

X 線精密分光に向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータのインピーダンス 特性測定

中島 裕貴 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

次世代 X 線観測衛星 DIOS は中高温銀河間物質 (WHIM) の 3 次元の空間構造を捉えることが目的である。このため、 2eV 程度@ $0.1\sim 1.5\text{keV}$ のエネルギー分解能が必要であり、この要請を満たす検出器として、我々は TES 型 X 線マイクロカロリメータ (以下、TES カロリメータ) の開発を行っている。その開発において、TES カロリメータの特性を十分に理解することは重要である。TES カロリメータはその信号を最終的には電気信号で読み取るため、その特性はそれ自身のインピーダンスである。今回、TES カロリメータの特性を理解するために TES カロリメータのインピーダンスを測定した。インピーダンスの測定とは言っても、ただ単純に LCR メータを当てるだけで測定できるというものではない。そこまでは、TES カロリメータを読み出す装置の周波数依存性や低温配線の寄生インピーダンスを総合的に評価する必要がある。今回は、それらの寄与を評価する測定系を構築したので、そのことについて報告する。

1 研究背景

バリオンの半数以上は未だ検出されておらず、これは中高温銀河間物質 (WHIM) としてフィラメント状に存在していると考えられている。WHIM の直接観測に要請される検出器の性能としては、 $0.1 < z < 0.3$ の赤方偏移による輝線シフトが検出可能な 2eV @ $0.1 \sim 1.5\text{keV}$ 程度のエネルギー分解能、およびフィラメント状に広がった天体の分布を捉える撮像性能である。その要求を満たす検出器として、我々は超伝導遷移端温度計 (TES) 型 X 線マイクロカロリメータ (以下 TES カロリメータ) の研究開発を行っている。現在、我々が達成している分解能は 7eV @ 5.9keV であり、まだまだ改善の余地がある。分解能の向上には TES カロリメータの動的な特性を十分に理解し、それを製作にうまくフィードバックすることが必要である。動的な特性を評価する場合、TES カロリメータの応答による非線形性から、それは単純な抵抗ではなく、複素インピーダンスをもつ素子であることを考慮する必要がある。したがって、TES カロリメータの特性評価にはインピーダンスの測定が必要である。

2 研究目的

TES カロリメータの動作回路の概要図を図 1 に示す。TES カロリメータは極低温の下、定電圧バイアスをかけることで超伝導遷移端中 (動作点) で動作させる。TES カロリメータの抵抗は数 $\text{m}\Omega$ と小さく、室温からの配線抵抗 (数 $100\ \Omega$) の影響が無視できないため、TES カロリメータに並列にシャント抵抗を繋ぐことで擬似定電圧

バイアスとして動作させる。TES カロリメータの抵抗変化 (数 $\text{m}\Omega$) に伴う電流変化は小さく、その微小信号の読み出しには、超伝導量子干渉計 (以下、SQUID) を用いる。SQUID は負帰還をかけて低温下で動作させる。

TES カロリメータの動的な性質を調べるためには、上記のように TES カロリメータ動作させながら、その応答速度である数 10kHz 程度でのインピーダンスを測定することが必要である。TES カロリメータそのもののインピーダンスは非常に小さく (数 $\text{m}\Omega$) それ自身に到達するためには、室温読み出し回路、低温読み出し回路 (SQUID, 低温配線等) の周波数依存性の影響評価を行う必要があった。

本研究は、室温読み出し回路、低温読み出し回路 (SQUID, 低温配線等) の周波数依存性の影響評価を行い、TES カロリメータのインピーダンスを構築することを目的とした。

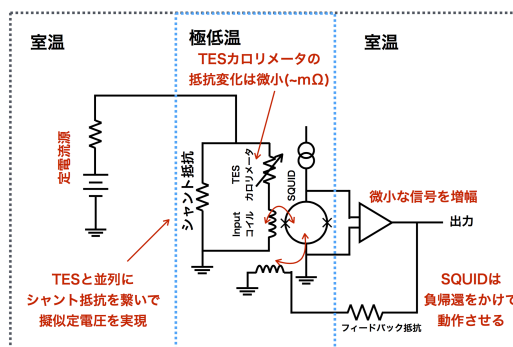


図 1: TES カロリメータの動作回路の模式図

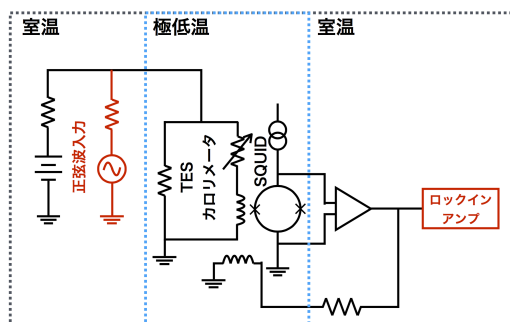


図 2: TES カロリメータのインピーダンス測定系の模式図. 図 1 の TES カロリメータの動作回路に赤で記した正弦波入力を追加し, 出力は赤で記したロックインアンプにより行う.

3 研究手法

バイアス源 (定電流源) と並列にファンクション・ジェネレータを繋ぐために, 変換ボックスを作製し, 定電圧バイアスと同時に交流電圧をかけられるセットアップを構築した. 測定は, 室温読み出し回路, 室温 + 低温読み出し回路, TES カロリメータ動作回路全体の周波数特性といった順番で, 動作回路系の構成要素を段階を踏んで測定することにより行った.

3.1 室温読み出し回路の周波数特性の測定

まず, 室温読み出し回路の周波数依存性を測定した. 図 3 に室温読み出し回路の回路図を示す. SQUID を, そのトランスインピーダンスゲインに等しい 100Ω の抵抗 (Dummy SQUID) で置換し, 室温読み出し回路の周波数依存性を測定した. この回路系で, バイアス抵抗 $R_B = 10 \text{ k}\Omega$, フィードバック抵抗 $R_{FB} = 5 \text{ k}\Omega$ であり, 室温読み出し回路以外の周波数依存性は既知であった. したがって, この測定により, 室温読み出し回路のみの周波数特性を調べることができた. 入力は, 正弦波 $10 \text{ mV}_{\text{rms}}$ で, 周波数は $11 \text{ Hz} \sim 200 \text{ kHz}$ で, その間隔は応答を見ながら変化させた.

3.2 室温読み出し回路 + 低温読み出し回路の周波数特性の測定

次に, 図 4 に示すように室温読み出し回路 + 低温読み出し回路の周波数依存性を測定した. SQUID は低温下で動作する素子のため, 低温読み出し回路を液体ヘリウム温度 (4K) まで冷やして測定を行った. 低温読み出し回路以外の周波数依存性は既知であり, この測定によ

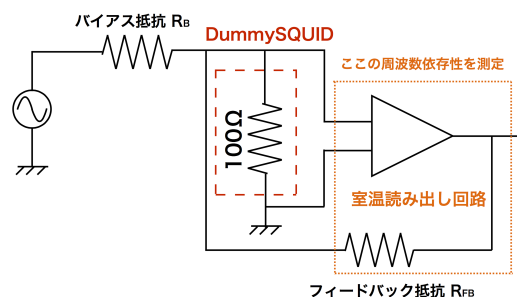


図 3: 室温読み出し回路の周波数特性測定の回路図

り, 先ほどの室温読み出し回路の周波数特性を差し引くことで低温読み出し回路の周波数依存性を知ることができた. 入力は室温読み出し回路と同様, 正弦波 $10 \text{ mV}_{\text{rms}}$ で, 周波数は $11 \text{ Hz} \sim 200 \text{ kHz}$ で, その間隔は応答を見ながら変化させた.

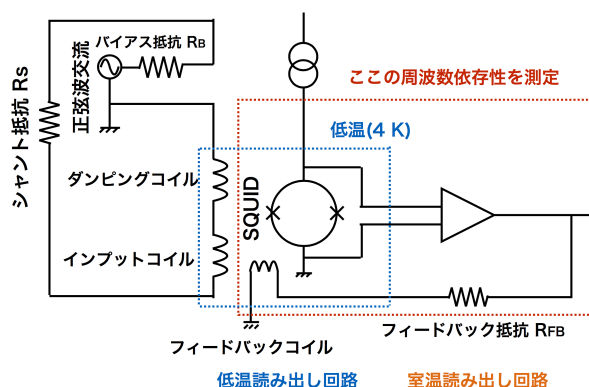


図 4: 室温読み出し回路 + 低温読み出し回路の周波数特性測定の回路図

3.3 TES カロリメータの動作回路全体の周波数依存性の測定

最後に, TES カロリメータの動作回路全体の周波数依存性を測定した. この測定結果から, 室温読み出し回路と低温読み出し回路の周波数特性の影響を差し引くことによって, TES カロリメータそれ自身のインピーダンスを求めることができる. 入力は, 正弦波 $10 \text{ mV}_{\text{rms}}$ で, 周波数は $11 \text{ Hz} \sim 55 \text{ kHz}$ で, その間隔は応答を見ながら変化させた.

4 結果

4.1 室温読み出し回路の周波数特性

室温読み出し回路の周波数依存性を図 5, 6 に示す. DC 入力に対する室温読み出し回路の出力は, 図 3 において, 入力電圧 V_{in} , 出力電圧 V_{out} , バイアス抵抗 R_B , フィードバック抵抗 R_{FB} とすると

$$V_{out} = \frac{R_{FB}}{R_B} V_{in} \quad (1)$$

とかける. 今回の測定では, $V_{in} = 10 \text{ mV}_{\text{rms}}$, $R_B = 10 \text{ k}\Omega$, $R_{FB} = 5 \text{ k}\Omega$ であったので, 低周波帯域で予測される出力の大きさは

$$V_{out} = \frac{5 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \times 10 \text{ mV}_{\text{rms}} = 5 \text{ mV}_{\text{rms}} \quad (2)$$

である. また, 室温読み出し回路には積分回路 ($R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 2200 \text{ pF}$) が組み込まれているが, そのカットオフ周波数は

$$f_{cut} = \frac{1}{2\pi RC} = 72 \text{ kHz} \quad (3)$$

である. 図 5 の結果はこれら期待値と一致するものであった. さらに, 室温読み出し回路は負帰還回路であるため, 位相は入力に対して 180° 回ることが考えられるが, 図 6 はこの予測をよく再現している.

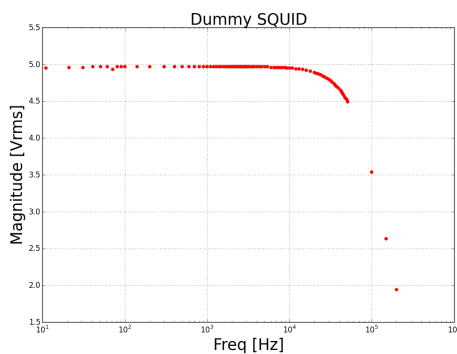


図 5: 室温読み出し回路の周波数特性 (出力電圧).

4.2 室温読み出し回路 + 低温読み出し回路の周波数特性

室温読み出し回路 + 低温読み出し回路の周波数特性を図 7, 8 に示す. 入力電圧 V_{in} , 出力電圧 V_{out} , バイアス抵抗 R_B , フィードバック抵抗 R_{FB} , 入力コイル相互

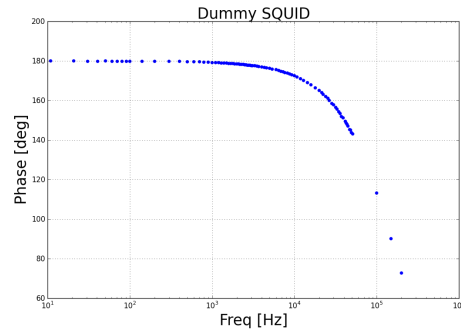


図 6: 室温読み出し回路の周波数特性 (入力に対する位相のずれ).

インダクタンス M_{in} , フィードバックコイル相互インダクタンス M_{FB} とすると, DC 入力に対する出力は

$$V_{out} = \frac{M_{in}}{M_{FB}} \frac{R_{FB}}{R_B} V_{in} \quad (4)$$

と書ける. 今回の測定では, $V_{in} = 10 \text{ mV}_{\text{rms}}$, $R_B = 1.2 \text{ k}\Omega$, $R_{FB} = 5 \text{ k}\Omega$, また [1] より, $M_{in} = 82.7 \text{ pH}$, $M_{FB} = 75.3 \text{ pH}$ であったので, 低周波帯域で予測される出力の大きさは

$$V_{out} = \frac{82.7 \text{ pH}}{75.3 \text{ pH}} \frac{5 \text{ k}\Omega}{1.2 \text{ k}\Omega} \times 10 \text{ mV}_{\text{rms}} = 46 \text{ mV}_{\text{rms}} \quad (5)$$

である. 図 7 より, 低周波での出力は約 $40 \text{ mV}_{\text{rms}}$ であり, 計算値に比べて小さかった. 今回の実験は, 液体ヘリウム残量の少ない中での実験だった. SQUID は低温下で動作し, その挙動は温度により変わってくるが, 今回の出力もその影響だと考えられる. また, 実験結果より, 100 kHz 以上では, 液体ヘリウム量の減少によって SQUID が正常に駆動していなかったのか, 値が外挿から予想される値から外れていた. したがって, 次の TES カロリメータのインピーダンス測定では, 100 kHz 以上の値は用いないこととした.

4.3 TES カロリメータのインピーダンス

TES カロリメータの動作回路全体の周波数依存性から上で得られた室温および低温読み出し回路の周波数特性の影響を差し引いて求めた TES カロリメータのインピーダンスの複素平面と実部・虚部それぞれの周波数特性を図 9, 10 に示す. 現時点で TES カロリメータに直列に繋がっているインダクタ成分の影響を差し引けていないが, TES カロリメータ回路のインピーダンスまでたどり着くことができた.

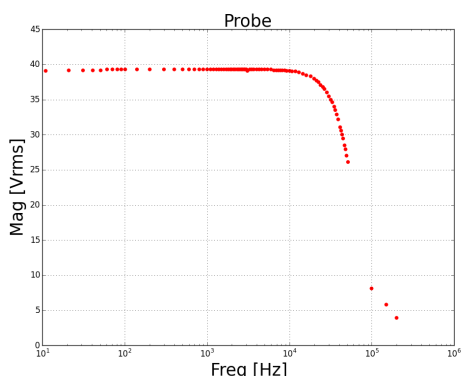


図 7: 低温読み出し回路の周波数特性 (出力電圧).

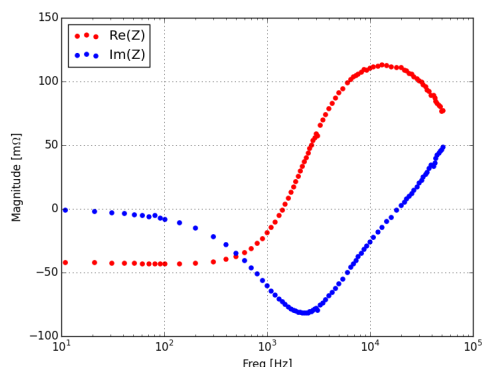


図 10: TES カロリメータのインピーダンスの実部・虚部それぞれの周波数依存性.

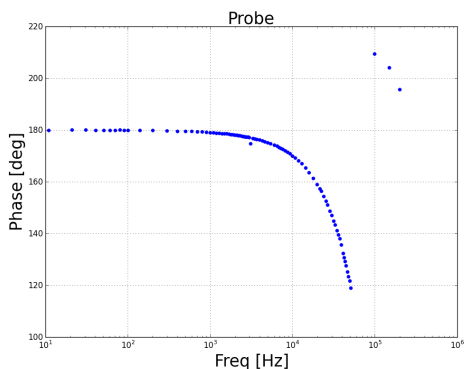


図 8: 低温読み出し回路の周波数特性 (位相変化).

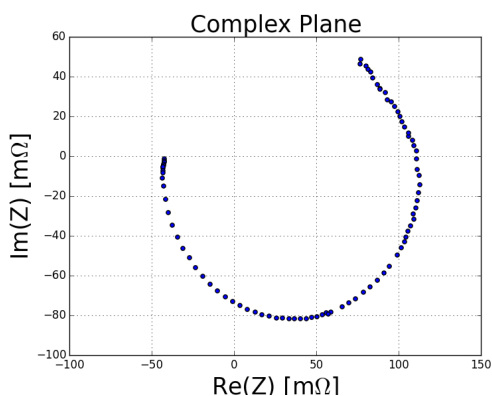


図 9: TES カロリメータのインピーダンスの複素平面.

ンスを, それと直列に繋がったインダクタ成分を含めて求めた. 今後はこの影響も差し引いて TES カロリメータそれ自身のインピーダンスを導出する.

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします.

Reference

[1] TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイの実用化に向けた低温フロントエンド部の開発, 千葉旭, 修士論文, 東京大学大学院理学系研究科 (2014)

5 まとめと今後の展望

室温読み出し回路, 低温読み出し回路, TES カロリメータ動作回路全体の周波数特性の測定といった段階を踏んで TES カロリメータのインピーダンスを求める測定系の構築を行った. 室温読み出し回路, 低温読み出し回路等の影響を差し引いて, TES カロリメータのインピーダ