

論文の内容の要旨

論文題目 New Readout Method for High Energy Resolution X-ray Microcalorimeters
(高エネルギー分解能 X 線マイクロカロリメータのための新しい読み出し方法)

氏名 宮崎 利行

X 線マイクロカロリメータは X 線を熱に変換し、その温度上昇から入射光子のエネルギーを測定する検出器である。X 線光子による温度上昇は微小なので、100mK 程度の極低温で動作させる必要があるが、高いエネルギー分解能と高い検出効率とを兼ね備えている。また分散系と異なり、広がった光源からの X 線も分光可能であるため、X 線天文学では特に重要な検出器である。

2000 年 2 月に打ち上げられ、残念ながら軌道投入に失敗した日本の X 線天文衛星 ASTRO-E は、半導体温度計を用いた X 線マイクロカロリメータ XRS を搭載していた。XRS は 0.5–10keV というエネルギー範囲で約 12eV という高いエネルギー分解能を誇り、X 線天文学の全く新しい分野を切り開くことが期待されていた。現在では、より高いエネルギー分解能を実現するため、温度計として超電導薄膜を利用した TES(Transition Edge Sensor) 型マイクロカロリメータの開発が世界的に行なわれており、さらなる性能向上がはかられている。このように X 線マイクロカロリメータは X 線分光器として高い能力を持っているが、これに、同時に撮像能力を持たせ、画像情報とスペクトル情報を同時に得ることができると、X 線天文学の観測に革命的な発展をもたらすことが期待される。

そのためには、一つの検出器上に沢山の画素をおくことが必要となるが、これには大きな困難が伴う。この最大の原因は配線からの熱流入である。従来のように全画素の信号をそれぞれ読み出す方式を採用する限り、ASTRO-E の 32 という素子数はすでに限界である。しかし、広がった天体の撮像と X 線分光を同時行なうためには、X 線望遠鏡の性能を考慮すると 32×32 の約 1000 画素程度が最低限必要である。これだけの素子数を実現するためには、どうしても複数の素子の信号を 1 素子分の配線で伝送するマルチプレクスが必要になる。

X 線マイクロカロリメータでは、最大のエネルギースペクトルを得るためには、一つ一つの光子イベントの波形を十分な時間分解能でサンプリングし、波形処理を行なうことが必須である。また、単純に複数のマイクロカロリメータの出力を加算してしまうとカロリメータ自体の熱揺らぎによる雑音を加算されてしまうため、本質的に高いエネルギー分解能は実現できない。このため、TES 型マイクロカロリ

メータの読み出しに使用する SQUID (超伝導量子干渉素子) を画素の数だけ用意し、それらを高速でスイッチングすることにより時分割でマルチプレクスを行なう方式がアメリカのグループにより提唱された。しかし、たとえば 32 画素の信号を十分な時間分解能でサンプリングするには、少なくとも 10MHz で SQUID をスイッチングさせる必要がある。原理的には SQUID は高速スイッチングに向けた素子ではあるが、現状の素子では 1MHz 程度が限界である。また高速の切替え信号を伝送しなければならない、高速スイッチングを行ないながら安定にカロリメータの信号を読み出す必要があるなど、技術的に越えなければならない高い壁が数多く残されている。

そこで私は、他の画素からのノイズをできるだけ加算せず、しかも 10MHz のスイッチングも画素数分の多数の SQUID も必要としない、X 線マイクロカロリメータの読みだし方式としては全く新しい方式を本論文で提唱した。

それは、マイクロカロリメータに流すバイアス電流を DC から AC に変更し、そのキャリアー信号の周波数を変えることによってマイクロカロリメータ自体の熱揺らぎによる雑音を加算することなく、信号を単純に加算し伝送しようというものである。このような読み出し方法では、信号のパワースペクトルはバイアス周波数の周辺に広がることになるため、バイアス電流の周波数間隔を十分広くとれば、マルチプレクスと高エネルギー分解能とを両立させることができるはずである。

一方、カロリメータを AC バイアスすると、出力にバイアス波形がそのまま現れることになる。TES 型マイクロカロリメータでは、バイアス電流を TES を超伝導遷移端に保つために利用しているので、キャリアー電流の大きさを任意に選ぶことはできず、通常、X 線信号に比べて 2 桁程度大きなバイアス電流が必要である。このバイアス電流によって X 線パルスによる微少な信号が埋もれてしまう。さらに、TES 型マイクロカロリメータの信号読み出し用いる SQUID は、大振幅の交流下では安定動作すら難しい。

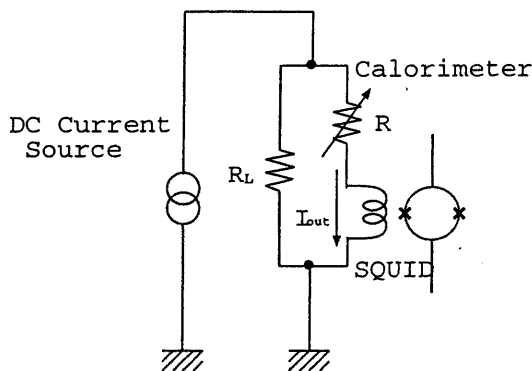


図 1: 一般的な TES マイクロカロリメータの読み出し回路。マイクロカロリメータを DC 電流源でバイアスし、電流の変化を SQUID で読み出す。

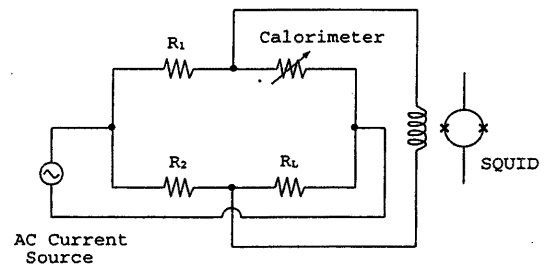


図 2: CABBAGE 方式を用いた TES マイクロカロリメータの読み出し回路。マイクロカロリメータを含むブリッジ回路を AC 電流源でバイアスしている。DC バイアス回路 (図 1) に抵抗を 2 本 (R_1 , R_2) を追加するだけで実現できる。

そこで、キャリアー信号を SQUID よりも前の段階でなんらかの方法で打ち消すことが必要となる。たとえば、キャリアー信号の逆向きの補正信号を SQUID に直接加算するような方式も考えられるが、この方式では補正信号を非常に精密に制御しなければならない。これに対して、マイクロカロリメータを抵抗ブリッジに組み込み、動作点でブリッジがバランスするようにしておけば、X 線イベントのない状態ではキャリアー信号は自動的にキャンセルされているはずである。

私は、このような読み出し方式を CABBAGE (Calorimeter Bridge Biased by an AC Generator) と名付けた。CABBAGE 方式はブリッジ用抵抗の追加という、非常に小さな回路変更でマルチプレクスを実現できる (図 1、図 2)。

本論文では CABBAGE の周波数応答、安定性、雑音の要因とその X 線信号への伝搬について、従来の DC バイアス型マイクロカロリメータ駆動回路との比較を主体とした考察を行なった。この方式では図 2 のように回路を構成する抵抗の数が増えるため、抵抗の熱雑音が増加する。しかし後で述べるように、100mK 以下の極低温では抵抗の熱雑音のエネルギー分解能への影響が、熱揺らぎによるものに比べ

て十分小さくなるため、これはあまり大きな問題にはならない。

私は上記の理論的な考察を実証するために、実際にチタン-金薄膜を温度計に用いた 2 素子の TES 型マイクロカロリメータで X 線パルスの読み出し実験を行った。極低温での信号の加算には、入力コイルが 4 つついた多重入力型の SQUID を用いた。これは、極低温での信号加算のために新たに開発したものである。また実験には取り扱いの容易な ^3He クライオスタットを用い、マイクロカロリメータを約 400mK まで冷却した。

この実験では、2つのマイクロカロリメータでそれぞれブリッジ回路を構成し、まず始めに、DC バイアスで X 線の検出を行なって素子ごとのエネルギー分解能を求めた。使用したマイクロカロリメータは、構造の問題から熱化の揺らぎによるノイズレベルが高く、エネルギー分解能を追求することはできなかった。しかし、この結果と雑音の伝搬についての考察に基づいて、マイクロカロリメータを CABBAGE 方式を用いて交流で駆動したときの、各ノイズ成分の寄与を見積もった。表 1 に示されるように、方形波によりバイアスすると、もう一方のカロリメータの熱揺らぎによる雑音を加算されなくなる分だけ、分解能が改善することが期待される。

表 1: エネルギー分解能のまとめ。DC バイアス時の結果からの見積もり。ただし値はマイクロカロリメータの熱化の揺らぎの効果を取り除いたもので、単位は [eV]

		計		ノイズ源							
				熱雑音							
				マイクロ カロリメータ		ブリッジ 抵抗		ショート 抵抗	SQUID	熱揺らぎ	
				結果	見積もり	i_{RA}	i_{RC}	i'_{RA}	i'_{RC}	i_{short}	i_A
A [eV]	DC	880 ± 150	-	318	186	333	205	217	111	442	442
	交流	840 ± 150	800	401	207	370	228	241	123	442	-
C [eV]	DC	560 ± 100	-	192	113	201	124	131	67	303	303
	交流	3700 ± 500	500	213	148	223	138	146	74	-	303

実際に 10kHz と 20kHz の交流でバイアスし動作させたところ、二つの画素の中で、どちらの画素が X 線を検出したかは、信号のキャリアー周波数から明確に区別できることがわかった。エネルギー分解能については、DC バイアスの実験に基づく見積り値と誤差の範囲で一致することがわかった。

以上から、CABBAGE 方式の動作特性と雑音の伝搬についての考察を実験的に実証することができた。この実験では動作温度が高かったため、抵抗の熱雑音の影響が大きくなった。しかし、動作温度を下げるとマイクロカロリメータの熱容量がデバイの T^3 則に従って小さくなるために信号が大きくなり、相対的に熱雑音の影響が小さくなる。その他の雑音の影響についても、温度でスケールして評価することが可能である。表 4 は動作温度を ASTRO-E XRS と同じ 65mK にとって雑音のエネルギー分解能への寄与を見積もったものである。この温度では熱雑音の影響は非常に小さくなり、エネルギー分解能はほとんどマイクロカロリメータの熱揺らぎによって決まる。素子数を増やすと、全ての素子の熱揺らぎを加算して読み出す DC マルチプレクスではエネルギー分解能が大きく悪化するのに対し、熱揺らぎを加算せずに信号を読み出せる CABBAGE 方式を用いたマルチプレクスでは、エネルギー分解能の劣化を押えて多素子の読み出しが可能である。

このように複数素子のマイクロカロリメータを同時に読み出す上で、CABBAGE 方式は非常に有効である。そこで私は図 3 のような構成で CABBAGE 方式を利用した 32×32 画素のマイクロカロリメータアレイの概念設計を行った。この時のエネルギー分解能の見積もりは約 4eV であり、CABBAGE 方式を用いれば 1000 画素の撮像マイクロカロリメータで 5eV 以下のエネルギー分解能は十分実現可能であるといえる。

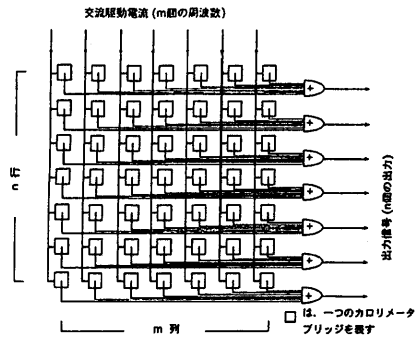


図 3: CABBAGE を用いたマイクロカロリメータアレイのマルチプレクス読み出し

図 4: 動作温度を 65mK に下げた場合のエネルギー分解能の見積もり。単位は [eV]

		計	ノイズ源			
			熱雑音		SQUID	熱揺らぎ
			マイクロ カロリメータ	ブリッジ 抵抗		
DC [eV]	1ch	3.2	0.20	-	0.29	3.2
	32ch	18	1.1	-	0.29	18
CABBAGE [eV]	1ch	3.2	0.23	0.24	0.33	3.2
	32ch	3.7	1.3	1.4	0.33	3.2