

誘電体マイクロカロリメータの開発

星野 全俊 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

宇宙に存在するバリオンは 50% は X 線では観測できないとされており、その観測対象も中性子星から銀河団まで多岐に及ぶ。例えば、銀河団に付随する高温プラズマの熱運動や元素組成などの物理状態の解明には数 eV の分光能力と数百万画素の撮像能力を両立した検出器が求められる。多くの X 線衛星に搭載されている X 線 CCD カメラは数百万画素だが、分光能力は原理的な上限である 120 eV (@5.9keV) を超えることはできない。一方で X 線マイクロカロリメータは撮像と数 eV の分光を同時に行える検出器である。素子に入射した X 線光子のエネルギーを熱に変換し、その温度上昇を測定する。数 eV の分光能力を達成するために極低温に動作温度を下げ熱雑音を抑制する必要がある。電気抵抗型ではすでに $E/\Delta E \sim 1000$ を達成している。しかし抵抗を温度計として使う場合、一つの素子は読み出し用の配線が数本必要であり、その熱流入により極低温を維持できず素子数が限定されてしまう。そのため CCD ほどの撮像能力は得られない。

この問題を解決するために、誘電率の変化を温度計として使用する「誘電体 X 線マイクロカロリメータ」を我々は考案・開発を行っている。高周波交流回路に誘電体を組み込むことで、1 本の伝送路で 1000 素子以上読み出すことができる。そのため原理的には CCD と同程度の撮像能力が得られる。これまでに量子常誘電体であるチタン酸ストロンチウムが極低温で誘電率に温度依存性を持つことを確認し、それを測定した。本講演では、誘電体 X 線マイクロカロリメータの原理、開発状況、アンプを用いた LED 光照射実験について発表する。

1 Introduction

1.1 X 線マイクロカロリメータ

X 線マイクロカロリメータは素子 (X 線吸収体と温度計) に入射した光子のエネルギーを温度上昇として極低温で測定する検出器である。熱容量 C_{th} の素子が温度 T_b の熱浴に熱コンダクタンス G_{th} の熱リンクを通してつながっている単純なモデル (図 1) では、入射直後の温度上昇は入射したエネルギーを素子の熱容量で割ったもの (E/C_{th}) で表されるため、この温度上昇を精密に測ることで数 eV の高いエネルギー分解能を達成できる。この温度上昇を精密に測るため、また熱容量が温度の 3 乗に比例するため素子の動作温度を低くすればよく、典型的な温度は 100 mK である。現在 X 線マイクロカロリメータとしては、半導体素子の電気抵抗の温度依存性を温度計として使用する半導体サーミスタ型や超伝導体の急峻な電気抵抗の変化を温度計として利用する TES 型などがある。しかし、これらのタイプの X 線マイ

クロカロリメータは一つの素子に配線が数本必要であり、素子を増やしていくとその熱流入により極低温を維持できなくなる。信号多重化が可能な TES 型の場合でも 1000 素子程度が限界と言われ、CCD ほどの撮像能力は得られない。

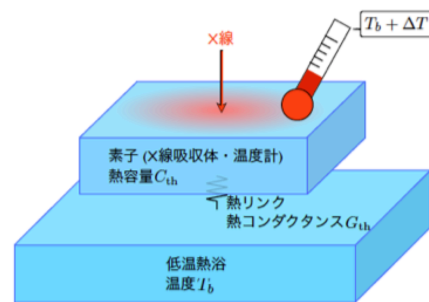


図 1: カロリメータの概念図

この問題を解決するために、誘電率の変化を温度計として利用する「誘電体 X 線マイクロカロリメータ」を我々は考案・開発を行っている。低温での温度

依存性をもつ誘電体を用いた LC 共振器が素子となる。この素子に X 線が当たることで素子の温度が上昇し共振周波数も変化する。その共振周波数変化から X 線エネルギーを測定するものである。また GHz の交流高周波帯を用いて共振周波数の異なる素子を並列に並べることで、1000 素子以上を 1 本の伝送路で読み出すことも可能と考えられている。そのため原理的には CCD と同じ撮像能力が得られる。

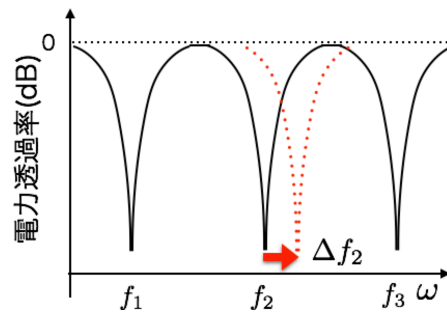


図 3: 共振周波数の変化

1.2 誘電体マイクロカロリメータの原理

近年、2K 付近での誘電率が比較的大きな温度依存性をもつ量子常誘電体という種類の誘電体が発見され、チタン酸ストロンチウム (STO) が低温で温度依存性があることを我々は示した (1)。今回の実験でもこれを用いている。

LC 共振器が複数並列に接続された場合を考える (図 2)。それぞれの共振器の共振周波数を f_1, f_2, f_3, \dots とすれば、入射電力の周波数がちょうど f_1, f_2, f_3, \dots のところで共振現象が起き、LC 共振器の方に電力が流れ透過電力は減少する。例えば左から 2 番目の素子に X 線が当たり温度が上昇すると誘電率が変化することで共振周波数が $f_2 + \Delta f_2$ と変化する (図 3)。動作点がちょうど f_2 にあったとすると共振周波数が変化したことで共振回路には電力が流れにくくなり、伝送線路の方に流れやすくなる。この変化を利用して X 線エネルギーを測定できる。ただし、隣り合う共振周波数の素子の信号が干渉しないためには、その間隔よりも共振の幅や共振周波数変化を小さくする必要がある。例えば、GHz 帯に共振周波数を MHz 間隔で並べていくと、単純に 1000 素子以上を並べることが可能である。

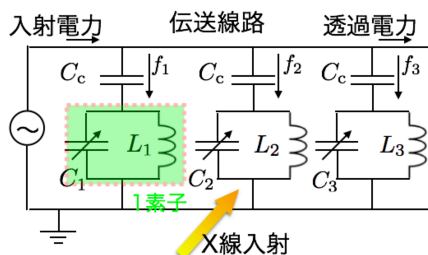


図 2: 誘電体マイクロカロリメータ

1.3 誘電体マイクロカロリメータ開発での現在の位置づけ

誘電体 X 線マイクロカロリメータで X 線を検出した例はまだどこにもない。そのためいきなり X 線のエネルギー帯を検出するのではなく、まずは X 線よりも高いエネルギー帯の検出 (GeV や MeV 程度) を目指している。現在は STO16 (STO の酸素同位体置換をしていないもの) を用いて数 K でエネルギーの検出ができることを実証し、極低温でよりよい温度計感度をもつ STO18 (STO16 を一部酸素同位体置換したもの) を使って X 線を検出することが当面の目標である。最終的な目標としては数万素子アレイの形成かつ $E/\Delta E \sim 1000$ の達成である。

2 Experiment

2.1 低温用アンプを使った STO16 への LED 光照射実験

2K で LED 光を STO16 に当てて信号を検出することに我々は成功しているがアンプを用いていなかったため S/N 比がよくなかった (2)。今回は STO16 に GaAs の赤外光 (LED) を当て、低温用アンプで増幅された STO16 からの信号を検出することが目的である。アンプを用いることで信号が増幅され S/N 比が改善されると考えた。

2.2 実験のセットアップ

冷凍機は He3 クライオスタットを用い、図 4 のようなセットアップで実験を行った。素子の共振周波数を調べる時はネットワークアナライザーを使用し、動作点として共振周波数を選んだ。読み出しには I/Q ミキサーを使用した。今回用いている STO は 2.5mm 角で 0.1mm の厚さがある (図 5)。

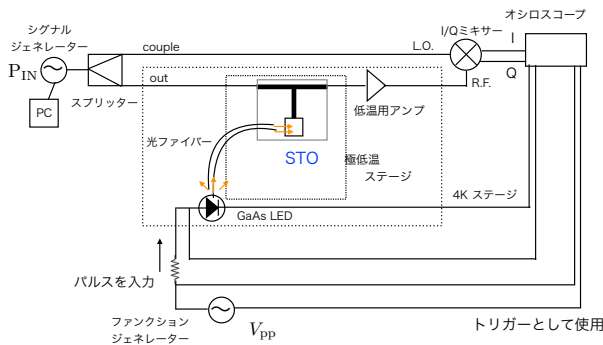


図 4: セットアップ

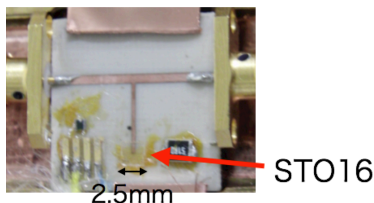


図 5: 今回用いた STO の写真

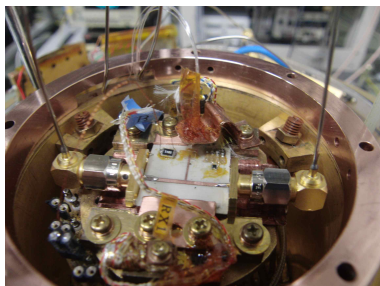


図 6: 極低温ステージの写真

3 Results

図 7 は前回の実験から得られた 1 回分のパルス (上段) と今回の実験から得られた 1 回分のパルス (下段) を載せている。入力電力-10dBm、温度 2K のときのものである。得られたパルスの波高値が明らかに大きくなっていて、S/N 比が改善されていることがわかる。

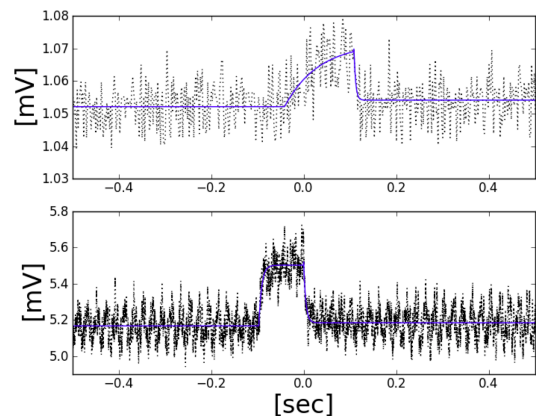


図 7: 上段は今回からの結果、下段は前回からの結果

4 Discussion

得られたパルスを 100 回ためて平均すると図 8 のようなパルスとして得られた。以下のような関数系で平均パルスをフィットすると、波高値は 0.335 ± 0.005 [mV]、立ち上がり時定数 $\tau_{rise} = 7.43 \pm 0.12$ と立ち下がり時定数 $\tau_{fall} = 6.16 \pm 0.08$ と求まる。

$$\begin{aligned} \text{立ち上がり} &: 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{rise}}\right) \\ \text{立ち下がり} &: \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fall}}\right) \end{aligned}$$

LED に入れる電圧を少しずつ変えていき、それぞれのときに STO が受け取ったおおよそのエネルギーと波高値の関係が図 9 である。4K (黒) と 2K (赤) での結果とともに前回のアンプを用いなかったとき (青) の結果もとのせている。2K のときの結果を $y = ax^b$ という形を仮定し外挿していくと 5.5MeV の α 線は 2K での検出が一応検出できると予想している。しかし、

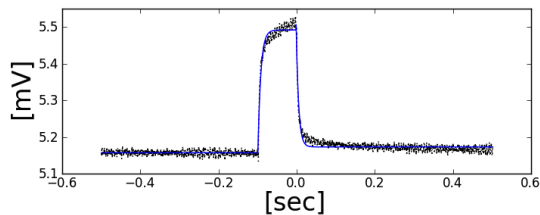


図 8: 平均パルスの図 青線はフィットしたときの線

keV オーダーの X 線では波高値は小さく検出は難しいと考えられる。一方、STO18 を用いたらどうなるかという見積もりを行い、図 9 の左側の破線がそれにあたる。2K での STO16 の波高値と同等の波高値が得られるエネルギーは STO18 ではどの程度になるのか見積もったものである。式 (1) により STO16 が受けたエネルギーは STO18 ではどの程度になるか計算した。添字の 16、18 はそれぞれ STO16、18 に対応し、 T は温度、 C は熱容量、 α は温度計の感度、 ε は比誘電率、 $\Delta\varepsilon$ は比誘電率の変化を表し、いま STO16 と STO18 では LED 光を検出したときに同じ波高値が得られると仮定している ($\Delta\varepsilon_{16} = \Delta\varepsilon_{18}$)。これから今回得られた波高値での STO18 が受けるエネルギーは keV オーダーになり、X 線検出の可能性があると見える。

$$E_{18} = E_{16} \left(\frac{T_{18}}{T_{16}} \right) \left(\frac{C_{18}}{C_{16}} \right) \left(\frac{\alpha_{16}}{\alpha_{18}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{16}}{\varepsilon_{18}} \right) \left(\frac{\Delta\varepsilon_{16}}{\Delta\varepsilon_{18}} \right) \quad (1)$$

5 Conclusion

今回の実験で低温用アンプを用いたことで STO16 からの出力を増幅することができ、前回よりも S/N 比を向上することができた。また、STO16 なら 2K での α 線の検出をできる可能性が示された。しかし STO16 では X 線検出は見込めないの今後 X 線検出をするためには STO18 を使う必要がある。今後は STO18 を用いる予定で、まずはその製作と評価を行っていくことになる。

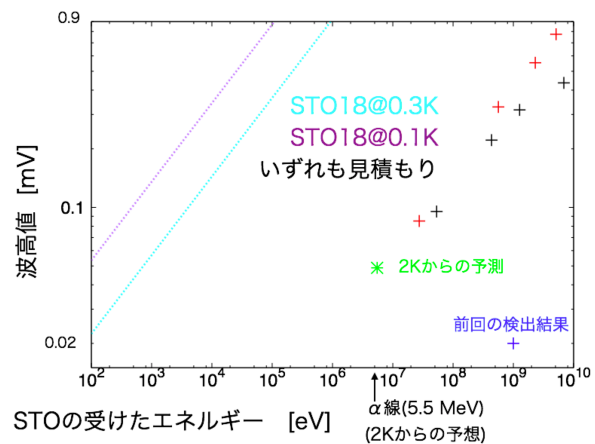


図 9: エネルギーに対する波高値、STO18 の α 線・X 線検出可能性 (黒が 4K、赤が 2K、青が前回の結果、緑は 2K からの予想)

Reference

- [1] Sekiya Norio. 誘電体マイクロカロリメータの概念検討と基礎実験 Master's thesis, University of Tokyo. 2012
- [2] Kikuchi Takahiro. 誘電体 X 線マイクロカロリメータの GHz 帯読み出しの研究 Master's thesis, University of Tokyo. 2014