

実験的宇宙物理研究グループ(CMBグループ)活動報告

2024年01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。

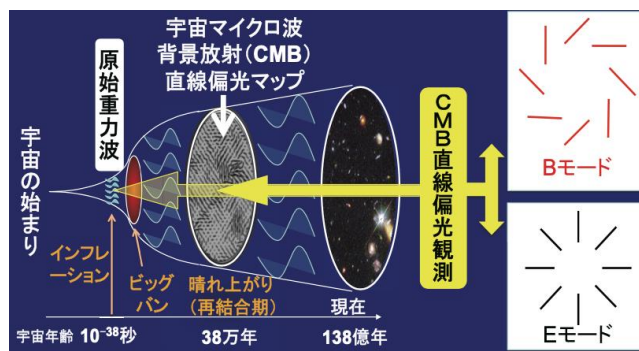


図 1: 宇宙の進化と宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

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、2032 年度の打ち上げを目指している。次世代初の 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 400 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・較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、試験要求を満たす較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、今年度は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。現在 LiteBIRD プリプロジェクト化に関する審査(MDR=Mission Definition Review)中である。素核研の担当箇所を含む技術審査を行う技術分科会は完了しており、残るは本審査のみとなっている。今年度中に本審査を終え、プリプロジェクト化に向けた準備を進めることが大きな目標の一つとなる。

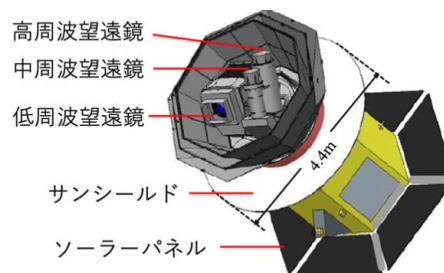


図 2: LiteBIRD 衛星概念図

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 528 となっている(2023 年 12 月 29 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。KEK での開発・統合作業を終え 2019 年初頭にファーストライトを得て(コロナ期間に一時観測サイトが閉鎖されたが) 2021 年からは安定して観測を続けている。ポーラーベア-1 における超新星残骸 TauA を用いたアクシオン様粒子の精密探索の結果(現在論文準備中)に触発されて、CMB に加えて TauA の観測を日々行っている。

また、望遠鏡の観測運用に関してはサイトのエンジニアとも協力しながら KEK が責任を持って担当している。観測機器の較正についても責任を持っており、特にゲインの時間変動をモニターするための人工較正光源(stimulator)の運用・解析については一手に引き受けている。今年度技術論文を投稿しアクセプトされている。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。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。この望遠鏡に搭載された光学素子には KEK と東大グループが共同で開発した新型の反射防止膜が施工されている。関連する技術論文を 2 編今年度発表した他、サイモンズアレイの後継実験であるサイモンズオブザーバトリー実験にも一部搭載されて、最近ファーストライトを迎えたことも今年度の成果である。

2014 年から 2016 年に取得したポーラーベア観測データを用いた超軽量アクシオン探索にも進展があった。これまで CMB 偏光角の時間変動を追う事で宇宙複屈折を探索し $10^{-21} \sim 10^{-19} \text{eV}$ の超軽量アクシオンに制限をつけてきたが、超新星残骸 TauA の偏光信号を用いる事で結果が格段に向上することが明らかになってきた(図 2)。現在データ解析は完了しており、論文発表の準備が佳境となっている。さらに、KEK グループを中心として円偏光成分に関する解析も進めている。標準宇宙論では CMB の円偏光成分は生じないため、有限な値が観測されれば、アクシオン等の未知の場の存在や原始磁場等のこれまで未観測な現象を強く示唆する結果となる。ポーラーベアでは測定器光学系の非完全性を用いて探索を行なっている。関連する技術論文を今年度発表し、解析結果に関する論文を現在準備中である。

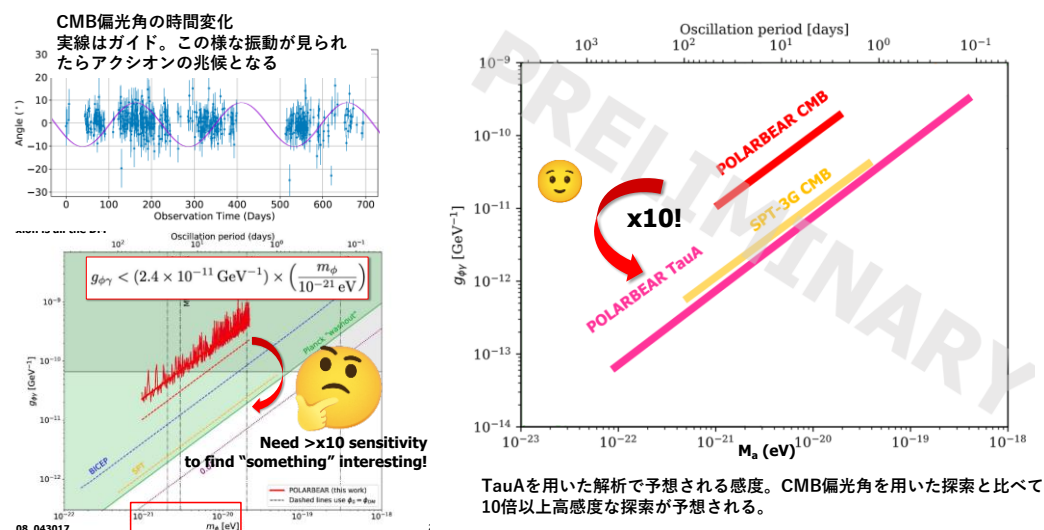


図 2 宇宙論的複屈折の探索を通じたアクシオン様粒子の探索原理 (左上図) と CMB 偏光角を用いた探索結果(左下図; 赤線が POLARBEAR の結果)。 $10^{-21} \sim 10^{-19} \text{eV}$ の超軽量アクシオンに対して厳しい上限値を得ることに成功した。現在進行中の TauA を用いた解析で予想される感度 (右図)。世界最高感度の探索が期待できる。