

GLTCAM:グリーンランド望遠鏡用多色撮像カメラの開発

○渡邊一輝(総合研究大学院大学)、大島泰(国立天文台/総合研究大学院大学)、
竹腰達哉(北見工業大学)、宇野慎介、井上修平(東京大学)、
山村亮介(電気通信大学)、丹羽佑果(東京工業大学)

概要

我々は、ミリ波・サブミリ波による広域探査での宇宙構造形成史の解明を目標に、グリーンランド望遠鏡 (GLT) に搭載する広視野 (18 分角) かつ超広帯域 (130-700GHz) の多色撮像が可能なカメラ (GLTCAM) を開発している。現在は、全帯域をカバーする光学系は設計済みであり、ミリ波観測用の多色 MKID 検出器の製作が進行中である。これらに付随して繰り返す作業にはマニュアルを作成し、グループ全体として独自の工夫を凝らすことで人為的なミスを減らしている。GLTCAM を用いた観測を今後 5 年以内に開始することを目指している。

1.科学的目標

ビッグバンの残光である宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は温度 2.725 K の黒体放射として観測されている。この CMB 光子は銀河団を通過する際に、逆コンプトン散乱してエネルギーを受け取りスペクトルが歪む、スニヤエフ・ゼルドビッチ (SZ) 効果が起きる。SZ 効果はさらに銀河団プラズマの熱運動に起因する tSZ と銀河団の視線方向の運動による kSZ に分けることができる。図 1 に示すように tSZ は kSZ に比べて 1 桁以上大きくなっている。tSZ と kSZ を正確に分離検出することで、銀河団衝突の様子や宇宙論パラメーターの精密決定につながる。SZ 効果の観測は赤方偏移によらないため遠方の銀河団の観測が可能である。また、これらの分離検出にはミリ波サブミリ波帯での広帯域かつ 6 色以上の観測が有効だとされている[1]。

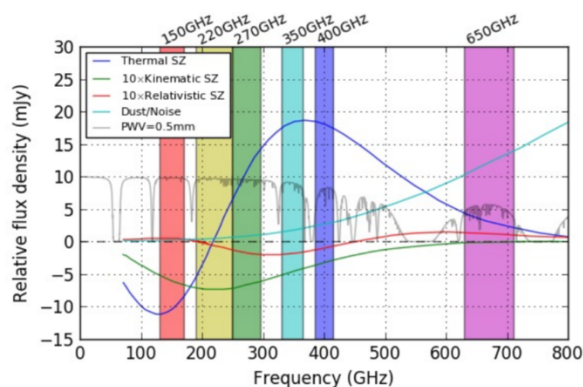


図 1 : tSZ、kSZ によるミリ波サブミリ波帯のスペクトル。

また、6 つの縦のカラーバーは GLTCAM の観測帯域を示している。

2.光学系

図 2 に国立天文台先端技術センターの都築俊宏氏に設計いただいた GLTCAM の広視野光学系

を示す。既存の GLT の約 2m 四方の受信機室に、本来はある程度の大きさが必要な広視野の光学系が収まるように、3 枚のミラーとクライスタットを収納するコンパクトなデザインとなっている。このため、GLT CAM では 130GHz-700GHz の広帯域かつ 1 度に 18 分角の広視野を撮像することが可能となっている。

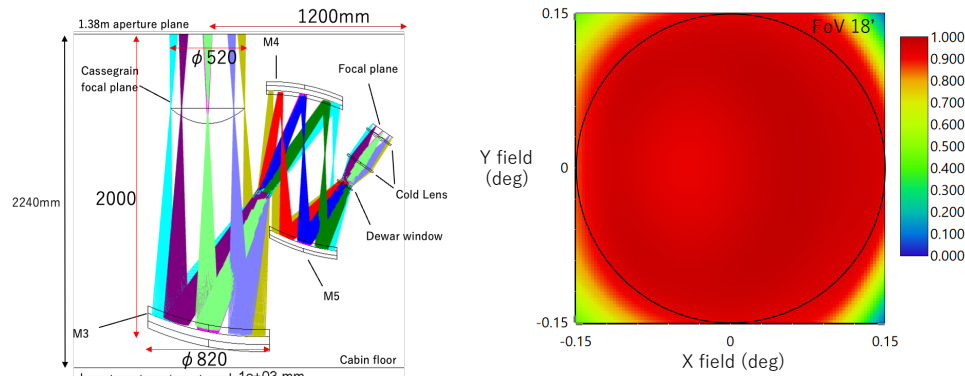


図 2：(左図) GLT の約 2 m 四方の受信機室に収まる光学系設計解。最大直径 80cm 程度の光学ミラーを含む 3 枚の自由曲面ミラーが配置されている。(右図) 波長 450 μ m でのストレーラ比マップ。黒円は視野 18 分角を示し、視野全面でストレーラ比 0.85 を超える無収差光学系となる。

3 検出器

現在はミリ波側の多色 MKID 検出器[2]を製作している。この検出器は図 3 で示すように 1 本のフィードラインと検出を行う複数の素子で構成されている。アンテナで信号を受けた後、バンドパスフィルター (BPF) で観測したい周波数域の信号のみ選択され、1/4 波長共振器型のマイクロ波力学インダクタンス検出器 (MKID) で検出されて入力信号の強さが測られる[3]。各素子はシリコン (Si) 基板上に窒化ニオブチタン (NbTiN) とアルミニウム (Al) のハイブリッドで作られている[4]。アンテナや BPF、MKID、フィードラインは NbTiN であり、BPF と MKID の間は観測周波数帯に感度を持つ Al で接続されている。これらの各パーツを冷却試験と光学試験を通して性能評価を行い、デザインにフィードバックをかけることで最終的な検出器のデザインを決定する。

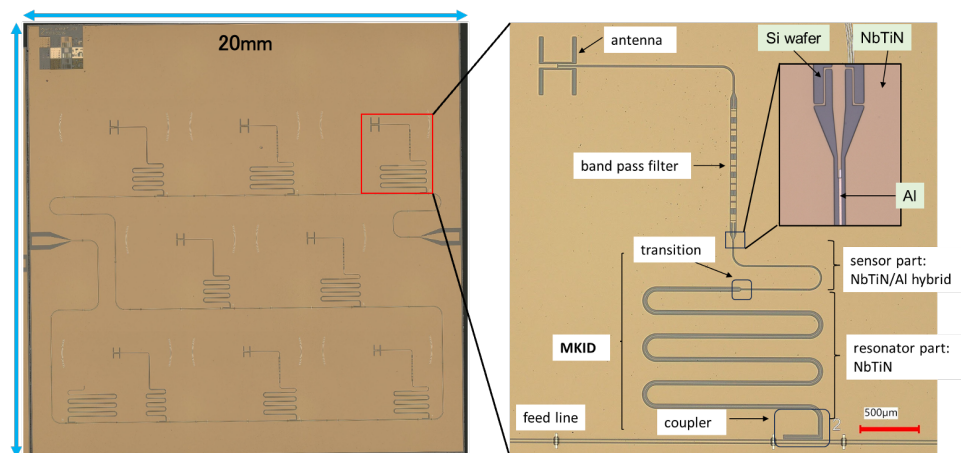


図 3：(左図) 1 本のフィードラインに複数の素子が連なっている。(右図) 各素子は主にアンテナと BPF、MKID で構成されており、Si 基板上に NbTiN と Al でパターンが作られている。

冷却試験では、MKID の周波数特性、BPF と MKID の接続を確認する。2023 年 7 月に行った試験では、MKID の共振周波数が設計値よりも 2.2 倍大きくなっていた。これは NbTiN のパターンニングのエッチングプロセス段階で Si も大きく削られてしまい Si の大きな段差が生じてしまい、後に積層される Al がその段差を乗り越えられなくなったために、図 4 が示すように NbTiN と Al の接合部で断線が起こったと考えられる。NbTiN のエッチング時間を調整して断線が起こらないように製作された検出器で行われた 2023 年 12 月の試験では、設計通りの共振周波数が確認できた。今後は、アンテナと BPF の動作確認や周波数特性を調べるために、光学試験を実施する予定である。

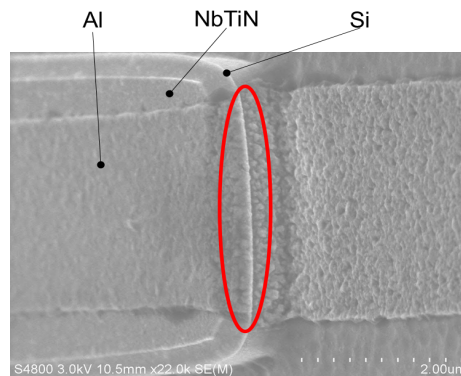


図 4：NbTiN と Al の接合部を傾斜観察した SEM 画像。

上から Al、NbTiN、Si の層になっており、Si のエッジ（図 4 の赤枠）で Al が断線している。

4. マニュアルの作成

検出器の製作作業や評価実験では繰り返し行う作業が数多くある。これらの作業は必ずしも同一人物が行うとは限らず、また期間が空いてしまうことも間々あり、作業時にミスが起こるリスクが高い場合もある。我々のグループでは、人為的なミスを減らすためにエクセルでマニュアルを作成して共有しており、独自の工夫として手順の重要度に応じて階層化を行なっている。

例として図 5 を挙げる。このマニュアルでは A 列の rank が階層を表しており、rank0 が作業内容、1 が注意事項、2 がコツや工夫となっている。実際の手順は C 列に示されている。具体的な使用方法としては、例えば rank 0 だけをエクセルのフィルター機能を使って抽出すると、慣れている作業向けのマニュアルになる。一方で rank 1 以上を取り出すと補足情報が足されたマニュアルになり、作業に慣れつつある作業員や久しぶりに作業を行う作業員向けのマニュアルになる。マニュアルに念のため配慮すべき点を載せておくことで、作業員が重要事項の確認をしながら作業を進められる。また、すべての rank が入ったものでは完全版のマニュアルになり、作業に慣れていない作業員向けのものになる。図に関しては別シートでまとめて保存しており、列 D でその手順で参照すべき図の番号を示している。いずれも作業員や状況に応じて適切なマニュアルを選択できるようにすることで、余計な情報を削ぎ落として簡潔なマニュアルになるため読みやすくなり、作業効率が高められミスが減ることにつながっている。

エクセルでマニュアルを作る他の利点は電子化されていることである。電子化されたマニュアルであれば、あまり手がかからずに手順の変更や付け加えが可能であり、バージョン管理も容易である。行 1 では、作業の様子や作業風景を収めたクラウド上のアルバムのリンクが貼られてお

り、より詳細な情報が必要になった場合でも簡単にアクセスできる。また、手順書の列 B にチェックボックスを配置し、作業者が逐一チェックを入れながら作業をすることで手順抜けを防止することができる。このチェックボックスはチェックの一括の取り外しが行えるようになっており、繰り返しマニュアルを使用する際にも簡単に空欄に戻すことが可能である。さらに、マニュアルを電子化したことによってクリーンルーム等の持ち込みが制限されるような環境においても、タブレット端末などで簡単に確認できるようになっている。

	A	B	C	D
1	図の保存場所		https://...	
2	rankの説明		0が作業内容、1が注意事項、2がコツや工夫	
3	rank	check	手順	図
4	0	☒	用意するもの ホットプレート、LDPE12.5mm、シリコンレンズレット、Si基板、ゴム手袋、ブロワー、lens-plate治具、detector-plate治具、蓋の治具、テフロンテープ、ピンセット	
5	0	☒	机の上をきれいにする	
6	0	☒	作業はゴム手袋、マスクをつけて行う	
7	0	☒	Si基板の移動はピンセットを用いる	
8	0	☒	FEP12.5umと茶色の紙を同時に4cm角程度に切り出す	
9	0	☒	茶色の紙に切り出しの形状を書き出す	
10	0	☒	FEP12.5umと茶色の紙をそれぞれマスキングテープで固定し、カッターで切り出す	1
11	2	☒	基本はカッターで切り出すが、四角はハサミの方がやりやすい	
12	0	☒	赤いマスキングテープを切り出しておく	
13	0	☒	キムワイブを2枚机の上に置き、その上に治具を置く	
14	0	☒	ブロワーで治具についている埃を飛ばす	
15	0	☒	lens治具の1の面にカットしたFEPを乗せ、位置調整する	2
16	1	☒	FEPが真ん中のH型の部分に出ていないか、圧入ピンの対面のピン穴に重なっていないか注意する	
17	0	☒	四角の部分にマスキングテープを貼り固定する	

図5：我々のグループのマニュアルの例。このシートでは手順を示している。

5.まとめ

銀河団衝突の様子や宇宙論パラメーターの精密決定を行うためには、tSZ と kSZ を分離検出する必要がある。この観測を行うためにはミリ波サブミリ波帯の広帯域で多色のカメラが必要であるため、我々は要求を満たす広視野（18分角）かつ超広帯域（130-700GHz）で6色での撮像が可能な GLTCAM を開発している。現在、光学系は GLT の受信機室に収まり、要求を満たす性能を持った設計が得られている。検出器は、実験室での性能評価実験を通して最終的なデザインの完成が目指されている。検出器の製作や性能評価実験では付随する作業は多岐に渡り、これらの作業でのミスを減らすために、エクセルで階層化された電子マニュアルを作成している。今後は光学系や検出器を完成させ、GLT での観測を5年以内に開始する予定である。

6.参考文献

- [1] Bernardis et al. A&A Volume 538, February 2012
- [2] Day, P. et al. Nature 425, 817–821, 2003
- [3] Baselmans et al. A&A, 601:A89, May 2017
- [4] S. J. C. Yates et al. Applied Physics Letters, 99(7):073505, 08 2011