

TES 型 X 線マイクロカロリメータ用断熱消磁冷凍機の温度制御の改良

伊東 宏昌 (金沢大学大学院 自然科学研究科)

Abstract

X 線マイクロカロリメータは入射 X 線光子のエネルギーを素子の温度上昇として計測する検出器であり、100mK 以下の極低温で動作させることにより、 $E/\Delta E > 1000$ の優れた分解能を実現するが、そのためには高い精度でセンサの温度を一定に保つことが要求される ($\Delta E = 3\text{eV}$ に対して $2\mu\text{Krms}$ 以下)。我々はこれまでに 5.9keV の X 線に対して 3.8eV(半値全幅)のエネルギー分解能を実現しているが、温度安定度は $4 - 18\mu\text{Krms}$ であり、これが性能を制限するひとつの要因になっていた。そこで私は温度制御ロジックを見直し、改良を行った。その結果、 $1 - 2\mu\text{Krms}$ の温度安定度を達成できた。

1 はじめに

X 線マイクロカロリメータは、入射 X 線光子 1 つ 1 つのエネルギーを素子の温度上昇として計測する検出器である。100mK 以下の極低温の極低温で動作させることで $E/\Delta E > 1000$ の優れたエネルギー分解能を実現し、精密な X 線分光観測が可能となる。図 1 に X 線マイクロカロリメータの模式図を示す。吸収体に X 線光子が入射すると吸収体の温度がわずかに上昇し、その熱は熱リンクを通して熱浴へ流れ熱平衡に戻る。このときのわずかな温度上昇を読み取ることで、入射 X 線光子のエネルギーを測定する。

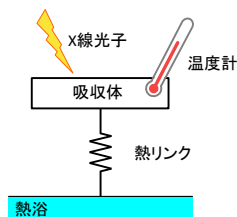


図 1: X 線マイクロカロリメータ模式図

しかし、熱浴の温度が揺らぐと、波高値がゆらぎ分解能を劣化させてしまう。なので、より良い分解能を得るためには熱浴の高い温度安定度が必須である。

2 断熱消磁冷凍機と PID 制御

2.1 断熱消磁冷凍機 (ADR)

ADR は冷媒である常磁性体に磁場を印加してエントロピーを下げ、断熱状態にした後に磁場を取り去ることで極低温を実現する冷凍機である。

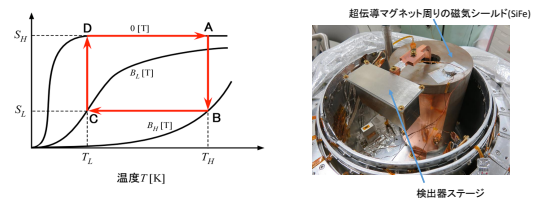


図 2: 右: 断熱消磁過程 左: ADR の内観

冷却過程として、まず熱浴と接した状態(熱スイッチ on)で磁場を印加し、磁化熱を熱浴に逃がす(図 3 過程 $A \rightarrow B$)。熱浴に磁化熱を逃がしきった後で熱浴と切り離し(熱スイッチ off)、断熱状態にした後磁場を取り去る(図 3 過程 $B \rightarrow C$)。外からの侵入熱にあわせて磁場を少しずつ取り去ることで温度を一定に保つ(図 3 過程 $C \rightarrow D$)。この部分で温度制御を行う。

2.2 PID 制御

PID 制御とは、入力値の制御を出力値と目標値との偏差、その積分、および微分の 3 つの要素によって制御を行う方法である。まず、PID 制御の基本式を示す。

$$m(t) = K_P \left\{ (e(t)) + \frac{1}{T_I} \int e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (1)$$

$$e(t) = \text{設定値} - \text{測定値}$$

$m(t)$: 制御出力 K_P : 比例ゲイン T_I : 積分時間
 T_D : 微分時間

この式が PID 制御の基本式である。第一項が比例項 (P 項)、第二項が積分項 (I 項)、第三項が微分項 (D 項) である。 K_P, T_I, T_D を調節することで最適な制御を行うことができる。P 項は、目標値に近づける働きをし、I 項は偏差を 0 にする働きがあり、D 項は振動を小さく抑える働きをする。

ADR においては温度制御は次のように 1 秒前の電流値との偏差を計算する。

$$I(t) = I(t-1) + K_P \left\{ (e(t)) + \frac{1}{T_I} \int e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (2)$$

3 実験装置とこれまでの状況

温度制御用の電流源として横河メータ & インストルメンツ社の GS200 を用いる。これは 200mA レンジで $1\mu A$ ずつ電流を調節でき、細かい制御を行うのに適している。

温度計測装置として Cryogenic Control Systems 社の model 62 (CryoCon62) を用いている。温度計は RuO (酸化ルテニウム) 温度計を用いているが、温度計のノイズを取り除くために温度計測装置である CryoCon62 の中で 16 秒で温度の平均化を行っている。温度計のバイアス電圧は $333\mu V$ としている。

TES のエネルギー分解能は素子の温度揺らぎによって制約を受けるので、高い温度安定度が必要である。

しかし、昨年までは温度安定度が $4 - 18\mu K_{rms}$ と悪く、しかも長い時間スケールでの温度上昇が見られた。なので制御の方法を改良する必要がある。

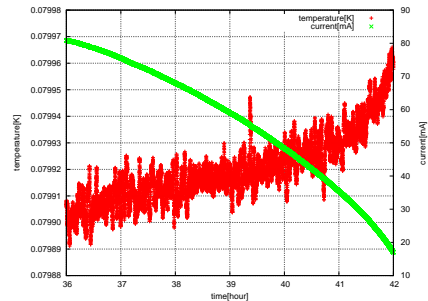


図 3: 改良前の温度安定度 (温度上昇補正後: $5.11\mu K_{rms}$) 赤: 温度、緑: 電流

従来の制御では、CryoCon62 のなかで 16s 温度を平均化した後、さらに 60 秒間平均化した温度を P 項にいれ、D 項は 10 秒ほどの温度変化の傾きを取っていた。I 項はない。そして侵入熱にあわせて電流を減らしていく項がついていた。

4 PID パラメータ調整方法

今までは PID パラメータを試行錯誤をすることで良いパラメータを探していた。しかしそれでは時間がかかるので、確立された PID パラメータ調整方法を導入する。パラメータ調整方法のひとつとして限界感度法がある。この方法は次の手順で行う。

1. 積分項と微分項を消して、比例ゲイン K_P を上げていく。
2. 比例ゲインを上げていくと、ある点 $K_P = K_u$ で持続振動が起きるので、その時のゲイン K_u と、振動周期 P_u を記録する。
3. 表 1 に従って PID パラメータを決める。

表 1: 限界感度法によるパラメータ調整

	K_P	T_I	T_D
P 制御の場合	$0.5K_u$		
PI 制御の場合	$0.45K_u$	$0.83P_u$	
PID 制御の場合	$0.6K_u$	$0.5P_u$	$0.125P_u$

5 実際の制御

5.1 P,I,D 項を入れての制御

まずは P 項だけの P 制御で制御を行った。パラメータは限界感度法を用いて決定した。温度安定度は $6.4\mu Krms$ とそれほど良いとはいえない。

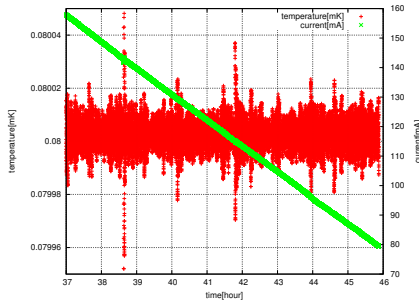


図 4: 80mK での P 制御 (P=945) 赤: 温度、緑: 電流 $6.4\mu Krms$

次に、I 項、D 項を導入して PID 制御を行おうとした。限界感度法によってパラメータを決定し、PID 制御を行ったが、振動が収束するのが遅いので、D 項が弱いと考え、D 項を約 2 倍にしたところ振動が収束し、安定度が $1.83\mu Krms$ と高い安定度を達成した。目標値との差、オフセットもほとんどない。

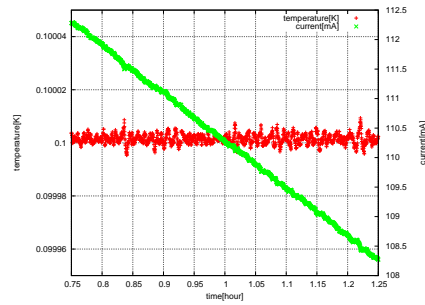


図 5: 100mK での PID 制御 (P=726,I=21,D=10) 赤: 温度、緑: 電流 $1.83\mu Krms$

5.2 電流減少項の導入

ADR の温度制御では、外からの侵入熱による温度上昇を打ち消すために一定の割合で電流を下げていかななくてはならない。そして、残りの電流が少なくなってくると、電流の減りが早くなり、制御が追いつかずに温度が上昇してしまう。それを防ぐために電流減少項 (dI/dt 項) を導入する。電流減少項の求め方として、直前の電流の減りから将来の電流の減りを予想する方法を考えた。次の式のように、電流の揺らぎを平均して 2 点をとり傾きを求める。ここでは、 $n=100s, m=300s$ とした。

$$\frac{dI}{dt} = \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{I_i}{n} - \sum_{i=m}^{m+n-1} \frac{I_i}{n} \right) \times \frac{1}{m} \quad (3)$$

n : 電流値の平均をとる秒数

m : 傾きを求める秒数

限界感度法で求めた D 項の値を 2 倍、3 倍、4 倍として、それぞれ 5 分間安定度を見たところ、3 倍の時に一番安定度が良かった。制御を行ったところ $1.57\mu Krms$ の安定度を達成した。このとき、X 線パルスを取得し、分解能は $3.8 \pm 0.4eV$ だった。過去の最高分解能を出すことができた。

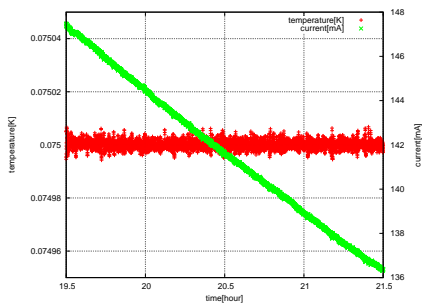


図 6: 75mK での PID+dI/dt 制御 (P=1350,I=22,D=15) 赤:温度、緑:電流 $1.57\mu Krms$

5.3 温度計の電圧、温度平均時間を変えての制御

測定される温度揺らぎの中には、本来の温度揺らぎだけではなく、温度計測装置のノイズも混じる。そのノイズに制御が働いてしまうと、揺らぎを増幅させてしまう。なので、今までは温度を 16s 平均化してノイズを減らしていた。しかし、それでは本来の温度揺らぎも消されてしまう恐れがある。ここでは、温度計にかける電圧を調節することで、ノイズを軽減し、その分平均化する時間を短くすることで、本来の温度揺らぎが消されてしまわないようにする。

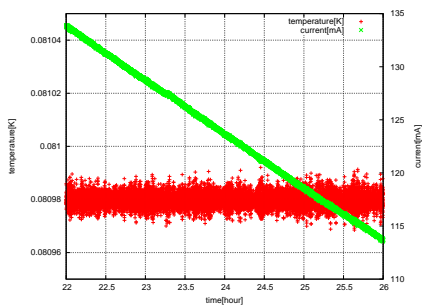


図 7: 75mK での PID+dI/dt 制御 (P=2160,I=12,D=9) 赤:温度、緑:電流 $2.67\mu Krms$

今までは、 $333\mu V$ の電圧をかけていたが、 $1mV$ にすることで、温度の絶対値がずれる代わりにノイズを約 1/10 に軽減することができた。それによって平

均時間を 4s まで短くすることができた。表示温度が $80.98mK$ となっているが、これは電圧が $333\mu V$ の時の $75mK$ に対応する。このときにとった X 線パルスのエネルギー分解能は $3.8 \pm 0.4eV$ と変わらず、分解能に影響を与えるほどの効果は見られなかった。温度揺らぎによる分解能への影響は十分小さくなったといえるが、温度安定度以外の要因が分解能を制限する主要な要因であることが考えられる。

6 まとめと今後

温度制御用の電流源を変え、制御ロジックの見直しを行い、新しい制御プログラムを導入したところ、 $1 - 2\mu Krms$ の温度安定度を保つことができるようになった。それによって分解能の改善には至らなかったが、現時点での最高性能である $3.8eV$ をコンスタントに出せるようになった。そして、温度計のノイズを落とすために温度計にかける電圧を変え、本来の温度揺らぎを見るために温度を平均化する時間を短くした。その結果、分解能に変化は見られなかった。分解能を制限する主要な要因は他にあると考えられる。

今後は、主要なノイズ源となっている SQUID の読み出し系のノイズを軽減することが必要である。

Reference

Cen, R., Ostriker, J.P. 1999, ApJ 514, 1
 Ohashi, T., et al. 2012, SPIE 8443, 844319
 山本重彦, & 加藤尚武 PID 制御の基礎と応用 2005, 朝倉書店
 小竹美里 2014, 第 44 回天文・天体物理若手夏の学校
 篠崎慶亮, 修士論文「断熱消磁冷凍機を用いた極低温 X 線検出器動作環境の構築」, 2003, 東京都立大学
 星野晶夫, 修士論文「断熱消磁冷凍機を用いた精密 X 線分光システムの開発」, 2005, 東京都立大学
 高倉奏喜, 修士論文「X 線マイクロカロリメータ動作断熱消磁冷凍機の温度制御改善を目指した研究」, 2015, 金沢大学