

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光観測実験グループ活動報告

2020 年 12 月 14 日 (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。現在の構成は教授 1 (羽澄)、研究機関講師 1 (長谷川)、助教 1 (デ・ハーン)、科研費研究員

2 名 (金子、長崎)、大学院生 5 名である。グループの目的は、「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。インフレーションは原始重力波の存在を予言する。その観測なしにはインフレーション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」であり (図 1 参照)、その測定は原始重力波を発見する最も感度の高い方法である。さらに 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

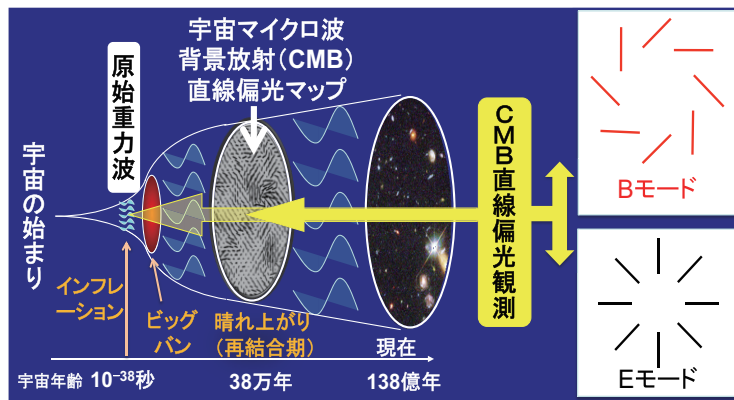


図 1：宇宙の進化と宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

- 1) 本グループが提案し JAXA が採択したライトバード (LiteBIRD) 衛星計画を推進すること
 - 2) ライトバードに資する地上観測を行い、宇宙論の成果を創出し、衛星の技術実証を行うこと
- の二点である。以下では、主要プロジェクトのライトバード衛星計画と、地上観測実験ポーラーベア (POLARBEAR) を中心に、進捗を説明する。

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

ライトバードは KEK CMB グループが提案した衛星計画で、従来の観測と比べておよそ 100 倍の感度で CMB 偏光観測を行うことを目指している。JAXA 宇宙科学研究所が戦略的中型衛星 2 号機に選定した計画で、2020 年代での打ち上げを目指している。2020 年代の世界唯一の CMB 偏光観測衛星となる可能性が高く、世界の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。KEK CMB グループ代表の羽澄がライトバードの世界全体 PI を務めている。

およそ 100 倍の感度を達成するため、超伝導検出器を搭載した 3 台の望遠鏡により、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。15 バンドに及ぶ観測周波数を持ち、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できる。観測機器に関しては、日本グループは低周波観測のための望遠鏡を担当する。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、望遠鏡の組み立て、検証、較正と言う大役を担う。

前回の報告 (2020 年 3 月 4 日) 以降、様々な科学的・技術的な進展があった。例として太陽放射を効果的に遮断するサンシールドと対称性の高いソーラーパネル (図 2) により、熱構造設計のマージンを改善したことがある。

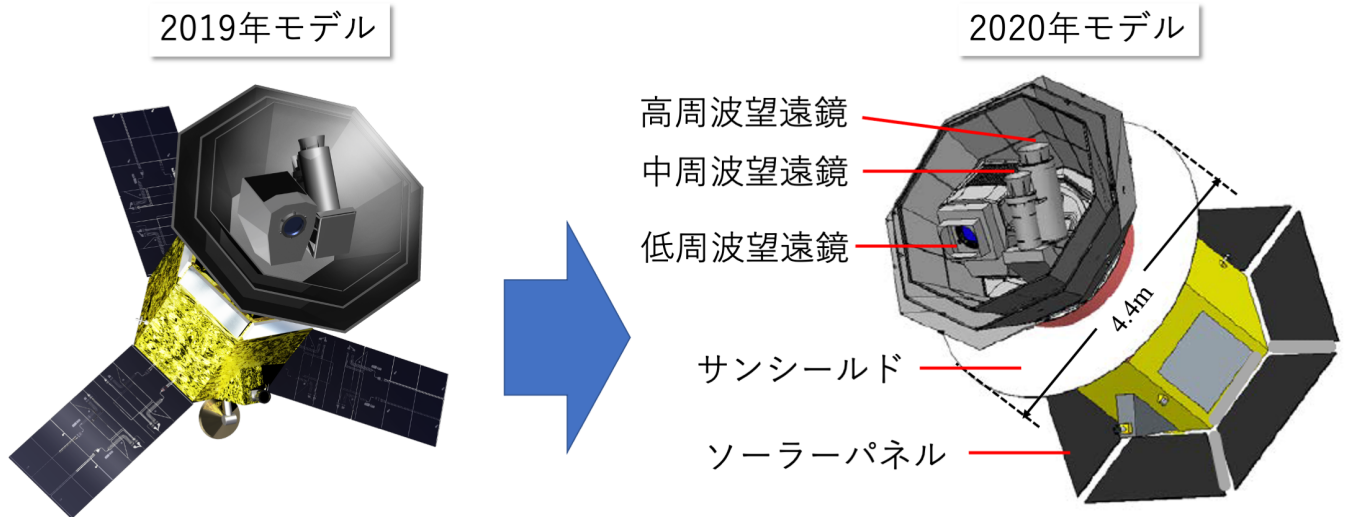


図 2: ライトバード衛星の概念検討の進化。

2020 年 6 月に岡山大学での開催を予定した世界全体会議は COVID-19 対策のため Zoom 会議に切り替えて実施した。Zoom 全体会議の毎日の参加者数は 110 名 (5 日間の平均値) であり、有意義な討議と意思決定ができた。COVID-19 の影響は無視できないが、これまでと同様のペースでライトバードの科学論文、技術論文を発表し続けた。本報告では、ライトバード開発研究のスピノフとして南雄人博士研究員 (現・大阪大学) が小松英一郎博士 (マックスプランク宇宙物理研究所、兼東大カブリ IPMU) と行った研究成果を紹介する (プレスリリース: <https://www.kek.jp/ja/press/pr20201124/>)。南氏はプランク衛星による CMB の偏光観測データを用い、宇宙を記述する物理法則がパリティ対称性を破っている兆候を、99.2% (2.4 シグマ) の確からしきで観測した。結果は *Physical Review Letters* 誌に掲載された。南氏が導入した新しい手法は、ライトバード衛星における装置の較正に関する研究に端を発している。今後ポーラーベアを含む地上観測で追試を行い、確からしきが 5 シグマを超えるようなことがあれば、我々の宇宙を支配する正体不明の暗黒エネルギーの正体を明らかにする重要な手がかりとなると期待されている。

最後にマネジメント関連の情報を三点記す。一点目は、ライトバードが文部科学省のロードマップ 2020 の掲載計画に選ばれたことである。二点目は、ライトバードが改訂版 KEK ロードマップに掲載されたことである。「その他の重要なプロジェクトの推進」の項で、他機関・他分野と連携して推進するプロジェクトという位置づけになっている。三点目は、羽澄が 2020 年 8 月 1 日より JAXA とのクロスアポイントメントを開始したことである。今年度は KEK が 80%、JAXA が 20% の割合で実行する。

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 435 となっている (2020 年 12 月 14 日現在)。本報告では、前回の報告 (2020 年 3 月 4 日) 以降に雑誌掲載された論文の中から、ハッブル定数の観測結果について以下に

紹介する。("A measurement of the CMB E-mode angular power spectrum at subdegree scales from 670 square degrees of POLARBEAR data", POLARBEAR collaboration, *Astrophys.J.* 904 (2020) 1, 65)

最近、複数の独立した精密観測から標準宇宙理論 (Λ CDM 理論) の綻びが報告され始めており、大きな注目を集めている。初期宇宙のデータから求めた現在の宇宙の膨張率 (ハッブル定数) と、現在に近い宇宙のデータから求めた値との違いが、 Λ CDM 理論では説明できないという問題 (ハッブル定数問題) は、その顕著な例である。宇宙背景放射 (CMB) 偏光度のより精密な観測は、ハッブル定数問題の解明に大きく寄与すると期待されている。我々は、ポーラーベア望遠鏡 (図 3 左) の偏光 E モード観測データ (図 3 中) を用いたハッブル定数の測定結果を 2020 年 5 月に発表した。これまでの誤差を 20% 減少することに成功し、ハッブル定数問題の統計的優位度が 4.3 シグマから 4.5 シグマに増加した。図 3 右が現状のまとめであり、4.5 シグマの食い違いがある。

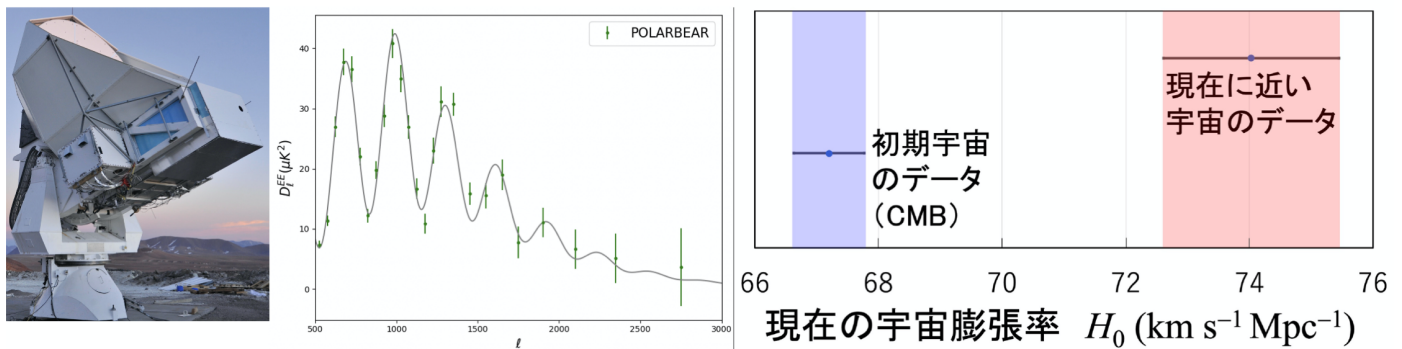


図 3 : (左) ポーラーベア望遠鏡の外観。(中) ポーラーベアの E モード偏光パワースペクトル観測結果。(右) 現在の宇宙膨張率 (ハッブル定数) 測定の現状。

ハッブル定数問題が新しい物理を示唆しているという期待と緊張感が高まっている。観測の系統誤差が原因である可能性は排除できないが、数年にわたる様々な検討にも関わらず、大きな系統誤差は見つかっていない。一方、いくつかの興味深い新理論が提案されている。例えば、初期ダークエネルギーモデル (early dark energy models) は、初期宇宙 (赤方偏移 $z \geq 3000$) で宇宙定数のようにふるまい、それ以降では放射のように急速にエネルギー密度を減少させていく新たなエネルギー形態を仮定する。一定のエネルギー密度しか供給しない宇宙定数とは異なり、初期宇宙と現在に近い宇宙の見かけ上のハッブル定数の食い違いをダークエネルギーの動的変化で説明できる。しかし、ダークエネルギーに時間変化を導入するだけでは、他のパラメータにしわ寄せが行き、別の不一致問題が起こるという指摘がなされている。複数の独立した測定で見え始めている Λ CDM の綻びを解決するシンプルな提案はないのが現状である。

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、二周波数 (90 ギガヘルツと 150 ギガヘルツ) で同時観測するポーラーベア-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後、試験観測を続けて来た。前回報告の直後から COVID-19 の影響で観測サイトでの活動の一時停止を決定したが、11 月より米国グループが観測サイトに入り、再開の準備を始めた。日本グループも許可を得次第、チリへ渡航する予定である。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、90, 150, 220, 270 ギガヘルツの 4 バンドで観測を行うサイモンズアレイ計画の一部と位置付けている。サイモンズアレイでは、KEK のポーラーベア-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 台の望遠鏡に搭載する。本報告で述べたハッブル定数問題についても、より精度の高い E モード偏光測定を通して、貢献できると考えている。