

超伝導遷移端検出器の弱結合の理解へ向けた臨界電流測定

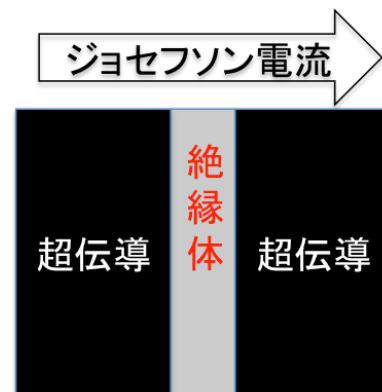
鈴木 翔太 (首都大学東京大学院 理工学研究科)

Abstract

我々のグループでは小型 X 線天文衛星 DIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) [1] への搭載に向けた次世代 X 線検出器である超伝導遷移端温度計 (Transition Edge Sensor = TES) 型マイクロカロリメータの開発を行っている。近年の研究で、超伝導体-常伝導体の 2 層構造を用いた TES において弱結合的振る舞いを示すケース (配線間の超伝導電子による巨視的な波動関数の干渉効果) があることがわかった。そこで、このような弱結合的振る舞いが我々の TES でも現れるかについて検証することにした。

1 はじめに

TES 型マイクロカロリメータは入射 X 線光子のエネルギーによる素子の温度上昇による超伝導状態と常伝導状態の急激な抵抗値の変化を利用して、X 線のエネルギーを 2eV の程度の精度で測定可能である。TES カロリメータは冷凍機内で極低温にして動作させることで高い分解能を得る。我々は TES に超伝導金属であるチタンと常伝導金属である金の二層薄膜を用い、近接効果で遷移温度を調節している。



2 TES の弱結合的振る舞い

弱結合とは 2 つの超伝導体の間にきわめて薄い絶縁体のような”障壁”が存在する状態である。超伝導状態はミクロナ電子対の位相が完全にそろった状態として記述されるが、弱結合状態にある 2 つの超伝導体は位相差ををそろえることで、1 つの超伝導体として振る舞おうとする。このとき図 1 のように位相差の分だけ電圧が無くても電流が流れる。これをジョセフソン効果といい、弱結合があるときの特徴的な現象として知られている。

我々の TES では配線のアルミニウムが極低温下で完全な超伝導体として存在する。しかし、TES はチタンと金が用いられているため、配線の超伝導体よりも超伝導性が弱いとされている。このため、TES をはさんだ配線間で弱結合的な振る舞いがみられると考えられ、図 2 に示すような研究が各機関で行われている。

図 1: 弱結合によるジョセフソン効果

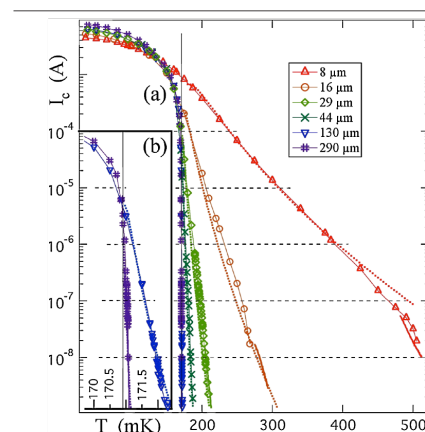


図 2: Jhon E. Sadleir et al., Phys Rev Lett 104, 047003 (2010)

3 超伝導薄膜の臨界電流

まず、弱結合が無い場合の TES の臨界電流について議論する。超伝導薄膜の臨界電流はギンズブルグ・

ランダウ方程式から

$$j_c = \frac{2}{3\sqrt{3}} q |\psi_0|^2 \frac{\hbar}{m_S \xi} \quad (1)$$

で与えられる [2]。ここで q は超電子の電荷、 ψ は超電子の磁場が無い状況における秩序パラメータ、 \hbar はプランク定数、 m_S は超電子の質量、 ξ はコヒーレンス長を表す。温度 T と臨界温度 T_c との比

$$t = T/T_c \quad (2)$$

を用いると、 ψ と ξ は臨界温度の近傍 ($T \propto T_c$) でそれぞれ

$$|\psi_0|^2 \propto (1-t) \quad (3)$$

$$\xi \propto (1-t)^{-1/2} \quad (4)$$

という温度依存性をもつ。したがって臨界電流は

$$j_c \propto (1-t)^{3/2} \quad (5)$$

という温度依存性をもつ。

一方、弱結合的な振る舞いがある場合、臨界電流は

$$j_c = \frac{\pi \Delta(T)}{2eR_n} \tanh \frac{\Delta(T)}{2kT} \quad (6)$$

となる [3]。ここで $\Delta(T)$ は超伝導体のエネルギーギャップ、 R_n は接合のトンネル抵抗、 k はボルツマン定数を表す。つまり、臨界電流の温度依存性が弱結合の有無によって変化するのである。

4 自作 TES の臨界電流測定

我々は TMU110 素子の 1 つのピクセル図 3 について弱結合的な振る舞いが存在するか検証をおこなった。

この素子の 1 ピクセルの大きさは 200 μm 角、臨界温度は 165 mK である。測定方法は超伝導状態の TES に電流値を変えながら電流をかけた抵抗値を測定し、超伝導状態の破れる電流値を記録、温度を変えながら同様の測定を行った [4]。実験のセットアップを図 4 に示す。

測定結果の図 5 から、弱結合が無い場合の臨界電流の温度依存性を表す (5) 式と、弱結合がある場合の温度依存性を表す (6) 式のどちらにもフィットした。

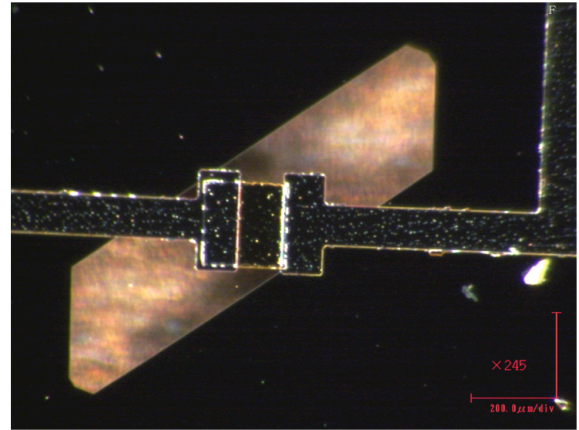


図 3: TMU110 素子の 1 ピクセル。ピクセル ID:2c

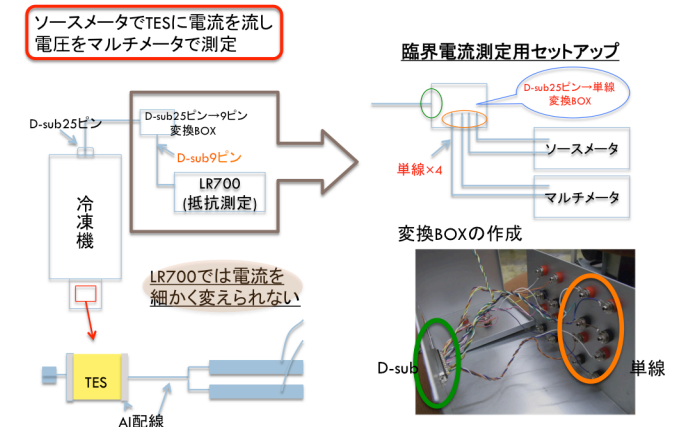


図 4: 実験のセットアップ

5 まとめ

今回の検証からは TMU110 に弱結合的な振る舞いしているかどうかを判断するに至らなかった。今後の課題としては、より T_c 近傍で今回と同様に臨界電流特性の温度依存性を調査すること。臨界電流の磁場依存性の測定による TES の弱結合的な振る舞いを検証することなどが上げられる。

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。

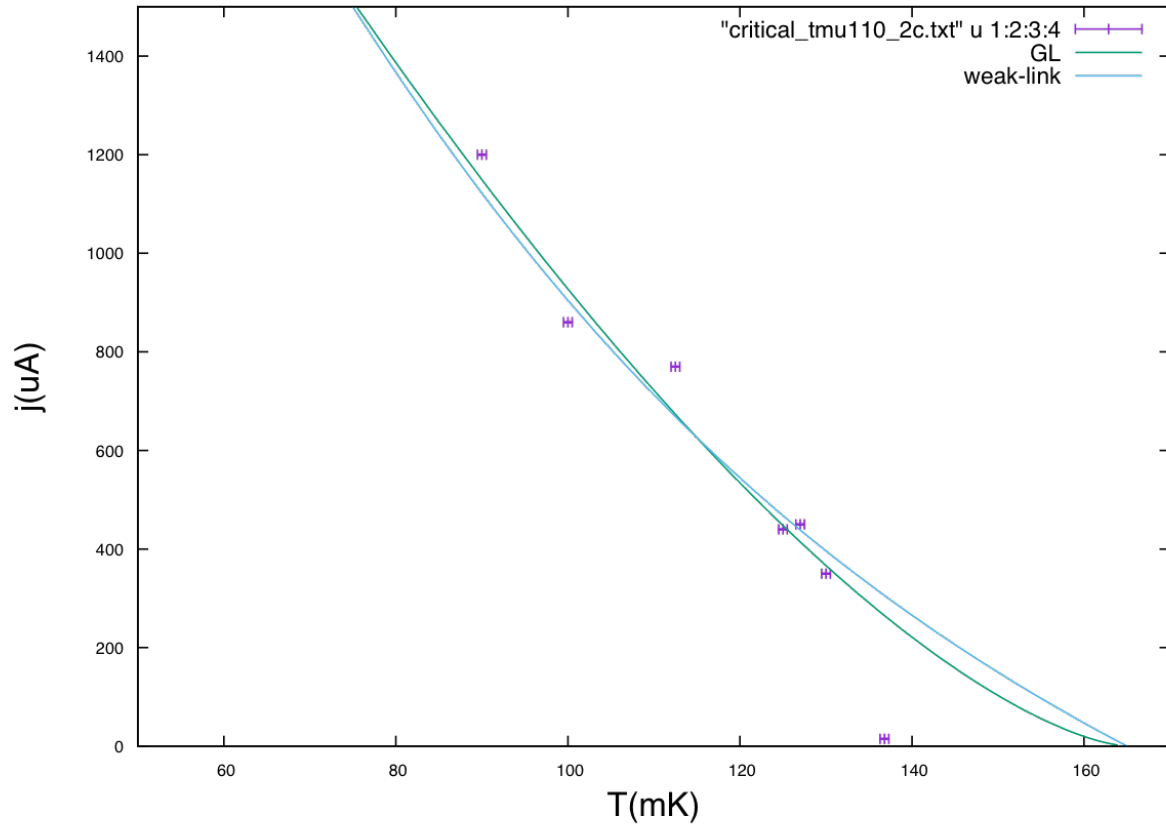


図 5: 測定結果のプロット。青い曲線が弱結合あり、緑の曲線が弱結合なしの時の臨界電流の温度依存性を示す。

Reference

- [1] T. Ohashi, et al. 2015, SPIE
- [2] 低温工学協会 1993, オーム社
- [3] 松葉博則 1997, 東京電機大学出版局
- [4] 黒丸巖静 2015, 卒業論文, 首都大学東京