

超伝導転移端(TES)型 X線マイクロカロリメータによる 宇宙観測と地上応用

満田和久

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 (ISAS/JAXA)

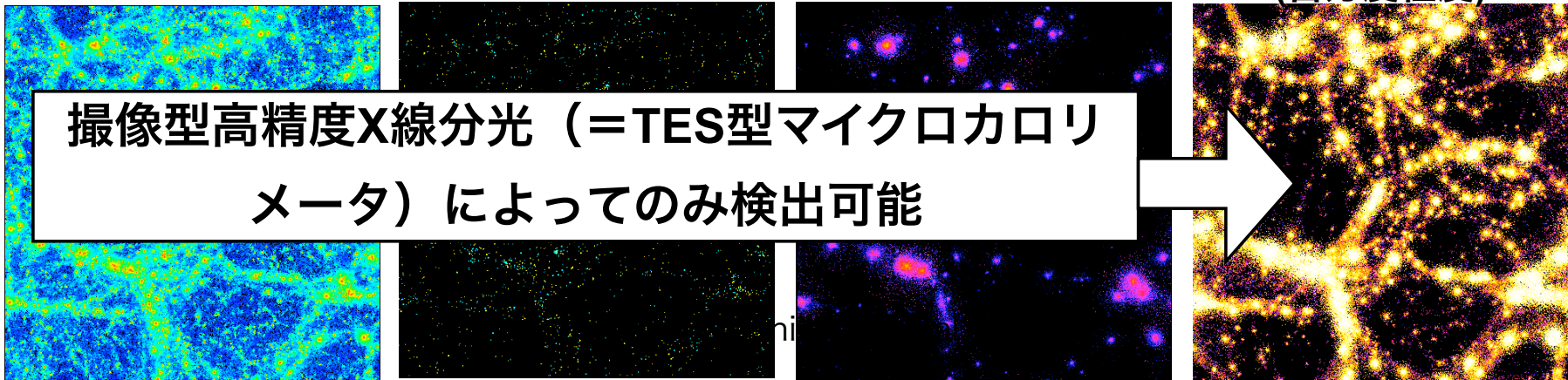
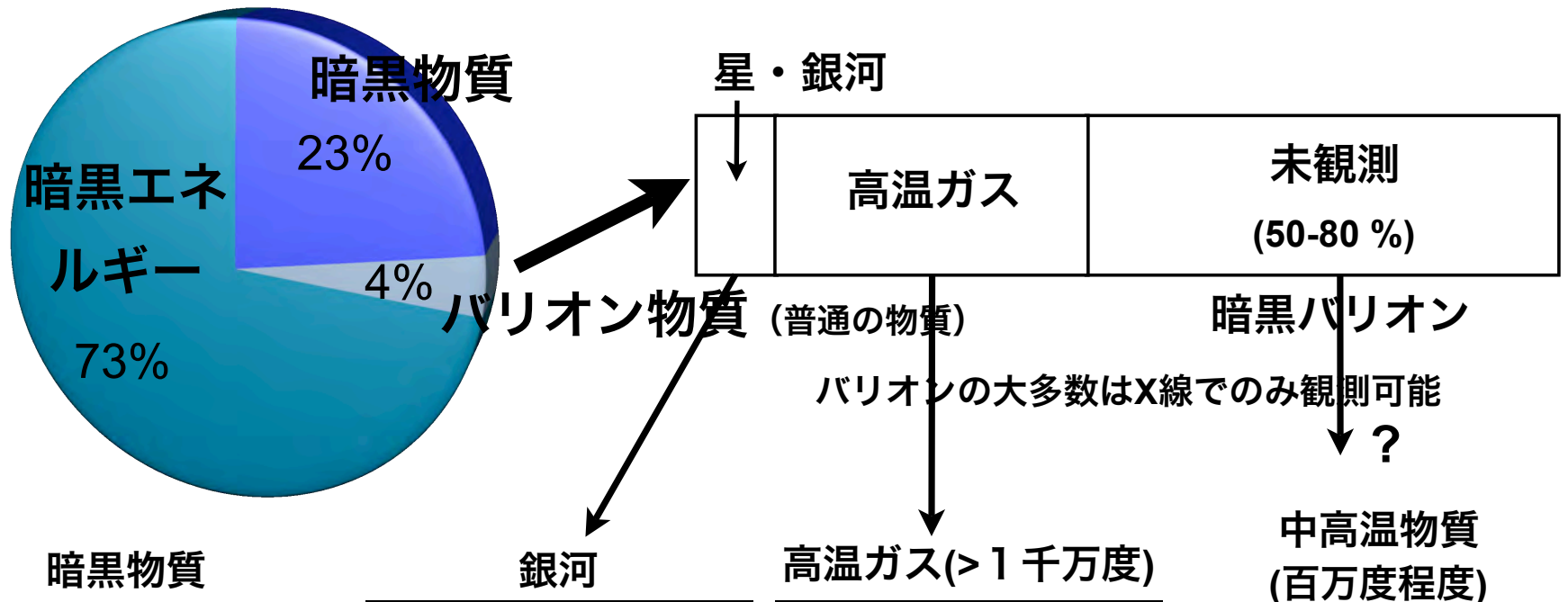
the TES μ -calorimeter

ISAS/JAXA-首都大-早稲田大-SIINT collaborationを代表して

概要

- X線撮像と精密分光を両立する観測によって、高エネルギー宇宙観測の新しい扉を開きたい。
 - 暗黒バリオンと宇宙の大構造の直接測定
 - 宇宙の大構造の形成と進化過程の直接検出
 - 宇宙の原子核合成の現場を直接検証
- TES型マクロカロリメータアレイを開発
 - 軟X線用、硬X線用TES マイクロカロリメータ
 - 極低温信号多重化によるアレイ読み出し
- TES型マクロカロリメータの地上応用
(宇宙観測は実現までに時間がかかる。.)
 - 地上プラズマ診断 (= 実験室宇宙物理学への第一ステップ)
 - X線微量分析

宇宙の物質/エネルギー組成

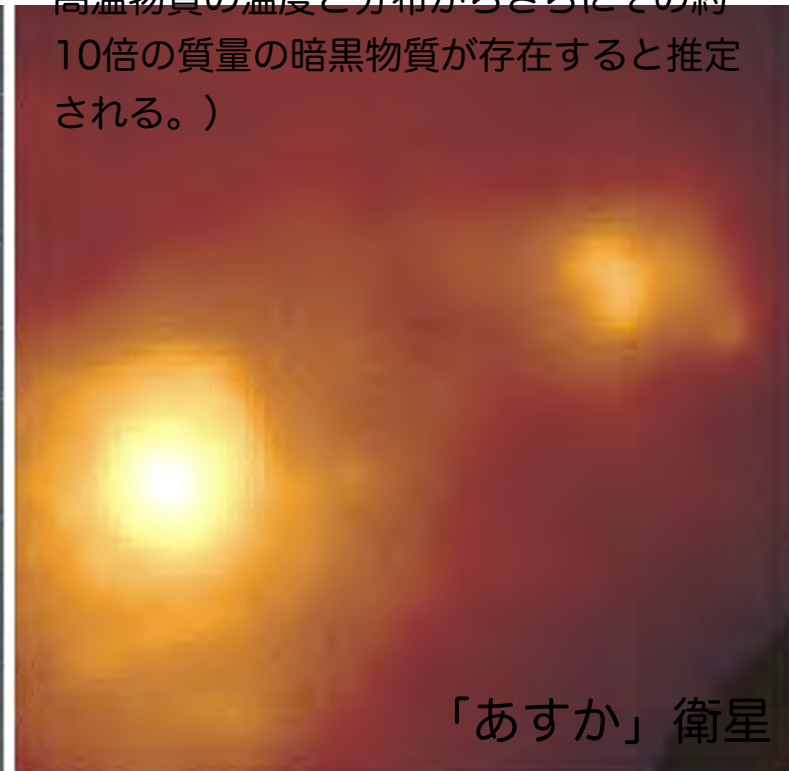


銀河団

可視光：銀河

X線：約1億度の高温物質

(高温物質の質量は全銀河の5倍程度。
高温物質の温度と分布からさらにその約
10倍の質量の暗黒物質が存在すると推定
される。)

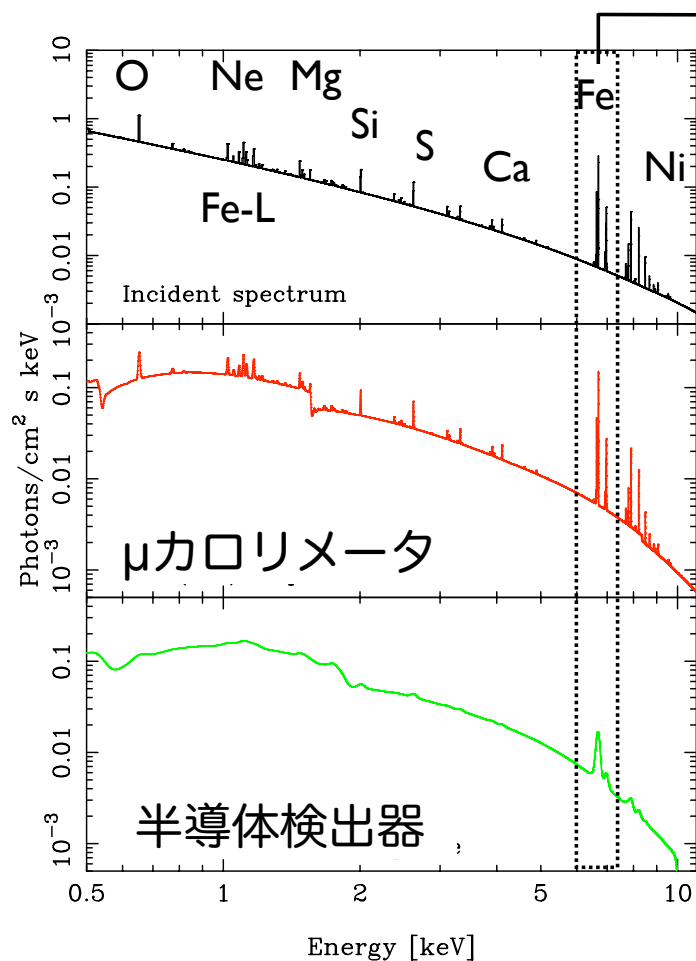


おとめ座銀河団

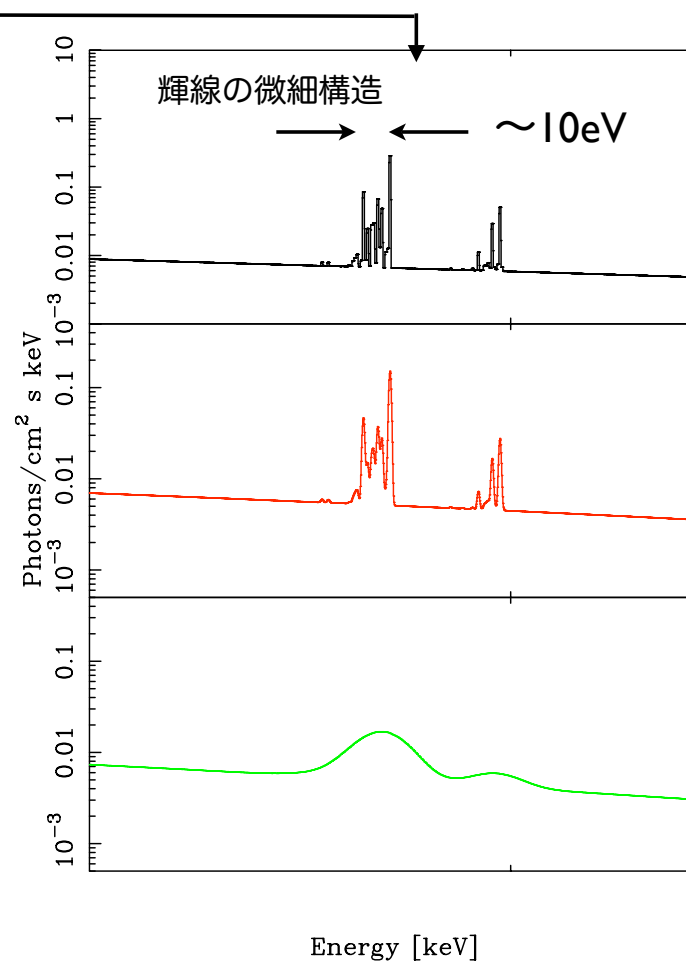
高温ガスからのX線

宇宙の高温ガスから予想される典型的なX線スペクトル

Thin thermal emission ($kT = 5\text{keV}$, $Z = 0.3 Z_{\text{sun}}$)

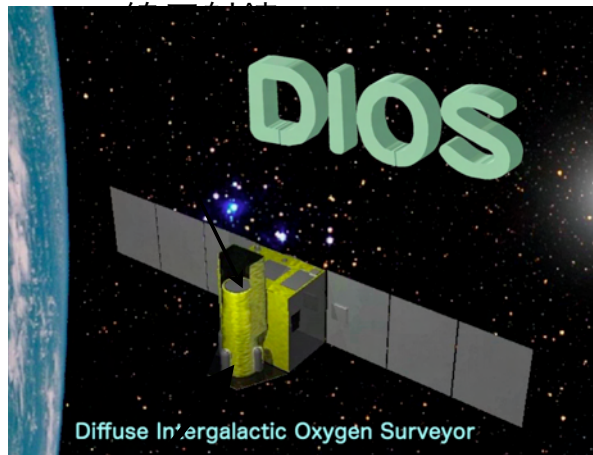


Thin thermal emission ($kT = 5\text{keV}$, $Z = 0.3 Z_{\text{sun}}$)

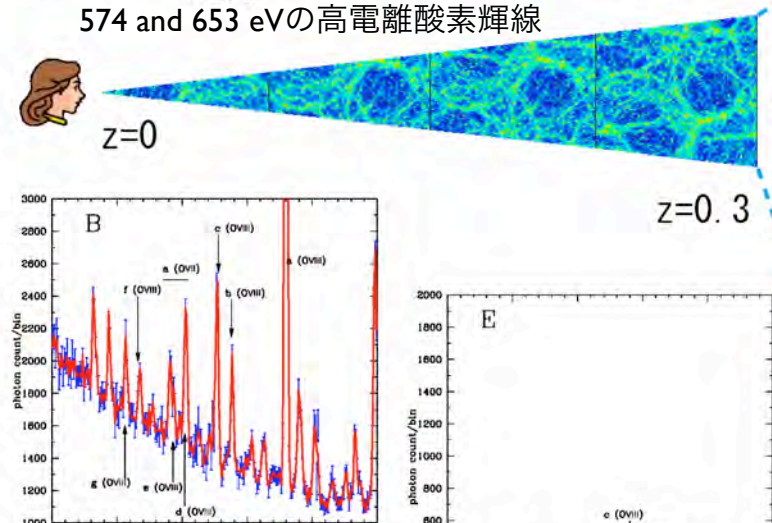
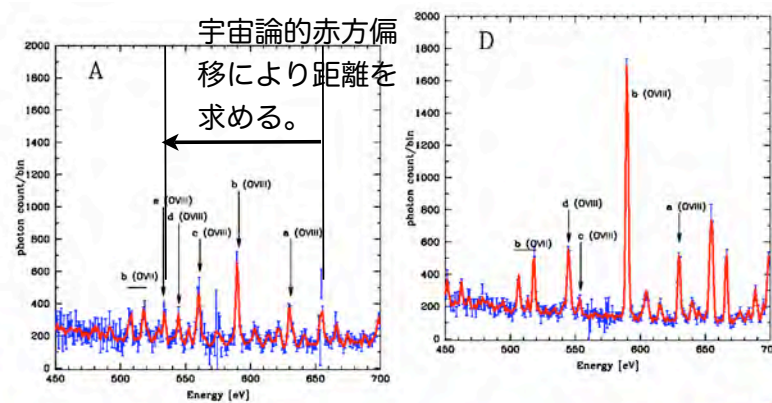


暗黒バリオンを捉え、それが描き出す 暗黒物質の分布を精密に測定する

微弱な輝線を検出し、距離を決定するため
にTES型μカロリメータが不可欠

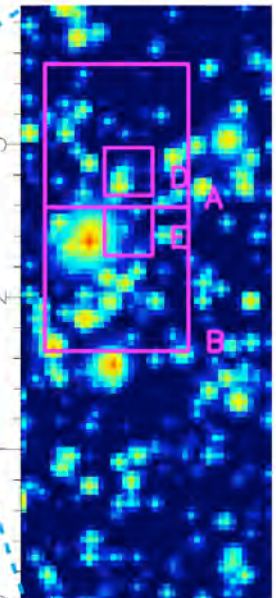
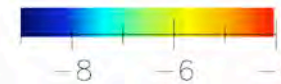


TES型マイクロカロリメータアレイ
エネルギー範囲: 0.3 -1 keV
エネルギー分解能: 2eV
アレイフォーマット: $\geq 12 \times 12$
全面積: $\geq 1 \text{ cm}^2$



観測のシミュレーション

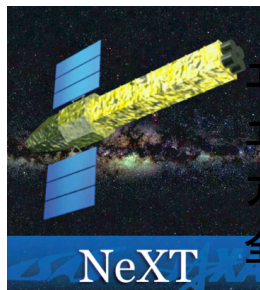
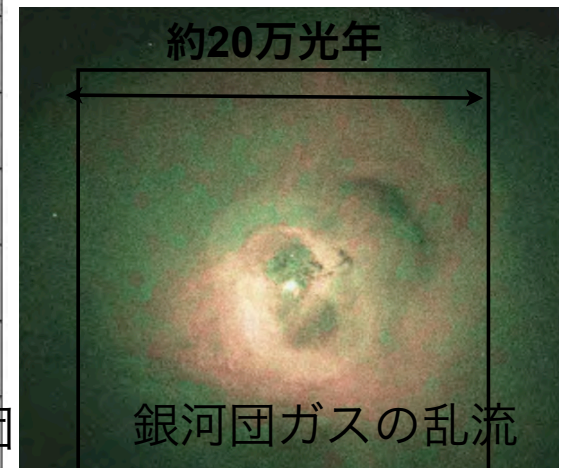
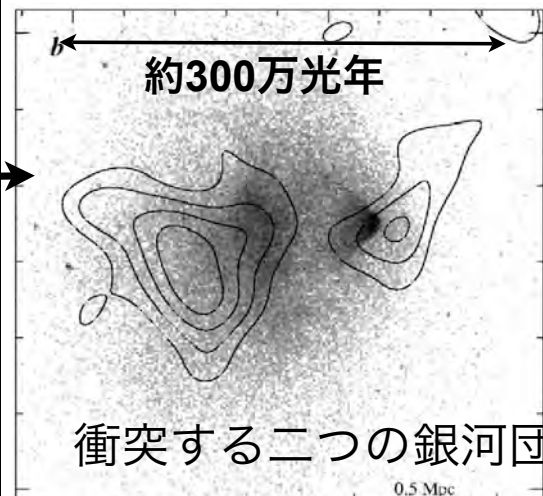
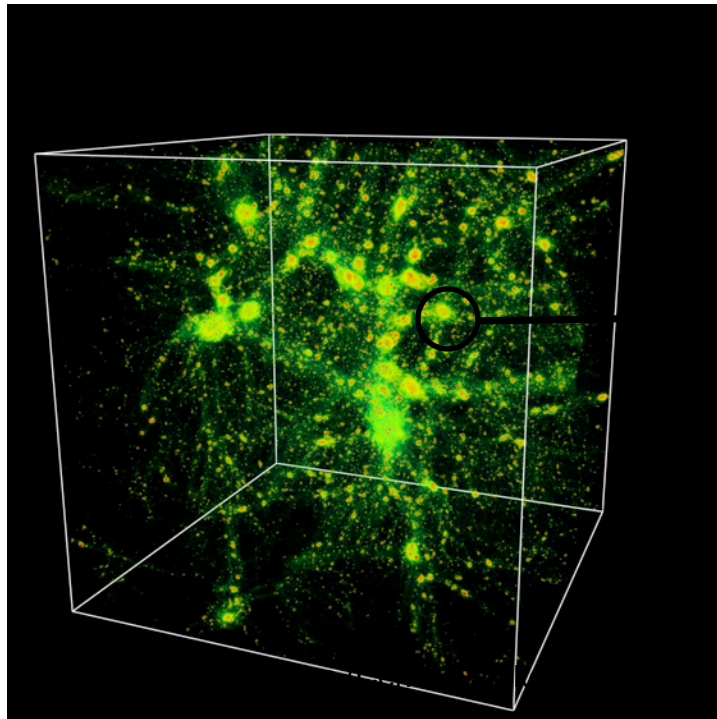
Log S_x [erg/s/cm²]



宇宙の構造進化

宇宙の大構造の主要要素である銀河団は、衝突と合体で進化していると考えられている。

速度測定にTES型μカロリメータが不可欠



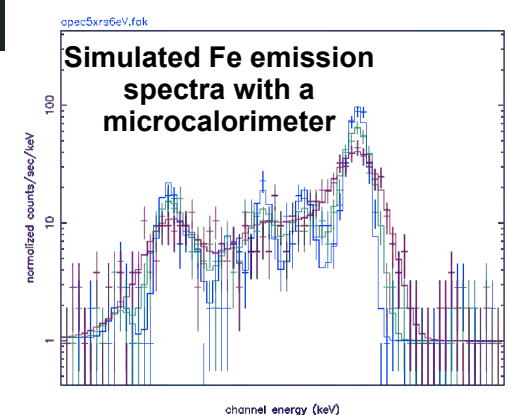
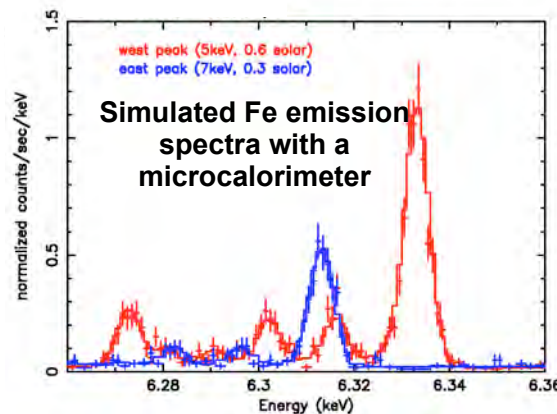
エネルギー範囲: 0.3 -10 keV

エネルギー分解能: 5eV

アレイ: $\geq 16 \times 16$

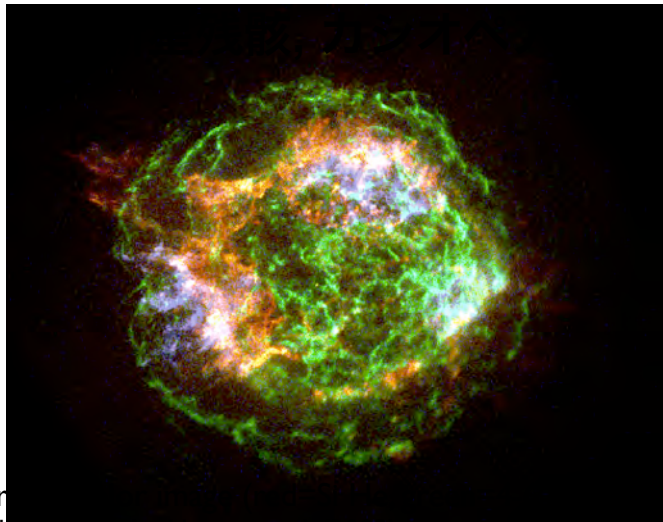
全面積: $\geq 1 \text{ cm}^2$

NeXT

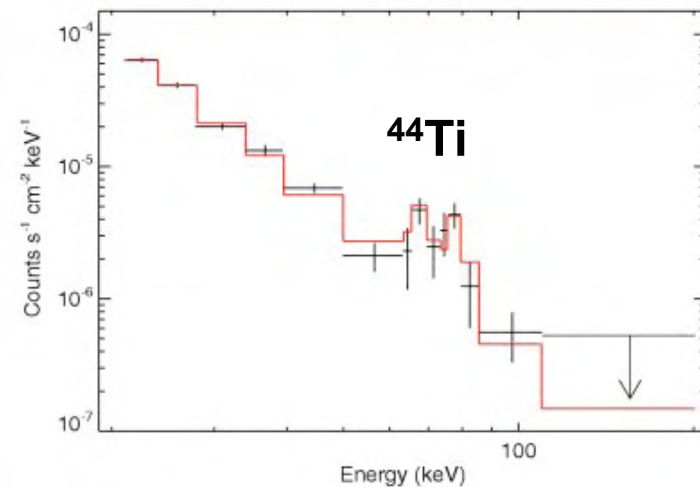
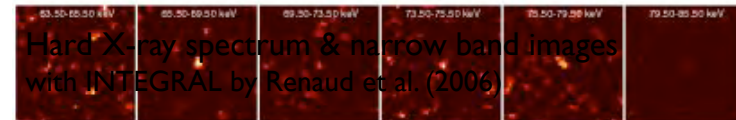


原子核合成

水素ヘリウム以外の元素は星の中で作られた



X-ray image of a supernova remnant (Fe K) with Chandra by Hwang et al. (2003)



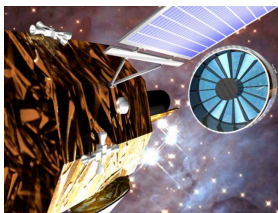
^{44}Ti からのガンマ線 (67.9, 78.4 keV)

超新星爆発の内部構造の理解の鍵

我々の銀河系内の最近 (~数100年)の超新星爆発の診断



カシオペア-A内の運動の測定
 エネルギー範囲: 10 -100 keV
 エネルギー分解能: 20eV
 アレイ: $\geq 6 \times 6$
 全面積: $\geq 1 \text{ cm}^2$



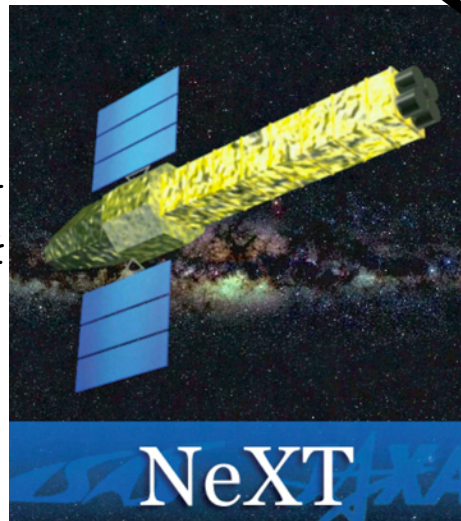
銀河中心領域のサーベイ
 エネルギー範囲: 10 -100 keV
 エネルギー分解能: 20eV
 アレイ: $\geq 16 \times 16$
 全面積: $\geq 1 \text{ cm}^2$

将来計画

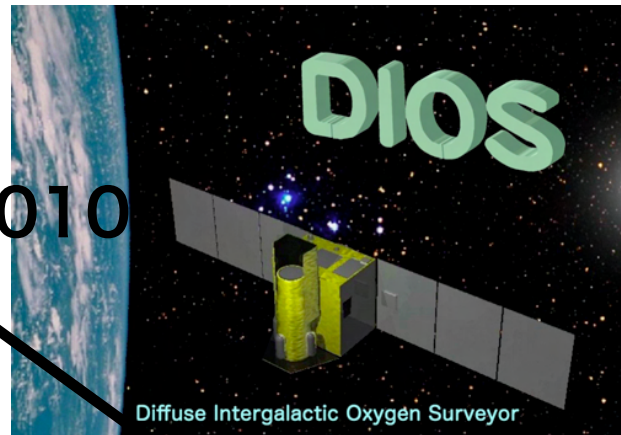
気球観測：
カシオペア-Aからの
 ^{44}Ti γ 線観測



1.7トン中型衛星
宇宙の大規模構造形成とそ
れに伴う粒子加速の解明を
めざす。TES μ カロリメー
タは運動測定をめざす。



2010



400kgの小型衛星
ダークバリオンの検出と、
それが描き出す暗黒物質
の3次元構造の測定をめざ
す。TES μ カロリメータは
ダークバリオンからの微弱
な信号検出に不可欠。

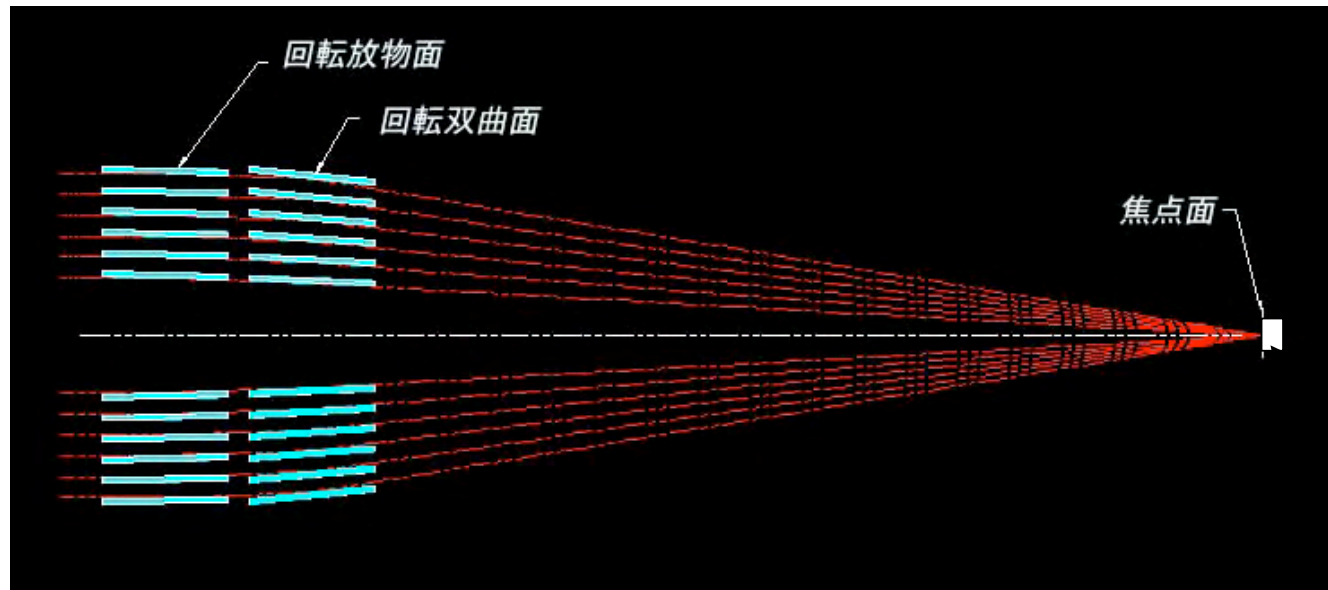
国際協力大型計画

有効面積100 m² の巨大なX線望遠鏡
を2台の衛星で実現。宇宙初期の天体
からのX線を分光する。

2020



X線の集光と結像



<1度程度の斜入射による金属表面での全反射を利用

焦点面X線検出器



すざく衛星の反射鏡

	XRT-S	XRT-I
焦点距離	4.5m	4.75m
直径	40cm	39.9cm
ネスト数	168	175
反射面	金	金
重量	18kg	18kg

TES型μカロリメータによる分光

μカロリメータ

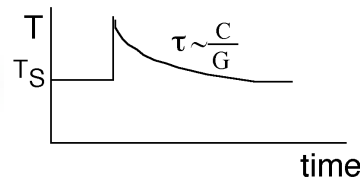
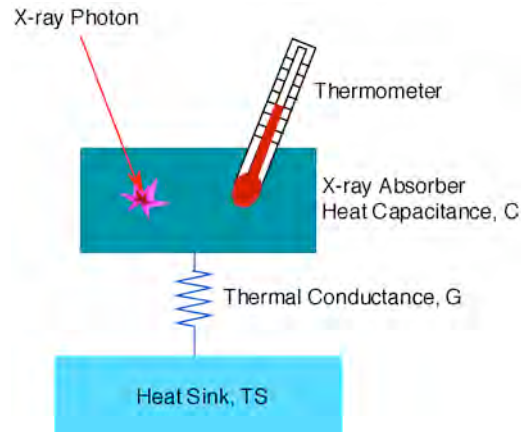
高分解能($E/\Delta E=100-1000$)

1に近い検出効率

アレイ化により撮像と両立可能

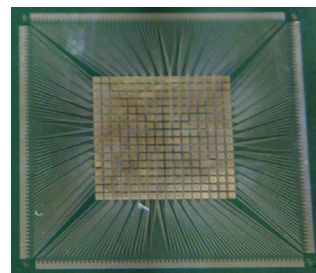
TES型

高感度温度計で、より高いエネルギー分解能と高速応答



$$\Delta E = 2.36\xi\sqrt{kT^2C}$$

16x16アレイ

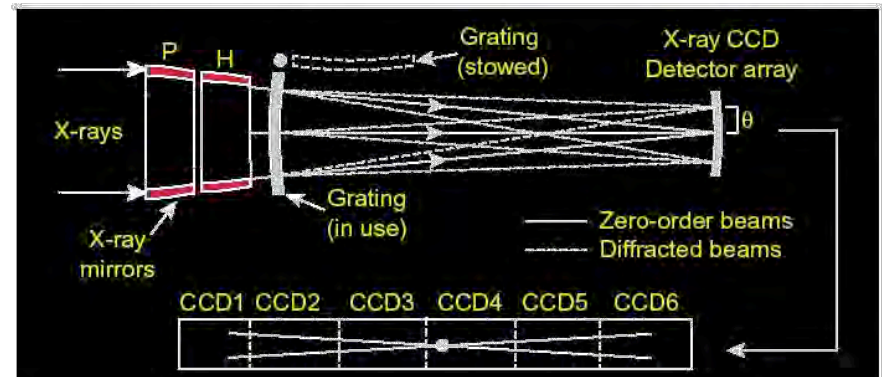


分散型分光器 (Gratingなど)

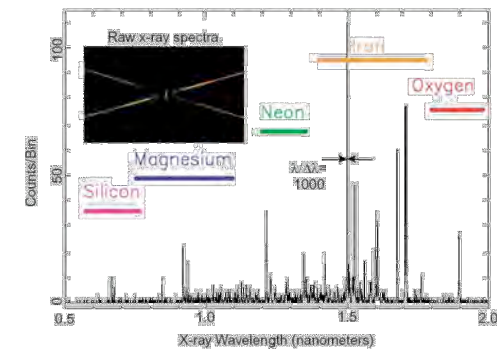
高分解能($E/\Delta E=100-1000$)

検出効率が低い

点源に対して高いエネルギー分解能
が得られ、撮像との両立は難しい



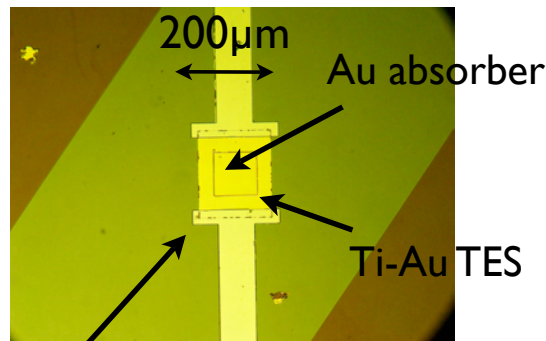
Chandra Observatory X-ray Spectrum of Binary Star Capella



(<http://asc.harvard.edu/>)

TES μ カロリメータ開発 (1)

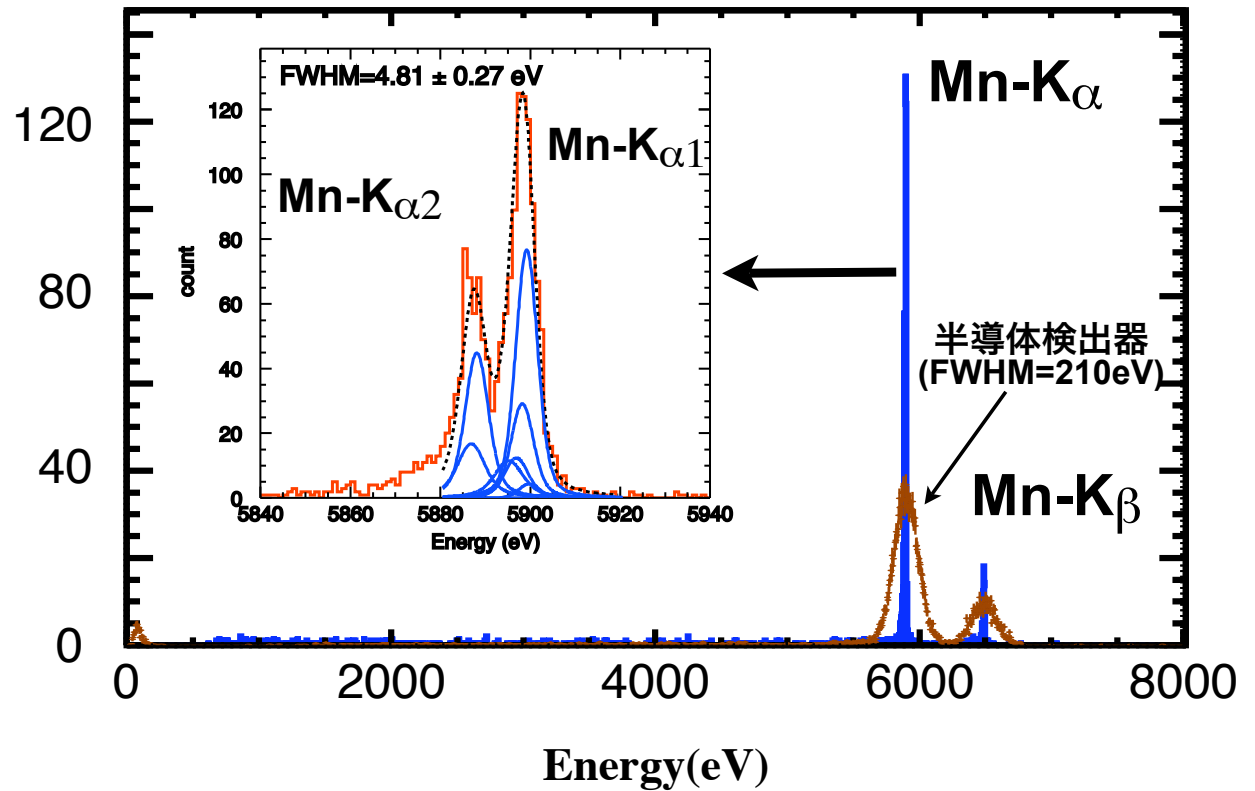
軟X線用検出器



SiNx membrane (熱リンク)

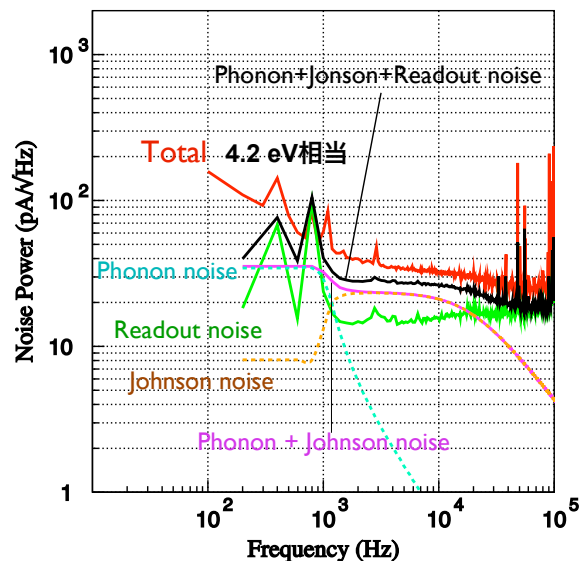
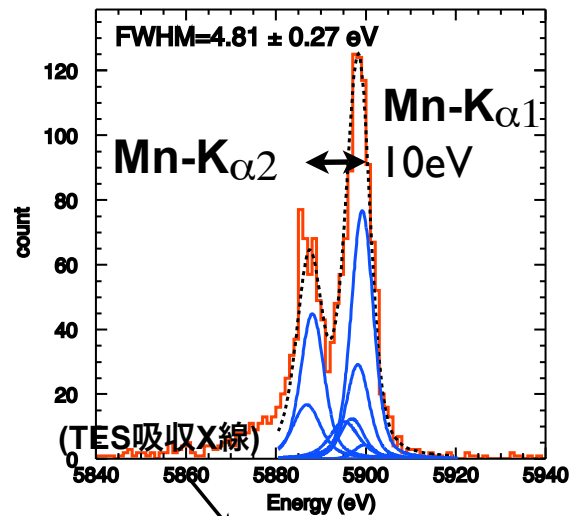
動作温度 100mK

(宇宙機構+首都大 製作素子)



Kurabayashi et al. 2007

エネルギー分解能を決めている要因



4.2 eV

2.6 eV

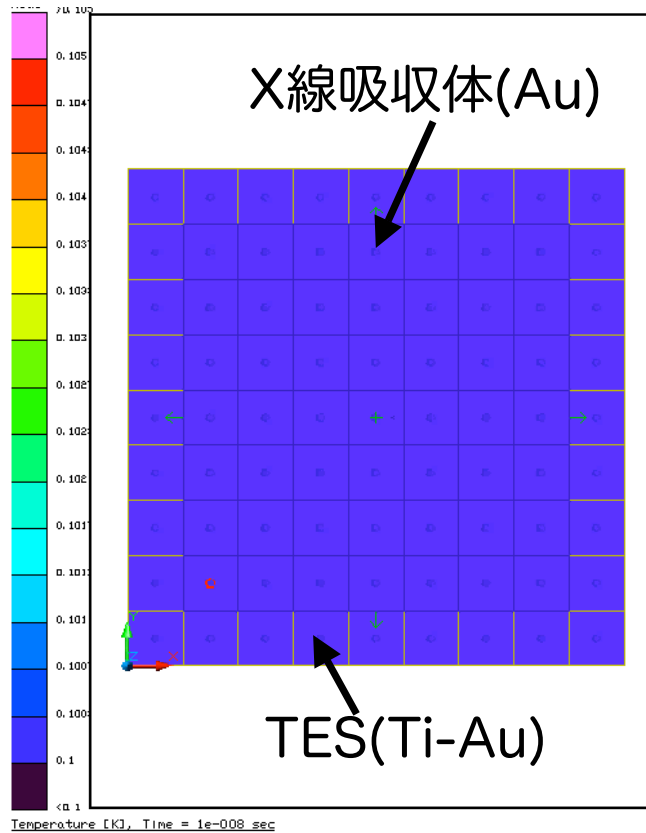
$$4.8^2 = 2.1^2 + 1.5^2 + 3.3^2 + 2.3^2 \text{ eV}^2$$

- 波形のX線吸収位置依存性
- “超過”雑音(これも原理的な雑音?)
 - 非定常効果 (Irwin 2006)
 - Vortex 雑音 (e.g. Galeazzi 2004)
 - クーパー対数の揺らぎ (Seidel 2004)
- 読み出し(SQUID)雑音
- 原理的な雑音 (Moseley et al. 1984, Mather 1982)
 - 熱揺らぎ (熱浴との間のランダムな熱の流れ)
 - TES抵抗の熱雑音

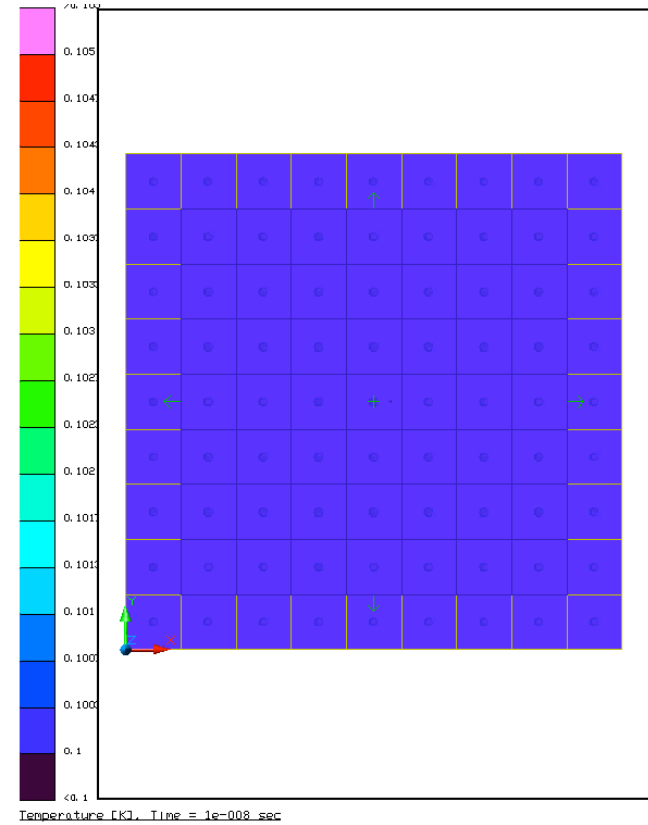
注：上記の式では、近似的に分解能を4つの項に分配した。

X線吸収位置依存性シミュレーション

角に入射

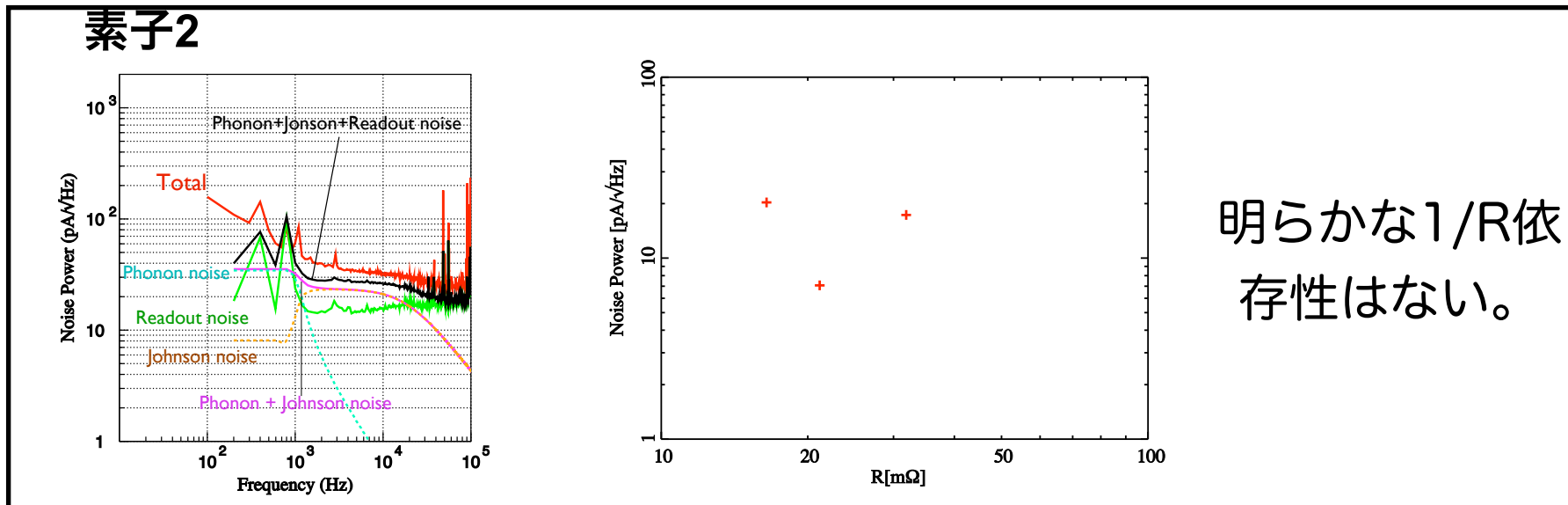
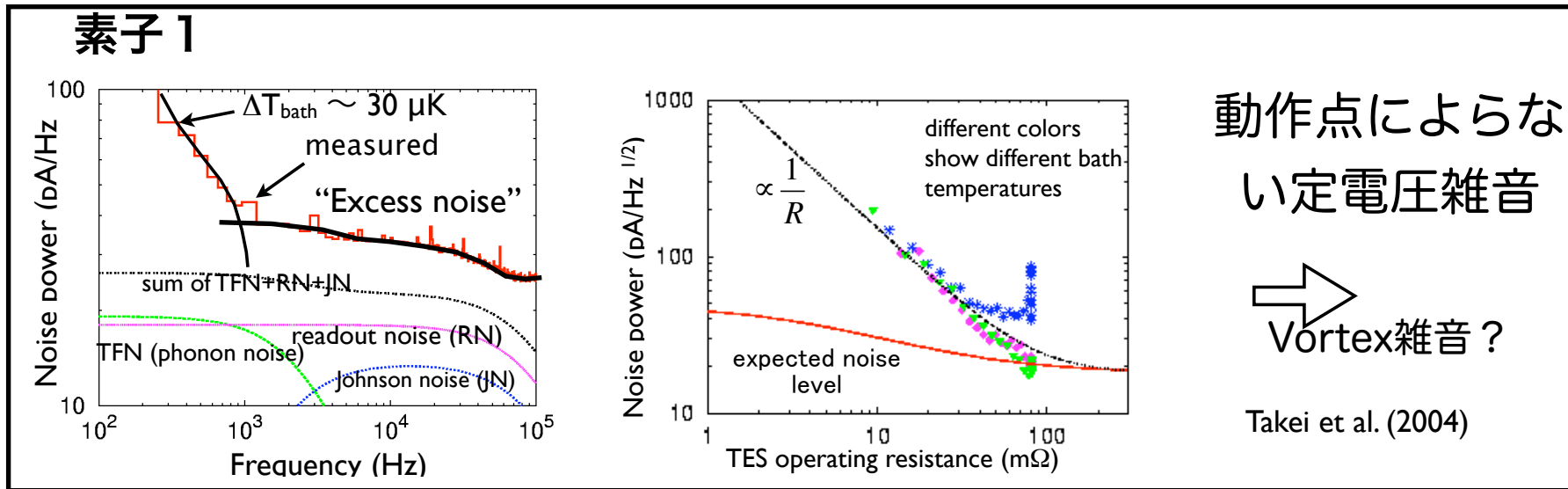


中心に入射



(X線入射から10 μ 秒までのmovie)

“超過”雑音の性質

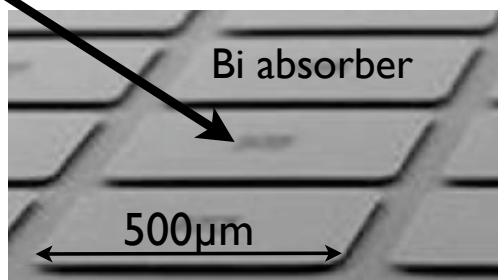


TES μ カロリメータ開発 (2)

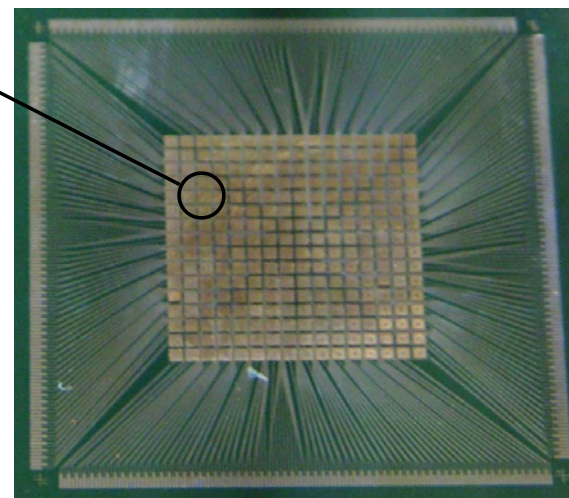
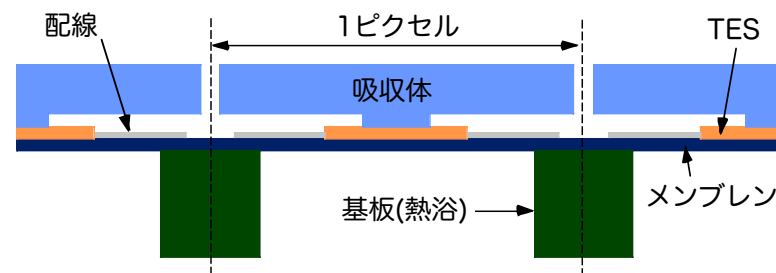
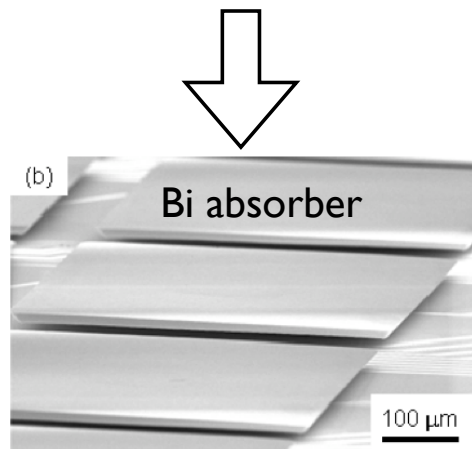
マッシュルーム型ビスマス吸収つき16x16 軟X線用アレイ

中心部に機械的、熱的問題

初期の試作



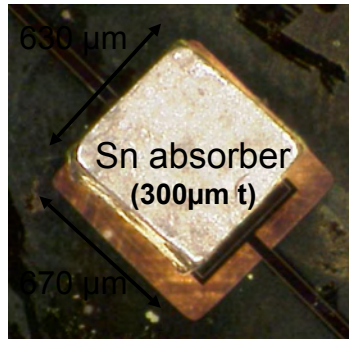
最近の改良



Kudo et al. 2004, Satoh et al. 2005

TES μ カロリメータ開発 (3)

硬X線 / γ 線検出器

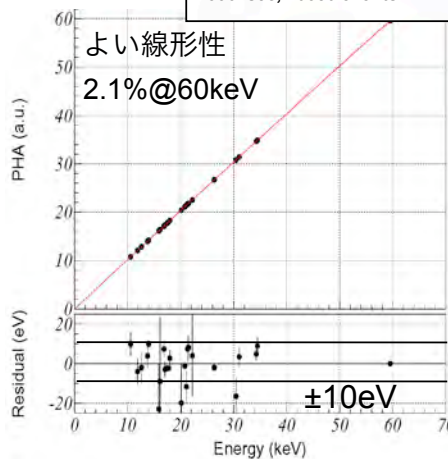
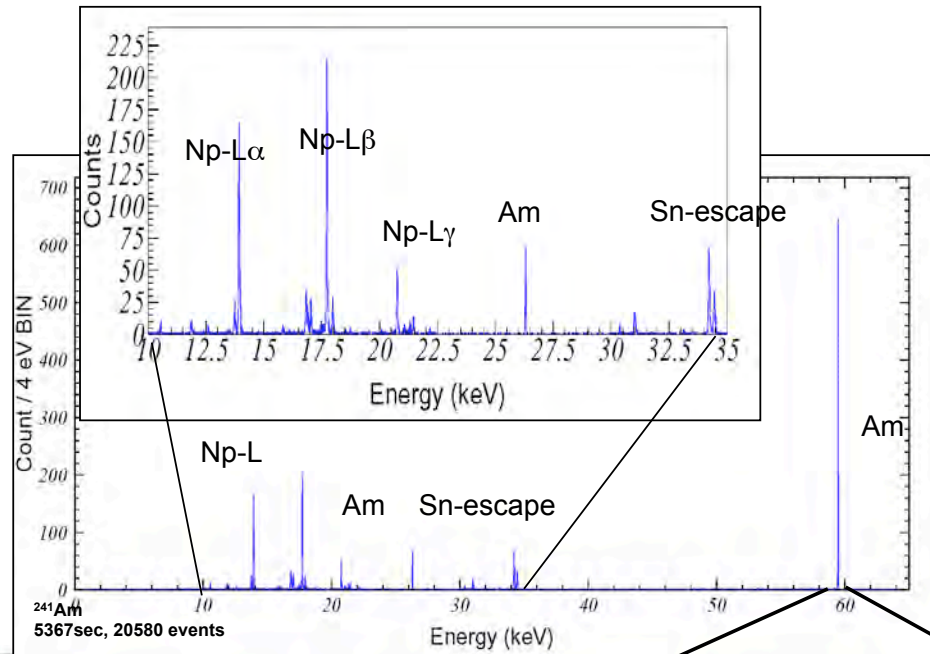
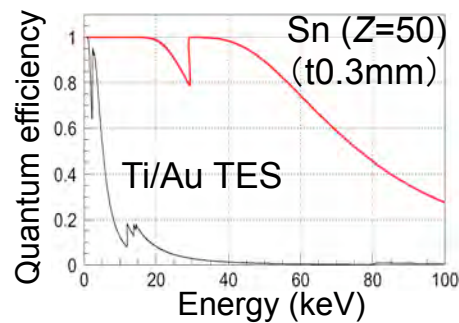


動作温度 100 mK

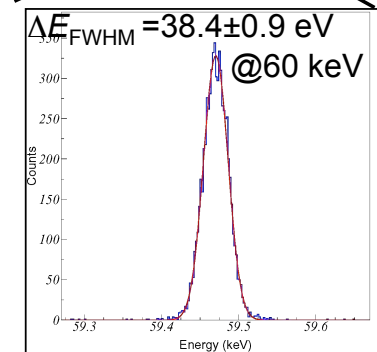
SIINT製軟X線用素子に錫の吸収体を装着

検出効率

80% @ 60 keV



GeやCdTeなどの半導体検出器に比べて30倍以上優れたエネルギー分解能



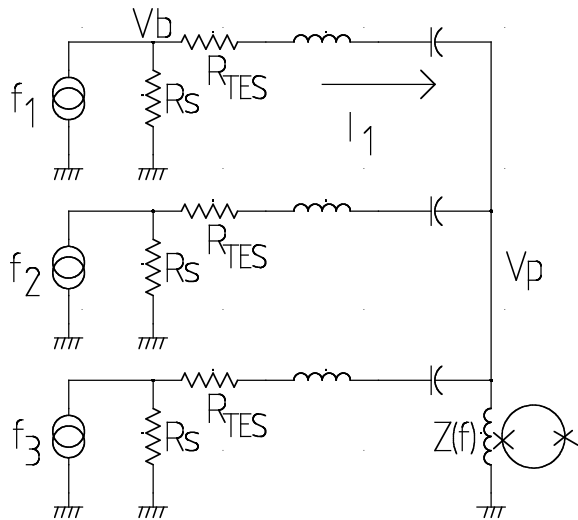
Oshima et al. 2006

TES μ カロリメータ開発 (4)

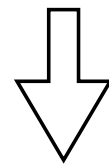
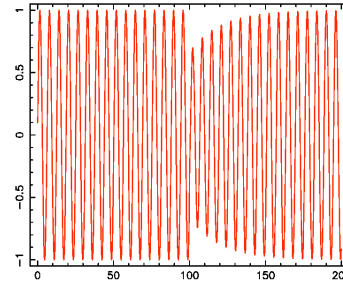
アレイ読み出し

周波数分割信号多重化

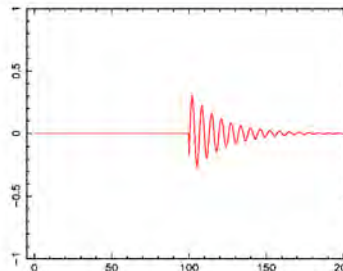
2画素加算実験



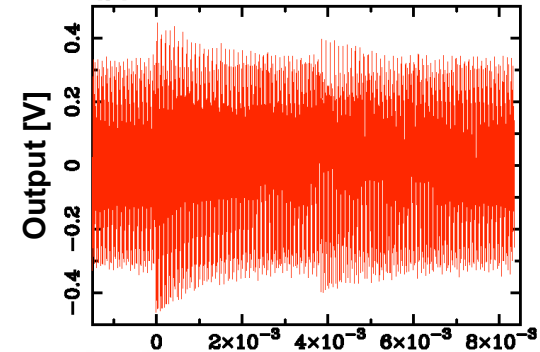
AC-駆動カロリメータ



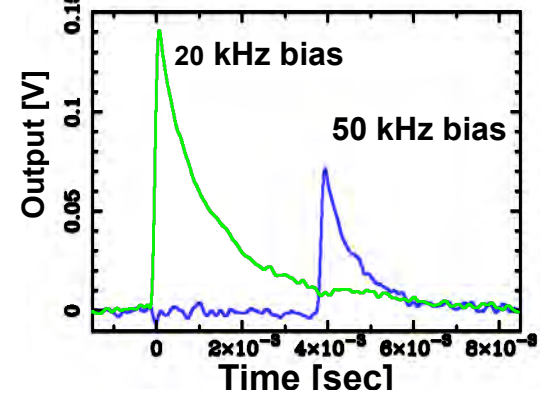
Carrier nulling



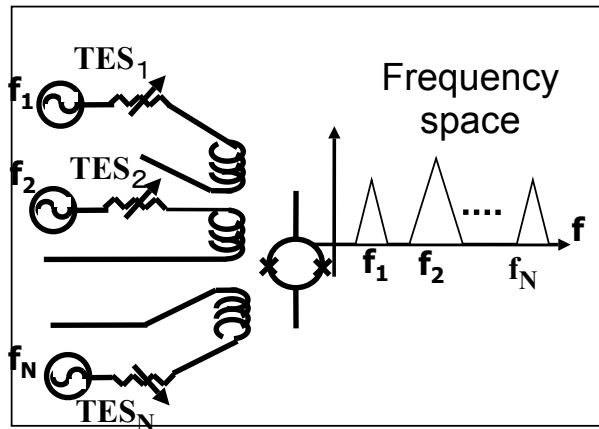
生信号波形



復調処理後



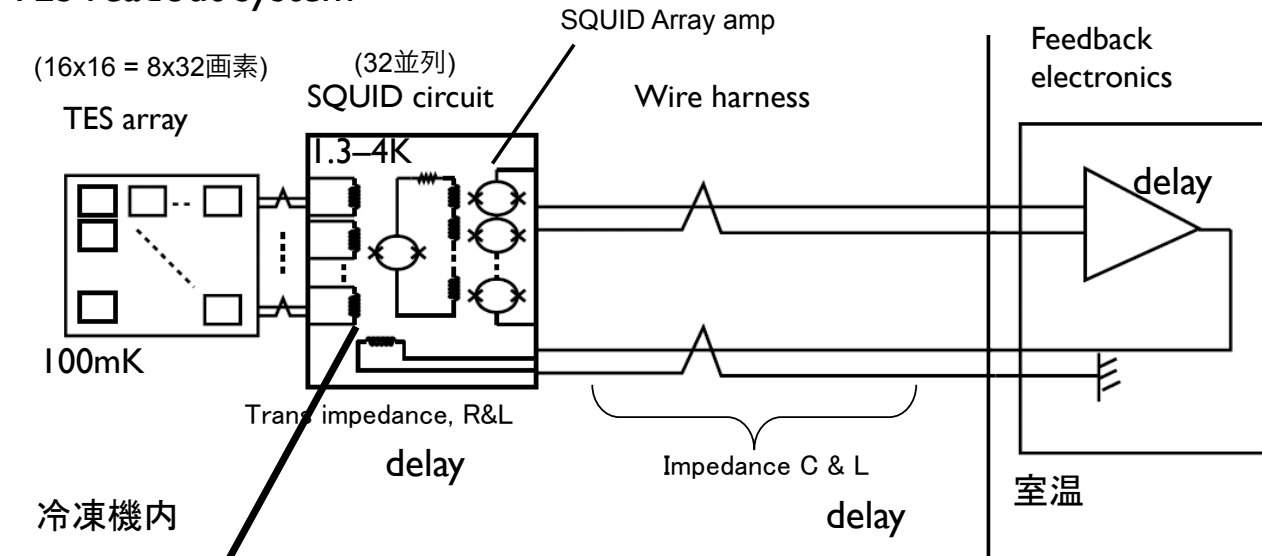
Iyomoto et al. (2004)



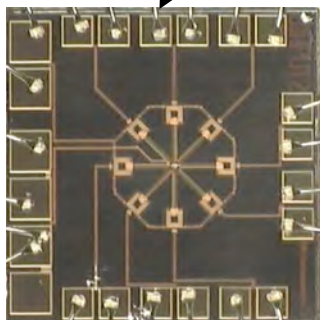
Miyazaki et al. (2002)

8-画素多重化に向けて

TES readout system



“summing point = feedback point”

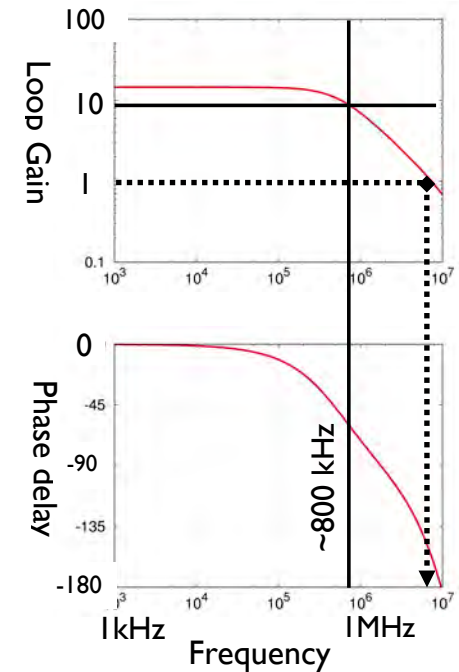


- 200 kHz から 1MHzの8周波数
- 高速SQUID FLL システムが必須
- 現状のシステムでは冷凍機内の配線がボトルネック

新規に開発した8入力SQUID

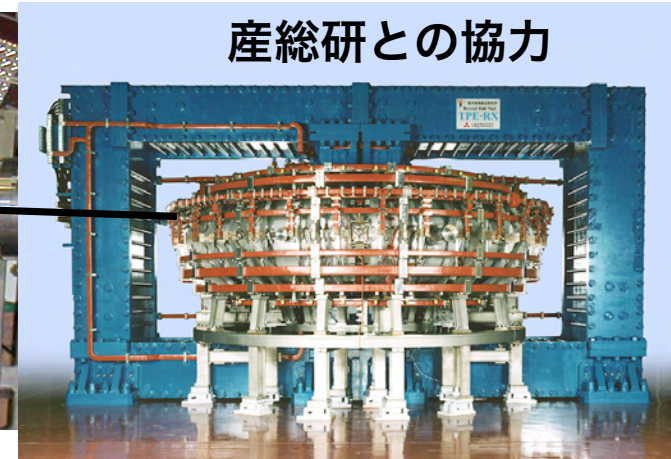
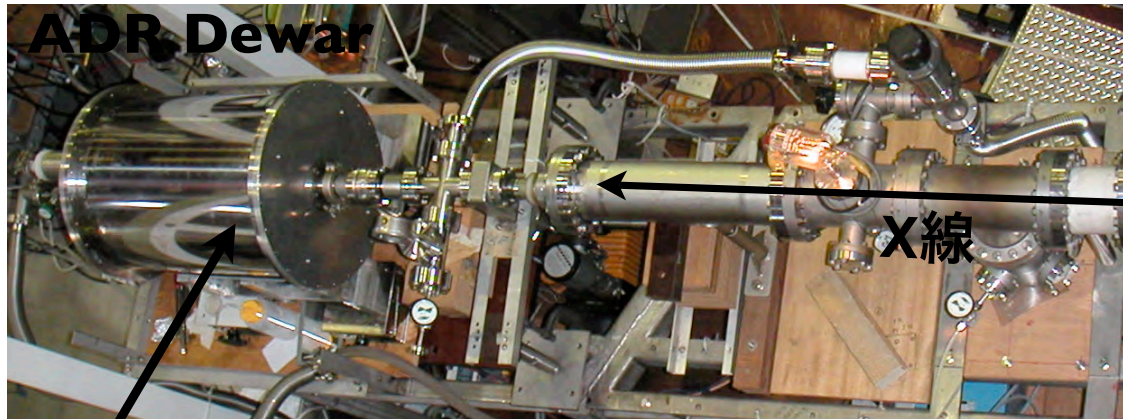
Yamasaki et al. 2006

現状の回路性能



地上応用 (1)

地上プラズマの診断



Soft X-ray TES (inside Dewar)

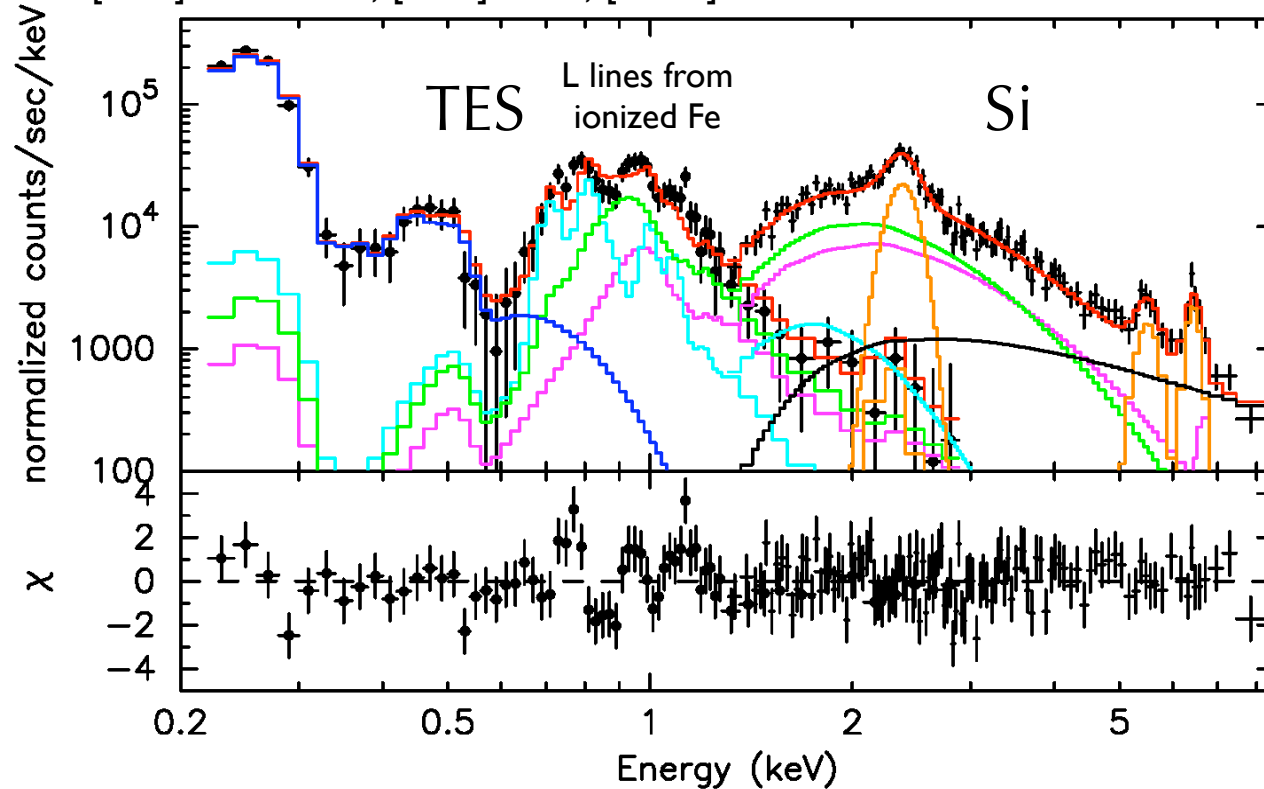
- 産総研 逆ピンチプラズマ装置 (筑波)
- 重水素プラズマ
 - 温度(kT)=約600 eV
 - 密度 x 持続時間 = 10^{11} - 10^{12} cm⁻³ sec
- TESで測定する目的
 - 不純物濃度の測定
 - 電子温度の決定

宇宙のプラズマに近い状態



$kT=75\text{eV}, 330\text{eV}, 800\text{ eV}, 1.02\text{ keV}, \Gamma=1.7$

$[\text{C}/\text{D}]=1.5\times 10^{-4}, [\text{O}/\text{D}]<10^{-5}, [\text{Fe}/\text{D}]=1.2\times 10^{-5}$



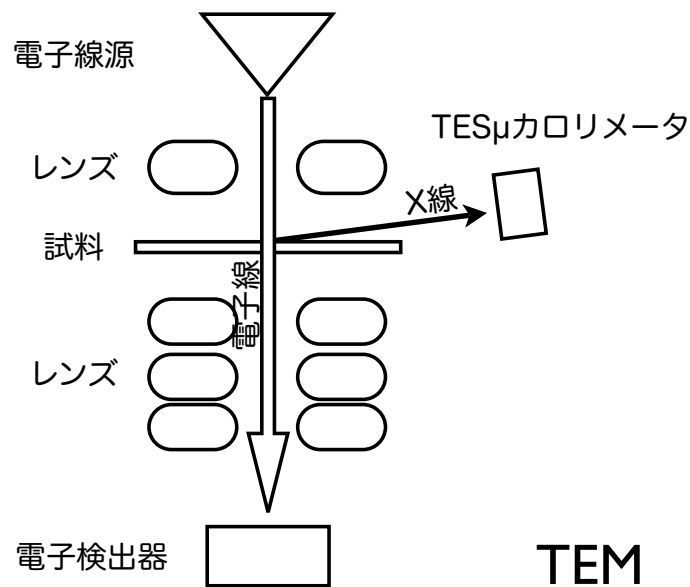
Shinozaki et al. 2006

- コンデンサーバンクを放電する際の巨大な電磁干渉によりエネルギー分解能は50eVまで悪化してしまった。
- それでも、プラズマの電子温度が多温度であること、炭素と鉄の存在量を決定。

地上応用 (2)

X線微量分析

物質・材料研究機構、SIINT、JAXA、九州大学、日本電子



● 目的

● 透過型電子顕微鏡 (TEM) への実装と分析の実証

- TEM環境でのTESμカロリメータの動作
- 冷凍機のTEM動作への影響
- ある程度の高計数率 (3 kcpc) とエネルギー分解能 (<10eV) の両立

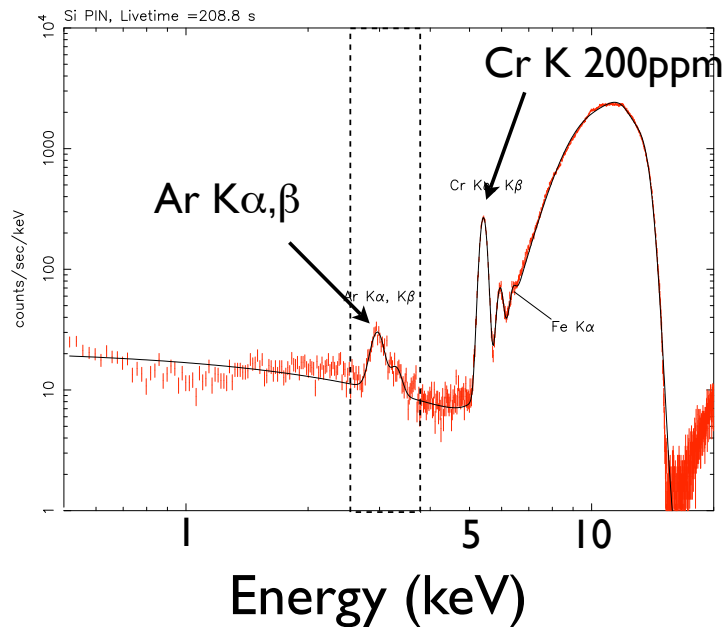
● 2006年8月から研究を開始

X線微量分析のシミュレーション

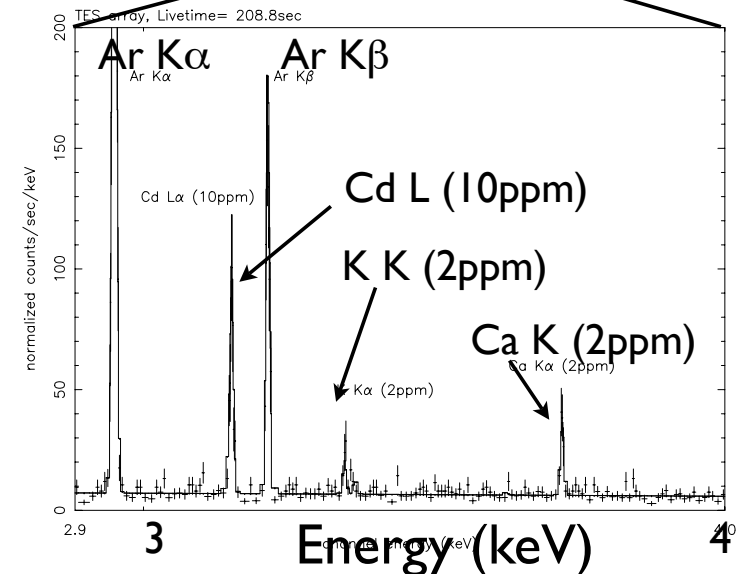
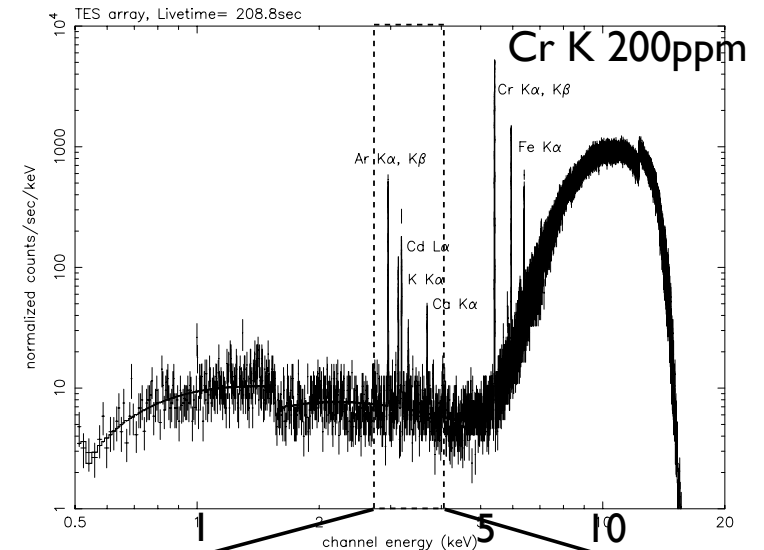
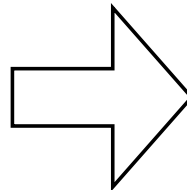
TES array (シミュレーション)

TEM(電子線励起)ではなく、X線励起の場合のシミュレーション

Si-PIN検出器 (実データ)



100ppmから
1ppmへ



どちらも積分時間は約210秒

まとめ

- X線撮像と精密分光を両立する観測は、高エネルギー宇宙観測の新しい扉を開く。
 - 暗黒バリオンと宇宙の大構造の直接測定
 - 宇宙の大構造の形成と進化過程の直接検出
 - 宇宙の原子核合成の現場を直接検証
- TES型 μ カロリメータアレイを開発
 - 軟X線用、硬X線用TES μ カロリメータ
 - 世界最高レベルの $4.8\text{eV}@5.9\text{keV}$, $38\text{eV}@60\text{keV}$ のエネルギー分解能、256画素アレイを製作
 - 極低温信号多重化によるアレイ読み出し
 - 8入力型SQUIDによる周波数分割信号多重化
- TES型 μ カロリメータの地上応用
 - 地上プラズマ診断 (= 実験室宇宙物理学への第一ステップ)
 - X線微量分析