

領域略称名：宇宙創成の物理
領域番号：2110

平成26年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「背景放射で拓く宇宙創成の物理
—インフレーションからダークエイジまで—

(領域設定期間)

平成21年度～平成25年度

平成26年 6月

領域代表者 (所属研究機関・部局(学部等)・職・氏名)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (KEK)・
素粒子原子核研究所・教授・羽澄昌史

目 次

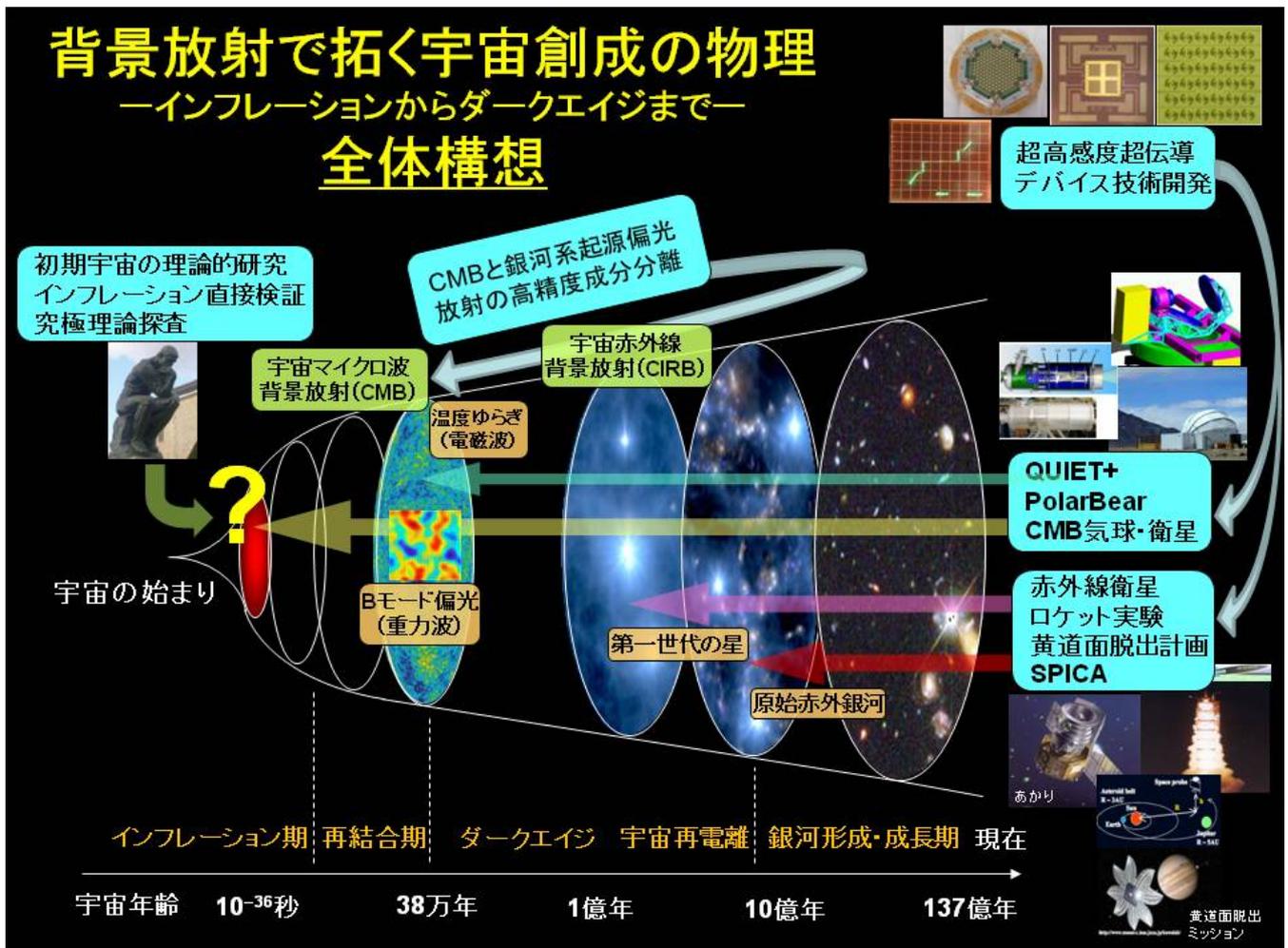
1. 研究領域の目的及び概要	p.3
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	p.5
3. 研究領域の設定目的の達成度	p.7
4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	p.11
5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	p.12
6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用，研究費の効果的使用を含む）	p.13
7. 総括班評価者による評価	p.14
8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	p.16
9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧，ホームページ，公開発表等）	p.20
10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	p.26

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ程度）

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、これ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。

【研究領域の目的】

宇宙はどのように始まったのだろうか？ どのような法則が宇宙を創り、進化させたのだろうか？これらの問いは人類に課せられた最大の知的挑戦である。本研究領域は、わが国の宇宙・素粒子・天文・超伝導デバイス関連の実験および理論研究者がこれまでに例のない規模の共同研究を立ち上げ、新学術領域を創成してこれらの問いに挑戦するものである。特にインフレーションからダークエイジまでの探究に最適とされるマイクロ波から赤外線にわたる宇宙背景放射に着目し、最新の観測手段と理論的手段を駆使してこれを精査することにより、「ビッグバンの前」から最初の星が輝くまでの宇宙創成の真の姿を明らかにすることを目的とする。さらに観測結果を究極理論（超弦理論など）の予言と比較することにより、地上実験では到達できない超高エネルギーの物理を探ることが本領域の最終目標である。



【研究の学術的背景】

宇宙は様々な波長の電磁波で満たされているが、その中で特に宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background, 以下 CMB と略す)は、晴れ上がり時点(誕生後 38 万年)の宇宙の姿を直接伝える最古のメッセンジャーである。CMB 温度観測衛星 COBE や WMAP による CMB 温度の精密観測は熱いビッグバンモデルの確立、宇宙の曲率や物質組成の決定、インフレーションモデルの予言の間接的な確認などめざましい成果を次々と上げ、宇宙論を精密科学へと発展させた。しかし、晴れ上がり以前の宇宙は光に対し完全に不透明で、CMB の温度観測でそれより過去の宇宙を直接見ることはできない。このため、CMB の温度観測から超高エネルギー状態の初期宇宙について確実な情報を得ることは不可能に見える。例えば WMAP の観測はインフレーションのモデルにある程度の制限を課すことに成功したが、インフレーションがいつ終わったかさえ決定できなかった。

【研究の構想と概要】

Bモード偏光観測 ―世界で高まる「世紀の発見」への期待―

本研究領域では、CMBの偏光成分に着目することによりこの限界を打ち破り、インフレーション期(前頁図参照)を直接観測して地上実験では到達できない超高エネルギーの物理を探る。その鍵となるのは、CMBの偏光Bモード測定である。インフレーションは量子ゆらぎを起源として、密度ゆらぎとともに原始重力波を生成する。この原始重力波は物質の影響をほとんど受けずに現在まで残り、我々に宇宙誕生時を直接見通す目を提供してくれる。原始重力波は微弱で直接検出は不可能だが、CMBの偏光空間分布に渦状の痕跡(電磁気学における磁場との対比から「Bモード」と称す)を残す(右図)。多くのインフレーションモデルでこの成分が検出可能と予言されている。Bモードの視野角ごとのパワースペクトルの発見・決定は、原始重力波の発見となり、種々の微視的理論に基づくインフレーションモデルの選別、ひいては超弦理論など背後にある究極理論の候補の直接検証を可能とする。

ただし、この偏光成分は非常に微弱で、十分な精度で検出し物理と結びつけるには、新たな検出器とデータ処理システムの開発、シグナル分離のための天文観測・理論研究、宇宙創成の理論的研究、そして、観測を行う専用衛星の開発が必要である。諸外国の競合プロジェクトに先んじて、これらを10年間で遂行することが長期構想であるが、今回の領域提案ではその第1フェーズとして、地上観測を推進しつつ、関連する諸課題を5年間で解決する。

本領域におけるダークエイジ研究の必要性

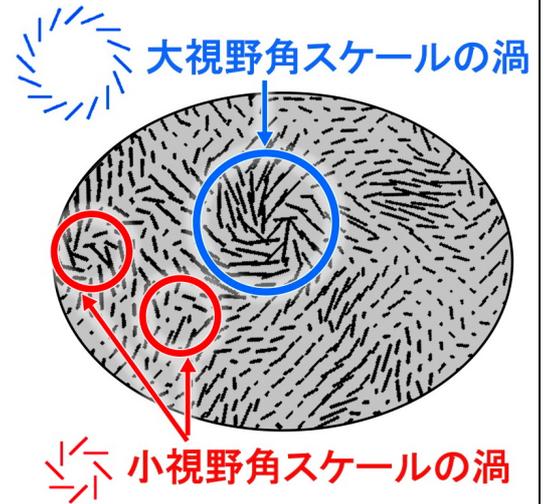
インフレーションの密度揺らぎは如何にして星や銀河へと進化したか?その解明には宇宙誕生後1億年頃の「暗黒時代(ダークエイジ)」の観測が重要である。本領域ではダークエイジの天体をひとまとめに宇宙赤外線背景放射(Cosmic Infra-Red Background, 以下CIRBと略す)として観測するというユニークな方法で、このインフレーションと密接に関連した天文学の重要課題に取り組む。赤外線天文学の手法はCMB観測と多くの共通点を持つため、インフレーションからダークエイジを領域の対象とすることにより、我が国における技術力、ノウハウ、経験を結集でき、大きな相乗効果が得られる。

【研究期間内の到達目標】(2008年12月提出の領域計画書に記載した内容)

- 地上実験(QUIET, POLARBEAR)を推進しWMAPの10倍の感度でBモード偏光成分測定を行い、重力レンズによるBモードを確実に発見し、原始重力波の探索を行う。
- 10年後に世界に先駆けてWMAPの100倍の感度で全天にわたる決定的なCMB偏光観測をおこなう科学衛星を打ち上げるための基本設計を学際的な視点で推進する。
- CMB衛星用1000素子超伝導カメラの開発、CIRB研究のための検出器開発を推進する。
- CIRBの観測等によりダークエイジの初代天体の研究を推進する。
- これまでより一桁以上高い精度でCMBと前景放射成分の成分分離スキームを構築する。
- 偏光Bモードの振幅とインフレーションモデルの対応を理論的に精査し、Bモード振幅の値を含めて、究極理論選別のために必要とされる観測情報を定量的に算出する。

【本領域の発展がどのような学術水準の向上・強化につながるか】

CMB偏光Bモード測定は、加速器実験では到達できない超高エネルギーの物理を探る最良の手段であり、従来のCMB温度・ゆらぎの測定を超えて、宇宙誕生および背後の究極理論に関する人類の知見を飛躍的に高めることが確実視される。これまで日本はCMB観測実験で欧米の後塵を拝していたが、偏光Bモード観測では従来とは比較にならない高度の新規測定技術が必要であり、我が国の叡智と技術力を結集することにより、一挙に世界をリードするレベルに到達することが可能である。本領域を強力に推進することは、我が国の宇宙論研究が、諸外国の実験・観測結果に基づいて理論を発展させるレベルから、実験・観測・理論の全てにおいて世界をリードする水準に達することにつながる。



偏光のBモード成分の概念図

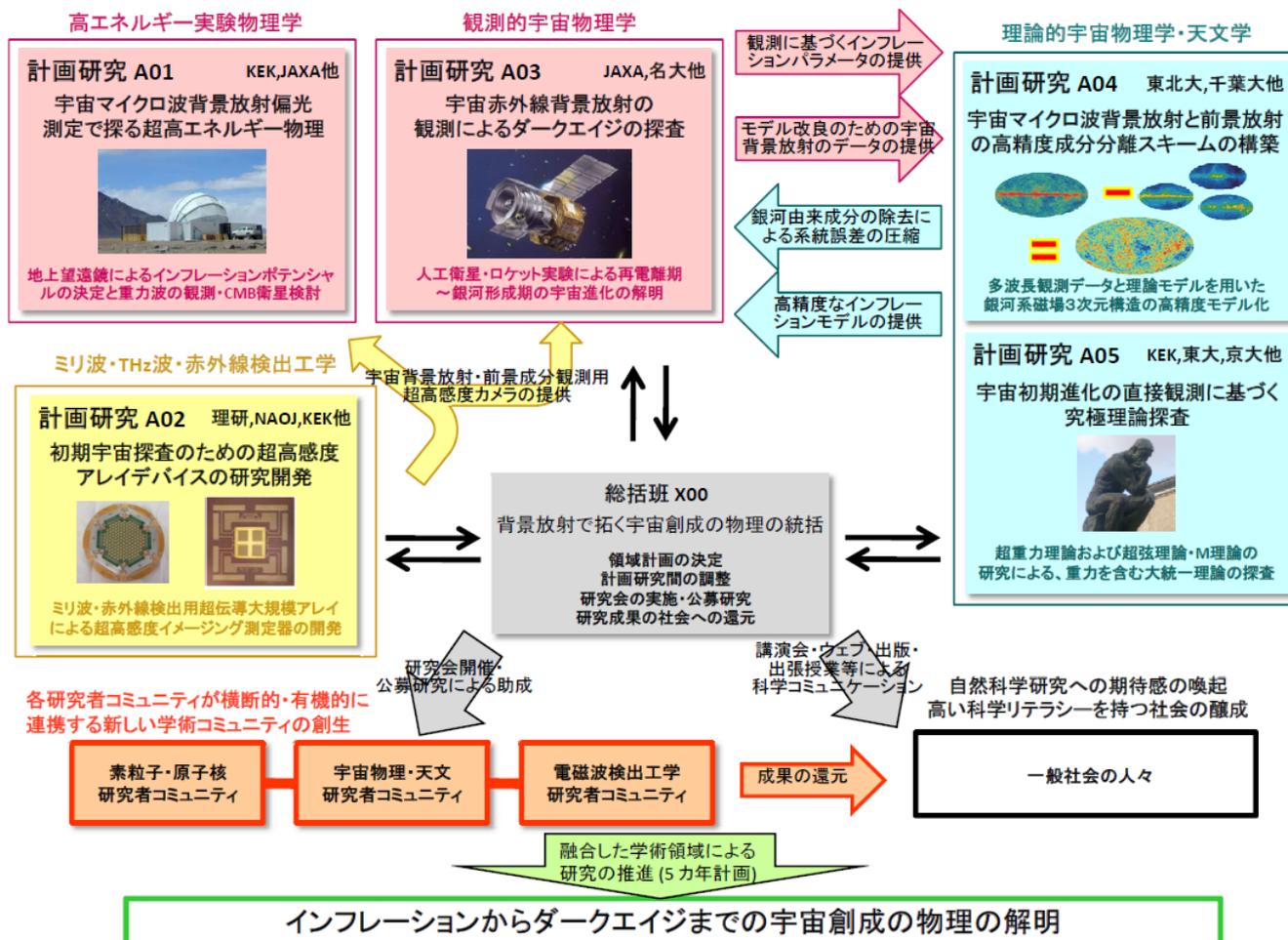
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2ページ程度）

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、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

【研究組織の概要】

本学術領域は、電波から赤外領域にわたる宇宙観測実験、理論宇宙物理学・天文学、素粒子論、超伝導デバイスという幅広い分野の研究者が連携することにより、宇宙進化とその背後にある理論の解明という人類の課題において、世界をリードする成果を上げることを目指すものである。この目的を達するためには、基礎となる要素研究とその達成課題を明確にしたうえで、各要素研究項目において世界最先端の成果を上げ、さらにそれらの成果を有機的に統合する必要がある。

本学術領域では、この要素研究を行うために、5つの計画研究を設定した（下図参照）。また、公募研究をこれらの計画研究でカバーできない問題の研究・解決や新たなアイデアの導入のために活用した。次に、これら計画研究・公募研究の相互連携および進展状況に応じた研究方向の調整を行い、最終的な成果の統合を行うための基盤組織として総括班を設けた。さらに、次世代の研究において中核を担う広い視野を持った若手研究者の育成のため、独立した若手の会を組織し、自主的に異分野の若手の相互交流・理解を図るよう促した。



【計画研究】

まず、計画研究 A01 と A03 は、それぞれ電波領域での地上 CMB 観測およびロケットによる赤外線背景放射観測により、インフレーションおよびダークエイジについての世界最高精度観測を行った。計画研究 A01 では、領域代表者（羽澄）が率いる高エネルギー加速器研究機構（以下 KEK と記載）のチームが中心となり、先行していた米国 2 つの実験グループ QUIET および POLARBEAR と連携し、最終的にはこれらの実験を主導するまでに至った。特に POLARBEAR で CMB 偏光のみを用いて世界ではじめて重力レンズ効果の観測に成功したこと、アップグレード計画 POLARBEAR-2 を本領域代表者が国際共同実験代表として率いるに至ったことは特筆されるべきであり、我が国の CMB 観測への貢献を広く世界に知らしめた。計画研究 A03 では、赤外線ロケット観測実験で実績のある松浦を中心とする宇宙航空研究開発機構（以下 JAXA と記載）のチームが、NASA を含む国際プロジェクトチームと協力し、これまで強度が未確定で

あった波長帯 ($1\mu\text{m}$ 近傍) における宇宙赤外線背景放射の測定に成功し、銀河系外に起源をもつ未知なる放射成分の発見に導いた。さらに、これらの成功を背景として、KEK と JAXA の密接な連携が生まれ、世界初の CMB B モード専用観測衛星 LiteBIRD の実現に向けた新たな組織作りに至った。

次に、計画研究 A02 は、A01 と共同で、衛星観測の前哨となる地上実験計画 GroundBIRD、衛星実験計画 LiteBIRD などの CMB 実験および次期赤外線観測実験で必要となる高感度超低温検出器の開発を理研、国立天文台、KEK、岡山大の 4 機関が連携することにより行った。デバイスの開発は、それぞれ電波観測および赤外線観測で実績のある大谷を中心とする理化学研究所チームと関本を中心とする国立天文台チームが担当し、装置部分の開発は田島を中心とする KEK チームが行った。これらチーム間の情報交換、問題点の共有・解決は、総括班戦略会議および毎年開催した領域シンポジウムを利用して行った。

計画研究 A04 は、A03 および関連する赤外線観測データに基づいて、A01 の観測から CMB ゆらぎについてのシグナルを分離するための天文的な理論研究を中心課題とした。この問題について豊かな研究経験をもつ服部の率いる東北大チームが中心となり、A01 および A03 と密接に連携して研究を進めた。

最後に、計画研究 A05 は、計画研究 A01、A03 を含む最新の観測情報に基づいて、宇宙創成の物理を理論的に明らかにするという困難かつ重要な挑戦を担った。このため、国内の主要な宇宙論研究者が結集した多機関連合の研究組織を形成した。この多機関連携を有機的に行うため、総括班とは独立に A05 班で独自に年 4 回程度の戦略会議を開催し、相互の研究状況の確認・理解を行うと共に、観測関係の計画研究の目標を考慮した共通の達成課題の設定を行い、理論研究に明確な方向性を与えることに努めた。この努力は、最新の観測結果と整合的なインフレーション理論の構築、CMB B モードと 21cm 将来観測を用いたニュートリノ質量決定・階層性の解明 (計画研究 A01 との連携)、赤外線背景放射と γ 線天文学観測の矛盾をアクシオンにより解決する可能性の検討 (A03 と連携) などに結実し、大きな成果を上げた。

【総括班】

すでに述べた様に、総括班は、各研究計画の進捗状況を共有し研究方向に関する議論や助言を行うとともに、様々な分野の研究者による機能的な連携を促す仕組みを企画する機能として設置した。総括班では、これまで 20 回 (2009 年 9 月以降約 3 カ月に一度)、合計 150 時間を超える「領域戦略会議」を開催した。ここでは上述したものを含む多くの連携研究のアイデアが生まれ、会議が大変有効に機能した。連携を促すために毎年 1 回の領域シンポジウムを実施するとともに、世界中の宇宙背景放射研究の関係者が一同に会する国際会議 CMB2013 を国内で実施した。また、総括班では、領域全体のホームページ開設や「ゆらぎ」と名付けた領域の統一的テーマの広報誌作成、異分野の研究者が合同で行う一般講演会開催など、アウトリーチ活動でも中心的な役割を果たした。

【公募研究】

公募研究は、計画研究がカバーしない新たな切り口の研究を募ることにより、意外性のある成果の創出を目指した。また、領域の広がりや拡大のために活用した。公募にあたっては顕著な成果創出が期待できる比較的大きな実験予算枠を少数ながら設ける工夫をした。公募研究者に計画研究の会議や研究会に出席してもらうとともに、日常的に研究進捗について意見交換するなど、研究内容の自由度を尊重しつつ領域の目標との調和を確認しながら研究展開するように配慮した。

【研究機関・計画研究間の連携】

以上で触れた項目も含めて、研究機関・計画間の連携の成果を以下にまとめる (括弧内は連携を担った計画研究を示す)。

- 全計画研究の力を結集し、LiteBIRD 衛星計画の科学目標、仕様、デザインを決定 (全計画研究)
- LiteBIRD のプロトタイプとなる新プロジェクト GroundBIRD の提案と開発 (A01 と A02)
- STJ や MKIDs の赤外線応用という新しい動機に基づくシーズ志向の開発 (A02 と A03)
- あかり衛星データを用いた CMB 前景放射評価 (A03 と A04)
- CMB 前景放射高精度成分分離スキームの構築 (A01 と A04)
- 将来の電波観測によるニュートリノ質量と階層性の決定精度の決定、将来観測プロジェクト POLARBEAR-2、GroundBIRD の観測装置仕様へのフィードバック (A01 と A05)
- 赤外線背景放射観測と γ 線天文学観測の間の整合性問題をアクシオンにより解決する提案 (A03 と A05)

3. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記載してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目毎の状況も記述してください。

【要旨】 本研究では、マイクロ波から赤外線にわたる「宇宙背景放射」に着目し、新しい発想と技術の導入により、インフレーションからダークエイジに至る「宇宙創成の物理」という研究領域の水準を、先行研究を桁違いに上回る世界トップレベルへと一気に押し上げた。5つの計画研究と相補的な公募研究からなる多彩な共同研究により、観測・理論・技術開発の全てにおいて、世界をリードする真に新しい成果を上げることに成功した。特筆すべき例としては、CMB 偏光のみを用いて世界ではじめて重力レンズ効果の観測に成功したことが挙げられる。また、同じ効果を CMB と CIRB の相関解析により確認したことも、本領域らしい成果であった。原始重力波の探索においても世界トップレベルを達成した。物理学の究極理論探索においては、世界の常識を覆し、大きな原始重力波を生成するインフレーションモデルが四次元超重力理論に基づいて自然に生成されることを発見した。5つの計画研究の総力を結集し、CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD の基本設計を学際的な視点で推進した結果、LiteBIRD 計画は学術会議マスタープラン 2014 の重点大型研究計画(マスタープランの中で最重要と認定された 27 計画)の一つに選ばれた。この新領域の成功を象徴する出来事である。これを支えたのは、超伝導検出器アレイ技術開発の成功と、新しいアイデアに基づく前景放射分離法の発明であった。さらに、赤外背景放射観測ロケット CIBER の打ち上げに全て成功し、可視近赤外域の CIRB ゆらぎを世界で初めて発見するなど、大きな成果をあげた。これらの活動を通して、我が国で手薄であった宇宙創成を研究する実験物理学者の養成にも成功した。さらに、本研究が生んだ POLARBEAR-2 計画が平成 26 年度科学研究費補助金・基盤研究(S)に採択され、LiteBIRD 衛星計画が宇宙理学委員会の平成 26 年度戦略的開発研究経費を受けるなど、今後の布石もしっかり打つことができた。以上から、本研究領域の設定目的の達成度は非常に高く、期待以上の成果があったと結論する。

【研究期間内の達成度】

以下では、領域計画書（2008 年 12 月提出）に掲げ、本報告書「1. 研究領域の目的及び概要」で示した 6 つの到達目標のそれぞれについて、研究期間内の達成度合いに着目し、具体的に記載する。

【1】地上実験 (QUIET, POLARBEAR) を推進し WMAP の 10 倍の感度で B モード偏光成分測定を行い、重力レンズによる B モードを確実に発見し、原始重力波の探索を行う

検出器の雑音レベルとして、POLARBEAR が $23\mu\text{K}/\text{s}$ を達成した。WMAP 衛星の値は $390\mu\text{K}/\text{s}$ であり、比較すると $390/23=17$ 倍の感度であり、設定目標を達成できた。POLARBEAR 初年度のデータを用いた解析を完了し、三本の論文を発表した。そのうち二本はすでに Physical Review Letters に掲載され（項目 9 参照）、どちらも Editors' Suggestion（編集者が特に興味深いものとした論文で、掲載論文の約 10%程度のみが選ばれる）に選ばれた。これらの論文の成果のなかでは、特筆すべきこととして、世界ではじめて、CMB 偏光のみを用いて重力レンズ効果の観測に成功した（4.7 シグマの有意度）ことが挙げられる。原始重力波の探索についても、QUIET 実験のデータ解析結果を論文発表することができ、世界トップレベル（公表時点で世界第二位）の結果を出す事ができた。また、POLARBEAR 実験では、QUIET を大きく上回る感度で観測を実施することに成功しており、原始重力波に起因する偏光 B モードを高精度で測定する準備が完成したと言える。以上から、本到達目標は十分に達成されたと言える。

【2】10 年後に世界に先駆けて WMAP の 100 倍の感度で全天にわたる決定的な CMB 偏光観測をおこなう科学衛星を打ち上げるための基本設計を学際的な視点で推進する

代表的なインフレーションモデルの予言を全て検証することができる究極感度の衛星計画 LiteBIRD を提案した。宇宙理学委員会の承認を受けたワーキンググループが結成され、領域の総力をあげて基本設計を進めた。衛星のミッション要求の設定から概念設計の完成に至る一連の検討を、JAXA のシステムズ・エンジニアリング推進室、ミッション・デザイン・サポートグループ、衛星機器メーカーなどと共同で進め、実現性の高い概念設計へ発展させることに成功した。

研究者コミュニティでも、LiteBIRD 計画は高い評価を得た。電波天文学の研究者団体である「宇宙電波懇談会」では、高い優先度を持つ計画であることが合意された。素粒子物理を研究する実験物理学者の団

体である高エネルギー物理学研究者会議でも、「将来計画検討小委員会答申」（平成 24 年出版）において、LiteBIRD が目指すサイエンスは、「将来重要な研究分野に発展するポテンシャルを持っており、（加速器大型計画と）並行して推進していくことが必要」と位置づけられた。研究者コミュニティの後押しを背景に、日本学術会議の宇宙・天文分科会の推薦を受け、LiteBIRD 計画を日本学術会議が取りまとめる「第 22 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン」（マスタープラン 2014）へ提案した。2013 年 9 月に開催されたヒアリングを経て、マスタープラン 2014 への掲載が決定し、さらに重点大型研究計画（マスタープランの中で最重要と認定された 27 計画）の一つに選ばれた。これは新領域の成功を象徴する出来事である。これを支えたのは、上記の基本設計研究に加えて、超伝導検出器アレイ技術開発の成功と、新しいアイデアに基づく前景放射分離法の発明であった。以上から、本到達目標に関しては、想定以上の成果を上げることに成功したと言える。

【3】CMB 衛星用 1000 素子超伝導カメラの開発、CIRB 研究のための検出器開発を推進する

新たにマイクロ波力学インダクタンス検出器（MKIDs）の研究開発を進め、1 ユニットあたり 600 素子の超伝導カメラユニット（歩留まり 95%）を開発した。このアレイは 1 ユニットであり、これを 2 ユニット用意することで 1000 素子カメラが容易に達成可能となる実績を得た。また、デバイスに入射波を集光するための 720 素子 Si マイクロレンズアレイ、無反射コーティング、4000 チャンネル信号読み出しシステムも新規開発し、システム化のための技術開発も達成した。また、電気的雑音等価電力（electrical NEP） 6×10^{-18} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、偏光成分に対する実測の雑音等価温度（optical NET）として世界最高値となる 190 $\mu\text{K}/\text{sec}$ などを達成した。これら CMB 用検出器の開発と並行して、CIRB 用の 512 素子 MKIDs 検出器アレイの作製・評価も行った。さらに、汎用 FPGA を用いた読み出しシステムを開発・公開し、単に CMB・CIRB 観測のみならず、他分野への技術活用のための基盤技術も構築した。

【4】宇宙赤外線背景放射(CIRB)の観測等によりダークエイジの初代天体の研究を推進する

計画研究 A03 では、ロケット実験 CIBER の実施、および、あかり衛星を用いた観測により、CIRB のゆらぎと放射スペクトルの測定を行うことを主要な研究課題として設定した。また、後継実験である CIBER-2、惑星探査機による CIRB 観測（EXZIT/ソーラー電力セイル）、SPICA 衛星などの将来計画の推進も課題として設定した。

CIBER 実験では、4 回のロケット打上げにすべて成功し、予定どおり研究期間内に全実験を完了した。これにより、世界ではじめて波長 0.8~1.8 μm の可視・近赤外域において CIRB のゆらぎと放射スペクトルの測定に成功した。その結果、この波長帯において、CIRB はすべての系外銀河からの足し合わせに対するこれまでの推定値を大きく超える輝度を有することを発見した。これは、銀河系外起源の未知なる赤外線背景放射成分（超過成分）が存在することを意味する。さらに、CIBER とあかり衛星により、赤外線観測としては大角度スケール（10 分角以上）での CIRB ゆらぎをはじめ検出した。計画当初に予想した、初代天体の寄与による波長 1 μm 付近での急峻なスペクトルやゆらぎの増大は有為には検出されなかったが、初代天体に関する観測的制限がはじめて得られ、本計画は当初目標を達成したと言える。CIRB の輝度とゆらぎの超過成分に関して、ダークマター・ハローに付随する古い星々とする解釈が本研究の一環として生まれ、初代星による解釈と合わせて新たな研究課題が設定できた。

CIBER-2 は、CIBER の遅延や予想できない技術的困難により、目標であった打上げ実施には至らなかったが、日本担当である光学系の開発を着実に進め、重要な技術要素の試作と実証を終えることができた。また、EXZIT/ソーラー電力セイルの検討では、JAXA へのプロジェクト提案をする段階に至るとともに、SPICA による観測計画や装置検討により、将来の精密 CIRB 観測についての重要な布石を打つことができた。

【5】これまでより一桁以上高い精度で CMB と前景放射成分の成分分離スキームを構築する

二つの独立なアプローチを試した。一つ目は、テンプレート法と呼ばれる手法であり、前景放射の成分に関する物理学的知見によらず、正しい成分分離ができることが特長である。二つ目は、階層ベイズ法という手法であり、前景放射の物理学的知見を客観的な形で先験的確率として取り入れることにより、分離の精度を更に高めることが特長である。本研究では、いずれの方法でも、シミュレーションにより、これまでより一桁以上高い精度で CMB と前景放射成分を分離できることを示すことが出来た。

【6】偏光 B モードの振幅とインフレーションモデルの対応を理論的に精査し、B モード振幅の値を含めて、究極理論選別のために必要とされる観測情報を定量的に算出する

計画研究 A05 では、この当初目標を達成するため、1)可能な限り最も一般的なインフレーション模型の現象論的構築と観測情報の計算、2)従来の常識に基づく先入観を捨て、超重力統一理論の枠内で、大きな原始重力波を预言するインフレーション模型が構築可能か、3)現在の唯一の究極理論候補である超弦理論・M 理論に基づいて第 1 原理的に整合的なインフレーション宇宙模型を構築可能か、4)究極理論に特有の情報をもたらす観測量は存在するか、という 4 つの具体的課題を設定して研究を行った。以下のように、これらすべての課題で世界をリードする成果を上げることができた。

- 1) インフレーションを起こす場が 1 成分となる場合の最も一般的な理論(Horndeski 理論)に基づいてインフレーション模型を構築し、十分なインフレーションが安定的に起きる条件を決定すると共に、ゆらぎに関する様々な統計的観測量に対する公式を導き、観測に基づいてインフレーション理論を絞り込む際のフレームワークを構築した。さらに、それに基づいて、従来の観測と整合的で大きな B モードを预言する新たな理論が多数存在することを示した。[2013 年度日本物理学会論文賞, 2013 年度井上 学術賞]
- 2) 次世代 B モード観測で検出可能な強度の原始重力波を预言する多様な理論が超重力統一理論の枠内で構築可能であることを示し、この分野の常識を変えた。[第 5 回井上リサーチアワード] さらに、アクシオンの宇宙論的影響の組織的研究によりインフレーションの理論と素粒子理論の密接な関連を明らかにした。[Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.誌招待 review 論文]
- 3) IIB 型超弦理論の大余剰空間コンパクト化シナリオにより宇宙論と整合的な 4 次元有効理論を導き、アクシオン型モジュライの CMB への影響を通してそれらを区別できることを示した。[2013 年度素粒子メダル奨励賞]
- 4) 整合的非等方インフレーション理論を初めて構築し、その预言するゆらぎの統計的非等方性およびスカラゆらぎとテンソルゆらぎの相関を観測することにより、ゲージセクターにおける超弦理論コンパクト化について情報が得られることを示した。[Class. Qn. Gravity 誌 2011-2012 ハイライト論文および招待論文, Physics Report 誌招待 review 論文]

【研究領域の長期目標に照らした領域形成の達成度と今後への準備状況】

これまで我が国は CMB 偏光観測実験で欧米の後塵を拝していたが、偏光 B モード観測では従来とは比較にならない高度の新規測定技術が必要であり、欧米においても多くの新たな技術開発なしには先に進めない状況にあった。開発には高い基礎技術力が必要とされるため、我が国の叡智と高い技術力を結集することにより、一挙に世界をリードするレベルに到達することが可能な状況にあった。まさに「我が国の学術水準の向上・強化につながる新たな研究領域」を打ち立てるチャンスに、本新学術領域研究を開始することができたのである。

領域の長期目標は、CMB 偏光観測を行う専用衛星の開発を諸外国の競合プロジェクトに先んじて 10 年間で遂行することとし、そのための新たな検出器とデータ処理システムの開発、シグナル分離のための天文観測・理論研究、宇宙創成の理論的研究を展開していくことである。また、これらを日本主導で行うための人材育成も重要な目標である。

本新学術領域研究は、上記長期目標の第 1 フェーズとして、地上観測を推進しつつ、関連する諸課題を 5 年間で解決し、「宇宙背景放射」研究領域を我が国で確固たる存在とすることに成功した。我が国で手薄であった宇宙創成を研究する実験物理学者の養成にも成功した。新領域の形成と発展を示す好例として、まず 2009 年には、日本物理学会に宇宙物理領域・宇宙背景放射セッションが誕生したことが挙げられる。本新学術領域の誕生が契機となっており、当該領域が「新たな研究領域」であることを如実に物語っている。その翌年の 2010 年 6 月に国立天文台で開催された CMB ワークショップで 120 名を超える参加者があったことは、これまで CMB の実験・観測に関連する活動が日本で低調であったことを考慮すると画期的である。さらに、2013 年 6 月に沖縄科学技術大学で開催された CMB2013 国際ワークショップは、世界中のほぼ全ての CMB 観測プロジェクトから参加者を招く歴史的にも画期的な国際会議となり大きな成功を収めた。このような努力も助けとなり、本領域の活動を通じて日本の CMB 研究が世界に知れ渡ることになった。

領域の研究成果は、今後の発展につながった。計画研究 A01 では、領域代表が提案して POLARBEAR 検出器システムの増強計画 POLARBEAR-2 を開始し、領域代表自らが、国際共同実験 POLARBEAR-2 の代表を務めている。POLARBEAR の 6 倍の感度を持つシステムの基礎開発を本新学術領域研究の期間内に完成することができた。これは、当初の想定を超えた成果と言える。POLARBEAR-2 計画は、平成 26-30 年度の科学研究費補助金・基盤研究(S)に採択された。また、計画研究 A01 と A02 が共同で進めた GroundBIRD 計画が、平成 26-28 年度の科学研究費補助金・基盤研究(A)に採択された。更に LiteBIRD 計画は、宇宙

理学委員会より平成 26 年度の戦略的開発研究費を受けることが決定し、ミッション定義審査に向けた作業を加速させる予定である。

なお、本領域の研究が終了した 2014 年 3 月に、米国を中心とした BICEP2 実験が南極での観測により原始重力波に起因する CMB 偏光 B モード信号を発見したと発表した。これが他実験の検証をパスすれば、大発見となる。POLARBEAR 実験、およびそれに続く POLARBEAR-2 実験は、BICEP2 の結果の検証とそれを超えてインフレーション理論をより厳しく検証していく上で、絶好のチャンスを得たと言える。今後 5 年間の CMB 偏光観測をリード出来る可能性が高い。これは、本新学術領域の提案が真に時宜を得ていたことを示している。

以上から、我々は、宇宙背景放射を研究する新しい研究者コミュニティの形成に成功し、宇宙創成の物理において世界をリードする革新的成果を得ることを目指し、期待以上の大きな成果を上げたと結論する。

4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ程度）

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

【2011 年 3 月 11 日に起きた東日本大震災の被害と対応について】

震源に近い東北大学（研究計画 A04 の拠点）では、甚大な被害があった。一時研究は完全に停止したが、最終的には前景放射分離の研究について所定の成果を上げることができた。使用していた計算機室では、耐震処置を施していたにもかかわらず、計算クラスタが倒れ、破損した。東北大学内の加速度計の測定結果から 1000 ガル以上の激震であったと推定されている。この計算クラスタが作成を担った「あかり」遠赤外線域全天地図は、世界中の天文学にとって重要な財産となる結果であり、震災の影響で滞ることは回避する必要があった。他研究拠点との連携や復興対策の資金などにより、中間評価時点で認められた遅れを最終年度までには挽回した。

研究計画 A01 及び A02 の拠点である高エネルギー加速器研究機構（茨城県つくば市）でも大きな被害があったが、結果として当初の計画からの大幅な遅延も無く、成果発表することが出来た。使用している実験室の天井から空調ダクトが落下、天井の一部も破損し剥がれ落ちるといった被害があり、補修工事が完了した 7 月までのおよそ 5 ヶ月間実験室が使用停止となった。そのため、一時的に機器の一部を別の場所に移設して活動を継続した他、国外のコラボレータの協力を仰ぎ、QUIET-II 用エレクトロニクスの開発及びデータ収集系の開発の一部を海外の実験室にて進める事で計画の遅延を最小限に抑える努力をした。A01 の主要論文の内[8,9,10]はこの時期の研究活動にて得られた成果である。また、QUIET 実験のデータ解析に用いる計算サーバを置いている建家も回りの地盤の崩壊と空調の破損及び電力制限等の措置により使用計画の見直しを余儀なくされたが、使用ノード数を必要最低限に抑える事で運用停止を回避した。さらに解析コードの改善により可能な限りパフォーマンスの低下を抑える努力をした。結果として当初の計画からの大幅な遅延も無く、結果の公表を行うことができた。

計画研究 A02 の拠点である国立天文台（三鷹市）、理化学研究所（仙台市および和光市）の各施設で停電および計画停電のため、2011 年 3 月を中心として装置の運用に大きな制限が生じた。機器によっては急停止するだけで装置不良を誘発するため、立ち上げ後も修理等を余儀なくされた。若手を中心に各機関を横断する研究体制を強化し、最終年度には震災で生じた遅れを挽回した。

【海外研究協力者の死去】

計画研究 A01 「宇宙マイクロ波背景放射偏光測定で探る超高エネルギー物理」で推進した QUIET 実験の実験代表者であり本領域の研究協力者であるシカゴ大のブルース・ウィンシュタイン教授が 2011 年 2 月に死去した。このため、米国側で新しいリーダーシップを築くことが必要となり、QUIET 実験のデータ解析に関してはプリンストン大学のスザンヌ・スタッグス教授が、QUIET 実験アップグレード（QUIET-II）については、カリフォルニア工科大学のアンソニー・リードヘッド教授が米国側代表となった。データ解析については、計画研究 A01 の推進によりすでに強固な解析グループが確立していたため、遅延無く結果を発表する事ができた(A01 主要論文[7])。QUIET-II に関しては米国側での予算が承認されなかった為、本新学術領域では POLARBEAR 実験に多くのリソースを投入する決断をした。このリスクマネジメントが功を奏し、POLARBEAR での重力レンズ B モード発見へとつながった。

POLARBEAR 実験についても、プロジェクトマネージャーを務めたカリフォルニア大学バークレー校のファン・トラン博士が、2009 年 12 月に事故死するという悲劇に見舞われたが、上で述べた本領域の貢献によって、最終年度までに POLARBEAR から初期観測成果を出す事が出来た。さらに、POLARBEAR のアップグレードである POLARBEAR-2 を提案し、本領域研究代表者が、POLARBEAR-2 プロジェクト全体の代表者（PI）に就任することとなった。

【ロケット打ち上げスケジュールの変更】

計画研究 A03 「宇宙赤外線背景放射の観測によるダークエイジの探査」で、2011 年予定の第 3 回 CIBER 実験の打ち上げが NASA ロケットの改造や天候不順のため 9 ヶ月遅延した。以後の計画も遅延したが、CIBER 実験への人的リソースを集中投入してチーム一丸となり挽回した結果、最終（第 4 回）打ち上げを含む CIBER 計画を研究期間内に完了することができた。

5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ程度）

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

【若手研究者育成の取組】

本新学術領域では、各計画研究内での活発な活動に加えて、研究計画間の連携による相乗効果を生み出すために、以下の若手研究者育成の取り組みを行った。

1. 若手の会 (<http://www.ir.isas.jaxa.jp/~tsumura/uchu-sousei-young/ML.html>)

若手の交流と研究の活発化を目指し、若手主導の研究会を開催した。ポスドク・学生で構成され、シニアスタッフ立ち入り禁止としている画期的な研究会である。従来の考え方に縛られない、新しい研究アイデアをボトムアップで構築することも狙いとした。以下のように、計6回の研究会を各計画研究領域のポスドク・学生が世話人となって主催した。

- ・ 第1回新学術若手勉強会（2010年12月22日 東大本郷キャンパス 理学1号館206号室）
- ・ 第2回新学術若手勉強会（2011年3月8日 JAXA 宇宙科学研究本部(相模原) 新A棟1257会議室A）
- ・ 第3回新学術若手勉強会（2011年6月16日 国立天文台三鷹キャンパス）
- ・ 第4回新学術若手勉強会（2011年11月2日 高エネルギー加速器研究機構 つくばキャンパス）
- ・ 第5回新学術若手勉強会（2012年4月23日 高エネルギー加速器研究機構 つくばキャンパス）
- ・ 第6回新学術若手勉強会（2013年3月19日 東北大学 青葉山キャンパス 理科総合棟204室）

若手が前列を独占する独特の雰囲気の中で（右写真）、活発な議論と交流がはかれた。学生が異分野の基本を学ぶ機会となり、広い視野を育てることに役立ったはずである。また、ポスドククラスの若手研究者が、自身の研究領域全体を俯瞰しレビューするという機会が得られたことも貴重な経験となったはずである。なお、研究会の世話人であったポスドク相当の若手3名は、そこで培ったリーダーシップを発揮し、その後助教などの上位ポストを獲得した。



2. 成果発表の機会提供

以下の取り組みを行い、若手の自発的な積極性を促進した。

- ・ 国際会議等に若手スピーカーを積極的に送り込んだ。
- ・ 国際会議 CMB2013 においてはポスター賞を企画し、若手の積極的な応募を奨励した。

【若手研究者の研究終了後の動向等】

本新学術領域では、90名の大学院生と、80名のポスドク・若手スタッフが研究に携わってきた。少なくとも半数程度の若手がキャリアを着実にステップアップしている。

1. 学生の進路

これまでに、合計33編の博士論文と25編の修士論文（総研大の場合はそれに準ずる論文）が執筆され、多くの若手研究者を育成した。修士号取得者の博士課程への進学率は5割程度である。博士取得者の大半はポスドクや助教として新たなキャリアを積み始め、本学術領域の拡大に寄与している。また、博士課程に在籍した大学院生のうち36名が、日本学術振興会特別研究員（DC）として採用され、若手研究者としての高いキャリアを積みはじめた。卒業生のうち一般企業・官公庁に就職したものは約20名である。

2. ポスドク、若手スタッフの進路

本新学術領域参加時に39歳以下であった研究者のうち、助教、准教授、教授等の職を新たに獲得した人数は19人にのぼり、昇進人事7件と合計すると3割以上の若手研究者が、本新学術領域で達成した研究成果をもとに、目覚ましいほどのキャリア向上を達成している。本科研費のポスドクとして着任してから1～2年程度のものも多いため、本領域研究に3年以上従事した若手のキャリア向上率はさらに高い。

また、日本学術振興会特別研究員（PD）や海外特別研究員にキャリアをステップアップしたものが20名もいる。なお、一般企業・官公庁に就職したものは3名程度である。

【若手研究者の受賞】

以下にあげるように若手の研究成果が認められ様々な受賞実績をあげている

- ・ 日本物理学会若手奨励賞、石徹白晃治、平成23年10月
- ・ 総合研究大学院大学学長賞、井上優貴、平成26年4月
- ・ 日本物理学会若手奨励賞、高橋史宜、平成23年10月
- ・ 第5回井上リサーチアワード、高橋史宜、平成25年2月
- ・ 第8回(2013年度)素粒子メダル奨励賞、高橋史宜、平成26年3月
- ・ Lagrange Award (Institut Lagrange de Paris)、向山信治、February 2014

6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

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。

各計画研究で購入した設備・装置は、それぞれが効率的に活用するとともに、計画研究間の連携による有効利用をおこなった。特任助教・研究員についても各計画研究で責任をもって雇用したが、総括班が主体となって、連携や交流を推進した。

1. 計画研究 A01「宇宙マイクロ波背景放射偏光測定で探る超高エネルギー物理」 (総経費 310,900 千円)

物品購入は POLARBEAR 実験とそのアップグレードに必要なハードウェアの調達の主たる目的であり、まさに領域の将来を拓くために不可欠な用途であった。冷凍機システム、クライオスタット開発などがこれにあたる。また、開発に必要な電磁界シミュレーション・ツールなどのソフトウェア一群を購入し活用している。これらのソフトウェアは、計画研究 A01 と A02 で共用して、有効活用をはかった。

2. 計画研究 A02「初期宇宙探査のための超高感度アレイデバイスの研究開発」 (総経費 415,000 千円)

超高感度デバイスを開発するための薄膜製造装置や、デバイス評価のための冷凍機や測定装置を導入した。理研と国立天文台に分子線エピタキシー装置を導入し、それぞれが、TiN と、Nb 及び Al とを主要な薄膜材料として研究を進めた。読み出し回路評価用のデバイス作製のために、理研が有する装置群の一部を計画研究 A01 の主催機関である KEK に移設し、A01 と A02 の連携を強化する体制を整えた。作製装置群を有していない岡山大学には特任助教の雇用費を手当てし、他機関に設置した共有設備を活用する方策をとった。特に、LiteBIRD 衛星の前哨となる地上実験 GroundBIRD においては、計画研究 A01 と A02 の間で、共同実験や物品の共同購入などの緊密な連携により開発を進めた。

3. 計画研究 A03「宇宙赤外線背景放射の観測によるダークエイジの探査」(総経費 120,300 千円)

主たる研究課題であるロケット実験の機器開発のために、赤外線光学の測定環境を整備した。また、3次元 CAD ソフトウェアを導入し CIBER-2 の機械設計に活用した。これらの設備は、将来計画推進の一環として、SPICA の機器設計やはやぶさ 2 の性能評価にも活用した。本研究経費で雇用したのべ 2 名の研究員は、あかり衛星のデータ解析にも携わり、研究計画 A04 と連携しつつ研究を進めた。

4. 計画研究 A04「宇宙マイクロ波背景放射と前景放射の高精度成分分離スキームの構築」 (総経費 65,400 千円)

高速 PC クラスタを導入し、CMB と前景放射の高精度成分分離スキームの構築をすすめた。重要課題の一つとして、あかり衛星の遠赤外線全天地図に基づくダスト成分の分離を遂行するため、特任准教授二名を雇用した。そのうちひとりには、「あかり」全天地図の作成において、計画研究 A03 と連携しながら中心的役割を担った。また、もうひとりには天の川銀河磁場モデル作成及び BICEP データの統合解析の実施の中心的役割を担い、計画研究 A01 と連携しながら研究活動を先導した。

5. 計画研究 A05「宇宙初期進化の直接観測に基づく究極理論探査」(総経費 64,900 千円)

研究費の主要部は、研究員の雇用と研究打ち合わせ・研究発表旅費である。各年度での成果や達成課題の応じて最大の成果が出るよう予算配分を行った。また、計算機を導入し、研究代表者と科研費雇用研究員の理論研究、論文作成、および研究計画メンバーが共用するネットワーク計算サーバとして活用した。

6. 総括班 (総経費 48,500 千円)

3ヶ月に一度の総括班会議や毎年の国内シンポジウム、2013年の国際研究会 CMB2013 に使用した。総括班戦略会議を開催し、領域代表や総括班メンバーが活発に意見交換を行い、本新学術領域の研究が組織的に進むように努めた。毎年の国内シンポジウムは、計画研究を進めている研究機関が交代でホストを勤め、毎回約 100 名の参加者を集め、領域の拡大に貢献した。

7. 公募研究 全 29 件、(総経費 131,600 千円)

中間評価時のコメント「公募研究をより一層活用することにより、領域の発展を更に促進してほしい。これまで本新学術領域との接点が少ないが学問的・技術的に深い関連を持つ研究者に広く領域の存在を知らしめる努力を組織的におこなうべきである。」に対応し、計画研究がカバーしない研究課題を積極的に募った結果、広がりある多様な公募研究が進められた。例えば、川良（東京大学）「宇宙可視光背景放射の測定」は計画研究 A03 と、高橋（東北大学）「非ガウス性から探る密度揺らぎの起源と進化」は計画研究 A05 と、相補的な研究が行われた。

7. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

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

総括班の最も重要な活動として、約3カ月に一度、総括班評価者を招いて、20回に及ぶ総括班戦略会議を開催した。戦略会議には毎回約8時間が費やされており、各計画研究代表者が当該計画研究の進捗状況を報告し、進捗の評価と改善に向けた議論を行った。これにより、総括班メンバーが最新情報を共有するとともに、総括班評価者から研究に関する評価・助言を得るという仕組みを構築した。

計画研究・公募研究に属さない評価担当の総括班員として、川邊良平(国立天文台・教授・電波天文学)、中川貴雄(宇宙航空開発研究開発機構・教授・赤外線天文学)の二名が総括班会議に参加し、それぞれの専門分野の知識を活かして高い見地から領域のあり方、研究の進捗について評価した。

川邊氏には特に電波観測という側面からCMB地上観測プロジェクトを中心に評価を行って頂いた。中川氏には、飛翔体を用いた観測の専門家という側面から、将来のCMB偏光観測衛星計画LiteBIRDとCIRB観測ロケット実験CIBERを中心に評価して頂いた。さらに、本新学術領域研究が研究コミュニティへもたらしたインパクト、将来の背景放射観測全般、広範な天文観測に資する超伝導検出器アレイ開発については両者が評価した。以下に、それぞれの両評価者による評価・助言を記す。

【川邊良平（国立天文台・教授・電波天文学）】

本領域は、これまで国内で十分根付いていなかった宇宙マイクロ波背景放射（CMB）研究を主な対象として取り上げ、赤外背景放射、前景放射、素粒子理論、観測機器技術といった関連分野を総括した、新たな分野の創設と科学的成果の実現を狙った野心的な取り組みである。領域代表の強力なリーダーシップのもと円滑な運営と研究推進が図られ、領域形成と科学的成果の両面において大きな成功を収めた。

計画研究A01では、米国との共同研究とはいえ、我が国におけるCMB観測をほぼ一から立ち上げ、世界トップレベルにまで押し上げ、大きな科学成果を生んだことは快挙である。我が国では本領域開始以前において、その重要性にも関わらずCMB偏光観測に関する目立った活動がなかった。これに対し本領域では、既に中間評価の段階においてQUIET実験データを用いた偏光観測結果が論文投稿され、世界トップレベルでBモード発見レースを戦える体制が構築された。このように早い段階で重要な観測結果が発表されたことは、我が国における新たな研究領域の誕生と形成を告げる契機となったと言え、非常に高く評価できる。また、領域の推進過程において米国側研究協力者の死去など予期せぬ問題に直面しながら、考えるベストの対処がなされた。そして、その後POLARBEAR実験が開始され、世界最高感度の成果が得られたことは特筆に値する。これらの共同研究において、日本からの若手参加メンバーがQUIET、POLARBEARともに主導的役割を果たしたことは高く評価でき、また今後のこの分野の発展に大きな効果があるであろう。

究極理論探査を行う計画研究A05は、領域設定時点において既に世界的実績を誇る研究者集団であり、期待に違わぬ大きな成果を挙げた。特に、大きな原始重力波を生成するインフレーションモデルが四次元超重力理論に基づいて自然に生成されることを発見したことは、世界の常識を覆し、かつ、物理の基礎理論と宇宙論とを結びつけた極めて重大な成果である。2014年3月にBICEP2グループが大きな原始重力波を発見したと報告し、その検証が世界的な課題となっているが、もしこれが確認されれば、計画研究A05で発見された知見が究極理論探査の世界的な流れを主導することになり、その意義は極めて大きい。

計画研究A02の超伝導検出器アレイ開発は、「検出器を制するものは観測を制する」という合言葉のもと、多彩な研究者を巻き込んで展開された。新しいコンセプトの提案・技術実証が進められ、世界に伍するレベルを実現したことは重要な成果である。その好例としてGroundBIRD実験が挙げられる。本研究開発で得られた偏光感度は世界最高感度に達し、その開発技術は、今後の背景放射観測のみならず大口径電波望遠鏡の将来計画などにおいても重要であり、電波天文学全般に大きなインパクトを与えると期待される。さらにX線天文学や産業応用への展開も可能で、領域を越えた波及効果が見込まれることから、今後この技術を大切に育てていくべきであろう。さらに計画研究A03、A04で得られた赤外背景放射の超過成分の新たな発見、前景放射成分の高精度除去法の確立も世界をリードする成果と言え、それぞれの計画研究が世界トップクラスの成果を創出したことは、この領域全体の成功を象徴的に物語っている。

また、領域形成という観点でも、我が国に存在しなかった研究領域を一から立ち上げ、発展させ、より

多くの研究者の参加を実現する努力が十分実を結んでいる。日本物理学会では、領域代表の呼びかけにより本領域を開始した 2009 年より宇宙物理領域・宇宙背景輻射セッションが誕生した。また、2010 年 6 月に国立天文台で開催された CMB 研究会で 120 名を超える参加者があったことは、これまで日本における CMB の実験・観測的研究が停滞してきたことを考慮すると画期的なことである。さらに、2013 年 6 月に沖縄科学技術大学で実施された CMB2013 国際会議は、世界中のほぼ全ての CMB 観測プロジェクトから参加者を招聘して開催され、歴史的にも画期的な会議として大きな成功を収めた。このように、本領域の活動を通じて日本の CMB 研究が世界に知れ渡ることに至ったことは高く評価できる。アウトリーチ活動も積極的かつ継続的に行われており評価できる。あえて注文をつけると、公募研究の活用にもう一工夫あれば領域の一層の発展につながった可能性がある。また、関係の深い電波天文観測グループともより連携した体制を作ることは有意義なことであろう。今後とも、学問的・技術的に関連を持つ研究者に広く領域の存在を知らしめ、研究推進力の拡大を計り、より熟成した研究推進母体を構築する努力を組織的に行うべきである。

【中川貴雄 (宇宙航空開発研究開発機構・教授・赤外線天文学)】

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光精密観測により宇宙のインフレーション仮説を検証する LiteBIRD 衛星計画は本新学術領域が総力を上げて計画したものである。「学術会議マスタープラン 2014」の重点大型研究計画に選定されたことに象徴されるように、研究コミュニティでもその価値は高く評価されている。

この事実からも明らかのように、LiteBIRD 計画の学術的意義は極めて高いと認められる。CMB 偏光観測を通じて揺らぎの重力波モードが求められれば、宇宙初期の大膨張期であるインフレーションの存在を直接証明し、その機構に迫ることが可能となる。最近、BICEP2 グループが、原始重力波起源の CMB 偏光 B モードを観測したと発表した。この結論が LiteBIRD で決定的に確認されることとなれば、その学術的意義は、宇宙論、さらには素粒子分野にとって極めて重要である。BICEP2 の観測は限られた領域のものであり、これに加えて、大スケール偏光観測によって天文学に与えられるインパクトについて検討が進められれば、本領域で進められてきた研究がさらに広がるものと期待される。

LiteBIRD 計画に向けた技術開発の成熟度も高いレベルにある。これまで QUIET 実験や POLARBEAR 実験などの地上実験を推進して来た経験、さらに本領域を通じて国内の専門家を結集して進めた新型超伝導検出器アレイなどの装置開発は、今後の衛星計画推進において非常に重要な要素となる。今後は、信頼性とロバストネスが求められる人工衛星に新型のアレイ検出器が実際に搭載できるか、また、搭載した際にどのような問題が考えられ、それをどう解決していくかなど、衛星計画特有の厳しい要求を満たすための検討をさらに進められたい。一方、観測成功の鍵を握る系統誤差評価や前景放射分離法などの解析法も確実に発展させている。困難が予想されるのが、前景放射の寄与を取り除き重力波モードに関係するパーティ負の B モードを取り出す部分である。WMAP 衛星 や Planck 衛星、BICEP2 などの知見も取り込みつつ、この部分の検討をさらに進めていただきたい。

LiteBIRD 計画の実施体制も妥当である。JAXA・宇宙研と KEK、国立天文台、さらに Kavli IPMU の連携に加えて大学等が参加するという実施体制は非常に強力であり妥当である。学術コミュニティでの合意形成も順調に進められている。電波コミュニティにおいては、計画の具体性や準備状況が高く評価され、また ALMA 望遠鏡や他の将来計画と独立した新しい研究対象を切り開く計画として、中規模計画の中で最も高い評価を得ている。また、理論コミュニティからも、特にサイエンス面から高い評価と期待を得ている。共同利用体制については、プロポーザルに基づく運用は計画されていないが、衛星データの公開などコミュニティへの成果の還元配慮がなされている。

総合的に見て LiteBIRD 計画は高く評価でき、本領域の狙いは極めて妥当なものであったと評価できる。宇宙論・素粒子物理学の分野に大きなインパクトを与える成果が期待でき、また、計画も着実に練り上げられてきている。今後は、小型科学衛星からの変更に伴う検討を早急に進めるとともに、前景放射による偏光成分の分離やそこから得られる新たな天文学的成果についてもさらに検討されることを期待したい。

領域のもう一つの重要な観測であるロケット実験による赤外線背景放射観測も新たな発見がなされており、今後の展開が非常に楽しみである。赤外線背景放射の超過成分は、ガンマ線観測との整合性の解決が新たな研究課題として浮かび上がっており、宇宙物理学にとって重要な問題提起につながる可能性が高い。この観点からの両コミュニティの交流も盛んになっており、今後の展開が大いに期待される。

8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目毎または計画研究毎に整理する]

（3 ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、現在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毎に計画研究・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。

計画研究 A01「宇宙マイクロ波背景放射偏光測定で探る超高エネルギー物理」

（1）POLARBEAR の初期観測結果

チリ・アタカマ高地（標高 5150m）に設置した POLARBEAR 望遠鏡を用いて 2012 年から 2013 年まで観測を行った。検出器の雑音レベルとして $23\mu\text{K}\sqrt{\text{s}}$ を達成した。データ解析結果を 2013 年 12 月と 2014 年 3 月に発表した。合計三本の論文のうち二本はすでに Physical Review Letters に掲載が決定（関係論文リスト番号 1,2）され、どちらも Editors' Suggestion に選ばれた。これらの論文の成果のうち、特筆すべきこととしては、世界ではじめて CMB 偏光のみを用いて重力レンズ効果の観測に成功したこと（トータルで 4.7 シグマの有意度）が挙げられる（図 1）。また、同じ効果を CMB と CIRB の相関解析により確認したことも、本領域らしい成果といえる。

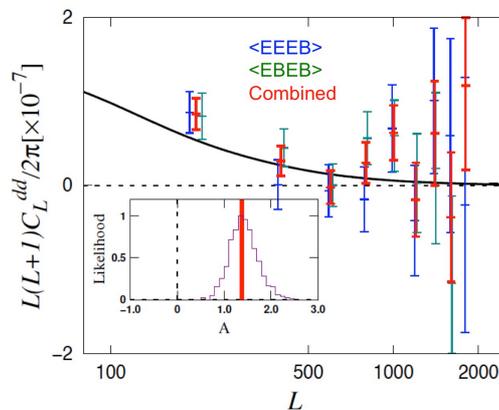


図 1: POLARBEAR の観測により得られた重力レンズパワースペクトル

（2）LiteBIRD 衛星のデザイン

代表的なインフレーションモデルの予言を全て検証することができる究極感度の衛星計画 LiteBIRD を提案した。宇宙理学委員会の承認を受けたワーキンググループが結成され、領域の総力をあげて基本設計を進めた。衛星のミッション要求の設定から概念設計の完成に至る一連の検討を、JAXA のシステムズ・エンジニアリング推進室、ミッション・デザイン・サポートグループ、衛星機器メーカーなどと共同で進め、実現性の高い概念設計へ発展させることに成功した（図 2）。



図 2: LiteBIRD 外観図

（3）QUIET の観測結果

チリ・アタカマ高地（標高 5080m）に設置した QUIET 望遠鏡を用いて 2008 年から 2010 年まで観測した Q (43GHz) および W バンド

(95GHz) のデータを解析し、世界で初めて CMB 偏光 E モードの第 3 ピークまで観測に成功した（図 3）。原始重力波の強度パラメータ r に関しては、Q バンド観測より $r = 0.35 (+1.06 - 0.87)$ 、W バンド観測より $r = 1.1 (+0.9 - 0.8)$ 、という結果を得た。特筆すべきこととして、系統誤差のレベルを $r = 0.01$ のときに期待される信号レベルより小さく抑えることに世界で初めて成功したことが挙げられる。

計画研究 A02「初期宇宙探査のための超高感度アレイデバイスの研究開発」

CMB や CIRB 観測用の超高感度アレイ検出器の開発では、入射波による超伝導体中の Cooper 対解離を用いた量子型検出器として、超伝導トンネル接合素子 (STJ) 検出器の研究を進め、薄

膜マッチング型、分布線路型と呼ばれる新たな STJ 検出器を開発した。一方、同じく Cooper 対解離を用いるが膜構造と信号読み出し法が異なるマイクロ波力学インダクタンス検出器

(MKIDs) も並行して研究開発し、STJ 検出器と同等以上の感度とアレイ読み出しに成功した。また、MKIDs は、作製技術が STJ 検出器と共通し、かつ、素子構造が簡素でアレイ読み出しが STJ 検出器よりも圧倒的に容易なことから、当初計画を発展させる形で、研究開発の中心を MKIDs 検出器に据えた。この結果、CMB

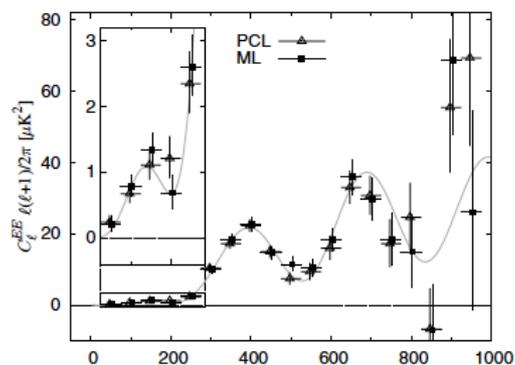


図 3: QUIET の CMB 偏光 E モードパワースペクトル観測結果 (W バンド)

用 600 素子アレイ, CIRB 用 512 素子アレイ, 4,000 チャンネルの信号読み出しを実現した. また, A01 と連携して冷凍機・光学系を含む地上観測用システム GroundBIRD の開発を進めた. また, デバイスに入射波を集光するための 720 素子 Si レンズアレイ, 無反射コーティング, 多層熱シールドなど光学系に関する新規技術を開発し, システム化技術開発も推進した. 検出感度では, 電氣的雑音等価電力 (electrical NEP) 6×10^{-18} W/√Hz を達成するとともに, 偏光成分に対する応答を実験室で実測できるシステムを新たに開発し, 実測の雑音等価温度 (optical NET) として世界最高値となる $190 \mu\text{K}/\sqrt{\text{sec}}$ を達成した. さらに, 汎用 FPGA を用いた読み出しシステムを開発・公開し, 他分野への MKIDs 技術活用のための基盤技術を構築するとともに, GroundBIRD 実験で技術的なブレークスルーとなる回転冷却系 (特許申請済) を開発して, パルス管冷凍機と He 減圧冷凍ステージを組み込んだ望遠鏡プロトタイプシステムの設計・製作を進めた.

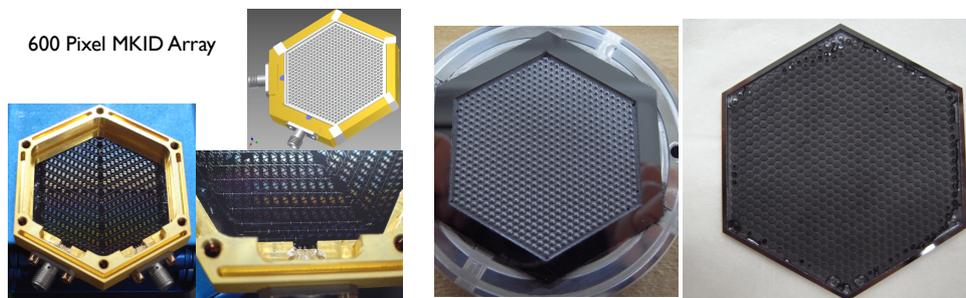


図 4. (左) 600 画素の 220 GHz MKID カメラの写真 (中,右) 720 画素 Si レンズアレイ, 及び, 無反射コーティングを施した様子

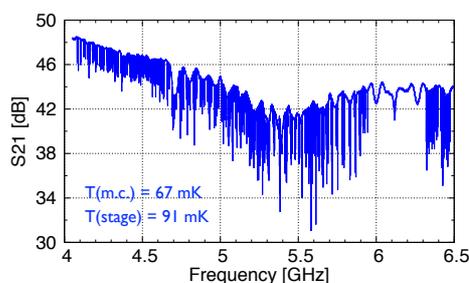


図 5. 600 画素の共振信号

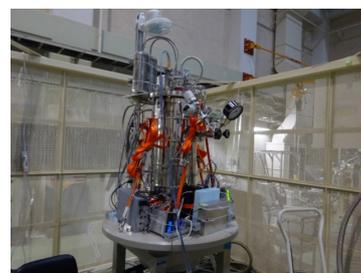


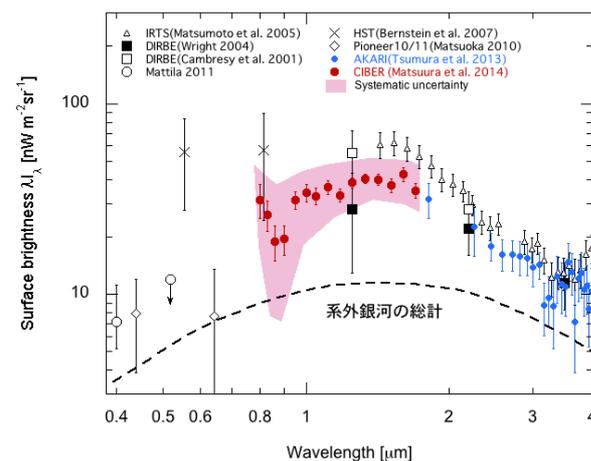
図 6. 構築した GroundBIRD プロトタイプ

計画研究 A03 「宇宙赤外線背景放射の観測によるダークエイジの探査」

(1) ロケット実験 CIBER

(関係論文リスト番号 6,7,8,9,14,15,16)

CIBER 実験では, 計 4 回のロケット打上げに成功し, 世界ではじめて, 可視・近赤外域 (波長 $0.8\text{-}1.8 \mu\text{m}$) での CIRB の放射スペクトルとゆらぎの測定に成功した (Matsuura+ & Zemcov+, 2014 submitted). 観測された CIRB (図中●) は, 遠方宇宙までの系外銀河からの寄与の総計 (点線) を超える輝度を有し, 未知の銀河系外放射 (超過成分) の存在が確実となった. また, CIRB のゆらぎについても, 数分角以上のスケールで銀河では説明できない大きな振幅をもつことがわかった. 当初予想された, 初代星による波長 $1 \mu\text{m}$ 以下での急激な輝度やゆらぎの低下は検出されなかったため, 超過成分の主因は系外銀河の見えないダークハローの星々 (IHL) とする, 新たな理論的解釈を提案した. 残された謎の解決は, 後継の CIBER-2 実験にゆだねられた. 前景放射に関する理解が飛躍的に進むとともに, それ自身が天文学の成果となったことも特筆できる.



(2) あかり衛星による観測 (関係論文リスト番号 3,4,5,10,12,13)

あかり衛星のデータ解析により, 波長 $2\text{-}5 \mu\text{m}$ における CIRB の放射スペクトルとゆらぎの測定に成功した. 放射スペクトル (図中●) は, CIBER の結果と連続的につながることが確認された. CIBER や Spitzer との統合的なゆらぎ解析により, IHL による超過成分の解釈が生まれた. さらに, 遠赤外線においても CIRB の測定に成功し, 結果解釈として原始ブラックホールや新種族銀河の寄与の必要性を示した. これらの成果

を、学術論文誌で発表するとともに報道発表により広く国民にアピールした。

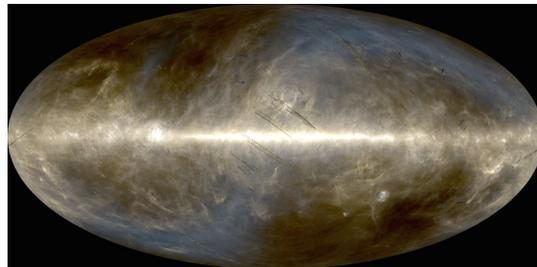
(3) 将来計画・その他 (関係論文リスト番号 1,2,11)

ロケット実験 CIBER-2 の機器開発を要素技術の試作実証により着実に進めた。惑星探査機による黄道光を排除した CIRB 観測計画の検討結果を、国際学会と学術論文誌にて発表した。また、宇宙背景ニュートリノの崩壊光子による CIRB の観測計画や、木星衛星の掩蔽を利用する CIRB 観測の成果について、学術論文誌上や記者会見にて発表した。

計画研究 A04 「宇宙マイクロ波背景放射と前景放射の高精度成分分離スキームの構築」

(1) 階層ベイズ法による成分分離と付随する天文学的研究

階層ベイズ法が威力を発揮するためには、銀河系内星間物質からのマイクロ波偏光放射源の物理的理解を深化させ、有用な入力情報を作ることが不可欠である。そのために、日本の赤外線観測衛星「あかり」が取得した遠赤外線全天探査データからの遠赤外線宇宙地図を作成した(右図、および関係論文リスト番号1)。さらに、銀河系内星間物質からのマイクロ波偏光放射分布の根幹を担う銀河系磁場の研究を展開した。磁気流体数値シミュレーションによる研究、プラズマ運動論的不安定性を種とした乱流磁場の生成過程の研究などがこれにあたる。これらの研究をベースに、階層ベイズ法の開発を行い、シミュレーションにより、LiteBIRD 衛星計画の性能要求を満たすことを示した。



(2) テンプレート法による成分分離

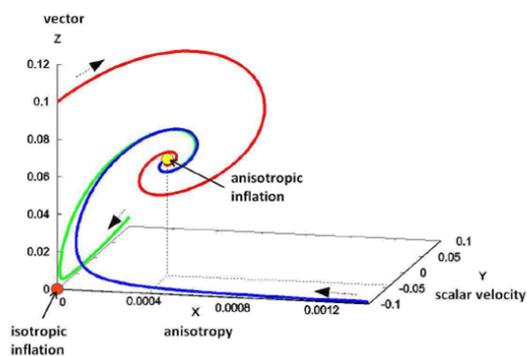
計画研究 A01 と密接に連携を取りつつ、テンプレート法による成分分離法のアルゴリズムを開発した。LiteBIRD 衛星の焦点面検出器のデザインに即した性能を仮定し、シミュレーションにより、シンクロトロン放射とダスト熱放射という二種類の前景放射成分が同時に混入している場合でも、LiteBIRD 衛星の性能要求を満たす成分分離が可能であることを示した(関係論文リスト番号2)。

計画研究 A05 「宇宙初期進化の直接観測に基づく究極理論探査」

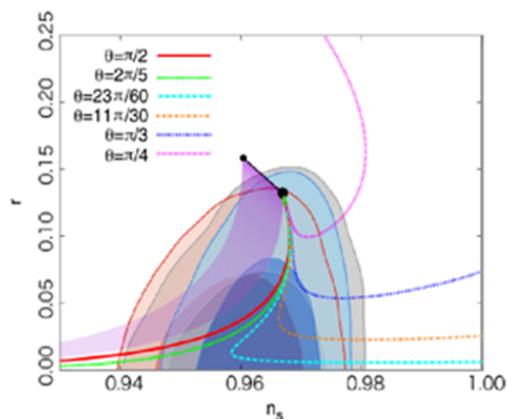
研究計画 A05 での特筆すべき成果は以下の通りである。

(括弧内は A05 関係論文リストの番号)

- 一般化された G-インフレーションモデルの構築と解析: 最も一般的な1成分スカラー場理論に基づくインフレーションモデルを構築し、その整合性、安定性およびゆらぎに関する観測的予言を組織的に明らかにすることにより、多様なインフレーションモデルを観測と比較し、モデルを絞り込む上での足場となる統一的枠組みを構築。(2,3,5,9,10,12,13,14)
- 整合的非等方インフレーションモデルの構築と解析: スカラー場とゲージ場が結合する理論に基づいて、整合的な非等方インフレーションモデルを構築し、ゆらぎパワースペクトルの統計的非等方性、スカラーゆらぎとテンソルゆらぎの相関など、その観測的予言を世界で初めて組織的かつ定量的に明らかにした。(8,16,27,28)
- 4次元超重力統一理論に基づく多様な large field 模型の構築: 4次元超重力理論の枠内で large field 模型を作る処方一般化し、これまでの温度ゆらぎスペクトル観測と整合的で、かつ次世代 CMB B-mode 観測で検出可能な原始重力波生成を予言する多様なインフレーションモデルを4次元超重力理論の枠内で構築。(20)
- アクシオン宇宙論の組織的研究: QCD アクシオンの CMB への影響、特に等曲率揺らぎの生成、ゆらぎ統計の非ガウス性を詳しく解析し、Planck データから宇宙再加熱温度とアクシオン崩壊定数について新たな強い制限を導出。さらに、3次元数値シミュレーションを用



非等方インフレーションは等方インフレーションより安定



強い原始重力波を予言する多様な理論

いてアクシオン放出，重力波放出，宇宙ひも・ドメインウォール形成について精密な評価を与え，素粒子統一理論について強い制限をえた。(30)

- **インフラトンに対する量子補正赤外発散問題の解明**：インフラトンに対する量子ループ補正における赤外発散問題を組織的に研究し，1成分インフラトンモデルでは赤外発散を回避するには量子場に対する初期条件を制限することが必要であることを明らかにした(21, 31).
- **修正重力理論の組織的研究**：究極理論の低エネルギー極限としての多様な修正重力理論の整合性，安定性，Einstein 理論との関係を組織的に研究し，さらにそれらの宇宙現象による検証について詳細に解析。(4, 6,7,15,18,23,24,25,26,29)
- **宇宙背景電波放射観測によるニュートリノ質量への制限**：CMB 偏光観測と将来計画である 21cm 宇宙背景放射観測の組み合わせにより，ニュートリノ質量について強い制限を得ることができること，さらにニュートリノ質量の階層を決定できる可能性があることを示した。(A01 との連携研究)

9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧，ホームページ，公開発表等）（5ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（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，現在から順に発表年次をさかのぼり，計画研究・公募研究毎に順に記載し，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。

1) 主な論文等一覧（全て査読あり）

厳選論文97編。ここに掲げる主な論文以外の論文および論文雑誌掲載審査中のものを含めると400編を超える。

計画研究A01「宇宙マイクロ波背景放射偏光測定で探る超高エネルギー物理」

1. "Measurement of the Cosmic Microwave Background Polarization Lensing Power Spectrum with the POLARBEAR experiment", POLARBEAR Collaboration, Phys. Rev. Lett., (2014年4月25日に掲載確定)(2014).
2. "Evidence for Gravitational Lensing of the Cosmic Microwave Background Polarization from Cross-correlation with the Cosmic Infrared Background", POLARBEAR Collaboration, Phys. Rev. Lett. 112, 131302 (2014).
3. "Mission Design of LiteBIRD", T. Matsumura et al., J. Low Temp. Phys., Published online, 1-8, (2014).
4. "The POLARBEAR Cosmic Microwave Background Polarization Experiment", D. Barron et al., J. Low Temp. Phys., Published online, 1-7 (2014).
5. "Adaptation of frequency-domain readout for Transition Edge Sensor bolometers for the POLARBEAR- 2 Cosmic Microwave Background experiment", K. Hattori et al., Nucl. Instru. and Meth. A, 732, 299-302 (2013).
6. "The Q/U Imaging Experiment Instrument", QUIET Collaboration, Astrophys. J., 768, 9-1:28 (2013).
7. "Second Season QUIET Observations: Measurements of the CMB Polarization Power Spectrum at 95 GHz", QUIET Collaboration, Astrophys. J., 760, 145-1:10 (2013).
8. "Innovative Demodulation Scheme for Coherent Detectors in CMB Experiments", K. Ishidoshiro, Y. Chinone, M. Hasegawa, M. Hazumi, M. Nagai, O. Tajima, Rev. Sci. Instrum., 83, 56104 (2012).
9. "Ethernet-Based DAQ System for QUIET-II Detectors", M. Nagai, K. Ishidoshiro, T. Higuchi, M. Ikeno, M. Hasegawa, M. Hazumi, O. Tajima, M. Tanaka, T. Uchida, J Low Temp Phys, 167, 689-694 (2012).
10. "Readout system with on-board demodulation for CMB polarization experiments using coherent polarimeter arrays", K. Ishidoshiro, M. Nagai, T. Higuchi, M. Hasegawa, M. Hazumi, M. Ikeno, O. Tajima, M. Tanaka and T. Uchida, Nuclear Science, IEEE Trans., 59, 647-655 (2012).
11. "Novel calibration system with sparse wires for CMB polarization receivers", O. Tajima, H. Nguyen, C. Bischoff, A. Brizius, I. Buder, A. Kusaka, J. Low Temp. Phys., 167, 936-942 (2012).
12. "First Season QUIET Observations: Measurements of CMB Polarization Power Spectra at 43 GHz in the Multipole Range $25 \leq \ell \leq 475$ ", QUIET Collaboration, Astrophys. J., 741, 111-1:18 (2011).
13. "Calibration System with Cryogenically-Cooled Loads for Cosmic Microwave Background Polarization Detectors", M. Hasegawa, O. Tajima, Y. Chinone, M. Hazumi, K. Ishidoshiro and M. Nagai, Rev. Sci. Instrum., 82, 5-054501 (2011).
14. "First Season QUIET Observations: Measurements of Cosmic Microwave Background Polarization Power Spectra at 43 GHz in the Multipole Range $25 \leq \ell \leq 475$ ", QUIET Collaboration, Astrophys. J., 741, 111-1:18 (2011).

計画研究A02「初期宇宙探査のための超高感度アレイデバイスの研究開発」

1. "Measurement of MKID Performance with High-Speed and Wide-Band Readout System,"K. Karatsu, M. Naruse, T. Nitta, M. Sekine, S. Sekiguchi, Y. Sekimoto, T. Noguchi, Y. Uzawa,

H. Matsuo, H. Kiuchi, J. Low Temp. Phys., Published online: 14 February 2014.

2. "GroundBIRD Experiment - Detecting CMB polarization Power in a Large Angular Scale from the Ground,"S. Oguri, J. Choi, O. Tajima, M. Hazumi, E. Won, M. Yoshida, M. Kawai, J. Low Temp. Phys., Published Online, 28 February, pp. 1-7 (2014).
3. "Calibration System with Modulated Polarization Source for Superconducting Detectors at 0.1 K,"K. Takahashi, S. Mima, S. Oguri, C. Otani, O. Tajima, H. Watanabe, M. Yoshida, J. Low Temp. Phys., Published Online, 23 February, pp. 1-7 (2014).
4. "Development of the Superconducting Detectors for Applications to Particle Physics and Astrophysics,"A. Kibayashi, M. Hazumi, H. Ishino, Y. Kibe, S. Mima, C. Otani, N. Sato, H. Watanabe, Y. Yamada, M. Yoshida, JPS Conf. Proc., vol. 1, pp. 013118-1-4 (2014).
5. "Anti-Reflection Coating for Cryogenic Silicon and Alumina Lenses in Millimeter-Wave Bands", T. Nitta, S. Sekiguchi, Y. Sekimoto, K. Mitsui, N. Okada, K. Karatsu, M. Sekine, H. Matsuo, M. Seta, and N. Nakai, J. Low Temp. Phys., Published online: 2014
6. "Close-Packed Silicon Lens Antennas for Millimeter-Wave MKID Camera", T. Nitta, K. Karatsu, Y. Sekimoto, M. Sekine, S. Sekiguchi, T. Noguchi, K. Mitsui, M. Seta, and N. Nakai, J. Low Temp. Phys., Published online: 2013.
7. "Beam Pattern Measurements of Millimeter-Wave Kinetic Inductance Detector Camera With Direct Machined Silicon Lens Array,"T. Nitta, M. Naruse, Y. Sekimoto, K. Mitsui, N. Okada, K. Karatsu, M. Sekine, H. Matsuo, T. Noguchi, Y. Uzawa, M. Seta, and N. Nakai, IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, vol. 3, pp. 56-62 (2013).
8. "Optical Efficiencies of Lens-Antenna Coupled Kinetic Inductance Detectors,"M. Naruse, Y. Sekimoto, T. Noguchi, A. Miyachi, K. Karatsu, T. Nitta, M. Sekine, Y. Uzawa, T. Taino, H. Myoren, IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, vol. 3, no. 2, pp. 180-186 (2013).
9. "Radio-transparent multi-layer insulation for radiowave receivers,"J. Choi, H. Ishitsuka, S. Mima, S. Oguri, K. Takahashi, and O. Tajima, Rev. Sci. Instrum., vol. 84, pp. 114502-1-6 (2013).
10. "Cryogenic cooling with cryocooler on a rotating system,"S. Oguri, J. Choi, M. Kawai, O. Tajima, Rev. Sci. Instrum. vol. 84, pp. 055116-1-5 (2013).
11. "Development of microwave kinetic inductance detectors and their readout system for LiteBIRD,"K. Hattori, M. Hazumi, H. Ishino, A. Kibayashi, Y. Kibe, S. Mima, T. Okamura, N. Sato, T. Tomaru, Y. Yamada, M. Yoshida, T. Yuasa, H. Watanabe Nucl. Instr. Meth A, vol. 732, pp. 306-310 (2013).
12. "NbN-based microwave kinetic inductance detector with a rewound spiral resonator for broadband terahertz detection,"S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, H. Tanoue, K. Koga, N. Furukawa, H. Yamada, S. Ohshima, C. Otani, J. Bae, Appl. Phys. Express, 6, 064103 (2013).
13. "Contribution of Quasiparticles in the Subgap States to the Surface Impedance of Superconductors", T. Noguchi, M. Naruse, and Y. Sekimoto, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(3), 1501404, (2013).
14. "Terahertz detector with transmission-line type superconducting tunnel junctions,"S. Ariyoshi, K. Takahashi,

- T. Noguchi, M. Kurakado, K. Koga, N. Furukawa, C. Otani, Superconductor Science and Technology, Vol. 25, No. 7, 075011 (2012).
15. "Novel Frequency-Domain Multiplexing MKID Readout for the LiteBIRD Satellite," K. Hattori, S. Ariyoshi, M. Hazumi, H. Ishino, A. Kibayashi, S. Mima, C. Otani, N. Satoh, T. Tomaru, M. Yoshida, H. Watanabe, J. Low Temp. Phys., vol. 167, pp. 671-677, (2012).
 16. "Development of Superconducting Detectors for Measurements of Cosmic Microwave Background", K. Hattori, M. Hazumi, H. Ishino, M. Kawai, A. Kibayashi, N. Kimura, S. Mima, T. Noguchi, T. Okamura, N. Sato, O. Tajima, T. Tomaru, H. Watanabe, M. Yoshida, Physics Procedia, vol. 37, pp. 1406-1412 (2012).
 17. "Development of Crystal Al MKIDs by Molecular Beam Epitaxy," M. Naruse, Y. Sekimoto, T. Noguchi, A. Miyachi, T. Nitta, Y. Uzawa, J. Low Temp. Phys. Volume 167, Issue 3-4, pp 373-378 (2012).
 18. "Terahertz Detector based on a Superconducting Tunnel Junction Coupled to a Thin Superconductor Film," S. Ariyoshi, T. Taino, A. Dobroui, H. Sato, H. Matsuo, C. Otani, Appl. Phys. Lett., Vol. 95, No. 19, 193504 (2009).
- 計画研究 A03「宇宙赤外線背景放射の観測によるダークエイジの探査」
1. "Near-infrared Brightness of the Galilean Satellites Eclipsed in Jovian Shadow: A New Technique to Investigate Jovian Upper Atmosphere", K. Tsumura, K. Arimatsu, E. Egami, Y. Hayano, C. Honda, J. Kimura, K. Kuramoto, S. Matsuura, Y. Minowa, K. Nakajima, T. Nakamoto, M. Shirahata, J. Surace, Y. Takahashi, and T. Wada, Astrophys. J., 2014 accepted.
 2. "Joint Planetary and Astronomical Science with the Solar Power Sail Spacecraft", S. Matsuura, H. Yano, D. Yonetoku, R. Funase, O. Mori, Y. Shirasawa, and Solar Sail WG, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 12, ists29, Tr_1-5 (2014).
 3. "Low-Resolution Spectrum of the Extragalactic Background Light with AKARI InfraRed Camera", K. Tsumura, T. Matsumoto, S. Matsuura, I. Sakon, and T. Wada, Publications of Astronomical Society of Japan, 65, 121, 7pp. (2013).
 4. "Low-Resolution Spectrum of the Diffuse Galactic Light and 3.3um PAH emission with AKARI InfraRed Camera", K. Tsumura, T. Matsumoto, S. Matsuura, I. Sakon, M. Tanaka, and T. Wada, Publications of Astronomical Society of Japan, 65, 120, 7pp. (2013).
 5. "Low-Resolution Spectrum of the Zodiacal Light with AKARI InfraRed Camera", K. Tsumura, T. Matsumoto, S. Matsuura, J. Pyo, I. Sakon, and T. Wada, Publications of Astronomical Society of Japan, 65, 119, 13pp. (2013).
 6. "The Cosmic Infrared Background Experiment (CIBER): the Narrow Band Spectrometer", P.M. Korngut, T. Renbarger, T. Arai, J. Battle, J. Bock, S.W. Brown, A. Cooray, V. Hristov, B. Keating, M.G. Kim, A. Lanz, D.H. Lee, L.R. Levenson, K.R. Lykke, P. Mason, T. Matsumoto, S. Matsuura, U.W. Nam, B. Shultz, A.W. Smith, I. Sullivan, K. Tsumura, T. Wada, and M. Zemcov, Astrophys. J. Suppl., 207, 34(12pp) (2013).
 7. "The Cosmic Infrared Background Experiment (CIBER): The Low Resolution Spectrometer", K. Tsumura, T. Arai, J. Battle, J. Bock, S. Brown, A. Cooray, V. Hristov, B. Keating, M.G. Kim, D.H. Lee, L.R. Levenson, K. Lykke, P. Mason, T. Matsumoto, S. Matsuura, K. Murata, U.W. Nam, T. Renbarger, A. Smith, I. Sullivan, K. Suzuki, T. Wada, and M. Zemcov, Astrophys. J. Suppl., 207, 33(12pp) (2013).
 8. "The Cosmic Infrared Background Experiment (CIBER): The Wide-Field Imagers", J. Bock, I. Sullivan, T. Arai, J. Battle, A. Cooray, V. Hristov, B. Keating, M.G. Kim, A.C. Lam, D.H. Lee, L.R. Levenson, P. Mason, T. Matsumoto, S. Matsuura, K. Mitchell-Wynne, U.W. Nam, T. Renbarger, J. Smidt, K. Suzuki, K. Tsumura, T. Wada, and M. Zemcov, Astrophys. J. Suppl., 207, 32(14pp) (2013).
 9. "The Cosmic Infrared Background Experiment (CIBER): A Sounding Rocket Payload to Study the Near Infrared Extragalactic Background Light", M. Zemcov, K. Tsumura, T. Arai, J. Battle, J. Bock, S. Brown, A. Cooray, V. Hristov, B. Keating, M.G. Kim, D.H. Lee, L.R. Levenson, K. Lykke, P. Mason, T. Matsumoto, S. Matsuura, K. Murata, U.W. Nam, T. Renbarger, A. Smith, I. Sullivan, K. Suzuki, and T. Wada, Astrophys. J. Suppl., 207, 31(16pp) (2013).
 10. "Brightness and Fluctuation of the Mid-Infrared Sky from AKARI Observations towards the North Ecliptic Pole", J. Pyo, T. Matsumoto, W.-S. Jeong, and S. Matsuura, Astrophys. J., 760, 102-110 (2012).
 11. "Search for Radiative Decays of Cosmic Background Neutrino using Cosmic Infrared Background Energy Spectrum" S.-H. Kim, K. Takemasa, Y. Takeuchi, and S. Matsuura Journal of the Physical Society of Japan, 81, 024101-024108 (8 pages), (2012).
 12. "AKARI observation of the fluctuation of the near-infrared background", T. Matsumoto, H.J. Seo, W.-S. Jeong, H.M. Lee, S. Matsuura, H. Matsuhara, S. Oyabu, T. Wada, Astrophys. J., 742, 124-134 (2011).
 13. "Detection of the Cosmic Far-Infrared Background in AKARI Deep Field South", S. Matsuura, M. Shirahata, M. Kawada, T.T. Takeuchi, D. Burgarella, D.L. Clements, W.-S. Jeong, H. Hanami, S.A. Khan, H. Matsuhara, T. Nakagawa, S. Oyabu, C.P. Pearson, A. Pollo, S. Serjeant, T. Takagi, and G. White, Astrophys. J., 737, 2-20 (2011).
 14. "Analysis of Dark Data of the PICNIC IR Arrays in the CIBER", D.-H. Lee, M.-G. Kim, K. Tsumura, M. Zemcov, U.W. Nam, J. Bock, J. Battle, V. Hristov, T. Renbarger, T. Matsumoto, I. Sullivan, L.R. Levenson, P. Mason, S. Matsuura, and G.H. Kim, Journal of astronomy and space sciences, 27, 401-406 (2010).
 15. "Observations of the near-infrared spectrum of the zodiacal light with CIBER", K. Tsumura, J. Battle, J. Bock, A. Cooray, V. Hristov, B. Keating, D.-H. Lee, L. Levenson, P. Mason, T. Matsumoto, S. Matsuura, U.-W. Nam, T. Renbarger, I. Sullivan, K. Suzuki, T. Wada, and M. Zemcov, Astrophys. J., 719, 394-402 (2010).
 16. "Cosmic Infrared Background Experiment (CIBER): A Probe of Extragalactic Background Light from Reionization", A. Cooray, J. Bock, M. Kawada, B. Keating, D.-H. Lee, L. Levenson, T. Matsumoto, S. Matsuura, T. Renbarger, I. Sullivan, K. Tsumura, T. Wada, and M. Zemcov, THE FIRST STARS AND GALAXIES: CHALLENGES FOR THE NEXT DECADE. AIP Conference Proceedings, Volume 1294, pp. 166-172 (2010).
- 計画研究 A04「宇宙マイクロ波背景放射と前景放射の高精度成分分離スキームの構築」
1. "AKARI Far-infrared all-sky survey maps", Doi, Y., Komugi, S., Kawada, M., Tanaka, S., Arimatsu, K., Ikeda, N., Kato, D., Kitamura, Y., Nakagawa, T., Ootsubo, T., Morishima, T., Hattori, M., Tanaka, M., White, G.J., Exaluzé, M., Shibai, H., Publications of the Korean Astronomical Society, 27, 111-116 (2012).
 2. "SIMPLE FOREGROUND CLEANING ALGORITHM FOR DETECTING PRIMORDIAL B-MODE POLARIZATION OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND", Nobuhiko Katayama and Eiichiro Komatsu, Astrophys. J., 737 78 (2011).
 3. "AcuA: the AKARI/IRC Mid-infrared Asteroid Survey", F. Usui, D. Kuroda, T. G. Mueller, S. Hasegawa, M. Ishiguro, T. Ootsubo, D. Ishihara, H. Katata, S. Takita, S. Oyabu, M. Ueno, H. Matsuhara, T. Obaka, Publ. Astron. Soc. Jap. 63 1117-1138 (2011).
 4. "Development of refractive Fourier Transform Spectrometer to realize multiband modulator for polarizing signal in millimeter and THz wave bands," Y. Luo, Ph.D. thesis (Doctor of Science), Astronomical Institute, Graduate School of Science, Tohoku University (2010).

1. "On the cosmology of massive gravity", A. De Felice, A. E. Gumrukcuoglu, C. Lin, S. Mukohyama, C. Q. Grav. 30, 184004 (2013). (21 citations@inspire.hep)
2. "Axions : Theory and Cosmological Role", Masahiro Kawasaki, Kazunori Nakayama, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 63, 69-95, (2013). (19 citations@inspire.hep)
3. "Loops in inflationary correlation functions" (review), T. Tanaka, Y. Urakawa, C. Q. Grav. 30, 233001 (2013). (8 citations@inspire.hep)
4. "Gauge Fields and Inflation", Maleknejad, M.M. Sheikh-Jabbari, J. Soda, Phys. Rept. 528, 161-261, (2013). (38 citations@inspire.hep)
5. "Statistical Anisotropy from Anisotropic Inflation", J. Soda (Kyoto U.), Jan 2012. 32 pp., Class. Quant. Grav. 29, 083001 (2012). (33 citations@inspire.hep)
6. "Massive gravity: nonlinear instability of the homogeneous and isotropic universe." A. De Felice, A. E. Gumrukcuoglu, S. Mukohyama, Phys.Rev.Lett. 109, 171101 (2012). (74 citations@inspire.hep)
7. "Cosmological perturbations of self-accelerating universe in nonlinear massive gravity", E. Gumrukcuoglu, C. Lin, S. Mukohyama, JCAP 1203, 006 (2012). (74 citations@inspire.hep)
8. "Anisotropic Friedmann-Robertson-Walker universe from nonlinear massive gravity", E. Gumrukcuoglu, C. Lin, S. Mukohyama, Phys.Lett. B717, 295-298 (2012). (43 citations@inspire.hep)
9. "Dark Radiation and Dark Matter in Large Volume Compactifications", T. Higaki, F. Takahashi, JHEP 1211, 125 (2012). (34 citations@inspire.hep)
10. "Generalized G-inflation: Inflation with the most general second-order field equations" (日本物理学会論文賞), T. Kobayashi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama Prog. Theor. Phys. 126, 511-529 (2011). (115 citations@inspire.hep)
11. Open FRW universes and self-acceleration from nonlinear massive gravity". E. Gumrukcuoglu, C. Lin, S. Mukohyama, JCAP 1111, 030 (2011). (95 citations@inspire.hep)
12. "Matter perturbations in Galileon cosmology", De Felice, R. Kase, S. Tsujikawa, Phys.Rev. D83: 043515, (2011). (63 citations@inspire.hep)
13. "Higgs G-inflation", K. Kamada, T. Kobayashi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama, Phys. Rev. D 83: 083515 (2011). (58 citations@inspire.hep)
14. "Primordial non-Gaussianity from G-inflation", T. Kobayashi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama, Phys. Rev. D83: 103524 (2011). (56 citations@inspire.hep)
15. "Generalized Galileon cosmology", A. De Felice, S. Tsujikawa, Phys. Rev. D84, 124029 (2011). (60 citations@inspire.hep)
16. "Observational constraints on loop quantum cosmology", M. Bojowald, G. Calcagni, S. Tsujikawa, Phys.Rev.Lett. 107, 211302 (2011). (45 citations@inspire.hep)
17. "A theory of extra radiation in the Universe", K. Nakayama, F. Takahashi, T.T. Yanagida, Phys.Lett. B697:275-279 (2011). (42 citations@inspire.hep)
18. "Dark energy: investigation and modeling", S. Tsujikawa, Astrophysics and Space Science Library Volume 370, "Dark Matter and Dark Energy: a Challenge for the 21st Century", pp 331-402 (2011). (143 citations@inspire.hep)
19. "New cosmological constraints on primordial black holes", B.J. Carr, K. Kohri, Y. Sendouda, J. Yokoyama, Phys.Rev. D81, 104019 (2010). (120 citations@inspire.hep)
20. "G-inflation: Inflation driven by the Galileon field", T. Kobayashi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama, Phys. Rev. Lett. 105 :231302 (2010). (119 citations@inspire.hep)
21. "Cosmology of a covariant Galileon field", A. De Felice, S. Tsujikawa, Phys. Rev. Lett. 105: 111301 (2010). (93 citations@inspire.hep)
22. "The Nature of Primordial Fluctuations from Anisotropic Inflation." M. Watanabe, S. Kanno, J. Soda,

- Prog.Theor.Phys.123:1041-1068 (2010). (70 citations@inspire.hep)
23. "Observational constraints on Galileon cosmology.", S. Nesseris, A. De Felice, S. Tsujikawa, Phys.Rev. D82:124054 (2010). (66 citations@inspire.hep)
24. "Dark Matter from Split Seesaw", A. Kusenko, F. Takahashi, T.T. Yanagida, Phys.Lett.B693:144-148, (2010). (61 citations@inspire.hep)
25. "Density perturbations in general modified gravitational theories", A. De Felice, S. Mukohyama, S. Tsujikawa, Phys.Rev.D82:023524 (2010). (54 citations@inspire.hep)
26. "Anisotropic Power-law Inflation", S. Kanno, J. Soda, M. Watanabe, JCAP 1012:024 (2010). (47 citations@inspire.hep)
27. "Running Kinetic Inflation", K. Nakayama, F. Takahashi, JCAP 1011:009 (2010). (39 citations@inspire.hep)
28. "IR divergence does not affect the gauge-invariant curvature perturbation", Y. Urakawa, T. Tanaka, Phys.Rev. D82: 121301 (2010). (39 citations@inspire.hep)
29. "f(R) theories" (Review, 136pp) A. De Felice, S. Tsujikawa, Living Rev. Rel.13:3 (2010). (561 citations@inspire.hep)
30. "Horava-Lifshitz Cosmology: A Review", S. Mukohyama, Class.Quant.Grav. 27: 223101 (2010). (106 citations@inspire.hep)
31. "Modified gravity models of dark energy", S. Tsujikawa, Lect. Notes. Phys. 800, 99 (2010). (92 citations@inspire.hep)

公募研究（下記以外にも30編をこえる査読付き論文が出版）

1. "Galaxy luminosity function and its cosmological evolution: testing a new feedback model depending on galaxy-scale dust opacity", Makiya, R.; Totani, T.; Kobayashi, M. A. R.; Nagashima, M.; Takeuchi, T. T., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 441, Issue 1, p.63-72 (2014).
2. "Cryogenic infrared filter made of alumina for use at millimeter wavelength," Y. Inoue, T. Matsumura, M. Hazumi, A. T. Lee, T. Okamura, A. Suzuki, T. Tomaru, and H. Yamaguchi,Appl. Opt. **53**, 1727-1733 (2014).
3. "Magnetohydrodynamic Simulations of the Formation of Cold Fronts in Clusters of Galaxies: Effects of Anisotropic Viscosity", Suzuki, K., Ogawa, T., Matsumoto, Y., Matsumoto, R., Astrophys. J., 768, id. 175 (19 pages), 2013.
4. "Characterization of NbN Tunnel Junctions With Radical-Nitrided AlNx Barriers," H. Akaike, T. Funai, N. Naito, and A. Fujimaki, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, 1101306 (6pages), (2013). (Invited Paper)
5. "Type-I cosmic string network", T. Hiramatsu, Y. Sendouda, K. Takahashi, D. Yamauchi and C. Yoo, Phys. Rev. D 88 (2013).
6. "Forecast constraints on cosmic strings from future CMB, pulsar timing and gravitational wave direct detection experiments", S. Kuroyanagi, K. Miyamoto, T. Sekiguchi, K. Takahashi and J. Silk, Phys. Rev. D 87 (2013).
7. "Dynamo Activities Driven by Magnetorotational Instability and the Parker Instability in Galactic Gaseous Disks", Machida, M., Nakamura, K.E., Kudoh, T., Akahori, T., Sofue, Y., Matsumoto, R., Astrophys. J., 764, id. 81 (9 pages), 2013.
8. "Laboratory Calibration System for CMB Polarization Detectors", M. Hasegawa, O. Tajima, Y. Chinone, M. Hazumi, K. Ishidoshiro and M. Nagai, J Low Temp Phys, 167, 892-897 (2012).
9. "Revising the Halofit Model for the Nonlinear Matter Power Spectrum", Takahashi, R., Sato, M., Nishimichi, T., Taruya, A. & Oguri, M., Astrophys. J., 761, 152, pp.1-10, (2012).
10. "What happens to Q-balls if Q is so large?", Nobuyuki Sakai and Takashi Tamaki, Phys. Rev. D 85, 104008 (9 pages) (2012).
11. "COSMIC OPTICAL BACKGROUND: THE VIEW FROM PIONEER 10/11", Y. Matsuoka, N. Ienaka, K. Kawara, and S. Oyabu, Astrophys. J., 736, 119 - 132 (2011).
12. "Infrared Spectral Energy Distribution of Galaxies in the AKARI All Sky Survey: Correlations with Galaxy Properties, and Their Physical Origin", Totani, Tomonori; Takeuchi,

- Tsutomu T., Nagashima, Masahiro; Kobayashi, Masakazu A. R., Makiya, Ryu, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.63, No.6, pp.1181-1206 (2011).
13. "Probability Distribution Functions of Cosmological Lensing: Convergence, Shear, and Magnification", Takahashi, R., Oguri, M., Sato, M. & Hamana, T., *Astrophys. J.*, 742, 15, pp.1-15, (2011).
 14. "Evidence of Quasi-Linear Super-Structures in the Cosmic Microwave Background and Galaxy", Distribution Kaiki Taro Inoue, Nobuyuki Sakai, Kenji Tomita, *Astrophys. J.* 724, 12-25 (2010).
- 2) 書籍
1. Luca Amendola and Shinji Tsujikawa, "Dark Energy: Theory and Observations" (Cambridge University Press), 2010 年
 2. 小玉英雄, 井岡邦仁, 郡和範, 「宇宙物理学」, KEK 教科書シリーズ 3, 共立出版, 2014 年
 3. 辻川信二, 「現代宇宙論講義」 (SGC ライブラリ 99), 2013 年
- 3) ホームページ
1. <http://cbr.kek.jp/>
 2. <http://cmb.kek.jp/>
 3. <http://quiet.kek.jp/>
 4. <http://cmbpol.kek.jp/polarbear/>
 5. <http://cmbpol.kek.jp/cmbcamera/>
 6. <http://litebird.jp/>
 7. <http://research.kek.jp/people/hkodama/UTQuestHP/>
 8. <http://www.astr.tohoku.ac.jp/~hken/us.tohoku.abc>
 9. <http://www.astr.tohoku.ac.jp/~hken/MosiTen>
 10. http://www.ir.isas.jaxa.jp/~matsuura/darkage/index_da.html
- 4) 公開発表について
- 【シンポジウムやセミナーの開催】
1. 「背景放射で拓く宇宙創成の物理—インフレーションからダークエイジまで—」シンポジウム 2014, 理研和光キャンパス 鈴木梅太郎ホール, 2014 年 6 月 2 日~3 日, 参加者 71 名, 招待講演 18, ポスター講演 25, <http://www-conf.kek.jp/cmb/2014/>
 2. "International Conference on Cosmic Microwave Background (CMB workshop 2013)", Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST), 2013 年 6 月 10 日~14 日, 参加者 121 名, 招待講演 39, ポスター講演 56, <http://www-conf.kek.jp/cmb/2013/>
 3. 国際会議 AIU2012 "Axion Cosmophysics", KEK 小林ホール, 2012 年 11 月 6 日~9 日, 参加者約 80 名, 招待講演 23(海外 12, 国内 11), 一般講演 11, <http://www-conf.kek.jp/AIU12/>
 4. 第 3 回 UTQuest 研究会 ExDiP2012 "Superstring Cosmophysics", 北海道幕別町 Grandvrio ホテル, 2012 年 8 月 6 日~12 日 参加者数 34 名, 招待講演者 11 名(海外 7 名, 国内 4 名), 一般講演 9 名, <http://research.kek.jp/people/hkodama/ExDiP2012/Site/Home.html>
 5. 「背景放射で拓く宇宙創成の物理—インフレーションからダークエイジまで—」シンポジウム 2012, 高エネルギー加速器研究機構 小林ホール, 2012 年 7 月 26 日~27 日, 参加者 90 名, 招待講演 25, ポスター講演 43, <http://www-conf.kek.jp/cmb/2012/>
 6. 「背景放射で拓く宇宙創成の物理—インフレーションからダークエイジまで—」シンポジウム 2011, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (相模原) 研究管理棟(本館)2階 大会議場, 2011 年 7 月 11 日~12 日, 参加者 86 名, 招待講演 21, ポスター講演 32, <http://www-conf.kek.jp/cmb/2011/>
 7. CMB ワークショップ 2010, 国立天文台三鷹 すばる棟 大セミナー室 (1F), 2010 年 6 月 7 日~9 日, 参加者 107 名, 招待講演 23(海外 4, 国内 19), ポスター講演 32, <http://www-conf.kek.jp/cmb/2010/>
 8. "Cosmic Microwave Background Radiation and Its Foreground Interstellar Components", 2011 年 2 月 17 日, 東京都西葛西, 参加者約 50 名, <http://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/workshop/cmb11/>
 9. "CIBER science workshop", 2010 年 11 月 15-16 日・KASI, Daejeon, Korea, 20 名
 10. 第 2 回 UTQuest 研究会 "Extra-dimension probe by cosmophysics (ExDiP2010)", 2010 年 11 月 9 日~12 日 KEK 小林ホール, 参加者約 50 名 (招待講演者:海外 5 名, 国内 3 名) <http://research.kek.jp/people/hkodama/ExDiP2010/>
 11. "CMB ワークショップ 2010", 2010 年 6 月 7 日~9 日, 国立天文台 (三鷹) 参加者約 120 名, <http://www-conf.kek.jp/cmb/2010/>
 12. 第 1 回 UTQuest 研究会, 2010 年 3 月 10 日(水) ホテル浦島 (那智勝浦) 参加者:約 44 名, 招待講演者:海外 5 名, <http://research.kek.jp/people/hkodama/UTQuestWS1/>
 13. 「背景放射で拓く宇宙創成の物理—インフレーションからダークエイジまで—」領域立ち上げシンポジウム, 2009 年 10 月 7 日 東京ステーションコンファレンス, 参加者約 70 名, http://www-conf.kek.jp/cmb/ryoiki_sympto/2009/
- 【招待講演等】
- 主な講演 (各領域 3 ~ 5 講演) を厳選。その他 200 回の招待講演と一般講演を合わせて, 領域全体で 600 回を超える講演。
- 計画研究 A01 「宇宙マイクロ波背景放射偏光測定で探る超高エネルギー物理」 (全て招待講演)
1. "CMB polarization experiments", M. Hazumi, KIAS-NCTS Joint Workshop on Particle Physics, String theory and Cosmology, February 9 - 15, 2014, High1 resort, Korea.
 2. "LiteBIRD - a future satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection", M. Hazumi, 9th East Asian Meeting on Astronomy, October 14 - 18, 2013, NCU, Taiwan.
 3. "LiteBIRD - A Small Satellite for the Studies of B-mode Polarization and Inflation from Cosmic Background Radiation Detection", M. Hazumi, Beyond CORe Workshop, June 25 - 29, 2012, Paris, France.
 4. "Search for B-Modes in CMB Polarization - QUIET and Other Experiments", O. Tajima, Rencontres de Moriond EW 2011, March 13 - 20, 2011, La Thuile, Italy.
 5. "Probing Inflation with CMB Polarization Measurements - QUIET, POLARBEAR and beyond", M. Hazumi, COSMO/CosPA 2010, September 27 - October 1, 2010, Tokyo, Japan.
- 計画研究 A02 「初期宇宙探査のための超高感度アレイデバイスの研究開発」
1. "Multi-pixel superconducting direct detectors for astrophysical observations", C. Otani, GDR-I Workshop 2013, Montpellier, France, 2013.12.10.
 2. "GroundBIRD Experiment", O. Tajima, International Conference on Cosmic Microwave Background (CMB 2013), Okinawa, Japan, 2013.6.13.
 3. "Development of Millimeter-wave MKID camera for LiteBIRD and Antarctica Dome Fuji Telescope", Y. Sekimoto,

- ASIAA seminar, Taipei, Taiwan, 2013.05.15
4. "Development of TiN MKIDs for CMB observations," C. Otani, The 13th Workshop on Submillimeter Receiver Technologies in East Asia, Nanjing, China, 11-12 Jan., 2013.
 5. "Development of quantum superconducting detectors in RIKEN," C. Otani, The 1st International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD 2012), Daejeon, South Korea, Dec. 12-15, 2012.

計画研究 A03「宇宙赤外線背景放射の観測によるダークエイジの探査」

1. "Recent limits on absolute brightness of the near-infrared background", S. Matsuura, Axion Cosmophysics, KEK-CPGS-AIU2012 (Accelerators In the Universe 2012), Nov 6-9, 2012, KEK, Tsukuba, Japan.
2. "CIBER measurements of the Mean Intensity of the NIR Background", S. Matsuura, Near Infrared Background and the Epoch of Reionization, May 14-15, 2012, Austin, Texas, USA.
3. "JAXA Instrument Concept, The View From 5AU", S. Matsuura, "NASA 5AU mission symposium", 6th UC Irvine Center for Cosmology Workshop, Mar 25-26, 2010, Irvine, CA, USA.
4. "宇宙赤外線背景放射でさぐる宇宙初期天体" 松浦周二, 宇宙線研究所共同利用研究会 ガンマ線天文学～日本の戦略, 2010年9月9日, 東大宇宙線研究所.

計画研究 A04「宇宙マイクロ波背景放射と前景放射の高精度成分分離スキームの構築」

1. 「宇宙背景放射(CMB)のサイエンスと PLANCK への期

5) 「国民との科学・技術対話」について

【報道発表等】

1. 記者会見 「「ガリレオ衛星が「月食」中に謎の発光？さばる望遠鏡などで観測」 2014年 於 学術総合センター 東北大・宇宙研・東工大・北大 津村(東北大)ほか
2. 報道発表 「何もない空を光らせるもの:「あかり」が空の赤外線成分の分離に成功」 2013年 於 JAXA 宇宙科学研究所 ISAS web page 津村ほか, <http://www.ir.isas.jaxa.jp/ASTRO-F/Outreach/results/PR131227/pr131227.html>
3. BS ジャパン「咲くシーズ: #008 宇宙観測がもたらす未来」にて羽澄が出演し, 研究内容が紹介される. 2013年5月25日放送, <http://www.bs-j.co.jp/sakuseeds/08.html>
4. サイエンスチャンネル・サイエンスニュース「ヒッグス粒子発見後の宇宙物理学研究」, 羽澄のインタビューを放映, 2013年4月10日配信, <http://sc-smn.jst.go.jp/M120001/detail/M120001030.html>
5. 報道発表 「「あかり」が捉えた宇宙最初の光」 2011年 於 JAXA 宇宙科学研究所 ISAS web page 松本, 松浦ほか, 読売新聞, 産経 MSN, 日経新聞, Yahoo ニュース, マイコミジャーナル等にて報道, <http://thyme.ir.isas.jaxa.jp/ASTRO-F/Outreach/results/PR111021/pr111021.html>
6. 報道発表 「「あかり」宇宙からの謎の遠赤外線放射を検出！」 2011年, 於 JAXA 宇宙科学研究所 ISAS web page 松浦, Yahoo ニュース, マイコミジャーナル, アストロアーツ, 天文ガイド等にて報道, <http://www.ir.isas.jaxa.jp/ASTRO-F/Outreach/results/ADFS110810/adfs110810.html>
7. 科学雑誌「日経サイエンス」2011年10月号「Front Runner 挑む」で羽澄の研究を紹介.
8. プレス・リリース 「宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光観測によるインフレーション宇宙の探求に道筋」, 2011年8月24日, 高エネルギー加速器研究機構, 問い合わせ先 羽澄, <http://legacy.kek.jp/ja/news/press/2011/08241301/>
9. NHK サイエンス ZERO 宇宙の進化を解き明かせ～赤外線で見える星と銀河の神秘～, 2010年11月20日(土) [教

待」, 服部誠, 日本物理学会シンポジウム「CMB で探る初期宇宙と Physics beyond the Standard Model」, 2011年8月, 弘前, 日本.

2. "Foreground subtraction", M. Hattori, Cosmic Microwave Background Radiation and Its Foreground Interstellar Components, February 2011, Tokyo, Japan.
3. "Bolometric Interferometer", M. Hattori, The 10th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, November, 2009, Wuxi, China.

計画研究 A05「宇宙初期進化の直接観測に基づく究極理論探査」

1. "G inflation", J. Yokoyama, APCosPA winter school and workshop, 2013年01月13日～2013年01月15日, Taiwan University, Taiwan
2. "Nonlinear Massive Gravity and Cosmology", S. Mukohyama, Cosmology and Astroparticle Physics, 2012年09月20日, KITPC, Beijing, China
3. "Impact of gauge fields on inflation", J. Soda, 2012 international workshop on String Theory and Cosmology, 2012年06月15日, Grand Hotel, Pusan, Korea
4. "Infrared divergences in cosmological perturbation theory", T. Tanaka, Ginzburg Conference, 2012年06月01日, Moscow, Russia
5. "Inflation from a SUSY Axion Model", M. Kawasaki, International Conference on Particle Physics and Cosmology(COSMO 11), 2011年08月22日, Port (ポルトガル)

育] 午後 10:00～午後 10:35, あかりの成果を紹介のため出演, <http://www.nhk.or.jp/zero/schedule/index.html>

10. 竹内薫著「ブレイクスルーの科学者たち」(PHP 新書) 第8章「素粒子と宇宙のあいだ」で羽澄の研究が紹介される.
11. 報道発表「初期宇宙に大量のモンスター銀河発見」 2010年 於 東京大学 廿日出, 河野, 川辺, 松浦, 新聞各紙 (神戸, 日経, 産経, 毎日, 読売, 佐賀, 山陰中央新報, 京都, 山形, 北陸中日, 岐阜, 北國, 岩手日報, 北日本, 東京, 日刊県民福井, 上毛, 新潟日報, 信濃毎日, 秋田魁新報, 静岡, サンケイエクスプレス, 公明, 朝日小学生) にて報道, http://www.s.u-tokyo.ac.jp/press/press-2010-39_pre20100929_61ba4bf4.html
12. 科学雑誌「日経サイエンス」2010年6月号記事「総力戦で初期宇宙に迫る」で QUIET 実験が紹介された.

【アウトリーチ活動】

1. サイエンス・アゴラ WS7 (2013.11.10) 日本科学 未来館 「のぞくかがく」にて, 郡和範が小学生以上の一般の方々を対象に, 宇宙に銀河が存在するためには, ダークマターが必要だということを丁寧に解説した.
2. 2009年から2013年(9月上旬)にかけて, KEK 一般公開で宇宙背景放射観測を紹介する展示を5回にわたって公開. アンケートに回答した人数だけでも1046人を得た. 約7割の人が面白かったと回答.
3. JAXA 宇宙科学研究所では常時一般公開があり, 申込み閲覧可能である. また, 毎年7月最終週の金土曜日の2日間は, 特別公開として全研究部門が研究内容をポスターやデモ実験などで紹介. 毎年2万人を超える来場者. 宇宙科学や宇宙開発に関して直接対話する機会が多くある. 2010年は, はやぶさの回収カプセル公開で来場者が多く, 宇宙科学・技術への強い関心が寄せられた.
4. KEK サマーチャレンジという大学3年生向け合宿プログラムにて「宇宙の温度を測る」という CMB 観測実験プログラムを2009年8月, 2010年8月, 2011年8月, 2012年8月, 2013年8月, の5度にわたり主催.

5. JAXA 宇宙科学研究所の大学・研究機関連携室ではインターン生を受入れ教育している。2013 年は、文系学部の大学生が宇宙研究者の仕事ぶり調査のため、松浦周二と新井俊明のインタビューを行い、記事としてまとめた。
6. 東京国際科学フェスティバルサイエンスカフェ、2013 年 10 月、東京、津村耕司 「小さなロケット望遠鏡で宇宙の一番星を探る」、<http://kokucheese.com/event/index/103634/>
7. 全国同時七夕講演会 2013 (2013.07.07) にて、郡和範と松村知岳が小中高生を対象に、「昔むかしの宇宙のお話」について講演を行った。宇宙の始まりの理論と観測の研究についてわかりやすく解説した。
8. KEK caravan (2013.05.24) 茨城県立古河中等教育学校 にて、郡和範が中学 1 年生を対象に、「宇宙のはじまり」、「宇宙の博士になるためには?」について講演をおこなった。インフレーション宇宙論の解説と、理論宇宙物理学者になるためのキャリアパスを紹介した。
9. JAXA宇宙科学研究所では、「宇宙学校」として各地で一般向け講演会を開催している。2013年は、東大・駒場に於いて松浦周二がA03に関する研究内容を紹介した。
10. ハートピア安八主催「天文講演会」、2013年3月岐阜、津村耕司 「宇宙のはじまりをさぐれ」、<http://www.town.anpachi.gifu.jp/wp-content/uploads/2013/02/5baa688ccd210c5f074bdca949d6ffb7.jpg>
11. 天文学普及プロジェクト天プラ主催「まるのうち宇宙塾」、2012年12月東京、津村耕司 「宇宙の一番星の探査」、<http://www.tenpla.net/maru/>
12. JAXA主催「宇宙学校みずなみ」、2012年12月岐阜、津村耕司 「宇宙望遠鏡で探る現在の宇宙の姿」、http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/event/2012/1202_mizunami.shtml
13. 大阪大学第28回湯川記念講演会 (2012.10.7) にて羽澄が「観測で探る宇宙の起源 -膨張する宇宙の謎をめぐって-」と題して講演。
14. 新宿ロフトプラスワン・マツドサイエンティスト・ナイト「ウは宇宙論のウ」(2012.09.30) に羽澄、松村知岳、片山伸彦が出演し、CMB観測について語る。
15. 全国同時七夕講演会 2012 (2012.07.07) にて、郡和範が「私は誰の子?宇宙の子 -宇宙のはじまりと未来のひみつ-」について講演を行った。小中高生を対象に、宇宙初期や星の中で起こる元素合成について解説した。
16. KEK 公開講座 2012 (2012.06.30) にて、郡和範が一般の方々を対象に、「宇宙のダークエネルギーとはなにか?」について丁寧に解説した。
17. 文部科学省主催Science Cafe Tokyo「目指せ!木星」、2012年4月東京、津村耕司 「木星から宇宙の果てを探る」、<http://cafesci-portal.seesaa.net/article/259661203.html>
18. KEK caravan (2012.01.06)大分県立日田高校にて、郡和範が高校 2 年生を対象に、「宇宙のはじまり・光速を超えるニュートリノ・霧箱実験」と言うタイトルで、インフレーション宇宙論について解説。また、霧箱実験を行って、放射線についての正しい理解の必要性を講演した。
19. 2011年12月23日、昭和女子大学クリスマスレクチャー「激動する宇宙」にて羽澄が「ビッグバン以前の宇宙はみえるか? -宇宙電波研究の最前線」と題して講演。
20. KEK caravan (2011.09.23)大分県立大分舞鶴高校にて、郡和範が一般公募した中学 3 年生を対象に、インフレーション宇宙論と、理論宇宙物理学者になるためのキャリアパスを紹介した。
21. 2011年6月17日 東北大学全学教育科目地球と宇宙の科学 担当3コマの内1コマで科研費の研究活動に関わる内容を講義(講義タイトル“宇宙の創成と深化を探る)。講師 服部 誠、受講者69名(東北大1年生47名)。
22. 2011 年度 理化学研究所 和光本所 一般公開 (2011 年 4 月 23 日) ポスター展示「未来の光テラヘルツ光の魅力」、サイエンスカフェ「テラヘルツテクノロジー<見えないものを見せる力>」
23. 2010 年 11 月 13 日 大阪大学「最先端の物理を高校生に Saturday Afternoon Physics」にて羽澄が「宇宙への旅立ち—ビッグバン以前を見る—」と題して講演。
24. 2010 年度 理化学研究所 仙台支所 一般公開「オドロキいっぱい!テラヘルツっておもしろい!」(2010 年 7 月 31 日) ポスター展示「テラヘルツセンシングとイメージング」、と超伝導コースターのデモを行った。
25. 2010 年度 理化学研究所 和光本所 一般公開 (2010 年 4 月 17 日) ポスター展示
26. 2010 年度宙博に CMB 観測装置を展示。宙博には 3 日間で約 3 万 1 千人の入場者があった。
27. 大阪大学 Saturday Afternoon Physics 2010 という高校生向けプログラムに講師として羽澄昌史が講演(2010 年 11 月 13 日)。参加者 141 名。アンケートによると、内容の難易度は適切であったとの回答が最も多かった。
28. 2010 年度 国立天文台 一般公開 (2010 年 10 月 23 日) 計画研究 A02 で開発した超伝導デバイスをを用いた検出器デモ実験を実施し好評を博す。
29. JAXA 宇宙科学研究所では、一般読者向けに ISAS メールマガジンを発行し、宇宙科学にまつわる研究や研究者の雑感を紹介。A03 の研究内容を 310 号 (津村耕司) と 344 号 (松浦周二) で紹介した。
(<http://www.isas.jaxa.jp/j/mailmaga/index.shtml>)。
30. JAXA 宇宙科学研究所・宇宙教育センターでは、学校等から申込などにより研究者と直接対話する機会を設けている。松浦周二は、研究という仕事について中学生と対話した。当人が対話内容について中学校の授業での研究レポートとして発表し、多くの興味をひいた。
31. 2010年7月28-29日 東北大理学部オープンキャンパスにて体験授業実施。講師 服部 誠、授業タイトル“ビッグバン以前を観る”，受講者数 100名(高校生85名，大学生 13名，保護者2名，男女比6:4)，分かり易かった・素敵だった・情報量が多かった等の声を聞く。
32. 2010年7月2日 東北大全学教育科目地球と宇宙の科学 担当3コマの内1コマで科研費の研究活動に関わる内容を講義(宇宙の創成と深化を探る)。講師 服部 誠、受講者69名、アンケートでは高校生が将来の進路選択に大きな影響を受けたと回答するなど大きな反響あり。
33. 2009 年 11 月 20 日 KEK 公開講座にて羽澄昌史が「ビッグバンの前を探る新しい宇宙観測」と題して講演をおこなった。10代から70代まで分布する参加者120名を得た。アンケートでは、わかりやすかったとの回答が83%。
34. 2009 年度 理化学研究所 仙台支所 一般公開「見えない光のサイエンス~テラヘルツ~」(2009 年 8 月 1 日) ポスター展示「テラヘルツセンシングとイメージング」、超伝導コースター等のデモをおこなった。
35. 2009年10月15日 宮城県立角田高校にて大学出張講義、講師 服部 誠、授業名“宇宙の構造形成の標準モデルとその観測的検証の現状”，受講者数27名(高校生25名，教員2名，男女比7:3)，ビッグバンより前があるとは知らなかった等新しい知識が得られて良かったとの回答多数
36. 2009年11月10日 東北大全学教育科目天文学概論にて講義、講師 服部 誠、講義タイトル“宇宙論研究の最前線”，受講者数 250名(東北大1年生，経・文・法・医・歯・教育学部，男女比6:4)，今まで受けた授業で最も良かった等絶賛される。

10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1ページ程度）

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

【要旨】本領域の成果は、「宇宙創成の解明」と「物質の根本法則の解明」という物理学のグランドチャレンジに関する新しい時代の到来をもたらし、物理学全体に大きなインパクトを与えている。BICEP2実験の発表を契機として、POLARBEAR/POLARBEAR-2による観測がますます重要な状況となっており、当該学問分野を超えて世界的な注目を集めている。本領域の成果は天文学分野にも刺激を与え、素粒子・宇宙・天文が交差する新たな共同研究を産み出す場を提供している。衛星観測に向けた技術開発の成果は、宇宙・天文分野にとどまらず、産業応用までも視野に入れた今後の展開を可能にした。

本研究領域ではCMB偏光とCIRBの精密観測、および関連する理論的研究を推進した。一見狭い領域の特殊な課題と思えるこれらの研究は「宇宙創成の解明」と「物質の根本法則の解明」という物理学のグランドチャレンジのまさに中心をなすものである。本領域の研究成果（項目3および項目8参照）は、これらのグランドチャレンジに関する新しい時代の到来をもたらした。重力レンズに起因するCMB偏光Bモードを世界ではじめて観測したことは、CMB偏光精密観測により今後産み出される豊潤な宇宙論的知見の出発点として記憶されるべき成果である。物質の根本法則を解明する新しい手法を確立したという意味で、物理学全体に大きなインパクトを与えている。また、大きな原始重力波が生成される理論モデルを提示したことは、従来の常識を覆した成果であり、素粒子論の最重要課題である量子論と重力理論の統一に大きなインパクトを与えた。CMB偏光観測がこのような理論を実証できた場合には、量子論の再考すら視野に入れた物理学自体の再構成にまで話が及ぶ可能性があり、実験・理論双方の研究を大きく刺激している。

本領域の研究が終了した2014年3月に、米国を中心するBICEP2実験が南極での観測により原始重力波に起因するCMB偏光Bモード信号を発見したと発表した。多数の報道があり、国民一般の関心も非常に高い。すべての科学研究の中で、CMB偏光観測は、我々人類が存在するその起源についての最も直接的な探求であり、科学を超えたセンス・オブ・ワンダーを掻き立てるからである。BICEP2の結果が他実験の検証をパスすれば、「科学史上100年に一度の大発見」になるとも言われている。平成26年度にはじまる科学研究費補助金・基盤研究(S)によるPOLARBEAR-2計画は、本新学術領域研究をさらに発展させるものであり、BICEP2の検証とそれを超えたインフレーション宇宙探求において、今後5年間のCMB偏光観測をリード出来る可能性が高い。したがって、宇宙・素粒子・天文分野を超えて、世界的に高い注目を集めている。学問的にかくも重大な局面が生じることは極めて稀であり、我が国の研究がそこで決定的な役割を果たせる機会が出来たことは、本新学術領域研究が真に時宜を得ていたものであったことを如実に示している。

本領域の成果は天文学分野にも刺激を与え、素粒子・宇宙・天文が交差する新たな共同研究を産み出す場を提供している。本領域のCMB観測と超伝導検出器アレイデバイス開発の成果が契機となった新たな提案の例として、可視光全天偏光サーベイにより前景放射に関する有用な情報を引き出す提案（広島大学など）、MKIDsを用いた将来の南極10mテラヘルツ望遠鏡計画（筑波大学など）、ダークマター探索計画（岡山大）、X線天文観測グループとの共同開発（JAXA宇宙科学研究所など）などが挙げられる。CIRBの観測も多く新たな共同研究の起点となっている。CIBER実験により未知の赤外超過成分の存在が明らかになったが、この超過成分は超高エネルギーγ線で与えられる制限と矛盾する可能性があり、赤外線天文学と高エネルギー宇宙物理学との交流が活性化している。計画研究A03とA04の連携により完成したあかり衛星の全天マップは、前景放射分離の研究に加えて、今後は他の天文研究のデータベースとしても役立てられる。宇宙再電離史の詳細と再電離機構の解明、星間塵の組成及び整列機構の解明、銀河磁場の構造・起源の解明、銀河ヘイズ起源解明へと繋がっていくと考えられる。

衛星観測に向けた技術開発の成果は、宇宙・天文分野にとどまらず、産業応用までも視野に入れた今後の展開を可能にした。太陽電池やワイドギャップ半導体の検査技術といった低炭素化社会実現に向けた産業利用の新たな可能性が切り拓かれた。さらに、信号読み出しシステム開発では、KEKのOpenItコンソーシアムにより技術を共用・公開し、誰もが使える技術として提供している。また、GroundBIRD冷凍機駆動用に開発・特許申請された回転継手は、20気圧ものガスを通せる画期的な回転継手であり、海外研究機関や企業からの利用希望が多数あり、基礎科学の枠組みを越えた幅広い利用が期待される。