

領域略称名：宇宙創成の物理  
領域番号：2110

平成23年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る研究経過等の報告書

「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23年6月

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

## 2. 目次

1. 表紙.....	p.1
2. 目次.....	p.2
3. 研究領域の目的及び概要.....	p.3
4. 研究の進展状況.....	p.4
5. 研究を推進する上での問題点と今後の対応策.....	p.5
6. 主な研究成果.....	p.6
7. 研究成果の公表の状況(主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等).....	p.22
8. 研究組織と各研究項目の連携状況.....	p.28
9. 研究費の使用状況(設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む).....	p.31
10. 今後の研究領域の推進方策.....	p.32
11. 総括班評価者による評価の状況.....	p.33

### 3. 研究領域の目的及び概要

(1頁以内目安)・冒頭には、研究領域名、研究期間、領域代表者所属・職・氏名、補助金交付額(年度別、研究領域全体の直接経費の額)を記載してください。

研究領域名：「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—」

研究期間：平成21年度～平成25年度

領域代表者所属・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・素粒子原子核研究所・教授・羽澄昌史

補助金交付額(直接経費、千円)

平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	合計
244,700	235,900	233,900	236,500	192,500	1,143,500

#### 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ミリ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。

#### 研究の概要

宇宙は熱い火の玉状態からビッグバンではじまったとされるが、その答えだけでは不十分であり、研究の最先端は、いまや「ビッグバンの前」を科学の目で捉えようとしている。ビッグバン以前を記述する仮設で最も有望かつ常識では信じがたい提案がインフレーション理論であり、その観測的検証は現代宇宙論の中心課題である。インフレーションの最も重要な予言は、原始重力波の生成である。原始重力波は、宇宙背景放射の偏光度分布に、他の物理現象では作れない渦状のパターンを刻印する。

「Bモード」と呼ばれるこの渦パターンを検出するのが原始重力波を発見するベストな方法として知られている。本領域では、最新の偏光計アレイを標高5000メートルに設置し、世界最高感度の観測によりBモードの探索を行う。インフレーションのエネルギーポテンシャルが力の大統一スケールにある場合には、原始重力波が発見される可能性は高く、宇宙の起源の探究にとって画期的な成果となる。さらにその結果を究極理論の予言と比較して、地上実験では到底到達できない超高エネルギーの物理に突破口を開くことが期待される。本領域では、実験・観測研究に加えて究極理論探査を目的とする理論研究を行い、観測結果が量子重力理論の検証にとってどのような意味を持つかを明らかにしていく。地上でBモード発見の兆候が得られた場合、人工衛星による全天精密観測が極めて重要になる。それを目指して、本領域では、将来の観測の成否を握る超伝導焦点面検出器アレイの開発、およびそれと密接に関連した人工衛星の設計研究を行う。Bモードの精密測定には、前景放射と背景放射の分離が極めて重要となるため、新しい分離方法を発明することも本領域の課題である。

星や銀河は、初期宇宙の量子論的揺らぎが進化したものだ、というのがインフレーション理論の驚くべき帰結である。これを確かめるには、ダークエイジとよばれる最初の天体ができたと考えられている時代の観測による解明が肝心であり、本領域では赤外線背景放射の観測というアプローチでダークエイジの理解を深化させていく。

## 4. 研究の進展状況

(1頁以内目安)・研究項目毎にこれまでの研究の進展状況を具体的に記載してください。

### 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」

全般的に順調に進んでいる。QUIET実験の初期観測結果を発表した。データの一部のみ用いたにもかかわらず、世界第2位の感度を実現した。今年度100%のデータを用いて結果を出せば世界最高感度に到達する予定である。全体にわたり本領域の研究者がリーダーシップを発揮し、国際会議においてもQUIETを代表して発表を行っている。QUIET実験アップグレードのR&Dも順調に進行し、装置に関する論文を投稿し、受理された。その他国際会議等で装置に関する発表をおこなっている。

POLARBEAR実験はカリフォルニアでの予備観測を終えてチリでの本観測を今年度開始する予定である。予定通り、研究期間内に高統計の原始重力波探索結果を論文投稿できる予定である。さらに、米国側の予算で新たに望遠鏡を追加できることになり、受信機システム(POLARBEAR2)を本領域が担当することとなった。最終年度に観測開始の予定である。予定通りいけば、これは当初の予定を超えたエクストラサクセスとなる。

人工衛星の設計研究も順調に進行し、米国の研究者も含め50人を超える研究者が参加している。研究会等で多数の口頭発表を行っている。計画研究A02との連携で、衛星搭載のための超伝導検出器のフィールドテストのプラットフォームの作成に着手した。これは衛星のプロトタイプとしても機能させ、一石二鳥を狙うデザインとなっている。これも提案時より高いレベルの連携のアイデアである。

### 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およびCIRB観測のための高感度アレイ検出器の開発では、入射放射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、および、分布線路型と呼ばれる新たなSTJ検出器を開発した。一方、Cooper対解離を用いる点では同じ(従って、感度も同じ)だ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。MKIDsは作製プロセスや開発要素がSTJ検出器と共通し、素子構造が簡素でアレイ読み出しも容易なことから、当初計画を発展させる形でMKIDs検出器を採用することとした。研究は順調に進捗しており、感度 $NEP=10^{-17}$  W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、16chアレイ作製・読み出しを実現した。また、アレイ読み出し用高周波回路の試作・試験、および、A01と連携して冷凍機・光学系を含む地上観測用システムの開発を進めた。

### 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」

予定どおり、宇宙赤外線背景放射の観測を、あかり衛星やロケット実験により実施した。その結果、世界で初めて可視・近赤外域での宇宙背景放射のスペクトル測定に成功するとともに、赤外波長全域での宇宙背景放射ゆらぎの測定に成功し、宇宙初期天体に関する新たな知見を得た。これらの成果を、学術誌や学会・研究会で公表するとともに、一般科学誌や報道により紹介した。また、今後の研究進展のため、次期ロケット実験にむけた装置改良や将来ミッションの装置設計をすすめている。

### 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」

東北大学の高速PCクラスタにおいて、「あかり」遠赤外線域全天地図作成処理が進められている。既存の天の川銀河系磁場モデルの問題点を明らかにし、天体物理学的根拠を持ち且つ既存の関連観測結果を説明できる天の川銀河系磁場モデル提出を目指した磁気流体数値シミュレーション実施準備も着実に進んでいる。さらに、天の川銀河系内塵からの偏光放射の最も高い精度のデータを提供している米国のBICEPチームと連携し、データを移設して塵からの偏光放射モデル構築を遂行している。

### 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」

研究は順調に進んでおり、これまでに、インフレーション宇宙モデルにおけるゆらぎの生成と観測的特徴の研究および統一理論に基づく整合的インフレーション宇宙モデルの構築という課題を中心として、100編近くの論文が国際公開プレプリントサーバーarXivに登録され、そのうちすでに70編余りが査読付きの学術誌に掲載されている。これらの論文の総引用数も800に上る。

## 5. 研究を推進する上での問題点と今後の対応策

(1頁以内目安) ・これまで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とった対応策、また、現在問題となっている点がある場合には、それを解決するための今後の対応策等について記載してください。

### 東日本大震災の被害と対応について

2011年3月11日に起きた東日本大震災により、本領域研究の研究拠点のいくつかで被害があった。幸い、死傷者はなく、物品に関しても研究推進上大きな問題となるような被害は生じておらず、各計画研究とも最終目標を達成することは可能な状況である。しかしながら、計画研究によっては、現時点で計画に若干の遅れが出ている項目もあり、それらについては今後少しずつ遅れを取り戻せるように人員を増やす等の処置を行っている。以下、簡潔に具体的被害と対策についてまとめる

高エネルギー加速器研究機構（茨城県つくば市）で使用している実験室の天井から空調ダクトが落下、天井の一部も破損するという被害があった。引き続き危険があるため、天井の破損があるエリアから実験装置を移動し、一時的に別の場所を借りて研究活動を行っている。天井の修理が7月中には完了する予定であるため、8月に元の配置に戻す予定である。データ解析に用いるコンピューティングサーバーを置いてある建屋も回りの地盤の崩落と空調の破損があったため、計算機を全て別の建物に移動して運用している。この建屋の復旧は8月に完了する予定であり、9月に計算機を再移動する予定である。

震源に近い東北大学では、転倒防止板の設置等出来る限りの耐震処置を施していたにもかかわらず、地震により計画研究A04で活用しているPCクラスタが転倒した。東北大学内の加速度計の測定結果からPCクラスタが設置されていた部屋の加速度は1000ガル以上の激震であったと推定されている。復旧後運用は出来ているが一部のノードが不安定な様相を示すことがあり、突然不調をきたす可能性は否定できず、まだ予断を許さない。被災物品リストからは外れている為、今後はっきりと故障した場合など、震災の影響が大きいと思われるが対処が難しいという状況に陥る可能性がある。震災から一カ月以内に行われた被災調査のみを根拠に被災物品リストを作成し、予算を計上するシステムとなっていたが、被災地の混乱した状況を考慮してほしかった。中長期のモニターで初めて明らかになった震災被害に対処する対応策を訴えていく。このPCクラスタが作成を担う「あかり」遠赤外線域全天地図は、世界の天文学にとっても財産となる結果であり、震災の影響で滞ることは是が非でも回避しなければならない。

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」では、高エネルギー加速器研究機構、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。立ち上げ後にいくつかの装置不良があり、修理等を余儀なくされた。

### 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」で推進する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、現在のQUIET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。

### 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、今後使用予定の観測ロケットの安全装置改良に時間を要するため、次回ロケット実験実施は当初の予定から半年以上遅延する（2012年2月予定）。これに伴い、計画の玉突き遅延が生じ、研究期間内での観測数の減損が懸念される。データ解析や科学的考察により多くの時間を割くことで成果の補償を試みる。

## 6. 主な研究成果

これまでの主な研究成果について、研究項目毎に2~3頁程度を目安とし、図表等を用いて分かりやすく記載してください。

### 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) QUIET 実験の初期観測結果

わたしたちが現在存在している宇宙は、超高温・超高密度の火の玉状態（ビッグバン）から、はじまり、約137億年かけて現在の大きさの宇宙に膨張したと考えられている。では、ビッグバンの前には何があったのだろうか？ それに答えるのがインフレーション宇宙論である。インフレーション宇宙論によると、宇宙はそのはじまりに、急激な加速膨張を起こしたとされている。その際に生成された原始重力波を宇宙マイクロ波背景放射（CMB）偏光の特殊なパターンである「Bモード」として観測することができる。インフレーションのポテンシャルエネルギーは「 $r$ 」というパラメーターで記述され、Bモードの強度は  $r$  にほぼ比例する。 $r = 0.01 \sim 0.1$  あたりの強度が、主要な理論で有力視されている。このインフレーション理論の決定的証拠であるBモードの発見をめざして、QUIET実験はCMB偏光の精密観測を高度5,000mを超えるチリ・アタカマ高地でおこなっている。QUIET実験は2008年10月から観測を開始し、10,000時間をこえる観測データを蓄積してきた。43GHz帯に感度をもつレーザー（CMB偏光測定器）を搭載して観測を開始し、途中(2009年6月)で95GHz帯レーザーに交換し観測を続けた。図1にQUIET実験観測装置を示す。



図 1: [左図]QUIET実験の観測装置と周辺の様子。[右図]装置内部（左図四角枠の部分）。

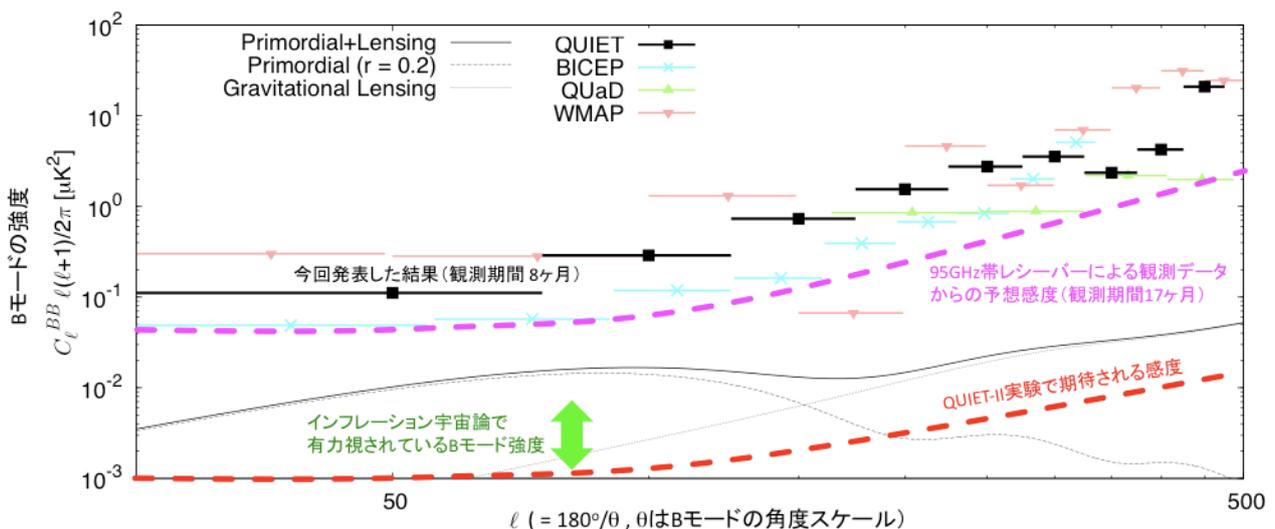


図 2: QUIET実験や他実験によるBモード探索リミット。43GHz帯レーザーによる観測データ(観測期間8ヶ月)により、世界第二位のリミットを達成した。95GHz帯レーザーによる観測データ(観測期間17ヶ月)により、世界最高のBモード探索感度を達成する見通しである。観測装置のアップグレード(QUIET-II実験)により、有力な理論から期待される強度のBモードを網羅することが可能になる。

2010年12月にQUIETの43GHz帯レシーバーによる観測結果を論文投稿した。観測期間はおよそ8ヶ月、総観測時間の約1/3にあたる。まだBモードの発見には至らないが、Bモードに対して世界第二位の上限値( $r < 2.2$  @ 95% C.L.)を与えた。図2はQUIET実験とその他の実験によるBモードの上限値である。現一位のBICEP実験は2年間の観測結果( $r < 0.73$  @ 95% C.L.)であり、QUIET実験43GHz帯レシーバー装置の感度はそれと互角であることがわかった。QUIET実験の95GHz帯レシーバーは43GHz帯レシーバーよりも約1.5倍優れた感度を実現している。2010年12月末までの観測データにより、世界最高のBモード探索結果が期待される。

今回の結果で、もう一つ注目すべき点は、QUIET実験が系統誤差に対して極めて強固であることを証明した点である。Bモードは極めて微弱な信号である。近い将来、Bモードを確実に発見するためには、検出器感度の向上だけでは不十分であり、従来の観測実験よりも桁違いに小さな系統誤差を達成する必要がある。図3はQUIET実験が達成した世界最小の系統誤差であり、本格的なBモード探索へ向けて、十分な精度であることを示している。また、示されている系統誤差のうち主要なもの原因は特定されており、更に小さくする見通しがたっている。既に95GHz帯レシーバーの観測にそのような改良が反映されているため、今後の結果ではさらに優れた精度を達成する見通しである。

QUIETグループは、KEKと米国シカゴ大、カリフォルニア工科大、JPL、プリンストン大などの研究者40余名で構成される国際実験グループである。

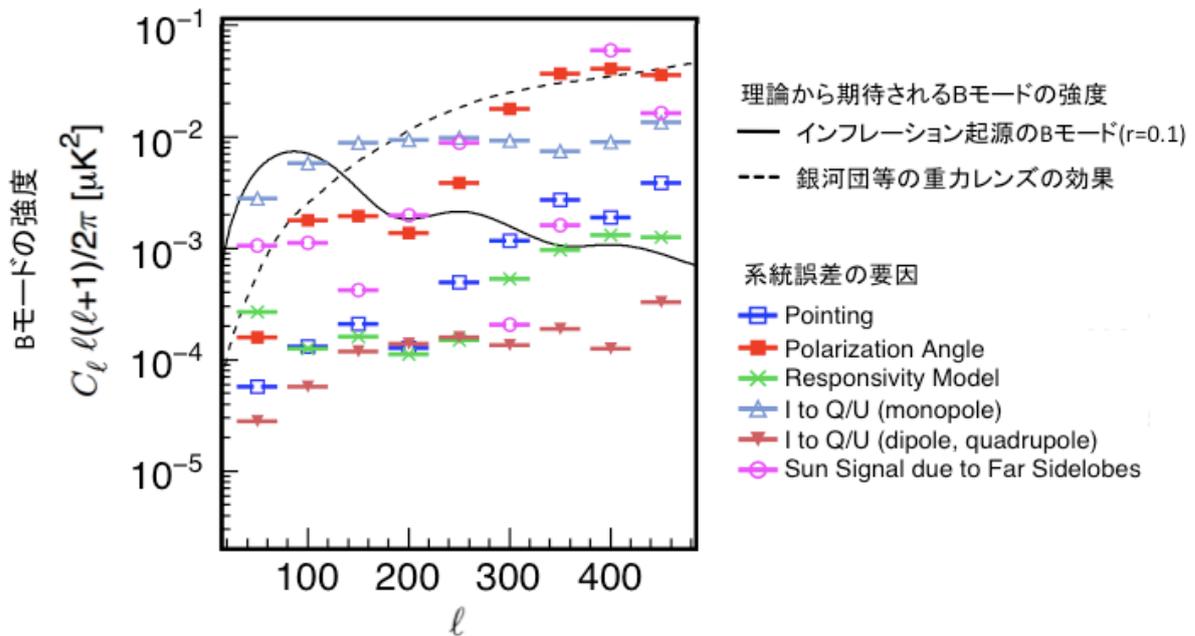


図 3 : QUIET実験が達成した世界最小の系統誤差。本格的なBモード探索へ向けて、観測装置の強固さを証明した。

(2) QUIET 実験アップグレード (QUIET2) の R&D

上記のアップグレードを達成するために不可欠となるコンパクトADC (アナログ・デジタル・コンバーター) の開発を行った。合計500個の偏光計を搭載する予定のQUIET2では、これまで使ってきたADCシステムより集積度の高いコンパクトADCが必要とされる。図4に開発したADCの写真、図5にノイズ測定結果を示す。標準サイズ(VME 6U規格)で64チャンネル読めるようになっている。ノイズ (図5) もチャンネル間の

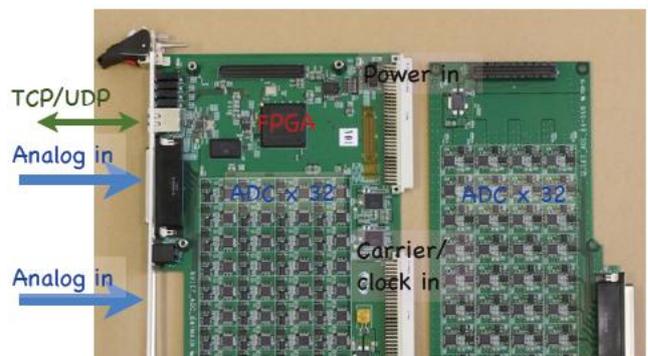


図 4: QUIET2 ADCの写真。Sub boardをMain boardに装着して使用する。

クロストークも小さく、システムの要求を満たしていることを確かめた。これらの結果は2011年6月に開催された国際会議TIPP2011で報告した。

500個の偏光計の特性を実際の観測時の状況に近い状態で観測するための新しい性能評価システムの開発も行った。現在のQUIET実験では、実験室で行ったチューニングをチリに設置してからやり直す必要が生じた。原因は、実験室で使っていた放射体の温度と観測時の空の温度とが異なることであった。QUIET2のように多数の偏光計を用いる実験では、観測値でのチューニングは避ける必要がある。このため、機械式冷凍機を用いた新しいシステムを構築した。装置概要と写真を図6に示す。ミラーが回転することにより異なる温度の放射体からの放射を偏光計に入射できる。実験室で本番の観測環境を再現するような試験システムはこれまでなかった新しいものであり、技術論文をReview of Scientific Instrumentsに投稿し、受理された。

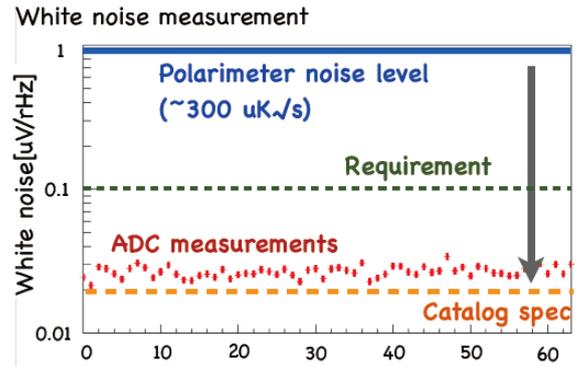


図 5 : QUIET2 ADCのノイズ測定結果。横軸はチャンネル番号。

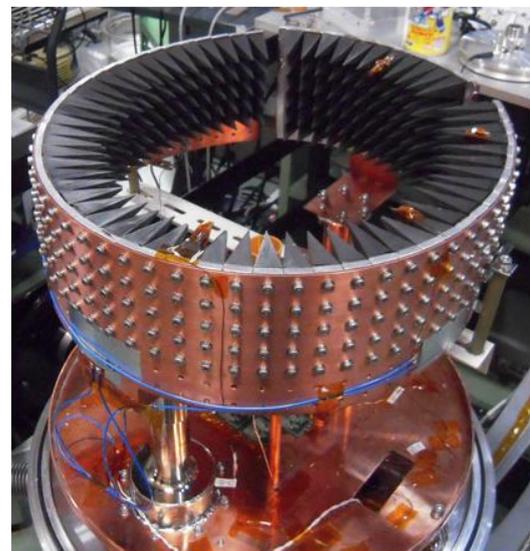
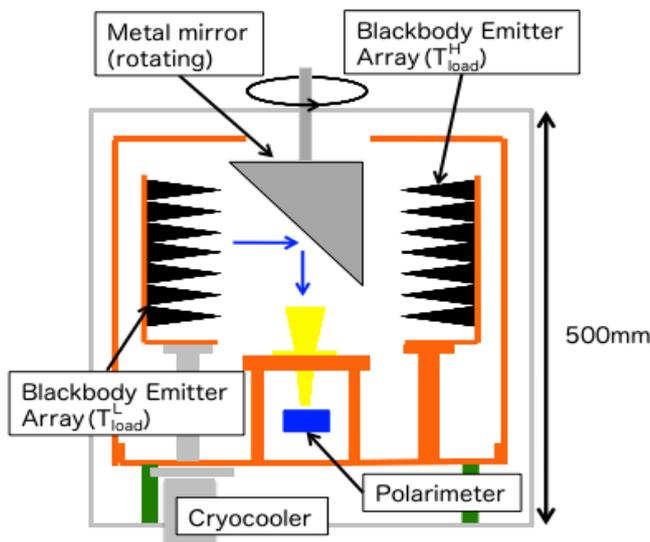


図 6 : QUIET2試験システムの概念図 (左図) と写真 (右図)。

### (3) POLARBEAR 実験の準備

チリにおけるもう一つの観測プロジェクト

POLARBEARは、超伝導転移端センサー (TESボロメータ) を用いてQUIETより高い周波数である150GHzの観測を行う。2010年にカリフォルニアで試験観測を行い、実際に観測を行いながら受信機や望遠鏡の動作確認、性能評価などをおこなった。この予備観測は成功に終わり、今年度にチリにおいて観測を開始する予定である。図7はPOLARBEAR望遠鏡の写真である。直径3.5mの望遠鏡 (QUIET望遠鏡の2倍強の大きさ) は角度分解能4arcminを実現する。小角度の構造まで観測できるので、重力レンズによるBモードを発見する上で、大きな強みとなっている。



図 7 : POLARBEAR望遠鏡

#### (4) POLARBEAR 実験アップグレード (POLARBEAR2)

米国側が新たに予算を得て、前頁の望遠鏡と同形のものを追加して配備できることとなった。偏光計アレイを搭載したレーザーシステムを新たに作成することが必要となり、本計画研究が中心となって開発を行うことになった（米国側にはレーザーシステムの追加予算はついていない）。

POLARBEAR2とよぶこのレーザーシステムは、現存のレーザーシステムのコピーではなく、より大きな焦点面により多くの偏光計アレイを搭載し、かつ90GHzと150GHzの二つの周波数を同時に観測できる新しいタイプの偏光計を用いる。偏光計アレイ用TESボロメータの開発には、カリフォルニア大バークレー校のマイクロファブリケーションラボを用いるが、現場の開発は日本人研究者が大きく貢献中しながらおこなっていく。クライオスタットを含むレーザーシステムに関しては、高エネルギー加速器研究機構が主導していく。これまでに焦点面のクライオスタットの設計は完了しており、光学系についての詳細な設計を進めているところである。現時点でのPOLARBEARレーザーシステム概念図を図8に示す。

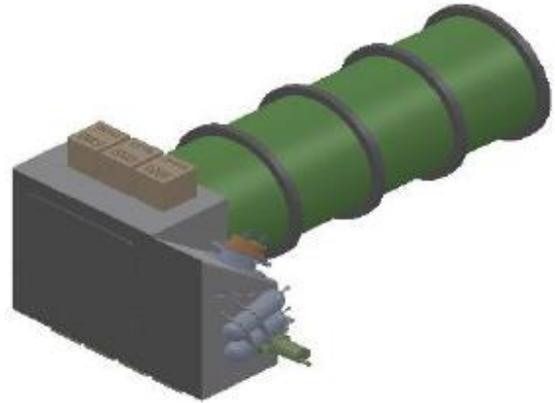


図 8: POLARBEAR2レーザーシステム概念図

#### (5) 人工衛星 LiteBIRD のデザイン研究

rの観測のポイントは、高い角度分解能は必要ない、従って望遠鏡は小さくてよいということである。目的をrの測定に絞ってしまえば、小型科学衛星でよいことになり、これを真剣に検討すべきである。欧米では主に中・大型の多目的CMB偏光観測衛星計画が主に検討されており、打ち上げは2020年代中盤以降となる可能性が高い。従って、小型衛星をいち早く打ち上げるという戦略は非常に魅力的である。このような考えのもと、本領域ではJAXAの小型科学衛星ワーキンググループの一つとして、LiteBIRDワーキンググループを立ち上げ、デザイン研究を推進している。LiteBIRDワーキンググループの主査は羽澄昌史 (KEK)、メンバー (2011年3月現在) は、JAXA、岡山大、カリフォルニア大・バークレー校、LBNL、近畿大学、KEK、筑波大、テキサス大学オースティン校、国立天文台、東北大、理化学研究所、横浜国大に属する研究者で総勢50名である。図9に現在の衛星概念図を示す。これまでに

- マッピングスピードの詳細な解析を行い、焦点面の概念設計を完成させた。
- L2 および LEO 軌道のそれぞれについて第一段階の熱設計を行い、成立解を見出した。
- 前景放射除去に関するシミュレーションを行い、スカラーテンソル比 r の測定への系統誤差を 0.01 以下のレベルまで抑え込めることを示し、結果を論文発表した。
- ZEMAX を用いた光学系のシミュレーションを実行し、透過型、反射型の両方について検討を行った結果、反射型を採用することにした。プロトタイプを製作した。
- テレメトリーについてデータ転送量、圧縮率などの研究を行い、要求分析を完了した。FPGA にロジックを実装し、動作を確認した。
- A02 との連携研究として、LiteBIRD のデザインをもとにした地上実証プラットフォーム GroundBIRD というアイデアが生まれ、製作を開始した。

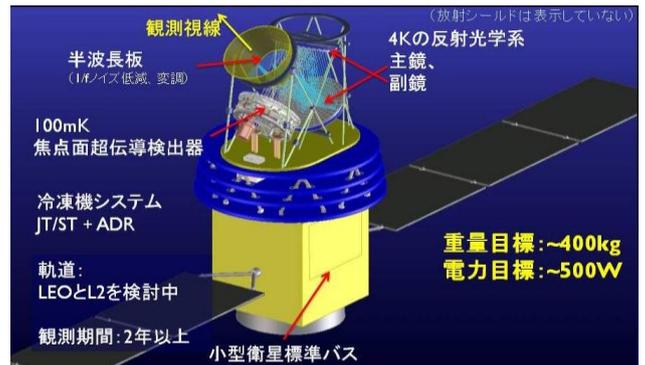


図 9 : LiteBIRD概念図

## 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」

本計画研究では、超高感度のアレイ型検出デバイスの開発、アレイ素子読み出し回路の開発、試験観測のためのシステム開発を行った。成果は多岐にわたるので、概要をかいつまんで紹介する。

### ● 超伝導トンネル接合素子（STJ）を用いた検出器の開発

STJ検出器は、入射放射によるCooper対解離で発生した余剰準粒子により発生するトンネル電流を読み出す。このSTJ検出器として、薄膜マッチング型検出器、および、分布線路型検出器を新たに考案し、原理実証実験に成功した。分布線路型STJでは、Nb超伝導体中の準粒子の平均自由行程（ $\sim 10\mu\text{m}$ ）に対して十分長い分布線路長の素子でギャップ周波数におけるシャープな感度上昇が確認された。また、分布線路型STJ検出器では、Nb/Al/AIOx/Al/Nb膜においてAl層の厚みでギャップ周波数を制御できることが明らかになり、この厚みを変えることで同じタイプの検出器をCMB観測（ミリ波観測）にもCIRB観測（テラヘルツ波観測）にも対応させられることがわかった。

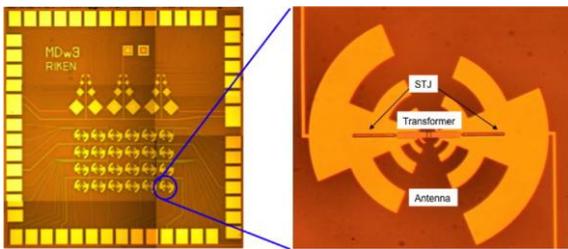


図10. 作製した分布線路型STJ検出器

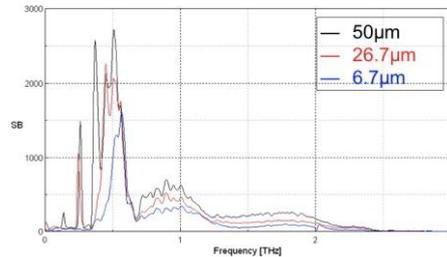


図11. 分布線路型STJのスペクトルレスポンス

### ● マイクロ波力学インダクタンス検出器（MKIDs）の開発

MKIDs 検出器は、入射放射による Cooper 対解離によって減少する力学インダクタンスを回路に流したマイクロ波信号の変化として読み出す。MKIDs は、複数の積層と非常に薄いトンネル障壁が必要な STJ 素子とは異なり、単層の超伝導膜に構造を作り込むことで素子作製ができ、作製プロセスが簡便な上に高い均一性の実現が容易である。加えて、マイクロ波の共振で信号を読み出すため、各画素の共振周波数を少しずつ変えることで数 100 チャンネルを容易に並列読み出しでき、信号線の数も STJ の数 10 分の 1～数 100 分の 1 にできるため、冷凍機の熱負荷も劇的に低減できる。また、素子性能向上のためのプロセス開発要素が STJ 素子と共通である。このような理由から STJ 素子開発と並行して研究を進め、国内初となるデバイス作製、感度として  $\text{NEP} = 10^{-17} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、Q 値  $5 \times 10^5$  を達成した。これらの結果をもとに、100 素子の素子設計を行った。

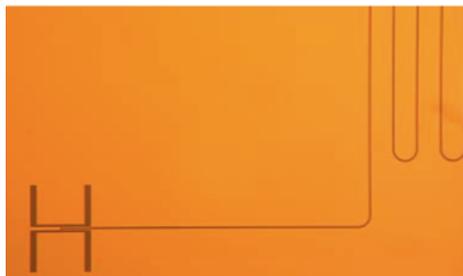


図12. 作製したMKIDs素子の一例

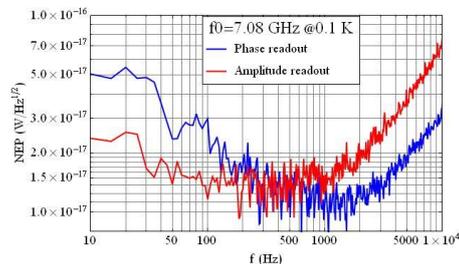


図13. MKIDs素子のノイズスペクトル

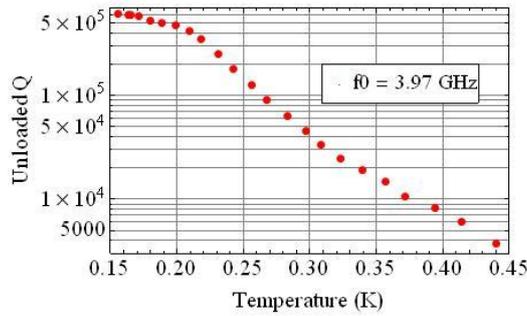


図14. MKIDsのQ値の温度依存性

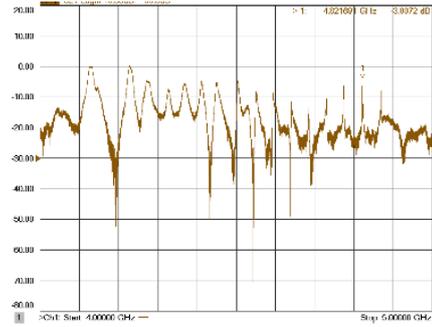


図15. 多チャンネル信号の一例

● 低雑音化のための理論的検討と新プロセスの導入

STJ や MKIDs の雑音の要因として、超伝導体膜中の格子欠陥や不純物によって Cooper 対の解離／再結合が発生し、定常的な余剰準粒子 (=Cooper 対の減少) が起こる可能性を指摘した。(特願 2009-205379 : 成瀬雅人、野口卓、関本裕太郎、国立天文台、複素ギャップモデルを適用した超伝導薄膜の表面抵抗の計算手法) この仮説の検証として、STJ 素子、および、MKIDs で超伝導ギャップの虚数項の大きさを検討し、実数項の  $10^{-2}$  倍程度とすると実験結果をうまく説明できることが両方で独立に確認された。この雑音の低減のために分子線エピタキシー (MBE) 装置を導入して単結晶薄膜および低不純物を実現する環境を構築した。結晶性／不純物濃度と性能の相関性については現在研究を進めている。

● 多チャンネル読み出しシステムの設計・製作・試験

交流信号を用いた多チャンネル信号の読み出しの実現に向けて検討を行った。具体的には、MKIDs について、共振ピークの減衰を見る従来型の吸収型読み出しに加えて、共振ピークそのものを測定する透過型読み出しを新たに考案・作製し、ミリ波検出に成功した。透過型でのQ値は90,000を達成した。また、多色での検出を目指すために、従来のコプレナー導波路(CPW)型MKIDsに加えてマイクロストリップ線路(MSL)型MKIDsの開発も開始した。また、多チャンネル同時読み出しのために、フィードバック機構を導入した周波数トラッキングを行うFPGAを開発し、大ダイナミックレンジを確保できることを確認した。

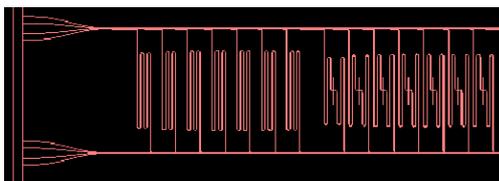


図16. 透過型MKIDsのマスクパターン

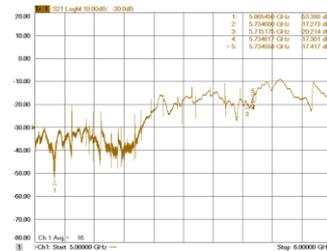


図17. 透過型MKIDsで読み出された信号

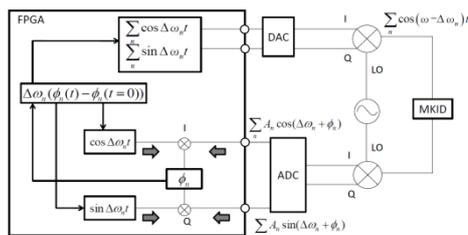


図18. 周波数トラッキングFPGAのダイアグラム

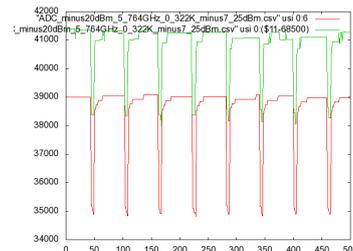


図19. 周波数トラッキングの様子

- 観測試験システムの設計・製作  
最終年度に検出器を搭載した試験システムを構築するために、計画研究A01と連携して試験システムの設計と製作を進めた。具体的には、冷凍機・光学系を含むシステムデザインを終え、クライオスタットの製作を始めているほか、光学系のビーム測定セットアップを構築して測定を行っている。また、検出器の光学設計・近傍界ビームパターンの測定を行うとともに、アレイ素子に装着するマイクロレンズアレイの試作を行った。
- その他  
計画研究A03と合同でテラヘルツアレイ検出器を用いた遠赤外線背景放射観測実験について検討を進めた。また、計画研究A04と合同で、地上サブミリ波望遠鏡とテラヘルツアレイ検出器による銀河ダスト放射前景成分の観測について検討を開始した。

### 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」

本計画研究の目的は、宇宙赤外線背景放射の観測により、初期宇宙における天体の形成と進化を研究することである。

近年の宇宙画像では、CMBの起源である宇宙の晴れ上がり期（水素の中性化）ののち、宇宙年齢1-3億年ごろの宇宙の暗黒時代（ダークエイジ）と呼ばれる時代に、初代天体として太陽の100倍を超える大質量の星々が爆発的に形成されたと考えられている（第一世代星）。それらは強力な紫外線で宇宙を再電離し、その後数億年のうちに消滅した。この宇宙初期の紫外放射は、宇宙膨張に伴い赤方偏移し、現在は近赤外波長域の宇宙背景放射を形成していると考えられる。つまり、宇宙赤外線背景放射を詳細に調べることで、宇宙暗黒時代の痕跡を見いだすことができる。

宇宙初期に発せられた微弱な赤外放射を検出するには、大気の放射や吸収に影響されない宇宙空間からの観測が必須である。そこで、我々は人工衛星やロケットを用いて観測を行っている。以下では、これらの観測から得られた主な研究成果を示す。

#### I. ロケット実験 CIBER

- 我々日本や米国の研究グループが行なってきたロケット実験や衛星観測の結果、近赤外波長の宇宙背景放射（右図中のデータ点）は、系外銀河や既知の銀河系内物質の放射（右図中の実線）では説明できないほどの高い輝度と波長  $1.5 \mu\text{m}$  付近にピークをもつ特異な放射スペクトルを持つことが明らかになった。この放射スペクトルの性質は、理論的に予想される第1世代星の紫外放射（主に水素ライマン $\alpha$ 輝線）が赤方偏移 ( $z > 10$ ) したものと説明できることがわかった。

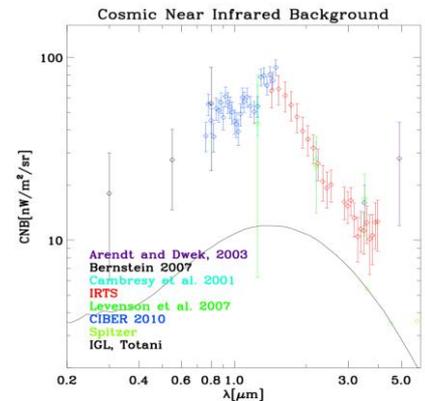


図20：宇宙赤外線背景放射の観測結果

ロケット実験CIBERは、宇宙赤外線背景放射への第1世代星の寄与の検証を目指し、我々JAXA宇宙科学研究所が米国カリフォルニア工科大学/NASAジェット推進研究所との共同実験である。口径10cmの極低温冷却望遠鏡と2次元アレイ検出器を用いて、宇宙赤外線背景放射の空間的ゆらぎの波長依存性と放射スペクトルを高精度で測定する画期的な観測計画である。これまでに、2009年2月と2010年7月の2回のロケット打上げおよび観測に成功し、可視・近赤外域での世界初の宇宙背景放射スペクトル



図21：ロケット打上げの瞬間（NASA/WSMR）

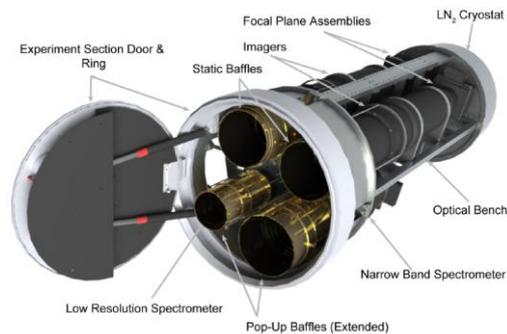


図22：CIBER観測装置（ロケットペイロード）

の測定に成功した。

2009年の実験では、装置自身からの熱放射の影響により、宇宙背景放射の検出には至らなかったが、最も強い前景放射である黄道光（太陽系ダストによる散乱光）のスペクトルに関する貴重なデータが得られ、これによりダストの組成と起源を明らかにする科学成果を得た [Tsumura et al., ApJ 719, 394 (2010)].

2010年の実験では、前回打上げ後に回収した観測装置に改良を施した結果、装置熱放射の影響なく観測を行なうことに成功した。観測された空のスペクトルから、黄道光、星野光、銀河系内のダスト放射からなる前景放射の差引を行なった結果、銀河系外に起源をもつ等方な拡散放射、つまり、宇宙背景放射のスペクトルを得ることに成功した（図1中、波長 $0.8\text{--}1.5\ \mu\text{m}$ の青いデータ点）[新井 H22年度 東京大学 修士論文, 松浦, 新井 日本天文学会 2011年春季年会, Matsuura et al. (2011) in preparation]. この結果は、赤方偏移 $z\sim 10$ の第一世代星のライマン $\alpha$ 輝線に相当する重要な可視・近赤外域において、世界で初めて宇宙背景放射スペクトルを測定したものである。

CIBERの観測結果は、宇宙赤外線背景放射が波長 $1.5\ \mu\text{m}$ に明確なピークを持つことを示している。また、ピークより短波長に複雑なスペクトル構造を示しており、これは宇宙初期の天体形成史を示す重要な情報と考えられる。近年の系外銀河からのTeVガンマ線の銀河間吸収測定による背景赤外光子密度の推定値は、これまでの宇宙背景放射の直接観測値よりもはるかに小さいことが知られている。今回のCIBERの観測結果は、両者の差をさらに広げるものとなった。この矛盾を解決する素粒子理論的な説明への取り組みが始まっている。

- 天体構造形成が未発達な宇宙初期においては、天体の密度分布はダークマター分布に従い、それらの天体に伴う宇宙赤外線背景放射は 10 分角程度の角度スケールに大きなゆらぎを生じることが予想される。これを前景の系外銀河と区別して検出し、初期宇宙起源であることをより強固なものとするができる（図4）。CIBERでは、背景放射スペクトルのピーク付近である  $1.6\ \mu\text{m}$  と短波長の  $1.0\ \mu\text{m}$  の2バンドでの撮像観測により、ゆらぎの角度スペクトルの波長依存性を調べることを目指した。

すでに述べたように2回の実験に成功し、宇宙背景放射のゆらぎデータを得た。現在、カリフォルニア工科大学が中心となりデータを解析中である。すでに、2波長でのゆらぎ振幅の比が第一世代星のモデル予測に近い値であることが確認されている。今後、放射スペクトルの測定結果と組み合わせて、宇宙初期に関する重要な情報が得られると期待する。

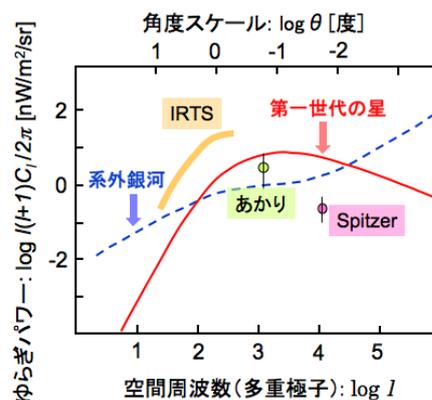


図23 背景放射ゆらぎの角度スペクトル

## II. あかり衛星による観測

- 日本の赤外天文衛星「あかり」は、赤外線波長全域において、これまでになく高い点源検出感度と広域観測能力を有することから、我々はこれを用いた宇宙赤外線背景放射の観測を実施した（背景放射観測プログラム代表者 松浦）。近・中赤外波長域では北黄極を中心とする領域、遠赤外域では南天の低シラス領域において、大規模なマッピング観測を行なった。その結果、近赤外と遠赤外において、宇宙背景放射ゆらぎの角度スペクトルを測定することに成功した。
- 近赤外（波長  $2\text{--}5\ \mu\text{m}$ ）のゆらぎ観測では、暗い系外銀河まで除去した後図5（上）に示すような背景放射の画像が得られ、その角度スペクトルを測定することに成功した（図5下）。その結果、数分角のスケールでのゆらぎ振幅が、系外銀河では説明できないほどの超過を示すことがわかった [Matsumoto et al. ApJ submitted (2011): arXiv:1010.0491]. これは、図4で示したような、第一世代星のモデルから予測されるゆらぎや米国の Spitzer 衛星による観測結果との良い一致を示しており、さらに詳細なデータ解析が期待される。

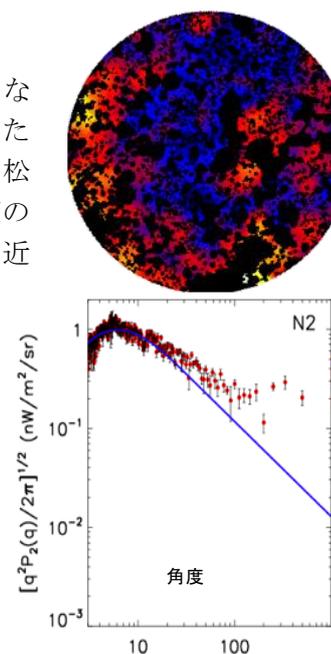


図24: あかり衛星によるゆらぎ観測

- 遠赤外（波長 60-180  $\mu\text{m}$ ）の観測（図 6）では，近赤外の宇宙背景放射と同様，系外銀河や銀河系内物質放射では説明のつかない，放射エネルギーの超過を発見した [Matsuura et al. ApJ accepted (2011), arXiv: 1002.3674]. 大質量の第一世代星は，最終的に超新星爆発を起こすか重力崩壊してブラックホールを形成し，その姿を消したと考えられる．遠赤外での宇宙背景放射の超過エネルギーの起源は，第一世代星の残骸ブラックホールへの物質降着による放射の可能性もあり，今後さらなる研究の展開が期待される [松浦 パリティ 2010 年 5 月号].

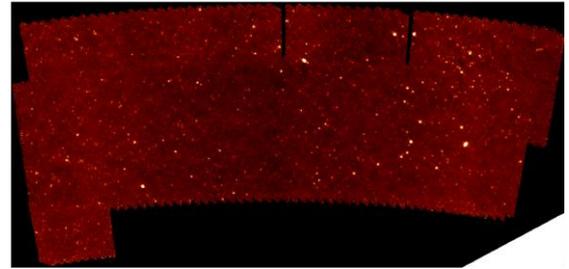


図 25: あかり衛星により得られた遠赤外マップ

同観測領域では，X線から電波までのあらゆる波長のデータを取得してきたが，今後もHerschel衛星やALMA望遠鏡のほか，将来ミッションの重要なターゲットとして探査を進め，これらの相関解析により背景放射の謎解明に取り組む。

### III. 将来計画

- CIBER ロケット実験は，平成 25 年まで継続して行なう予定である[Zemcov et al. Proc. of “Cosmic Radiation Fields: Sources in the Early Universe” arXiv: 1101.1560, ほか 4 編の装置論文投稿予定 ApJS]. 今後も，より高い精度の観測を目指し装置改良を行なってゆく．次回の実験では，偏光観測による黄道光と宇宙背景放射との高精度な成分分離を目指す．このため，これまでに偏光素子の基礎開発を行なった．
- 将来は，より大口径（30cm）の望遠鏡を用い，CIBER より 1 桁高い測定精度での新たなロケット実験を行なう．本研究期間内の実験実施を目標に，装置の設計と製作を開始した．
- 可視・近赤外以外でも宇宙背景放射の観測計画を検討している．より短波長での可視域における背景放射のスペクトル観測を目指すロケット実験のほか，宇宙背景ニュートリノ崩壊光子や残骸ブラックホールなどの宇宙初期物質の検出を目指す遠赤外域でのロケット実験 FIDAX を検討し，装置の基礎開発をすすめている．
- 太陽系ダスト密度が高い地球近傍では，黄道光推定の不定性が大きいいため，これが宇宙背景放射の測定精度を支配している．我々は，この困難を打破すべく，惑星探査機によるダストの希薄な深宇宙からの背景放射観測ミッション EXZIT を提案している．このミッション実現のため，JAXA の次世代惑星探査機ソーラーセイルへの観測装置搭載を前提として，装置仕様の検討と概念設計を開始した．

また，EXZITの搭載装置開発の一貫として，2014年打上げ予定の小惑星探査機「はやぶさ 2」の搭載近赤外分光器NIRS3の開発に携っている．

## 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」

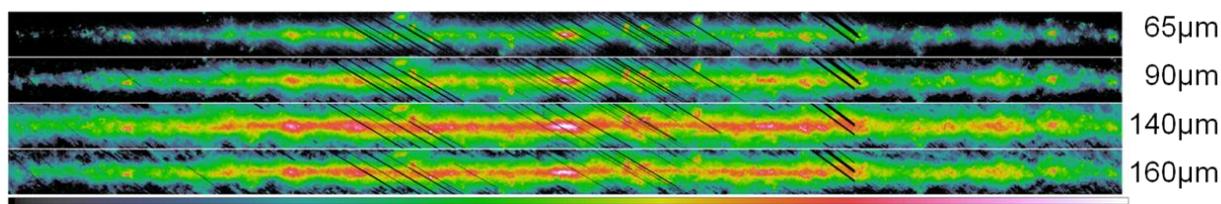
本領域が世界初検出を目指す宇宙マイクロ波背景放射偏光Bモードシグナルは、宇宙誕生から38万年後に刻印されたシグナルであり、電磁波で観測できる最も遠い宇宙から発せられたシグナルである。そのため現在までの137億年の間に形成された様々な天体からの偏光シグナルが混入し、ただでさえ微弱で検出困難な宇宙マイクロ波背景放射偏光Bモードシグナルの検出を更に困難なものにしている。宇宙マイクロ波背景放射の観測データに混入してくる天体起源のシグナルを前景放射と呼ぶ。前景放射の中でも私達が暮らす天の川銀河系の中の星間物質からの偏光放射が宇宙マイクロ波背景放射偏光Bモードシグナル検出にとって最も深刻な影響を与えている。前景放射成分の特に天の川銀河系内の成分をどれだけ高い精度で宇宙マイクロ波背景放射成分と分離できるかが、現時点でこの分野に於ける世界的課題となっている。私達は、特に天の川銀河系起源の前景放射成分の物理的理解を深めることで成分分離精度の飛躍的向上を目指して研究を実施している。

天の川銀河系起源の主な偏光放射源は、光速に近い速度で運動する電子が天の川銀河系の磁場の周りを運動することで放射されるシンクロトロン放射と天の川銀河系の磁場に張り付いた塵からの熱放射の2つである。シンクロトロン放射は、磁力線と垂直方向に偏光した直線偏光を放射する。塵は、完全な球体でなく扁平な形をしている。塵は長軸方向が磁力線に垂直になるように配列し磁力線に張り付くのがエネルギー的に最も安定な状態である。この結果塵からの熱放射は、磁力線に垂直方向に直線偏光した放射となる。

この様に天の川銀河系内からの偏光放射成分の偏光方向は、天の川銀河系磁場の構造により支配されている。そこで私達は、天体物理学的な根拠を持ち現実に出来るだけ近い天の川銀河系磁場の3次元構造構築を当面の課題の一つとして研究に取り組んでいる。この活動の中で、宇宙マイクロ波背景放射偏光観測に関連した観測データを元に天の川銀河系磁場モデル構築するこれまでの全ての研究で用いられている磁場のモデルにおいて、磁場の発散が有限値を持つ即ち磁気単極子の存在を暗黙の内に仮定するモデルになっていることを始めて明らかにした。一方連携研究者の松元(千葉大)等は磁気流体数値シミュレーションを用いて天の川銀河系磁場の大局的3次元構造モデル構築を試み2006年に学会誌に発表している。その結果によれば、磁場構造の進化は、磁気回転不安定性と磁気浮力不安定性の2つの物理機構により支配され、初期条件によらずある決まった準定常状態に落ち着くことが明らかになった。勿論彼らの結果は、磁場の発散がゼロになることを自動的に満たしている。そこで私達は、千葉大が提案している天の川銀河系磁場モデルを既存のシンクロトロン偏光放射全天マップと比較し、観測を再現できるかテストした。その結果、準定常状態で現れる磁場の渦巻き構造の渦の巻きがきつ過ぎ、シンクロトロン放射の偏光角の全天マップと合わないことを明らかにした。これらは、本科研費で雇用している森嶋准教授の成果であり、成果は学会誌に投稿済みで現在査読審査中である。私達は、千葉大モデルで考慮されていなかった銀河の渦巻き腕の存在による重力ポテンシャルに現れる渦巻き構造を取り入れることで観測との食い違いが改善することを期待している。現在この効果を取り入れた磁気流体数値シミュレーションの実施を目指して、千葉大グループの協力を得ながら服部が指導し大学院生が中心となり準備を進めている。遅くとも今年の12月までには、結果を出せると考えている。これらの計算処理及び画像解析は、本科研費で購入した高性能計算PCを用いて実施している。

現在用いられている天の川銀河系内の塵分布の全天地図は、30年前に米・英・蘭が共同で開発した

IRASと呼ばれる赤外線観測衛星で所得したデータを元に構築されたものである。例えば、天の川銀河系外の天体が多いところで塵からの放射が強い等、深刻な系統誤差が混入していることが既に知られており改善が待ち望まれている。日本の赤外線観測衛星「あかり」は、IRAS以来25年ぶりに塵分布測定に欠かせない遠赤外線領域での全天探査観測を実施した。「あかり」のデータを用いれば、塵分布の空間分解能及び塵の温度測定の精度を飛躍的に改善出来ることが期待される。連携研究者の土井が率いる「あかり」チームが過去5年の長い年月を掛けて解析ツールの開発を実施してきた。代表者の服部も5年前からこの開発プロジェクトに関わっている。震災直前の今年3月始めに宇宙科学研究所と東北大学の協定に基づき、「あかり」遠赤外線域全天探査で得た生データと解析ツールの一式を仙台に移植し、本科研費で購入した高性能計算機PCクラス(16core×8node=128CPU)を用いた遠赤外線域全天地図作成処理を開始した。図は、このツールを用いて得た銀河面の地図である。本格的な作業開始直後、震災により遠赤外線域全天地図作成処理は中断を余儀なくされ震災前の状態に復旧させるのに1カ月以上要した。現在全力で遠赤外線域全天地図作成処理が進められている。このプロジェクトは現在、本科研費で雇用している大坪准教授が中心になって推進してい



### Galactic Plane, $l = -50$ to $+50^\circ$ , $b = -2.5$ to $+2.5^\circ$

る。現在のペースで遠赤外線域全天地図作成処理の作業が進むと全天データの処理完了までには約半年を要することになる。現在も解析ツールの改善が実施されており、解析ツールのバージョン更新が今後1年以上は継続的に行われると考えている。全天地図の信頼度を高める為に解析ツールのバージョン更新毎に全天データの解析を再処理することは必須であり、その為に作業処理速度の更なる向上が必要不可欠である。そこで作業処理速度向上の為に以下の二つの対策の実施を進めている。一つは、使用コア数の増加に伴う「あかり」データへのアクセス数の増加による処理速度の遅滞を緩和するため「あかり」データのコピーマシンをもう一台増設することである。現在使用コア数が45コアを超えたところで遅滞が発生しているので、この処置で90コアが有効に使用でき処理速度が倍になると考えている。もう一つは、インテルコンパイラーの活用である。森嶋が行った、幾つかのベンチマークテストの結果によれば、インテルコンパイラーの使用で処理速度が飛躍的(最大比10倍程度)に上がることが分かっている。しかし、現状の「あかり」解析ツールはインテルコンパイラーで動かすことが出来ず、ツールの最適化が必要である。今後、大坪が中心になりインテルコンパイラーの活用に向けたツールの最適化を実施する。得られた遠赤外線地図を天の川銀河系内の塵分布の地図に翻訳するには、更なる解析が必要である。この活動は、IRASデータを用いた世界初の天の川銀河系塵分布地図を作製した3人の米国人研究者の内、唯一現役の研究者であるハーバード・スミソニアン天文台のフィングバイナー准教授からツールの提供等協力を得て大坪が中心になって今後推進していく。最初の「あかり」遠赤外線全天地図完成後直ちにこの作業に取り掛かる予定である。

「あかり」は、偏光情報を提供できないため、世界で初めて天の川銀河系内の塵からの偏光放射全天分布を提供する欧州の観測衛星PLANCKとの連携を当初予定していた。しかし、パブリックリリース前にPLANCKと連携することは困難な状況である。それに代わるデータとして米国のチームが

南極点で観測を実施する宇宙マイクロ波背景放射偏光Bモード探査観測BICEPで得られたデータの提供を受け、既にそのデータを用いた解析が森嶋を中心として始まっている。これは、空の一部のみをカバーするデータであるが、天の川銀河系の塵からの偏光放射を測定したデータとしては最も精度の高いものである。このデータと「あかり」を元にした塵分布地図及び私達独自の天の川銀河系磁場モデルを用いた高精度な塵からの偏光放射のテンプレート第一バージョンの今年中の完成を目指している。

シンクロトロン放射の現実的なモデル構築には、天の川銀河系内の相対論的電子分布を私達が数値シミュレーションで構築する磁場モデル中での、高エネルギー粒子の伝搬を解かなければならない。これを目的として、銀河系内の高エネルギー粒子の伝搬をシミュレートするGALPROPと呼ばれるパブリックなコードを用いたシミュレーションの実施の為に準備を森嶋と服部が指導し大学院生が中心となって進めている。

天の川銀河系内偏光放射成分の物理的理解の深化に関わる上記の結果を取り入れた、高精度成分分離スキームの開発を階層ベイズ法を用いて実施する予定であった。この方向性は変えていないが、強度分布に対する成分分離スキーム開発に留まっているのが現状である。上記の課題の展開で手一杯でここまで手が回っていないのが実情である。今後は、成分分離スキーム開発を独自に進めるA01に所属する研究者との連携等を図り、最終年度までに当初目標達成を目指す計画である。

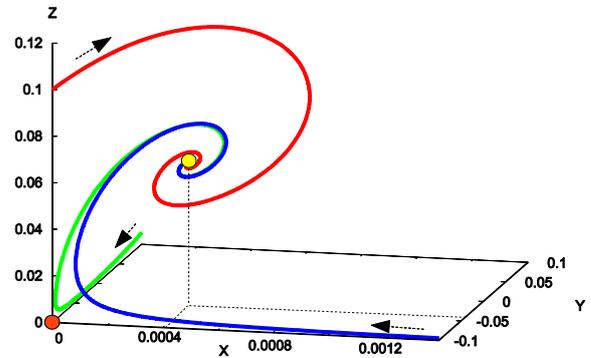
高精度成分分離には、出来るだけ多くのバンドで偏光データを得ることが鍵である。そこで従来の1/2波長板に代わり原理的に無制限のバンドで偏光観測が可能な新しい偏光変調器を屈折型フーリエ分光器を応用することで考案し、試作機を作製して実験室での実証実験を実施した。この成果で今年3月に服部の元で中国からの留学生が東北大学より博士号を取得した。この学生は4月よりNEC中央研究所の研究者として活躍している。

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」

本計画研究はインフレーション宇宙モデルからの観測的予言の研究と、究極理論候補に基づく宇宙モデルの研究を平行して進める計画となっている。それに従って成果をまとめるが、成果は多岐にわたるので、紙数の関係で一部のみ紹介する。

IV. インフレーション宇宙モデル

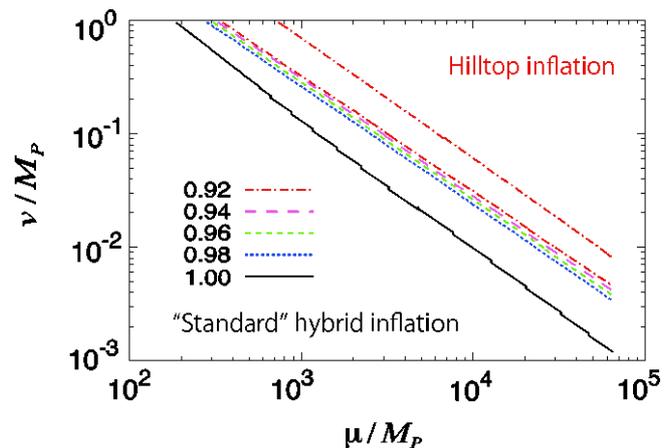
- 非等方インフレーションモデル：インフレーション時にスカラ成分と結合したベクトル場が存在するとインフレーション時の宇宙膨張が非等方になり、生成されるゆらぎのパワースペクトルに非等方性が生じる可能性が V. Mukhanov らにより 2008 年に指摘されたが、当初のモデルは理論的に整合的なものでなかった。分担者の早田と共同研究者は、ゲージ場の結合定数がモジュライ場としてのインフラトンに指数関数的に依存する 4 次元理論が非等方インフレーション解をもち、しかもその近傍の解は等方インフレーション解ではなく、この非等方解に漸近する（アトラクター）ことを示した[Kanno S, Soda J, Watanabe M: JCAP 1012:024 (2010)]. この形の 4 次元理論は超弦理論の観点から自然な理論で、整合的な理論で初めて非等方インフレーションが起きることを示したことになる。早田らはさらに、非等方インフレーションがスカラ型ゆらぎとテンソル型ゆらぎの混合を引き起こし、原始重力波に起因する CMB 偏光 B モードと密度ゆらぎに起因する E モードに観測的に検出可能な相関を生み出すことを定量的に示した[Watanabe M, Kanno S, Soda J: Prog. Theor. Phys. 123:1041 (2010); Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 412:L83 (2011)]. この予言は、ゆらぎのパワースペクトルの非等方性ととも、現在進行中の CMB 観測により検証されれば究極理論についての貴重な情報を与えることになる。



- ハイブリッドインフレーションモデル：ハイブリッドインフレーションモデルは、カオティックインフレーションモデルに対応するスカラ場（谷場）と新インフレーションモデルに対応するスカラ場（滝場）の 2 成分場をインフラトンとして用いる混成モデルとして 1993 年に A Linde により提案され、重力を含む統一理論である 4 次元超重力統一理論の予言する自然なインフレーションモデルの一つである。

しかし、宇宙のゆらぎスペクトルとしてスケール不変なスペクトルより短波長側でパワーの大きくなる「青いスペクトル」を予言し、赤いスペクトルを支持する WMAP 衛星による CMB ゆらぎ観測と合わないためほぼ否定されようとしていた。これに対し、最近、実はハイブリッドモデルでも滝場が重要な役割を果たす状況では従来の解析とは異なる結果が得られることを S. Clesse が数値計算に基づいて指摘した。

小玉と共同研究者は、この Clesse の主張が正しく、滝場インフレーションにより観測と整合的な赤いスペクトルのゆらぎが得られることを解析的に示した[Kodama H, Kohri K, Nakayama K: arXiv:1102.5612].



- ゆらぎ生成における IR 発散の問題：現在のインフレーション理論では、宇宙構造の種となる大

域的宇宙ゆらぎはインフレーション時でのインフラトン場の量子ゆらぎに起因すると考えられており、観測にも支持されている。このゆらぎ生成の研究では通常、ゆらぎの非線形相互作用の量子効果は無視されるが、正直にこの効果を場の量子論に従って計算しようとする、量子補正への長波長モードの寄与が発散する（IR 発散問題）。これはゆらぎについての明確な理論的予言をするうえで大きな障害となる。田中とその共同研究者はこの問題に正面から立ち向かい次のような驚くべき結果を得た[Tanaka T, Urakawa Y: JCAP 1105:014(2011); Urakawa Y, Tanaka T: Prog. Theor. Phys. 125: 1067 (2011); Phys.Rev. D82: 121301 (2010)]。まず、インフラトンが 1 成分の場合には、IR 発散は初期条件がスケール不変（初期に発散がない）なら、実際に観測する量（ゲージ不変量）では現れない。一方、多成分系では、量子論の予言が、長波長量子ゆらぎの様々な値に対応する古典的に大きく異なる宇宙に対する予言の平均値に対応するために、1 成分の場合と異なり、理論の許容する宇宙のアンサンブルを実際に観測されたものに制限することによってのみ IR 発散が除去できる（宇宙分散の分離）。

- G-インフレーションモデル：現在、ポテンシャルを持つ標準的な 1 成分インフラトンに基づくインフレーションモデルの理論研究はほぼ終了し、高次元統一理論から見てより現実的な多成分モデルや標準的でない時空微分依存性を持つ理論の研究が主流になりつつある。G-インフレーションモデルはその一つで、時空微係数に非線形に依存するスカラ場であるガリレオンと呼ばれる場をインフラトンとして用いる。横山を中心とするグループは、これまでの観測と整合的な G-インフレーションモデルを初めて構築し、その予言するゆらぎが従来の標準モデルと大きく異なる性質を持つことを示した[Kobayashi T, Yamaguchi M, Yokoyama J: Phys.Rev.Lett.105 :231302, 2010 ]。さらに、素粒子標準モデルに含まれるヒグス場をガリレオン場とする G-インフレーションモデルが構築可能であることを示した[Kamada K, Kobayashi T, Yamaguchi M, Yokoyama J:Phys. Rev. D83: 083515 (2011)]。また、辻川はこのガリレオン場がダークエネルギーのモデルとしても使えることを示した[De Felice A, Kase R, Tsujikawa S: Phys.Rev. D83: 043515 (2011); Nesseris S, De Felice A, Tsujikawa S: Phys.Rev. D82:124054 (2010); De Felice A, Tsujikawa S: Phys. Rev. Lett. 105: 111301 (2010)]。

- その他

- ✧ Ghost インフレーションモデルでのゆらぎ 4 点相関の計算[向山]。
- ✧ Horava-Lifshitz 理論における Lifshitz スカラ場の生み出すゆらぎが大きな非ガウス性を持ちうることを示した[向山]。
- ✧ 最も一般的な修正重力理論に対する摂動論の定式化と安定性解析[辻川,向山]。
- ✧ f(R,G)理論について、球対称ブラックホール解が不安定であること、および非等方宇宙ではゴーストが現れることを示す[田中]。
- ✧ アクシオンモデルでの MCMC 解析により、CMB 観測から等曲率ゆらぎの振幅とスペクトルをどの程度決定できるか解析[川崎]。
- ✧ Long cosmic string の kink からの重力波の評価、B-mode に与える影響[川崎]。
- ✧ 局所ボイドモデルでの重力レンズ効果により生じる温度非等方性および B モードおよびそれと E モードの相関関数に対する解析的表式を導出し、観測可能な相関の特徴を指摘[小玉]

V. 究極理論に基づく宇宙モデルの構築。

- 4次元超重力理論におけるハイスケールインフレーションモデル：少し前まで 4次元超重力理論の枠組みで大きな原始重力波の振幅を予言するカオティックインフレーションモデルを作ることとは不可能と思われていたが、ケーラーポテンシャルにある種の対称性を課せば可能となることが 2000 年に川崎・山口・柳田により指摘された。高橋はこのアイデアを発展させることにより、超重力理論の枠内で非標準運動項をもちハイスケールで線形ポテンシャルをもつインフレーションモデルを初めて構築した[Takahashi F:Phys.Lett.B693:140-143 (2010)]。さらに中山とともに、それに基づいて標準モデルにおけるヒグス場をインフラトンとするハイスケールインフレーションモデルを提案した[Nakayama K, Takahashi F: JCAP 1102: 010 (2011)]。

- 統一理論の予言する様々な位相的励起の観測的予言: 川崎のグループは, 宇宙ひも, ドメイン・ウォール, Q ボールなど, 宇宙初期に形成される様々な (準) 位相的励起の進化を高精度数値計算で調べ, それに基づいて統一理論に対する強い制限を得た. 特に, アクシオン宇宙ひもからのアクシオン放出を考慮すると, QCD アクシオンの質量に対する制限が従来より強くなることを明らかにした [Hiramatsu T, Kawasaki M, Sekiguchi T, Yamaguchi M, Yokoyama J: arXiv:1012.5502 (2010)]
- その他
  - ◇ 超対称 axion モデルに基づく整合的インフレーション宇宙モデルの構築[川崎, 中山]
  - ◇ CMB 観測および BBN 理論と観測の比較が示唆する余剰輻射成分に対する大統一理論に基づくモデルを構成[中山, 高橋].
  - ◇ Horava-Lifshitz 理論における GR 極限の正則性を球対称系の場合に証明[向山].

## 7. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）

・本研究費の助成を受けて発表した研究成果について記載してください。

・頁数の目安は設けませんが、評価資料全体の頁数の目安が30頁であることに留意し、全体の分量が多くなる場合には工夫をお願いします。

（1）主な論文等一覧について（全て査読あり）合計70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プレプリントを含めると100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」

“**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**, 054501 (2011)

“**Simple Foreground Cleaning Algorithm for Detecting Primordial B-mode Polarization of the Cosmic Microwave Background**”, N. Katayama, E. Komatsu [arXiv: 1101.5210] To appear in ApJ.

“**First Season QUIET Observations: Measurements of CMB Polarization Power Spectra at 43 GHz in the Multipole Range  $25 \leq \ell \leq 475$** ”, QUIET Collaboration, arXiv: 1012.3191, Submitted to APJ

“**The polarbear CMB Polarization Experiment**”, \*Kam Arnold and The POLARBEAR Collaboration Proc. SPIE 2010, to be published

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」

“**Terahertz Detector based on a Superconducting Tunnel Junction Coupled to a Thin Superconductor Film**”, \*S. Ariyoshi, T. Taino, A. Dobroiu, 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」

“**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., in press 2011, arXiv:1002.3674

“**AKARI observation of the fluctuation of the near-infrared background. I**”, Matsumoto, T.; Seo, H. J.; Jeong, W. -S.; Lee, H. M.; Matsuura, S.; Matsuhara, H.; Oyabu, S.; Wada, T. Astrophys. J., submitted 2011, arXiv:1010.0491

“**Far infrared luminosity function of local star-forming galaxies in the AKARI Deep Field South**”, C. Sedgwick, S. Serjeant, C. Pearson, S. Matsuura, M. Shirahata, S. Oyabu, T. Goto, H. Matsuhara, D. Clements, M. Negrello, and G. White, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., in press 2011, arXiv:1106.0899

“**Measuring Light from the Epoch of Reionization with CIBER, the Cosmic Infrared Background Experiment**”, Zemcov, M.; Arai, T.; Battle, J.; Bock, J. J.; Cooray, A.; Hristov, V.; Keating, B.; Kim, M.-G.; Lee, D.-H.; Levenson, L.; Mason, P.; Matsumoto, T.; Matsuura, S.; Mitchell-Wynne, K.; Nam, U. W.; Renbarger, T.; Smidt, J.; Sullivan, I.; Tsumura, K.; Wada, T. arXiv:1101.1560 for the proceedings of "Cosmic Radiation Fields: Sources in the early Universe", November 9-12, 2010, DESY, Germany

“**An Asteroidal Origin for Interplanetary Dust from the Infrared Spectrum of Zodiacal Light**”, 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).

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」

“**AcuA: the AKARI/IRC Mid-infrared Asteroid Survey**”, \*F.Usui, D.Kuroda, T.G.Mueller, S.Hasegawa, M.Ishiguro, T.Ootsubo, D.Ishihara, H.Kataza, S.Takita, S.Oyabu, M.Ueno, H.Matsuhara, T.Obaka, Pub. Astron. Soc. Jap. (2011) in press

“**Testing Galactic Magnetic Field Structure Model Predicted by Magnetohydrodynamical Numerical Simulation Using WMAP K-band Polarization Data**”, \*T.Morishima, M.Hattori, M.Machida, R.Matsumoto, S.Nakamura, Astrophys. J., (2011) submitted.

“**Analytical Models of the Divergence Free Global Galactic Magnetic Field Structure**”, \*T.Morishima, M.Hattori, Astrophys. J., (2011) submitted.

“**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)

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」

“**Observational constraints on assisted k-inflation**,” J. Ohashi, S. Tsujikawa, Phys. Rev. D83: 103522, 2011. arXiv:1104.1565 [astro-ph.CO]

“**Dominance of gauge artifact in the consistency relation**” T. Tanaka, Y. Urakawa, JCAP 1105:014, 2011. [arXiv:1103.1251 [astro-ph.CO]]

“**Primordial non-Gaussianities in general modified gravitational models of inflation**,” A. De Felice, S. Tsujikawa, JCAP 1104:029, 2011. [arXiv:1103.1172 [astro-ph.CO]].

“**A note on the role of the boundary terms for the non-Gaussianity in k-inflation**,” F. Arroja, T. Tanaka, JCAP1105:005, 2011 [arXiv:1103.1102 [astro-ph.CO]]

“**On the waterfall behavior in hybrid inflation**,” H. Kodama, K. Kohri, K. Nakayama, Prog. Theor. Phys. 126, accepted (2011) [arXiv:1102.5612]

“**Number-Theory Dark Matter**,” K. Nakayama, F. Takahashi, T. T. Yanagida, Phys. Lett. B699 :360-363, 2011. [ arXiv:1102.4688 [hep-ph]].

“**A covariant approach to general field space metric in multi-field inflation**,” J.-O. Gong, T. Tanaka, JCAP 1103:015, 2011 [arXiv:1101.4809 [astro-ph.CO]]

“**Why have supersymmetric particles not been observed?**,” F. Takahashi, T.T. Yanagida, Phys. Lett. B698: 408-410, 2011. [ arXiv:1101.0867 [hep-ph]].

“**The Gravitational Lensing Effect on the CMB Polarisation Anisotropy in the Lambda-LTB Model**,” H. Goto, H. Kodama, Prog. Theor. Phys. 125: 815-836, 2011.

- [arXiv:1101.0476 [astro-ph.CO]]
- “**Brane Holes**,” V. Frolov, S. Mukohyama, Phys. Rev. D83, 044052:1-12, 2011 [arXiv:1012.4541 [hep-th]]
- “**Higgs G-inflation**,” K. Kamada, T. Kobayashi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama, Phys. Rev. D 83: 083515, 2011. [arXiv:1012.4238 [astro-ph.CO]]
- “**Strong dynamics at the Planck scale as a solution to the cosmological moduli problem**,” F. Takahashi, T. T. Yanagida, JHEP 1101:139, 2011. [arXiv: 1012.3227 [hep-ph]]
- “**Chiral Modulations in Curved Space I: Formalism**,” A Flachi, T. Tanaka, JHEP 1102: 026, 2011. [arXiv:1012.0463 [hep-th]]
- “**Destruction of  ${}^7\text{Be}$  in big bang nucleosynthesis via long-lived sub-strongly interacting massive particles as a solution to the Li problem**,” M. Kawasaki, M. Kusakabe, Phys. Rev. D 83: 055011, 2011. [arXiv:1012.0435 [hep-ph]]
- “**Matter perturbations in Galileon cosmology**,” A. De Felice, R. Kase, S. Tsujikawa, Phys.Rev. D83: 043515, 2011. [arXiv:1011.6132 [astro-ph.CO]]
- “**Full nonlinear growing and decaying modes of superhorizon curvature perturbations**,” Y. Takamizu, J. Yokoyama, Phys. Rev. D83: 043504, 2011. [arXiv:1011.4566 [astro-ph.CO]]
- “**Running Spectral Index from Inflation with Modulations**,” T. Kobayashi, F. Takahashi, JCAP 1101:026, 2011. [arXiv:1011.3988 [astro-ph.CO]]
- “**Imprints of Anisotropic Inflation on the CMB**,” M Watanabe, S Kanno, J. Soda, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 412:L83-L87, 2011 [arXiv:1011.3604 [astro-ph.CO]]
- “**The gravitino problem in supersymmetric warm inflation**,” J. C. Bueno Sanchez, M. Bastero-Gil, A. Berera, K. Dimopoulos, K. Kohri, JCAP 1103:020, 2011. [arXiv:1011.2398 [hep-ph]]
- “**Anisotropic Power-law Inflation**,” S. Kanno, J. Soda, M. Watanabe, JCAP 1012:024, 2010. [arXiv:1010.5307 [hep-th]]
- “**A theory of extra radiation in the Universe**,” K. Nakayama, F. Takahashi, T.T. Yanagida, Phys. Lett. B697:275-279, 2011. [arXiv:1010.5693 [hep-ph]]
- “**Chameleon dark energy models with characteristic signatures**,” R. Gannouji, B. Moraes, D. F. Mota, D. Polarski, S. Tsujikawa, H. A. Winther, Phys. Rev. D 82:124006, 2010. [arXiv: 1010.3769 [astro-ph.CO]]
- “**Kahler moduli double inflation**,” M. Kawasaki, K. Miyamoto, JCAP 1102 :004, 2011. [arXiv:1010.3095 [astro-ph.CO]]
- “**Observational constraints on Galileon cosmology**,” S. Nesseris, A. De Felice, S. Tsujikawa, Phys. Rev. D82:124054, 2010. [arXiv:1010. 0407 [astro-ph.CO]]
- “**General Analysis of Inflation in the Jordan frame Supergravity**,” Kazunori Nakayama, Fuminobu Takahashi, JCAP 1011: 039, 2010. [arXiv: 1009.3399 [hep-ph]]
- “**Natural selection of inflationary vacuum required by infra-red regularity and gauge-invariance**,” Y. Urakawa, T. Tanaka, Prog. Theor. Phys. 125: 1067-1089, 2011. [arXiv:1009.2947 [hep-th]]
- “**Ghost condensation and CPT violation in neutrino sector**,” Shinji Mukohyama, S. C. Park, Phys. Lett. B696:505-508, 2011. [arXiv:1009.1251 [hep-ph]]
- “**Inflation from a Supersymmetric Axion Model**,” M. Kawasaki, N. Kitajima, K. Nakayama, Phys. Rev. D82:123531. 2010. [arXiv: 1008.5013 [hep-ph]]
- “**Higgs Chaotic Inflation in Standard Model and NMSSM**,” K. Nakayama, F. Takahashi, JCAP 1102: 010, 2011. [arXiv:1008.4457 [hep-ph]]
- “**Hilltop Supernatural Inflation and Gravitino Problem**,” K. Kohri, C.-M. Lin, JCAP 1011: 010, 2010. [arXiv:1008.3200 [hep-ph]]
- “**Running Kinetic Inflation**,” K. Nakayama, F. Takahashi, JCAP 1011:009, 2010. [arXiv:1008. 2956 [hep-ph]]
- “**Catastrophic Instability of Small Lovelock Black Holes**,” T. Takahashi, J. Soda, Prog. Theor. Phys. 124:711-729, 2010. [arXiv:1008.1618 [gr-qc]]
- “**Affleck-Dine baryogenesis with modulated reheating**,” K. Kamada, K. Kohri, S. Yokoyama, JCAP 1101: 027, 2011. [arXiv:1008.1450 [astro-ph.CO]]
- “**Non-Gaussianity from Lifshitz Scalar**,” K. Izumi, T. Kobayashi, S. Mukohyama, JCAP 1010: 031, 2010. [arXiv:1008.1406 [hep-th]]
- “**Master Equations for Gravitational Perturbations of Lovelock Black Holes in Higher Dimensions**,” T. Takahashi, J. Soda, Prog. Theor. Phys. 124:911-924, 2010. [arXiv:1008.1385 [gr-qc]]
- “**G-inflation: Inflation driven by the Galileon field**,” T. Kobayashi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama, Phys. Rev. Lett. 105 :231302, 2010. [arXiv:1008.0603 [hep-th]]
- “**Horava-Lifshitz Cosmology: A Review**” S. Mukohyama, Class. Quant. Grav. 27: 223101, 2010. [arXiv:1007.5199 [hep-th]]
- “**Constraint on the gravitino mass in hybrid inflation**,” K. Nakayama, F. Takahashi, T.T. Yanagida, JCAP 1012: 010, 2010. [arXiv:1007.5152 [hep-ph]]
- “**Stability of Holographic Superconductors**,” S. Kanno, J. Soda, Phys. Rev. D82: 086003, 2010. [arXiv:1007.5002 [hep-th]]
- “**Cosmology of a covariant Galileon field**,” A. De Felice, S. Tsujikawa, Phys. Rev. Lett. 105: 111301, 2010 [arXiv:1007.2700]
- “**IR divergence does not affect the gauge-invariant curvature perturbation**,” Y. Urakawa, T. Tanaka, Phys. Rev. D82:121301, 2010. [arXiv:1007. 0468 [hep-th]]
- “**Linear Inflation from Running Kinetic Term in Supergravity**,” F. Takahashi, Phys. Lett. B693:140-143, 2010. [arXiv:1006.2801]
- “**Dark Matter from Split Seesaw**,” A. Kusenko, F. Takahashi, TT Yanagida, Phys. Lett. B693:144-148, 2010. [arXiv:1006.1731]
- “**Density perturbations in general modified gravitational theories**,” A De Felice, S. Mukohyama, S. Tsujikawa, Phys. Rev. D82:023524, 2010. [arXiv:1006.0281]
- “**Matter power spectrum in  $f(R)$  gravity with massive neutrinos**” H Motohashi, AA Starobinsky, J. Yokoyama, Prog. Theor. Phys. 124:541-546, 2010. [arXiv:1005.1171]
- “**Hawking Radiation from Fluctuating Black Holes**,” T Takahashi, J. Soda, Class.Quant.Grav.27:175008, 2010 [arXiv:1005.0286]
- “**Discrete R Symmetries and Domain Walls**” M Dine, F. Takahashi, TT Yanagida, JHEP 1007:003, 2010 [arXiv:1005.3613]
- “**Probing Variant Axion Models at LHC**,” CR Chen, PH Frampton, F. Takahashi, TT Yanagida, JHEP 1006:059, 2010. [arXiv:1005.1185]
- “**Generalized Brans-Dicke theories**,” A De Felice, S. Tsujikawa, JCAP 1007:024, 2010. [arXiv:1005.0868]
- “**Geometrically Consistent Approach to Stochastic DBI Inflation**,” L Lorenz, J Martin, J. Yokoyama, Phys. Rev.D82:023515, 2010. [arXiv:1004.3734]
- “**Analytic formulae for the off-center CMB anisotropy in a general spherically symmetric universe**,” H. Kodama, K Saito, A Ishibashi, Prog. Theor. Phys.124:163-180, 2010. [arXiv:1004.3089]
- “**Non-Gaussianity of superhorizon curvature perturbations beyond  $dN$  formalism**,” Y Takamizu, S. Mukohyama, M Sasaki, Y Tanaka, JCAP 1006:019, 2010. [arXiv:1004.1870]
- “**Trispectrum from Ghost Inflation**,” K Izumi, S. Mukohyama, JCAP 1006:016, 2010. [arXiv:1004.1776]

“Use of delta N formalism - Difficulties in generating large local-type non- Gaussianity during inflation” T. Tanaka, T. Suyama, S. Yokoyama, *Class.Quant.Grav.*27:124003, 2010 [arXiv:1003.5057]

“B-mode polarization induced by gravitational waves from kinks on infinite cosmic strings”, M. Kawasaki, K. Miyamoto, K. Nakayama, *Phys. Rev. D*82 :103504, 2010. [arXiv:1003.3701]

“Numerical study of Q-ball formation in gravity mediation”, T. Hiramatsu, M. Kawasaki, F. Takahashi, *JCAP* 1006:008, 2010. [arXiv:1003.1779]

“Effects of Light Fields During Inflation”, T. Kobayashi, S. Mukohyama, *Phys. Rev. D*81:103504, 2010 [arXiv:1003.0076]

“The Nature of Primordial Fluctuations from Anisotropic Inflation”, M. Watanabe, S. Kanno, J. Soda, *Prog. Theor. Phys.* 123:1041-1068, 2010. [arXiv: 1003.0056]

“f(R) theories”, A. De Felice, S. Tsujikawa, *Living Rev. Rel.* 13:3, 2010. [arXiv:1002.4928] (Review, 136pp)

“Analytic formulae for CMB anisotropy in LTB cosmology”, K. Saito, A. Ishibashi, H. Kodama, *Prog. Theor. Phys.* 124:163-180, 2010. [arXiv:1002.3855 [astro-ph.CO]]

“Gravitational Waves from Collapsing Domain Walls”, T. Hiramatsu, M. Kawasaki, K. Saikawa, *JCAP* 1005:032, 2010. [arXiv:1002.1555]

“Phantom boundary crossing and anomalous growth index of fluctuations in viable f(R) models of cosmic acceleration”, H. Motohashi, A.A. Starobinsky, J. Yokoyama, *Prog. Theor. Phys.* 123:887-902, 2010. [arXiv:1002.1141 [astro-ph.CO]]

“Gravitational waves from kinks on infinite cosmic strings”, M. Kawasaki, K. Miyamoto, K. Nakayama, *Phys. Rev. D*81:103523, 2010. [arXiv:1002.0652]

“Ghost Dark Matter”, T. Furukawa, S. Yokoyama, K. Ichiki, N. Sugiyama, S. Mukohyama, *JCAP* 1005:007, 2010. [arXiv:1001.4634]

“Primordial Black Holes as All Dark Matter”, P.H. Frampton, M. Kawasaki, F. Takahashi, T.T. Yanagida, *JCAP* 1004:023, 2010. [arXiv:1001.2308]

“Gravitational-Wave Constraints on the Abundance of Primordial Black Holes”, R. Saito, J. Yokoyama, *Prog. Theor. Phys.* 123:867-886, 2010. [arXiv:0912.5317]

“Cosmic Discordance: Detection of a modulation in the primordial fluctuation spectrum”, K. Ichiki, R. Nagata, J. Yokoyama, *Phys.Rev.*D81:083010, 2010. [arXiv:0911.5108]

“Stellar center is dynamical in Horava-Lifshitz gravity”, K. Izumi, S. Mukohyama, *Phys. Rev. D*81:044008, 2010. [arXiv: 0911.1814]

“Matter instabilities in general Gauss-Bonnet gravity”, Antonio De Felice, David F. Mota, Shinji Tsujikawa, *Phys. Rev. D*81:023532, 2010. [arXiv: 0911.1811]

“Gamma-ray Constraints on Hadronic and Leptonic Activities of Decaying Dark Matter”, R. Chen, S.V. Mandal, E. Takahashi, *JCAP* 1001:023, 2010. [arXiv:0910.2639].

“Cosmological Magnetic Fields from Inflation and Backreaction”, S. Kanno, J. Soda, M. Watanabe, *JCAP* 0912:009, 2009. [arXiv: 0908.3509]

【その他、著作・解説論文等】

1. 大谷知行, "1.2.1 テラヘルツ波検出器," 平成22年度光技術動向調査報告書, pp. 2-8 (2011).
2. 大谷知行, “宇宙背景放射観測のための超電導検出器の開発,” 超電導 Web21, Vol. 2010, No. 2, pp. 5 (2010)
3. C. Otani, “Development of superconducting THz detectors for Cosmic Microwave Background observation,” Superconductivity Web21, Vol. 2010,

No. 2, pp. 5 (2010).

4. “Dark energy: investigation and modeling”, S. Tsujikawa, in "Dark Matter and Dark Energy: a Challenge for the 21st Century" [arXiv:1004.1493]
5. “Dark Energy-Theory and Observations”, L. Amendola, S. Tsujikawa, Cambridge University Press, 2010, 506pp.

(2) ホームページについて

以下の領域ホームページを作成し、活用している。

一般向け: <http://cbr.kek.jp/outreach/>

研究者向け: <http://cbr.kek.jp/>

さらに各計画研究が研究機関毎にホームページを設置しており、上記ホームページからリンクされている。

(3) 公開発表について

【シンポジウムやセミナーの開催】

“領域立ち上げシンポジウム”, 2009年10月7日 (参加者約70名) [http://www-conf.kek.jp/cmb/ryoiki\\_sympto/2009/](http://www-conf.kek.jp/cmb/ryoiki_sympto/2009/), “CMBワークショップ2010”, 2010年6月7日～9日, 国立天文台 (三鷹) <http://www-conf.kek.jp/cmb/2010/> (参加者約120名)

“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

“CIBER science workshop”, 2010年11月15-16日・KASI, Daejeon, Korea, 20名

第2回UTQuest研究会

Extra-dimension probe by cosmophysics (ExDiP2010)

<http://research.kek.jp/people/hkodama/ExDiP2010/>  
2010年11月9日～12日 KEK

参加者: 約50名, 招待講演: 海外5名, 国内3名

第1回UTQuest研究会

<http://research.kek.jp/people/hkodama/UTQuestWS1/>  
2010年3月10日 (水), 那智勝浦

参加者: 44名, 招待講演者: 海外5名

国際型ワークショップ ALTB Cosmology (ALTB2009)

<http://www-conf.kek.jp/LLTB2009/>  
10月20日-23日 KEK

参加者約20, 招待講演者: 海外4名

【招待講演】主なもの (合計69回の招待講演。) これ以外の招待講演および一般講演を合わせると、領域全体で200回を超える。

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. “Search for B-Modes in CMB Polarization –QUIET and Other Experiments”, Osamu Tajima, Rencontres de Moriond EW 2011, March 13–20, 2011, La Thuile, Italy.
2. “超伝導検出器によるビッグバン以前の宇宙観測”, 羽澄昌史, 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会第77回ワークショップ「極限を測る超伝導技術の最前線」2011.3.10, 東京
3. “First results from QUIET”, Osamu Tajima, International Workshop on Cosmic Microwave Background Radiation and Its Foreground Interstellar Components, Feb. 22, 2011, Tokyo.
4. “Status of POLARBEAR”, Haruki Nishino, International Workshop on Cosmic Microwave Background Radiation and Its Foreground Interstellar Components, Feb. 22, 2011, Tokyo.
5. “Future ‘r’ Measurements and Foreground”, Masashi Hazumi, International Workshop on Cosmic Microwave

- Background Radiation and Its Foreground Interstellar Components, Feb. 22, 2011, Tokyo.
6. “Detector using superconductivity”, Masashi Hazumi, Joint Asian Accelerator Workshop (JAAWS), Nov. 29, 2010, POSCO, Korea.
  7. “ビッグバン以前を探る—超伝導マイクロ波検出器による宇宙背景放射観測”, 羽澄昌史, 第71回応用物理学学会学術講演会、2010年9月16日、長崎
  8. “Probing Inflation with CMB Polarization Measurements -QUIET, POLARBEAR and beyond”, Masashi Hazumi, Horiba International Conference COSMO/CosPA, 2010.9.27-10.1, Tokyo
  9. “Future CMB Polarization Measurements and Japanese Contributions”, Masashi Hazumi, YKIS2010 Symposium, Cosmology –The Next Generation–, June 28-July 2, 2010, Kyoto, Japan.
  10. “Cosmic Microwave Background (CMB)観測と宇宙背景重力波”, 羽澄昌史, 2010年6月14日 DECIGO Workshop、東京
  11. “CMB 偏光観測実験の Overview”, 羽澄昌史, 日本物理学会第66回年次大会 宇宙線・宇宙物理領域シンポジウム 「主題：CMB で探る初期宇宙と Physics beyond the Standard Model」、新潟、2010年3月25日–28日
  12. 「ビッグバンの前を探る小型科学衛星 LiteBIRD」, 羽澄昌史, 超流動ヘリウム冷却システム技術調査研究会、2010.1.29, 東京
  13. “今後の CMB 観測計画とガンマ線天文学”, 羽澄昌史, 宇宙線研究所共同利用研究会「高エネルギー宇宙物理学の将来と CTA」, 2010.1.9, 柏
  14. 「ビッグバンの前を探る新しい宇宙観測—宇宙マイクロ波背景放射の偏光度測定」, 羽澄昌史, 東京工業大学物理学グローバル COE「ナノサイエンスを拓く量子物理学拠点」公開シンポジウム、2009.12.8、東工大蔵前会館
  15. 「宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光観測衛星 LiteBIRD」, 羽澄昌史, 石黒正人教授退職記念ワークショップ「野辺山の四半世紀と電波天文学の将来」、2009.7.4, 国立天文台三鷹
  16. “Primordial Gravitational Wave Detection from CMB Polarization Measurements: Ground-based experiments and yet another satellite study”, Masashi Hazumi, The 58<sup>th</sup> Fujihara Seminar on World-wide Network for Gravitational Wave Observation, May 27-29, 2009, Hayama.
- 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」
17. S. Ariyoshi, T. Taino, A. Dobroiu, H. Sato, H. Matsuo, C. Otani, "Evaluation of a Terahertz-wave Detector with a Superconducting Tunnel Junction Coupled to a Thin Superconductor Film," East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE2009) Nanjing, China, 2009.10.
  18. C. Otani, S. Ariyoshi, T. Taino, A. Dobroiu, “Terahertz sensing and imaging with superconducting tunnel junction detectors”, 2009 Superconductive device, material, system, and cryocooler conference in Yonezawa (Yonezawa Conference), Yonezawa, Japan, 2009.6.
  19. C. Otani, “Terahertz Sensing, Imaging and Applications”, 2nd A\*STAR-RIKEN Joint Symposium 2009, Singapore, Singapore, 2009.5.
  20. C. Otani, S. Ariyoshi, T. Taino, A. Dobroiu, “Terahertz Detector Array using Superconducting Tunnel Junctions”, Joint JSPS-ESF International Conference on Nanoscience and Engineering in Superconductivity, Tsukuba, Japan, 2009.3.
  21. 有吉誠一郎, “テラヘルツ帯・超伝導検出器の開発とイメージング応用,” 低温工学協会 第7回冷凍部会例会, 早稲田大, 2011.3.11.
  22. 大谷知行, 有吉誠一郎, 高橋研太, 古賀健祐, “超伝導テラヘルツ検出器の開発.” 第11回テラヘルツ電磁波産業利用研究会「テラヘルツ科学を支える低温技術」, 大阪, 2011.1.28
  23. 大谷知行, “超伝導トンネル接合によるテラヘルツ波検出,” 日本学術振興会超伝導エレクトロニクス第146委員会 センシングシステム分科会第3回研究会, 東京, 2011.1.24.
  24. 大谷知行, “超伝導トンネル接合素子を用いたテラヘルツイメージング” 低温工学協会東北・北海道支部 第15回超伝導・低温若手セミナー 洞爺湖, 2010.8.30-31.
  25. 大谷知行, 有吉誠一郎, 田井野徹, “超伝導デバイスによるテラヘルツイメージングと展望,” 電子情報通信学会2010年総合大会 チュートリアルセッション「超伝導システム化技術」, 仙台, 2010.3.16.
  26. 大谷知行, “テラヘルツセンシングとイメージング,” 和光理研 IP セミナー, 和光, 2009.9.29.
  27. 大谷知行, “サブミリ波—テラヘルツ波センサ (STJ, SIS, MKID),” 超伝導エレクトロニクス技術調査委員会, 2009.8.10.
  28. 関本裕太郎, 成瀬雅人, 野口卓, 新田冬夢, “MKID-ミリ波サブミリ波検出器で拓く宇宙観測”, 応用物理学会 超伝導検出器で実現する次世代先端分析技術, 2011/3/26, 神奈川
  29. 成瀬雅人, 関本裕太郎, 新田冬夢, 野口卓, 鶴澤佳徳, 2010, “マイクロ波超伝導共振器を用いた天文観測用サブミリ波帯検出器アレイの開発”, 東北大電気通信研究所 共同プロジェクト研究会. 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」
  30. “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. <http://physics.uci.edu/5AU/>
  31. “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」
  32. Cosmic Microwave Background Radiation and Its Foreground Interstellar Components, 2011年2月, 東京, 服部 誠, “Foreground subtraction”
  33. The 10<sup>th</sup> Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, 2009.11., Wuxi, China, M. Hattori, Bolometric Interferometer” 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」
  34. “Modified gravity models of dark energy”, S. Tsujikawa, Lect. Notes. Phys. 800, 99 (2010) [arXiv: 1101.0191 [gr-qc]]
  35. “AdS/CFT on the brane”, J. Soda, Lectures given at 5th Aegean Summer School: From Gravity to Thermal Gauge Theories: The AdS/CFT Correspondence, Adamas, Milos Island, Greece, 21-26 Sep 2009. [arXiv:1001.1011]

36. “Big-bang nucleosynthesis and new physics”, K. Kohri, 4th UniverseNet School. 2010.9.12, Lecce, Italy
  37. “弦理論とブレーンインフレーション”, 向山信治, 第40回天文天体物理若手夏の学校, 2010年8月3日, 豊橋
  38. “Particle Cosmology”, Kazunori Kohri, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology, 2011.3.4-5, KEK, Tsukuba.
  39. “Quantum field in curved space ~issues related to IR divergences in the inflationary universe~”, 田中貴浩, 第四回超弦理論と宇宙, 2011年2月18日, 箱根
  40. “CMB and physics of the early Universe”, Kazunori Nakayama, International Workshop on CMB “Cosmic Microwave Background Radiation and Its Foreground Interstellar Components”, 2011年2月17日, 東京
  41. “Alternative Gravity Theories II: Horava-Lifshitz gravity”, Shinji Mukohyama, 2011 Shanghai Asia-Pacific School and Workshop on Gravitation, 2011年2月12日, Shanghai, China.
  42. “Alternative Gravity Theories I: Ghost Condensation”, Shinji Mukohyama, 2011 Shanghai Asia-Pacific School and Workshop on Gravitation, 2011年2月10日, Shanghai, China.
  43. “Dark Radiation”, F. Takahashi, 余剰次元物理2011, 2011年1月23日, 大阪大学
  44. “インフレーション宇宙論”, 田中貴浩, 第23回理論懇シンポジウム「林忠四郎先生と天文学・宇宙物理学」, 2010年12月22日, 京大基研
  45. “Cosmology and black holes in ghost condensate”, S. Mukohyama, APCTP Focus Program: Frontiers of Black Hole Physics, 2010年12月7日, APCTP, Korea
  46. Status of Horava-Lifshitz gravity, S. Mukohyama, APCTP Focus Program: Frontiers of Black Hole Physics, 2010年12月9日, APCTP, Korea
  47. Galileon Cosmology, Shinji Tsujikawa, Workshop on Beyond Standard Models and the Dark Sides of Our Universe, 2010.11.19, Shanghai, China
  48. G-inflation, J. Yokoyama, Workshop on Beyond Standard Models and the Dark Sides of Our Universe, 2010年11月19日, Shanghai, China
  49. Influence of axionic fields on large scale structures, H. Kodama, KEK-CPWS ExDiP2010 ‘Extra-Dimension Probe by Cosmophysics’, 2010.11.12, KEK
  50. Cosmology of a Galileon field, S. Tsujikawa, KEK-CPWS ExDiP2010 ‘Extra-Dimension Probe by Cosmophysics’, 2010年11月12日, KEK
  51. Higgs inflation with a running kinetic term, F. Takahashi, KEK-CPWS ExDiP 2010 ‘Extra-Dimension Probe by Cosmophysics’, 2010.11.10, KEK
  52. Isocurvature Perturbation as Probe for the Early Universe, Masahiro Kawasaki, KEK-CPWS ExDiP2010 ‘Extra-Dimension Probe by Cosmophysics’, 2010年11月10日, KEK
  53. Issues on supersymmetric hybrid inflation, Kazunori Nakayama, KEK-CPWS ExDiP2010, ‘Extra-Dimension Probe by Cosmophysics’, 2010年11月10日, KEK
  54. IR issues in the inflationary universe, Takahiro Tanaka, KEK-CPWS ExDiP2010 ‘Extra-Dimension Probe by Cosmophysics’, 2010.11.9, KEK
  55. Viability of Horava-Lifshitz theory, Shinji Mukohyama, KEK-CPWS ExDiP2010 ‘Extra-Dimension Probe by Cosmophysics’, 2010年11月9日, KEK
  56. Density perturbations in general modified gravity models of dark energy, Shinji Tsujikawa, NIMS-APCTP Joint International Workshop, 2010年10月1日, 大田, Korea
  57. Inflation and dark energy-theoretical progress over 20 years, Shinji Tsujikawa, JGRG20, 2010年9月25日, 京都大
  58. Higgs Inflation with a running kinetic term, F. Takahashi, COSMO/CosPA 2010, 2010年9月29日, 東京大
  59. 素粒子模型と暗黒物質の直接および間接検出, 中山和則, 日本物理学会, 2010.9.13, 九工大
  60. ダークエネルギー間際再考: 宇宙論的側面, 田中貴浩, 日本物理学会, 2010.9.12, 九工大
  61. ダークエネルギー問題再考: 素粒子論的側面, 北澤良久, 日本物理学会, 2010.9.12, 九工大
  62. Dark energy and modified gravity, S. Tsujikawa, Confronting theory with observations-A UniverseNet Cosmology Workshop, 2010.8.20, ニールスボーア研究所, Denmark
  63. Fine Structure of Inflationary Scenario, J. Soda, Cosmology, Gravitation & High Energy Physics 2010, 2010.6.28-7.1, Universiti Putra, Malaysia
  64. Cosmological implications of gravity at a Lifshitz point, S. Mukohyama, Gravity and Cosmology 2010, 2010年6月16日, 京大基研
  65. CMBと超高エネルギー物理, 向山信治, CMBワークショップ2010, 2010.6.8, 国立天文台
  66. Dark matter annihilation effects on the CMB anisotropy, 中山和則, 新学術領域CMBワークショップ2010, 2010.6.7, 国立天文台
  67. Probing signatures of modified gravity models of dark energy, S. Tsujikawa, IEU-APCTP Workshop, 2010.5.17, Institute for the Early Universe (Korea)
  68. Dark energy and modification of gravity, S. Tsujikawa, APCTP-IEU Focus Program, 2010年5月14日, APCTP (Korea)
  69. Cosmology with Gravity in the Higgs phase, S. Mukohyama, 2nd Holographic Cosmology Workshop, 2010年5月11日, McGill University
- (4) 「国民との科学・技術対話」について  
【報道発表】
- “初期宇宙に大量のモンスター銀河発見” 於 東京大学 廿日出、河野、川辺、松浦  
[http://www.s.u-tokyo.ac.jp/press/press-2010-39\\_pre2010092\\_9\\_61ba4bf4.html](http://www.s.u-tokyo.ac.jp/press/press-2010-39_pre2010092_9_61ba4bf4.html)
- 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
- 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) [教育] 午後10:00～午後10:35 (再放送) 2010年11月26日(金) [教育] 午後6:55～午後7:30  
<http://www.nhk.or.jp/zero/schedule/index.html>
- あかりの成果を紹介のため出演
- 【アウトリーチ活動】
1. 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。アンケートを実施し、わ

- かりやすかったと答えた人が83%にのぼった。
2. 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月の2度にわたり主催。
  3. KEK 一般公開で宇宙背景放射観測を紹介する展示を公開。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。
  4. 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。
  5. 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。アンケート結果によると、内容の難易度は適切であったと答えたものが最も多かった。
  6. 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
  7. 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」、超伝導コースター
  8. 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
  9. 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>」
  10. 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用いた検出器デモ実験を実施し好評を博す。
  11. JAXA 宇宙科学研究所では常時一般公開があり、申込みば閲覧可。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。
  12. 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。  
(<http://www.isas.jaxa.jp/j/mailmaga/index.shtml>) . 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。
  13. 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、研究とはどのような仕事かについて中学生と対話した。本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との報告を受けた。
  14. 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、受講者属性(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
  15. 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、受講者属性(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
  16. 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、受講者属性(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。
  17. 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深める)。講師 服部 誠、受講者69名、受講者属性(東北大1年生62名(経2名、法3名、文8名、医16名、教1名、理7名、工25名、高校生7名)、内女子19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。
  18. 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深める)。講師 服部 誠、受講者69名、受講者属性(東北大1年生47名(経2名、法2名、文2名、医4名、歯2名、理10名、工25名)、男女比3:1)、アンケートは未回収

## 8. 研究組織と各研究項目の連携状況

(2頁程度目安) 研究領域の設定目的の達成に向け、これまでどのように研究項目間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたかを具体的に記載してください。各研究項目の研究課題名及び、計画研究・公募研究(公募研究は研究代表者のみ)に参画している研究者の所属職氏名を記載してください。目安頁数(2頁)を超えても差し支えありません。

各計画研究代表者と領域評価者等で構成される総括班ではこれまで7回(2009年9月以降約3カ月に一度)、合計60時間を超える領域戦略会議を開催した。領域戦略会議では、各計画研究の進捗状況を共有し、全員で研究の進め方について考え、新しいアイデアを出すことも含めた連携の促進を具体的に議論してきた。この領域戦略会議は大変有効に機能している。

以下では、各計画研究について、他計画研究との連携および公募研究との調和について記す。

### 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」

- A02 との連携で将来の人工衛星 LiteBIRD のプロトタイプとなる GroundBIRD の製作を開始した。
- A05 と活発に研究交流を行い、A01 で推進する観測の意義について常に最新情報を得ている。
- 公募研究代表者とは日常的に研究の進捗状況について意見交換し、必要に応じて領域代表が助言を行うなど、公募研究代表者の自由度を尊重しつつ密な連絡を取って研究を展開している。

### 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」

- 毎月、研究分担者による A02 戦略会議 (skype 会議を含む) で研究項目間の密な連携を計っている。領域代表者も毎回参加し領域全体の目的に照らした研究方向の確認と改善に努めている。
- 3ヶ月に1度開催している領域戦略会議では、研究代表者である大谷に加え、分担者である関本も参加し、領域全体の情報共有と計画研究間の連携に努めている。
- 理研、国立天文台、高エネ研、岡山大の4機関で相互に連携して実験を進めた。予算規模の比較的小さい岡山大は高エネ研と一体となって研究を進めることで、効率的かつ相互にプラスとなる体制を確立している。

### 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」

- 公募研究者に計画研究の会議および研究会に出席してもらい、計画研究のメンバーとの相互理解をはかっている。また、公募研究の内容に関して、共同での研究会開催や共同研究を緊密な連携により進めている。
- 計画研究 A04 の CMB 前景放射評価には、あかり衛星のデータが重要な役割を果たす。A03 の宇宙赤外線背景放射の観測データは、天域が限定的であるが前景放射としても良質であるため、これを用いた成分分離の試行は全天データプロセスのベンチマークとして有用であるほか、成分分離スキームの確立は宇宙赤外線背景放射の観測にも有用である。両計画研究は、人的交流を含む強いつながりを持ちながら進んでいる。

### 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」

- A01の片山教授らはスペクトルデータのみを用いて成分分離を行う独自のスキームを開発している。この開発と、銀河系の天体物理学的理解を深化させ、その成果を積極的に取り入れることで分離精度を向上させようとするA04の活動との接点を模索し、更なる分離精度向上を目指している。
- 公募研究者に定期的な A04 戦略会議および主催研究会に出席してもらい、計画研究のメンバーとの相互理解をはかることにより研究の方向付けに役立っている。

### 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」

- 公募研究者に計画研究の定期的な戦略会議および主催研究会に出席してもらい、計画研究のメンバーとの相互理解をはかることにより研究の方向付けに役立っている。
- 計画研究 A03 のロケット観測(CIBER)により赤外線宇宙背景放射強度についての驚くべき最新情報(未公開)がもたらされた。この情報と宇宙ガンマー線天体観測の整合性は宇宙論・究極理論へ重大な影響を与える。この問題について A05 班で検討を始めた。

各研究項目の研究課題名及び、計画研究・公募研究に参画している研究者の所属職氏名  
(平成23年6月現在)

【計画研究A01】

研究課題名：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

研究代表者：羽澄 昌史 高エネルギー加速器研究機構(KEK)・素粒子原子核研究所 (IPNS) ・教授

研究分担者：都丸 隆行 KEK・超伝導低温工学センター・助教

吉田 哲也 宇宙航空開発研究開発機構(JAXA)・宇宙科学研究所(ISAS)・教授

連携研究者：松原 英雄 (JAXA・ISAS・教授)、満田 和久 (JAXA・ISAS・教授)、鈴木 敏一 (KEK  
・超伝導低温工学センター・教授)、住澤 一高 (KEK・IPNS・助教)、  
長谷川 雅也 (KEK・IPNS・助教)、佐藤 伸明 (KEK・IPNS・助教)

科研費雇用：松村 知岳 (KEK・IPNS・特任助教)、石徹白 晃治 (KEK・IPNS・研究員)、  
永井 誠 (KEK・IPNS・研究員)、永田 竜 (KEK・IPNS・研究員)

研究協力者：エイドリアン リー (カリフォルニア大バークレー校・教授)、日下 暁人  
(シカゴ大・研究員)、茅根 裕司 (KEK・IPNS・協力研究員)、森井秀樹 (KEK・IPNS  
・協力研究員)

【計画研究A02】

研究課題名：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

研究代表者：大谷 知行 理化学研究所・テラヘルツイメージング研究チーム (理研テラヘルツ) ・  
チームリーダー

研究分担者：関本 裕太郎 国立天文台(NAOJ)・先端技術センター(ATC)・准教授

田島 治 KEK・IPNS・准教授

岡村 崇弘 KEK・IPNS・助教

樋口 岳雄 KEK・IPNS・助教

石野 宏和 岡山大学大学院・自然科学研究科・准教授

連携研究者：有吉 誠一郎 (理研テラヘルツ・研究員)、古川 昇 (理研テラヘルツ・テクニカルスタ  
ッフ)、野口 卓 (NAOJ・ATC・教授)、鶴沢 佳徳 (NAOJ・ATC・准教授)、  
服部 香里 (岡山大学大学院・自然科学研究科・特任助教)

【計画研究A03】

研究課題名：宇宙赤外線背景放射の観測によるダークエイジの探査

研究代表者：松浦 周二 JAXA・ISAS・助教

研究分担者：松本 敏雄 JAXA・ISAS・名誉教授

連携研究者：川田 光伸 (JAXA/ISAS)、和田武彦 (JAXA/ISAS)、松原英雄 (JAXA/ISAS)

科研費雇用ポストドク：津村 耕司 (JAXA/ISAS)

研究協力者：James Bock (Caltech/JPL)、大藪 進喜 (名大)、大坪 貴文 (東北大)、  
石黒 正輝 (ソウル大)、白旗 麻衣 (すばるハワイ観測所)、  
鈴木 和司 (名大)、渡部 豊喜 (名大)

【計画研究A04】

研究課題名：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

研究代表者：服部 誠 東北大学大学院理学研究科・准教授

連携研究者：土井 靖生 (東大・助教)、松元 亮治 (千葉大・教授)、田村 元秀 (国立天文台・  
准教授)、井上 開輝 (近畿大・准教授)

科研費雇用：森嶋 隆裕 (東北大・特任准教授)、大坪 貴文 (東北大・特任准教授)

研究協力者：町田 真美（九州大・助教）、Douglas Finkbeiner（ハーバード大・准教授）、  
John Kovac（ハーバード大・准教授）

【計画研究A05】

研究課題名：宇宙初期進化の直接観測に基づく究極理論探査

研究代表者：小玉英雄 KEK・IPNS・教授

研究分担者：川崎 雅裕 東京大学・宇宙線研究所・教授

横山 順一 東京大学・大学院理学系研究科・教授

早田 次郎 京都大学・大学院理学研究科・准教授

辻川 信二 東京理科大学・理学部第二部物理学科・准教授

向山 信治 東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任准教授

中山和則 東京大学・大学院理学系研究科・助教

連携研究者：北澤良久（KEK・IPNS・教授）、田中 貴浩（京都大学・基礎物理学研究所・教授）、

高橋 史宜（東北大学・大学院理学研究科・准教授）、郡 和範（KEK・IPNS・助教）

野澤 真人（KEK・IPNS・研究員）

【公募研究】研究項目・氏名・研究代表者所属・職「研究課題名」

- A01 大田 泉 近畿大学・理工学部・助教  
「宇宙マイクロ波背景放射広視野広帯域偏光観測の光学系開発」
- A01 木村 誠宏 KEK・超伝導低温工学センター・講師  
「超軽量化を目指した衛星搭載型断熱消磁冷凍機用超伝導磁石の開発とその実証」
- A01 片山 伸彦 KEK・素核研・教授  
「F e r m i GPUを使用した解析パイプラインの構築」
- A01 吉田 光宏 KEK・加速器・助教  
「スーパーレンズ等の微細構造を用いた回折限界を超える衛星搭載用高密度ミリ波光学系」
- A01 長谷川 雅也 KEK・素核研・助教  
「CMB小型衛星実験に向けた基礎データの収集：銀河面からの偏光ミリ波の高感度観測」
- A01 竹井 洋 JAXA・宇宙科学研・助教  
「宇宙の形成と構造進化の解明に向けた超伝導遷移端センサの信号多重化の革新」
- A02 赤池 宏之 名古屋大学・工学系研・助教  
「プラズマ窒化障壁を用いた超高感度サブミリ波帯検出器用高品質窒化ニオブ接合の開発」
- A03 川良 公明 東京大学・理学系・准教授  
「宇宙可視光背景放射の測定」
- A03 戸谷 友則 京都大学・理学系・准教授  
「赤外線領域における宇宙論的な銀河形成理論モデルの構築」
- A05 高橋 龍一 弘前大学・理工学研究科・助教  
「光のレイシユエーティングシミュレーションを用いた重力レンズ起源の偏光ゆらぎの見積り」
- A05 坂井 伸之 山形大学・教育文化学部・准教授  
「宇宙マイクロ波背景放射における非線形大規模構造の痕跡と初期宇宙モデルに対する制限」
- A05 高橋 史宜 東北大学・大学院理学研究科・准教授  
「低エネルギーインフレーションモデルにおける整合的宇宙論の構築とその観測的検証」
- A05 田中 貴浩 京都大学・基礎物理学研究所・教授  
「インフレーションモデルにおける赤外・紫外発散の問題」

## 9. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）

(1頁以内目安)・購入した設備等をどのように有効活用しているか、また、研究費を如何に効果的に使用しているかを記載してください。

### 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」

物品購入はQUIETおよびPOLARBEARのアップグレードに必要なハードウェアの購入が主たる目的であり、まさに領域の成功のために不可欠かつ効果的な用途といえる。冷凍機システム、コンパクトADC開発、クライオスタット開発などがこれにあたる。また、開発に必要となるツールとして電磁界シミュレーションのためのソフトウェアなどのソフトウェア一群を購入し活用している。

特任助教・研究員の雇用は研究推進の原動力といっても過言ではなく、優秀な若手が研究を支えている。研究費の用途として非常に効果的である。さらに計画研究A01とA02の連携の効果が大きく、様々なツールを共通に役立てることが出来ている。

### 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」

- 希釈冷凍機 2009 年度に導入し、AI 超伝導検出器の開発の土台となっている。コンスタントに 100 mK を達成しており、超伝導検出器の高感度化に貢献している。
- 2010 年度にマイクロ波ミリ波計測部品を購入することによって、独自の低雑音計測システムを構築した。これによって、AI 超伝導検出器の NEP $\sim 10^{-17}$  を達成している。
- 素子作製では、最も重要な開発項目である高感度化に向けて、理研と国立天文台に分子線エピタキシー装置を導入し、Nb と Al については国立天文台が、TiN については理研が中心となって研究を進めている。また、読み出し回路評価用のデバイス作製のために、理研が有していた装置群の一部を高エネ研に移設し、効率的に研究を進められる体制を整えた。作製装置群を有していない岡山大には特任助教の雇用費を手当てし、他機関と連携して研究を進めた。また、研究の進捗と必要性に鑑みて、年度ごとの予算配分についてフレキシブルに対応し、効率的な研究費の運用を図っている。作製装置群は東日本大震災で若干の影響を受けたが、現在ではほぼ復旧が進んでおり、当初のタイムスケジュールに沿って研究を進められると考えている。

### 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」

主たる研究課題であるロケット実験には、実験室や地上での観測装置の開発や性能評価が必須であり、本研究費で購入した測定用光源や電子機器をこの目的に用いている。また、研究打合せや実験およびデータ解析を、ロケット打上げ基地や共同研究者が所属する米国にて行う必要があるが、本研究費によりこれらの活動を維持できている。さらに、本研究課題に関する将来計画にむけての観測装置設計や基礎技術開発については、現在のところ本研究費が唯一の財源である。

### 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」

- 本研究費で購入した高速PCクラスタは、「あかり」遠赤外線域全天地図作成でフル活動している。しかし、まだ余力があり、その能力を最大限引き出すための努力も継続して行われている。
- 本研究費で購入した高速PC群、画像処理ソフト群は、研究活動にフル活用されている。
- 本研究費雇用の大坪準教授は「あかり」遠赤外線域全天地図作成プロジェクトで中心的役割を担い、森嶋準教授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、グループの活動を先導している。二人はグループの計算機環境のハード・ソフト両面の整備を担当し、中でも森嶋はPCクラスタの計算環境の最適化・セキュリティー強化を推進し「あかり」遠赤外線域全天地図作成の東北大学での実施実現に大きな役割を担った。

### 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」

- 研究費の主要部は、研究員の給与と研究打ち合わせ・研究発表旅費であるが、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ている。
- 購入備品は以下の計算機で、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のためのネットワーク計算サーバとして使用、
  - ワークステーション Dell Precision T7500 1 台 (1,042,440 円, H21 年度購入).
  - 計算サーバー Power Master Vision S8827 1 台 (994,875 円, H22 年度購入).

## 10. 今後の研究領域の推進方策

(1頁以内目安) ・これまでの研究成果に照らして、今後どのように研究領域を推進し、領域設定時の目的を達成していくのか、その方策等について記載してください。

まず領域全体の推進方策について述べる。東日本大震災などの予期せぬ問題にもかかわらず、研究は概ね順調に進展しており、各計画研究で領域設定時の目的を達成できると期待される。計画研究A01では複数望遠鏡設置という当初の予定を超えたエクストラサクセスを狙っており、予定を超えた成功の可能性がある。しかしこれは研究者が行うタスクが増加していることも意味している。このような状況では、タスク過多によるミスの増加、計画の遅れというリスクが増大する。また、研究予算的にもぎりぎりの状況である。従って、研究領域全体の推進については、ミスを減らしてプロジェクトを成功に導くこと、予算とスケジュールのより徹底した管理をおこなうこと、を実行していく。

次に各計画研究の具体的推進方策を述べる。

### 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」

- QUIET の 2010 年までに修得した全データの解析を 2011 年度中に終わらせ結果を発表する。QUIET2 のための R&D も 2011 年度中に終わらせ、米国側の予算が確定し次第建設に入る。
- 2011 年度から開始する POLARBEAR 実験の観測を成功させ、期間内に高統計での B モード探索結果を発表する。
- POLARBEAR2 のレシーバーシステムの建設を完了し、最終年度に観測を開始する。
- LiteBIRD の概念設計を終了させ、成立性を確保する。地上での実証実験および A02 との連携による超伝導検出器の試験用テストベンチとして GroundBIRD を完成させ、テスト観測を行う。

### 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」

- 理研と国立天文台は MKIDs 素子の作製と評価に注力する。国立天文台では実績のある Nb と Al を中心に研究開発を進め、理研では高感度化の可能性が高い TiN に挑戦する。
- 高エネ研と岡山大は、読み出し回路とシステム化を進め、特にシステム化においては計画研究 A01 と密な連携を計りながら研究を進める。

### 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」

すでにCIBERロケット実験による宇宙赤外線背景放射に関する科学成果を得て、着実に領域設定時の目的を達成しつつある。今後は、改良したCIBER実験による新たな研究展開をはかるとともに、次期ロケット実験計画CIBER-2の開発を、現在進行中の設計に基づいて着実に進め、研究期間内での打上げ・観測を目指す。さらに、ロケット実験の発展形として、宇宙背景放射探査機EXZITや大型赤外天文衛星SPICAの装置概念設計と基礎開発をCIBERの観測成果をふまえて研究期間内に行なう。

### 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」

15年前に発表された世界初の天の川銀河系全天塵地図作成に携わったフィンクバイナー氏との連携を強化し、「あかり」データを元にし解像度・精度を飛躍的に向上させた天の川銀河系全天塵地図を期間内に完成させる。磁気流体シミュレーションに関しては、「あかり」全天地図・BICEPデータの連携により天の川銀河系内の塵からの偏光放射の高精度なテンプレートを今年度中に完成させる。これら全ての情報を取り込んだ高精度成分分離スキームをA01と連携しながら期間内に完成させる。

### 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」

- すでに現象論的な枠組みではインフレーションモデルとその観測的予言について組織的な研究は完了したと言える。これに基づいてモデルを絞り込むための新たな CMB 実験の観測情報が公表されるのは 1 年以上後になるので、当面は、まず、4 次元超重力理論に基づく統合的な宇宙モデルとして構築可能なものを選別する。
- 初期宇宙観測を究極理論に結びつけるためには、究極理論に厳密に基づいた現実的かつ統合的な宇宙モデル構築が必要となる。国際的にもこの第 1 原理的なアプローチはようやく始まったばかりであるが、この困難な課題に挑戦する。現在、新たに超弦理論現象論を専門とする国内の素粒子論研究者の協力を得て、研究戦略を検討中である。

## 1 1. 総括班評価者による評価の状況

(1頁以内目安)・総括班評価者とは研究領域全体への評価・助言等を行う研究者を指します。また、総括班評価者には計画研究及び公募研究の研究代表者・研究分担者はなることができません。

・総括班評価者から受けた評価・助言等がある場合には、当該評価者の所属職氏名及びその評価結果等について記載してください。

「8. 研究組織と各研究項目の連携状況」の項で説明したとおり、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、これまで合計7回の総括班戦略会議を開催してきた。戦略会議では、各計画研究代表者が当該計画研究の進捗状況を報告し、議論をおこなってきた。これにより、総括班メンバーが最新の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・助言を得るといふしくみを構築している。この中で、計画研究・公募研究に属さず、評価担当の総括班員として、以下の2名が総括班会議に参加している。

### 評価者の氏名と所属・職・専門分野

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)

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

以下に、今回の中間評価に関しての、評価者による評価・助言を記す。

### 評価者による評価・助言

全体に、領域代表のパワフルなリーダーシップのもと、領域の運営と計画研究の推進は非常にうまくいっているといえる。計画研究A01ではQUIETの初期データを用いて、偏光観測結果を論文投稿し、世界のトップレベルでBモード発見レースを戦っていることは評価できるし、米国側研究協力者の死去などの予期せぬ問題に対しても、考えられるベストの対処を行っている。POLARBEAR実験がいよいよはじまり、期間内に世界一の高感度での結果を出し、大きな発見がな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結果が出てきており、今後が非常に楽しみである。ガンマ線観測との不一致が鮮明になってくる場合は、宇宙物理学にとっても大きな問題提起となる可能性がある。その他の計画研究も東日本大震災という予期せぬ問題があったにも関わらず、期間内に目標達成の見通しが得られている。

領域を発展させ、より多くの研究者の参加を実現する努力もなされている。2010年6月に開催されたCMBワークショップでは、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えると、画期的といえる。あえて一つ注文をつけるとすると、今後の課題として、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ありませんが学問的・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。

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。今後、研究期間の後半に領域として大きな成果があがることが期待されているので、その際にタイムリーなアウトリーチ・広報活動を行うことが出来るよう、普段から準備をしておいていただきたい。