

# ASTE 搭載用ミリ波サブミリ波帯 多色連続波カメラの開発

竹腰 達哉 (国立天文台野辺山宇宙電波観測所)

## 概要

ミリ波サブミリ波帯の超広帯域観測を進めるべくサブミリ波望遠鏡 ASTE に搭載する連続波カメラの開発を進めている。本カメラは 2 色同時観測が可能な光学系を持ち、250mK に冷却されたボロメータを用いて効率の良い観測を実現する。現在、波長 1.1 mm と 850  $\mu\text{m}$  帯での科学運用を目指しており、2014 年 4 月には星形成領域に付随するダスト構造の画像の取得に成功した。多色化や読み出し系の改良による素子数増加に向けた開発についても紹介する。

## 1 イントロダクション

ミリ波サブミリ波帯の連続波観測は、宇宙形成初期に存在する爆発的星形成銀河（サブミリ波銀河と呼ばれる）を非常によくトレースし、その時代の暗黒物質の分布や、星・銀河形成史を探る上で重要な観測手法である。近年、超伝導センサーを使った直接検出器の半導体プロセスによる多素子化が可能になり、100–10000 素子もの超伝導検出器を利用した連続波カメラの開発が、世界各国で進められている。日本においても国立天文台によって運用されている直径 10m のサブミリ波望遠鏡 ASTE を用いて、本格的な連続波カメラによるサーベイ観測を推進することを可能にすることが重要である。そこで、国立天文台野辺山宇宙電波観測所を中心とする国際チーム<sup>\*1</sup>は、ASTE に最適化された連続波カメラの開発を進めている。

## 2 ASTE 搭載用多色連続波カメラの概要

我々が開発を進めている連続波カメラは、サブミリ波銀河の「色」、すなわち赤方偏移量を調べることで、天体の距離をある程度推定することを目指している。そこで、1.1 mm, 850  $\mu\text{m}$ , 450  $\mu\text{m}$  の 3 つの波長帯を観測することが重要であり、効率の良い観測を実現するため、ダイクロイックフィルターを用いた 2 色同時撮像可能な光学系を設計した (図 1)。現在 1.1 mm, 850  $\mu\text{m}$  の観測が可能な装置になっており、将来的に 450  $\mu\text{m}$  の観測が可能な装置に更新する計画である。カメラの開発フェイズごとの予定している性能緒元を表 1 に示す。

本カメラでのサブミリ波の検出は、超伝導遷移端での急峻な温度に対する抵抗率の変化を用いた

---

<sup>\*1</sup> 国立天文台、東京大学、北海道大学、University of California Berkeley, McGill University, Cardiff University, Chinese University of Hong Kong

表 1 ASTE 多色カメラ開発フェイズ

開発世代	Phase I	Phase II
搭載時期	2012– 2015	2016–
観測バンド数	2	2
観測周波数	270/350GHz	350/670GHz
観測波長	1100/850 $\mu$ m	850/450 $\mu$ m
素子数	169/271	271/919
ビームサイズ	28''/22''	22''/11''
視野	7.5'	7.5'
オプション		ポラリメータ マルチクロイック

高感度な温度計である超伝導遷移端センサー (TES) を、250mK という極低温で運用し、スパイダーウェブ型の吸収体の温度変化を測定することで、実現している。このように光子を熱化して検出する検出器をボロメータと呼び、超広帯域観測と、フォトンノイズ限界の観測を実現する点で優れている。読み出しは定電圧バイアス下で、抵抗値の変化に伴う電流変化をコイルを用いて磁束変化とし、高感度な磁束計である SQUID を用いて測定する。各 TES ボロメータに LC 共鳴フィルターを直列配列することで周波数多重化を行い、1つの SQUID で8つの TES ボロメータの読み出し (8MUX) を実現している\*2。

### 3 現地搭載試験

これまで我々は、2012年4–6月に望遠鏡への組み込み試験を行い、2013年11月–2014年1月(ただし悪天候)および2014年3–4月に試験観測を実施した。図2は2014年4月のコミッション時の写真である。銀河中心領域や著名な星形成領域、そしてブランクフィールドに対する観測を実施したほか、望遠鏡性能評価のために惑星に対するビームマップ観測も実施した。図3は銀河系内の大質量星形成領域 NGC6334I に対する観測で、星形成領域に付随する数分角に広がったフィラメント状のダスト構造までを取得することに成功した。光学系の評価は惑星のデータを用いて行い、ほぼ回折限界を実現していることを確認した。

### 4 今後に向けて

本連続波カメラは ASTE 望遠鏡鏡での搭載試験を実施し、ほぼ所定の光学性能が出ていることを確認できた。現在、チーム内でこれらのデータ解析を推進しているものの、大気除去、キャリブ

\*2 Phase II においては 16MUX または 32MUX に更新する予定である。

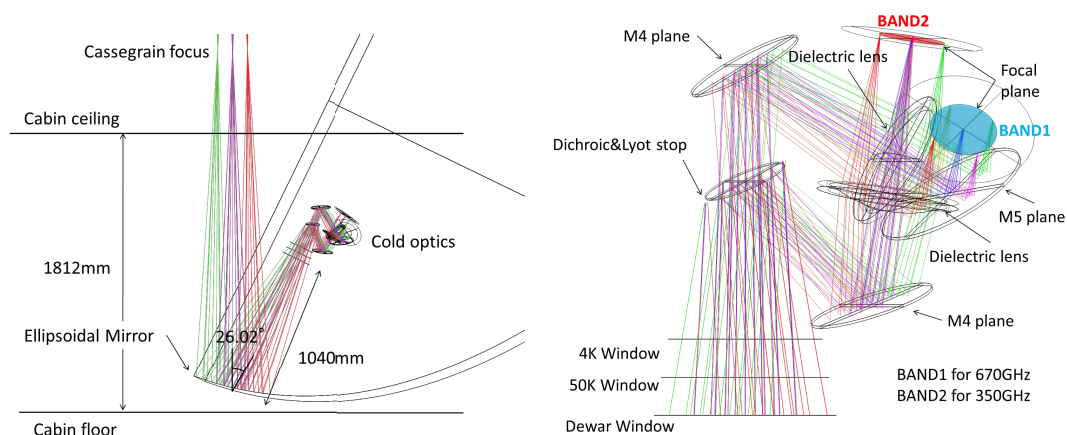


図1 光線追跡法により設計された光学系。(左)受信機室光学系。望遠鏡で集光された光線はカセグレン焦点を通過後、受信機室内に入る。受信機室底面付近に設置された修正楕円鏡で再度集光された光線が、冷却光学系内に導入される。(右)冷却光学系の配置図。修正楕円鏡により集光された光線は、冷却デュアの窓を通り、冷却光学系に導かれる。デュア、50K、4K シールドの窓を通過した光線は、Lyot stop を兼ねたダイクロイックフィルターで2色に分けられる。平面鏡で反射した後、高密度ポリエチレンレンズによりテレセントリック光学系を実現し、焦点面にホーンアレイとカップリングする。50cm 角のコンパクトな冷却光学系を実現した。

レーション、ポインティングなど、まだまだ多くの解析上の課題が多く残っている。今後はこれらのデータ解析を中心に、科学観測に向けた準備を進める予定である。

第2世代にむけては、1000素子以上の読み出しが必要になるため、MUX数を増やすことが必要である。また、現在マルチクロイック TES ボロメータの採用を検討している。これはアンテナで取得したサブミリ波を、マイクロストリップライン上の LC 共鳴フィルターで周波数を分割したあとで、それぞれを TES に流し込むことで実現し、すでに1ウェハーで3色同時観測可能なものが宇宙背景放射実験で応用されている。我々の2バンド同時観測光学系それぞれに違う帯域を割り当てることで、150GHz から 670GHz 帯までの6色同時観測の実現し、半桁にわたる超広帯域のデータ取得が可能になると期待される。

## 参考文献

- [1] T. Takekoshi *et al.*, 2012, "Optics Design and Optimizations of the Multi-Color TES Bolometer Camera for the ASTE Telescope", *IEEE Trans. Terahertz Sci.*, vol. 2, no. 6, pp. 584-592
- [2] T. Oshima *et al.*, 2013, "Development of TES Bolometer Camera for ASTE Telescope: I. Bolometer design", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 23, Issue 3, 2101004
- [3] A. Hirota *et al.*, 2013, "Development of TES bolometer camera for ASTE telescope: II. Performance of detector arrays", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 23, Issue 3, 2101305

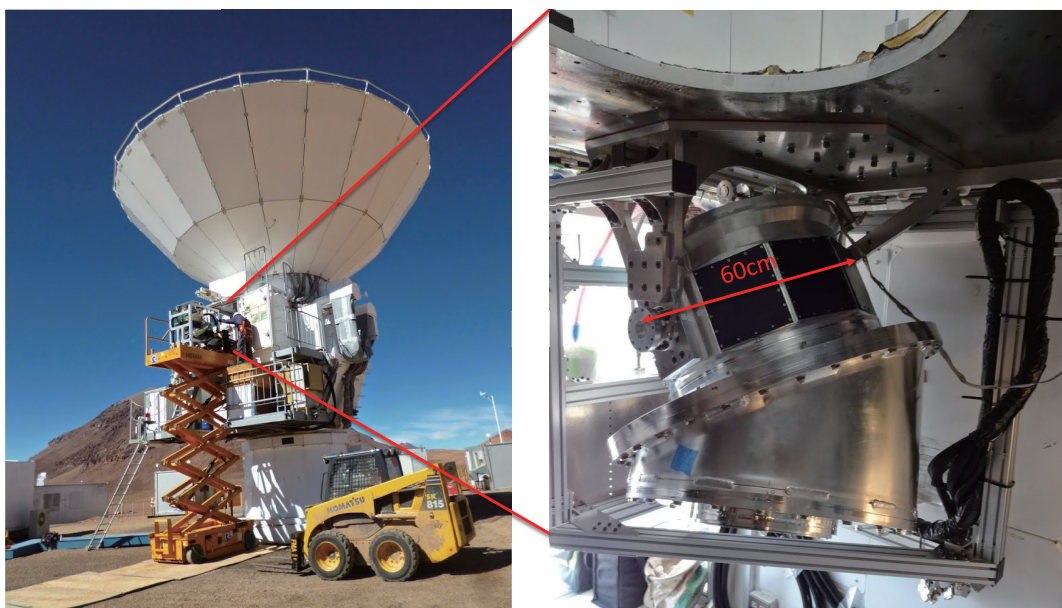


図2 (左)ASTE から連続波カメラを降ろす時の作業の様子。シザーリフトで 300kg あるカメラ本体をカセグレンキャビンまで昇降する。(右) カセグレンキャビン内部でのカメラの様子。天井天板に固定される。実際に使用する際は、写真上部の天井丸穴の周囲から受信機室床付近まで、第3鏡とその保持機構を吊り下げる。

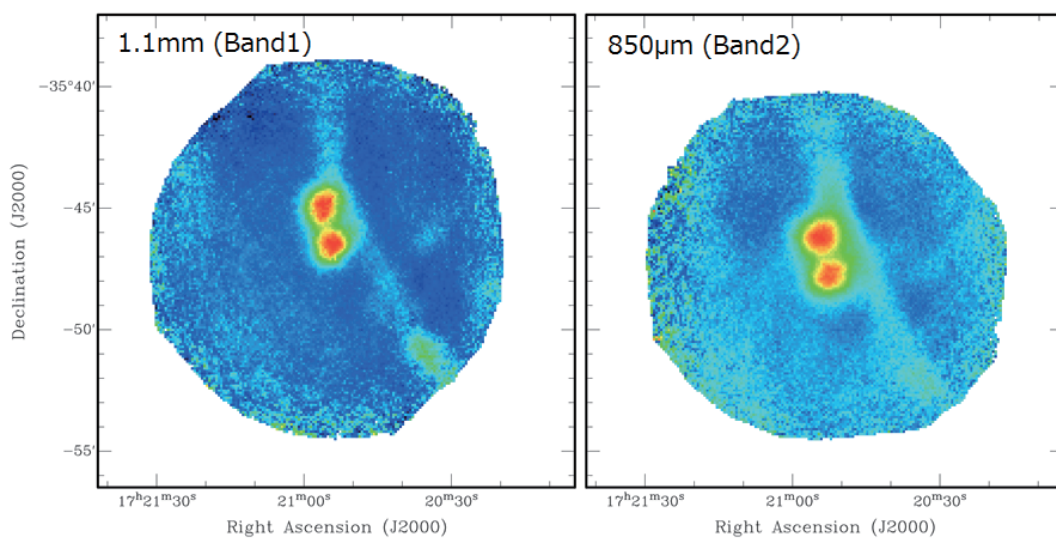


図3 試験観測により得られた NGC6334I のマップ。波長 1.1mm (左) と 850 $\mu$ m (右) のマップが同時観測により取得された。