

# 論文の内容の要旨

論文題目 Millimeter-wave camera using antenna coupled  
superconducting resonators

(アンテナ結合超伝導共振器を用いたミリ波カメラ)

氏名 成瀬 雅人

ミリ波・サブミリ波は、宇宙晴れ上がりの瞬間(宇宙誕生から 38 万年後)を捉えることができる宇宙背景放射 (W. Hu and S. Dodelson, 2002), 銀河が最初に形成されたころ (10 億年後) の情報を持つ赤方偏位した遠方銀河団 (S. Chapman et al., 2005)、さらには近傍銀河での星形成(F. Motter et al., 2007)といった様々な時代の天体現象を観測することができる。このように幅広い時代に渡る宇宙の進化を解明するためには、ミリ波サブミリ波での広視野サーベイ観測が極めて有力な手段である。また、2011 年に ALMA (Atacama Milimeter/submillimeter Array) の初期観測が開始された。ALMA は極めて高い角度分解能  $0.01''$  を持ち、30-950 GHz 帯を 10 の周波数帯域で観測する極めて強力な観測装置である。ALMA と相補的な役割をする、広視野高感度観測装置の開発が世界中で行われている。

このような背景のもと超伝導検出器を用いた天文学用のミリ波サブミリ波カメラの研究開発を行った。本研究の開発目標は地上観測限界( $NEP \sim 1 \times 10^{-16} \text{ W/Hz}^{1/2}$ )以下の検出器を実現すること、及び 1000 素子規模のミリ波サブミリ波連続波カメラ開発のために光学系を含めた検出器システムを試作し、動作を実証することであった。さらに、将来の衛星計画を見据えた検出器のさらなる高感度も目指した。

カメラに用いる検出器として MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector) と呼ばれる超伝導共振器の性質を利用した検出器を採用した。この超伝導検出器に DSA (Double slot antenna) を組み合わせ、集光系としてレンズアレイを採用した。MKID は超伝導伝送線路(coplanar waveguide,

CPW)を用いた LC 共振回路によって構成されており、共振周波数は 3-8 GHz のマイクロ波帯に設計されることが多い。これはマイクロ波帯が共振器を製作するうえで都合のよい大きさであることと、マイクロ波帯では雑音温度 5 K 程度の低雑音アンプが利用可能なことが理由である。超伝導共振器によるミリ波光子の検出原理は、以下のとおりである。超伝導ギャップエネルギー以上の周波数の光子が MKID に入射することで超伝導膜内のクーパー対が壊され、超伝導膜の表面インダクタンスが変化する。このインダクタンス変化が共振の強度及び位相のずれを引き起こす。このずれを透過損失の強度と位相として読み出すことでミリ波サブミリ波が検出される。

また、カメラ開発にとって MKID が持つ好ましい特徴として以下の 3 つがあげられる。

- 1, 原理的な検出器感度限界 (NEP, Noise Equivalent Power) は  $10^{-20}$  W/Hz<sup>1/2</sup> 以下であり、これは宇宙での背景雑音限界以下である。ただし、超伝導共振器の感度限界は、超伝導体内の準粒子寿命によって制限され、デバイス基板や超伝導表面の酸化物などが超過雑音を引き起こすとされる。
- 2, 各素子の共振周波数を少しずつずらしておくことで、周波数多重読み出しを行うことができる。これによって、数 100 素子のカメラをわずか 2 本の同軸ケーブルで動作させることができる。
- 3, 超伝導共振器は CPW で構成可能であり、1 層の超伝導膜と 1 回のエッチングプロセスを行うだけで検出器を構成することが可能である。この単純な構造によって、不良素子数の減少及び素子間の性能ばらつきを抑えることが期待される。

MKID の性能は準粒子寿命が長く、共振の Q 値が高いほど良い。そこで、本研究では高感度化を目標として、超伝導薄膜の品質と準粒子寿命の関係性の解明並びに検出器感度を制限していた超伝導共振回路の Q 値頭打ちの原因追究を行った。そのために、高品質 Al 膜を作製するために分子線エピタキシー(MBE, Molecular Beam Epitaxy) 装置を国立天文台内のクリーンルームで立ち上げた。また、検出器評価のために、0.1 K 希釈冷凍機を立ち上げた。測定系はデルフト工科大学のシステムを参考に組み上げ、検出器の電氣的 NEP, カメラの光学的 NEP の測定を行った。

第 3 章では超伝導ギャップエネルギーを複素数化することによって、超伝導接合(SIS) の電流電圧 (IV) 特性ならびに、超伝導薄膜の表面抵抗の超過損失の双方をうまく説明できることを示した。超伝導薄膜の表面抵抗を計算するために、複素伝導度の計算理論である Mattis-Bardeen (MB) 理論に複素ギャップエネルギーを適用した。その結果、具体的には、NbN/MgO/NbN 接合の IV 特性と、同じデバイスから求められたテラヘルツ帯での表面抵抗を共通の超伝導ギャップエネルギーの値で再現できることを示した。さらに、複素ギャップを適用した MB 理論によって、超伝導共振器の Q 値の温度依存性もうまく説明できる可能性を示した。

BCS(Bardeen, Cooper, Schrieffer) 理論から導かれる準粒子寿命は温度が低くなるにつれて指数関数的に増加するが(Kaplan, et al, 1976), 超伝導 Al 膜の場合には、超伝導転移温度の 1/6-1/8 の温度で頭打ちになることが報告されている(Baselmans, et al. 2008)。この準粒子寿命の頭打ちの原因として、磁性不純物・外部磁場・超伝導薄膜内の Grain Boundary や結晶欠陥などがあげられる。Al 膜に、同量の磁性不純物 Mn と Al を打ち込んで準粒子寿命を比較した実験では、不純物の種類に関係なく寿命が 1/10 の程度になることが報告されている(Barends, et al. 2009)。この結果から示唆されるのは、準粒子寿命を長くするためには超伝導膜の欠陥を少なくすることが必要だということである。そこで、低温でのマイクロ波における誘電損失が小さい( $\tan\delta < 10^{-4}$ ), Si 基板上に結晶成長

する Al を使って超伝導の膜質が準粒子寿命に与える影響を調べた。

第 4 章では国立天文台のクリーンルームで分子線エピタキシー装置を立ち上げ、Si(111)基板上に Al(111)が、Si(100)上には Al(110)が結晶成長することを高速電子回折 (図 1) 及び X 線回折を使って確認した。Al 膜を結晶化することによって、150 nm 厚の Al 膜の残留抵抗比(RRR)を 20 に向上させることができた。また、成膜時の基板温度を上げることによって RRR は改善する一方、膜の表面粗さが悪くなることが分かり、MKID に最適な成膜条件は基板温度が 100 °C であることをつきとめた。また、膜厚 150 nm 程度の結晶成長した Al 膜は中心線 3  $\mu\text{m}$ 、ギャップ 2  $\mu\text{m}$  で構成される CPW へと混酸を用いたウェットエッチングによってパターンニングした (図 1)。

第 5 章では、超伝導検出器の測定環境構築について詳述した。4 重に磁気遮蔽された 0.1 K 希釈冷凍機内に超伝導共振器を置き、超伝導共振器の透過損失スペクトラム(S21)及び LED パルスに対する反応の緩和時間を、試料温度を変えながら測定できるシステムを構築した (図 1)。

第 6 章では Al 膜の膜質の違いが超伝導共振器の性能に与える影響を調べた。第 4 章の方法で製作したエピタキシャル Al 膜と電子線蒸着 (EB) で成膜したアモルファス Al 膜を比較した。Al 膜の高品質化によって、RRR を 10 から 18 へと向上させることはできたが、0.1 K での準粒子寿命はともに 450  $\mu\text{s}$  であり、電氣的 NEP も  $1 \times 10^{-17} \text{ W/Hz}^{1/2}$  で同程度であった。本研究の範囲内では、高品質 Al 膜によって超伝導共振器の検出器性能向上は見られなかった(図 1)。また、RRR が向上しても準粒子寿命が変わらないという事実は、常伝導体における電子の散乱機構と超伝導準粒子の散乱機構が違うことを示唆している。また、迷光対策などの測定環境改善を行い、超伝導共振器の形状・共振の Q 値を変化させながら検出器としての最適解を探った結果、 $6 \times 10^{-18} \text{ W/Hz}^{1/2}$  の検出器感度を実現した(図 2)。当初の目標である地上での観測雑音限界を大きく上回る検出器の開発に成功した。

第 7 章ではカメラの光学系の設計並びに製作を行った (図 1)。光学系として長半球シリコンレンズアレイを採用した。このレンズアレイは高純度多結晶シリコンの板から国立天文台のマシンショップにて、高速スピンドルを用いて製作された。レンズの表面粗さは 2  $\mu\text{m}$  以下であり、ミリ波・サブミリ波帯用レンズとして十分な精度であった。レンズの直径を大きくするとビーム幅が狭くなる代わりに検出器面積が大きくなり、望遠鏡の焦点面の大きさが限られていることからカメラの素子数が制限されてしまう。レンズの直径を観測波長( $\lambda$ )の 0.5-10 倍まで変化させてビームパターンを計算し、レンズ直径を  $3\lambda$  とした。また、天体からの信号を超伝導膜へと結合するために使う DSA が、220 GHz 帯で 20 %の周波数帯域を、440 GHz で 10 %の周波数帯域を持つように 3 次元電磁解析ソフトを用いて設計した。

第 8 章では 9 素子のミリ波カメラの光学評価を行った。220 GHz で測定されたビームパターンは 20 dB の範囲で設計値とよく一致した。この測定は 0.3 K 冷凍機を用いて行われた。また、0.1 K 希釈冷凍機内部に 2 K-16 K まで温度を変えられることができる黒体輻射源を置き、黒体の温度を変えながらミリ波カメラを評価し、光学的 NEP 並びにレンズ・DSA を含めた光学効率を推定した。その結果、8 K の輻射を受けている状態での光学的 NEP は  $1 \times 10^{-14} \text{ W/Hz}^{1/2}$  であり、光学効率は 6-7 %程度と見積もられた。光学効率を低くしている原因としてシリコンレンズ表面の反射損失があげられるが、それ以上に超伝導共振器内で作製された準粒子が、共振器外に逃げてしまっていることの影響が大きいと推定される。

今後の超伝導共振器を用いたミリ波カメラ開発の大きな課題として、素子毎の性能ばらつきの評

価と光学効率向上があげられる。光学向上には、直径数ミリのシリコンレンズアレイ表面の反射を抑えつつ 0.1 K までの冷却サイクルに耐える構造を実現することと、ミリ波によって作られた準粒子を超伝導共振器内に閉じ込められるようにすることが必要である。

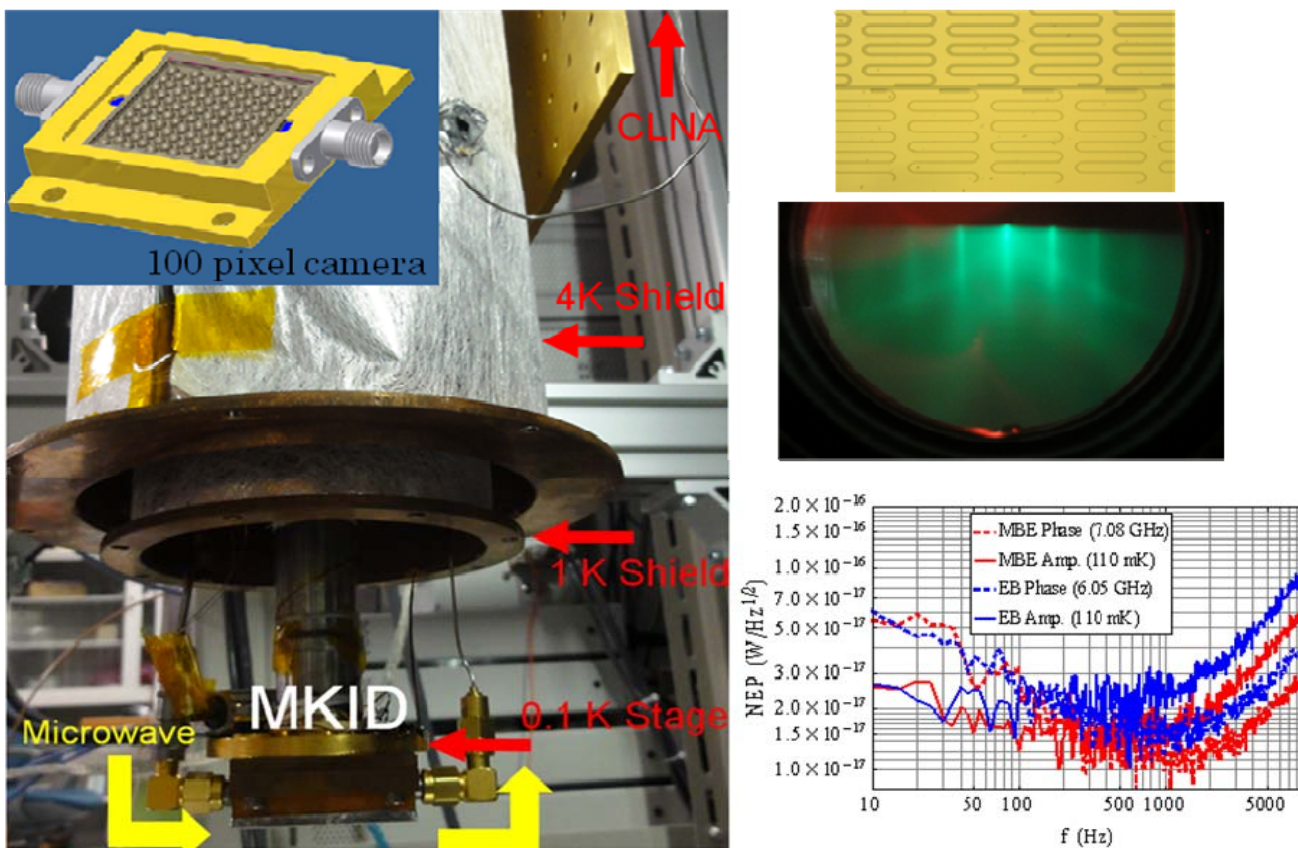


図 1 : 0.1 K 冷凍機内部及び配線(左), 100 素子カメラの CAD 図面(左挿入), Al 膜超伝導共振器アレイ(右上), 分子線エピタキシー(MBE)による結晶 Al 膜の高速電子回折画像(右中), MBE 及び電子線蒸着 Al 膜を用いた超伝導共振器の検出器雑音比較(右下)。

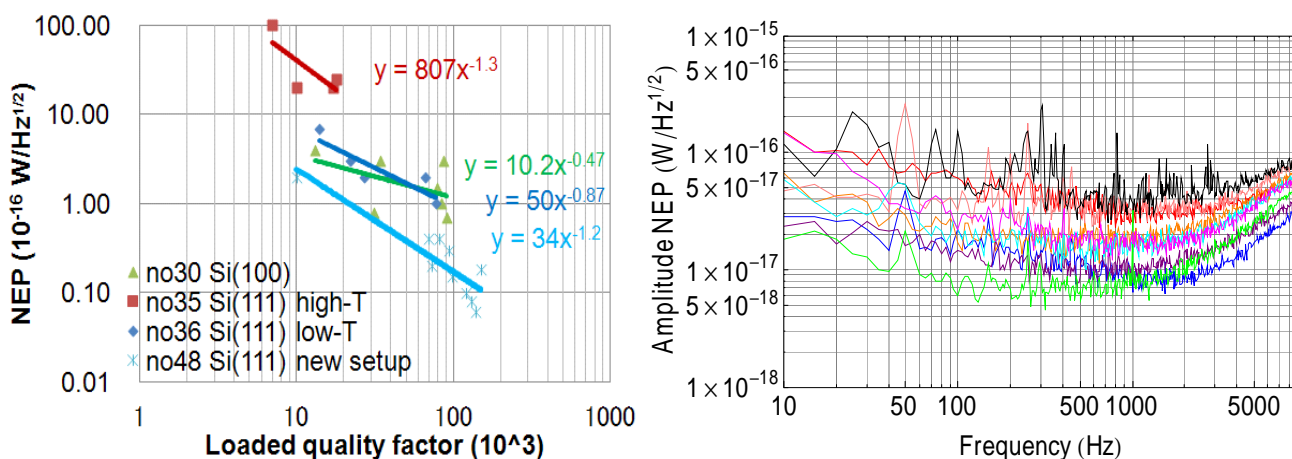


図 2 : さまざまな膜質の共振器の Q と検出器雑音の関係(左)、同一チップ上にある 9 素子の検出器雑音のスペクトラム。