 の経費で開発した Simons Array の受信機を CMB 専用望遠鏡に設置する作業風景。

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。重力波対応天体のフォローアップ観測など、すばる望遠鏡の時間軸天文学の開拓を目指して、高速読み出しを可能にする CMOS 検出器を開発

した。2560×10000 pixel (7.5 μ 角ピクセル)のプロトタイプを作製した。裏面照射型 CMOS プロトタイプは、当初すばる望遠鏡に搭載して試験観測を行う予定であったが、この間の様々な天災(火山性地震の多発、台風)のため、望遠鏡のスケジュールが過密化し、受け入れは実現しなかった。代替プランとして、広島大学の1.5m望遠鏡において、2019年9月、2020年2月の2回試験観測を行った。口径が小さいため新しい科学成果を出すまでには至らなかったが、感度、ノイズ等素子の基本性能が実地で確認できた。その後はコロナ禍の影響で、試験観測等の遅れが出ているが、状況が改善し次第、再開予定である。計画研究B02班の経費は繰り越しすることにした。これは令和2年3月に参加を予定していたドイツでの研究会“Mapping the X-ray Sky with SRG: First Results from eROSITA and ART-XC”がコロナの影響で中止になり、10月の開催に延期された。そのため、本計画研究代表者、共同研究者が参加するための旅費を繰り越しすることにした。

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、NASAジェット推進研究所)、台湾、中国、ドイツマックスプランク研究所、

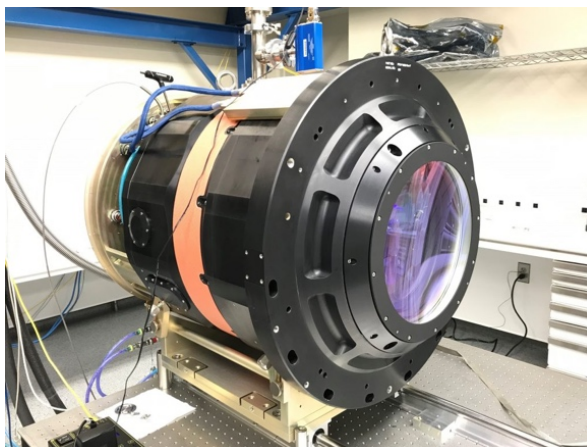


図2: 計画研究B03の経費で開発したすばるPFSの赤外線分光器一式(米国ジョンズホプキンス大学にて)

フランスマルセイユ天体物理研究所、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ESAの衛星計画EuclidやNASAの衛星計画WFIRST(最近Roman Space Telescopeに解明)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。

計画研究B04班は、光コムと組み合わせたTMTの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た。本領域の経費により、堅牢性に優れ、長期稼働に実績のあるErファイバレーザー、光位相変調器、波長変換光学素子等を調達し、精密粗調整可能な光共振器、可視広帯域光発生法、およびレーザー・光共振器の自動安定化回復機構を新規開発した。この結果、利用可能な波長範囲350-405, 456-540, 667-864nm、これは可視波長域の約60%をカバーし、世界最高の広帯域を持つ光コムシステムの開発に成功した。2019年7月には、この経費により光コムシステムを岡山に輸送し、国立天文台の岡山188cm望遠鏡の高分散分光器に搭載し、分光スペクトルの取得および長時間の稼働試験にも成功した。これらの開発・試験・観測に専任的に従事する博士研究員を雇用し、その人件費にも本経費を執行した。理論的検討においては、D01班との共同作業として、赤方偏移の時間変化の測定に付随する系統誤差に関して、銀河系による特異加速度の効果が支配的であるが、大マゼラン雲とM31の効果も赤方偏移の時間変化の測定においては無視できないことを明らかにした。研究打合せや研究発表の旅費に本経費を利用した。

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

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

本領域の提案は「②当該領域の各分野の発展・飛躍的な展開を目指すもの」を選択した。この目的は思った以上に達成したと考えている。

欧米で非常に活発で精密科学となった銀河俯瞰観測は日本ではほとんど行われていなかったが、本領域の成果としてすばる HSC の精密宇宙論の実現により、観測的宇宙論の最前線に並び、今後の PFS の実現により世界をリードする準備ができた。こうして宇宙論の研究について、日本の国際的な立場を確立した。同じく CMB の地上実験での機器開発の貢献、人材育成などを通じ、確実に経験を積み、それまで欧米が中心だった CMB 研究分野において、日本に CMB 研究の基盤を確立した。CMB B モード偏光の測定は、ノーベル賞級のサイエンスであり、世界からも注目されている。

本領域で今後の大規模実験・観測計画の準備が格段に進歩した。B01 班の CMB 実験では国際共同実験の Simons Array の日本負担分の装置を完成させたほか、本領域で準備を進めた LiteBIRD 計画が宇宙科学研究所の次期戦略的中型 2 号機の計画に選定された。本領域の CMB 研究、支援がなければ、実現し得なかった。B03 班ではすばる望遠鏡での超広視野多天体分光器 PFS の建設が進み、2022 年から観測が始まる。本領域の支援により赤外検出器を組み込むことができ、アメリカ中心の競合計画 DESI ではできないサイエンスが可能となる。また B04 班では 30m 望遠鏡で宇宙の加速膨張を直接観測するための周波数コムを使った超高波長分解能分光器の開発が完了した。これからは本領域に関わった研究者だけでなく、広くコミュニティで使われるものとなるため、当該学問分野への大きな貢献である。

すばる HSC 重力レンズの宇宙論パラメータの測定結果は、他の欧米の重力レンズの結果と同様に、CMB 衛星 Planck 衛星との矛盾を示している。また、期間中にハッブル定数 H_0 の値についても CMB の結果と近傍宇宙の天文観測の結果に矛盾が見られ、これらの結果は宇宙の標準模型の綻びを示唆している可能性がある。標準模型を超える新しい物理が発見されれば、加速膨張の物理に迫れる可能性もある。同じく本領域で理論的に提案され、観測的にヒントが見つかった原始ブラックホールは、ダークマターの候補として今後さらに注目される。もし追観測、実験でこれらの示唆が発見あるいは証拠として確立すればノーベル賞級の結果となる。このように、本領域の進展により、さらに加速宇宙の研究のさらなる発展が期待され、将来の観測、実験に道筋を与えた。

また本領域で特徴であった究極的なデータ解析のツールは公開され、本領域の研究者だけでなく広く使われており、今後の世界での研究での必須のツールとなっている。長期的なインパクトとなる。

本研究領域の成果は、関連学問分野に新しいコミュニティを生み出した。いままでバラバラであった観測的宇宙論、宇宙実験物理、超弦理論、素粒子理論、天文学、量子情報、統計数理、量子光学といった既存分野を超えた共同研究が多く生まれ、異分野間の協力が実現した。さらに他分野へ広がりのあるインパクトが生まれている。例えば C01 班の計画代表者大栗の本領域での研究は、スタンフォードやカリフォルニア工科大学の研究者による近似的量子誤り訂正符号の研究につながった。B04 班で開発した光コムシステムは世界最高の広帯域を達成し、量子光学分野で応用が期待される。

そして本領域での研究成果で若手研究者が多く就職できており、若手育成が非常に成功した。こうして生まれた新しいコミュニティと多くの若手研究者によって、この勢いは今後も継続していくのは間違いない。

11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和2年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

領域に携わる大学院生、若手研究者の育成に関して、特に以下の取り組みを行った。(1) 領域の研究テーマの普及・啓蒙、また新しいアイデアを歓迎するブレインストーミングのミニワークショップ・研究会を開催した。(2) 意識・意欲の高い若手研究者には、世界最先端の観測・実験データに基づく研究プロジェクト、あるいは国際プロジェクトをリードする機会が与えられ、実際に研究成果を挙げ、経験を積んだ。(3) 公募研究、人材交流を積極的に活用し、若手研究者のリードの下、異なる研究項目、研究計画を横断的に跨ぐ共同研究を促した。これらの取組の主な成果として、以下のものがある。領域の研究テーマで、多くの大学院生が修士号（約45件）、博士号（約40件）を取得した。例えば、すばるHSCの重力マイクロレンズ探査による原始ブラックホールの研究は東京大学の大学院生の博士論文の研究に基づいている。公募研究の研究代表者（若手研究者）が、宇宙背景放射POLARBEAR、すばるHSCの最先端の観測データを用い、国際共同研究を立ち上げ、研究成果を実現した。また、領域で雇用した博士研究員（若手研究者）が、本領域での研究の成果・業績が認められ、研究職に就いた。特に、複数の若手研究者が、国内の研究職だけではなく、米国、台湾、中国のテニュア・テニュアトラック助教授、准教授等の研究職に就いた。このように次世代の研究を担う、また国際的な人材を輩出することができたと言える。さらに、領域を超えて広くアナウンスし、大学院生、博士研究員を対象に、若手研究者育成のためのキャリアパス・セミナーを開催した。以上の理由により、若手研究者の育成が期待通りに進んだと言える。

12 総括班評価者による評価

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

これまで約20回の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。そのなか約12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）

評価者による評価・助言

本研究は、現代宇宙論最大の謎である宇宙の2つの加速機構（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。その特長は、理論および観測・実験の両面から系統的な研究を行うというものである。本来、物理学の研究は、理論または実験のみで十分な成果が得られるものではなく、二人三脚の相補的関係をもって遂行されることで大きな進展が得られる。本研究では、そのために研究対象を3つ（インフレーション、揺らぎと構造、ダークエネルギー）に分けそれぞれに理論班を配置し、計画した4つの観測・実験においてはそれぞれの対象に対応する成果目標を設定している。この際、従来の一つの研究テーマを対象とした観測・実験と理論の単なる連携とは異なり、本研究領域の各研究グループとしては、より広い2次元的な5行3列の行列構造を構築し、多角的かつ有機的な研究連携を行うことで、より広範囲で重要な研究成果が引き出せるように様に工夫されている。その成果は論文数などにも現れており、5年間で領域全体では750編を超える論文を発表し、また数多くの受賞者も出している。

研究成果に関しては、本研究遂行のため各分野の第一線で活躍している研究者を集めており、領域の研究業績としては非常にめざましいものがみられる。また多くの若手研究者を巻き込んだ研究を遂行することで、若手育成にも大きな貢献を行って来た。中間評価の段階では「新学術領域として考えたとき、領域の各研究グループの枠を超えた共同研究や新しい課題の創出が必要」と述べたが、その点は大きく改善され、グループ枠を超えた共同研究による重要な成果もかなり出ている。具体的には、原始ブラックホールの研究や究極理論から提案されたswampland仮説とインフレーションモデルの制限などは注目に値する。米LIGOチームによる重力波観測で明らかになったブラックホール連星の起源やインフレーションの検証可能性においては、本研究領域の理論班だけでなく実験・観測グループも大きな寄与をしている。

重力波観測により重力波の伝播速度がほぼ光速であることが明らかになり、従来考えられてきた修正重力理論による現在の加速膨張モデルは大きな制限を受けることになり、現在の宇宙の加速膨張の説明には新しい方向性や観点を導入することも必要となると思われるが、本研究領域ではその点までは言及されていないのが残念である。また、この研究領域の動機となった問い「なぜ宇宙は加速するのか？」に対する答えはまだほとんどわかっていない。一方で、swampland仮説は、暗黒エネルギーが宇宙項ではなくslow-roll的な振る舞いになる、すなわち、宇宙初期におけるインフレーションも現在の宇宙における加速膨張も、共に時間進化するもの（宇宙項ではあり得ない）との見通しを与えた。インフレーションが「終焉」し、ビッグバン宇宙が始まったように、現在の加速膨張も過渡的なものであり、減速膨張に転じるはずであるとの予言であり、理論的な研究にとどまらず、実験・観測に大きな目標を与えたものと位置

付けられる。このswampland仮説を提唱したこと、そして、この仮説に基づき、インフレーション模型が予言する原始重力波の振幅やダークエネルギーが時間進化する程度を評価し、CMBのBモード偏光や加速膨張の時間発展の検出可能性について、本研究領域の実験班が推進してきた諸計画（Simons ArrayやLiteBIRD計画、またHSCおよびPFSによる広天域イメージングサーベイ・分光サーベイ）を想定して踏み込んだ予測を行い、観測的検証の可能性を具体的に提示できたことは、この科研費での活動の大きな成果である。

実験グループ計画研究（B01~B04）においても当初の目標に沿って活動を進め、地上CMB実験であるSimons Arrayにおける日本分担である受信器の開発、スペースからのLiteBIRD計画における低周波望遠鏡の概念設計と計画検討、すばる望遠鏡HSCによる宇宙論サーベイ観測の主導的な推進、すばる望遠鏡PFS装置における赤外検出器システムの開発、CMOS検出器の開発、TMT望遠鏡で宇宙膨張を測定するための光Combの開発などで、当初目標とする機器の製作・試験を進めることができた点は評価される。すばる望遠鏡HSCによるサーベイ観測では、重力レンズ効果の精密測定と Λ CDM理論模型との比較を非常に注意深く行うことにより、高い精度で宇宙論パラメータの制限に成功した。特に、Planck衛星によるCMB観測からの制限と2シグマ程度の矛盾が存在することを示したことは、 Λ CDMという標準モデルに破れが存在し、新たな突破を示唆している可能性があり、国際的にも注目を集め重要な測定結果と評価されている。今後、HSCサーベイの進行により、さらなる精度の向上が期待されるが、本研究の結果は、現代的な精密宇宙論の分野で、日本の観測装置・日本の研究者を中心とする解析でベンチマークとなる成果のひとつと位置づけられるだろう。また、すばる望遠鏡HSCを使った重力マイクロレンズの探査から、太陽系小天体質量程度の原始ブラックホールの存在量に強い制限をつけた観測は、LIGO計画などによる重力波天体の検出とあいまって、学術的インパクトの高い成果として評価できる。これらの観測的成果は、C01やD01の理論・解析グループとの密接な協力によって進展しており、まさに本研究領域の果実として得られた成果と言えるだろう。

Simons Array、CMOS検出器、PFS赤外検出器、光Combの開発においては、装置開発の成果は達成したものの、実際に宇宙の観測によるデータの取得・検証までは達成するまでには到らなかった点は、指摘しておくべきである。しかしながら、国際協力の相手側の事情やすばる望遠鏡の運用における事情など外的な要因が複雑に絡み合う中で、Simons Arrayの巨大な超伝導検出器システムを完成させ、チリへ移設して試験観測の成功にまでこぎつけたこと、競合する他計画と比較して、より長波長側まで分光することを可能にするPFS赤外分光器の制作・開発が大きく進んだこと、また可視光波長域の約60%をカバーする世界で最も広い波長帯域の光Combを開発したこと、など、難しい装置開発で成果が得られたことは、十分に高く評価できる。

宇宙のインフレーションモデルの特性や暗黒エネルギーの性質の特性についての予言など理論的研究の進展、宇宙モデルと実験パラメータの相互関係を幅広くあつかう解析ツールの開発など、本新学術研究の交流の中で生まれた新たな知見や研究者層の広がり、相互交流は、これら観測機器の観測開始と共に研究が大きく発展するための準備段階を達成したと言うことはでき、その点は大きな成果と評価することはできるだろう。特に、我が国が主導する次世代のCMB観測衛星計画LiteBIRDが、宇宙科学研究所の次期戦略的中型2号機の計画に選定されたことは、B01の地上CMB実験での実績に加え、本研究領域での、こうした幅広い研究交流を通して得られた大きな進展の一つと言える。

以上のように、本研究領域は、日本主導のCMB観測や可視光近赤外線撮像分光サーベイ観測により、ますます謎の深まる加速膨張の物理の核心に、さらに迫って行くための大きな飛躍をもたらした。多くの若手研究者の育成の成功とあわせ、今後のさらなる発展に注目したい。