



熱量計測を応用した光子検出器

満田和久

(受取日：2001年11月15日，受理日：2001年12月4日)

Calorimetry Photon Detectors

Kazuhisa Mitsuda

(Received November 15, 2001; Accepted December 4, 2001)

Energy-dispersive photon detection with quantum microcalorimeters are reviewed emphasis with on the Transition Edge Sensor (TES) microcalorimeters. At X-ray wavelengths, these detectors realize high energy resolution and high quantum efficiency at the same time, and thus are very useful for observations of very weak cosmic X-rays. The signal response and the noise of the detectors are discussed. We show that they can detect photons of wide energy ranges; from infra-red to hard X-rays.

1. はじめに

可視光やX線などの光子から電子線や α 線のような荷電粒子，さらに中性子やexoticや素粒子など電磁相互作用をしない粒子まで，物質となんらかの相互作用をすれば，そのエネルギーは最終的に熱に変換される。したがって，熱量測定という方法を用いればあらゆる種類の放射に感度を持つ検出器が実現可能なはずである。しかも，それを0.1 K程度の極低温に冷却すれば，他の手段では到達できない超低雑音をも実現できる。

熱測定を利用した光・放射線検出器は，歴史的には赤外線検出器（赤外線ボロメータ）から始まった。特に遠赤外線領域では半導体検出器を用いることが困難であるためボロメータが唯一の高感度検出器となっている。たとえば，室温で動作する遠赤外線カメラ用画素として 256×256 の画素を持つ赤外線ボロメータ素子がすでに実用化されている。¹⁾一方，この波長域は，宇宙観測においても重要な波長帯であり，検出器を0.3 K程度の極低温まで冷却した超高感度赤外線ボロメータが実用化されている。

これらの赤外線ボロメータは，検出器に入射する赤外線のエネルギー流量を測定しているのであって，一つ一つの

赤外線光子を区別して検出しているわけではない。これに対して，一つ一つの光子や素粒子がもたらしたエネルギー量子を一つ一つ測定するのが量子マイクロカロリメータ（Quantum microcalorimeter，以下マイクロカロリメータ，または単にカロリメータと記す）である。光子検出器としてのマイクロカロリメータは，まず，高いエネルギー分解能を持つX線分光検出器として研究され，半導体検出器にくらべると数10倍優れたエネルギー分解能をもつ検出器が実現されている。²⁾最近では，その応用範囲は近赤外線光子から硬X線光子にまでひろがりつつある。

以下では，まず，マイクロカロリメータの動作原理とX線分光検出器の現状を概観した後，マイクロカロリメータの動作と雑音について少し詳しく議論する。次に，超電導遷移端を温度計に利用したTransition Edge Sensor (TES) 型カロリメータの製作方法と信号の読み出しの実際について，我々の実験に基づいて解説する。最後に，今後のマイクロカロリメータの可能性として，近赤外線から硬X線までの広い波長への応用について議論する。なお，exoticな素粒子探査への応用についての解説記事が藁輪先生により1992年に本誌に書かれているのでそちらも参照されたい。³⁾

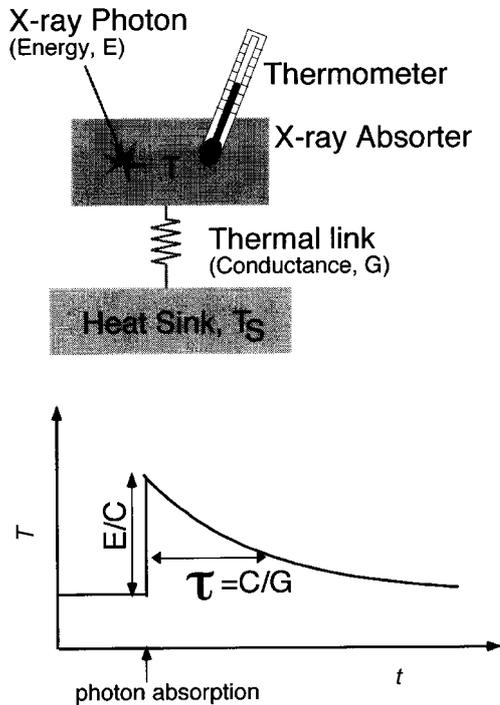


Fig.1 Schematic diagrams of a quantum microcalorimeter (top) and its response to a photon absorption (b). The calorimeter consists of an X-ray (photon) absorber, a thermometer, and a thermal link to a heat sink. The temperature of the X-ray absorber increases when it absorbs a photon, and then the temperature goes back to the equilibrium value.

2. マイクロカロリメータとエネルギー分解能

2.1 マイクロカロリメータの原理

Fig.1に、マイクロカロリメータの概念図を示した。マイクロカロリメータの主な構成要素は、光子を吸収する吸収体、熱浴、これらを結ぶ細い熱リンク、温度変化を測定する温度計である。吸収体がエネルギー E の光子を吸収すると $\Delta T = E/C$ だけ温度が上昇し、その後、 $\tau = C/G$ の時定数で元の温度に戻る。ここで C と G はそれぞれ、温度計を含めたカロリメータ素子の熱容量と熱リンクの熱伝導度である。したがって、温度上昇 ΔT を計れば、光子のエネルギーを測定できる。この時、温度測定の精度は、熱リンクを通してランダムに熱が入り出すことによって生じる素子の温度揺らぎ（一般に phonon noise と呼ばれる）で原理的には決まってしまう。その大きさは以下のように直感的に見積もることができる。⁴⁾ 温度 T の物質中の phonon の平均のエネ

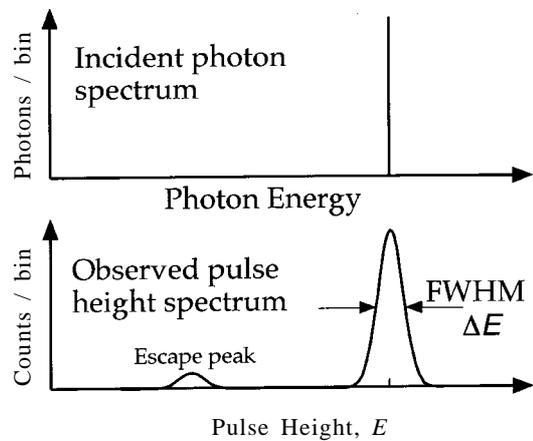


Fig.2 Typical response of X-ray detectors. Even if the incident photon spectrum is monochromatic (top), the pulse height spectrum obtained with an energy dispersive X-ray detector has a finite width (bottom). The energy resolution is often measured with the full width half maximum (FWHM) of the distribution.

ルギー ϵ はボルツマン定数を k とすれば、 $\epsilon = kT$ である。一方、熱容量 C の物質の持つ全熱エネルギーは CT であるので、平均の phonon の数 N は、 $N = CT/kT = C/k$ である。phonon の数の揺らぎはポアソン分布に従うので、その分散は $\sigma(N) = \sqrt{C/k}$ である。これから、温度の分散は $\sigma(T) = \sigma(N)kT/C$ 、エネルギー推定の誤差（つまりエネルギー分解能）は $\sigma(E) = \sigma(N)kT = \sqrt{kT^2 C}$ とそれぞれ見積もられる（実は、検出器の動作を考慮すると分解能はこの見積もりよりも1桁以上改善可能である。このことは後で詳しく議論する）。ここで、物質の熱容量は低温では温度に強く依存することに注意が必要である。熱容量として、格子比熱と電子比熱を考えると、 C はそれぞれ T^3 および T^1 に比例する。したがって、エネルギー分解能は温度の $5/2$ から $3/2$ 乗に比例する。したがって、温度を下げればエネルギー分解能は急激に改善するはずである。しかし、実際の動作温度は、十分に高い感度を持った温度計が実現可能な範囲に限定され、通常 100 mK 程度である。たとえば、 1 mm^2 の面積と $10 \mu\text{m}$ の厚さのシリコン片を考えると、 100 mK で、 $C \sim 1 \text{ pJ K}^{-1}$ 程度が実現できる。したがって、エネルギー分解能は、

$$\Delta E = 2.36 \sqrt{kT^2 C} = 4 \text{ eV} \left(\frac{T}{100 \text{ mK}} \right) \left(\frac{C}{1 \text{ pJ K}^{-1}} \right)^{1/2} \quad (1)$$

が期待できる。ここで、 ΔE は、検出器のエネルギー分解能を半値幅で定義したもので (Fig.2 参照)、 $\Delta E = 2 \sqrt{2 \ln 2} \sigma(E) = 2.36 \sigma(E)$ である。

2.2 マイクロカロリメータはなぜ必要か

宇宙観測や地上の蛍光X線分析装置では、半導体検出器が分光検出器としてしばしば用いられる。半導体検出器のエネルギー分解能は、120から200 eV程度であるので、式(1)からマイクロカロリメータでは、これよりも一桁以上優れた分解能が実現可能である。この分解能の差を実感するためにFig.3に、温度が5千万度で、様々な元素を太陽系近傍の平均の組成と同じ割合で含む高温プラズマからのX線放射を、半導体検出器に相当する120 eV、現在のマイクロカロリメータの12 eV、次世代のマイクロカロリメータの1 eVのそれぞれの分解能で観測した時に期待されるエネルギースペクトルを示した。このような高温プラズマは、たとえば、銀河団や超新星残骸などに観測される。銀河団は可視光で観測すると数100の銀河が数100万光年の大きさの空間に集まっている系である。しかし、X線で観測すると全体がX線で輝いており、この空間が太陽質量の 10^{13} 倍の数千度の高温プラズマで満たされていることがわかる。このようなプラズマからは異なるイオン化状態にある様々な元素からのスペクトル線が放射されている。しかし、半導体検出器では個々の輝線を分解できないだけでなく、多くの輝線を検出することすらできない。微量な元素を検出し、その量やイオン化状態を調べるには、10 eV程度の分解能が必要である。これは、宇宙空間のプラズマ観測だけでなく、地上の分析装置にもあてはまる。また、10 eV程度の分解能になると、輝線の微細構造を分離できるようになる。これによって、プラズマの密度など、100 eVの分解能では得ることのできない質的に異なる情報もたらされ、さらに輝線のドップラー効果を利用して数100 km s^{-1} 程度の運動まで検出できるようになる。たとえば、銀河団は銀河団同士が数100 km s^{-1} の相対速度で衝突し、合体することで進化すると考えられているが、10 eV分解能の観測は、銀河団のダイナミックな進化の姿を明らかにするであろう。グレーティングやブラッグ結晶格子などの分散系の分光器を用いれば、10 eV程度のエネルギー分解能は実現可能である。しかし、分散系分光器では検出効率が1%程度しか得られない。またX線は平行光である必要がある。これに対し、マイクロカロリメータでは100%に近い効率が実現でき、X線の到来方向にはあまり敏感ではない。これらは、地上実験でも利点となるが、1000秒に1個しか光子が来ないような極端に微弱なX線や、銀河団のように空間的に広がったX線源を観測する宇宙X線観測にとっては決定的に重要な要素である。

2.3 3種のマイクロカロリメータ

これまでにX線分光検出器として動作している量子マイクロカロリメータは、半導体型カロリメータ、TES型カロリメータ、磁気カロリメータの3種類に分類することがで

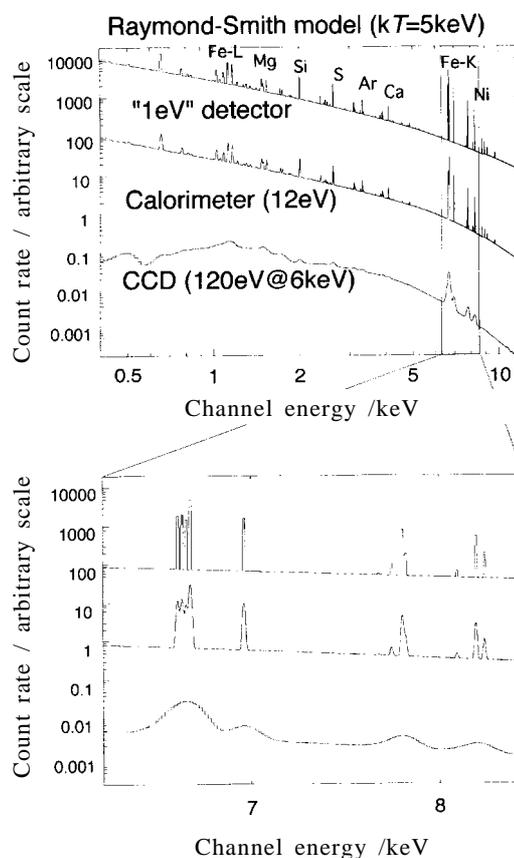


Fig.3 Simulation spectra of X-ray emission from hot plasma of a temperature of about 5×10^7 K containing heavy elements of the solar abundance, such as silicon, sulphur, iron. The model spectrum was convolved with the response function of three X-ray detectors of different energy resolutions. Emission lines and their fine structures (see the bottom panel) from ionized atoms can be clearly resolved with microcalorimeters.

きる。歴史的にはこの順番に研究が進んできた。X線マイクロカロリメータとして初めに実用化されたのが半導体型カロリメータである。半導体中に大量($\sim 10^{20} \text{cc}^{-1}$)の不純物をドーピングすることで低温で動作するサーミスターを実現する。シリコンにホウ素やヒ素などをイオン打ち込み装置でドーピングしたシリコン温度計と、ゲルマニウムに中性子を照射し核反応を起こさせ不純物を生成したNTD(Neutron Transmutation Doping)ゲルマニウム温度計が代表的である。X線天文衛星Astro-E2に搭載されるX線マイクロカロリメータではシリコン温度計を利用している。⁵⁾我々は、

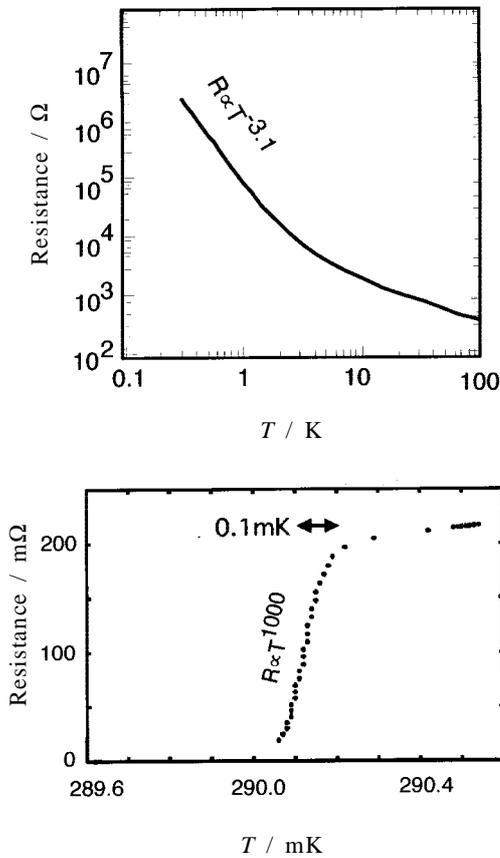


Fig.4 Examples of the Resistance-Temperature curve of the heavily-doped Si thermometer (top) and the Ti-Au TES (bottom). The sensitivity of the thermometer defined by the power-law index of the R-T curve is typically 3 for Si thermometers, while it can be as high as 1000 for TES.

2000年2月にロケットの不調により軌道投入に失敗で失われたAstro-E衛星の後継機として、Astro-E2衛星準備を現在すすめている。この衛星に搭載するのは、0.6 mm角のマイクロカロリメータが32個並んだアレイ状素子で、5.9 keVのX線に対して半値幅10 eVのエネルギー分解能を達成する。

これに対し、TES型カロリメータは、超伝導体の超伝導から常伝導へ遷移に伴う急激な温度変化を利用し、温度計の感度を向上したものである。これによって高いエネルギー分解能が得られると同時に応答が速くなる。超伝導遷移端を温度計に用いる考え方自体は古くからあったが、後に述べる強い電熱フィードバックが1995年に提唱され、⁶⁾ TES型カロリメータの開発が急激に進んだ。TESカロリメ

ータの登場によって、地上の分析装置としてもカロリメータが注目されるようになったが、毎秒1000カウント以上のX線カウントレートに耐える応答の速さもその魅力の一つである。⁷⁾ マイクロカロリメータの分解能は、素子の大きさ(面積と厚み。厚みはX線の検出効率を決定する)に左右されるので、エネルギー分解能を単純に比較するのは危険であるが、オランダ宇宙研究機構(SRON: Space Research Organization of the Netherlands)が開発した0.3 mm角の素子の5.9 eVのX線に対して半値幅4.3 eVの分解能が2001年夏の時点での世界最高記録である。⁸⁾

磁化を利用した磁気カロリメータの開発は、ドイツのハイデルベルク大学とアメリカのブラウン大学の共同研究により、最近急速にすすんでいる。0.1 mm角の素子で、5.9 keVに対し12 eVの分解能が得られている。⁹⁾

3. マイクロカロリメータの動作と雑音

3.1 温度計と温度計感度

前節で述べた3種のカロリメータの違いは、温度変化を感知する温度計の違いである。この中で、半導体型カロリメータとTES型カロリメータは抵抗の温度変化を利用しているので、その動作は数学的には全く同等に扱うことができる。そこで、この節ではこれらの二つのカロリメータについて詳しく述べる。

TES型カロリメータは、超伝導薄膜の超伝導から常伝導へ遷移に伴う急激な温度変化を利用することで、半導体型カロリメータに比べて温度計の感度を大幅に向上した。ここで、抵抗温度計の感度は、抵抗(R)の温度(T)に対する変化率の大きさ $\alpha = d \ln R / d \ln T$ によって定義する。Fig.4に、我々が製作したシリコン温度計とTES温度計のR-T特性の例を示す。半導体の場合は、 α の符号は負で、最も感度の高いものでも、 $\alpha = -3$ 程度である。これに対し、TES温度計では、 α は正で、 $\alpha \sim 1000$ を得ることが可能である。

3.2 信号の読み出しと電熱フィードバック

TES温度計の動作温度範囲は、超伝導遷移端の幅、つまり1 mK以下しかない。どうやって、この狭い温度範囲に温度を制御するのであろうか? その答えは、電熱フィードバック(Electro-Thermal Feedback)にある。温度計の抵抗変化を読み出すためには、温度計に電流を流す必要がある。この電流はジュール発熱を伴うので、カロリメータ素子は熱浴よりも高い温度で動作している(Fig.5)。この電流の流し方として、半導体カロリメータでは定電流バイアスを加え、電圧によって抵抗変化を読み出す。TES型カロリメータでは定電圧バイアスを加え、電流により抵抗変化を読み出す(Fig.6)。このようにすると電熱フィードバックがかかる。たとえば、なんらかの外乱(たとえばX線光子の吸収)により、カロリメータの温度が少し上昇した場合を

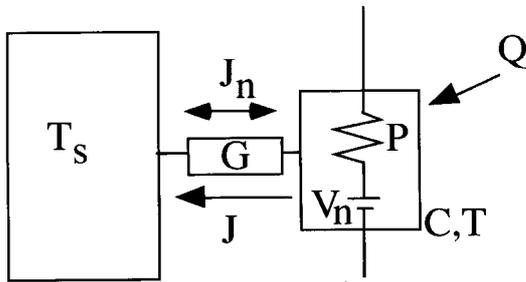


Fig.5 Thermal diagram of a calorimeter in operation. The Joule heat dissipation, P , and the heat flow, J , through the thermal link, G is balanced in equilibrium, i.e. $P = G(T - T_s)$. J_n and V_n are respectively the random heat flow between the thermal link (i.e. the phonon noise) and the random voltage arising from the thermal noise of the thermometer resistance (i.e. the Johnson noise). Q is the heat input by X-ray photons.

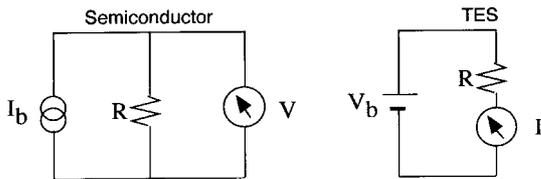


Fig.6 Bias and signal readout schemes for semiconductor (left) and TES (right) calorimeters. Semi-conductor calorimeter is usually biased with a constant current and the voltage is measured using a JFET follower amplifier. TES is biased with a constant voltage and the current is measured with a SQUID current meter. When biased according to those schemes, the calorimeter temperatures are stabilized at the bias point with the electro-thermal feedback.

考えよう。温度上昇で抵抗値が変化しますが、このようにバイアスしておくで、どちらの場合も抵抗変化でジュール発熱は減少する。つまり温度を下げて、もとに戻そうとするのである。これが、電熱フィードバックである。TES型カロリメータでは、抵抗の温度変化率が大きいために、強いフィードバックがかかる。これによって、ある適当な動作条件では、素子の温度は自動的に超伝導遷移端上に保たれる。実際の素子の動作の様子を5.2節で示す。電熱フィードバックは、動作を安定化するだけでなくX線に対する信号の応答速度も速くする。これは電子回路において増幅器に負のフィードバックをかけると周波数帯域が広がることと、

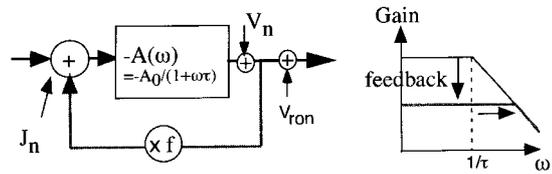


Fig.7 Analogy of the electro-thermal feedback of microcalorimeter and the negative feedback of an electric amplifier. The negative feedback expands the frequency range. J_n , V_n , and V_{ron} are respectively the phonon noise, the Johnson noise, and the readout noise.

よく似ている (Fig.7) 電熱フィードバックを考慮すると、信号の時定数は、

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{1}{1 + L_0} \frac{C}{G} \quad (2)$$

となる。ここで、 L_0 は、電熱フィードバックの全ループゲイン (のDC成分) である。Fig.7の回路と対応させると、 $L_0 = A_0 f$ である。実際のカロリメータでは、定常状態のジュール発熱量を P とすると $L_0 = |\alpha| P / GT$ である。熱浴の温度がカロリメータの動作温度に比べて十分に低いと、熱リンクを流れる熱は $\sim GT$ であり、これは、ジュール発熱 P とつり合っている。したがって、 $L_0 \sim |\alpha|$ である。したがって、信号の時定数は $|\alpha|$ に反比例し短くなる。典型的な TES カロリメータでは、

$$\tau_{\text{eff}} = 5 \mu\text{s} \left(\frac{C}{1 \text{ pJ K}^{-1}} \right) \left(\frac{G}{\ln \text{ W K}^{-1}} \right)^{-1} \left(\frac{\alpha}{1000} \right)^{-1} \quad (3)$$

となり、信号は半導体型にくらべると数100倍速くなる。

3.3 雑音とエネルギー分解能

半導体・TESカロリメータには、原理的に避けられない3つの雑音が存在する。熱リンクを通して熱がランダムに流れ発生する温度揺らぎ (2章のphonon noise)、温度計の抵抗に発生する電気的な熱雑音 (Johnson noise)、そして電圧/電流を計測する素子の発生する雑音 (readout noise) である。これらが与える影響は、Fig.7に示す電熱フィードバックの等価回路で考えるとわかりやすい。phonon noiseは熱の流れとしてX線信号と同じように“オペアンプ”に入力される。これに対し、Johnson noiseは“オペアンプ”の出力のところに雑音を発生し出力に現れ、同時にフィードバックループを通して入力に戻る。readout noiseは出力信号に単純に加算される。この結果、phonon noiseとJohnson noiseはもともと白色雑音であるが、“回路系”の

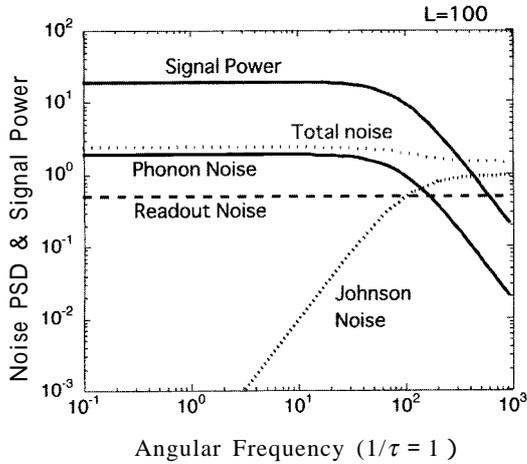


Fig.8 Power spectrum densities of calorimeter noise components and signal frequency response for an ideal calorimeter. The sensitivity of the thermometer, α is set to ~ 100 , thus the frequency range of the calorimeter is extended by a factor of 100 from the thermal time constant, $\tau = C/G$.

周波数応答の影響を受ける。Fig.8に典型的なカロリメータの動作パラメータを仮定して雑音のパワースペクトル密度と、信号の周波数応答を計算した例を示した。phonon noiseのスペクトル密度は、信号の周波数応答と同じ形をしていて、“回路系”が応答できない周波数帯では急激に小さくなる。これに対して、Johnson noiseのフィードバックループを回った成分と直接出力に現れる成分は互いに打ち消しあうので回路系が応答する周波数帯域では逆に小さくなる。読み出し装置として低雑音のJFET（半導体型の場合）やSQUID（TES型の場合、SQUIDについては後述する）を用いるとreadout noiseは、phonon noiseとJohnson noiseの和よりもこの図に示すように小さくすることが可能である。

X線光子が吸収されると電圧/電流変化のパルスが生じる。これを、一つ一つ検出し、その高さからX線のエネルギーを推定する。この際、適切な周波数フィルターを適用することによってより高いエネルギー分解能を得ることができる。最適なフィルターとは、S/N比の大きな周波数帯域のみを取り出すものである。この時、X線光子のエネルギー決定のS/N比は、この周波数帯域でのS/N比と周波数幅だけで決まるであろう。有効な信号が存在する周波数帯域では、雑音はphonon noiseが支配的である。そのパワースペクトル密度は、温度が T 、熱リンクの熱伝導度が G の時、 kT^2G [$W^2 \text{ Hz}^{-1}$]と書くことができる。一方、有効な周波数帯域幅は $1/\tau_{\text{eff}}$ である。エネルギー分解能を表す半値幅 ΔE はS/N比を帯域幅で積分したものの逆数で表わされる

ので、

$$\Delta E = 2.36 \sqrt{kT^2G \times \frac{1}{1+L_0} \frac{C}{G}} = 2.36 \sqrt{\frac{kT^2C}{1+L_0}} \approx 2.36 \frac{\sqrt{kT^2C}}{|\alpha|} = 0.1 \text{ eV} \left(\frac{T}{100 \text{ mK}} \right) \left(\frac{C}{1 \text{ pJ K}^{-1}} \right)^{0.5} \left(\frac{\alpha}{1000} \right)^{0.5} \quad (5)$$

と見積もることができる。最後の等号のところでは $|\alpha| = 1$ を仮定した。この式は、Johnson noiseもいれて厳密に計算した式と、 1 のオーダーの定数を除いて一致する。この式には、 $1/|\alpha|$ に比例する項が、式(1)に対する補正項としてはいつている。半導体カロリメータでは $\alpha \sim 3$ であるので、補正項は1のオーダーである。しかし、TESカロリメータでは $\alpha \sim 1000$ なので、補正項は0.03程度になる。以上の議論で、単位周波数当たりのS/N比は、 α にはよらないことに注意して欲しい。つまり、応答が速くなり周波数帯域が広がったことにより分解能が改善するのである。

4. 磁気カロリメータ

磁気カロリメータは、常磁性体に外部磁場を印加し、その時の磁化の大きさが温度に依存することを利用して温度計とする。温度計の感度、 $\alpha = d \ln M / d \ln T$ は、 -1 程度であるので、TESのような感度の高い温度計というわけではない。しかし、温度計のJohnson noiseが存在しないこと、SQUIDを磁気センサーとして使用することによってreadout noiseをphonon noiseに比べて小さくできること、の2つの利点により高いエネルギー分解能が期待できる。カロリメータの雑音としてphonon noiseのみ存在する場合には、前節で単位周波数当たりのS/N比は周波数に依存しないことを示した。磁気カロリメータの場合SQUIDの雑音が無視できる限りS/N比は一定なので、有効な周波数帯域は信号の定数よりも高周波に伸び、読み出し回路系やX線エネルギーが熱に変換する時間スケールなどで決まる信号の立ち上がり時間 τ_{rise} によって決定される。前章の議論と同様にしてエネルギー分解能を見積もると、

$$\Delta E = \sqrt{kT^2G \times \tau_{\text{rise}}} = \sqrt{kT^2C \times (\tau_{\text{rise}}/\tau)} \quad (6)$$

となる。電熱フィードバックはないので、信号のdecay timeは熱的な時間、 $\tau = C/G$ である。信号の立ち上がり時間をdecay timeの1/1000程度にすることができれば、TESマイクロカロリメータと同様なエネルギー分解能が得られることになる。磁気カロリメータの研究の当初は立ち上がり時間が1秒程度になってしまい、分解能が得られていなかった。しかし、最近、金にErなどの磁性原子を数100 nm程度ドーブしたものを磁性体として利用することで、1 μm 秒程度の立ち上がり時間が得られるようになった。これ

によって、急速にエネルギー分解能が改善している。9)

5. TES カロリメータの製作と動作の実際

我々*は、4年前前にTES型マイクロカロリメータの研究を開始した。10)それから、最初のX線信号が出るまでに1年を要し、その時のエネルギー分解能(半値幅)は約2000 eVであった。その後、改良を重ねて、現在は38 eVが得られているが、まだ本来期待される分解能とは一桁の開きがある。現在、エネルギー分解能を改善するための研究をすすめているが、これと並行して、1000個程度の画素を持つ撮像型のカロリメータアレイの素子製作と信号処理方法の基礎研究も行っている。この章では、カロリメータ製作の実例として、我々のカロリメータの製作方法とX線信号を読み出す実験装置を紹介したい。

5.1 操作方法

X線吸収体・温度計・熱リンクのカロリメータの構成要素は、シリコン基板上に3次元マイクロマシニングプロセスによって製作する。現在、熱リンクとして太さ20 μm 長さ0.5から1 mmのシリコンビーム構造を用いた素子と、厚さ1 μm程度のシリコン窒化膜を用いた構造の2種類の素子を製作している。Fig.9, Fig.10に、カロリメータの素子の構造と試作した素子の例を示した。素子の製作手順は以下の通りである。まず最初に、最終的にシリコンを完全に取りさる部分を表側から40 μm程度RIE (reactive ion etching)により削り取る。続いてTESとなるチタンと金の2層の薄膜とアルミまたはニオブの配線を電子ビーム蒸着またはスパッターとエッチングプロセスにより表側に形成する。続いて、その上にX線吸収体を形成し、最後に熱リンクを残すように裏側からシリコンを削り取る。シリコンビーム方式のカロリメータは、主に早稲田大学において同大学のプロセス装置を用いて製作している。一方、窒化膜方式はセイコーインスツルメンツ社が製作している。我々はTESの素材としてチタンと金の2層の薄膜を張り合わせたいわゆるbilayerを採用している。チタンの超伝導遷移温度はバルクの状態では390 mK、薄膜状態では通常500 mK程度である。これに、金のような常伝導金属の薄膜を張り合わせると、二つの層の電子の波動関数が混ざりあう近接効果によって遷移温度が下がる。理想的には二つの薄膜の厚さを調整することによって500 mK以下の任意の温度に超伝導遷移温度を制御することができるはずである。しかし、実際には、チタンと金の界面の状態、チタンの不純物や内部応

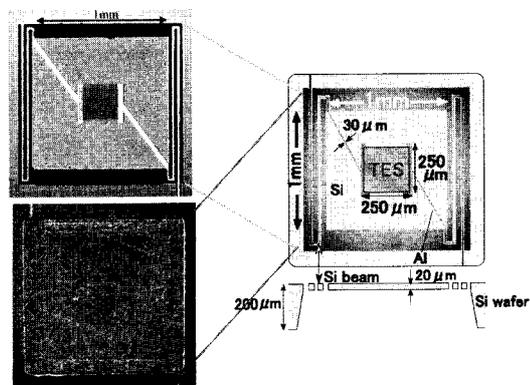


Fig.9 Schematic view (right) and photographs (left) of a calorimeter made on a bulk silicon wafer. A silicon diaphragm of 1 mm² area and 20 μm thickness is supported by two thin zigzag silicon beam supports. The TES and the aluminum electrode are found in the top left photograph, while they are covered by the tin X-ray absorber of the mushroom shape and ~ 10 μm thickness for the left bottom photograph.

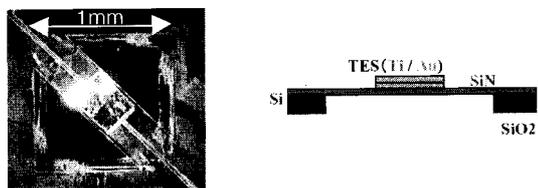


Fig.10 Schematic view and photographs of a calorimeter made on a SiN membrane. The TES is deposited on the SiN membrane of 1 μm thickness which has a bridge-like structure.

力といった様々な要素で遷移温度は影響を受ける。我々はこれまで、TESの転移温度を安定に制御することに多くの時間を費やした。ようやく最近になって安定に100 mK遷移温度を得ることができるようになってきた。転移温度がなかなか下がらなかったことが、まだ十分に高いエネルギー分解能が得られていない原因の一つである。Fig.9左下の素子では、X線吸収体を電析(メッキ)プロセスで製作している。これは、我々が撮像型の大規模マイクロカロリメータアレイ実現のために開発している全く新しい手法である。これまででは、X線吸収体は手作業でエポキシを使って張り付けるか、蒸着によりつけるか、どちらかであった。しかし、前者の方法では大規模アレイの実現は不可能であ

*)宇宙科学研究所 満田研究室, 早稲田大学 庄子研究室・本間研究室, 東京都立大学 大橋研究室。セイコーインスツルメンツ社と三菱重工業社の協力を得ている。

る。後者の方法でX線吸収体としての十分な厚み(たとえば10 μm)を成膜することが難しく、高い検出効率を実現できない。これに対し、電析(メッキ)プロセスなら10 μm程度の厚みは容易に得られ、マイクロマシンプロセスの中で製作可能である。また、Fig.9写真の吸収体はキノコ状の立体構造を持っている。写真は、キノコの笠を真上から見た場合に相当しており、X線吸収体は裏側のキノコの軸に相当する部分でTESだけに接触している。これによって、熱をTESにのみ伝達しつつ、大きな開口効率で受光面を覆うことができる。

5.2 測定系

TES薄膜の典型的な常伝導抵抗値は100 mΩ、動作点の抵抗値は10 mΩである。電気抵抗Eの抵抗体が温度rで発生する熱雑音電流のパワースペクトル密度は、

$$P_{\text{Johnson}} = \frac{4kT}{R} = 2 \times 10^{-11} \left(\frac{T}{0.1 \text{ K}} \right)^{1/2} \left(\frac{R}{0.01 \text{ W}} \right)^{-1/2} \frac{\text{A}}{\text{Hz}} \quad (9)$$

である。そこで、TESの動作抵抗に比べて十分に入力インピーダンスが低く、雑音レベルが式(9)よりも低い電流計が必要である。SQUID(超伝導量子干渉素子)を利用した電流計はこの条件を満足する。DC-SQUIDは、超伝導リングの途中に二つの絶縁接合(Josephson Junction)を持つ素子である。¹¹⁾超伝導リングを貫く磁束によってリングの電流-電圧特性が変化する。これを利用して高感度な磁束センサーができる。これに、超伝導配線を用いた入力コイルを接続して電流を磁場に変換することで、DC的な入力インピーダンスが0の高感度かつ高速な電流計ができる。SQUIDを実際に利用する際には、SQUID自身の能力に比べて信号処理を行う室温回路の性能が追いつかないのが現状である。たとえば脳磁場計測等に用いられるDC-SQUIDシステムの場合は、周波数帯域を犠牲にして低雑音を達成しているため、周波数帯域は10 kHz程度である。TESカロリメータの時定数(式(3))を考えると、これでは不足である。そこで、100個程度のSQUIDを直列に接続し増幅機能をもたせた直列SQUIDアレイ増幅器が開発された(Fig.11)。これによって室温回路の負担が軽くなり、1 MHz近くまで帯域を広げることが可能になった。宇宙研ではセイコーインスツルメンツ社が開発したシステムを使用しているが、 $2 \times 10^{-12} \text{ A Hz}^{-1/2}$ の雑音レベルと、500 kHzの周波数帯域を達成している。この性能を達成するには、配線やSQUIDの磁気シールドに細心の注意が必要である。宇宙研で、この雑音をレベル達成するまでに1年以上の時間を要した。

TES型カロリメータは、定電圧バイアスする。これはFig.11に示すようにTESの動作点での抵抗値の1/10程度の

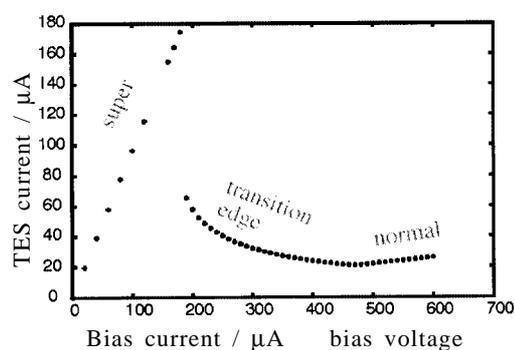
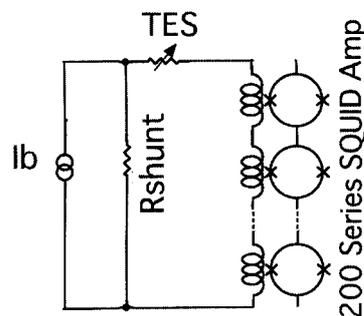


Fig.11 Realistic bias circuit for a TES calorimeter (top) and an example of the I-V curve (bottom). Constant-voltage bias is approximately realized by the constant bias current and the shunt register. When the bias current gradually increases from zero, first all the bias current goes through the TES because the TES is a superconductor. At some point, the current jumps and starts decreasing. In this range, the Joule dissipation of the TES is kept approximately constant, which means the TES is kept on the transition edge. The current starts increasing again at some point. Here the TES is a normal resistor.

抵抗値のシャント抵抗を並列に入れ、ここに定電流バイアス電流を流すことで擬似的に実現する。バイアス電流とSQUIDで測定するTESを流れる電流との関係を見ると、TESの状態を知ることができる。Fig.11には、我々の測定データの例を示した。これは、この図に示す回路系を希釈冷凍機の低温ステージにセットし、熱温浴の温度を約80 mKに制御して測定したものである。バイアス電流を0から徐々に大きくしてゆくと、初めは全ての電流はTESを流れるが、あるバイアス電流のところTESの超伝導状態が壊れTESは遷移端上に移行し、TESを流れる電流は急に減少する。この後しばらく、バイアス電流を増やすとTESの抵

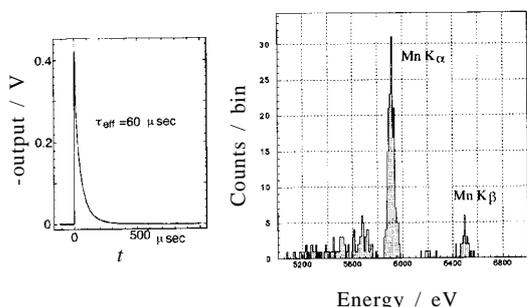


Fig.12 X-ray pulse (left) and pulse height spectrum for Mn K α (5.9 eV) and Mn K β (6.5 eV) lines (right) for the calorimeter shown in Fig.10. The direction of current is inverted in the left panel; i.e. the current decreases an X-ray pulse. The energy resolution is 38 eV.

抗値が増え、TES に流れる電流が減少する状態が続く。この間はTES の発熱が一定に保たれており、まさに電熱フィードバックによって遷移端上に保たれる状態である。バイアス電流を増加してゆくと、あるところでTES は常伝導となる。ここから先は抵抗値一定の線に沿ってTES を流れる電流は再び増加する。

TES が遷移端上にあるようにバイアス電流を流し、X 線を照射すると X 線を電流減少のパルスとして検出することができる。我々の実験装置では、パルス波形をデジタルオシロスコープで digitize し、それをコンピュータで波形解析してパルス波高を決定している。Fig.12 に digitize した X 線パルス波形と、⁵⁵Fe 放射線源からのマンガンの K 特性 X 線に対するスペクトルを示す。このマイクロカロリメータの半値幅は 38 eV であり、典型的な半導体検出に比べると 4 倍程度優れた分解能が得られている。しかし目標とする分解能にはまだ一桁足りない。この原因は、動作温度が 290 mK で目標とする 100 mK よりも高いこと（半値幅は温度の 3/2 から 5/2 乗数に比例することを思い出して欲しい）と、X 線光子が吸収された後におきる温度変化の大きさに X 線の吸収位置依存性があるためであると考えている。現在、転位温度約 100 mK の TES カロリメータを製作中でありこれによってエネルギー分解能は大幅に改善できると期待している。

6. TES カロリメータの可能性

量子マイクロカロリメータは、これまで主に X 線分光検

出器として開発されてきた。この章では、TES カロリメータの X 線以外の波長域での光子の分光検出の可能性について議論し、この分野の世界の最近の研究成果を簡単に紹介する。

カロリメータに照射される光子のエネルギーが大きくなるとカロリメータには強い非線形性が現れる。半導体型カロリメータでは、熱容量が温度上昇で急激に大きくなるために応答が悪くなる。TES カロリメータの場合には、それ以前に、温度上昇が選択幅を超え、応答が全く変化してしまう。そこで、TES カロリメータを設計する際には、測定する光子の最大エネルギーをあらかじめ決め、TES が常に遷移端上で動作することを要請する。この条件下で、最良のカロリメータを設計してみよう。

検出する最大エネルギーを E_{\max} とすると、それが吸収された時の温度変化は E_{\max}/C である。これは遷移端の幅 T/α よりも小さくなくてはならない。そこで、以下の式を満足するような熱容量になるように設計する。

$$E_{\max} / C = \eta T / \alpha \quad (10)$$

ここで、 η は、カロリメータの動作点や遷移端の形に依存するパラメータであるが、0.3 程度とするのが妥当であろう。この時、エネルギー分解能は式 (5) から、 E_{\max} を使って

$$\Delta E = \frac{kTE_{\max}}{\eta} \quad (11)$$

と表わされることがわかる。ここでエネルギー E_{\max} の光子に対する相対的なスペクトル分解能、 $E_{\max}/\Delta E$ が q よりも大きいことを要請すると、 E_{\max} には下限があることがわかる。

$$E_{\max} = \frac{kTq^2}{\eta} = 0.007 \text{ eV} \left(\frac{T}{100 \text{ mK}} \right) \left(\frac{\eta}{0.3} \right)^2 \left(\frac{q}{10} \right)^2 \quad (12)$$

動作温度が 100 mK の時、赤外線領域までエネルギー分解能を持った光子検出が原理的には可能である。

一方、高エネルギー側については、光子と物質の相互作用から限界がある。X 線領域では光子は、光電吸収によって吸収され、その全エネルギーを X 線吸収体に与える。ところが、光子のエネルギーが高くなると、光電吸収の確率は小さくなりコンプトン散乱が頻繁に起こるようになる。コンプトン散乱は光子エネルギーの一部しか吸収体に与えないので、コンプトン散乱から光子のエネルギーを精度よく決定するには、散乱をすべて追いかける必要がある。これは今のところ困難である。このことから、マイクロカロリメータによる分光検出が可能なのは 200 keV である。

低エネルギー光子の分光検出は、スタンフォード大学のグループが研究を行っている。 $E_{\max} = 10 \text{ eV}$ 程度に設定し、素子の大きさを 20 μm 角まで小さくすることにより最適な熱容量を実現し、0.3 ~ 10 eV (近赤外線から紫外線) 領域

**) 原稿校正時：その後、13eV に改善した。

で、 $E/\Delta E = 20$ 程度の分解能を実現している。¹²⁾この検出器は、高速の可視分光検出器として天体観測にも用いられようとしている。一方、100 keVまでの硬X線領域の検出器は、ローレンスリバーモア国立研究所のグループが研究しており、60 keVで $\Delta E = 60$ eVの優れた分解能がすでに達成されている。¹³⁾

7. おわりに

1995年に登場したTESカロリメータは、急激に研究が進み、今や赤外線から硬X線までの広い波長域をカバーする分光型光子検出器としてのステータスを確立しつつある。しかし、当初期待されていたようなX線領域での1 eVの分解能は達成されておらず、逆に、様々な技術的・原理的な難しさが見えてきてしまっている。今後は、我々が現在行っているような撮像型分光検出器としての研究開発が主流になっていくと思われる。

一方、TESや磁気温度計が登場した時のように、量子マイクロカロリメータは新しい温度計測技術の発明によって、大きな発展をする可能性を秘めている。この面からのブレークスルーに期待したい。

文 献

- 1) たとえば、和田英男ほか、電気学会論文誌 E 117-E[12], p.612 (1997).
- 2) たとえば、C. K. Stahle, D. McCammon, and K. D. Irwin, *Physics today's* August, p.32 (1999).
- 3) 蓑輪 眞, *Netsu Sokutei* 19, 129 (1992).
- 4) S. H. Moseley, J. C. Mather, and D. McCammon, *J. Appl. Phys.* 56, 1257 (1984).
- 5) 満田和久, 藤本龍一, *日本物理学会誌* 55, 340 (2000).
- 6) K. D. Irwin, *Appl. Phys. Lett.* 66, 15 (1995).
- 7) レイ ラドベリーパーティィー 12月号, p.18 (1998).
- 8) H. Hoevers, *AIP conference proceedings* 605, 193 (2002).
- 9) C. Enss, *et al.*, *Journal of Low Temperature Physics* 121, 137 (2000).
- 10) R. Fujimoto *et al.*, in proceedings of 9th International Workshop on Low Temperature Detectors, ed. by McCammon *et al.* (2001).
- 11) たとえば、大塚洋一, 物性測定の新進 II, 小林俊一 編, 丸善, 第1章.
- 12) A. J. Miller, *et al.*, *Nuclear Instrument & Methods in Phys. Res. A*, 444, 445 (2000).
- 13) D. T. Chow, *et al.*, *Nuclear Instrument & Methods in Phys. Res. A*, 444, 196 (2000).

要 旨

量子マイクロカロリメータは、高波長分解能と高検出効率を同時に実現するX線検出器として実用化されつつある。マイクロカロリメータの動作原理とX線分光検出器の現状を概観した後、マイクロカロリメータの動作と雑音について議論した。次に、超電導遷移端を温度計に利用したTransition Edge Sensor (TES)型カロリメータの製作方法と信号の読み出しの実際について、我々の実験に基づいて解説した。最後に、今後のマイクロカロリメータの可能性として、近赤外線から硬X線までの広い波長への応用について議論した。

満田和久 Kazuhisa Mitsuda
 宇宙科学研究所宇宙圏研究系, Institute of Space and Astronautical Science, TEL. 042-759-8132, FAX.042-759-8455, e-mail: mitsuda@astro.isas.ac.jp
 研究テーマ: 宇宙X線観測のためのX線検出器の開発と、それをを用いたX線宇宙物理学の観測的研究(銀河団, 中性子星, ブラックホール天体など)
 趣味: 音楽(鑑賞と演奏), そば打ち