# 講演番号 P7-002 TES型X線マイクロカロリメータの開発現状

大石詩穂子、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、赤松弘規、石川久美、阿部祐輝、辺見香理、榎祟利、榎島陽介、 細谷竜治 (首都大)、満田和久、山崎典子、竹井洋、吉武宏、関谷典央、平社航、酒井和広 (ISAS/JAXA)、 藤本龍一、星野晶夫、谷津貴裕、國久哲平、山本亮 (金沢大)、篠崎慶亮 (JAXA/ARD)、佐藤浩介 (MIT)、 前田龍太郎 (産総研)、師岡利光 (セイコーインスツル)、田中啓一 (エスアイアイ・ナノテクノロジー)

我々の研究グループでは高分光性能 (ΔE ~ 2 eV)と数100ピクセルの撮像能力を有するTES (Transition Edge Sensor) 型X線マイクロカロリメータの開発を行っている。TESカロリメータは Au,Tiの二層薄膜からなり、X線光子による素子の温度上昇を、超伝導遷移端の急激な抵抗変化を利用して測る検出器である。グループ内で『素子開発』 『回路開発』 『冷凍機開発』の全てを 行っており、ミッシングバリオン探査衛星DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) をはじめとする将来の衛星搭載へ向け、素子のアレイ化技術の確立や読み出し系の信号多重化、検出 器動作に必要な断熱消磁冷凍機の開発を行なっている。また、電荷交換反応の地上応用実験を視野に入れた冷凍機開発にも力を注いでいる。



DIOS 計画 (Díffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) ダークバリオン探査ミッション DIOS計画とは、宇宙に広がる電離した銀河間物質からの酸素 輝線検出を通じて中高温銀河間物質(WHIM: ダークバリオン)の



Ezoe+, IEEE TAS in press Ishisaki+, 日本物理学会,2010 Oishi+, 応用物理学会,2010 Ezoe+, 日本天文学会,2010





流体シミュレーションによる 宇宙の大構造の物質分布 a: ダークマター b: 銀河団 (> 10<sup>7</sup> K) c: 銀河 (< 10<sup>4</sup> K) d: WHIM (10<sup>5</sup>-10<sup>7</sup> K)

存在とその物理的諸性質を探る小型科学衛星である。酸素輝線を 精密分光することで、0 < z < 0.3 の範囲にあり宇宙の大規模構 造に沿って分布するWHIMを直接検出できる。WHIMは100万度 程度の温度をもつ希薄なガスで、現在の宇宙のバリオン量の約 50%を担っていると推定されている(Danforth&Shull+05)。 左図に示すように、WHIMは他の温度域のバリオンに比べて、 暗黒物質が作る大構造の良いトレーサーになることが宇宙流体シ ミュレーションから予測されている (Yoshikawa+04)。 これらの観測を実現するためには高いエネルギー分解能と撮像 能力を兼ね備えた検出器が必須であり「TES型X線マイクロカロ リメータ」が最も有力である。 ▶計画の詳細はS3-09 (大橋) 、搭載予定の光学系の開発はP3-160 (杉田) ■要求性能 📟 分光能力 → 2 eV 程度の高いエネルギー分解能 撮像能力 → > 256素子以上のアレイ検出器 (面積: 1 cm<sup>2</sup>)

\* TES型N線マイクロカロリメータ





#### 1ピクセルを読み出すための 超伝導積層配線デザイン

左が上から見た図、右が断 面図である。50-100 nm 厚の上部・下部配線がコン タクトホールで接触する。



衛星搭載を実現するためには、16×16ピクセル以上のアレイデザインで、5 eV 以下の高い分光 能力を持つ素子が必要である。このような密集した大規模ピクセルの実現においては、基板上の 配線スペースの確保が難しく、ピクセル間のクロストークも問題となる。

我々は、~10 μm 幅の配線をSiO2の絶縁膜を挟んで重ね合わせた積層配線 (micro strip)の試作 を行った。配線にはAIやNbの超伝導物質を使用し、1 cm 角の基板スペースに 500 μm ピッチで 世界最大級である20×20の400ピクセル分の配線形成に成功した。電流が折り返すことで磁場も 打ち消される。抵抗を測定したところ、断線に対する歩留まりは95%~97%と良好であった。現 在は配線上にTESを成膜し、RT特性を確認しており、最終的にTESカロリメータとして動作さ せ、良い性能を目指す。

#### X-ray Mícrocalorímeters

入射したX線光子の1つ1つのエネルギーを、素子内部の温度上昇として測る検出器である。 素子を~100 mK で動作させ、数 mK の微小な温度上昇を高感度の温度計で計測する。

### TES; Transition Edge Sensor (超伝導遷移端温度計)

TESは超伝導物質を使用した温度計である。超伝導-常伝導遷移端での数 mK 幅の急激な抵抗 変化により素子の温度上昇を計測する。エネルギー分解能は入射エネルギーによらず、素子内 部のフォノン数の揺らぎ等に起因し、次式で与えられる。

$$\Delta E_{(FWHM)} \cong 2.35 \sqrt{\frac{4k_B T^2 C}{\alpha}} \sqrt{\frac{n}{2}(1+2\beta)(1+M^2)} \quad [eV]$$

ここで温度計感度  $\alpha$  は抵抗 Rと温度 Tを用いて  $\alpha = d \ln R/d \ln T$  で表される。温度計に半導体を 用いた場合は $\alpha < 10$ であるが、TESでは  $\alpha ~ 100-1000$  と優れた感度を持つ。 $\beta$ はTESの電流 感度であり、 $\beta = d \ln R/d \ln l$  で表される。また*M*はExcess noise factor、*n*は熱伝導度の温度依 存性を表す項 (*G* = *KnT<sup>n-1</sup>, n* = 3-5) である。



#### Hirakoso+, 日本物理学会,2010



信号多重化の概念図

## (3) 断熱消磁冷凍機の開発

Shinozaki+, 日本天文学会,2010 Henmi+, 日本物理学会, 2010

TES型マイクロカロリメータは100 mK 以下の極低温で動作させる。我々のグルー Alalloy Outer Shell プでは信頼性が高く、宇宙空間でも使用可 能な断熱消磁冷凍機 (ADR) の開発を行っ Support shells ている。ADRユニット (冷媒カプセル・ ヒートスイッチ・マグネット)を複数直列に<sup>130KAI</sup> 繋げることで、軽量小型で低磁場でも比較<sup>30KAI</sup> 的高温(4 K)より100 mK 以下を実現でき る。現在は2段式ADRのサイクルを実証 し、50 mK の到達を確認できている。

TESのアレイ化で必須となる、信号多重化技 術にも取り組んでいる。マイクロカロリメータは 極低温で動作させるため、配線からの熱流入や システムの複雑化が問題となる。そこでこれら の問題を解決するのが、極低温で複数の信号を まとめて読み出す"信号多重化"である。我々の グループでは、個々の素子を1 MHz 以上の周波 数で交流駆動し、信号を変調して周波数空間で の区別を行う周波数分割方式を採用している。 モデルパルスの入力に対して5 MHz までの駆動 に世界で初めて成功している。 開発状況の詳細はP7-031 (平社)







LHe tank

CPA GGG

多価イオン衝突装置



第11回 宇宙科学シンポジウム 2011年1月5日-1月7日

Enoki+, 日本天文学会, 2010



Si (Li) 検出器による予備実験