

CMB 観測に向けたミリ波多素子超伝導体共振器カメラの開発

関口繁之¹、関本裕太郎²、唐津謙一²、新田冬夢³、関根正和¹

成瀬雅人⁴、野口卓²、鵜澤佳徳²、松尾宏²

¹東京大学、²国立天文台、³筑波大学、⁴埼玉大学

第 42 回天文・天体物理若手夏の学校 集録

1. Motivation

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は COBE、WMAP により精密に測定され、宇宙論パラメータの観測手法の一つであるとともに、ビッグバン宇宙論の証拠となる柱の一つでもある。しかしビッグバン宇宙論には、地平線問題や平坦性問題などが生じることになる。これを説明するための仮説としてインフレーション理論があるが、それはまだ実証されてはいない。インフレーションは CMB 以前に起こった出来事なので電磁波での直接観測はできないが、間接的にはインフレーションの存在の有無を観測することが可能である。CMB から放射される光子は最終散乱面で荷電粒子とトムソン散乱を起こすため CMB にある偏光パターンを引き起こす (E モード)。そこにインフレーションが起こると原子重力波が発生し、光子はその影響を受けるため、CMB に別の偏光パターンを生じさせる (B モード)。よって、CMB の B モード偏光を観測できれば間接的なインフレーション理論の実証となるが、B モード偏光の大きさは、CMB の温度揺らぎの 2,3 桁小さいことが予想されるため、今まで以上に高感度な検出器 (電波カメラ) が必要となる。

私が所属している国立天文台先端技術センターの電波カメラグループでは B モード偏光観測に向け、次世代の電波カメラ候補の 1 つである MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector) カメラの開発を行っている。

2. MKID の原理

MKID は量子型検出器の 1 種である。常伝導体が超伝導体になると、2 つの電子が結合しクーパーペアとなる。このクーパーペアの結合エネルギーは半導体のエネルギーギャップに比べて約 3 桁低く、サブミリ波からミリ波光子のエネルギーに対応する。

入射した光子が超伝導体のギャップエネルギー (2Δ) より大きいとき、1 個の光子に対し 1 個のクーパーペアが壊され 2 個の準粒子が生成される (図 1 左)。超伝導体の電気抵抗は一般には 0 と捉えられているが、それは直流電流の場合である。交流電流の場合、超伝

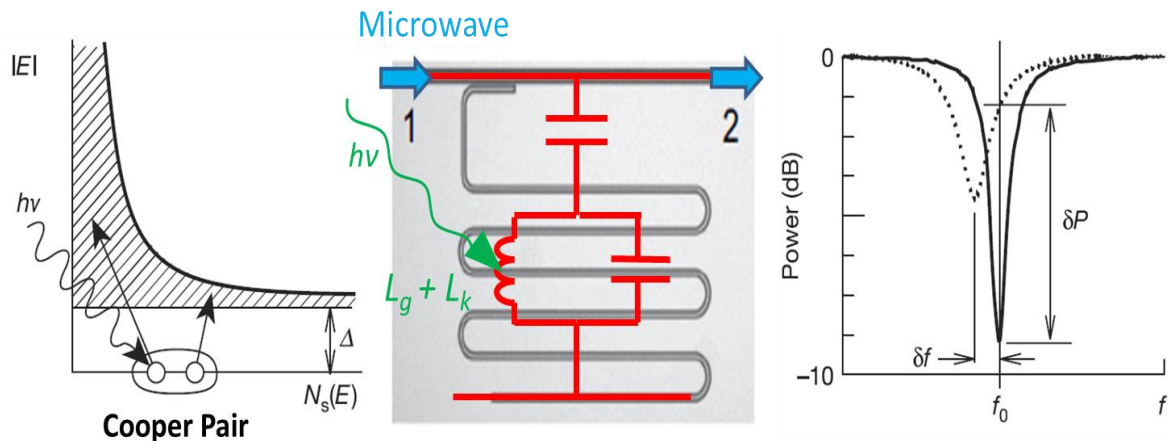


図 1: MKID の原理

導体の準粒子の移動には慣性があるため、その影響として力学インダクタンスを生じる。MKID の写真を図 1 (中央) に示すように、超伝導体の CPW (coplanar-waveguide) 線路で構成された、一本の共振部分 (カーブしているライン) と一本のフィードライン (1 から 2 にかけてのライン) で 1 素子を構成しており、この等価回路を図 1 (中央) の赤線で示した。MKID は LC 共振回路として振る舞いその信号をフィードラインから読み出す仕組みになっており、共振周波数は素子の共振部分のラインの長さによって決まり次式のように書ける。

$$f = \frac{1}{4l\sqrt{(L_g + L_k)C}}$$

ここで、 l は共振部分のラインの長さ、 L_g 、 C は超伝導配線が持つインダクタンス、キャパシタンスであり、 L_k が力学インダクタンスである。よって、一本のフィードライン上に、 l を変えて共振周波数を調整させた複数の共振部分を取り付けると、1 本のラインから複数の素子を読みだすこと (周波数マルチプレックス) が可能となる。

ギャップエネルギー以上の光子が入射すると MKID 内のクーパーペアが準粒子に変化するので、力学インダクタンスが増加する。よって、MKID に光子が入射するとその分、共振周波数が低い方へと変化する (図 1 左)。この共振周波数の差を読み取ることで、入射光子の数がわかるのである。

MKID は基本的には超伝導体膜一層から構成されており、製作が比較的に簡単のため歩留まりが非常に高い。また、周波数マルチプレックスにより、少ない読み出しラインで 1000 素子規模の電波カメラが実現できる検出器である。

3. 国立天文台における MKID の開発

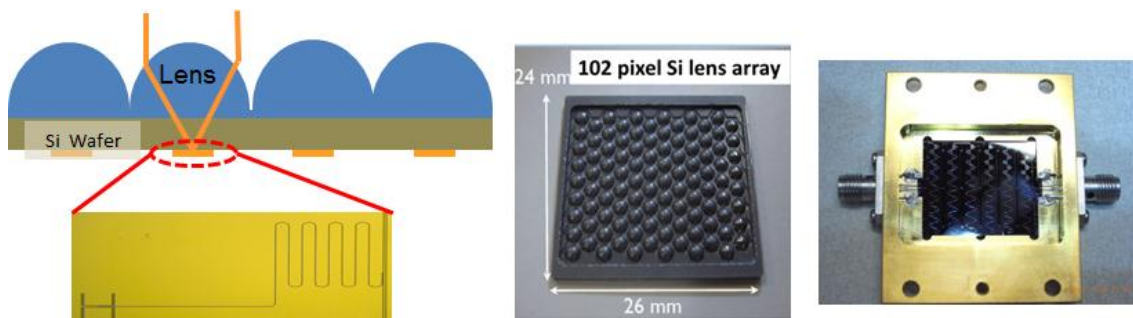


図 2 MKID と Si レンズアレイ

国立天文台で開発している MKID は Si ウェハー上に Al ($\Delta \sim 90\text{GHz}$) を成膜させ、MKID のデザインにエッチングしたものである。また、目標とする観測周波数に感度を持たせるため、共振部分の先端にダブルスロットアンテナを取り付けたデザインとなっている (図 2 左)。さらに、アンテナだけでは指向性が良くないので、指向性を高めるため Si レンズを 1 素子ずつに取り付けた。この Si レンズは MKID のデザインに合わせて、1 枚の Si 板に高速スピンドルによる機械加工を施すことにより、Si レンズアレイとして製作される (図 2 中央)。MKID を使用する際は、図 2 (左) のように MKID をサンプルボックスに固定し、SMA ケーブルによって読み出される。

他に、下記に挙げる事についても我々は開発を行ってきた。

A) 高品質 Al 膜

一般に検出器の感度を上げるためには検出器の NEP (Noise Equivalent Power) を下げる必要がある。MKID の NEP は

$$NEP \propto \sqrt{\frac{N_{qp}}{\tau_{qp}}}$$

で表される。ここで τ_{qp} は準粒子寿命、 N_{qp} は準粒子数である。 τ_{qp} は成膜した Al 膜の状態に依存し、結晶中に格子欠損などが存在すると準粒子寿命は短くなる。また N_{qp} は温度によって変動し、温度が低くなればなるほど準粒子数は多くなる。よって、MKID の NEP を下げるためには高品質な Al 膜を成膜し、より低温で測定する必要がある。

国立天文台では、MBE (Molecular Beam Epitaxy) 装置を使って高品質 Al 膜を成膜しており、結晶化 Al 膜による MKID を 0.1K 希釈冷凍機に搭載して性能評価を行った。そして、図 3 に示すように、electrical NEP が $6 \times 10^{-18} [\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}]$ を達成することに成功した。しかし、MKID の性能 (ノイズや準粒子寿命) について、結晶化 Al 膜と非結晶

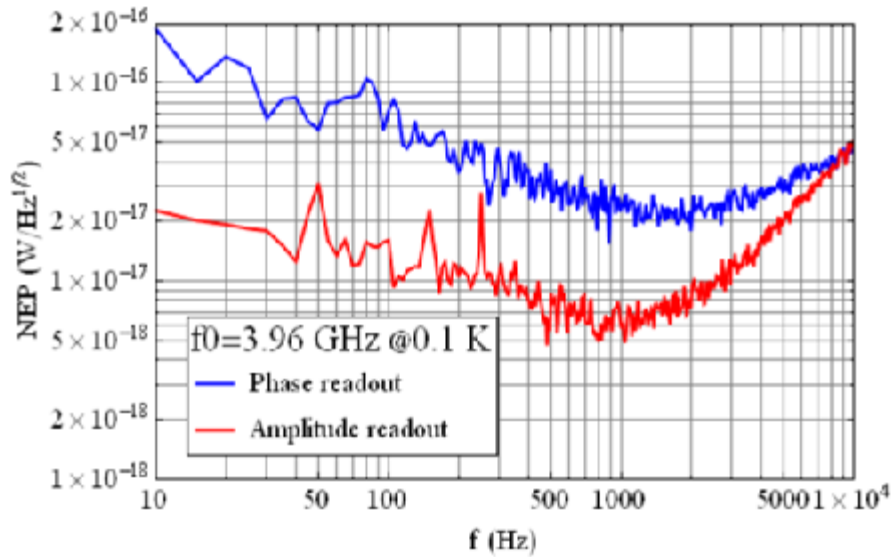


図3 MKIDのNEP (M. Naruse Ph. D Thesis, Tokyo Univ. 2012)

Al膜の間で違いは見ていないので、より迷光対策などを施した light-tight な測定系が必要となってくる。

B) 読み出し回路

MKID は周波数方向にマルチプレックスされているので、その読み出し方法として今までは、1つのある周波数の **InputPower** を送りその応答を測定し、測定が完了したら次の周波数の **InputPower** を送りその応答を測定し…といったように、一回の **InputPower** 入力に対して一つの周波数成分しか測定ができないため、周波数方向に **InputPower** をスイープさせて全体の周波数について測定する方法を取ってきた。しかしそれでは各素子の“同時”のデータが取れず、さらに共振周波数以外の目的でない周波数も測定してしまうため効率が悪い。これを解決するため、FFT を用いた読み出し回路の開発を行っている。

この新しい読み出しシステムでは、**InputPower** で与える周波数をある一つの周波数ではなく、様々な周波数の信号（ある周波数帯域の）が足し合わされている信号（オシロスコープなどでみると雑音のように映る）を与え、帰ってきた信号をFFTすることにより各素子の“同時”測定が可能となる。また、足し合わせる周波数を共振周波数付近に設定しておくことで、MKIDの信号以外を測定してしまう無駄を省ける。

図4にFFTを用いた読み出し回路によって測定されたMKID（102素子）の信号を示す。赤いプロットが各素子の共振ピークであり、図4に示されている周波数帯域は102素子すべての帯域のおよそ半分である。よって、共振が確認できただけでもMKIDの歩留まりは成膜段階から比べて90%以上という高い値を示すこともできた。

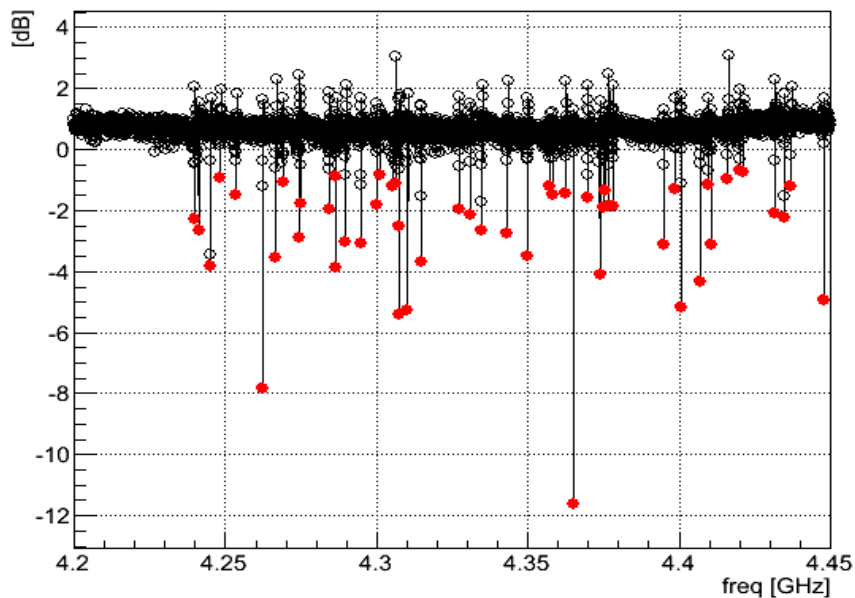


図4 FFTを用いた読み出し回路によって取得されたMKID信号

次のステップとしては、観測可能な周波数帯域を広げることや、ノイズの測定もこのシステムで行えるようにすることなどが挙げられる。

4. 今後の展望

現在は102素子のMKIDの開発に成功しているが、将来的には1000素子カメラの開発に取り組んでいく。それに向けて、SiレンズアレイのARコーティングや0.1K冷凍機でのビーム測定、読み出し回路のさらなるupgradをまずは行っていく。

5. 参考文献

1. M. Naruse Ph. D Thesis, Tokyo Univ. 2012
2. Jonas Zmuidzinas “Superconducting Microresonators: Physics and Applications”
3. J. Baselmans “Kinetic Inductance Detectors” J Low Temp Phys (2012) 167:292-304
4. J. Baselmans, S. Yates, P. Diener, P. de Visser, “Ultra Low Background Cryogenic Test Facility for Far-Infrared Radiation Detectors” J Low Temp Phys (2012) 167:360–366
5. J. Gao. D Thesis, California Institute of Technology. 2008