

## 実験的宇宙物理研究グループ(CMBグループ)活動報告

2023年06月12日 (文責) 長谷川 雅也

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 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)、准教授 1 (長谷川)、助教 1 (デ・ハーン)、研究員 1 名 (長崎)、大学院生 6 名である (特別共同利用研究員として受け入れている外部の 2 名を含む)。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

- 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事
- 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事の二点である。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。

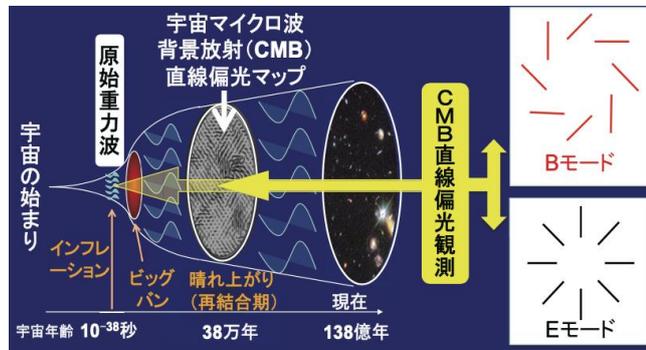


図 1: 宇宙の進化と宇宙マイクロ波背景放射(CMB)

## 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

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。現在、14 カ国から約 350 名の参加者による国際グループ(国内参加者約 80 名)により概念設計と要素開発を進めている。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出来ない感度を実現し、全天にわたる 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。観測機器の準備に関しては、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、米国グループと共同で望遠鏡の核心部に設置する超伝導センサーアレイシステムの開発と、地上における望遠鏡の検証・性能評価・校正という大役を担う。素核研 CMB グループは特に後者を担当し、試験要求を満たす校正装置の開発と実機試験をおこなうための「KEK スペースチェンバー」の概念設計検討をメカグループと共に進めている。関連して、試験成功の鍵を握るミリ波光学系の低温サポートに関してもメカグループと共同で開発を行っており、プロトタイプ製作に向けた設計を進展させた。さらに、関連する IRD(インターフェース要求文書)を JAXA との間で交わし内容の精査を進めている。今年度は、夏頃に実施予定の LiteBIRD プリプロジェクト化に関する審査(MDR=Mission Definition Review)に向けた文書作成と素核研の担当箇所に関わる技術審査を通過する事が大きな目標の一つとなる。

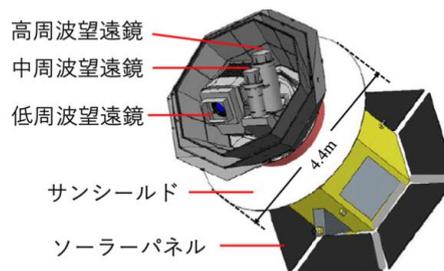


図 2: LiteBIRD 衛星概念図

## 3. 地上観測の進展:ポーラーベア-2 の現状

KEK CMB グループは、国際共同実験として 2012 年にポーラーベア-1 実験の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 513 となっている(2023 年 6 月 6 日現在)。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 での統合試験が完了し、同年 10 年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、試験観測を続けてきた。2020 年から COVID-19 の影響で観測サイトの活動が停止していたが、2020 年末に米国グループがチリに入国することが出来て、装置の再

立ち上げを行い、現在は観測を再開している。ポーラーベア-2は、現在では、望遠鏡を3台用いて、複数の周波数帯域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受信機のデザイン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。米国側で作成する受信機の一つがカリフォルニア大学サンディエゴ校での試験を終えてチリに送られ昨年度望遠鏡に搭載された。なお、この受信機に組み込まれている赤外線フィルター・半波長板等の光学素子は、KEKで製作されたものである（COVIDにより米国の関連会社が活動を停止し製作が出来なくなったため、国際協力として日本で作成を行なった）。今年度4月には、ほぼ4年ぶりに対面での共同研究者会議を2日間 UCバークレーにて行い、サイモンズアレイからより多くの物理成果を創出するための今後の観測戦略等についての議論を行った。

また、2014年から2016年に取得したPOLARBEAR観測データの再解析を行い、新しい宇宙観測成果を発表した。CMB偏光角の時間変動を精密に測定し宇宙複屈折の検出を目指したものである。有意な信号は得られなかったが、複屈折がアクシオン(Axion-like particle)起源であると仮定する事で $10^{-21} \sim 10^{-19} \text{eV}$ の超軽量アクシオンに対して厳しい上限値を得ることに成功した。（“Constraints on axion-like polarization oscillations in the cosmic microwave background with POLARBEAR”, submitted to Physical Review D）。現在、アクシオンのさらなる高感度探索を目指して新たなデータ解析手法の確立に取り組んでいる。さらに、CMB研究の新たな可能性として、CMB円偏光の探索を目指した光学素子の特性評価についても論文にまとめて報告している（“Characterization of a half-wave plate for CMB circular polarization measurement with POLARBEAR”, submitted to Review of scientific instruments）。

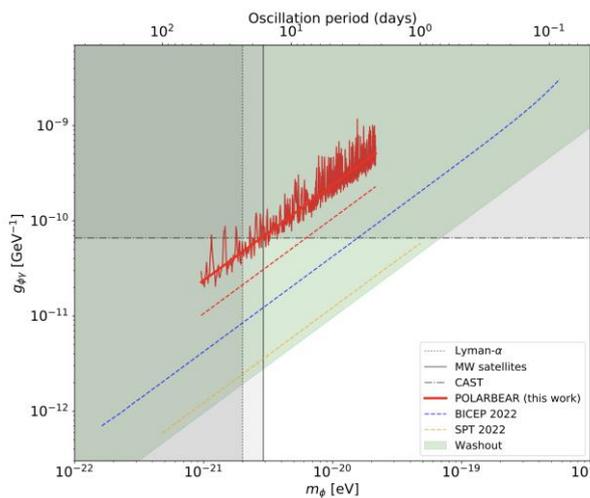


図 3: 宇宙論的複屈折の探索を通じたアクシオン様粒子の探索結果（赤線がPOLARBEARの結果）。 $10^{-21} \sim 10^{-19} \text{eV}$ の超軽量アクシオンに対して厳しい上限値を得ることに成功した。