



TES マイクロカロリメータ

岡田 信二
理化学研究所

TES とは、Transition Edge Sensor (超伝導転移端センサー) の略称で、極低温技術を応用した検出器のひとつです [1]。その名の通り、超伝導から常伝導への相転移における急激な抵抗変化を利用し、微量な温度変化を高感度に測定する熱量計 (マイクロカロリメータ) です。TES マイクロカロリメータは、0.1 K という極低温で動作させるため超低雑音を実現し、極めて優れたエネルギー分解能を備え、熱に変換可能なあらゆる種類の粒子に感度を持ちます。このため応用範囲は大変広く、近赤外光から X 線・ γ 線までの単一光子検出器としてだけでなく、TES をアンテナと結合しその終端抵抗熱を測定することでマイクロ波検出用ボロメータとしても広く利用されています。本測定技術は近年急速な発展を遂げており、宇宙マイクロ波背景放射 B モード偏光測定 [2] や X 線天文衛星への搭載 [3] といった宇宙天文分野、放射光施設における物質科学分野 [4]、ハドロンビームを用いた原子核物理分野 [5, 6] など、幅広い領域で注目を集めています。

図 1 に単一光子検出器としての TES の動作原理を示します。通常、入射光子を効率よく熱化する為の吸収体を取り付け、熱化による温度変化を TES 素子 (超伝導薄膜) により検出します。TES の温度は、まず超伝導転移温度以下 (熱浴の温度 T_b) まで下げた後、定電圧バイアスをかけジュール熱により超伝導転移端の動作点 T_{op} に保持します。入射粒子により生じた僅かな温度上昇は、急激な抵抗の増加を引き起こします。これに伴う電流の減少を SQUID (超伝導量子干渉素子) 電流計により計測することで、入射粒子のエネルギー損失を導出することができます。一方、この電流の減少は、ジュール発熱を減らす為、自ら温度を下げて元の動作点 T_{op} へと戻そうとします。これが電熱フィードバックと呼ばれる、TES を超伝導転移温度に保持し続ける仕掛けです。

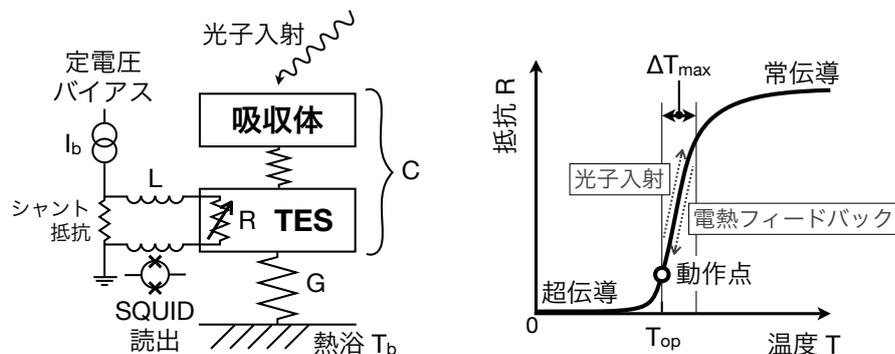


図 1: TES 動作原理

TESの抵抗温度計としての感度を、抵抗 R の温度 T に対する変化率 $\alpha \equiv \delta \ln R / \delta \ln T$ と定義すると、エネルギー分解能 ΔE (FWHM)は、ボルツマン定数 k_b 、転移温度 T_c 、吸収体とTESの熱容量の和 C を用いて、 $\Delta E = 2\sqrt{2 \ln 2} \cdot \sqrt{k_b T_c^2 C / \alpha}$ と表されます。入射エネルギー E に対して $\Delta E / E < 10^{-3}$ を達成しており、様々なエネルギー領域において、最高分解能 $\Delta E = 0.9$ eV (@1.6 keV)[7]、1.6 eV (@5.9 keV)[8]、22 eV (@97.4 keV)[9]を実現しています。従来の半導体検出器(シリコン検出器・Ge検出器)と比べ1~2桁優れ、波長分散型クリスタル分光器にも匹敵する分解能を誇ります。動作温度領域は、図1の線形領域 ΔT_{max} (数mK程度)のため、測定最大エネルギーは $E_{max} \propto CT_{op} / \alpha$ と表され、測定エネルギー領域に応じて最適化します。信号の時定数 τ は、熱浴との熱伝導率 G とすると $\tau \propto C / G$ に比例し、200 $\mu s \sim 1$ ms程度が一般的です。

一方、TES 1素子受光面の典型的なサイズは、0.1 mm²(X線用)[4]、2 mm²(γ 線用)[10]と小さい為、多素子化による有効面積の増加が重要な課題です。ここで鍵となるのが、極低温部への熱流入を極力抑えるため、少ないケーブル数で多数の信号を同時に読み出す多重読出技術の開発です。時間領域や周波数領域における様々な多重化読出技術の開発が進む中、最近、時分割式多重読出(TDM)という方式で、200素子超のX・ γ 線検出システムが利用可能となってきました[4, 10]。この多素子化による有効面積の拡大や、TESの広いエネルギー範囲への可用性は、他の高分解能分光器との比較において、多方面への応用の可能性を広げる魅力的な利点です。

原子核ハドロン実験分野に於けるTES初応用実験として、K中間子原子X線精密分光実験(J-PARC E62)[6]の準備が進められています。これに先駆けて行われた π 中間子原子X線分光実験では、1.5 MHzの高計数率 π ビーム環境下にて、TDM読出方式による240素子TESアレイ(有効面積23 mm²)を動作させることに成功しました。エネルギー分解能 $\Delta E = 6.8$ eV @ 6.4 keV、時間分解能1.2 μsec を達成し、 π -¹²C $4f \rightarrow 3d$ 遷移エネルギーを0.1 eV以下の高精度精度決定することで、ハドロンビームによる高精度X線分光実験の実現可能性が示されました[5]。

現在、1000素子以上のTES読出しを可能にする次世代多素子読出として、数GHzのマイクロ波帯を用いた周波数多重読出の技術開発が、日本を含む世界各国でしのぎを削っています。今後、更なる多素子化によって、原子核研究を含むより多彩な学術研究における活躍が期待されます。

参考文献

- [1] K.D. Irwin and G.C. Hilton, "Transition-Edge Sensors", C. Enss (ed.), Cryogenic Particle Detection, Topics in Applied Physics, vol. **99**, Springer, 2005
- [2] M. Hazumi et al., Proc. SPIE **8442** (2012) 844219
- [3] S. Yamada et al., J. Low Temp. Phys., **184** (2016) 688
- [4] W.D. Doriese et al., Review of Scientific Instruments **88** (2017) 053108
- [5] S. Okada et al., Prog. Theor. Exp. Phys. **2016**, 091D01
- [6] J-PARC E62 (Precision Spectroscopy of Kaonic Atom X-rays with TES) : http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1507/pdf/P62_2015-6.pdf
- [7] S. R. Bandler et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 2100705
- [8] S. Smith et al., J. Low Temp. Phys. **167** (2012) 168
- [9] M. K. Bacrania et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **56** (2009) 2299
- [10] D. A. Bennet et al., Rev. Sci. Instrum. **83** (2012) 093113