

2011年度 第41回
天文天体物理若手 夏の学校
TES型X線マイクロカロリメータにおける
X線吸収体の最適化

永吉 賢一郎 ISAS/JAXA

2011年8月31日

発表内容まとめ

TES 型 X 線マイクロカロリメータとは

- 入射した光子 1 個 1 個のエネルギーを素子の温度上昇により測定する検出器
- 極低温で数 eV という高エネルギー分解能を達成

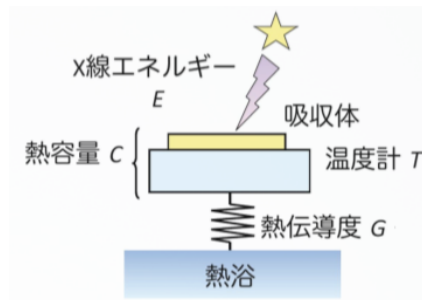


図 1: カロリメータ概略図

TES 型マイクロカロリメータにおける吸収体

マイクロカロリメータの性能を決定づける非常に重要な部分。様々なことを考慮し、きちんとした設計が必要である。

吸収体の大きさ

エネルギー分解能と検出効率のトレードオフで決まる。素子の熱揺らぎで決まるエネルギー分解能は、ボルツマン定数 k_B 、動作点温度 T 、熱容量 C 、温度計感度 α を用いて

$$\Delta E_{FWHM} \propto \sqrt{\frac{k_B T^2 C}{\alpha}} \quad (1)$$

と表される。

- 吸収体が小さい (C が小さい) → エネルギー分解能は高いが検出効率は悪い
- 吸収体大きい (C が大きい) → エネルギー分解能は低いが検出効率は高い

用いられる物質

比熱が小さく、X線を良く止め、熱化、熱拡散が速い物質が向いている。金、銅、ビスマスなどが良く用いられる。吸収体に入射したX線は光電吸収によって吸収され、そのエネルギーが熱に変わる（熱化）。熱は吸収体やTESに広がっていき（熱拡散）、最終的には熱リンクを通して熱浴に流れる。

- 熱化、熱拡散が遅い→熱の一部が測定できずに、エネルギー分解能劣化
- 吸収位置による熱拡散時間のばらつき→波形がばらつきエネルギー分解能が劣化

TES型マイクロカロリメータと吸収体開発の歴史

面積がTESよりも小さい吸収体

我々は図2のような素子でエネルギー分解能2.8eV（世界記録は1.8eV）を達成している。なお、今後出てくる断面図の色分けは図2と同じであり、断面図のスケールは垂直方向を約100倍にして書いてある。

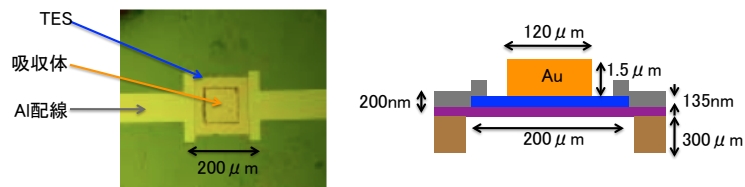


図 2: エネルギー分解能 2.8eV を達成した素子の写真と断面図

現在マイクロカロリメータ開発の主流は、エネルギー分解能の追求から一歩進み、開口率の向上とイメージングを狙って多素子化に移行している。我々は図3のように、1cm角に256素子を並べるプロセスを確立しているが、配線をできるだけ細く密に配置する等工夫を凝らしても開口率は10%程度しかなく、依然として開口率の向上が問題であった。

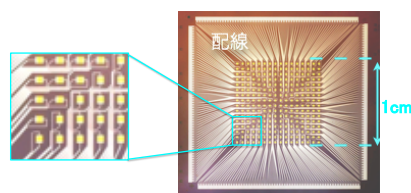


図 3: 256 素子アレイ

面積が TES よりも大きい吸収体

開口率を飛躍的に向上させるため、吸収体のサイズを大きくすることが考えられた。図4のように、笠と幹を持つ構造の吸収体をマッシュルーム型吸収体と呼ぶ。次世代 X 線天文衛星に搭載されるようなカロリメータには高いエネルギー分解能と検出効率が要求され、それは多素子化とマッシュルーム型吸収体によって実現される。したがってマッシュルーム型吸収体の開発は非常に重要である。

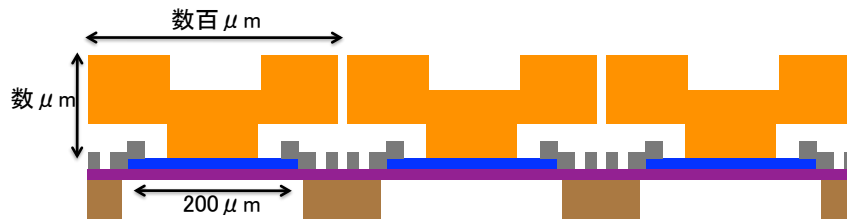


図 4: マッシュルーム型吸収体断面図

我々はかつてビスマスと金でマッシュルーム型吸収体を試作しているが、

ビスマス: 吸収体製作に成功するが、熱サイクルでほとんどが剥がれる

金: 笠を形成するプロセスでどうしても笠がだれてしまい、吸収体の製作に失敗という問題があった。

マッシュルーム型吸収体設計の最適化

以上を踏まえて今回、私は銅を用いたマッシュルーム型吸収体を検討した。銅は良く性質が知られた扱いやすい物質であり、熱伝導性が非常に優れた物質なので、マッシュルーム型吸収体に適している。ただし比熱が大きいので、エネルギー分解能追求の点では不利である。また原子番号も小さいので、ある程度の X 線を止めるには金に比べてより厚い膜にしなければならない。そこで成膜方法に電析出（メッキ）を用いることにした。今までは蒸着で成膜しており、数 μm が限界であったが、電析ならば数 $10\mu\text{m}$ も可能である。また、電析で比較的ゆっくり析出した銅は、蒸着に比べて残留抵抗比 RRR がよいという結果¹も得ており、熱伝導の観点から有利である。

さらに笠のだれを防止するため、図5のように笠と TES の間に熱伝導の悪い SiO_2 を挟むことにした。これは新しい試みであり、十分に検討する必要がある。

以下では最適化への第一歩として、必要な吸収体の厚さや、エネルギー分解能と吸収体の面積、 SiO_2 の影響を見積もる。

¹我々が実験したところ、電析による銅の RRR は約 7.6 であった。これについては、さらに追加実験による検証を考えている。

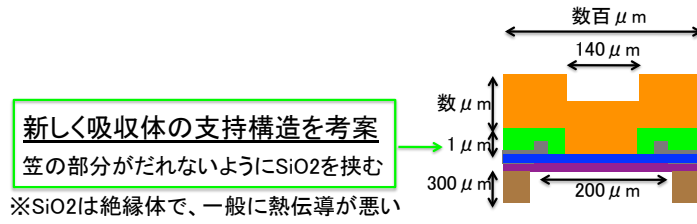


図 5: 今回検討した素子の断面図

必要な吸収体の厚さ

X線の吸収率は、線吸収係数 μ と厚さ Y_{Cu} を用いて

$$X \text{ 線吸収率} = 100(1 - e^{-\mu Y_{Cu}}) [\%] \quad (2)$$

と書ける。線吸収係数は物質に依存し、銅では

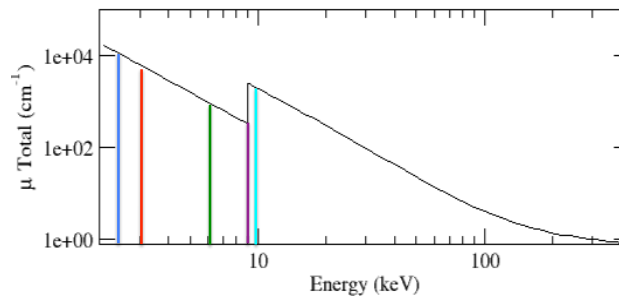


図 6: 銅の線吸収係数のエネルギー依存性

となっている。図 6 に示してあるエネルギーについて 2 式を計算すると、

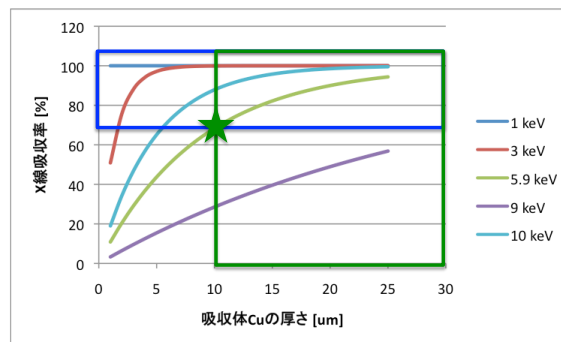


図 7: 銅の厚さと X 線吸収率

と求まる。天文学的に重要である鉄輝線で 70%以上の X 線吸収率（青線枠内）を要求すると、吸収体の厚さは 10 μm 以上必要（緑線枠内）であることがわかる。

吸収体の面積とエネルギー分解能

次に熱容量 C を計算して、1式よりエネルギー分解能を見積る。吸収体の一辺がTESと同じサイズと、2倍のサイズのもので検討した。図8、図9中の3本の線は温度計の感度 α の違いであり、現実的なカロリメータでは $20 < \alpha < 100$ 程度である。

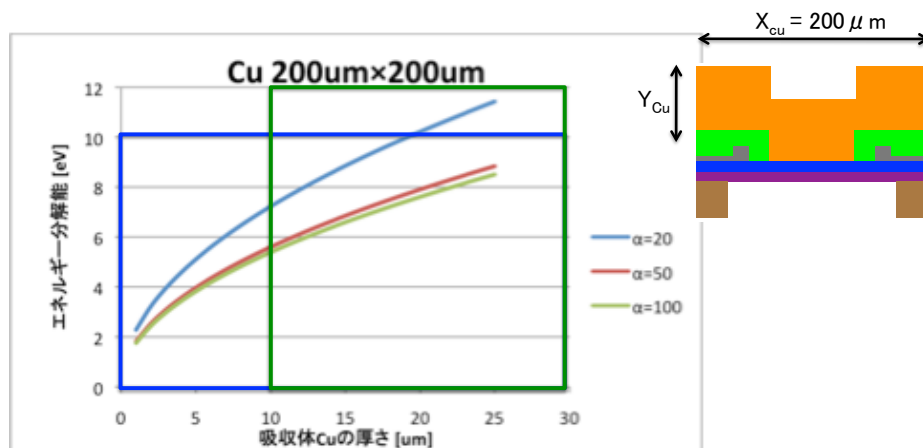


図 8: 吸収体のサイズとエネルギー分解能 1

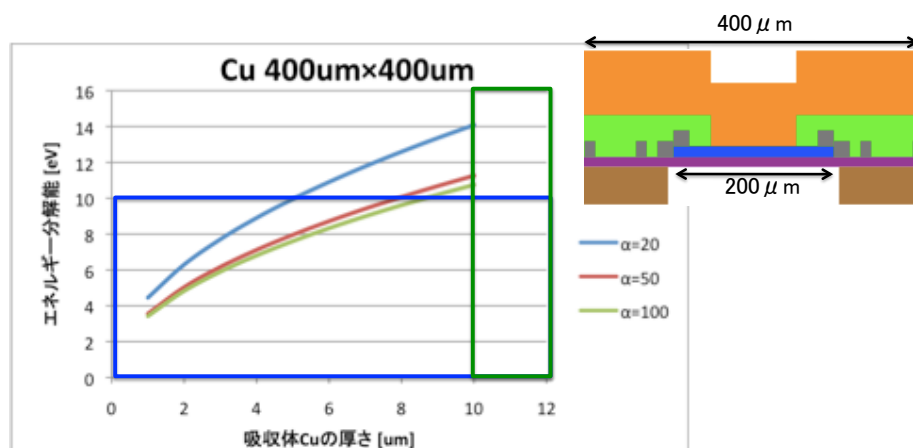


図 9: 吸収体のサイズとエネルギー分解能 2

エネルギー分解能 10eV は切りたい (青線枠内) とすると、図8より $200\mu\text{m}$ 角の吸収体では、厚さが $20\mu\text{m}$ 程度のもので可能であることがわかり、吸収体の厚さは $10\mu\text{m}$ 以上必要 (緑線枠内) という条件を満たせることがわかる。一方 $400\mu\text{m}$ 角の吸収体では、図9より条件を満たすのは難しいかぎりぎりであることがわかる。

吸収体の面積と熱拡散

熱揺らぎにより制限されるエネルギー分解能から吸収体の面積に制限をつけたが、吸収体内での熱拡散にかかる時間からも吸収体の面積を検討する。

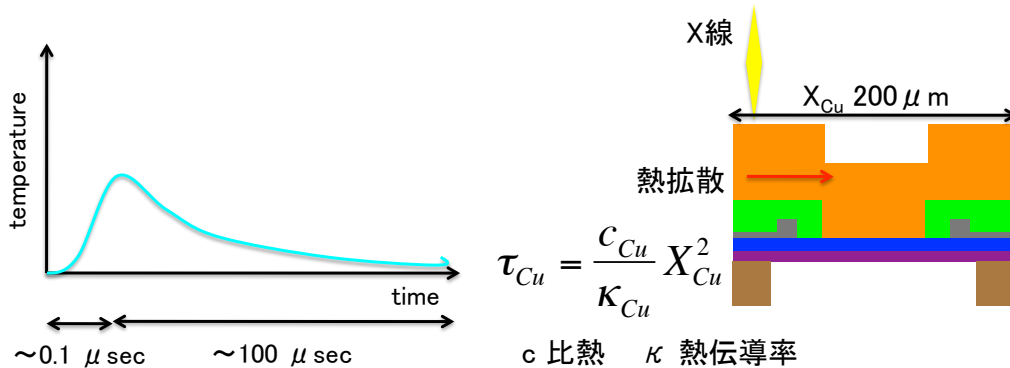


図 10: 素子内での温度の振る舞い (左) と熱拡散の時定数 (右)

実際の TES での温度の振る舞いは図 10 (左) のようになっている。吸収体内での熱拡散は TES での温度上昇以前に終わっているのが望ましく、そのタイムスケールは $0.1\mu\text{sec}$ のオーダーである。図 10 (右) のような状況を考え、熱拡散の時定数を見積ると

$$\tau_{Cu} = \frac{9.7 [\text{J m}^{-3} \text{K}]}{9.7 \times 10^{-1} [\text{w m}^{-1} \text{K}]} (200 [\mu\text{m}])^2 = 0.4 \left(\frac{X_{Cu}}{200 [\mu\text{m}]} \right)^2 [\mu\text{sec}] \quad (3)$$

となり、 $200\mu\text{m}$ 角の吸収体では熱拡散は十分速い。 $400\mu\text{m}$ 角の吸収体では $1\mu\text{sec}$ オーダーになるが、温度下降のタイムスケールよりは十分速く、これが実際エネルギー分解能にどれほど影響があるかは実験してみなければわからない。

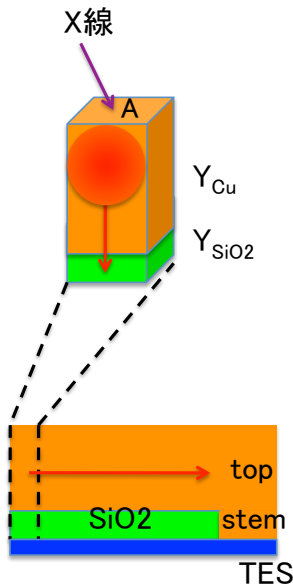
SiO₂ の影響を考える

一般に SiO₂ は熱伝導が悪いと言われているが、本当に吸収体内の熱は幹の方に流れ、SiO₂ の方には流れないのか。これは十分に確かめる必要がある。まず銅と SiO₂ の物性値を表 1 にまとめた。考える状況設定は図 11 である。吸収体の一番隅に X 線があたり、光電吸収により X 線は吸収される。そのエネルギーが熱に変わり (熱化)、そこから熱が幹の方に拡散していくスピードと、SiO₂ の方に伝導していくスピードを比較する。具体的に時定数を計算して比をとると、 $200\mu\text{m}$ 角の吸収体では 6.4% の熱が SiO₂ に流れることがわかった。これならば問題はない。しかし $400\mu\text{m}$ 角の吸収体ではかなりの熱が SiO₂ に流れてしまうことがわかった。これは計算方法も含めて要検討事項である。この計算では SiO₂ は吸収体と完全に密

着し、界面での抵抗もないと仮定している。界面での抵抗（カピッツァ抵抗）を文献値等で知ることは難しい。実際に実験してみて、ここら辺の振る舞いが計算通りかを確認したいと考えている。

表 1: 物性値まとめ@0.1K

	Thermal Conductivity [w m ⁻¹ K ⁻¹]	Specific Heat [J m ⁻³ K ⁻¹]
Cu	9.7 × 10 ⁻¹	9.7
SiO ₂	3.5 × 10 ⁻⁴	2.5 × 10 ⁻¹



SiO₂に熱が流れるタイムスケール

$$\tau_{SiO_2} = \frac{C}{G} = \frac{c_{Cu} A Y_{Cu}}{\kappa_{SiO_2} A / Y_{SiO_2}} = \frac{c_{Cu}}{\kappa_{SiO_2}} Y_{Cu} Y_{SiO_2}$$

top 200 μm 角
stem 140 μm 角

比をとると

$$\frac{\tau_{Cu}}{\tau_{SiO_2}} = \frac{\kappa_{SiO_2}}{\kappa_{Cu} Y_{Cu} Y_{SiO_2}} X^2$$

$$= 6.4 \times 10^{-2} \left(\frac{10[\mu m]}{Y_{Cu}} \right) \left(\frac{1[\mu m]}{Y_{SiO_2}} \right) \left(\frac{X}{30\sqrt{2}[\mu m]} \right)^2$$

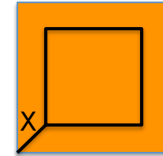


図 11: 考える状況設定の図と SiO₂ に熱が流れるタイムスケール

まとめと今後

- 70%程度 5.9keV の鉄輝線を止め、エネルギー分解能が 10eV 以下の、TES と同じ面積を持つ吸収体は作れそう。
- 一辺の長さが TES の 2 倍までの吸収体が、熱拡散過程やエネルギー分解能の点でも限界か。さらに検討が必要。
- まずは 10 素子で製作して、設計を検証したい。

10素子のレイアウト

$1:\sqrt{2}:2$

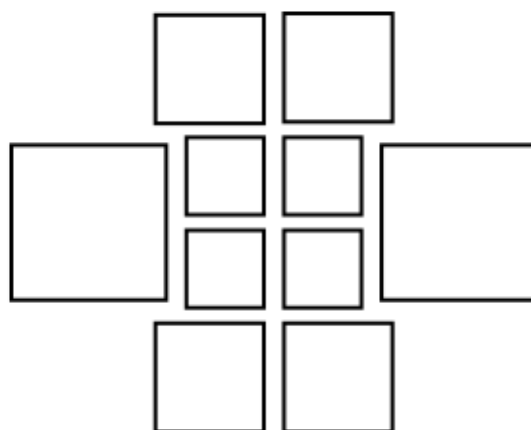


図 12: 10 素子レイアウト例



図 13: 製作風景