

TES型X線マイクログカロリメータの 応答特性の研究

東京都立大学 理学研究科 修士2年

森田うめ代

目的

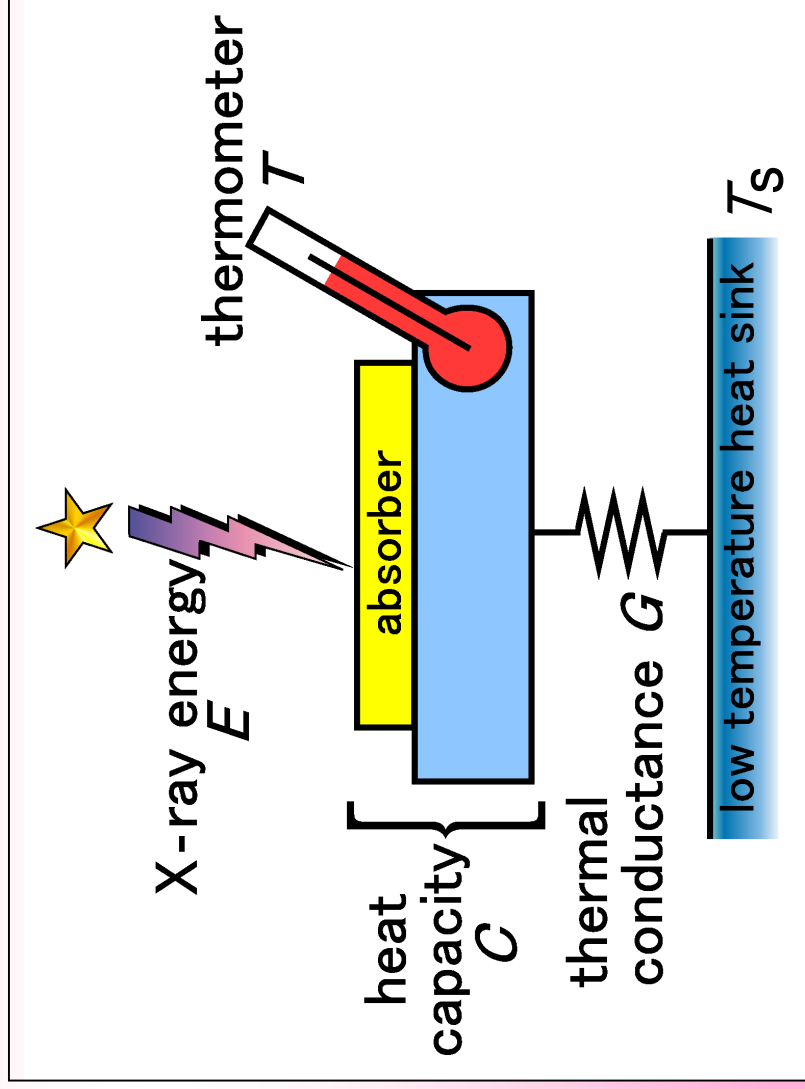
次世代(2010年頃) X線天文衛星搭載撮像分光器にむけて

- 高エネルギー分解能の実現 (昨年度 46 eV)
- 応答特性の理解

1. X線マイクロカロリメータ

- X線光子のエネルギーを素子の温度上昇として検出
- エネルギー分解能は動作温度 $T \sim 100 \text{ mK}$ と温度計の感度 α で決まる

$$\Delta E \propto \sqrt{k_B T^2 C / \alpha}$$

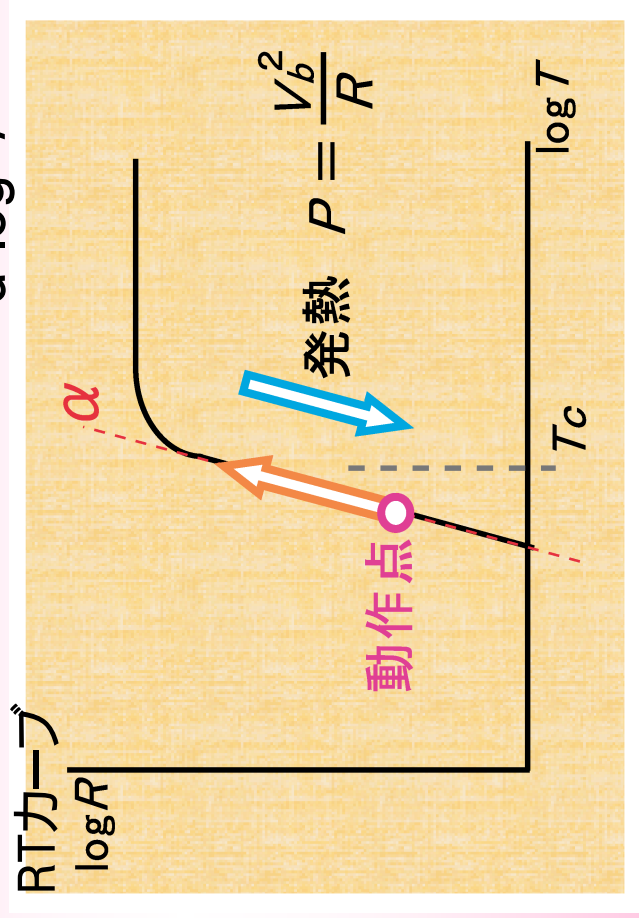


2. TES型X線マイクロリメータ

TES温度計 (Transition Edge Sensor)

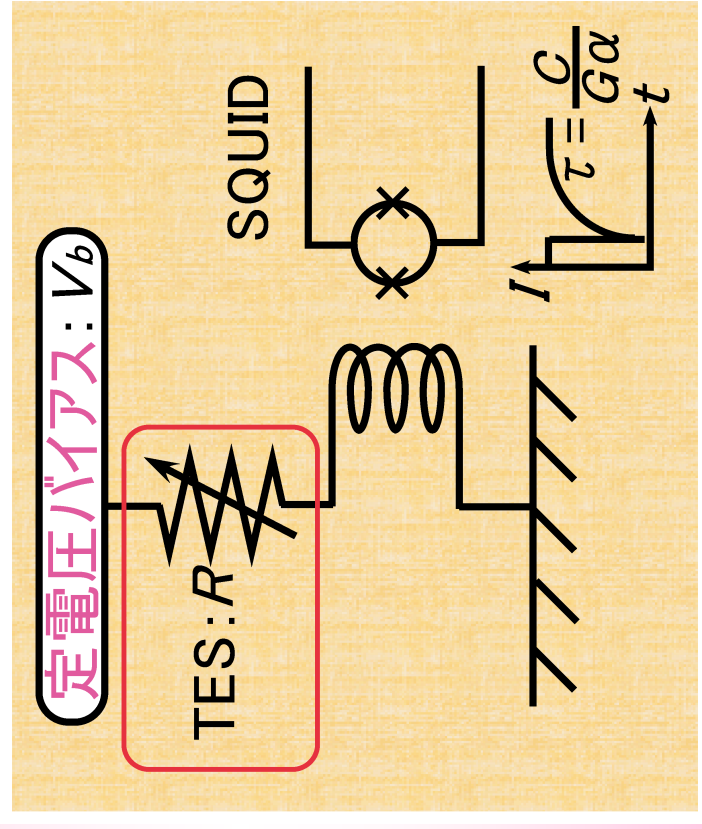
超伝導転移端を温度計として利用

$$\text{温度計の感度 } \alpha = \frac{d \log R}{d \log T}$$



TES の利点

感度 α 大
時定数 τ 短縮



電熱フィードバック

X線入射

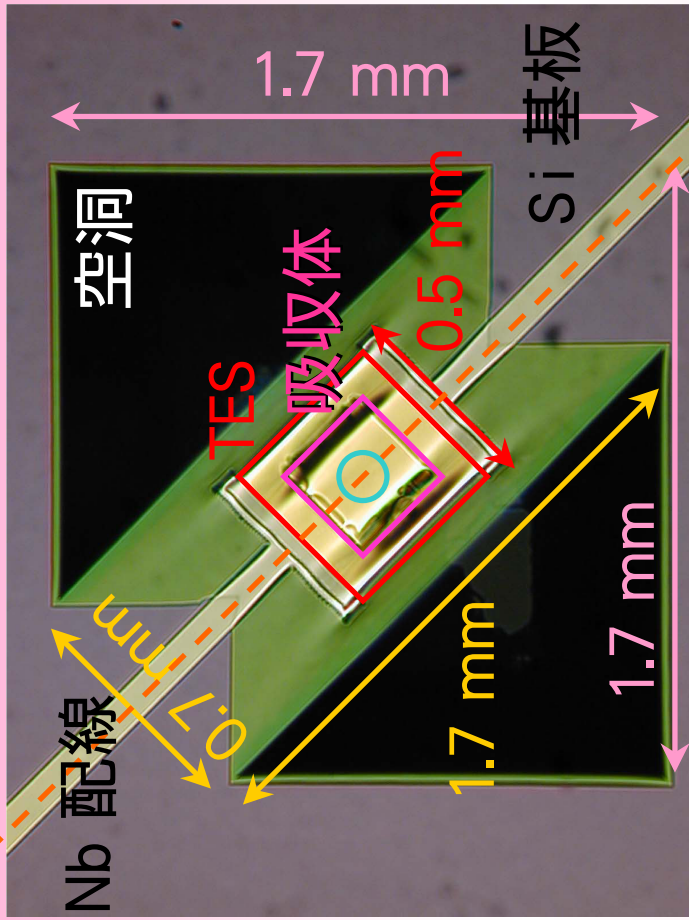
$T \uparrow \rightarrow R \uparrow \rightarrow I \downarrow$

発熱減少

電流変化を検出 (SQUID 利用)

3. SII-14 カリメータ

宇宙科学研究所、Seiko Instruments Inc. と共同開発



TES Ti - Au の2層薄膜

0.5 mm × 0.5 mm

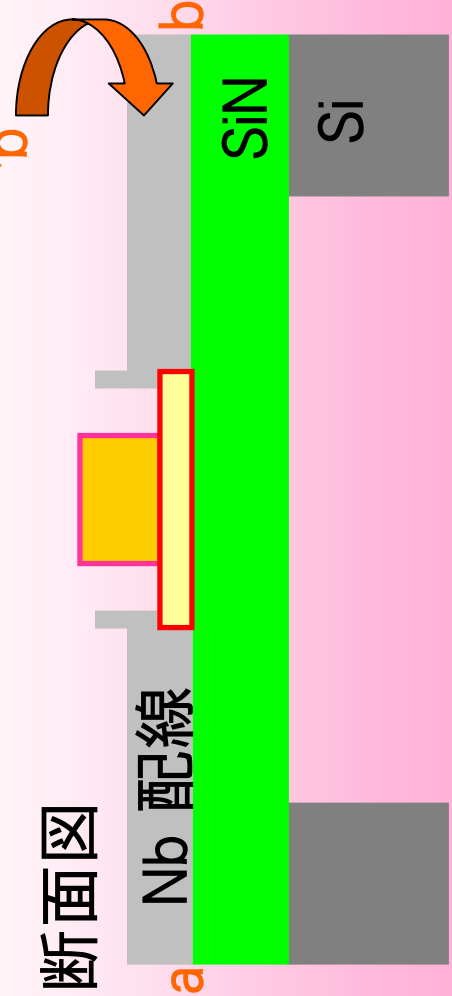
厚さ : Au 110 nm, Ti 40 nm

X線吸収体 Au

0.3 mm × 0.3 mm × 300 nm

0.2 mmφ サファイアコレメータ

断面図



4. 測定履歴

2002/02 $11.4 \pm 0.7 \text{ eV}$ @ 5.9 keV (TMU)

測定系の改善



超伝導 (鉛) 磁気シールド
バイアスラインにコンデンサ

2002/08 $6.6 \pm 0.4 \text{ eV}$ @ 5.9 keV (TMU)

(世界記録は $\sim 4 \text{ eV}$ @ 5.9 keV)

2002/11 LLNL (Lawrence Livermore National Lab.)

X線発生装置を用いて Al、Cr、Fe のX線照射可能
読み出しノイズが都立大の $\sim 1/3$

$6.0 \pm 0.3 \text{ eV}$ @ 1.5 keV

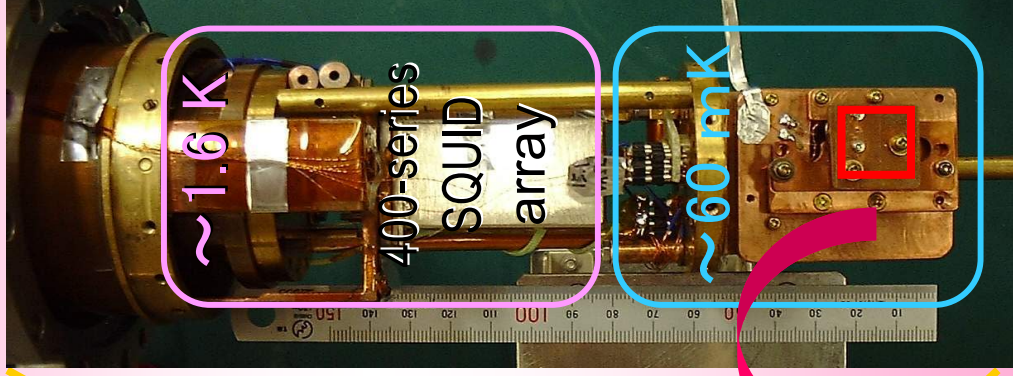
$8.3 \pm 0.8 \text{ eV}$ @ 5.4 keV

$8.8 \pm 1.2 \text{ eV}$ @ 6.4 keV

5. 実験装置

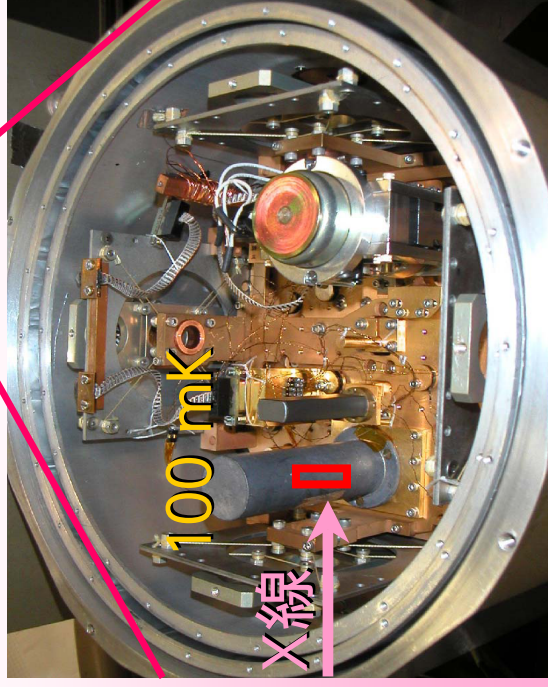
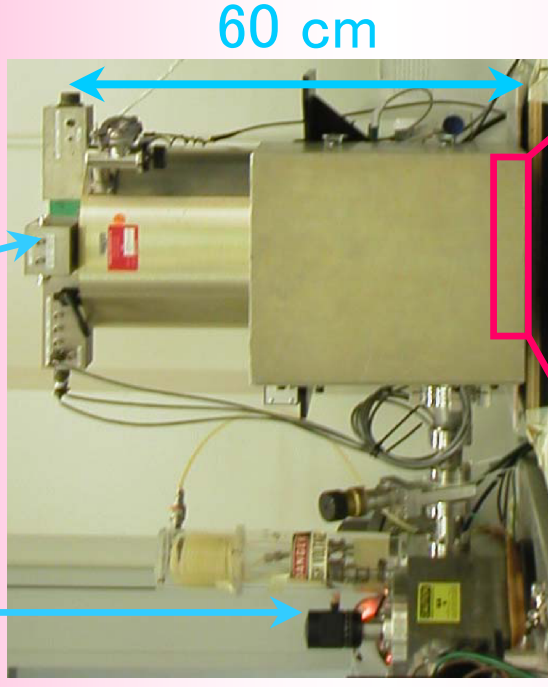
@TMU

冷凍機 : 希釈冷凍機
X線照射方法 : ^{55}Fe 線源のみ



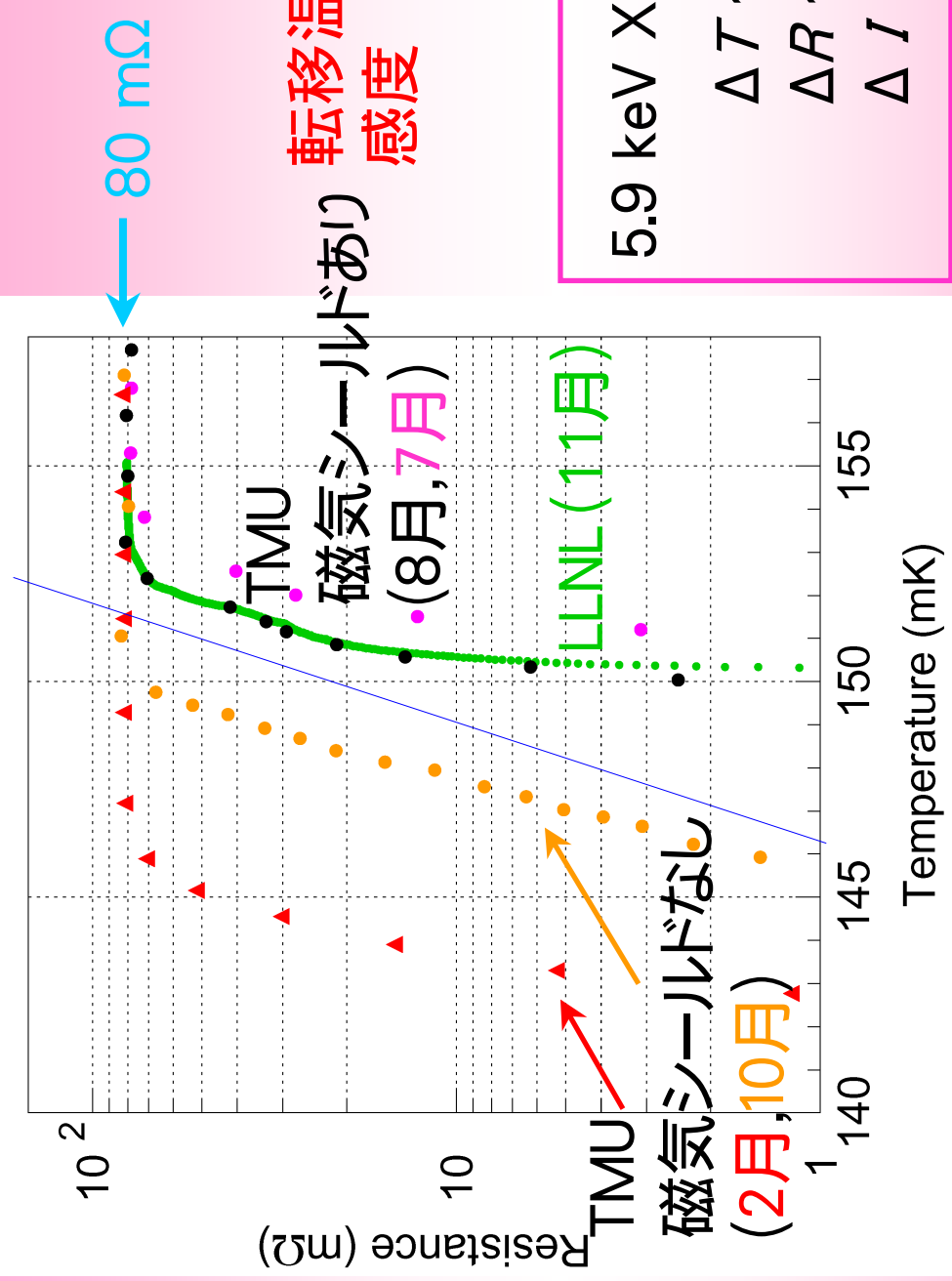
@LLNL

断熱消磁冷凍機
X線発生装置使用 (Al, Cr, Fe など)



6. R T 特性

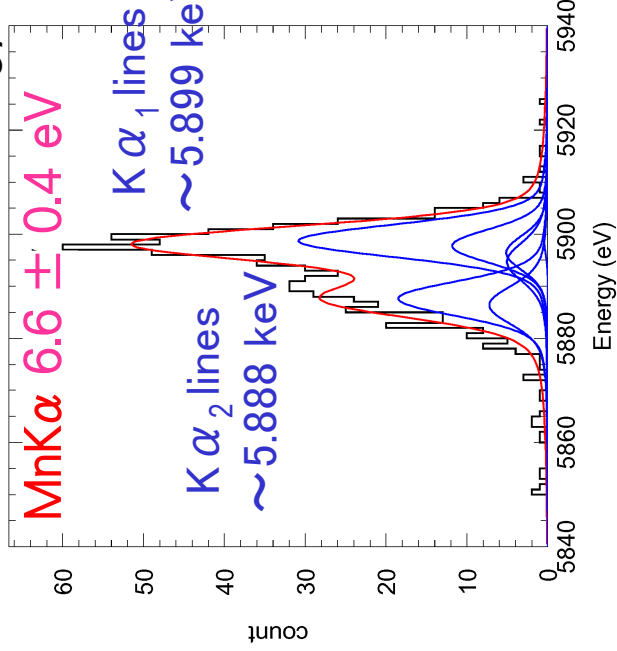
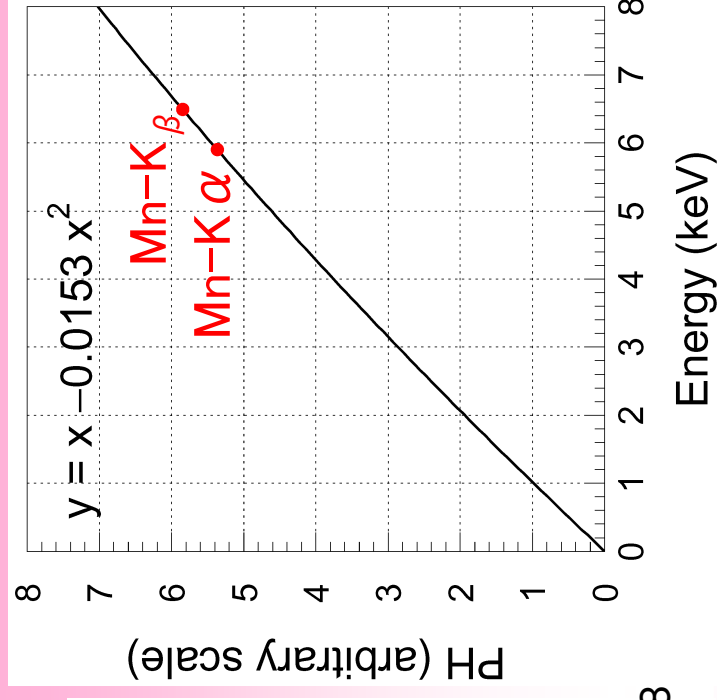
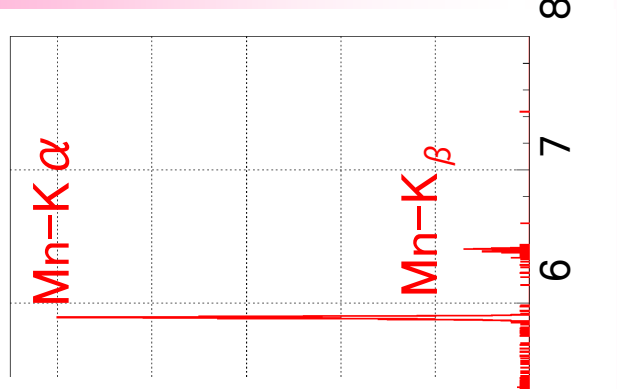
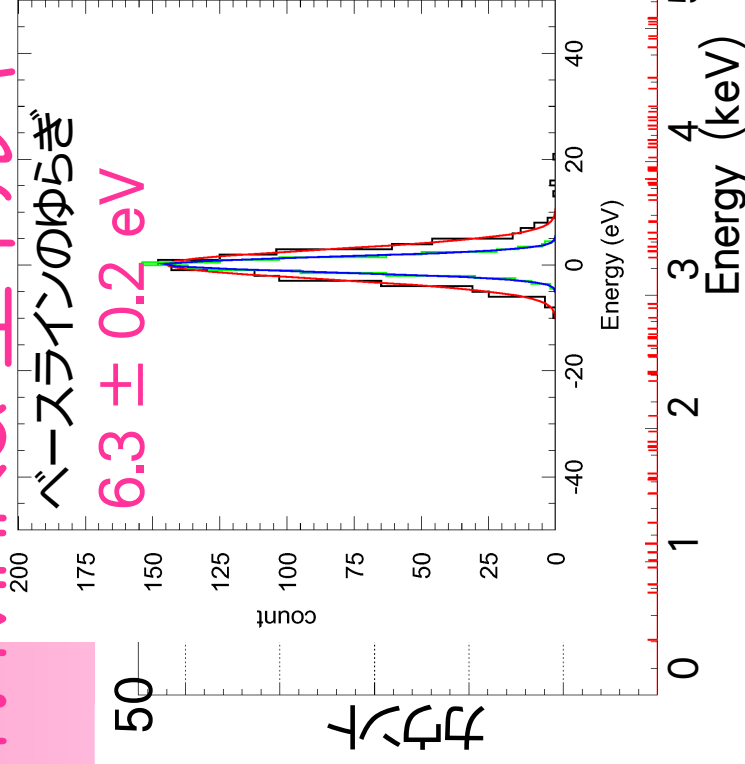
$$R \propto T^{120}$$



5.9 keV X線が入射した際

$\Delta T \sim 0.5$ mK
 $\Delta R \sim 15$ mΩ
 $\Delta I \sim 11$ μA

温度計の再現性 ~ 5 mK
経年変化があるとしても数 mK
シールドなしの方が転移温度が低い傾向



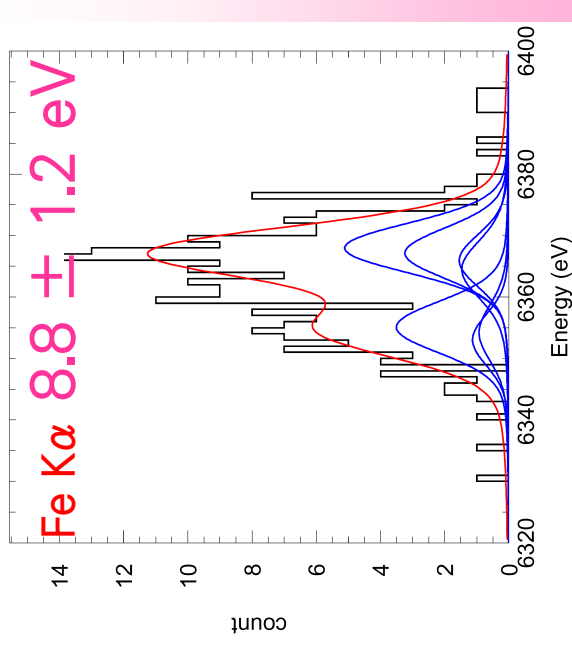
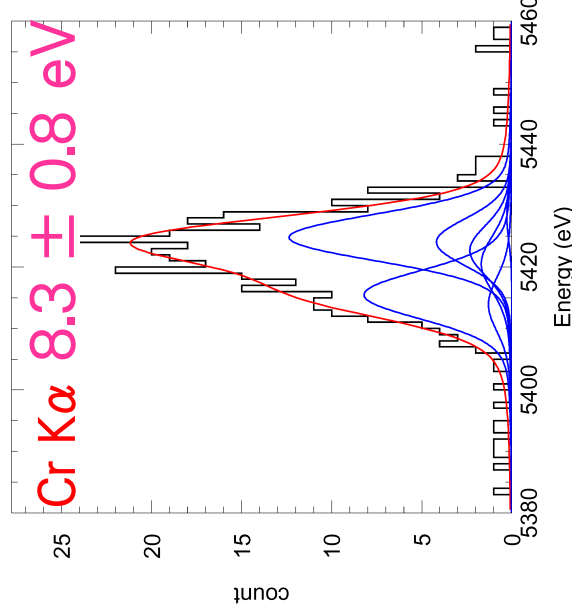
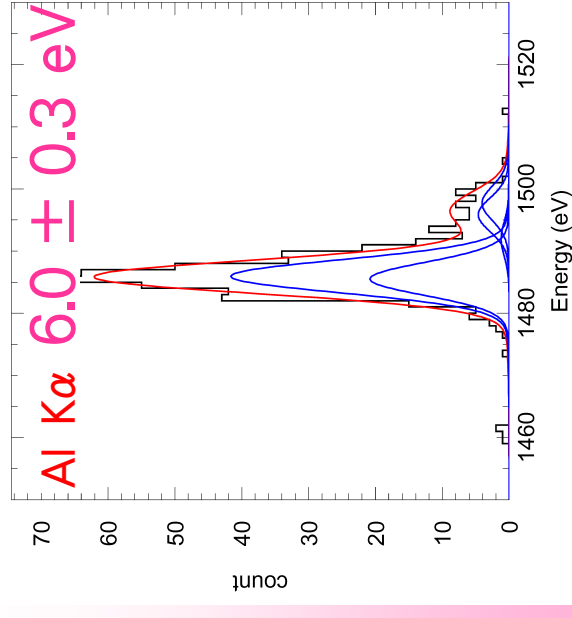
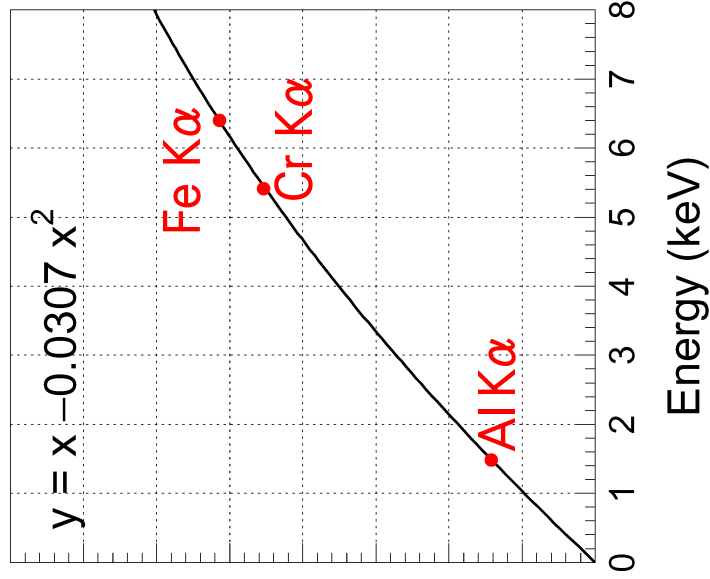
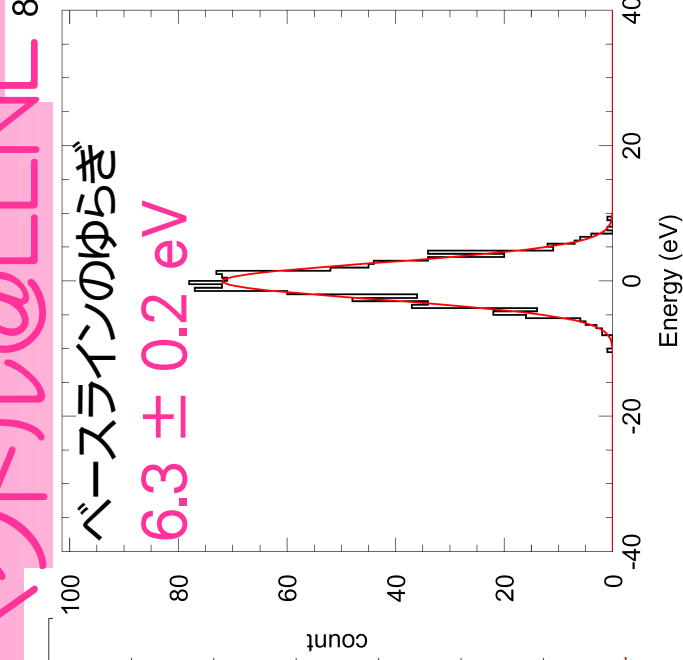
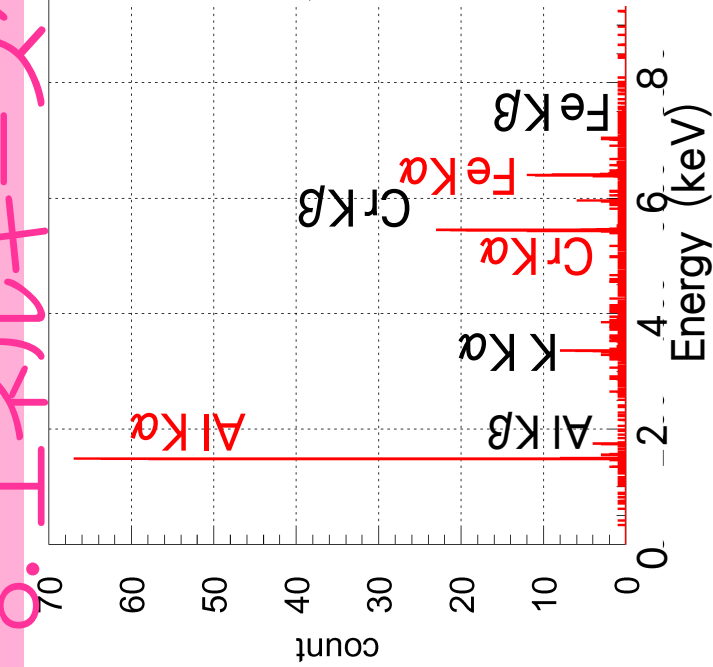
エネルギーとパルスハイトの関係を

$$PH = aE^2 + bE \text{ の2次関数で補正}$$

$$\sqrt{(\text{エネルギー分解能})^2 - (\text{ベースラインのゆらぎ})^2}$$

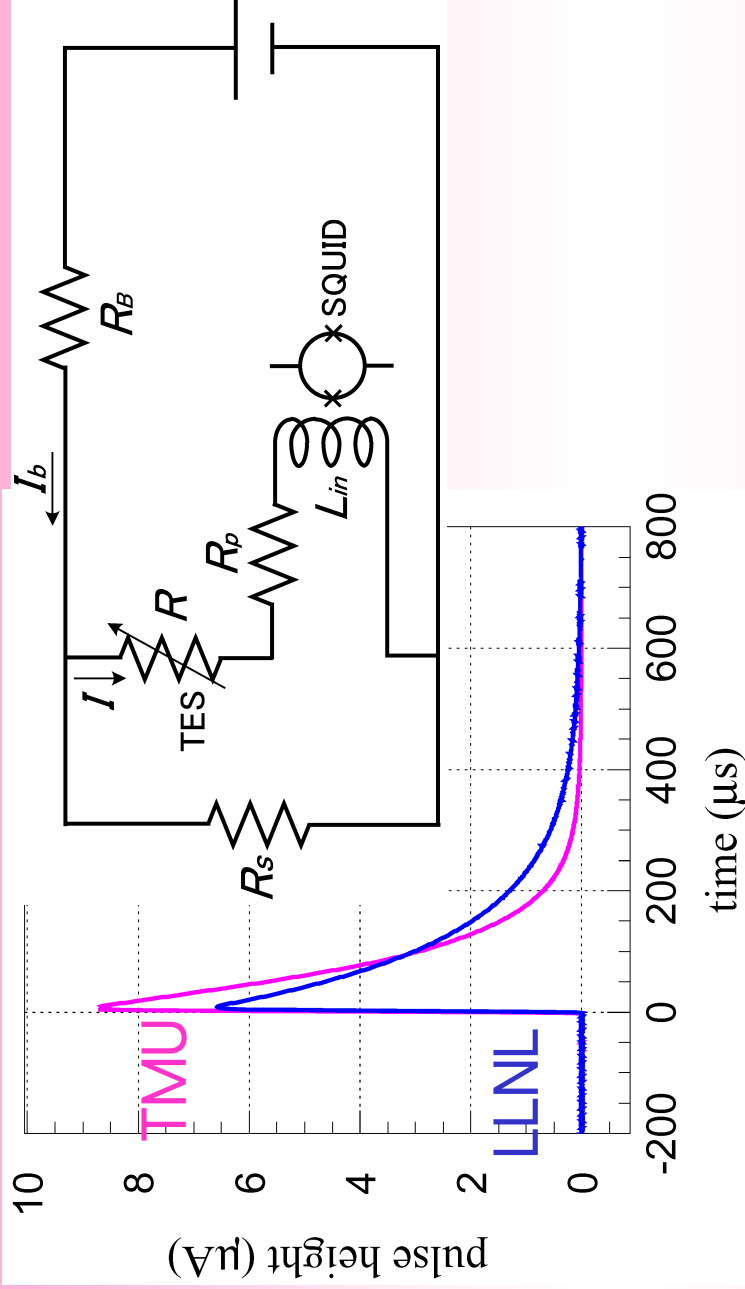
= 波形のばらつき

温度ゆらぎ (~ 30 μ K) の影響は ~ 1.4 eV で
無視できる



温度ゆらぎ ($\sim 10 \text{ } \mu\text{K}$) の影響 $\sim 1.6 \text{ eV}$, 5.8 eV , 6.9 eV で説明可能

9. パルス波形の比較



動作パラメータ

$R = 42 \text{ m}\Omega$ $44 \text{ m}\Omega$

$T = 151 \text{ mK}$ 151 mK

$T_s = 61 \text{ mK}$ 100 mK

$R_s = 3.1 \text{ m}\Omega$ $4.3 \text{ m}\Omega$

$R_p = 0.0 \text{ m}\Omega$ $5.0 \text{ m}\Omega$

$I = 31 \text{ }\mu\text{A}$ $25 \text{ }\mu\text{A}$

$C = 2.0 \text{ pJ/K}$ 2.0 pJ/K

測定値

$PH = 9 \text{ }\mu\text{A}$ $7 \text{ }\mu\text{A}$

$\tau = 78 \text{ }\mu\text{s}$ $118 \text{ }\mu\text{s}$

$\alpha \sim 113$ 126

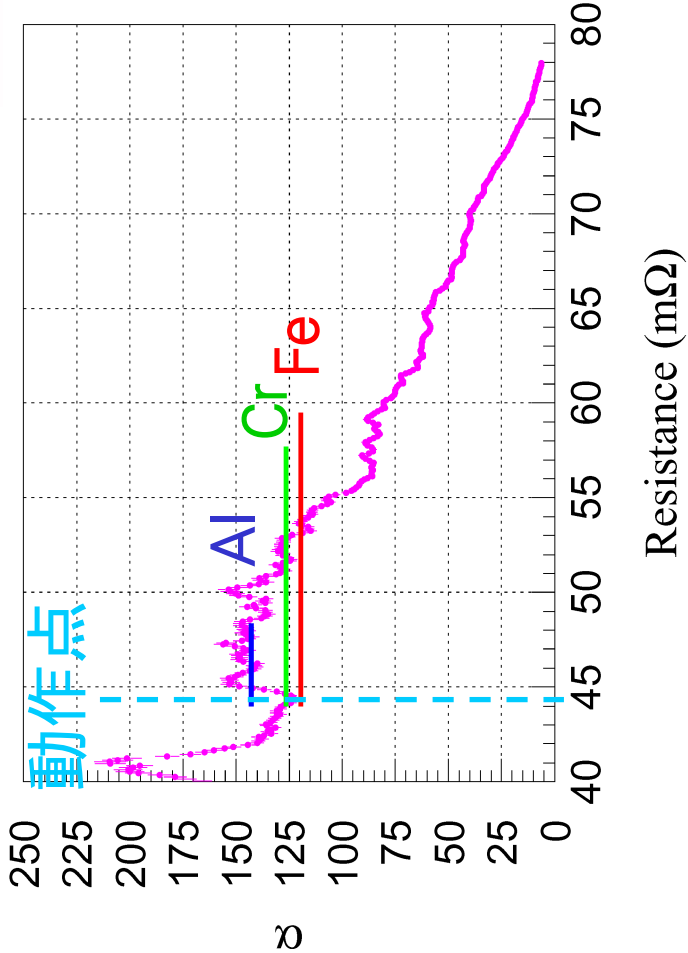
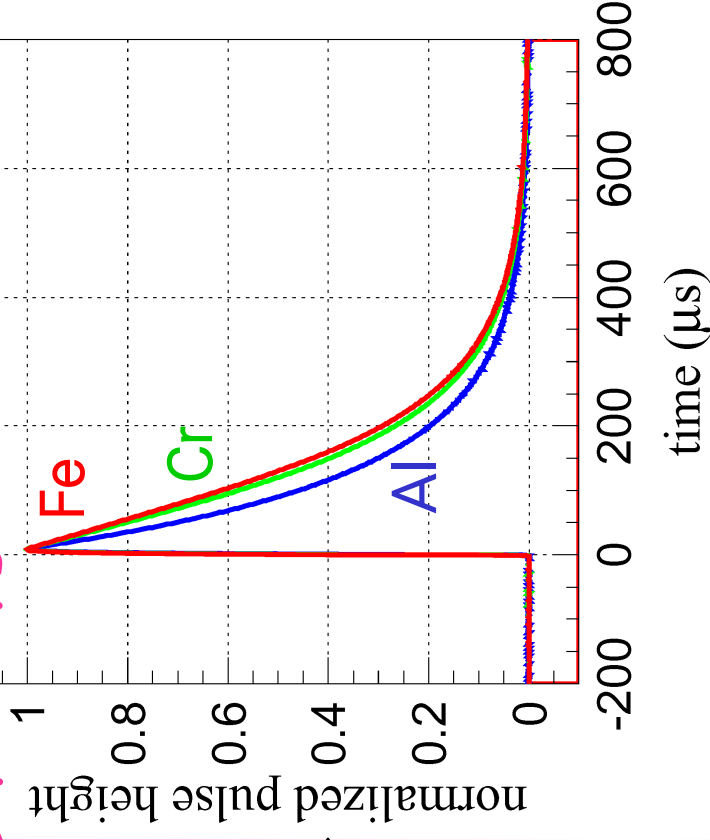
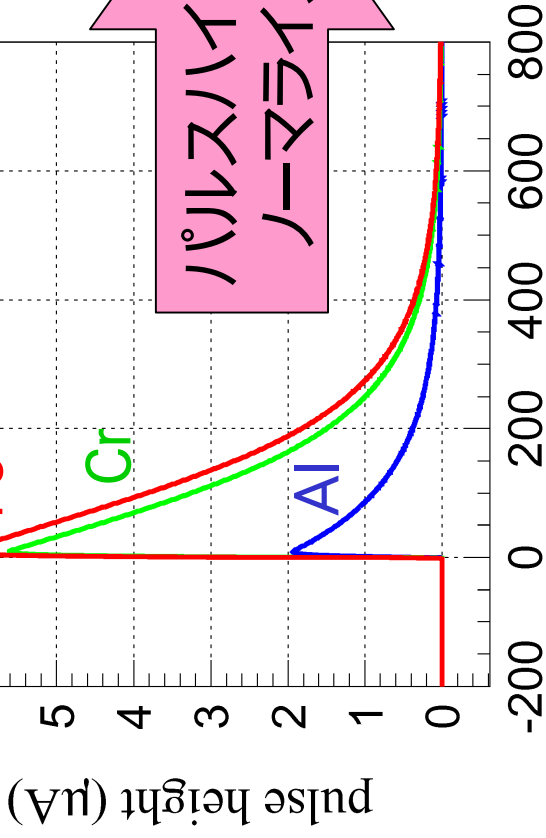
$$\text{パルスハイト} = \frac{E\alpha}{CT} I \frac{R}{R + (R_s + R_p)}$$

$$\text{時定数 } \tau = \frac{C/G}{L_3 + 1}$$

$$I \propto 1 - \left(\frac{T_s}{T} \right)^n, \quad L_3 = \frac{I^2 R \alpha}{GT} \frac{R - (R_s + R_p)}{R + (R_s + R_p)}$$

理論式で絶対値まで含め、ほぼ説明できた。

10. パルスハイトの非線形性の原因



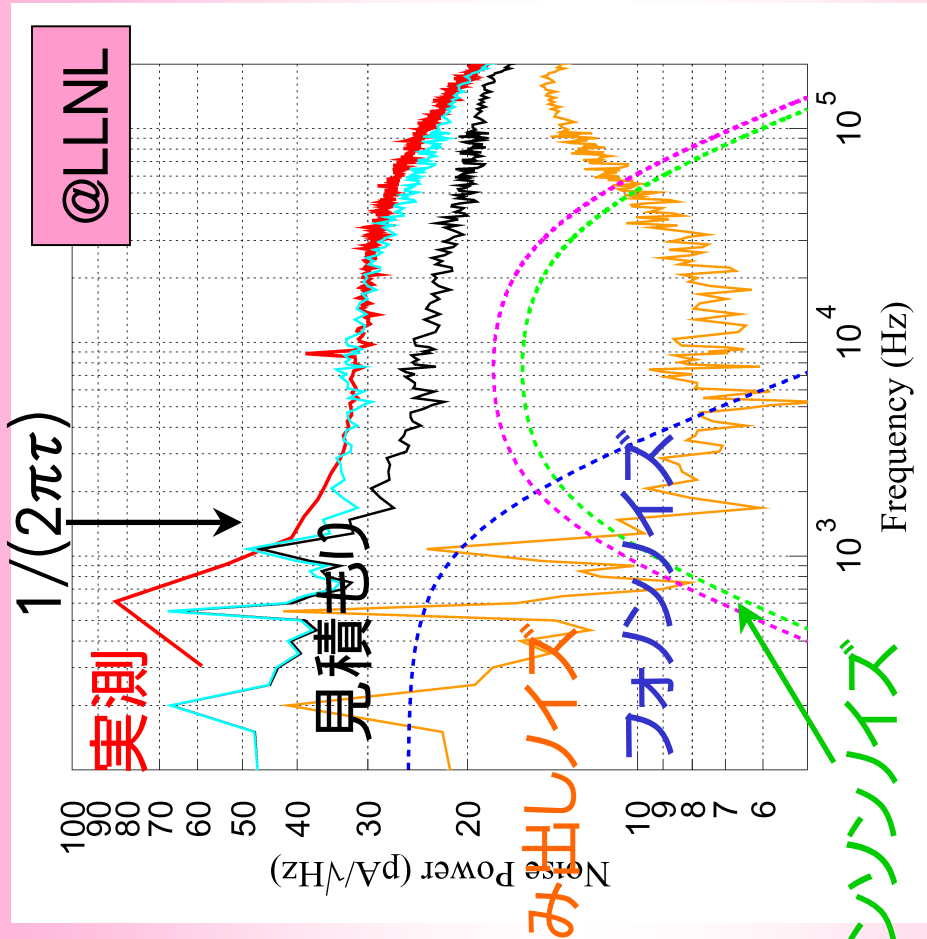
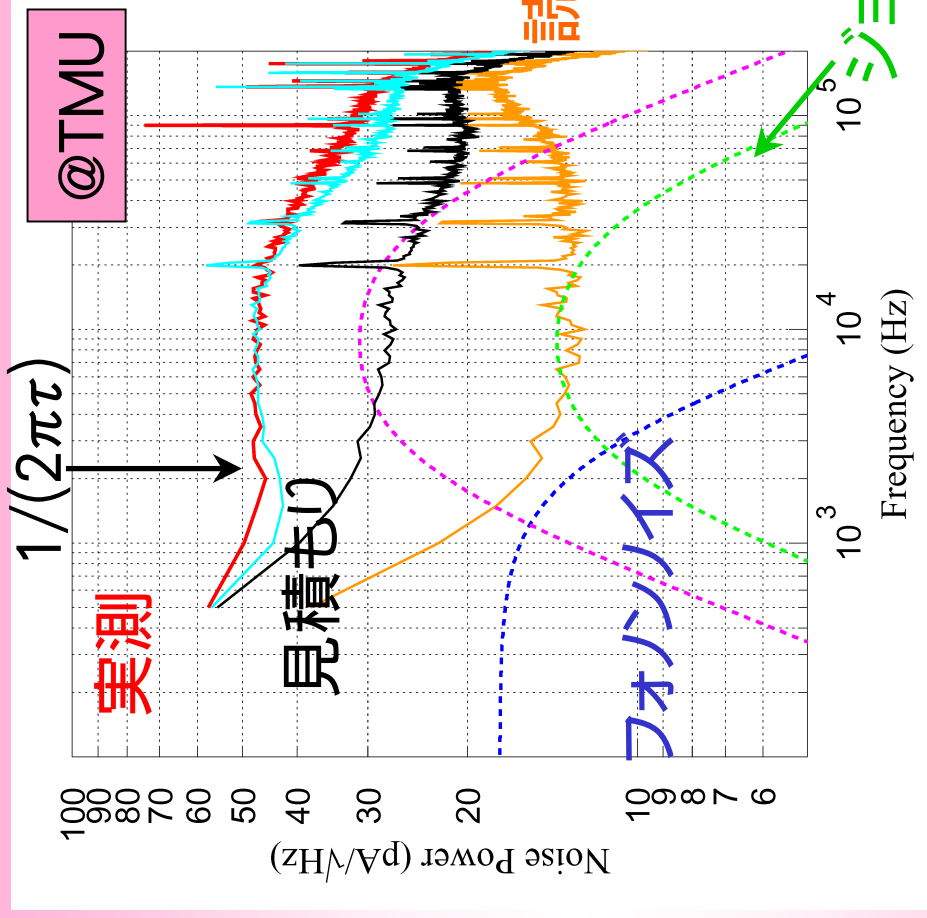
入射エネルギーが高いほど
時定数が長くなる

$$PH \propto \alpha$$

$$\tau \propto 1/\alpha$$

入射エネルギーに対応する
 ΔR で 平均した α がエネルギーの
高いところで小さくなるため

11. ノイズの比較



都立大のほうが見積みからの超過が大きい(超過ノイズ $\propto 1/R$)。
バイアス電圧のゆらぎを 1.2、0.06 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ とすると見積みと合う。

正確な原因は不明

12. まとめ

分解能の向上

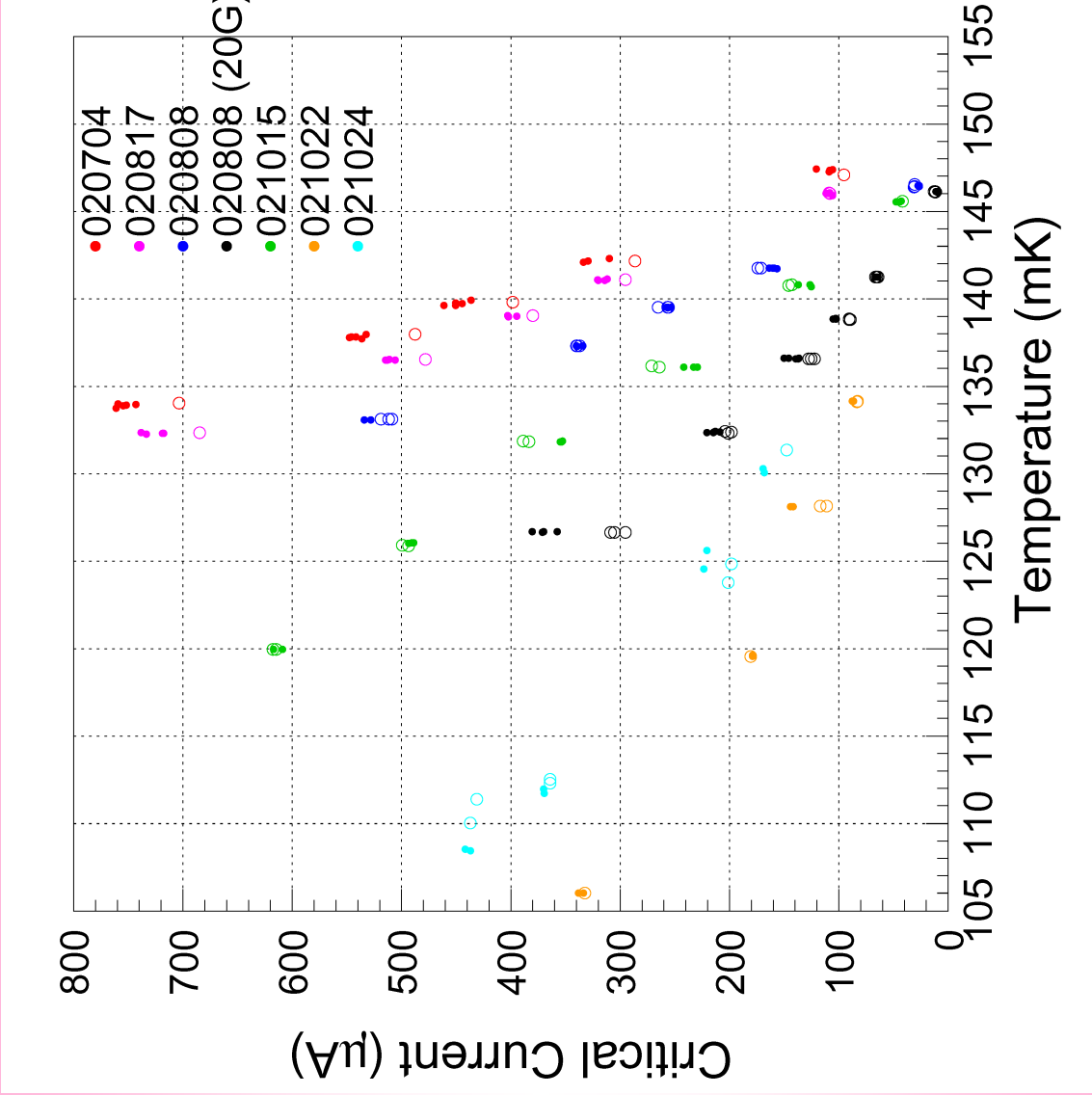
- 測定環境向上により都立大で $6.6 \pm 0.4 \text{ eV}$ @ 5.9 keV 達成
- LLNLで $6.0 \pm 0.3 \text{ eV}$ @ 1.5 keV 達成
- ベースラインとの二乗差は熱浴の温度ゆらぎで説明可能

パルス応答の理解

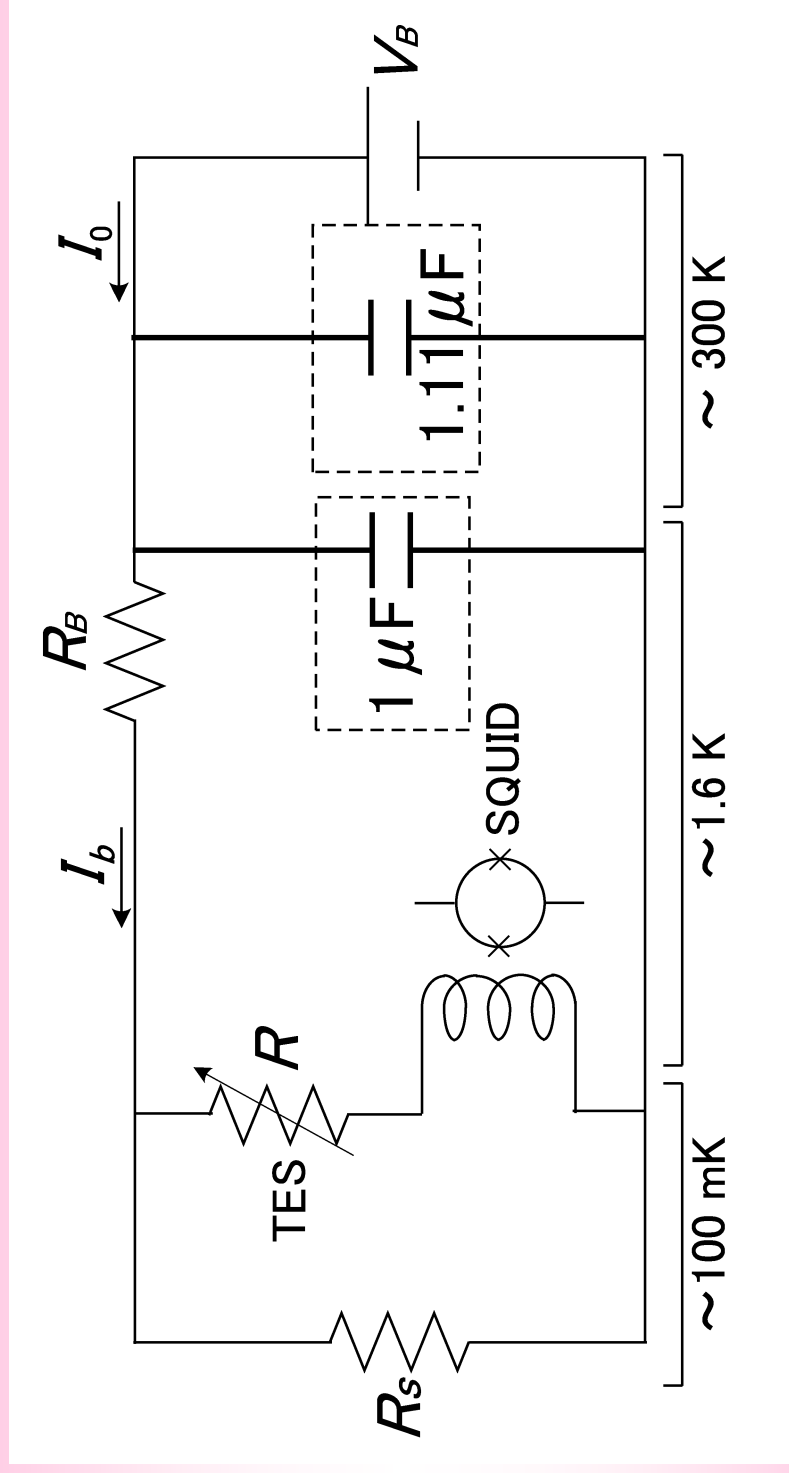
- パルス波形を定量的に説明
- パルス応答のエネルギー依存性を評価

ノイズ応答の解明

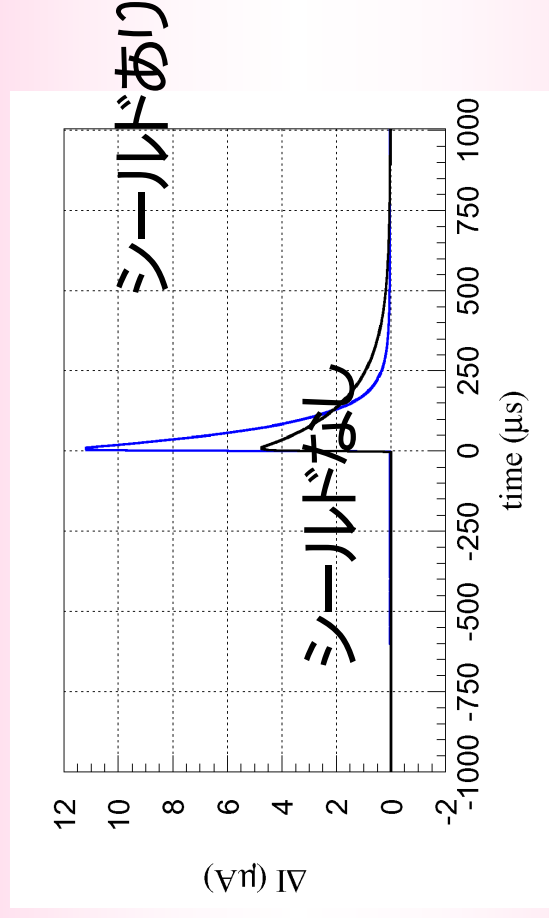
- ノイズはまだ完全には説明できない (超過ノイズ)



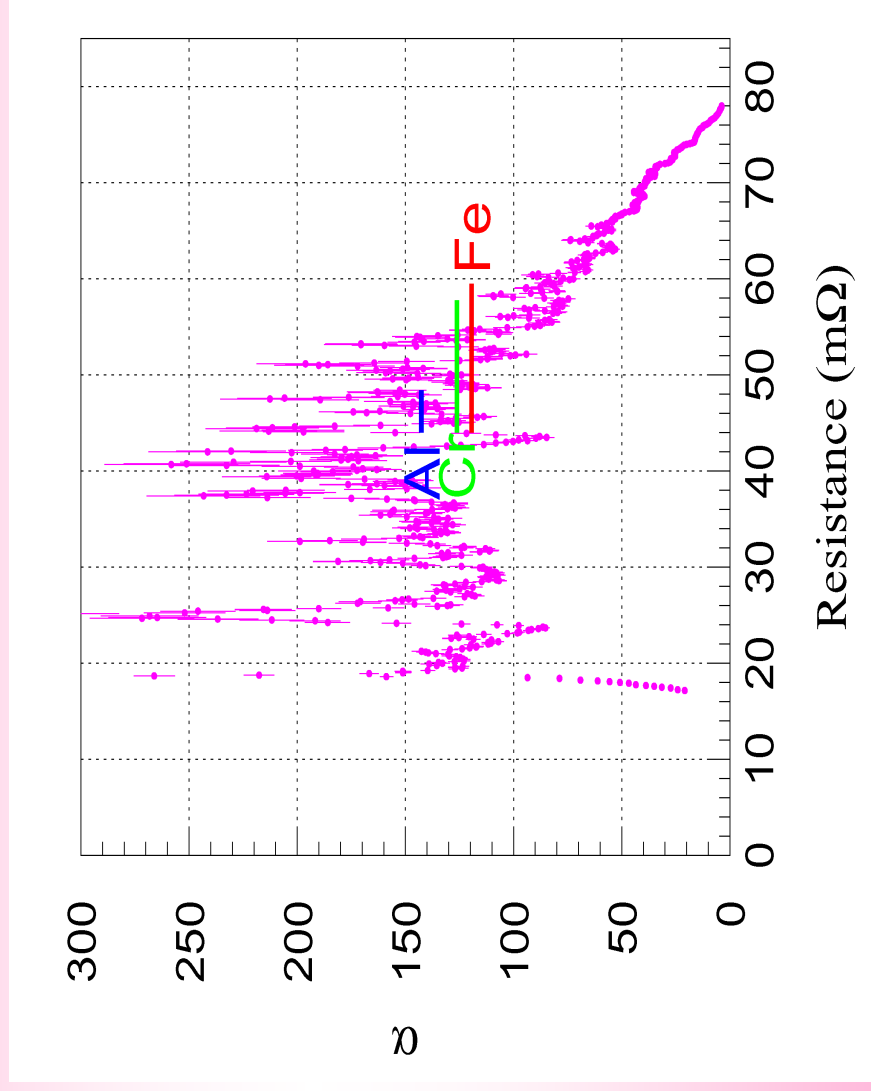
コンデンサ



超伝導磁気シールド



感度 $\propto$



目的

衝突銀河団 A2256 のX線輝度分布

宇宙の高エネルギー天体現象の解明

銀河団の進化

二小銀河団同士が高速で衝突・合体

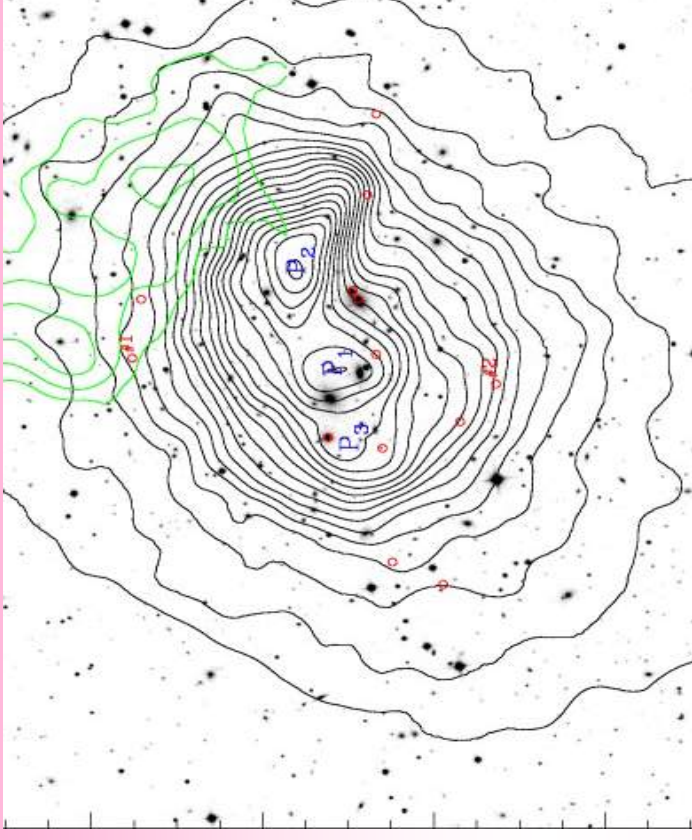
X線輝線のドップラー効果

(6.7 keV)

$v \sim 500 \text{ km/s}$ で高温ガスが運動

$\Delta E < 10 \text{ eV}$ の分解能で分離

⇒ TES型カロリメータで理論的には到達可能



次世代X線天文衛星搭載撮像分光器にむけて

- $\Delta E \sim 3 \text{ eV}$ のエネルギー分解能の実現

- マルチピクセル化 (32×32 ピクセル)

昨年の性能と問題点

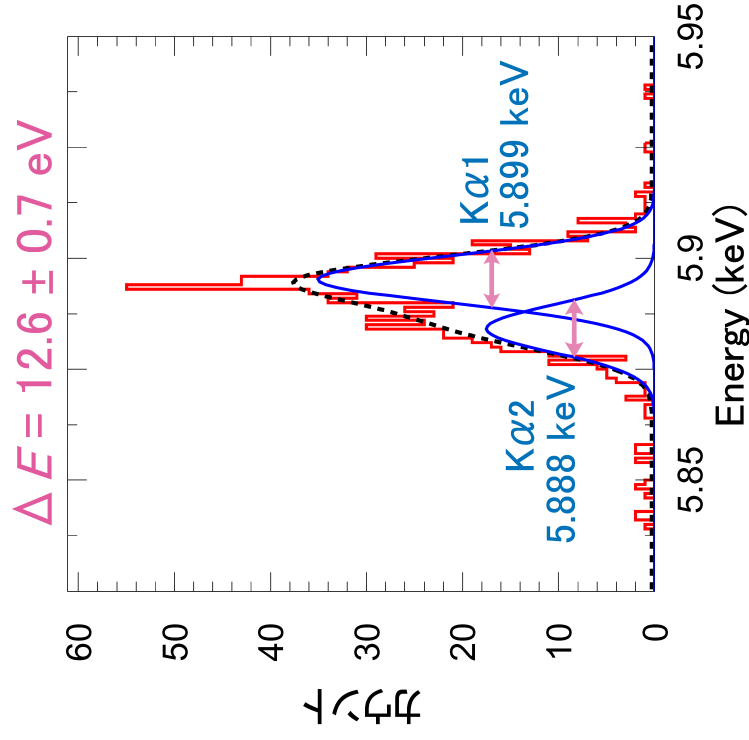
2002.2 の時点での

エネルギー分解能

$\Delta E = 12.6 \text{ eV @ } 5.9 \text{ keV}$

ベースラインのゆらぎ

$\Delta E = 11 \text{ eV}$



問題点

- X線パルスハイトが見積もりの約半分

⇒ カロリメータ動作時の実効的な温度計の感度 α の抑制

- 読み出し系ノイズが大さい

- X線照射は ^{55}Fe でのみ ⇒ エネルギーとパルスハイトの関係が不明確