

# 論文の内容の要旨

## Development of Wide Field and Broadband Cryogenic Optics with Microwave Kinetic Inductance Detectors

(マイクロ波力学的インダクタンス検出器用広視野・広帯域冷却光学系の開発)

関口繁之

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) とは宇宙誕生後約 38 万年後の名残りであり、現在は 150 GHz にピークを持つ 2.73 K の黒体放射と一致したスペクトルとして観測される。これまでに COBE, WMAP, PLANCK の CMB 観測衛星によってその温度揺らぎの精密観測が行われ、宇宙年齢などの宇宙論パラメータが高精度に決定された。これらの観測結果により標準モデルに対して地平線問題や平坦性問題が発生した。この問題を解決するために初期宇宙で指数関数的な膨張が起こったとするインフレーション理論がある。CMB の B モード 偏光はインフレーションの原始重力波によって生成されるため、B モード偏光の精密観測はインフレーション理論の検証を行う鍵となる。原始重力波は大角度スケールに現れるため、全天を効率よく観測する広視野ミリ波観測装置が要求される。

B モード偏光観測では CMB の前景放射成分を取り除くため、50 – 400 GHz 帯の広帯域観測が要請される。限られた焦点面において、1 画素に対して 1 つの周波数バンド(比帯域 30%) しか検出できないと 1 バンドあたりの総素子数は少なくなる。そのため、1 画素で複数の周波数バンドを検出できる多色カメラの開発は重要である。多色カメラの製作には平面アンテナと結合させる給電系 (feed) の広帯域化が必須である。

ミリ波・サブミリ波による遠方銀河の探査は近傍銀河の多様性や進化過程を解明する手掛かりとして重要である。近年盛んになりつつあるサブミリ波で明るい銀河については、統

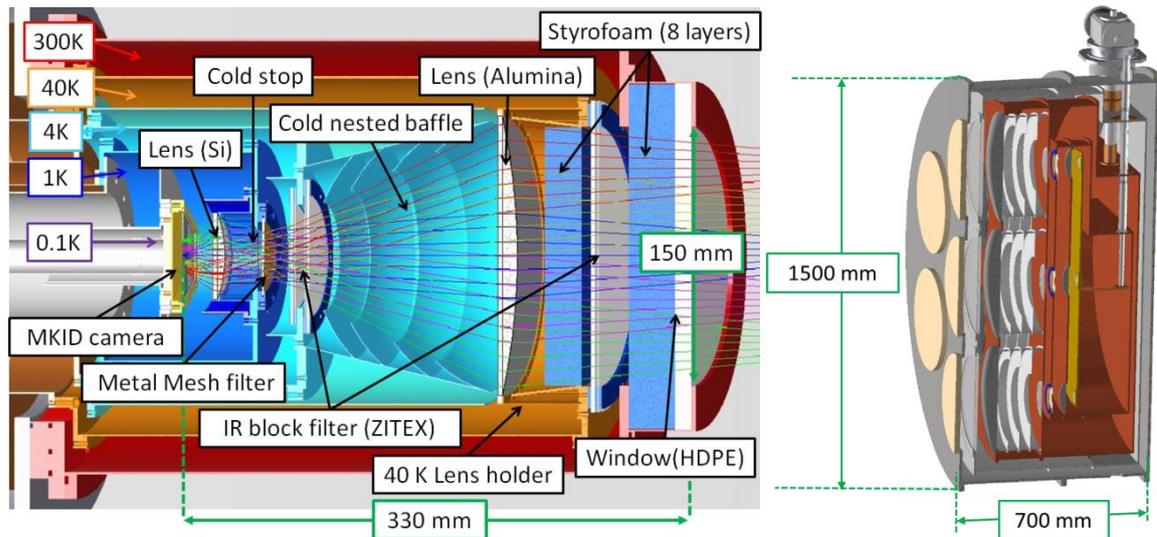


図 1. 広視野冷却光学系（左）と、7 モジュール化したデザイン（右）

計的に性質を理解するために多くのサンプルの観測が求められている。これらを効率よく観測するためにミリ波帯での大規模サーベイが必要である。Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) などの干渉計は狭い視野を高角度分解能で観測するのに長けているが、大規模サーベイをするには時間がかかり効率的ではない。そのため、大型単一鏡と組み合わせる広視野カメラが必要である。

広視野な観測装置には James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) の SCUBA-2 (FoV :  $8 \times 8 \text{ arcmin}^2$ ) や IRAM 30m 望遠鏡に搭載されている NIKA2 (FoV : 6.5 arcmin in diameter) などが成果を上げつつある。しかし、光学系に冷却反射鏡を用いているため装置が大きくなり、さらなる広視野化が難しい。我々は高誘電率、低損失のレンズを用いた屈折光学系によるコンパクトな冷却光学系を設計し、モジュール化により大型単一鏡の広視野焦点面が可能になると考えた。

大型単一鏡での広視野ミリ波・サブミリ波観測を見据えた冷却光学系を設計・開発した。その仕様は以下のとおりである。1. モジュール化による広視野化が可能。2. 高屈折率、低損失のレンズを用いたコンパクトなデザイン。3. 超伝導検出器を高感度に動作させる温度までの冷却。4. 光学部品からのローディングの減少

本光学系はミリ波帯で高屈折率、低損失であるシリコン( $n=3.4$ ) とアルミナ( $n=3.1$ ) をレンズとして用いたデザインである (図 1 (左))。観測周波数は 220 GHz であり、直径 100 mm の望遠鏡焦点面 ( $F/\#=6$ ) から直径 18 mm の検出器面 ( $F/\#=1$ ) までのリレー光学系となっている。検出器面は超伝導検出器 (MKID : Microwave Kinetic Inductance Detectors) を用いており、高感度に動作させるため 150 mK 以下まで冷却する必要がある。そのため、窓からの赤外線の入射エネルギーを抑えるために 3 つの赤外線カットフィルター (ZITEX,

Styrofoam, Metal mesh) を用いている。検出器の光学カップリング効率を上げるためレンズや赤外線カットフィルターには観測周波数帯の反射防止膜を施している。これにより、赤外線カットフィルターの合計透過率は観測周波数帯で 0.78 であり、6THz 以上で  $< 10^{-10}$  を達成した。

視野外からの迷光を抑えるためにコールドバッフルの製作を行った。本バッフルは内側の羽により迷光を外へ反射するようにデザインされた。LightTools を用いたシミュレーションによって迷光の影響を調べた。その結果、バッフルを取り付けたときは、取り付けないときの 1/4 まで迷光を減少させた。

迷光を含めた検出器面への熱流入は  $0.7 \mu W$  であり、冷凍機の冷却能力である  $20 \mu W$  より十分小さいため、モジュール化することが可能である。冷却試験では 60 時間で 100 mK まで冷却された。

さらなる広視野化に向けて、本光学系をモジュール化した設計を図 1 (右) に示す。南極 10 m 望遠鏡の焦点面に、モジュール化した光学系を 7 モジュール配置することで、視野 1 度を確保する。

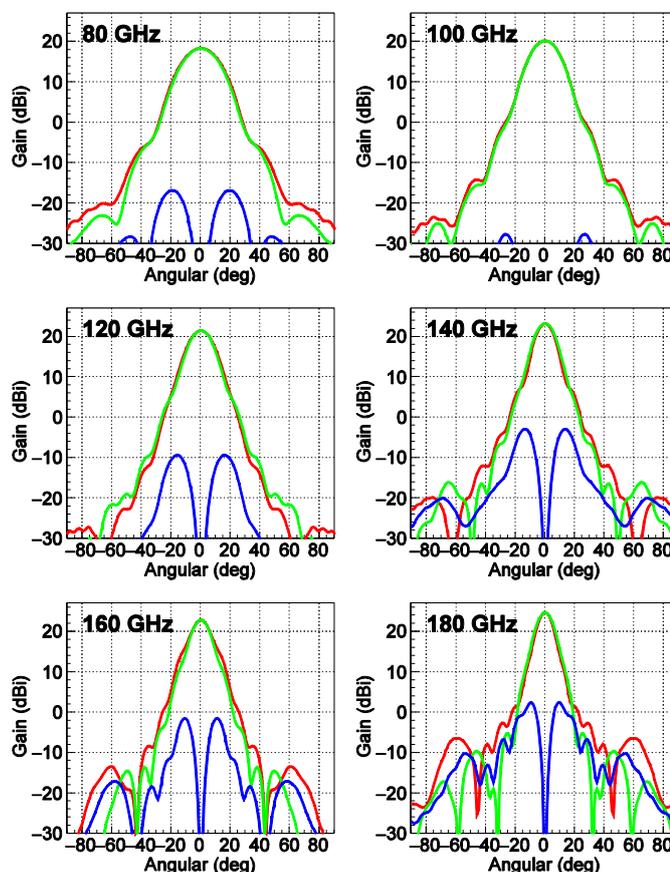
コルゲートホーンは、WMAP, Planck 衛星でも使われたようにビーム対称性やサイドローブ、交差偏波の性能から、ミリ波で最も性能の高いフィード (給電部) として知られている。欠点は、帯域が 1:1.4 と狭いことである。我々は、その課題を克服するとともにアレイ化に成功した。



図 2. 80 - 180 GHz コルゲートホーンアレイ

(上) 写真

(右) ビームパターンシミュレーション (赤 : E-plane、緑 : H-plane、青 : 交差偏波 diagonal plane )。



広帯域 Feed として、80 – 180 GHz の 4 素子コルゲートホーンアレイの開発を行った (図 2. (上))。コルゲートホーンの広帯域化はこれまでに、コルゲーションの内部を広げたリングロード構造を用いて達成された。(R. Datta++ 2014) ではマイクロマシン技術を用いた *platelet* という手法で 284 素子アレイの製作が行われた (帯域 70 – 175 GHz (1:2.33))。(L. Lucci++ 2012) では薄いアルミ板をスタックすることで 4 素子アレイが製作されたが、リングロード構造ではないため、33-50 GHz (1:1.51) の帯域となっている。他にも、(V. Tapia++ 2016) では直接加工によるコルゲートホーンが開発された (帯域 67 - 116 GHz (1:1.73))。本コルゲートホーンは平面構造のコルゲーションだけを用いて、機械加工によって製作できる設計を行った。直接加工により不要な箇所を削ることでの軽量化が行えるため、焦点面の熱容量を削減できる利点がある。主偏波のビームは対称性が良く、交差偏波やサイドローブレベルも -20 dB, -30 dB 以下となっている (図 2. (右))。また、反射損失はデザイン周波数帯のほとんどの帯域で -15 dB 以下である。80 – 180 GHz ホーンアレイでは各ホーンについてのビームパターンも測定し、各素子のビームに違いがないことが確認された (図 3.)。

80 – 180 GHz ホーンアレイと OMT-MKID デバイスを組み合わせた 2 色カメラを広視野冷却光学系に搭載してのビームパターンも測定した (図 4.)。広視野観測のためのモジュール化された焦点面検出器を設計した。各モジュール毎に周波数帯域を変えることにより 55 – 330 GHz の広帯域をカバーすることが可能である。

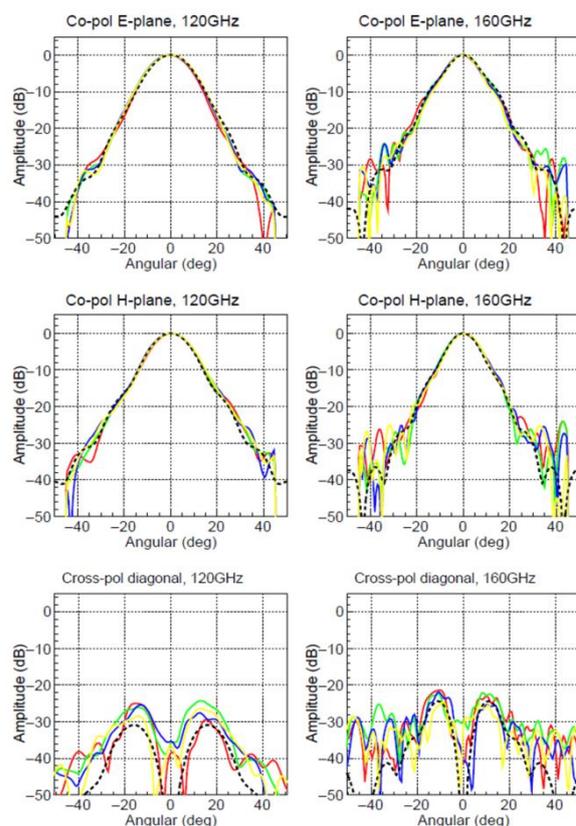


図 3. 80 – 180 GHz コルゲートホーンアレイの 120, 160 GHz におけるビームパターン (@ 300 K)。点線 (黒) がシミュレーション値で実線 (赤、緑、青、黄) が各ホーンのパターン。

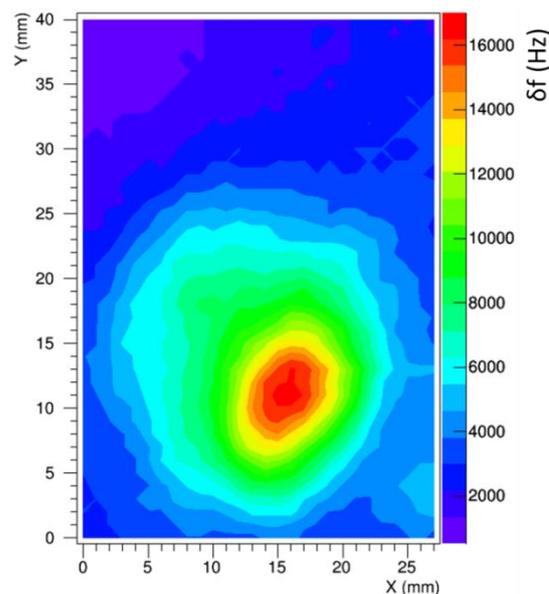


図 4. コルゲートホーン結合 OMT-MKID のビームパターン