

CMB 偏光観測実験 GroundBIRD のファーストライト

理化学研究所
小栗 秀悟
shugo.oguri@riken.jp

京都大学
鈴木 惇也
suzuki.junya.4r@kyoto-u.ac.jp

京都大学
本多 俊介
honda.shunsuke.75r@st.kyoto-u.ac.jp

2020 年 (令和二年) 2 月 3 日

1 はじめに

1964 年, カシオペア座 A を電波で観測しようとしたペンジラスとウィルソンは, 観測データの中に説明のつかないオフセットがあることを発見した。これはビッグバンの残光, 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) に由来する 2.7 K の信号を明確に捉えた歴史的瞬間だった [1]。

その後現在に至るまで半世紀以上の長きにわたって, CMB は理論・観測の双方からわれわれを惹きつけてきた。宇宙の進化にともなって旅をしてきた CMB の光には, その長い 138 億年の歴史が刻み込まれている。そこから引き出された数々の情報は, われわれのもつ宇宙の描像を劇的に更新するとともに, 新たな謎を生み出す源泉でもあった。相互作用可能な領域を超えてなぜ宇宙が均一であるのか (地平線問題), 宇宙初期の曲率がなぜ不自然に小さいのか (平坦性問題), などがその例である。こうした問題を解決する最有力候補が, 宇宙初期に指数関数的膨張があったとするインフレーション理論であり, 現在その観測的検証に向けて様々な試みがなされている。

これまで地上望遠鏡で達成しえなかった大角度領域での CMB 偏光観測を通じてインフレーションの痕跡「原始重力波」を探るため, GroundBIRD[2] は高速回転するスキャンモジュレーションというユニークな手法を用いる。重さ 1 t に近い望遠鏡が回転する迫力を, 図 1 QR コード先の動画でぜひご覧いただきたい。これまで CMB 観測実験は欧米の主導によっておこなわれてきたが, 筆者たち日本のグループを中心として立ちあげたのもこの実験の特色である。2019 年 9 月, スペインのカナリア諸島ティデ天文台に設置された GroundBIRD 望遠鏡は“ファーストライト”(試験観測の開始) を達成した。

本稿では, CMB 観測実験の魅力と, GroundBIRD



図 1: 観測地にて GroundBIRD 望遠鏡 (重量 1 t 弱) が 3 秒に 1 回もの速さ (20 RPM) で回転する様子。

<https://photos.app.goo.gl/ivjrhVkJcSDzaHNA>

望遠鏡の開発や挑戦について紹介する。

2 CMB で探る宇宙のはじまり

2.1 インフレーション宇宙論と原始重力波

CMB の観測実験では, 天球上の CMB の温度分布を測定し, 空間周波数でフーリエ変換したパワースペクトルを算出して, 各空間点での温度揺らぎの相関・パターンを調べる。その強度・形状は宇宙年齢や各組成のエネルギー密度など宇宙論に関する様々なパラメータから決定され, 一つのスペクトルからでも非常に多くの情報を引き出すことができる。

宇宙の描像に対する種々のパラメータが測定されるにつれて, 初期宇宙の“標準模型”であるビッグバン宇宙論では説明できない数々の疑問が新たに生じてきた。その中で, これらの疑問を一度に解決するインフレーション宇宙論が注目を集めている。この理論で予言される初期宇宙の加速膨張を検証することが現代物理学の最重要課題の一つとなっている。インフレーションの検証の

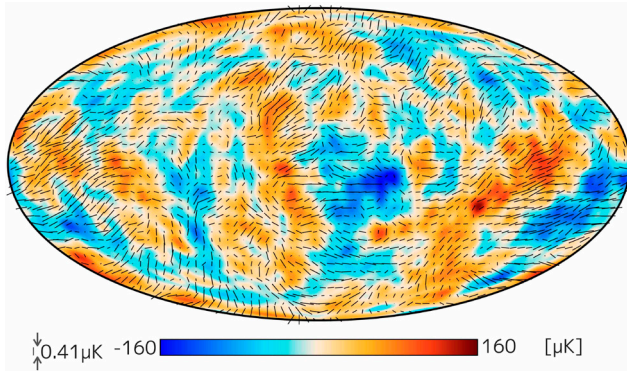


図 2: Planck 実験によって得られた CMB マップ [3]。温度ゆらぎを色のコントラストで表現し、偏光パターンを線の向きと長さで表現してある。

鍵となるのは重力波である。急激な時空の加速膨張は宇宙のあらゆる空間で原始重力波を生成する。この重力波は現在に至るまでほとんど相互作用することはない。しかし、重力波の作る時空の歪みは CMB の微小な非一様性と相まって、 B モードと呼ばれる渦巻模様の偏光パターンを天球上に刻むことが知られている。CMB の偏光 (図 2) を精度良く観測・測定することによって原始重力波の強度を測ることが可能である¹。

しかし、その信号強度は非常に小さく、観測するための工夫が必要となる。CMB には単純な電磁相互作用に由来する無偏光成分や別の偏光パターン (E モード) という数桁も大きな強度の別成分がある。これらからのクロストークが微小であっても B モード信号が埋もれてしまう可能性がある。また、 E モードは重力レンズの影響を受けて B モードを生成するため厄介である。ただ、この重力レンズ効果によってできる B モードは銀河団スケールの生成物であるため、宇宙全体で生成される原始重力波由来の B モードとは異なる角度スケールで観測される。実際の観測ではこれらをうまく切り分けつつ解析をおこなう必要がある。

2.2 CMB 偏光観測の現状

CMB 偏光観測は、たくさんの研究グループがしのぎを削っている。 B モード観測の現状を図 3 に示す。小角度スケール (大きい ℓ , 図の右側) では POLARBEAR[4] や SPTpol[5] の観測により、重力レンズ効果由来の B モードの存在が確認された。一方で、 $\ell \sim 100$ 付近の領域では、BICEP2 / Keck Array[6] のグループがもっともよい精度の観測をおこなっているが、CMB とは無関係な天の川銀河からの放射 (前景放射) による影響を十分吟味できておらず、原始重力波起源 B モードの発見に

¹ 原始重力波の検出は、重力場の量子ゆらぎの発見を意味し、場の量子論の観点からも重要な意義を持つ。

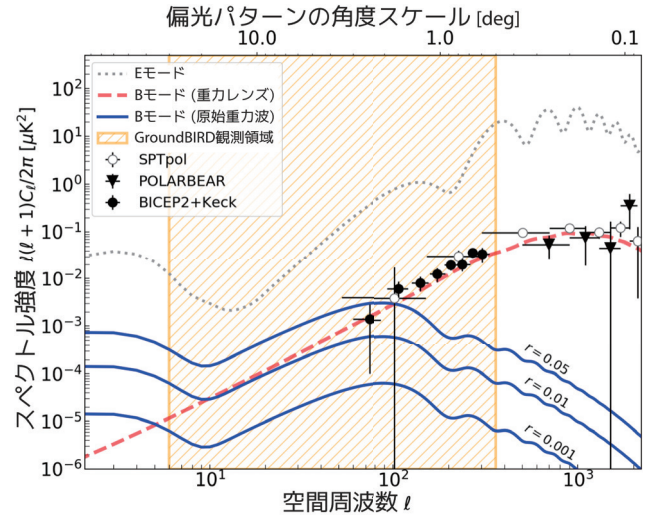


図 3: B モードパターン強度のパワースペクトル。横軸は球面調和関数展開したときの次数 (空間周波数 ℓ) でパターンの大きさの逆数に対応する。原始重力波の強度パラメータ r によってスペクトル強度が異なる。GroundBIRD は図の網掛けの領域で大角度スケールの探索をおこなう。

は至っていない。 $\ell \sim 10$ 付近の領域は、Planck 衛星 [3] の実験データのみである。Planck 衛星は偏光観測に最適化された実験でないため、 E モードの検出にとどまっている。今後は、検出器数を増やすことによる高感度化、および、信号変調を駆使した大角度スケール化が進む。複数台の望遠鏡を用いる実験 Simons Observatory[7] の準備が進んでおり、さらには全米を統合する規模のプロジェクト CMB-S4[8] の計画も議論されている。いずれも、 $\ell \sim 50$ から、より小角度スケールを主ターゲットとしている。

GroundBIRD がターゲットにするのは、より大角度スケールである。 $6 < \ell < 300$ の領域で、文字通り重力波起源 B モードのスペクトル形状を決定する。同様に回転スキャンを用いて大角度スケールに挑む実験に CLASS[9] と QUIJOTE[10] がある。GroundBIRD の武器は、他に類を見ない高速スキャン変調であり、後述する $1/f$ ノイズに影響されない観測を実現する。また、周波数帯域の異なる QUIJOTE 実験とも共同解析し、世界最多の多波長観測で前景放射対策をおこなう。

GroundBIRD は衛星実験に肉薄する角度スケールをカバーするため、衛星実験と相補的な関係にある。日本では、衛星実験である LiteBIRD[11] も進められている。衛星実験には大気の影響がないという大きなメリットがあるものの、コスト面や修理が事実上難しいという理由から 10 年オーダーの長い準備期間が必要となる。地上実験は、低い費用で実験を開始でき、装置のアップグレードや修理も可能である。そのため、新しい超伝導検

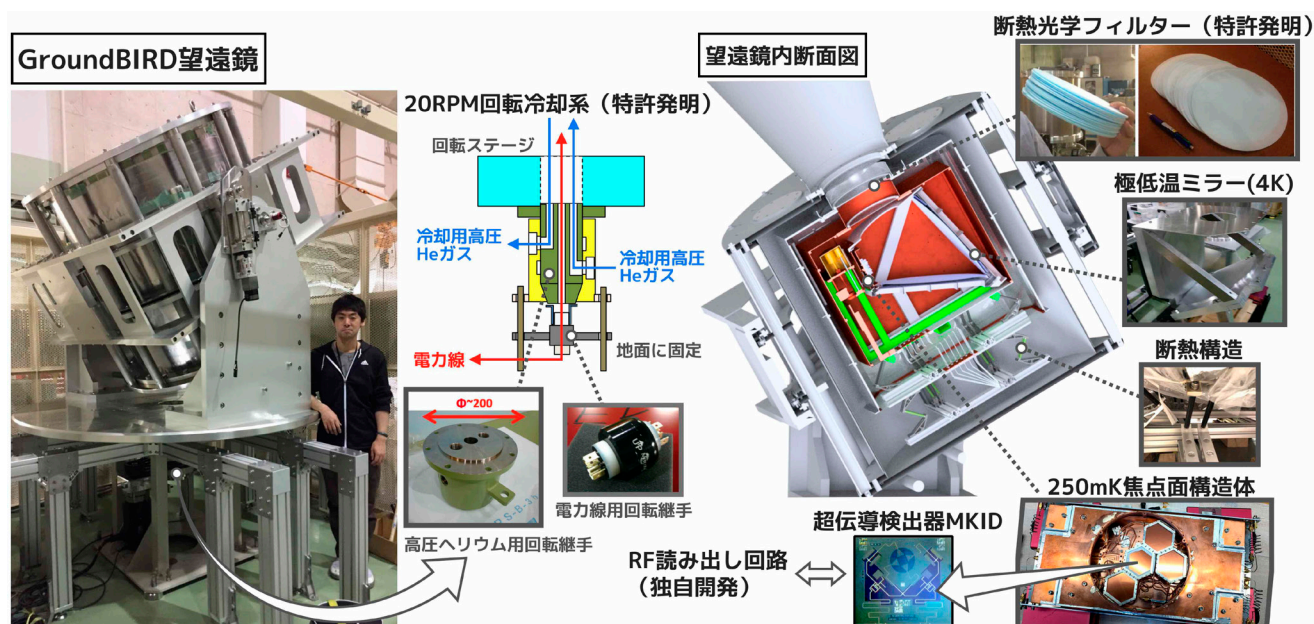


図 4: GroundBIRD 望遠鏡。各種独自・最先端の技術が結集している。特に、余分な熱放射を抑制する断熱フィルター [12] と 20RPM の回転冷却システム [13] は特許発明になっている。

出器など、最先端な技術を取り込めるのも地上観測の醍醐味である。

3 GroundBIRD 望遠鏡の開発

地上からの CMB 観測には大気放射の影響という障害がある。GroundBIRD では、従来の望遠鏡の 100 倍速にもおよぶ高速回転するスキャンモジュレーションでこのハードルを乗り越える。この前衛的なコンセプトを実現するために、応答性の高い超伝導検出器、冷却のための高圧ガス回転継手など、時代を先取る技術が求められた (図 4)。

望遠鏡の開発は、PI の一人である田島氏 (現京都大学) の構想を元に、2012 年に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にて開始した。回転台上で冷却する技術の研究開発を経て、2014 年に望遠鏡の本体というべきクライオスタットの製作がスタート。2017 年に望遠鏡構造体が完成して、システムとしての評価がはじまり、2018 年の KEK 内での望遠鏡移設テストを経て、2019 年に観測地であるカナリア諸島テネリフェ島に輸送された。

本節では GroundBIRD の特色である高速回転スキャンと、それを可能にした技術開発について紹介する。

3.1 高速回転スキャン変調

大角度 (小さい ℓ) のパターンを見るためには、望遠鏡の向きの大きく違う 2 点から来る信号をくらべる必要がある。望遠鏡のスキャン速度は有限のため、大角度

になるほど観測の時間間隔は離れてしまう。一方、信号に乗る大気放射の影響などには低い周波数 (長い時間間隔) になるほど卓越する $1/f$ ノイズと呼ばれる成分が存在している。したがって、大角度で感度良く観測するためには、望遠鏡のスキャン速度を上げる必要がある。

しかし、速度を上げるためには望遠鏡のスキャン方式を見直す必要があった。従来の地上観測では、望遠鏡の首振りによってスキャンしていた。この方式では観測領域の両端で折り返すための加速と減速が生じ、スキャン速度を高めることができない。

そこで、GroundBIRD では加減速なく継続して動かせる「連続回転」をスキャン方式として採用することにした。この高速回転スキャンには「高圧ガスの回転系への導入」が課題として立ちはだかる。超伝導検出器の冷却に用いる機械式冷凍機の運転のために、回転台の上下でガスのやりとりが必要だったためだ。本実験は、高圧ヘリウムガス配管の回転継手の開発から始まった。当時、電線や水道管用の回転継手は存在していたが、17 気圧もの高圧ヘリウム配管用のものは存在しなかった。大手の開発メーカー達が二の足を踏む中、武田エンジニアリング株式会社²が、保証期間 1ヶ月という条件付きで開発を引き受けてくれた。図 4にあるものが世界で初めて完成した高圧ガス管用の回転継手である。すでにのべ数年間は使用しているが、ガス漏れを起こしたことはない。この回転継手開発の成功により、世界最速の回転スキャンを実現する GroundBIRD 実験が始動した。

その翌年には、市販の電線用回転継手や特注の回転台

²<http://www.takeda-eng.jp/>

を組み合わせ、回転台上での冷却テストがおこなわれた。電線用の回転継手は、内部に水銀を用いることにより接続を維持している。8 本接続可能であり、100V 電源用に 3 本、冷凍機コントロール用に 4 本使用した。当時は、通信用の電線を用意することができず、ノートパソコンを台上にロープでくくりつけて無線 LAN 経由で通信し、冷凍機のコントロールをした。現在は、100V 電源線を用いて、電力線通信により通信をおこなっている。回転台は、株式会社ジーテック³ に製作を依頼した。開発直後は回転駆動由来の電気ノイズに悩まされたが、要所所で絶縁をとる改善を施し、安定した冷却状態の維持が可能となった。毎分 20 回転する回転台上の冷却系は世界初であり、特許も取得した [13]。

3.2 超伝導検出器 MKID と読み出し系

MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector) は最新の超伝導検出器の一つである。超伝導体で共振回路を作成し、それらと AC 結合している読み出し線を介して各々の共振特性を読み出す。入射エネルギーによる超伝導状態の破壊を共振特性の変化として捉えることで、検出器として用いる (図 5)。MKID の最大の利点は、多重読み出しの容易さである。検出器の共振周波数を少しずつ変えることで、複数の検出器を一つの読み出し線で読むことが可能となる。GroundBIRD は、一つの読み出し線に「55 ピクセル」×「直交する 2 偏波」の計 110 個の検出器を載せる。開発・製作は理化学研究所が中心となっておこなっている。

MKID を読み出す際は、複数の正弦高周波を読み出し線に入力し、出力された信号を再び周波数分解して、それ

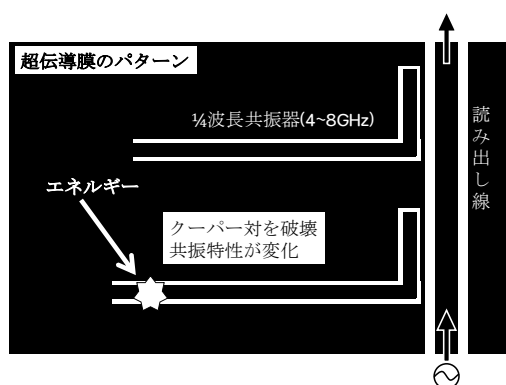


図 5: MKID の概念図。シリコン基板上に図のような金属 (超伝導膜) のパターン (黒い部分) を載せ、読み出し線と共振器を作成する。破壊されたクーパ対の量を共振特性の変化として測定する。共振器の長さの違いで検出器ごとに共振周波数を変えることができ、一つの読み出し線で複数の検出器を同時に読み出すことができる。

³<http://www.ggg-tech.co.jp/>

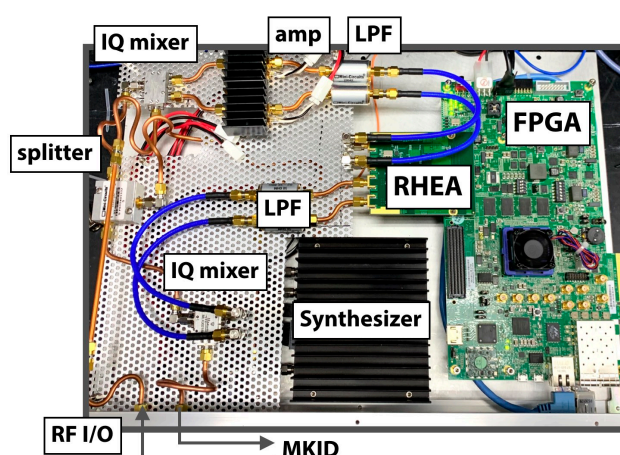


図 6: GroundBIRD で使用している読み出し回路系。一つの筐体の中で FPGA での信号処理と GHz 帯域の信号処理すべてをおこなう。

ぞれの共振特性を読む。共振周波数は 4 ~ 8 GHz で直接 DAC/ADC で取得するのが難しいため、数百 MHz の自作のアナログ回路と市販の周波数変換回路を組み合わせ、システムを構築した。アナログ回路は当時大学院生の石塚氏 (現株式会社とめ研究所) が、KEK の Open-It の助力を経て開発し、RHEA⁴と命名された [14]。200 MHz のクロックと DAC/ADC で構成されており、6 GHz の発振器を用いて周波数変換すると、5.9 ~ 6.1 GHz の正弦波を送受信することができる。RHEA と FPGA(Xilinx 社・Kintex UltraScale) を組み合わせ、120 個の正弦波を送受信し、1 kSPS でデッドタイムレスに読み出すシステムを構築した (図 6)[15]。

3.3 実験ホール内での望遠鏡の試験観測

観測地へと送り出す前に、望遠鏡が正しく動作していることを確かめる必要がある。そのためにわれわれは KEK 北カウンターホール内で 2 つの試験をおこなった。

まず一つ目は、液体窒素を用いた応答性試験である。エコソープという電波吸収体を液体窒素の中に浸すと、77 K の熱放射を作り出すことができる。この 77 K の熱放射と室温 (約 300 K) の熱放射に対する応答を比較することで、検出器の感度を算定することができる。ただし容器の外側や望遠鏡の窓が結露してしまうと、そこでの室温からの熱放射の反射が支配的になってしまうので、常にサーキュレータで空気を送り込み、表面を乾燥させる対策が必須となる。視野を十分にカバーするために最大辺が 90 cm にもおよぶ特大の発泡スチロール箱に液体窒素とエコソープを入れて、それをアルミフレームでがっしりとホールドして望遠鏡の天板にマウントし

⁴RHEA is a High speed Analog board. ダチョウのような陸鳥 (ground bird) から命名。

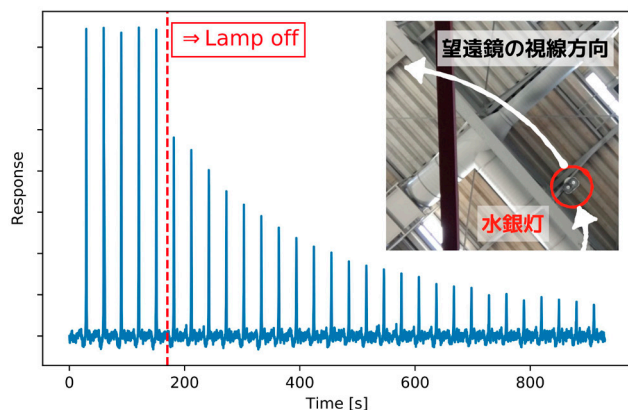


図 7: 水銀灯を用いた測定で得られたデータ。縦の点線で示した時刻に水銀灯を消すと、その熱放射低下に伴って検出器の応答が徐々に下がっていくことを確認した。

た。この試験の結果、検出器が予想通りに応答し、読み出し系のノイズも目標値まで抑えられていることが確認できた。

二つ目は、光学系をチェックするため水銀灯の「観測」試験である。望遠鏡を開発していた KEK 北カウンターホールの天井には水銀灯が設置されており、発光時には熱放射源となる。これを天体に模した観測試験をおこなった。GroundBIRD を一定の仰角で固定して回したとき、検出器の視野の中に水銀灯が入ると、その時間だけ応答が跳ね上がることになる。まずは水銀灯のオン/オフで応答に差があることを確認し（図 7）、仰角を少しずつ変えながら測定を繰り返し、望遠鏡が設計通りの角度分解能を達成している事を確認した。

これらの試験の結果、望遠鏡が正常に動作していることを確認でき、いよいよ観測地であるテネリフェ島への輸送が始まった。

4 いざ観測所へ！

テネリフェ島を擁するスペイン領カナリア諸島は、スペイン本土から離れたアフリカのモロッコや西サハラの沖に位置している。日本からのアクセスは、成田空港 → マドリードの直行便のあと、テネリフェ島のノルテ空港行きへと乗り換えるのが最短経路となる。テネリフェ島にあるティデ山はスペイン領最高峰であり、その周囲を含めたティデ国立公園はユネスコの世界自然遺産に登録されている。カナリア天体物理学研究所 (IAC) の運営するティデ観測所は、山頂へと向かうルートから分岐した標高 2400 m の場所にある。

日本を発った GroundBIRD は、まず山のふもとにある IAC 本部のクリーンルーム内へ輸送され、冷却試験などがおこなわれた。性能確認後、改めてティデ観測所



図 8: 望遠鏡の観測所インストールの様子。トラックに直接載せて観測所まで輸送し、クレーンで回転台の上に設置した。

へと移送され、我々が先行して建設したドーム内にインストールされ（図 8）、試験観測に臨んだ。

4.1 ファーストライトへの長い道のり

日本で開発した望遠鏡をスペイン領カナリア諸島にある観測所へインストールするにあたって、想像以上の労力を要した。たとえば 400 V を 200 V に変換する変圧器を現地調達する必要があったが、手配する現地の業者のスペイン語を解読し、さらに日本の事務とすり合わせるなど厄介な作業を強いられた。

一方、望遠鏡にもトラブルが発生した。まず、日本から望遠鏡を輸送する際に、極低温部を断熱しながら支え

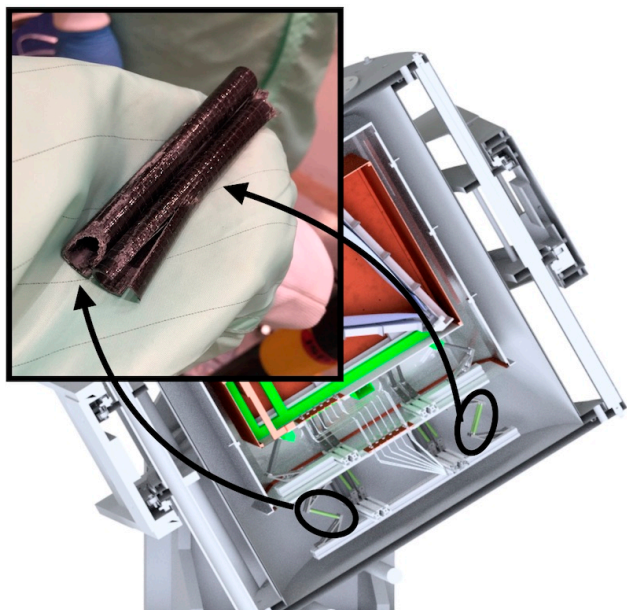


図 9: 壊れたガラスエポキシ製の骨組み部品。極低温の望遠鏡光学系を断熱しつつ支持するクライオスタットの要だが、日本からテネリフェへの輸送中に 16 本すべてが折れてしまった (左上写真)。

るガラスエポキシ製の骨組み全 16 本が折れてしまった (図 9)。同一の部品を日本で製作・送付して交換作業をおこない、日本を発ってから 5ヶ月後に、ようやく冷却テストを開始することができた。

さらに、山のふもとでの冷却テストを終えて望遠鏡を観測所に輸送する際、冷凍機と望遠鏡の内部構造をつないでいた高純度アルミニウムのヒートリンクが破断してしまった (図 10)。輸送後には中を開けずにそのまま冷却を始めたため、温度の時間変化プロットを見て初めて問題が起きていることに気づいた。急遽冷却を中止して、望遠鏡内部を引き出すためのクレーン車を手配し、重要度の低い別の箇所から高純度アルミニウムを剥がして破断した箇所を修復する緊急手術をおこなった。青空の吹きさらしの中で真空容器をあける作業というのは初めての経験であったが、この処置のおかげで望遠鏡はファーストライトに向けて順調に冷え、焦点面がついに 250 mK まで冷えた。

4.2 ファーストライト

2019 年 9 月 20 日に冷凍機が最低温度に到達したのち、まずは月の観測をおこなった。日本での水銀灯での性能評価とは違い、遠方界となる天体での観測試験をすることで、より確度の高い望遠鏡の性能評価と光学系の較正ができる。また、多くの CMB 望遠鏡では、月は明るすぎるために応答性が飽和してしまうことがあるが、ダイナミックレンジが非常に広い MKID を搭載す

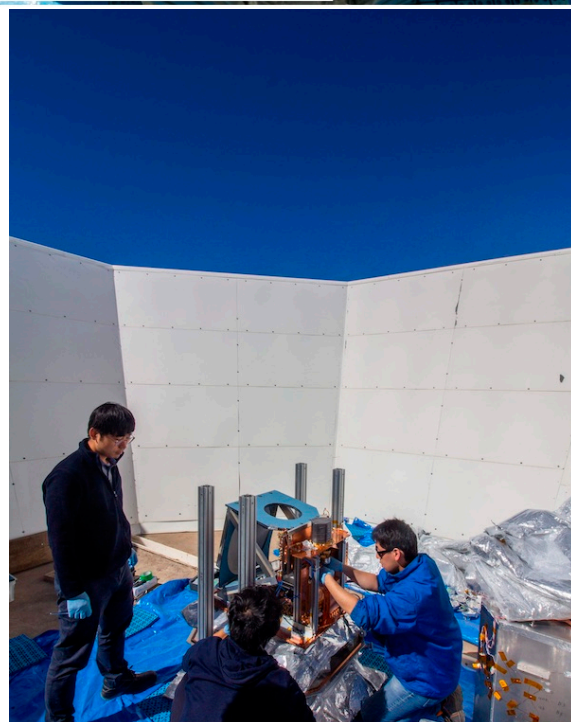
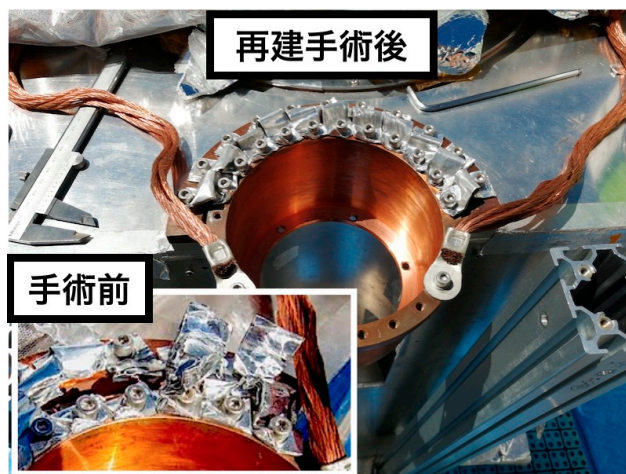


図 10: (上) IAC 本部から観測所へ輸送する際に破断してしまったヒートリンク (左下枠内) と再建手術後の写真。(下) 修理のために青空のもと作業中の風景。

る GroundBIRD は CMB 温度から室温まで、信号が飽和することなく測定できる。MKID[16] には、オランダ宇宙研究所及びデルフト工科大学で作成された試験用素子を用いた。

まずは確実に月を捉えられるように、低速回転 (2 RPM) での観測からスタートした。月が望遠鏡の視界を通過する 1 時間前から観測を開始し、月が通り過ぎるのを待った。すると、ちょうど予想した深夜 4 時ごろに、毎回転に 1 つ鋭い信号 (月の信号!) を確認し、GroundBIRD で初めて天体の観測に成功した (図 11)。月の形状も正しく捉えられ、月の大きさから見積もったビーム幅や望遠鏡のビーム方向などはすべて設計値とおおよそ一致した。その後、望遠鏡の角度情報の DAQ も整備しつつ、GroundBIRD の回転数を 20 RPM まで上

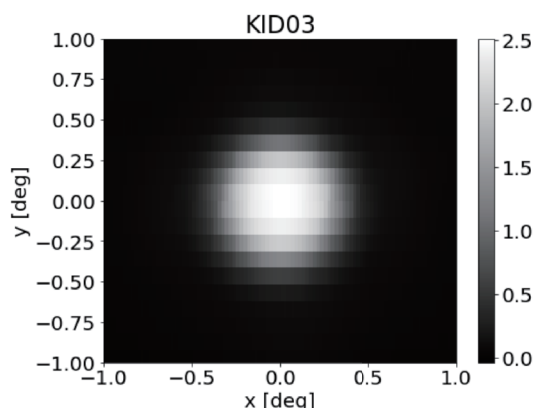


図 11: GroundBIRD で取得された月の信号。

げて観測を進めていった。高速スキャン中でも月がきれいに再構成できることを確認した。これまでの多大な苦労が報われたと涙した瞬間であった。

4.3 長期観測に向けて

ファーストライト後、原因不明の DAQ 不具合が度々発生した。GroundBIRD の屋外での稼働は初めてで多くの原因が考えられたため、読み出し回路の分解・シンプルな構成への組み替えをおこないながら原因究明を進めた。電源系やアンプ回路を重点的に疑っていたが、結局硬い同軸ケーブルが FPGA ボードのコネクタにストレスをかけて、微妙な接触不良を起こしていたことが原因であった。屋外の気温・湿度の変動で、コネクタへのストレスのかかり方が変化して問題が露呈したようだった。この接触不良で FPGA から出力される信号にビットずれが起きてしまうことがわかり、硬いケーブルを柔らかいケーブルに付け替えることでストレスを軽減し、

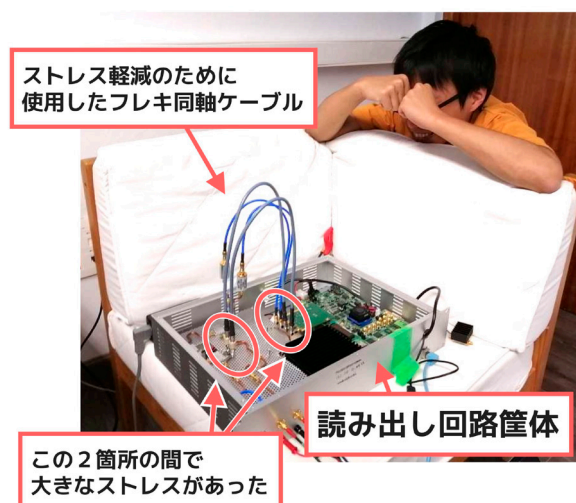


図 12: 柔らかいケーブルを上向きに接続することで DAQ 不調を解決した直後の写真。筐体の蓋が閉められなくなった不格好な様に、頭を抱える筆者のひとり。現在は、蓋がちゃんと閉まるように対処してある。

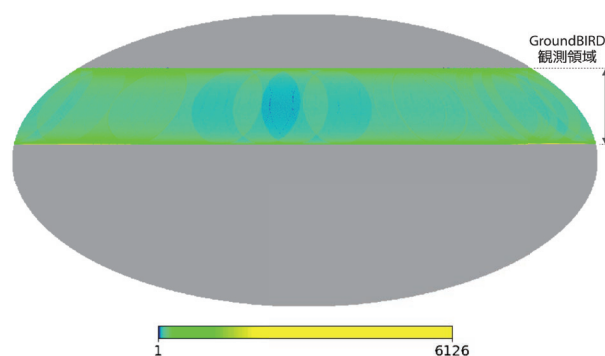


図 13: GroundBIRD 連続運転で取得した観測領域（帯状の領域）。色は観測の“深さ”を表す。

なんとか問題を解決した（図 12）。その後、同様の問題は起きていないが、FPGA のヘルスチェック機能を実装して、類似した問題に遭遇したときにすぐに対応できるようにしている。

その後、望遠鏡の冷却系・DAQ が長期運用に耐えうるかの試験として、数日間の連続観測を計画したのだが、“Calima”と呼ばれる現象により、観測が阻まれてしまうトラブルにも見舞われた。これはサハラ砂漠で巻き上げられた砂塵が風で飛ばされてくるカナリア諸島に特有の現象で、まれにティデ観測所を砂塵で覆ってしまうことがある。運悪くちょうど連続観測初日に Calima が観測所を直撃してしまい、砂塵による装置の損傷を防ぐため観測を延期せざるを得なかった。ただ、翌日には天候が回復し、連続観測を開始することができた。

観測自体は安定しておこなうことに成功し、冷却系は期待通り 1 日以上サイクルで運用できた。図 13 に取得できた観測領域を示す（CMB 分野ではヒットマップと呼ぶもの）。今回の観測中は太陽が GroundBIRD の視野まで昇ることはなく、数日のうちに仰角 70 度の GroundBIRD が観測できる領域をすべてデータ取得できた。詳細なノイズ評価は鋭意解析中である。

長期観測では、温湿度計・web カメラなどを設置し、天候状態によって観測ドームを開閉しつつ観測を進めていく必要がある。また、CMB は昼夜問わず観測できるため、望遠鏡運転をテネリフェと日本の両方から交代でおこなうためにも、遠隔からのリモート運転の設備と安全確保が必要となる。安全を確認しながら徐々に各操作のリモート化と自動化を進めている。

また、GroundBIRD のオペレーションチーム内でスラックボットを構築した。これはビジネス向けチャットアプリであるスラック⁵上で応答する対話型のタスク実行アプリケーションで、世界中どこからでも気軽に望遠鏡の情報を可視化して確認することができる。冷却系や天候状態によって即時対応が必要なときには、アラートメールの発行も設定しており、緊急時の対応体制を整え

⁵<https://slack.com>

ている。望遠鏡周りの温湿度や検出器温度、真空度、冷凍機に使用するガスの圧力など様々なパラメータを気軽に確認できることで、長期間の望遠鏡運転業務に対する負担はかなり軽減できた。今後は web インターフェイスなども整えて、統一的な望遠鏡運転の方法を充実させていく予定である。

5 おわりに

本稿では宇宙マイクロ波背景放射の観測による物理について紹介し、昨年ファーストライトを達成したユニークな望遠鏡 GroundBIRD について記述した。CMB 観測実験は、宇宙始まりの謎に迫るという物理が魅力的なだけでなく、最先端の超伝導検出器の運用といった技術面のチャレンジも面白い。実際、GroundBIRD のメンバーによる CMB 観測という枠にとらわれない超伝導検出器に関する一般的な研究もおこなわれている [17]。

今回、観測実験において大きなマイルストーンである「ファーストライト」を無事達成することができた。いよいよ本格的な CMB 観測を始めることになるため、現在それに向けて着々と準備を進めている。前述した望遠鏡のリモート運転に向けてハードウェアやソフトウェアをアップデートし、さらに焦点面検出器についても現在のテスト用の素子からさらに高性能な素子へと入れ替える予定だ。年スケールの観測データを蓄積し、CMB 偏光の大角度パターン測定を目指す。

GroundBIRD は望遠鏡の移設が終わり、ようやく実際にデータを触ることのできる面白い時期がやってきた。ハードウェアやソフトウェアの改良・開発を始めやるべきことは山積しており、現状既に解析の手が回っていないデータもある。大学院生やポスドクとして参加するのなら、もっとも活躍できる時期と言えるだろう。本稿によって多くの人が CMB 観測に、そして GroundBIRD について興味を持っていただけることを願う。

本実験は、日本からは理化学研究所・京都大学・東北大学・KEK・埼玉大学・東京大学・国立天文台、韓国からはコリア大学・韓国天文研究院、オランダからデルフト工科大学、そしてスペインからは IAC の参画するコラボレーションによりおこなわれている。

また、試験観測用素子の提供や外れたワイヤーボンディングの修復など、オランダ宇宙研究所からも多大な支援をいただいている。この場をお借りして感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] A.A. Penzias, R. W. Wilson, *Astrophysical Journal Letters*, **142**: 419–421, (1965).
- [2] T. Nagasaki *et al.*, *J. Low Temp. Phys.*, **193**, 1066–1074, (2018)
J. Choi *et al.*, *EPJ Web Conf.*, **168**, 01014, (2018).
- [3] Planck Collaboration, arXiv:1807.06205, Accepted by A and A, (2018).
- [4] POLARBEAR Collaboration, *Astrophys.J.*, **848** no.2 121, (2017).
- [5] SPT Collaboration, FERMILAB-PUB-19-536-AE-PPD, 16 pp., (2019).
- [6] BICEP2 and Keck Array Collaborations, *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 221301, (2018).
- [7] Simons Observatory Collaboration, *JCAP* **1902**, **056**, (2019).
- [8] K.Abazajian *et al.*, arXiv:1908.01062 [astro-ph.IM].
- [9] T. Essinger-Hileman *et al.*, *Proc. SPIE*, Vol. 9153, id. 91531I 23 pp., (2014).
- [10] A. Gómez *et al.*, *Proc.SPIE Int.Soc.Opt.Eng.* 7733, 77330Z, (2010).
- [11] M. Hazumi *et al.*, *J. Low Temp. Phys.*, **194**, 443–452 (2019).
- [12] J. Choi *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **84**, 114502, (2013).
特許第 6029079 号
- [13] S. Oguri *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **85**, 086101, (2014).
S. Oguri *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **84**, 055116, (2013).
米国特許 US 9,316,418 B2.
- [14] H. Ishitsuka *et al.*, *J. Low Temp. Phys.*, **184**, 424–430 (2016).
- [15] J. Suzuki *et al.*, *J. Low Temp. Phys.*, **193**, 562–569 (2018).
- [16] L. Ferrari *et al.*, *Proc. SPIE Vol. 9914*, 99142G (2016).
- [17] H. Kutsuma *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **115**, 032603, (2019).