

課題研究ゼミ

ミリ波サブミリ波天文学用超伝導受信機&ミクサー

東京大学理学部天文学科 4 年

泉 拓磨

(学籍番号 05102002)

2011 年 4 月 12 日

概要

Jonas Zmuidzinas の論文の日本語訳です。

アブストラクト

超伝導受信機は天体物理学、特にミリメートルから遠赤外の波長においてますます重要となるだろうが、その波長帯での科学的な機会には天文学や宇宙論において鍵となる問題が含まれている。超伝導受信機には多くの利点がある。卓越した感度、リソグラフィック製造、特に近年の多重読み出し方式の実用化に伴うアレイサイズの大規模化といったものである。本稿では科学的機会、これらのデバイスの基本となる物理、ラディエーションカップリングの技術、遷移端ボロメーター、トンネル接合（超伝導-絶縁体-超伝導）への取り組み、そして熱電子ミクサーといった最近の直接検出器の進歩のレビューもする。

I. Introduction

超伝導検出器は遠赤外線からミリメートルの波長帯での天体物理で重要な役割を果たしつつある。その波長帯の光は初期宇宙でとても強く放出されていた。この論文においてはおおざっぱにミリメートル帯を $10\text{mm} > \lambda > 1\text{mm}$ 、サブミリ帯を $1\text{mm} > \lambda > 0.2\text{mm}$ 、そして遠赤外を $200\mu\text{m} > \lambda > 20\mu\text{m}$ と定義する^{*1}。これらは周波数でいうとそれぞれ $30\text{GHz} < \nu < 300\text{GHz}$ 、 $300\text{GHz} < \nu < 1500\text{GHz}$ 、そして $1.5\text{THz} < \nu < 15\text{THz}$ に対応している。

一般的に天文学の測定には2つのアプローチがある。スペクトル分解能の低い $\lambda/\Delta\lambda$ が 3~10 程度の測定は測光と呼ばれる。それらは電子シンクロトロン放射や熱制動放射、そして星間ダスト粒子からの熱放射のような広帯域なスペクトル源を調べるときに用いられる。対して分光とは、 10^6 程度までの高分解能による測定で、典型的には分子や原子のスペクトル線を調べる際に用いられる。

^{*1} サブミリと遠赤の境界として $200\mu\text{m}$ を選んだのだが、これは今現在遠赤外天文学で最も一般に利用されている検出技術である圧縮型 Ge:Ga 光伝導検出器の長波長側のカットオフ波長と同じである。

A. Photometry

ミリ波サブミリ波での測光は天文学において重要な役割を担っている。たとえば、測光は宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の研究で用いられているが、それは空をミリ波の光で満たし、宇宙の電磁エネルギーの大半を形作っている。CMB の測定は我々にビッグバンから 300000 年後の初期宇宙のスナップショットを見せてくれる。この放射の非方向性の測定は既に宇宙の幾何学はユークリッド的（空間が平坦）ということを示し [1]-[3]、いくつかの重要な宇宙論パラメータの最も正確な値を与え [4]、ダークエネルギーに支配され、多量のダークマターを含むインフレーション由来の宇宙論モデルを強く支持する結果を与えている。将来の CMB の偏光測定はインフレーション時の宇宙（約 10^{-38} s）と大統一（理論）のエネルギースケールでの素粒子物理学に関する詳細な情報を生み出すと期待されている [5]-[8]。また、銀河団を通過する際の CMB の散乱の観測（スニヤエフ・ゼルドビッチ効果）によりあらゆる距離にある銀河団の位置を特定することができる [9]。これらのデータにより宇宙の膨張の歴史、構造形成、そして宇宙論的距離スケールでの重力でさえ検証することができるだろう。超伝導受信機を使う将来的な CMB 偏光観測の宇宙計画が提案されている。

他の例は銀河からの星間ダスト放射の研究である。銀河からの信号のうち最もよく知られているのは可視光や UV での星からの熱放射で、電荷結合素子（CCD）のアレイを用いて観測される。もっとも初期の、非常に遠方にある銀河の中には、この星の光の大半は我々にまで届かないことがわかってきた [10]-[14]。星の光はダストに吸収され、より長い波長の光として再放出される。実際、宇宙にあるサブミリ光の総エネルギーは、UV/可視/近赤外のそれとほぼ等しい [15]-[17]。さらに、サブミリ帯は非常に遠方の銀河まで見通せるという点でユニークである。その理由は、ダストの出すスペクトルは長波長でとても急な傾きを持つ（ $\sim \nu^{3.5}$ ）ので、宇宙論の周波数の赤方偏移が本質的には距離の増加に伴う減光を補うからである。サブミリ波測光によるこのダストの放射の観測は銀河の総光度を与えるが、それは星形成率に関係していて、ダストの振る舞いに関する情報も与えてくれる。将来の 10m 級の宇宙望遠鏡はこの科学的機会を利用するように提案されている [18]。

測光に用いられる検出器の技術は、観測波長に依存する。冷却された高電子移動度トランジスタ増幅器、さらにはダイオード検出器はしばしば $\lambda > 3\text{mm}$ [19] で用いられている。熱的な直接検出器、特に半導体ボロメーター [20]-[22] は現在 $3 > \lambda > 0.2\text{mm}$ で有用である。半導体を用いた光子検出器は一般的に $\lambda < 0.2\text{mm}$ で用いられている。

超伝導遷移端センサー（TES）をサーミスタとして用いる新世代のボロメーターが開発中である [24]。この手法は数千のピクセルからなる焦点面を作るのに適していて、現在構築中のシステムにおいては半導体ボロメーターにとってかわっている。同じ波長帯で作動する超伝導光子検出器のためにプロトタイプも存在する。これらは一般にボロメーターよりは冷却への要請がゆるいし、それゆえに将来的に選択できる技術になるかもしれない。

B. Spectroscopy

スペクトル線の観測もまた、ミリ波サブミリ波天文学において重要な役割を果たす。ミリ波サブミリ波帯では分子の回転線が主要なものとなっていて、遠赤外では原子の微細構造線がそうである [25]。 $\lambda/\Delta\lambda \sim 10^6$ もの分解能がドップラーシフトやスペクトル線のプロファイルにはしばしば必要とされる。

回折格子や Fabry-Perot 分光器の奥のボロメーターのような直接検出器 [26]-[30] が中程度の分解能において用いられ、周波数のダウンコンバーターとして超伝導ミクサーを用いるヘテロダイン受信機が高いスペクトル分解能 ($\lambda/\Delta\lambda > 10^3$) で用いられている。これらには $3 > \lambda > 0.25\text{mm}$ での超伝導絶縁体-超伝導 (SIS) トンネル接合ミクサーや、より短い波長での熱電子ボロメーター (HEB) ミクサーが含まれる。

ヘテロダイン受信機は大半の電気工学者にとって最もなじみの深いものである。アンテナで検出された周波数 ν_{RF} の RF 信号と、局部発振器 (LO) の出力波の周波数 ν_{LO} の $\sin$ 波がミクサーとして知られる非線形装置において混合されるのだが、そこではうなり周波数 $\nu_{IF} = |\nu_{RF} - \nu_{LO}|$ の信号が作られるが、それは中間周波数信号 (IF) としても知られている。IF 信号はさらにダウンコンバートされるか検波されるかをする。電波天文分光にとって、IF 信号はフィルターバンク型、音響光学型 (AOS) [36]、そしてデジタル相関型 [37]-[41] のような多チャンネルスペクトル分析機によって処理される。IF スペクトルはオリジナルの RF スペクトルのレプリカで、 $\nu_{IF} \ll \nu_{RF}$ なので非常に高いスペクトル分解能が達成されうる。

典型的には、電波もしくはマイクロ波のミクサーは GaAs ショットキー型ダイオードのような半導体ダイオード [42] を用いることで実装されるが、それは特に低ノイズというわけではない。それゆえ、ミクサーのノイズとコンバージョンの効率が受信機システム全体のパフォーマンスにとって致命的にならないように、アンテナからの信号はミクサーにかける前に低ノイズのアンプを通して送ることになる。実際、低温 HEMT 増幅器は電波天文学のセンチメートル領域で広く使われている [19]。しかし、ミリメートルから遠赤外に及ぶ非常に高い周波数帯では、LNA の類は存在しない。よって、とても感度のよい第一段階のミクサーが必要である。加えて、調整可能なサブミリ LO 源の出力パワーは一般に非常に弱いので [33]、低い LO パワーでも動くミクサーが必要である。これまで、低温冷却された半導体ダイオードが第一段のミクサーとして用いられてきたが [43]-[46]、これまでのところ、それらは超伝導トンネル接合や HEB のミクサーに置き換わっている。

ヘテロダイン検出ではなく直接検出器を用いることは、背景光が低いとき [26],[47] の中程度のスペクトル分解能としてとても望まれているものだ。これは直接検出器には当てはまらない、量子限界として知られる [48],[49] 原理的な最小ノイズがヘテロダインシステムには存在するからである。しかし、長波長で高スペクトル分解能 ($R = \lambda/\Delta\lambda \sim 10^5 - 10^6$) が必要な場合 [50]-[52] にヘテロダインを使うことも良しとなるように数多くの技術的な挑戦がなされている。

超伝導ヘテロダイン受信機の別の重要な応用例は、たくさんの望遠鏡群を用いる開口合成干渉計であり、それは単一鏡の場合よりずっと高い空間分解能を得ることができる [53]-[55]。この技術では、望遠鏡からのダウンコンバートされた信号は典型的には光ファイバー通信で一つにまとめられ、交差相関がとられる [40],[41]。現在世界最大の電波天文計画である ALMA は、チリのアタカマ砂漠の高原に 12m の望遠鏡を 64 機設置し [56]、30 から 950GHz で稼働する予定である。超伝導 SIS 受信機の開発がこの計画を可能とした。実際、大干渉計は 1980 年代初頭にすでに考慮されていたが [57]-[59]、それは最初の SIS 受信機が作動した (1979 年) のからわずかな数年後のことであった。

サブミリ分光や干渉計は、恒星や惑星の形成を研究する上で強力な武器となる。星は冷たい分子ガス雲の奥深くで重力崩壊により形成されるが、その領域には大量のダストもあり、そのせいで可視や近赤外の波長域では見ることができない。分子雲のガスの大半は冷たく 10-20K で、主としてミリ波を放出する。しかし、新しく形成された星からの輻射は周囲のガスやダストを温め、ダスト粒子から氷が蒸発

して、それによって化学反応の複雑なネットワークが進行し、その結果として明るいサブミリ波のスペクトル線を出す巨大な森になる [60]-[62]。水はもちろん研究対象として特に興味深い物質である。もっともなことだが、地球の大気は水の回転遷移周波数では不透明で [63]、それゆえ星間空間の水を観測するには一般に航空機上からか [32],[64]、宇宙空間での [65],[66] 観測が必要である。

II. TRANSITION-EDGE BOLOMETERS

A. Introduction

ミリメートル、サブミリメートルの波長域での天文学用の TES ボロメーターは、遷移温度 T_c の薄い超伝導フィルムにくっついた輻射吸収材（アブソーバー）からなっているが、それは温度 $T_0 \sim T_c/2$ の熱浴と弱く連結されている。この TES は一定のバイアス電圧により、超伝導遷移温度の範囲内の作動点まで加熱されている。TES を流れる電流は低雑音な電流増幅器として働く超伝導量子干渉計デバイス（SQUID）に連結されている。leg-isolated ボロメーターと呼ばれるある典型的な装置構造では、アブソーバーと TES は小さい熱容量のために Si か低応力性の窒化シリコン（LSN）のとても薄い膜の上に置かれる。その薄膜は機械的な支柱の熱伝導が無視できるように細い足のように作られている。足の上の金属導線は TES と電気的に結ぶ役割と、TES と熱浴との間の熱のやり取りをする役割を果たしている。

B. Device Physics

超伝導ボロメーターは 60 年前から知られているが、ほとんど使われなかった。伝統的に、センサーは定常電流によりバイアスがかけられ、電圧増幅をして読みだされる。バイアス電力 $P_B = I^2 R$ は T_c 近傍で抵抗 R が増加することによって温度と共に増加していく。このことは不安定さや熱の逃げ道にも関連する正の電熱的フィードバックを生み出した。Irwin[81] による新しいアイディアは、遷移領域上の作用点での TES の温度を安定化する負の電熱フィードバックをかけるために定常電圧によるバイアスを用いるというものだ。この電圧バイアスがかかった TES は、線形性、バンド幅、吸収されたオプティカルパワーや熱浴の温度といった外部のパラメータ変化への応答には影響されない、といったことを含む大きなネガティブフィードバックと共に、伝統的な変換機の利点を多く持っている。こういった装置は薄膜の蒸着とオプティカルリソグラフィーによって作られる。結論として、これらは大規模アレイに向いている。

実際には、TES から熱浴への熱伝導はバイアスなしで、最大限望ましいオプティカルパワー P_{max} が TES を温度 T_c に加熱するように選ばれる。バイアス電圧 V は、TES が遷移の起こる急こう配の点まで加熱されるような小さいオプティカルパワー P を得るように選ばれる。中間値の P では、電熱フィードバックがトータルの入力パワー $P + V^2/R$ を（そしてつまりは温度も）一定に保つ。オプティカルパワーへのボロメーター電流 I の応答は、電流応答 S_I と呼ばれる。単極応答を持つ熱回路においては [82]

$$S_I \equiv \frac{\partial I}{\partial P} = -\frac{1}{V_B} \frac{L}{L+1} \frac{1}{1+i\omega\tau} \quad (1)$$

ここで、 $L = \alpha P/GT$ はループゲインで、 $\alpha = (T/R)dR/dT$ は超伝導遷移の傾きの値で、 $G = dP/dT$ は微分熱伝導で τ は有効時定数である。典型的なループゲイン $L \sim 10^3$ では、低周波応答は $S_I = -1/V_B$

でバイアス電圧のみに依存し、信号のパワーや熱浴の温度には依存しない。有効時定数 $\tau = \tau_0/L$ はフィードバックなしの時定数 $\tau_0 = C/G$ よりずっと小さい。実際には、 τ の完全なリダクションが行われることは稀である。なぜなら大半の装置は単極熱回路を持っていないからだ。たとえば、アブソーバーから TES への熱輸送の遅れ（内部時定数）はフィードバックによって減少せず、通常数ミリ秒の時定数を生み出す。

図 1 に示されているように、TES は入力コイルで SQUID に連結された変圧器である。電流バイアスのかかったシャント抵抗器は TES への定常電圧バイアスをかけるために使われる。シャント抵抗器が検出器の温度近傍で運用されると、この機器構成によりバイアスネットワークからのジョンソンノイズは無視できる。SQUID の読み出しは従来の半導体ボロメーターで用いられていた JFET 増幅器に比べて多くの利点がある。それはボロメーター温度かその近傍で用いることができ、パワー散逸が小さく、大きなノイズマージンを持つ。また、固有のインピーダンスが小さいので TES/SQUID システムは従来の JFET 読み出しを用いる高インピーダンスボロメーターに比べてマイクロホンピックアップへの感度がずっと鈍い。SQUID を作るために用いられる薄膜や露光装置は TES ボロメーターのものに似ているので、同一チップ上での積分も考え得る。