

誘電体 X 線マイクロカロリメータの開発

中山 貴博 (東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻)

Abstract

宇宙の高エネルギー現象の解明において、X 線検出器のエネルギー分解能や角度分解能を向上させることは重要である。例えば優れた角度分解能をもつ Chandra 衛星の CCD 検出器で銀河団を観測すると内部構造まで鮮明なイメージが得られる。しかしその分光能力は十分でなく、内部の詳細な運動を解析することはできない。一方マイクロカロリメータは 100mK で素子の温度上昇を読み出す検出器である。素子には電気抵抗体を用いるのが現在の主流であるが衛星の冷却能力を考慮するとその素子数は数千程度からの飛躍的向上は望めない。なぜなら 1 素子に対して読み出し用配線が数本必要となるからである。そのため電気抵抗体では配線からの熱流入が問題となり、CCD 検出器のように素子数を並べることができない。以上のように CCD 検出器の素子数を維持しつつより良いエネルギー分解能をもつ検出器が必要となっている。そこで我々は、温度計素子として誘電体を用いた「誘電体 X 線マイクロカロリメータ (DMC)」の研究を進めている。私は DMC の新たな誘電体素子候補として量子強誘電体である $\text{KTa}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_3$ (以下 KTN) を提案する。そこで本公演では新たな素子 $\text{KTa}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_3$ を用いた DMC の可能性を考察していく。

1 導入

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、素子に入射した X 線光子のエネルギーを温度上昇として読み出す検出器である。図 1 のように熱容量 C_{th} の素子が、温度 T_b の

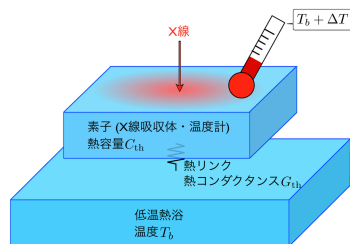


図 1: X 線マイクロカロリメータのモデル

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た単純なモデルを考える。エネルギー E をもつ X 線入射直後の素子の温度上昇は、 $\Delta T = E/C_{th}$ として表すことができる。したがってこの温度変化を正確に測定することで X 線のエネルギーを求めることができる。しかし X 線のエネルギーは keV オーダーであるためそのエネルギーを温度変化として読み出す

には、熱容量 C_{th} が小さな素子を極低温 ($\sim 100\text{mK}$) で動作させかつ高感度の温度計を用いなければならない。現在素子としては電気抵抗体を用いるタイプが主流であり、我々のグループでは半導体技術を用いた素子で $2.8\text{eV} (@5.9\text{keV})$ という高い分光性能を達成している。しかしこのタイプの X 線マイクロカロリメータではその結果 CCD 検出器ほどの撮像能力は得ることができない。

1.2 誘電体 X 線マイクロカロリメータ

この問題を解決するために、我々は温度計素子として誘電体を用いた「誘電体 X 線マイクロカロリメータ (DMC)」の研究を進めている。DMC は誘電体素子をキャパシタとした LC 共振回路を伝送路に並列に接続し、X 線が入射することによる共振周波数変化を読み出す。並列接続のため読み出し用の配線数を抑えることが可能である。また、広帯域の共振周波数をもつ素子を並列に並べることで、伝送路あたり 1 万素子程度の読み出しが可能であると考えられている。したがって検出器の素子数を飛躍的に向上させることができ、原理的には CCD 検出器と同等の撮像能力が得られる。

伝送路との結合容量 C_c および、誘電体素子を極板間物質として用いた容量 C_{d_i} のコンデンサ、リアクタンス L_i からなる i 番目の LC 共振回路が並列接続されて構成される透過回路を図 2 に示す。X 線の測定は入射電力と透過電力の比を用いて計算することができる。 i 番目の LC 共振回路の共振周波数を f_i とすると、入射電力が f_i のときにその電力がアースに落ちて透過電力が低下する共振現象が起こる。この回路に X 線が温度計素子に入射すると、光電効果によって誘電体の温度が上昇する。それに伴って誘電率、キャパシタンス、そして共振周波数変化 Δf_i が起こる (図 3)。したがって、この LC 回路の共振周

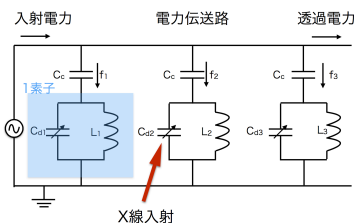


図 2: 誘電体 X 線マイクロカロリメータの読み出し回路

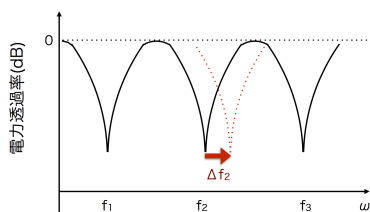


図 3: X 線入射による共振周波数変化イメージ

波数変化を読み出すことで X 線のエネルギーが測定できる。この方法では抵抗体を用いないため、理想的な読み出し回路において従来の X 線マイクロカロリメータでは避けられなかったジョンソンノイズによる原理的なエネルギー分解能への制限を除くことができる。

1.3 先行研究

我々はこれまでの研究により、 SrTiO_3 (以下 STO16) や $\text{SrTi}({}^{16}\text{O}_{0.58}{}^{18}\text{O}_{0.42})$ (以下 STO18) が極

低温で温度感度があると示してきた。そして STO16 を素子として用いた GHz 帯の LC 共振器の開発に成功し、それによって LED 光を検出することができた ($\sim 2\text{K}$)。一方で共振周波数のシフトは 1K 以下では検出できなかった。誘電体は半導体、超伝導体、常磁性体などに比べて材料の選択の幅が広く、また原子番号の大きな元素を含ませることで X 線吸収効率を高めることができる。したがって誘電体マイクロカロリメータによる X 線の検出に向けて、カロリメータに用いるのに最適な誘電体素子を見つけていくことが必要である。現在 STO16 と同位体比率の異なる STO18 を用いた共振器の開発が進められており、さらに新たな誘電体素子として $\text{KTi}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_3$ (以下 KTN) が候補として挙げられる。

1.4 誘電体マイクロカロリメータ開発での現在の位置付け

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ない。したがっていきなり X 線エネルギー帯 (keV) での検出実験を行うのではなく、X 線よりも高いエネルギー帯 (MeV や GeV) の検出を実証し、段階的に X 線を検出しようとしている。誘電体マイクロカロリメータは最終的に数百万素子のアレイの形成かつ $E/\Delta E \sim 1000$ という性能の達成を目指している。

2 誘電体の種類

2.1 常誘電体と強誘電体

多くの種類がある誘電体の中で誘電体 X 線マイクロカロリメータの素子として適するものは、カロリメータが動作する極低温において誘電率が大きな温度依存性を持つ誘電体である。誘電体の中にはある温度 (キュリー温度: T_C という) 以下になると常誘電体から強誘電体に相転移するものが存在する。キュリーワイス則によると、その誘電率は以下の式に従う。

$$\epsilon = \frac{C}{T - T_C} \quad (1)$$

2.2 量子常誘電体と量子強誘電体

キュリー温度が極低温にあればキュリーワイス則から誘電率が大きな温度依存性を持つように思われるが双極子相互作用が弱いために量子的な揺らぎである零点振動が支配的となり強誘電体転移が抑制される。このような特徴を持つ誘電体を量子常誘電体といい、その誘電率は以下の Barrette の式に従う。

$$\epsilon = \frac{A}{\frac{T_1}{2} \coth\left(\frac{T_1}{2T}\right) - T_c} \quad (A, T_1 : \text{const}) \quad (2)$$

この式から低温極限 ($T \rightarrow 0$) で誘電率が高い値を保って飽和し温度依存性はほとんどなくなることが分かる。したがって量子常誘電体は素子候補になることは難しい。KTaO₃(以下 KTO) は量子常誘電体の一種である。KTO はペロフスカイト型の結晶構造をもつことが知られている。しかし KTO は、Ta を Nb に置換することで強誘電性を誘起させることができる。このような特徴をもつ誘電体を量子強誘電体という。量子強誘電体は極低温において誘電率に温度依存性が見られるため X 線カロリメータの素子候補になると考えられる。

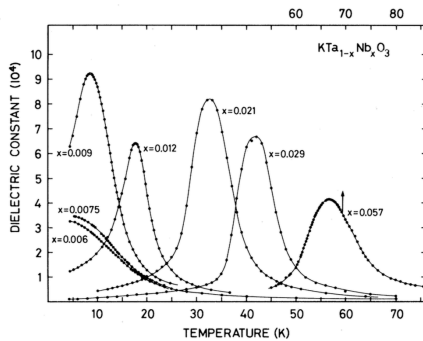


図 4: KTa_xNb_{1-x}O₃ の量子強誘電性 [3]

3 考察

3.1 KTa_xNb_{1-x}O₃ を用いた誘電体マイクロカロリメータ

KTN を誘電体 X 線マイクロカロリメータの素子として用いる場合を考える。KTN に X 線が入射した時の温度上昇やそれに伴う静電容量および共振周

波数変化を求めていく。図 5 に KTN($x = 0.03, 0.09$) の比熱の温度依存性を示す。 $x=0.003$ の場合、2K に

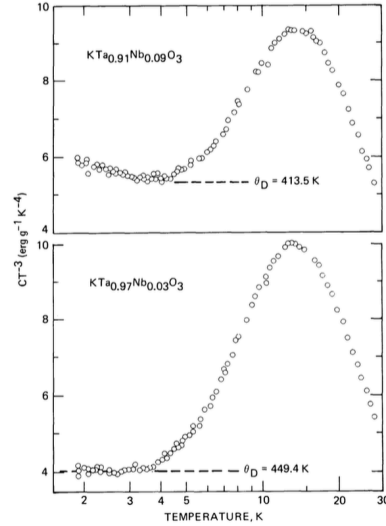


図 5: KTa_xNb_{1-x}O₃ の比熱の温度依存性 [4]

において比熱 $c = 3.20 \times 10^{-6}$ [J/g/K] と分かる。KTN の密度は結晶構造を考えると $d = 6.98$ [g/cm³] となるので、素子を面積 $A=1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 、厚さ $t=100\mu\text{m}$ の平行平板とした場合の熱容量 $C_{th,2K}$ は

$$C_{th,2K} = 2.23 \times 10^{-9} \left(\frac{A}{1\text{mm}^2} \right) \left(\frac{t}{100\mu\text{m}} \right) [\text{J/K}] \quad (3)$$

となる。十分低温では比熱はフラットつまり格子比熱が支配的な T^3 則にしたがっていると考えられるので、100mK での値は外挿により

$$C_{th,100K} = 0.279 \left(\frac{T}{0.1\text{K}} \right)^3 \left(\frac{A}{1\text{mm}^2} \right) \left(\frac{t}{100\mu\text{m}} \right) [\text{pJ/K}] \quad (4)$$

と求めることができる。したがってこの素子にエネルギー $E=5.9\text{keV}$ の X 線を入射させた場合、

$$\Delta T = 3.39 \times \left(\frac{C_{th,100mK}}{0.279\text{pJ/K}} \right)^{-1} \left(\frac{T}{0.1\text{K}} \right)^{-3} \left(\frac{A}{1\text{mm}^2} \right)^{-1} \left(\frac{t}{100\mu\text{m}} \right)^{-1} [\text{mK}] \quad (5)$$

の温度上昇となる。また、誘電体温度計の絶対感度 α は誘電体素子の静電容量 C_d に対し

$$\alpha \equiv \frac{d \log C_d}{d \log T} = \frac{T}{C_d} \frac{d C_d}{dT} \quad (6)$$

と表せる。仮に $\alpha \sim 0.01$ とする。誘電体素子をキャパシタとしてインダクタンス L を用いて LC 共振回

路を形成した際、素子への X 線入射による静電容量の相対変化 $\frac{dC_d}{C_d}$ は

$$\begin{aligned} \frac{dC_d}{C_d} &= \alpha \times \frac{dT}{T} = 1.6910^{-4} \times \\ &\times \left(\frac{\alpha}{0.01} \right) \left(\frac{C_{th,100mK}}{0.279pJ/K} \right)^{-1} \left(\frac{T}{0.1K} \right)^{-4} \\ &\times \left(\frac{A}{1mm^2} \right)^{-1} \left(\frac{t}{100\mu m} \right)^{-1} \left(\frac{E}{5.9keV} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

となる。さらに、インダクタンス L が温度依存性を持たないと仮定する。このとき共振周波数変化 $\delta\omega_r$ について、

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C_d L}} \quad (8)$$

$$\delta\omega_r \sim \frac{d\omega_r}{dC_d} \frac{\delta C_d}{\delta T} \delta T \quad (9)$$

の関係から共振周波数相対変化 $\Delta_r(\omega) \equiv \delta\omega_r/\omega_r$ は

$$\begin{aligned} |\Delta_r(\omega)| &\sim 8.47 \times 10^{-5} \\ &\times \left(\frac{\alpha}{0.01} \right) \left(\frac{C_{th,100mK}}{0.279pJ/K} \right)^{-1} \left(\frac{T}{0.1K} \right)^{-4} \\ &\times \left(\frac{A}{1mm^2} \right)^{-1} \left(\frac{t}{100\mu m} \right)^{-1} \left(\frac{E}{5.9keV} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

となる。よって共振周波数が 1GHz であれば 84.7kHz の変化が見込まれる。

3.2 ノイズによる影響評価

X 線マイクロカロリメータを運用するうえで避けることのできない問題が、素子の熱を担うフォノンの揺らぎに起因するフォノンノイズと素子の電気抵抗に起因するジョンソンノイズである。誘電体 X 線マイクロカロリメータは電気抵抗体を用いないことから、理想的にはフォノンノイズのみが支配的なノイズとなりカロリメータの分解能を制限する。電熱フィードバックを考慮した X 線パルスの時定数を有効時定数 τ_e とし、 τ_e^{-1} を有効応答周波数とする。X 線の信号の電力スペクトルは $(1 + \omega^2 \tau_e^2)^{-1}$ の周波数依存性を持つ。フォノンノイズの電力スペクトル密度は X 線信号の周波数依存性と同一依存性を持つので、その信号雑音比は周波数依存性を持たない。

半値全幅のエネルギー分解能 ΔE_{FWHM} は NEP(雑音等価パワー: Noise Equivalent Power) を用いて

$$\Delta E_{FWHM} = \left(\frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{d\omega}{NEP^2(\omega)} \right)^{-1/2} \quad (11)$$

と表せる。フォノンノイズの NEP は

$$NEP_p^2 = 4k_B T_b^2 G_{th} \Gamma(T_p, T_b) \quad (12)$$

と表せるのでフォノンノイズの影響を評価すると式 (11) より、($\Gamma \sim 1/2$ とする)

$$\Delta E_{FWHM} = 3.1 \left(\frac{T_b}{0.1K} \right) \left(\frac{C_{th}}{1pJ/K} \right)^{1/2} \left(\frac{\Gamma}{1/2} \right)^{1/2} \left(\frac{r'}{0.1} \right)^{1/2} \text{ [eV]} \quad (13)$$

と求めることができる。(r' は信号量の大きさなどに関わる量である) よって DMC のエネルギー分解能は理想的にはこの程度の値となることがわかる。

4 まとめと今後の課題

これまでの理論的な考察から KTN を素子として用いた DMC は、熱容量の値が典型的な熱容量に比べ小さいので式 (13) より、 $\Delta E_{FWHM} = 1.6 \text{ [eV]}$ のような非常に高いエネルギー分解能を持つ。KTN を素子とした DMC によって非常に高い分光性能で X 線を検出できる可能性があることがわかった。しかし KTN の極低温での物性の振る舞いを測定した事例はまだない。DMC による X 線検出に向けて、今後はまず KTN の極低温における物性の振る舞いを明らかにし、シミュレーションを通して最適な LC 共振回路を設計する。

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。

Reference

- [1] Sekiya Norio 2011, the Univ.Tokyo
- [2] Kikuchi Takahiro, 2014, the Univ.Tokyo
- [3] Rytz, D et.al, 1983, Phys.Rev.B 27,6830
- [4] W.N.Lawless et.al, 1985, JJAP