



TES型X線マイクロカロリメータの エネルギー分解能更新と その要因究明

宇宙物理実験研究室

阿部 祐輝

研究背景

次世代X線天文衛星 DIOS

→ Missing baryonの大規模構造を探る



WHIM(中高温銀河間物質:

10万~1000万度の希薄なガス)

として存在していると予言

→酸素輝線の分布からWHIMの分布を理解

→ダークマターの分布の解明



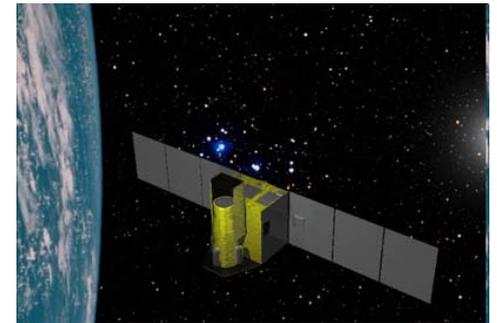
そのために...

①我々の銀河からの放射と区別

②redshiftから奥行き方向を決定



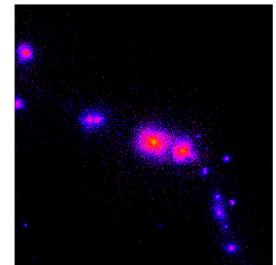
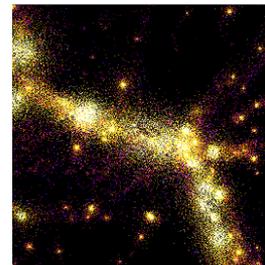
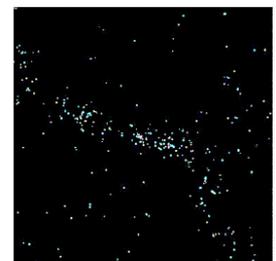
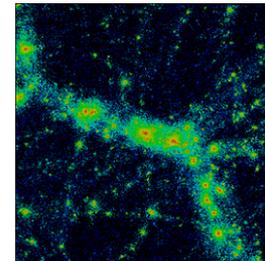
2eV程度の分解能が必須!!



PI: 首都大 大橋
2015年打ち上げ提案中

ダークマター

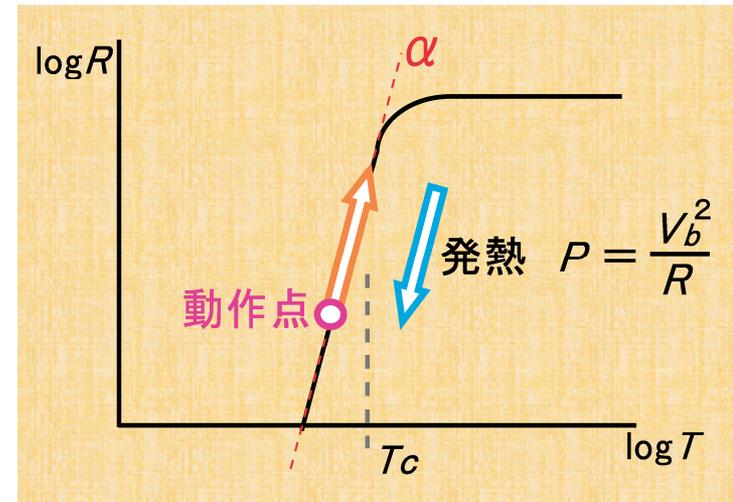
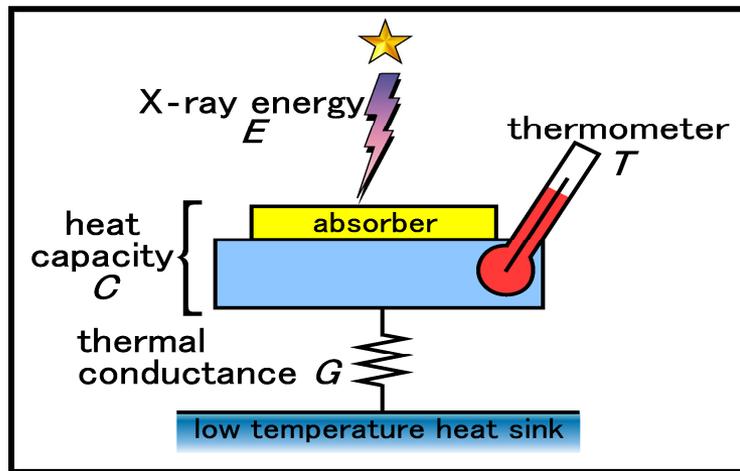
銀河(1万度)



WHIM(10万~1000万度) 銀河団(1000万度~)

TES型X線マイクロカロリメータとは

- X線光子のエネルギーを素子の温度上昇として検出する装置
- TES温度計(Transition Edge Sensor):
超伝導遷移端を温度計として利用



エネルギー分解能

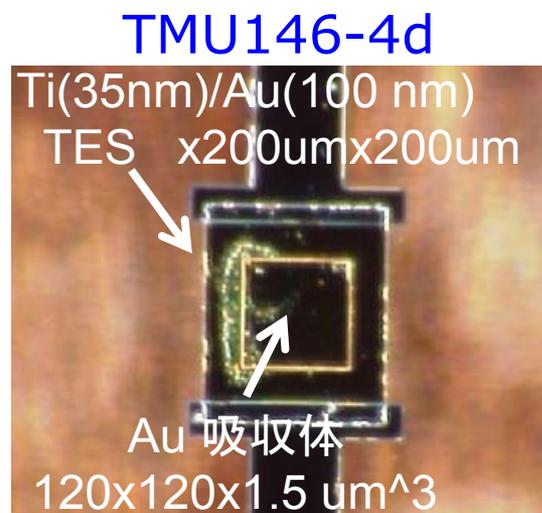
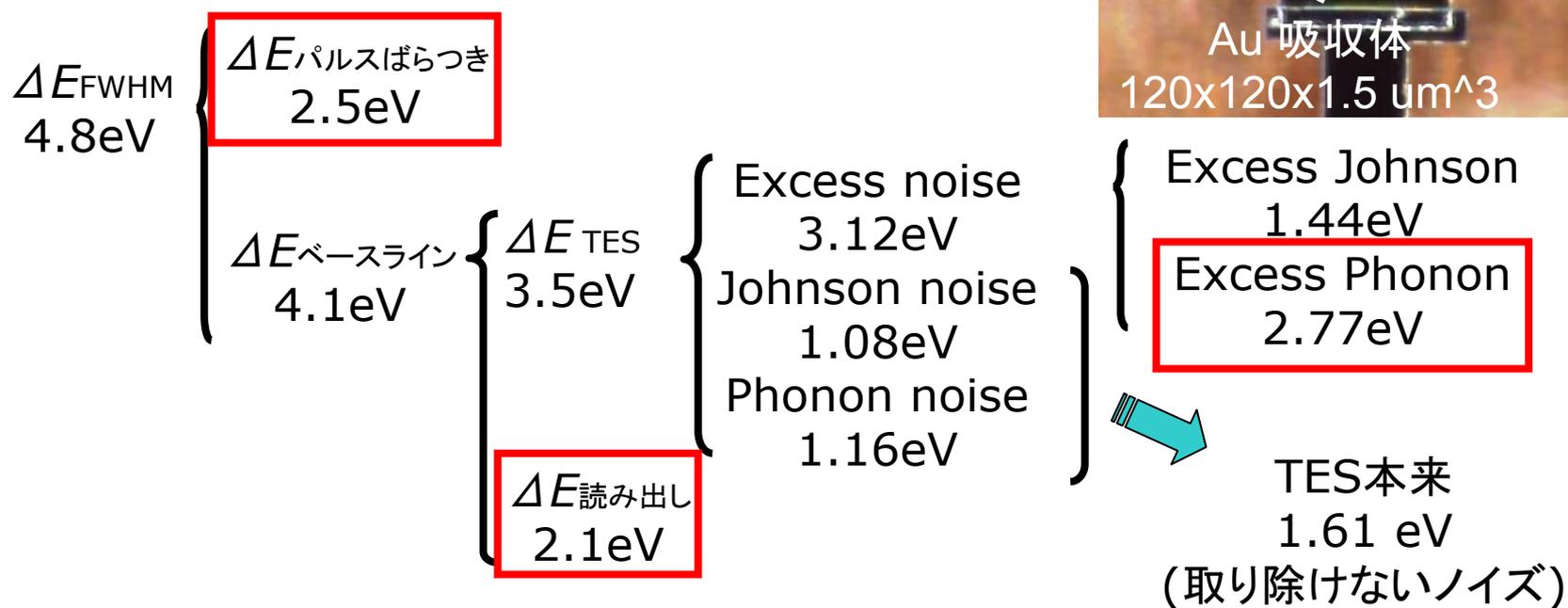
$$\Delta E_{\text{FWHM}} \propto \sqrt{k T^2 C / \alpha}$$

温度計感度: $\alpha = \frac{d \log R}{d \log T}$

これまでの研究成果

- エネルギー分解能
4.8 eV@5.9keV (Yoshino+, JLTP, 2008)
→ 自作素子 TMU146-4d
(転移温度: 108mK)

- 分解能の内訳



これまでの研究成果

○ 何が分解能を制限しているか...

① ΔE パルスばらつき

- 熱浴の温度揺らぎ(冷凍機の温度安定度)
- X線入射位置依存性
→吸収体以外の部分にX線が照射

② $\Delta E_{\text{excess Phonon}}$

- 熱浴の温度揺らぎ
- 希釈冷凍機内部の熱輻射

③ ΔE 読み出し

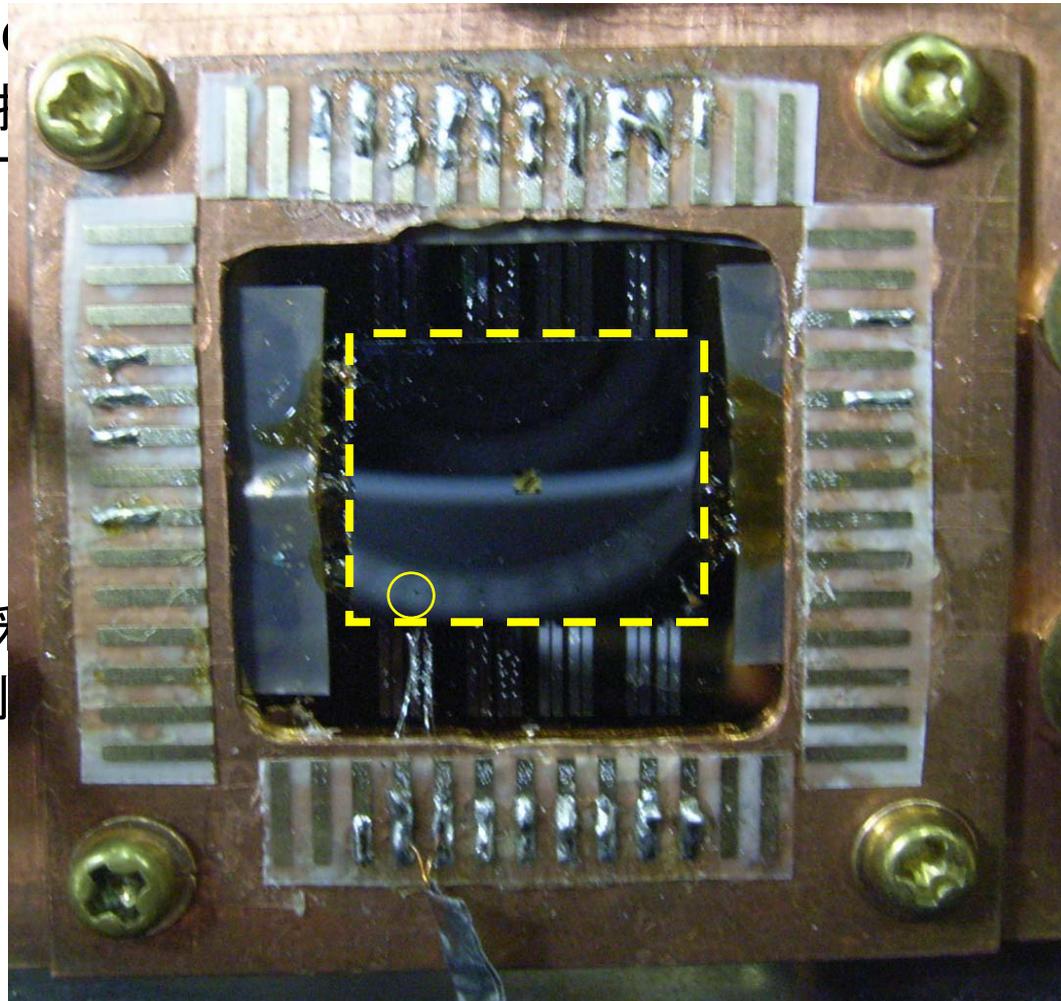
- SQUID回路からのノイズ
- 測定機器からのノイズ

本研究の目的

○ Exc

① 熱
→ T

② 希
別

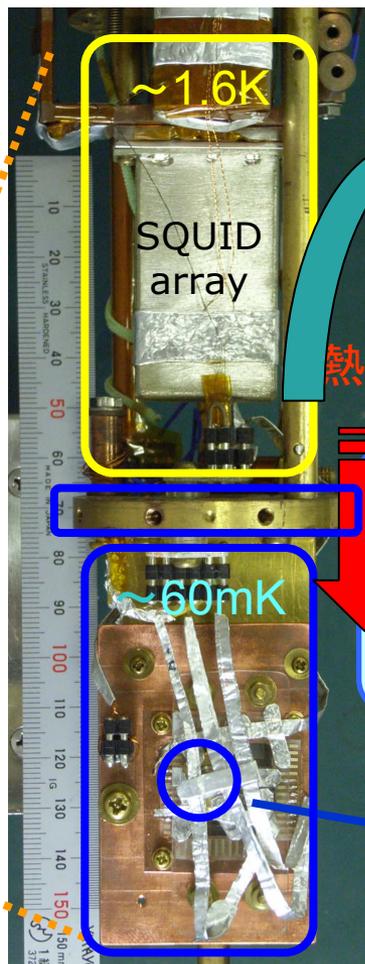
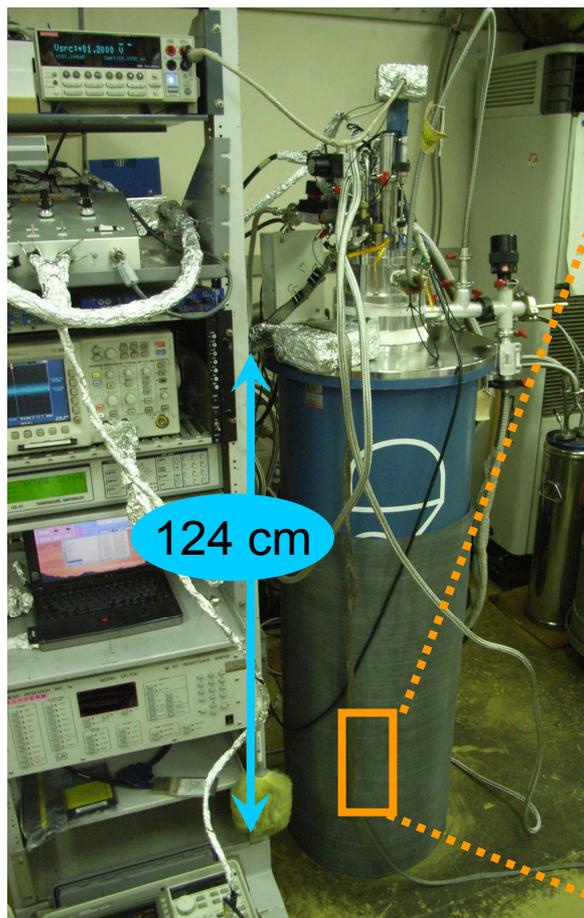


X線が照射

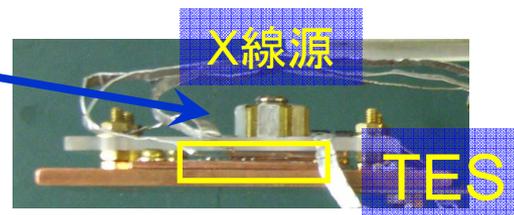
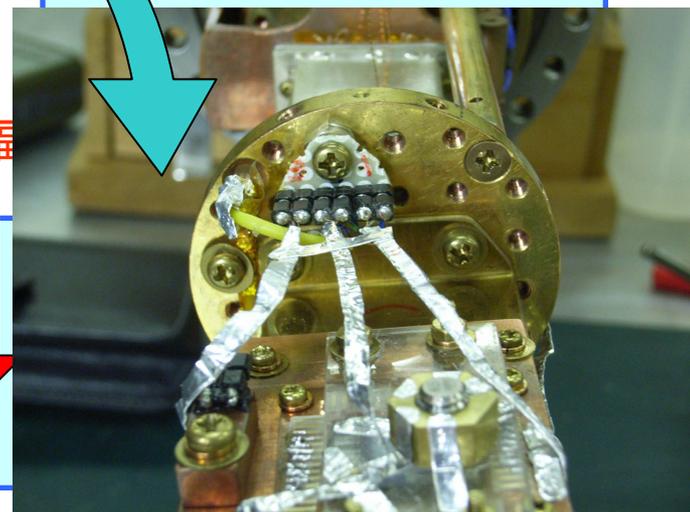
性能性

実験装置

希釈冷凍機 (OXFORD社製)



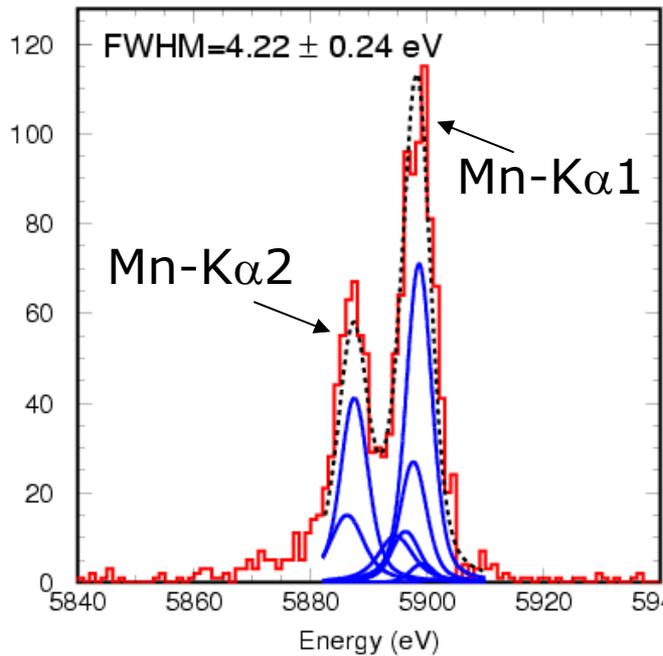
- ・最低到達温度
~60 mK
温度安定度



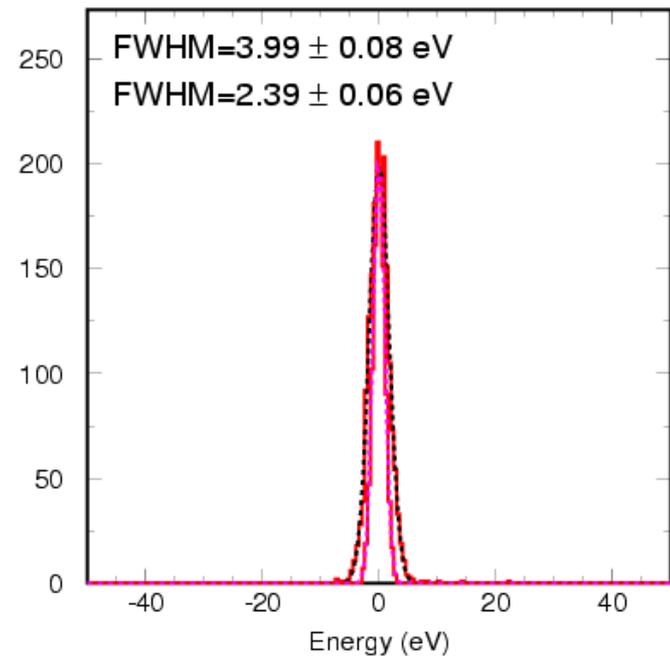
結果

エネルギー分解能: **4.2eV**@5.9keVを達成(2月5日現在)

→日本記録更新!!



$$\Delta E_{\text{FWHM}} = 4.2\text{eV}$$

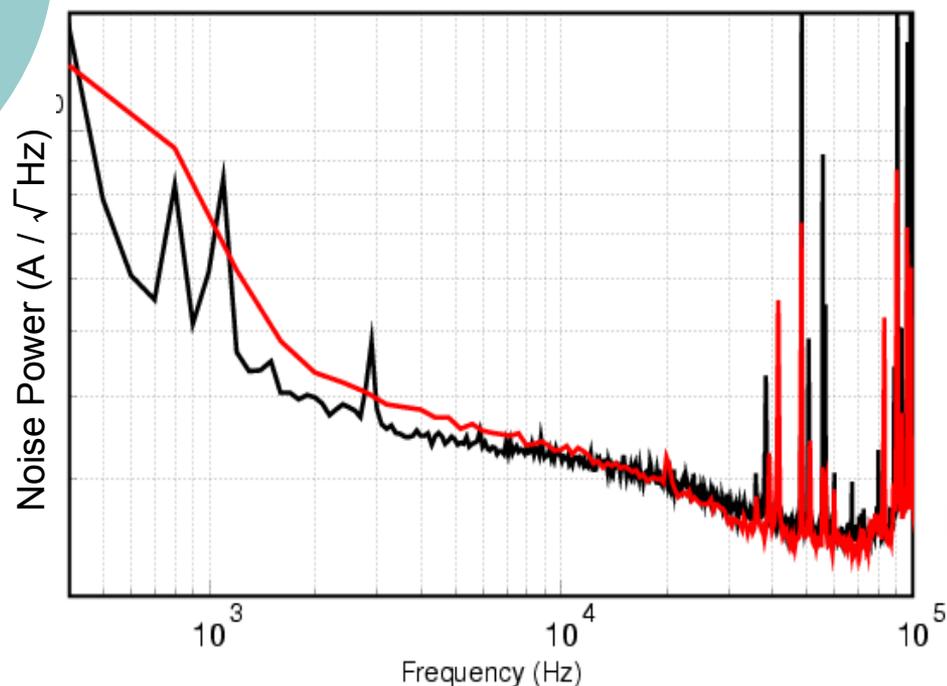


$$\Delta E_{\text{ベースライン}} = 4.0\text{eV}$$

$$\Delta E_{\text{読み出し}} = 2.4\text{eV}$$

考察 - 熱輻射の抑制

1K potからの輻射をシールド→Excess Phononを抑制



今回 (4.2 eV) と前回 (4.8 eV) の動作点でのノイズスペクトルを比較



低周波側で違いが見られるが、大まかに変化が見られない

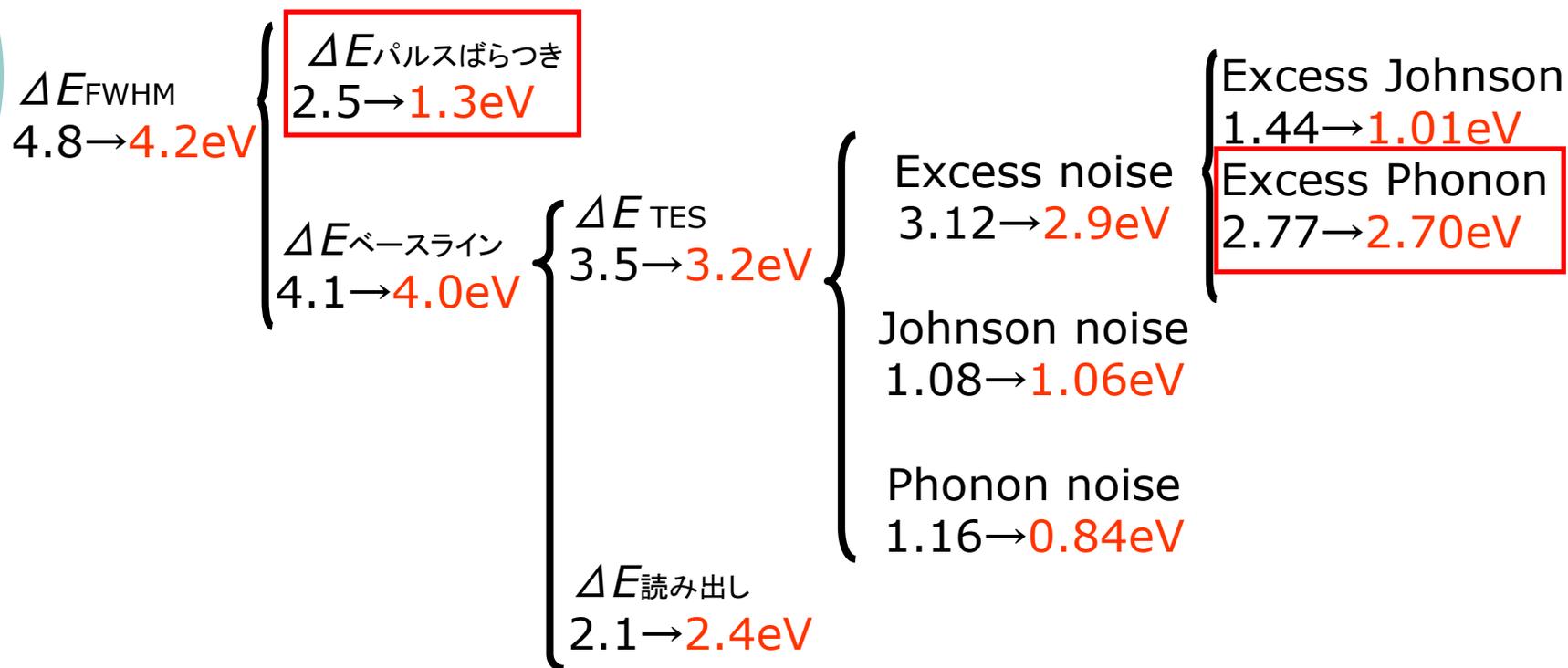


Excess Phonon の寄与もそのまま。

ブラック 2007年 4.8 eV
レッド 2009年 4.2 eV

Excess Phonon の原因は熱輻射ではない可能性

考察 - エネルギー分解能へ寄与



Excess Phononは大きく変化せず、パルスのばらつきが減少

考察

- パルスのばらつき
TESにより近い位置で入射X線をコリメートすることで、
Au吸収体にのみX線が照射



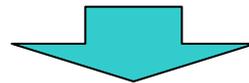
ばらつきの原因となっていた吸収体以外への照射が減少



分解能の更新

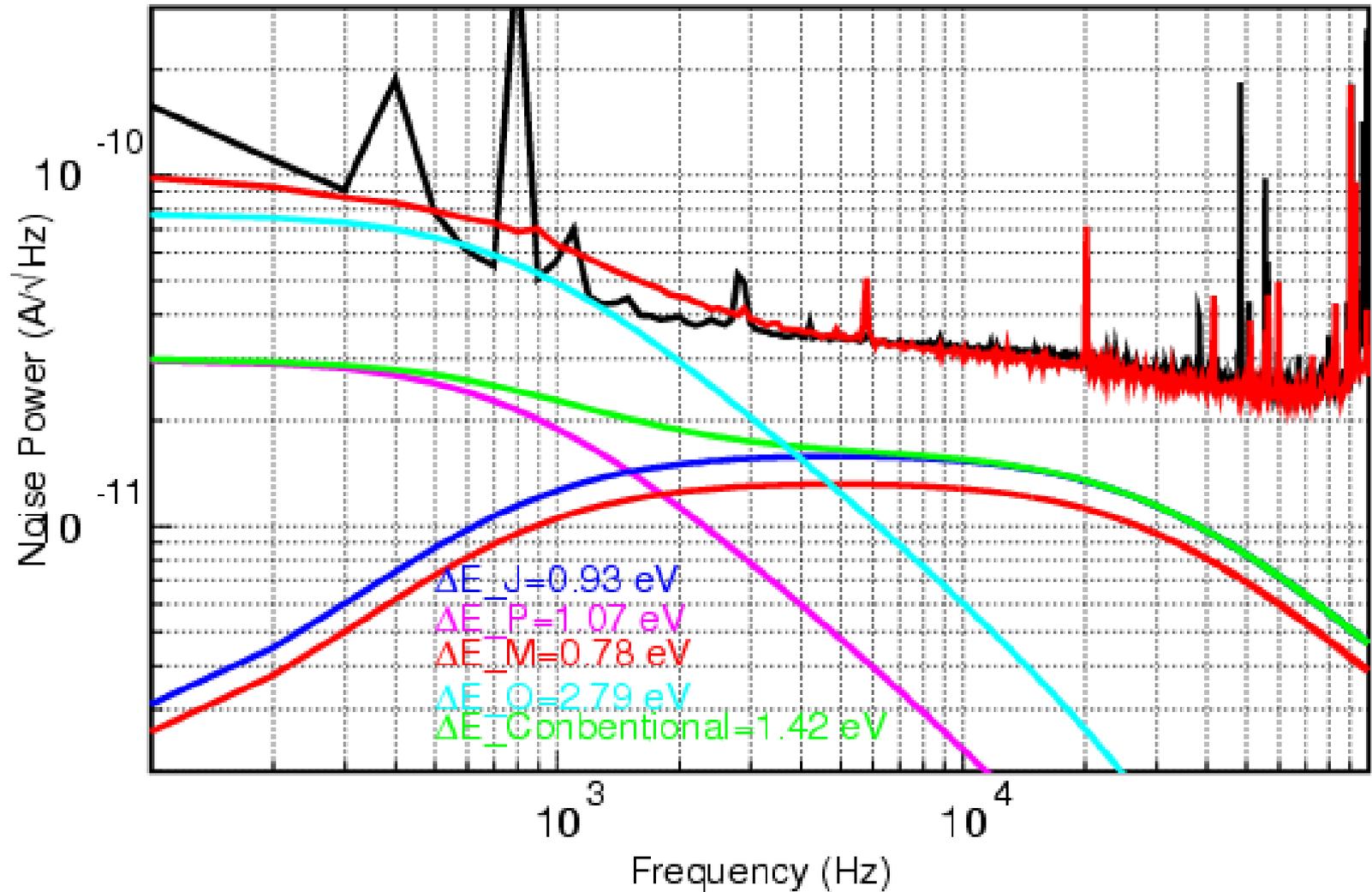
まとめと今後の課題

- 今回の実験で自作素子TMU146-4dの再測定を行なった
- エネルギー分解能4.2eVを達成した
- 熱輻射対策ではノイズの変化が見られず、分解能更新の要因はコリメータの寄与が大きい。
- 今後、測定機器を見直し、読み出しノイズの抑制を進め、更なる分解能更新を目指す
→性能の良い測定機器に変更後、読み出しノイズが削減

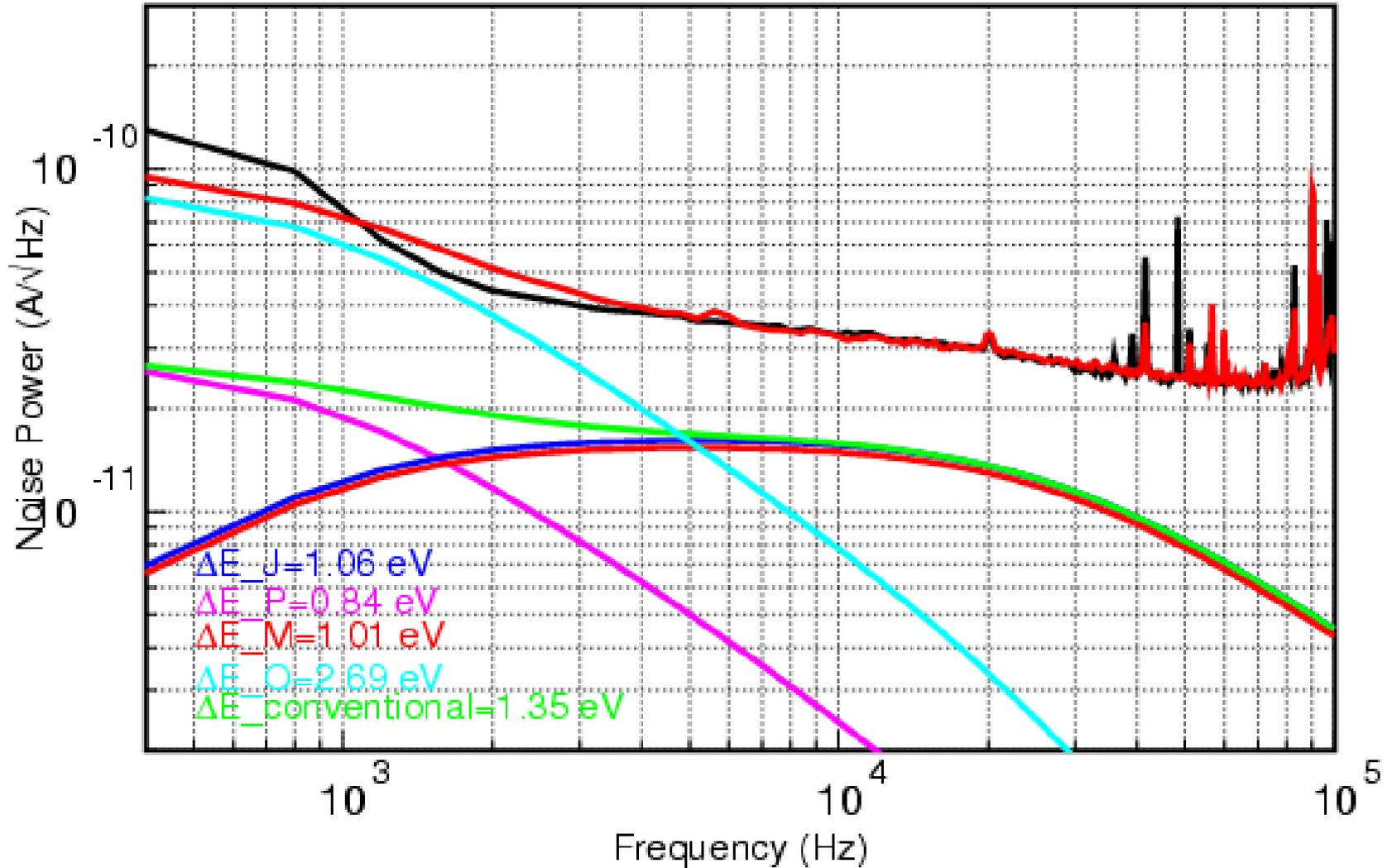


3eV台達成の見込み

Noise analysis of TMU146 – 2007 version

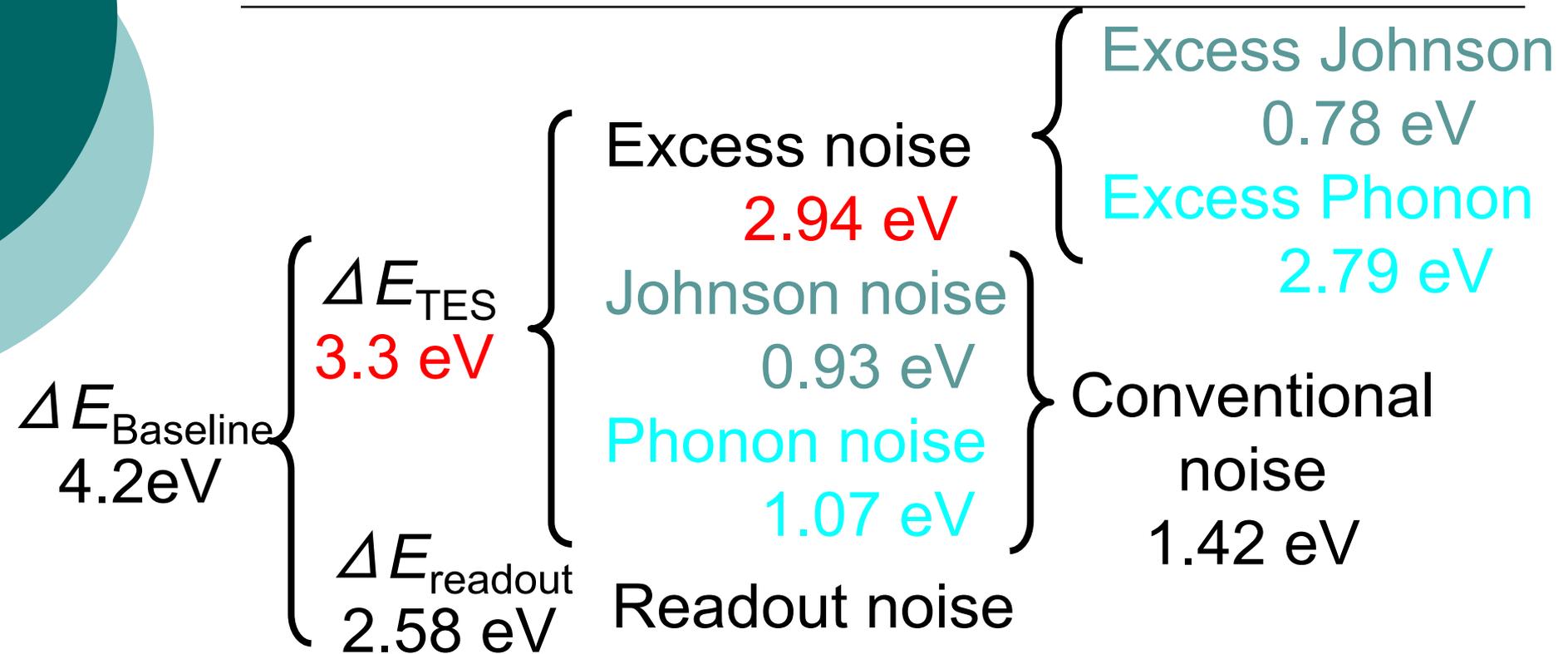


Noise analysis of TMU146 – 2009 4.2 eV



Breakdown of energy resolution of TMU146 -2007 4.8 eV

読み出しノイズの結果を反映させたもの



横河オシロの設定説明とbit数

Sample Rate	Sample Number RL=Record Lengthと呼ぶ	平均数	Band Width	Y軸
2MS / s	10k	340	500 kHz	200mV/div

Sample rate 一秒間に何sampleデータを取得するか。今回は2MS/sなので、1sample取るのに、 5×10^{-5} 乗秒(2M Hz)
Sample numberは一回に取るデータのデータ長。ある長さのデータ(Band width)をsample numberで割った値が、横軸の細かさ
平均数 この回数だけ同じデータを取得し、誤差を少なくしている
Band Width データ取得する周波数範囲

Band width 500kHz 10k個のデータ点でデータ取得
つまり、50Hzずつの離散的データが得られる

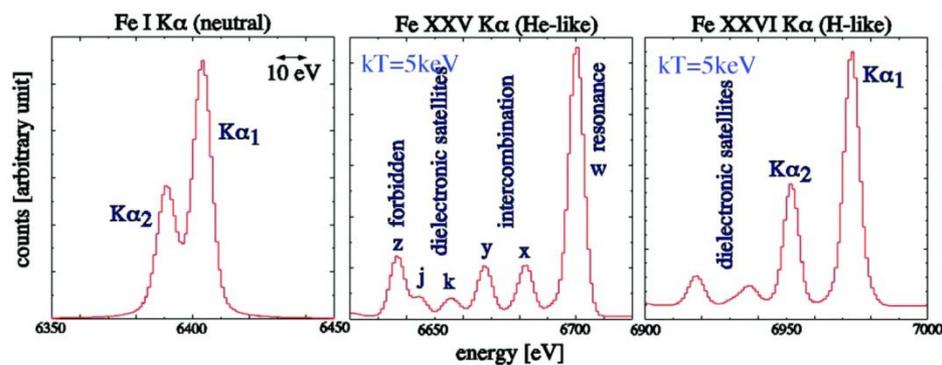
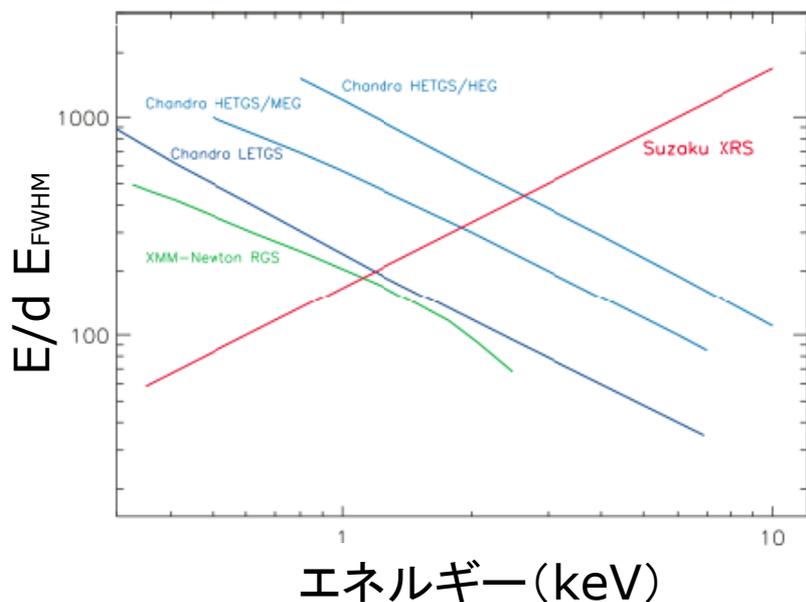
縦軸の範囲は 何mV/divにするかで決まる。目盛は上下5個ずつだったと思うので、200 mV/divであれば 1Vppの範囲でデータ取得できる。
今回我々の用いたADCは13bitだったので、2の13乗で8192個のデータをとれる。
データの間隔は $2V/8192=0.244$ mV 。つまり、0.244 mV 毎の決定精度しかないことになる。
(0.122mVの倍数のデータが一番影響を受けてしまう)
これがフーリエ変換するとき、乗ってきてしまっている。
16bitであれば、66536個のデータが取得でき、0.0305mVまで決定精度が上昇するので、観測されるノイズに対する測定系の寄与も減少する

カロリメータの特徴

ももとはAXAF(現Chandra)に搭載予定でアメリカが1980年代に開発開始。
その後、カロリメータはASTRO-Eに搭載されることになるが、2000年打ち上げ失敗

2005年ASTRO-E2が打ち上げられ、軌道上で60mK到達、7eVの性能を確認⇒Heの蒸発により天体観測は行われず

- 非分散型検出器であり、X線の検出効率が高い
- 1keV以上では回折格子よりもエネルギー分解能がよい
- 広がった天体を観測しても性能劣化がない(回折格子は点源にしか使えない)
-カロリメータなら超新星残骸、銀河団などの広がった天体O.K.
- そのエネルギー分解能から精密なプラズマ診断(温度決定)
- ~100km/sレベルの運動決定(ドップラーシフト。CCDでは1000km/sレベル)



半導体カロリメータ

半導体カロリメータ: 温度感度 α が一桁台。それでも分解能は、4eV台まで達成されている (LTD12 L.kelley)

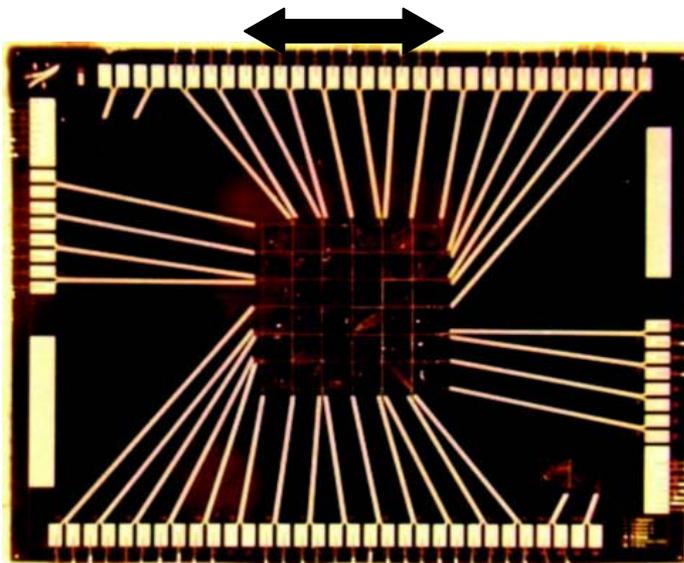
手作りに近い製作方法 \Rightarrow **たくさんの素子を並べるアレイ化が困難。**

読み出しにJFETを用いているため、130 Kで読み出さなくてはならない。

XRS(すざくに乗っていたものやASTRO-Hにのるもの)では時定数が長すぎる。 \Rightarrow 明るい天体が見れない

- 吸収体の比熱の改良により、
 ΔE 4.2eV (50mK)

3.8mm



$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, $x = 0.16$, $790 \times 790 \times 6 \mu\text{m}$

