

(文責) 羽澄 昌史

1. イントロダクション：ビッグバン以前を探る CMB 偏光観測と KEK CMB 観測グループ

宇宙マイクロ波背景放射（Cosmic Microwave Background、CMB と略記）は宇宙最古の電磁波である。CMB の観測に対して二度のノーベル物理学賞が授与されていることから明らかなように、私達が住むこの大宇宙の誕生と進化を研究するためには CMB の観測は欠かせない。

KEK の CMB グループ（正式名称は実験的宇宙物理研究グループ）は 2007 年度に活動を開始した。その目的は、「宇宙を実験室として、物理学の根本法則（「宇宙のルールブック」）を実験的に探求する」ことである。現在は「CMB 観測によるインフレーション宇宙と背後にある量子重力理論の検証」が中心テーマである。インフレーション宇宙仮説は、熱いビッグバン以前に宇宙が急激な加速膨張を起こしたとする。いわば「宇宙全体が加速器になっていた時代があった」と言うのである。その検証は現代宇宙論の最重要課題の一つである。インフレーションに起因する原始重力波の観測なしにはこの検証は完成しない。CMB 偏光の「B モード偏光」と呼ばれる渦パターンは、「時空に浮かぶ天然の原始重力波記録装置」であることが知られており（図 1 参照）、その測定が原始重力波を発見する最も感度の高い方法である。CMB 偏光観測は、インフレーションの背後にある量子重力理論（超弦理論等）を検証できる現在唯一無二の手段であるため、高エネルギー物理学の発展にも不可欠である。グループの現在の目標は

1) 本グループが提案し JAXA が採択したライトバード（LiteBIRD）衛星による CMB 偏光観測を実現
2) ライトバードの直接的な助けとなる地上観測を行い、宇宙論の成果を得つつ、衛星の技術実証を行うの二点である。以下では、グループが推進している主要プロジェクトのライトバード衛星計画と、いよいよ始まった地上観測実験ポーラーベア（POLARBEAR）を中心に、進捗を説明する。

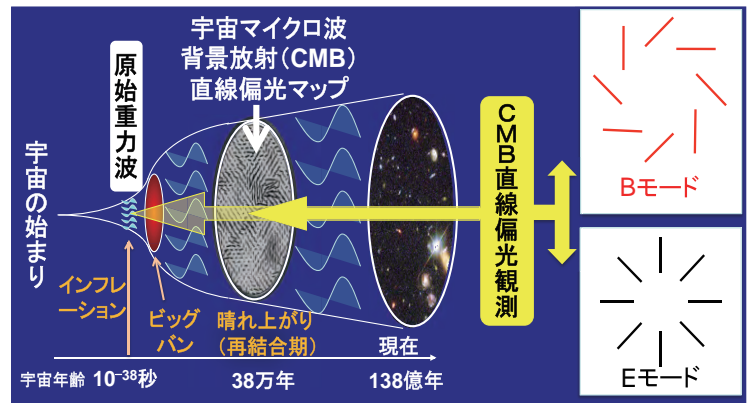


図 1：宇宙の進化と宇宙マイクロ波背景放射（CMB）

2. ライトバード衛星計画：国際協力によるデザインの進展

JAXA 宇宙科学研究所は、2019 年 5 月に、戦略的中型衛星 2 号機としてライトバードを選定した。ライトバードは、KEK CMB グループが提案し、究極の CMB 偏光観測を行う科学衛星計画であり 2027 年ごろの打ち上げを目指している。なお、本計画は、2020 年 1 月に、「学術会議マスタープラン 2020 の重点大型研究計画」に選ばれている。

超伝導検出器を搭載した二台の望遠鏡により、従来の観測と比べておよそ 100 倍の感度で CMB 偏光を全天にわたり精密観測する。大気の影響を受ける地上観測では到達できない感度を実現し、全天に渡る B モード偏光の全貌を明らかにすることを目指している。15 バンドに及ぶ観測周波数を

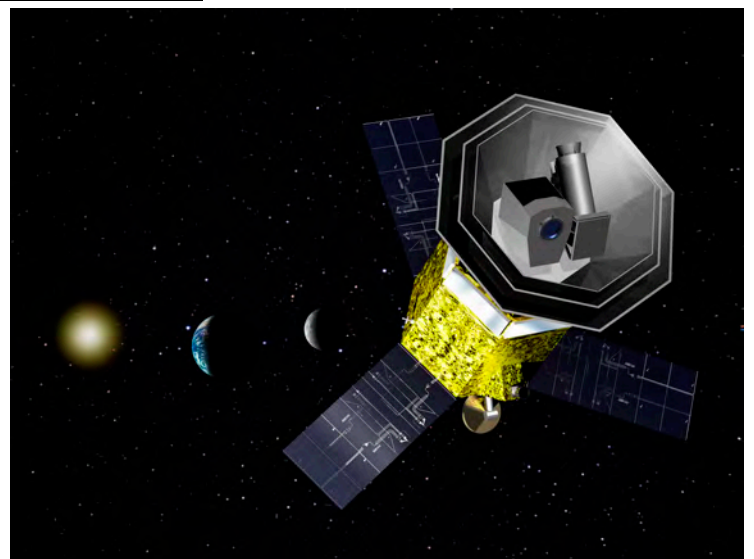


図 2：宇宙空間に浮かぶライトバード衛星の想像図
(©JAXA 宇宙科学研究所)

持つことにより、背景放射とその他の放射を地上では不可能なレベルで正確に分離することができる。ミッション機器に関しては、日本グループは二台の望遠鏡のうち、低周波観測のための望遠鏡 (Low Frequency Telescope、LFT) を担当する。KEK は、これまで地上実験で培った技術と経験に基づき、さらに JAXA つくばキャンパスと KEK の所在地が近いという利点も生かしつつ、LFT の組み立て、検証、校正と言う大役を担う。図 2 にライトバードの概観を示す。

ライトバードは 2020 年代に打上げる世界で唯一の CMB 偏光観測衛星となる可能性が高いため、世界の CMB コミュニティ及び宇宙論コミュニティから注目を集めている。JAXA 宇宙科学研による正式な選定が世界に示されたため国際協力がさらに進展し、現在 250 名を超える国内外の研究者が参加し、日米欧加が分担して協力する体制が整いつつある。2019 年 7 月には JAXA 宇宙科学研に世界の研究者を招き、キックオフ会議を開催した。CMB 観測で世界をリードしたプランク衛星のリーダーであるジャンルー・プジェ博士から、ライトバード全体 PI の本グループ羽澄へ松明を渡すセレモニーがあった (図 3)。2019 年 10 月には CMB グループの助教として、デ ハーン タイメン博士が着任した。博士は、ライトバードやポーラーベアで使用する超伝導転移端検出器の読み出しシステムに関する世界的なエキスパートであり、CMB 観測のデータ解析についても造詣が深い。ライトバード計画での活躍が期待される。

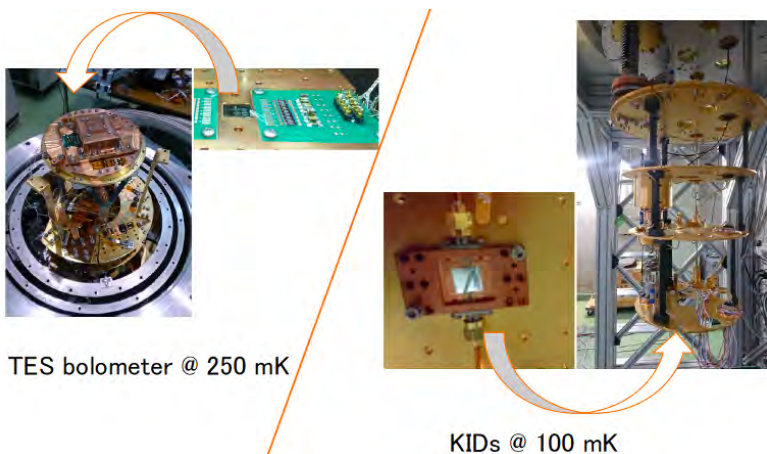
2019 年度は様々な技術的な進展やシミュレーション研究の進展があった。CMB グループで行った開発研究例として、南雄人博士研究員が中心となり、米国チームと共同で行った宇宙線に対する耐性の高い新しい超伝導検出器の研究を挙げる。フォノンを適切にブロックする金属をリソグラフィ技術で配置することにより、宇宙線による影響を抑えられることを測定とシミュレーションにより明らかにした。研究結果は国際会議で発表され、論文として出版された (Y. Minami et al., "Irradiation Tests of Superconducting Detectors and Comparison with Simulations", DOI : 10.1007/s10909-020-02393-7)。図 5 に測定装置と測定結果の一部を示す。



図 3 : ライトバード・キックオフ会議におけるプランク衛星チームからライトバード衛星チームへの松明受け渡しセレモニー (©KEK/IPNS)



図 4 : 新しく着任したデハーン タイメン助教



TES bolometer @ 250 mK

KIDs @ 100 mK

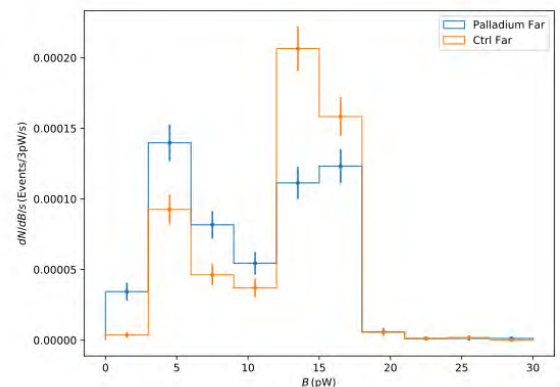


図 5 : (左図) 宇宙線の影響を測定した超伝導検出器と実験セットアップ。(右図) アルファ線を照射した測定結果。フォノンをブロックする金属を配置したセンサー (青線) の方が応答を小さくできる。

3. 地上観測の進展：ポーラーベア-1の新しい成果とポーラーベア-2の試験観測

ポーラーベア-1 実験は、2012年に観測を開始して以来、様々な観測結果を発表してきた。特に世界で初めて CMB のみを用いて重力レンズの証拠を検出したことが大きな成果であり、2014年に発表した二篇の論文の引用度は、合わせて 392 となっている（2020年3月4日現在）。2019年には、三篇の観測結果論文が査読を経てアストロフィジカルジャーナルに掲載された。現在、さらに三篇の論文を投稿し査読中の状態にある。掲載論文の中から、相互相関の解析結果（図6）をここで紹介する（Astrophys.J. 882 (2019) 62）。相互相関の解析とは、二つの望遠鏡が同じ天空を観測した場合の関係の度合いを調べることである。これにより、望遠鏡の結果を個別に解析することでは得られない情報が得られる。我々は、ポーラーベア-1 とすばる望遠鏡の観測から同じ天空を観測したデータを選んだ。相互相関の解析を行うことにより、世界で初めて、銀河観測のデータと、CMB 偏光との相関を測定した。統計的有意度は 3.5 シグマであった。この相関は宇宙の重力ポテンシャルにより光が曲げられる「重力レンズ効果」に起因している。系統誤差が大変小さい測定なので、今後の精密測定が期待される。ポーラーベアチームとすばるチームの共同研究であるこの論文は、多波長の観測を駆使して宇宙を研究する「マルチメッセンジャー宇宙物理学」の好例である。

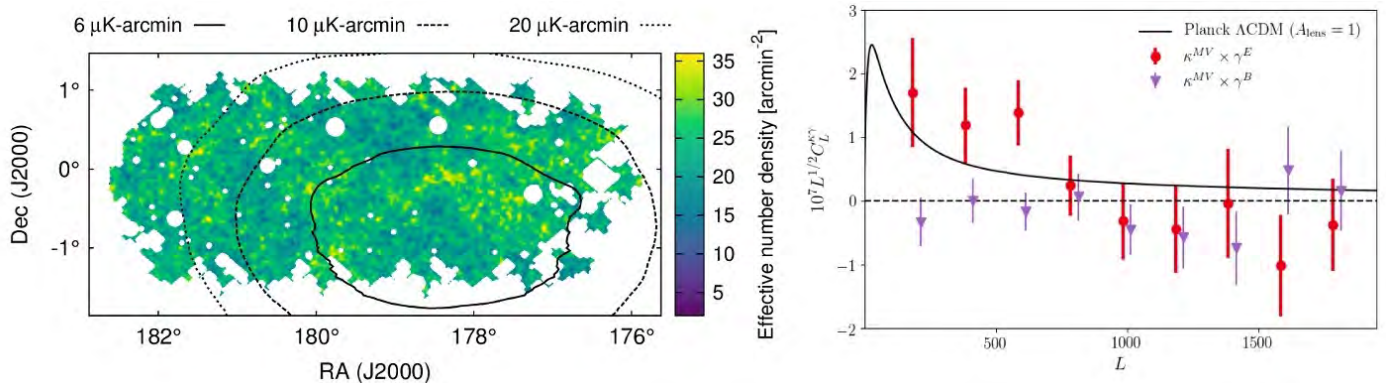


図 6：(左図) ポーラーベア-1 の観測領域（線で示す）とすばる望遠鏡の観測領域（色付き領域）。二つが重なっていることを利用して相互相関を調べた。(右図) 解析結果。左から三つの誤差付きの赤い点がゼロでないことが相互相関の存在を示している。

KEK CMB グループはポーラーベア-1 の感度を 6 倍程度改善し、かつ二つの周波数（90 ギガヘルツと 150 ギガヘルツ）で同時観測できるポーラーベア-2 計画を提案し主導してきた。開発は 2009 年に開始し、2018 年 8 月に KEK での総合試験が完了し、同年 10 月末にチリの観測サイトで設置作業をはじめ、2019 年初頭にファーストライトを得た。2019 年は、悪天候による障害などがありながらも調整を続けて来た。近い将来に宇宙論グレードの観測を開始することを目指している。なお、ポーラーベア-2 は、2009 年の発案時にはポーラーベア-1 受信機に使用したファン・トラン望遠鏡に搭載する計画であったが、現在では、望遠鏡を 3 台用いてより多くの周波数で観測を行うサイモンズアレイ計画の一部と位置付けられている。サイモンズアレイでは、KEK が主導して開発したポーラーベア-2 受信機を土台にして改良を加えた受信機を米国側で 2 台作り、計 3 台の受信機を 3 台の望遠鏡に搭載し、90, 150, 220, 270 ギガヘルツの 4 バンドで観測を行う予定である。二台目の受信機の製作・試験が米国で終わり、本稿執筆時点では、チリへ送り出され、船旅の途上にある。