

## A far-infrared balloon-borne polarization experiment, PILOT

松村知岳、Samantha Stever（東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構）、小松国幹（岡山大学大学院自然科学研究科）、杉山真也（埼玉大学大学院理工学研究科）、and PILOT collaboration

## A far-infrared balloon-borne polarization experiment, PILOT

Tomotake Matsumura, Samantha Stever (Kavli IPMU, The University of Tokyo), Kunimoto Komatsu (Graduate school of natural science and technology, Okayama University), Shinya Sugiyama (Graduate School of Science and Engineering, Saitama University), and PILOT collaboration

### 1. はじめに

初期宇宙の探索において宇宙マイクロ波背景放射（Cosmic Microwave Background = CMB）の観測は重要な役割を果たしてきた。現在、標準宇宙論が確立され、初期宇宙に対する観測的挑戦はインフレーション仮説の検証に舵を切り進んでいる。ミリ波帯域での観測は、CMB だけではなく、シンクロトロン放射やダスト放射が銀河面を中心に支配的であり、前景放射として CMB の前に立ち塞がる。特に、インフレーション探索では CMB の B モード偏光観測に対してダスト偏光放射の詳細理解が必須であることは、2014 年の BICEP2 の観測結果からも明らかとなっている。完全な黒体放射である CMB に対して、ダスト偏光放射のスペクトルは CMB 観測において高周波側（ミリ波～遠赤外）にて支配的になる。この帯域における観測は大気の影響を受けやすく、地上からの観測には感度の限界がある。従って、気球観測及び衛星観測が最適であり、現在のインフレーションの制限は地上観測望遠鏡 BICEP/Keck による 100、150 GHz の CMB データと ESA 衛星 Planck (<353 GHz) によるダスト偏光放射によって決まっている[1]。衛星によるこの帯域での偏光観測は、将来衛星 LiteBIRD 計画による高精度観測が期待されている。

PILOT は Planck ではカバーできない遠赤外線領域にて高精度偏光観測を実現する気球計画である。また、ESA 衛星 Herschel は遠赤外線領域を観測しているが偏光に感度はない。こうしたニッチな領域をカバーする PILOT は、カナダ Timmins より 2 回、そしてオーストラリア Alice Springs より 1 回、計 3 度の打ち上げを行い、観測データを取得した。本講演では PILOT の実験概要を紹介する。

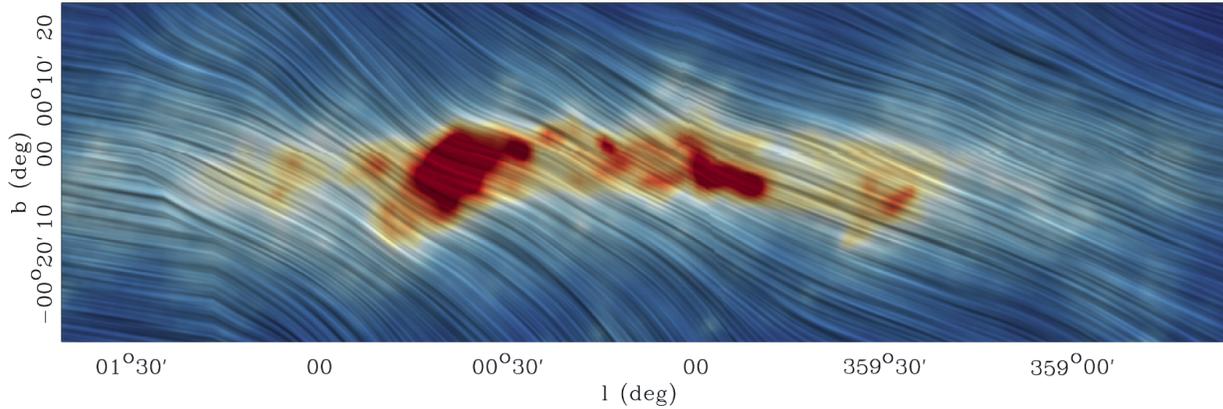


図1 2度目の観測データより[2]、銀河中心部のダスト強度（色）及び偏光観測により再構築した天空面に投影した磁場方向（パターン）を示す。観測帯域は  $240 \mu\text{m}$  より。

## 2. 実験概要

PILOT の実験概要を紹介する[2,3,4]。  
 PILOT 望遠鏡は常温及び冷却光学系により構成される。主鏡は直径  $0.83\text{m}$  で常温に配置され、副鏡以降の光学系は  $4\text{K}$  に冷却されている。冷却は液体ヘリウムクライオスタットを用いており、クライオスタット内の冷却再結像光学系は、レンズ、広帯域半波長板偏光変調器、偏光子により焦点面を構成する。偏光観測は断続的回転をする半波長板により入射偏波が回転し、この回転偏波が偏光子を通過することで変調される。変調された偏波は透過成分と反射成分に分かれ二つの焦点面にて結像する。焦点面検出器はヘリウム3ソーブション冷凍機により約  $300\text{mK}$  に冷却されたボロメータアレイを採用している。これは Herschel PACS のための開発された検出器と同じものである。ボロメータは二つの焦点面にそれぞれ  $1024$  個あり、計  $2048$  個のボロメータを搭載している。検出された信号は時間

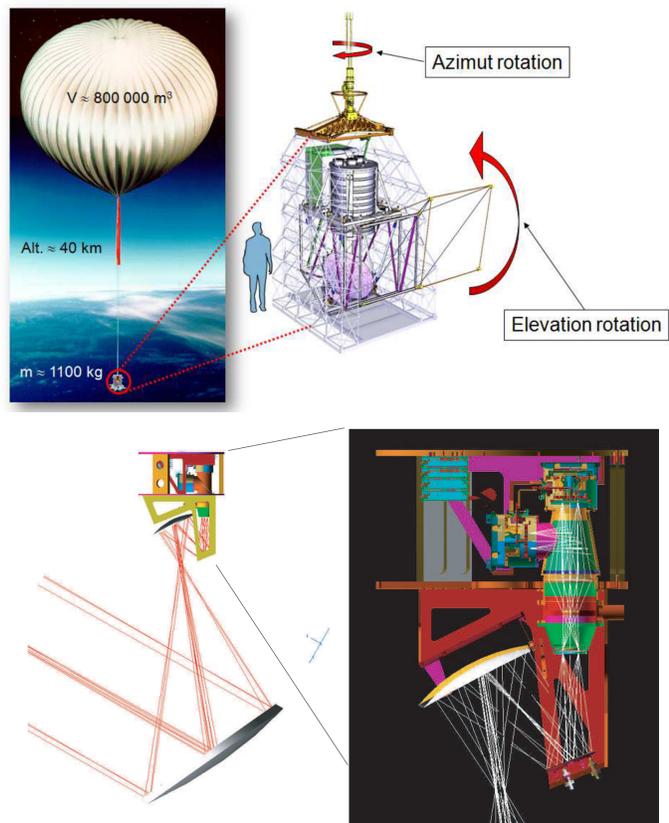


図2 PILOT の装置概要[3,4]。

多重化読み出しにて読み出だす。観測波長（周波数）帯域は  $240\ \mu\text{m}$ （1025 GHz）と  $550\ \mu\text{m}$ （545 GHz）であり、ビーム径はそれぞれ 1.9 分角、3.3 分角に対応する。

PILOT の打ち上げ及びシステムの運用は CNES により行われた。PILOT のゴンドラは総重量約 1.1 トンで  $800,000\text{m}^3$  の気球にて高度 40km の観測を想定している。望遠鏡のポインティングは CNES の開発した Estadius ステラーセンサを用いており、2 度目の打ち上げ・観測時における角度再構築精度は 1 秒角（並進方向）、6 秒角（回転方向）を実現した。

観測領域は星形成領域、高銀位低ダスト領域（BICEP 領域）など多岐にわたる。図 1 は Mangilli et al.[3]より、銀河中心領域の観測を示す。これまでの観測結果は講演時に紹介する。

### 3. カナダでの飛翔観測

PILOT は 3 度目の観測カナダオンタリオ州 Timmins にて CNES と CSA の協力により打ち上げキャンペーンを行った。打ち上げは 2019 年 9 月 24 日早朝で、要求を満たす約 1 日の飛翔により偏光観測を行った。日本からは 3 度目のフライトより PILOT に参画し、共著者である 4 名（主著者に加え、研究員 1 名、博士大学院生 2 名）が打ち上げに参加し、フライト中のデータ解析を担当した。現在、鋭意データ解析が進行中である。

### 4. 今後の展望

当初の計画として PILOT の観測は 3 回の飛翔機会を持って終了した。現在、PILOT を改造することで C+ の輝線を観測する計画があり、その概念設計が CNES の PhaseA として進んでいる。検討結果に従って、今後の計画が確定する予定である。この計画は SPICA の偏光観測装置 B-BOP とシナジーを持つ可能性があり、今後のさらなる議論が期待される。

また、米国とフランスの研究者を中心として CMB 偏光及びダスト偏光に特化した気球観測 Inflation and Dust Surveyor (IDS) の概念計画を行っており、この計画の紹介も行う。



図3 3度目の打ち上げ直前のPILOT。

## 参照

[1] Planck collaboration, "Planck 2018 results. I. Overview, and the cosmological legacy of Planck Planck", A&A, accepted.

[2] A. Mangilli et al., "The geometry of the magnetic field in the central molecular zone measured by PILOT", A&A 630, A74 (2019)

[3] J.-Ph. Bernard et al., "Inflight performance of the PILOT balloon-borne experiment", Proc. SPIE 9914, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VIII, 99140W (19 July 2016).

[4] R. Misawa et al., "PILOT: a balloon-borne experiment to measure the polarized FIR emission of dust grains in the interstellar medium", Proc. SPIE 9153, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VII, 91531H (23 July 2014).