

LiteBIRD KDP-2 に必要だったこと、それをやり遂げて次へ

JAXA 宇宙科学研究所 藤本龍一、吉原圭介

LiteBIRD（ライトバード）は、「宇宙の始まりの瞬間を探る」という非常に挑戦的で魅力ある宇宙科学ミッションです¹。宇宙は 138 億年前に高温高密度の状態から始まり、それが大きく膨張することで現在の姿になりました（ビッグバン宇宙論）。なぜそのような高温高密度の状態から始まったのでしょうか？それを説明するのがインフレーション理論です。この理論によれば、時空が急激に膨張（インフレーション）した後、相転移を起こして高温高密度になり、ビッグバンが始まりました。インフレーションが本当に起きたとすると、宇宙マイクロ波背景放射（Cosmic Microwave Background radiation; 以下 CMB）に「原始重力波 B モード偏光」と呼ばれる渦巻き状の痕跡を残すと考えられています。この原始重力波 B モード偏光を検出し、インフレーションの観測的証拠を掴もうとするのが LiteBIRD です。JAXA 宇宙科学研究所が主導し、日本、欧州、北米各国の宇宙機関、大学・研究機関の国際協力により 2030 年代の実現を目指しています。現在宇宙機関で計画されている唯一のスペースからの CMB 観測計画です。

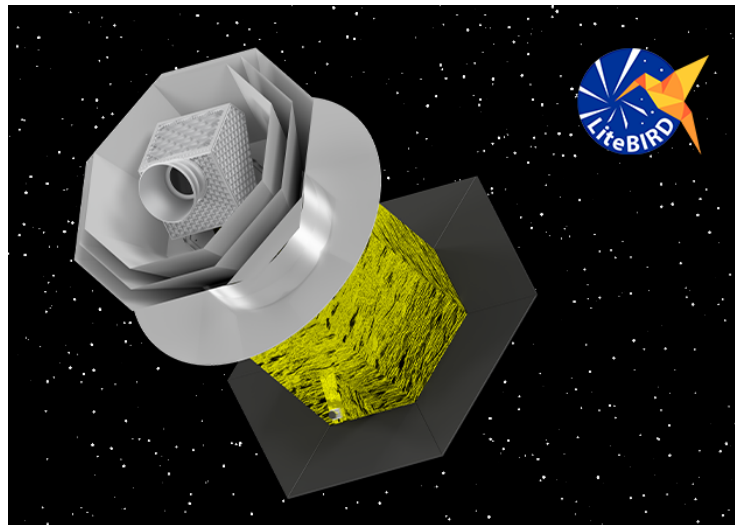


図 1: LiteBIRD の模式図。衛星バス部の上に望遠鏡を含むペイロード部がある。望遠鏡は 3 層の V-groove で覆われ、放射冷却と機械式冷凍機の組合せで望遠鏡を 5 K に冷却する。

これまで CMB 観測は地上とスペースの双方から行われてきており、両者は相補的です。地上では、電力や質量のリソースをあまり気にせずに、最新の装置を多数使用して観測を行うことができます。これに対してスペースは地球大気の影響を受けることなく、広い周波数帯域の観測を行うのに適しています。特に全天サーベイは地上では容易ではなく、スペースでの観測が有効です。ただし、いずれの場合も、原始重力波 B モード偏光の検出は簡単ではありません。

¹ <http://litebird.isas.jaxa.jp/>

CMB は極めて等方的な温度 3 K（ケルビン）の黒体放射ですが、方向によって 10^{-5} 程度のわずかな温度の揺らぎが存在します²。偏光の揺らぎは温度の揺らぎよりさらに 1 桁以上小さな信号です。CMB の偏光を調べるには、宇宙からやってくるミリ波・サブミリ波の偏光観測を行い、そこから銀河系内の放射の影響を取り除かなければなりません。そのようにして得られた CMB の偏光のうち、ほとんどは E モード偏光³と呼ばれるもので、さらに B モード偏光の多くは重力レンズ効果によるものです。原始重力波 B モード偏光を検出するにはこれらの「邪魔な」成分⁴をすべて丁寧に取り除く必要があります。そのために高感度かつ系統誤差を極限まで抑えた精密な偏光観測が必要です。LiteBIRD では、望遠鏡を温度 5 K（摂氏 -268 度）に冷却し、さらに 0.1 K（摂氏 -273.05 度）に冷却したおよそ 4000 個の焦点面検出器（超伝導転移端センサー TES を用いたボロメータ；以下検出器）を使用し、34-448 GHz 帯域のミリ波・サブミリ波の偏光観測を行います。太陽-地球の第 2 ラグランジュ点で、宇宙機のスピンの歳差を組み合わせた特殊な方式でおよそ 3 年かけて全天サーベイを行います。

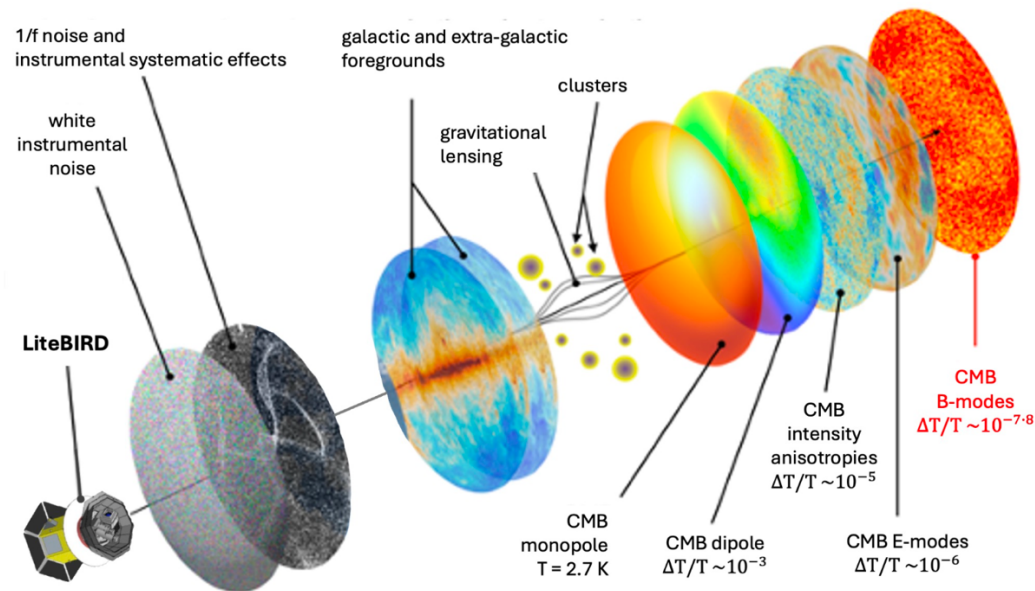


図 2: LiteBIRD に届く様々な信号。インフレーション理論の検証のために測定したいのは一番右奥の「CMB B-modes」で、それ以外はノイズになる。

² WMAP や Planck はこのわずかな揺らぎの分布を詳しく調べ、宇宙年齢やその他の宇宙論パラメータを高い精度で決定しました。

³ 偏光の向きが波数ベクトルに対して平行もしくは垂直なものを E モード偏光と呼びます。これに対して、B モード偏光は 45 度傾いています。密度ゆらぎは E モード偏光しか生成できませんが、重力波は E モード変更と B モード偏光の両方を生成でき得るため、B モード偏光の検出が鍵になります。

⁴ 「原始重力波 B モード偏光」の検出にとっては邪魔者のこれらの成分も、他の研究にとっては非常に重要な信号となります。ですので、実際にはインフレーションの観測的証拠を掴むという科学目標以外にも様々な科学目標を掲げています。

通常の天文衛星では、様々な天体を観測することで、最終的に天体や宇宙の普遍的な性質の理解を目指しており、言わば天文台として使われることが多いです。全天サーベイを行う天文衛星でも、そのデータを使って多くの天体の研究を行う点は変わりません。これに対して LiteBIRD による観測は、全天ミリ波・サブミリ波偏光マップを取得して、そこから原始重力波 B モード偏光を検出することでインフレーションのパラメタを決めるという、言わば一つの壮大な物理実験であり、LiteBIRD はこの実験に特化した一つの実験装置です。この一点に特化して、宇宙科学研究所の科学衛星として、世界に先駆けて 2030 年代にこの測定の実現を目指すという点がこの計画の大きな特徴です。そもそも、インフレーションの解明は自然界の基本的な力の統一にも関連しており、高エネルギー物理学（素粒子物理学）と密接な関係があります。このような背景により、国内の地上 CMB 観測を行っている研究者の多くは高エネルギー物理（素粒子）実験分野出身です。そのような CMB 研究者を母体とするグループに、ミリ波・サブミリ波観測の知見を有する電波天文研究者、極低温スペースミッションの経験を有する X 線天文研究者等が加わって、従来の宇宙科学研究所にはなかった全く新しい LiteBIRD 科学チームが形成されているのです。海外では、特に Planck 衛星の実績を有する欧州各国の CMB 研究者が多数参画していて、強力な支援が得られています。

LiteBIRD は 2019 年に宇宙科学研究所の戦略的中型計画 2 号機に選定されました。これまで地上 CMB 実験で使用されている検出器は米国のいくつかの研究機関が製作を担当しており、LiteBIRD でもその技術を有する米国の研究機関が製作することを前提としてきました。選定当初は NASA が参画して焦点面検出器の調達を担当することを目指していましたが、NASA における国際協力の基本方針の見直しもあって、それは実現しませんでした。そこで、高エネルギー加速器研究機構(KEK)内に新たに採択・設置された量子場計測システム国際拠点(QUP)が、地上 CMB 観測用の検出器の開発実績をもつ米国の研究機関と連携し、調達を進める方針としました。この体制の下でミッション検討を進め、2024 年にはミッション定義審査を通過し、プロジェクト化に向けた準備を進めていました。しかしながら、衛星搭載用検出器の開発は地上とは異なる難しさがあり、技術的難易度に加えて体制やコストなどの課題が顕在化した結果、KEK が LiteBIRD 計画から撤退するという決断に至ったのです。検出器がなければミッションは成立しません。

ここに至り、LiteBIRD 計画は命脈を絶たれたかに思われました。当時の宇宙科学研究所や JAXA、さらには宇宙科学コミュニティにおいても、そのような認識が急速に広がっていききました。しかし、この状況下にあっても、チームはミッションの実現を諦めませんでした。LiteBIRD は提案から長期にわたる準備期間を経ていましたが、この過程で力をつけていた若手・中堅メンバ（当時は“2nd Generation”とも呼ばれていました）が中心となり、宇宙科学研究所に対し、計画の抜本的な見直し、すなわち「デスコープ」ならぬ「リフォーメーション」を提案したのです。KEK の撤退の可能性が把握された 2024 年 6 月から約 1 ヶ月後の 7 月には、

国内外の LiteBIRD 関係者を集めた国際会合を開催し、計画の実現性を高めるためのリフォーメーション案を国際チームで徹底的に議論しました。各国の宇宙機関からの支援もあり、3 ヶ月程度という非常に短い期間で集中的な検討が進められ、リフォーメーション案の青写真が取りまとめられました。このリフォーメーション案は、2024 年 9 月に宇宙科学研究所が実施した Key Decision Point (KDP)において議論されました。この結果、継続検討の価値があると判断され、約 1 年かけてさらなる詳細検討を実施し、その後にミッション継続の可否を改めて判断することが決定されました。



図 3: 2024 年 7 月(KEK 離脱の報に接して 1 ヶ月後!)にバンクーバーで行われた会合に終結した国際 LiteBIRD チーム。この会合で、リフォーメーション案の青写真が取りまとめられた。

前述のように、KEK の撤退は LiteBIRD チームにとって衝撃的な出来事でしたが、むしろこの状況を貴重な機会と捉え、計画の実現性を高めるべく、リフォーメーション検討ではあらゆる角度から見直しに取り組みました。まず、研究代表者(PI)の交代を始めとする組織の若返りを実施しました。新しい体制の下、科学目的から観測装置の性能要求に至るまでの過程を一から見直しました。その際、インフレーション理論の検証という科学目的は維持しつつ、性能として譲れるところはぎりぎりまで譲って実現性を高めることを重視しました。3 台あった望遠鏡は 1 台に集約し、極低温検出器も 1 台にした上で構成や採用技術を見直しました。これにより、望遠鏡や検出器を冷却する極低温冷却装置もよりシンプルな構成になりました。また、LiteBIRD の科学的意義、価値をさらに高めるための活動も進めています。全天広帯域観測が可能なスペースからの観測は、インフレーション仮説の探索において地上 CMB 望遠鏡と相補的な知見を与えることから、地上の大型 CMB 観測計画と連携して最大限の相乗効果を得ることを目指しています。さらに、LiteBIRD が作成するミリ波・サブミリ波の全天偏光マップは、インフレーションの検証に限らず、様々な宇宙論、宇宙物理、さらには銀河系内や太陽系内のミ

リ波放射の研究など、幅広い科学的価値が期待されます。このため、これらの価値を積極的にアピールし、広く天文・宇宙物理学コミュニティから賛同が得られるように取り組んでいます。

ただ、最大の懸案であった極低温検出器の調達に関しては、LiteBIRD チームの活動だけではすぐに状況を改善することはできず、非常に厳しい局面にありました。検出器の製作は基盤技術を有する米国が担当することを前提に考えていたため、NASA や米国の地上 CMB 計画を支援する機関との連携を改めて模索し、米国の機関からの調達をあらゆるチャネルを通じて打診しました。研究者間では比較的容易に協力関係を築くことができましたが、フライトモデルまでの資金獲得に向けた具体化な道筋の見通しを得ることは難しく、さらにその後の米国の政権交代の影響もあり、米国の状況はむしろ一層不透明さを増していきました。そのような困難な状況において、欧州のいくつかの機関が LiteBIRD のために立ち上がり、欧州検出器コンソーシアムを結成して、米国の技術に頼らずに自前で検出器開発を行う体制を構築しようとする動きが生まれました。欧州には、CMB 用 TES ボロメータの実績こそないものの、宇宙用センサとして X 線 TES マイクロカロリメータや赤外線 TES ボロメータの開発実績があり、光学系設計・試験の技術も存在しています。一定の R&D（研究開発）が必要ですが、リソースさえ確保できれば、およそ 2 年で BBM での実証が可能という見通しも得られました。こちら当初は資金の確保の見通しが立っていませんでしたが、宇宙科学研究所執行部の働きかけにより、またイタリア・英国・オランダを中心とする欧州各国の宇宙機関の強い支援により、ESA 技術局の支援を得て R&D を進めるという、これまで全く考えられなかった体制が立ち上がったのです。おりしも、米国の不透明さが増す中で、2024 年 11 月に JAXA と ESA の間で将来大型協力に関する共同声明が出され⁵、日本と欧州が協力して宇宙科学の灯を絶やさずに歩み続けるべきだという機運が高まっていたこと、また、欧州では autonomy, self-determination, resilience の重要性が改めて認識されたこと（この分野の検出器は、従前の欧州ミッションにおいては米国技術に依存しており、欧州技術による開発への投資はこの文脈に合致する）などの急激な環境変化の“風”を的確に捉え、通常の枠組みに囚われずに、様々なチャンスを掴みに行ったことが功を奏したものと理解しています。これは宇宙科学研究所執行部のリーダーシップや各国宇宙機関の強い支援があって初めて実現したものであり、LiteBIRD チームとしても、大変感謝の念を抱いています。

欧州検出器コンソーシアムは、イタリアを中心に、英国、オランダ、その他の国が参画しており、開発の取りまとめはイタリア国立原子核物理学研究所(INFN)が担っています。日本では残念ながら KEK が撤退してしまいましたが、今後は日欧の宇宙科学と素粒子物理学分野が一体となって LiteBIRD を推進していきます。従前の宇宙科学ミッションとは異なる分野のパートナ

⁵ https://www.jaxa.jp/press/2024/11/20241120-1_j.html

一との協働することにより、LiteBIRD は、米国が不在の中でも日欧協力で挑戦的かつ魅力ある宇宙科学ミッションを実現できるという一つの象徴的なミッションになっていくことでしょう。

2025 年 9 月、宇宙科学研究所において KDP-2 が実施され、LiteBIRD は次のステップに向けて検討を継続することが認められました。KEK 撤退の報に接した 2024 年 6 月からの約 15 ヶ月のリフォーメーション活動を振り返ると、LiteBIRD を現実のミッションとして成立させるためには避けて通ることができなかった非常に重要な活動期間であったと言えます。この間、要求を一から見直し、性能と実現性のせめぎ合いの中でギリギリのところでのバランスを考えた検討を国際チームで協力して追求できたこと、宇宙科学研究所幹部や国内外のパートナー機関との緊密な対話を通じて、より強固な支援が得られる体制を築けたこと、困難な状況にあっても利用できるものは利用してなりふり構わずあがき、そこに外部から効果的な働きかけがあって検出器 R&D 体制の基盤が構築できたこと、そしてこれらの活動を通じて国内・国際チームの一体感が一層強まったこと等々、すべてが今後につながる大事なステップであったと捉えています。また、今回の再出発を支えた背景には、ミッションの提案から立ち上げまでに時間を要する中にあって、今回の活動の中核となった若手・中堅メンバが成長していたこと、さらに宇宙科学研究所による長年の国際協力を通じて海外宇宙機関との強い信頼関係が築かれていたことなど、一朝一夕には形作れない積み重ねが存在していた点があったことも重要であったと思います。

しかし、KDP-2 を通過したとはいえ、リフォーメーションは依然としてその途上です。2026 年夏に本当の意味で最初の関門であるミッション定義審査（LiteBIRD にとっては 2 回目）が行われます。そこでは原始重力波 B モード偏光を検出するためにミッションが満たすべき要求を示し、その妥当性が審査されるのはもちろんのこと、加えてミッション要求から観測性能や校正精度への要求がどのように導かれるのか、また、どのような設計にすればそれを満たすことができるのか、説得力のある説明をすることが勝負どころとなるでしょう。また、LiteBIRD には多数の欧州諸国が参加しており、各国をしっかりと取りまとめて開発を進めていくことが重要です。そのために必要な国際協力の体制を構築することも、科学面・技術面と並んで勝負どころの一つになると考えています。国際 LiteBIRD チームの勢いを維持しつつ、ミッション定義審査を確実に乗り越えられるよう、引き続きチーム一丸となって検討を進めていきます。