

TES型X線マイクロカロリメータの 性能向上を目指した性能評価と ノイズ抑制の研究

宇宙物理実験研究室
赤松 弘規

修士論文内容

性能の良い素子の特性評価

γ 線カロリメータの特性評価

ノイズ抑制を目指した素子の特性評価

目次

1. 研究背景
2. TESカロリメータの動作原理
3. 実験装置と測定方法
4. 複素インピーダンス
5. 評価結果
6. まとめと今後の課題

1.研究背景

- 0.1～10 keVのX線領域：様々な元素の輝線が存在

将来のX線分光装置への要求

微細構造線の分離	⇒	数 eVのエネルギー分解能
広がった天体の観測	⇒	広視野撮像能力

X線マイクロカロリメータが有力候補

- 次世代X線天文衛星 (DIOS : Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)
中高温銀河間物質 (Missing baryon) の大規模構造を探る

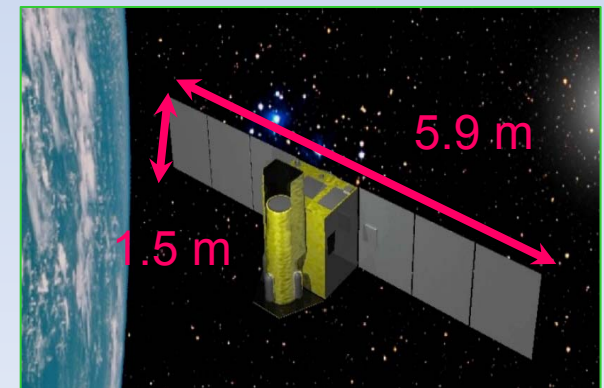
搭載X線分光装置への要求 (Tawara+, SPIE, 2008)

エネルギー分解能 2 eV

広視野撮像能力 ⇒ 256素子のアレイ化

TES型X線マイクロカロリメータ

DIOS衛星 (PI: 大橋)
2015年打ち上げを提案中



2.TESカロリメータの動作原理

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感知

エネルギー分解能

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

TES (Transition Edge Sensor)

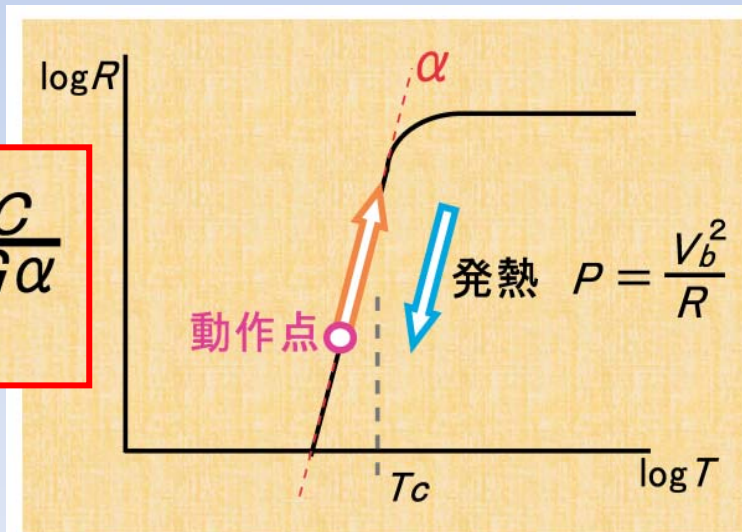
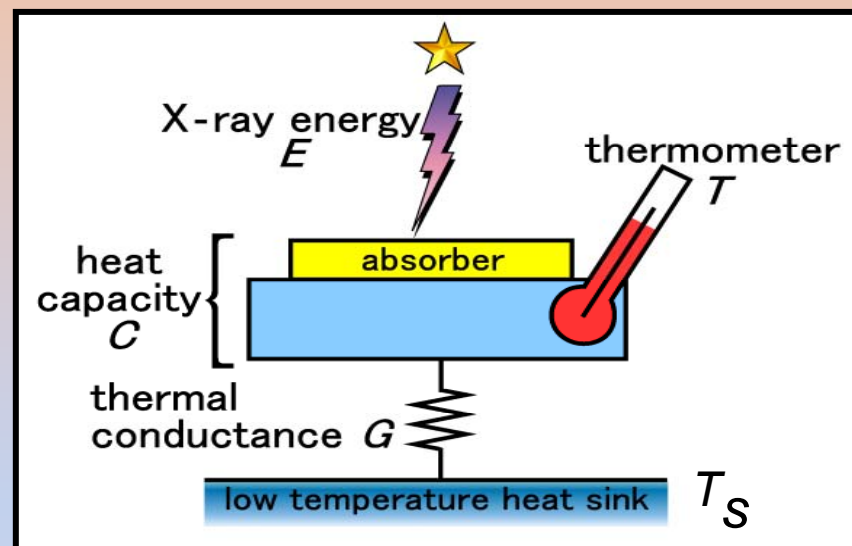
超伝導遷移端の急激な抵抗
変化を利用した温度計

TESの感度を表すパラメータ

$$\alpha = \frac{\partial \ln R}{\partial \ln T} \quad \beta = \frac{\partial \ln R}{\partial \ln I}$$

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha / (1 + \beta)$$

$$\tau = \frac{C}{G \alpha}$$



理論的分解能を知る上で必須だが、
X線パルスからではパラメータ α 、 β 、 C の分離が困難

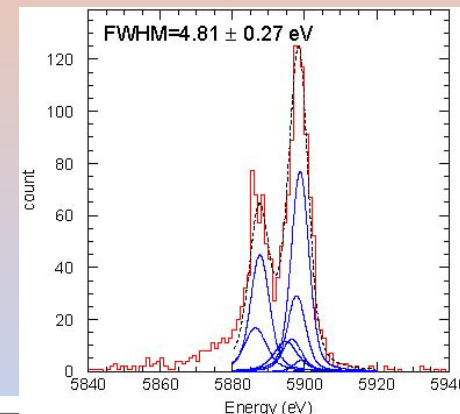
• これまでの結果

Ti/Au TESカロリメータをIn-house 製作（首都大&宇宙研）

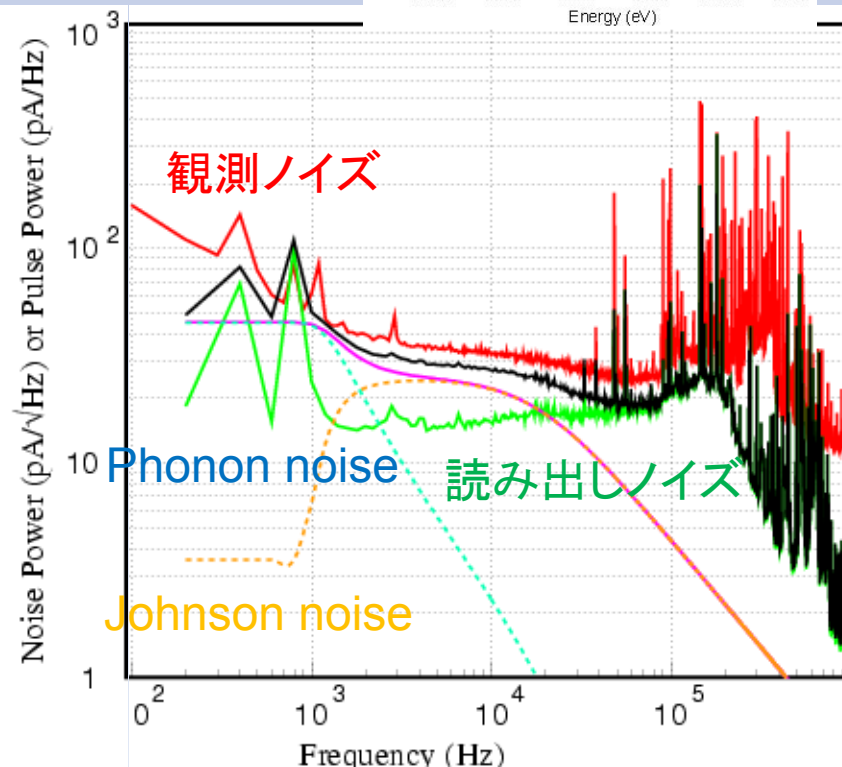
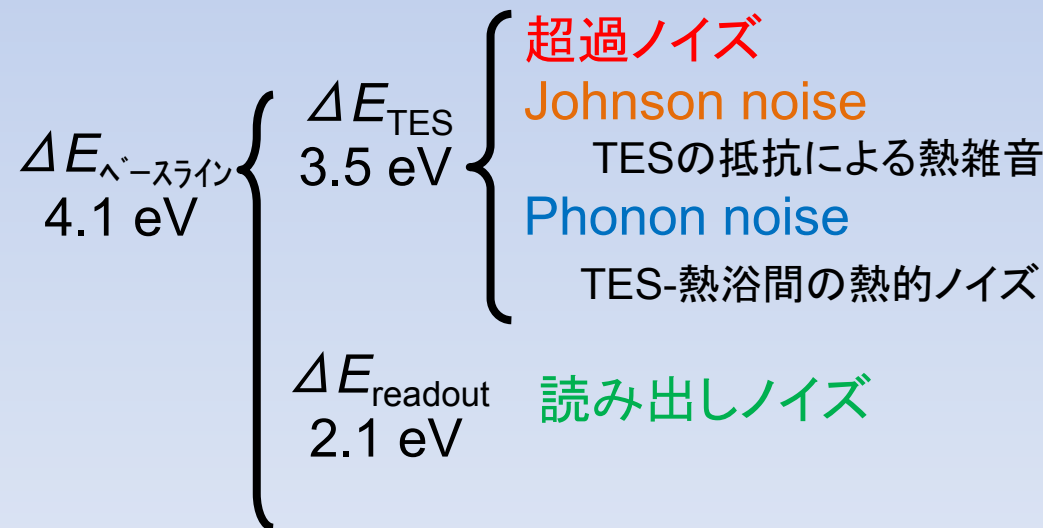
エネルギー分解能 4.8 eV @ 5.9 keV (Yoshino+, JLTP, 2008)

分解能を制限している原因は？

⇒従来の理論モデルでは
説明できない超過ノイズの存在



TMU146-4dのエネルギー分解能内訳



本研究の目的

- TESカロリメータの特性評価方法の確立
- 性能を制限している原因の追及
- 超過ノイズの振る舞いの評価

他機関での超過ノイズの原因候補 (Irwin & Hilton 2006)

クーパー対の揺らぎ

渦糸数密度の揺らぎ

超伝導・常伝導の状態揺らぎ

超伝導体を用いるTES特有



原因解明と振る舞いの理解が急務

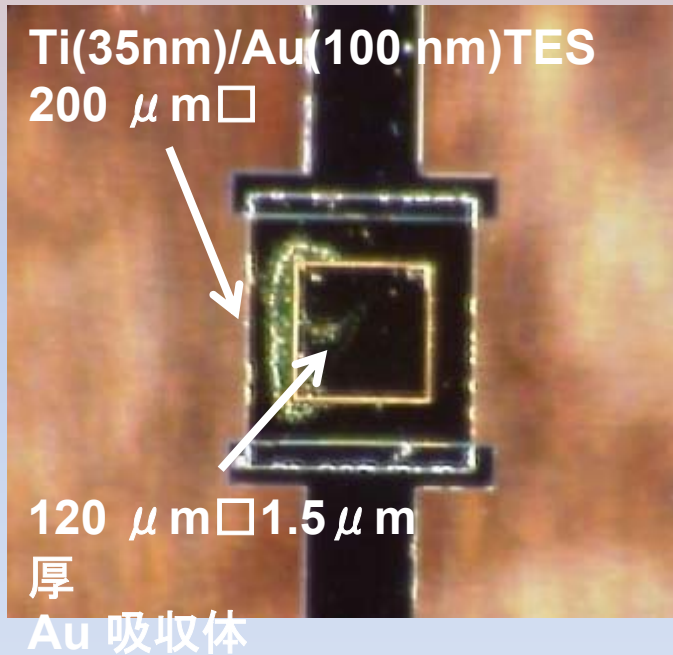
我々の素子でも同様な性質の超過ノイズが存在するか検証

3.実験装置と測定方法

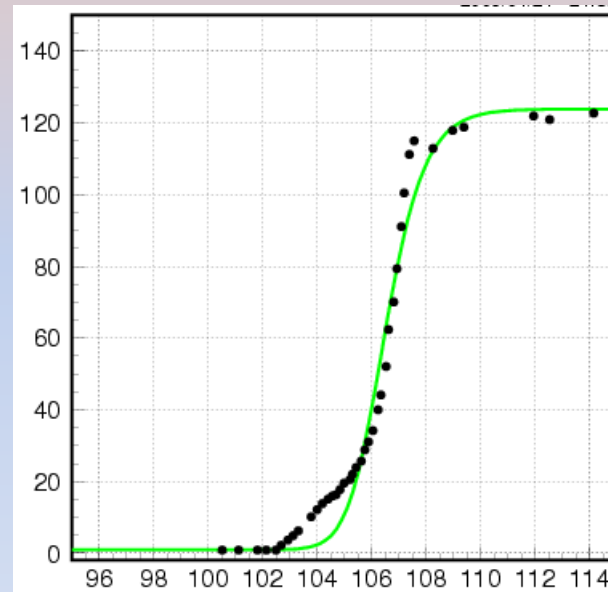
希釈冷凍機
(OXFORD社製)

TMU146-4d

Yoshino +, JLTP, 2008

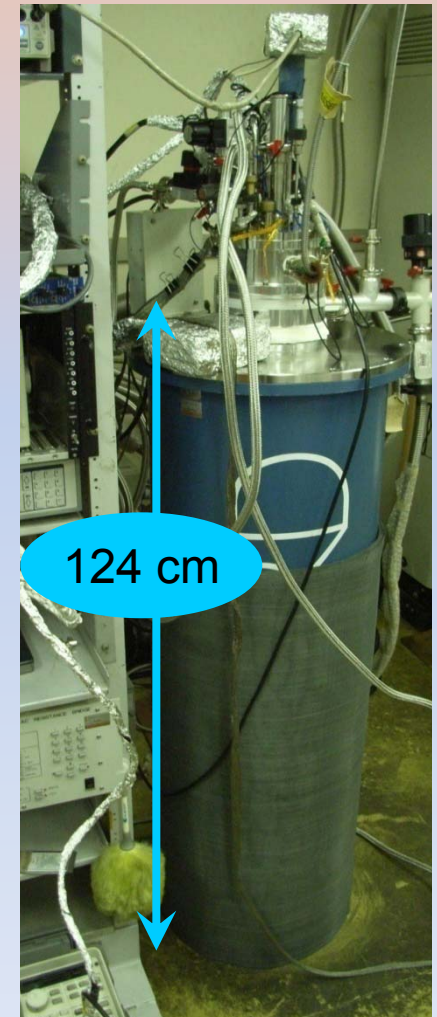


抵抗値 [$\text{m } \Omega$]



熱浴温度 [m K]

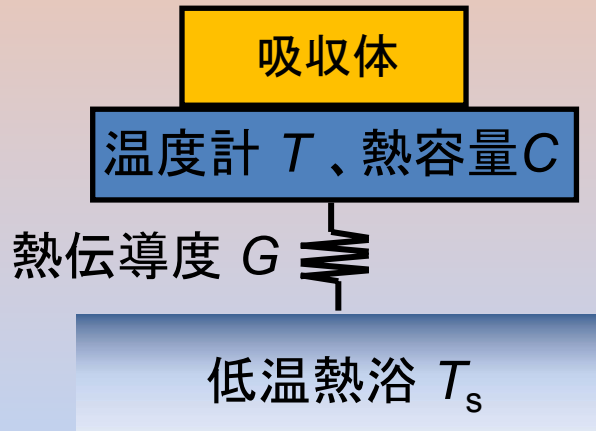
$T_c = 102 \text{ mK}$
二段転移気味



4.TESカロリメータの複素インピーダンス

インピーダンスからパラメータを決定可能

Lindeman + 2004



$$Z_{\text{TES}} = Z_{\infty} + (Z_0 - Z_{\infty}) \frac{1}{1 - i \omega \tau_{\text{eff}}}$$

周波数が0のインピーダンス $Z_0 = -R \left(1 + \frac{\beta + 2}{\mathcal{L} - 1} \right)$

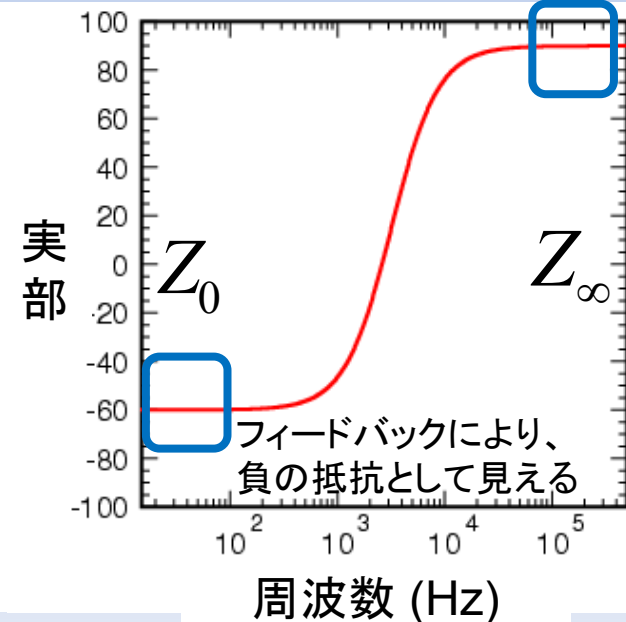
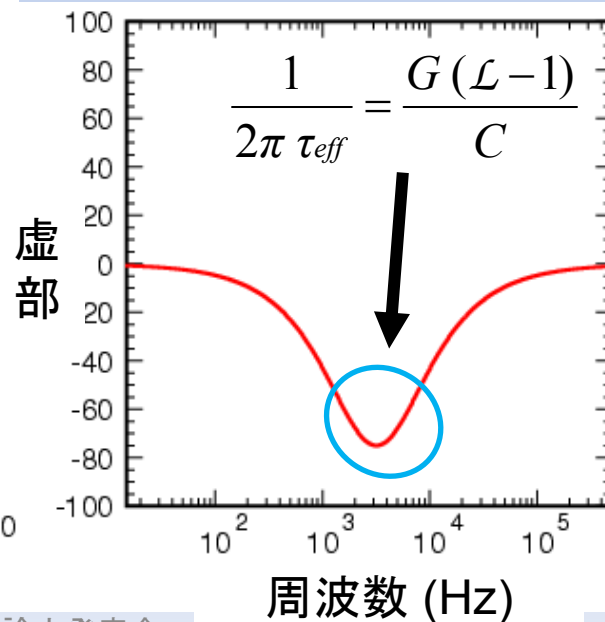
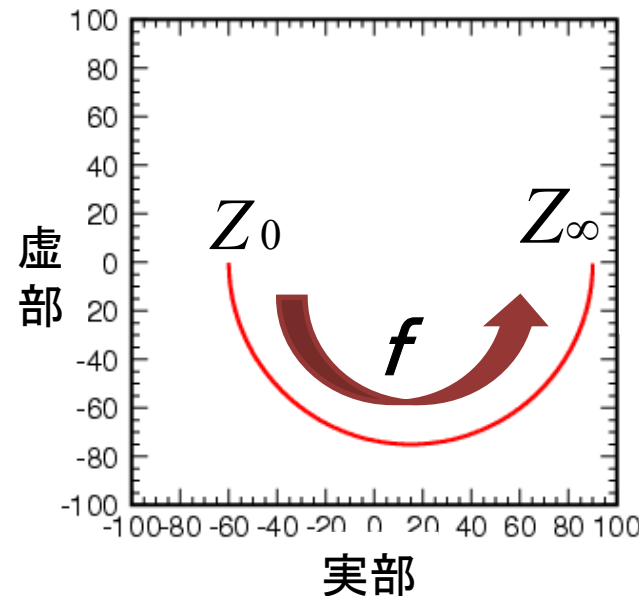
実効的な
時定数 τ_{eff}

周波数が ∞ のインピーダンス $Z_{\infty} = R (1 + \beta)$

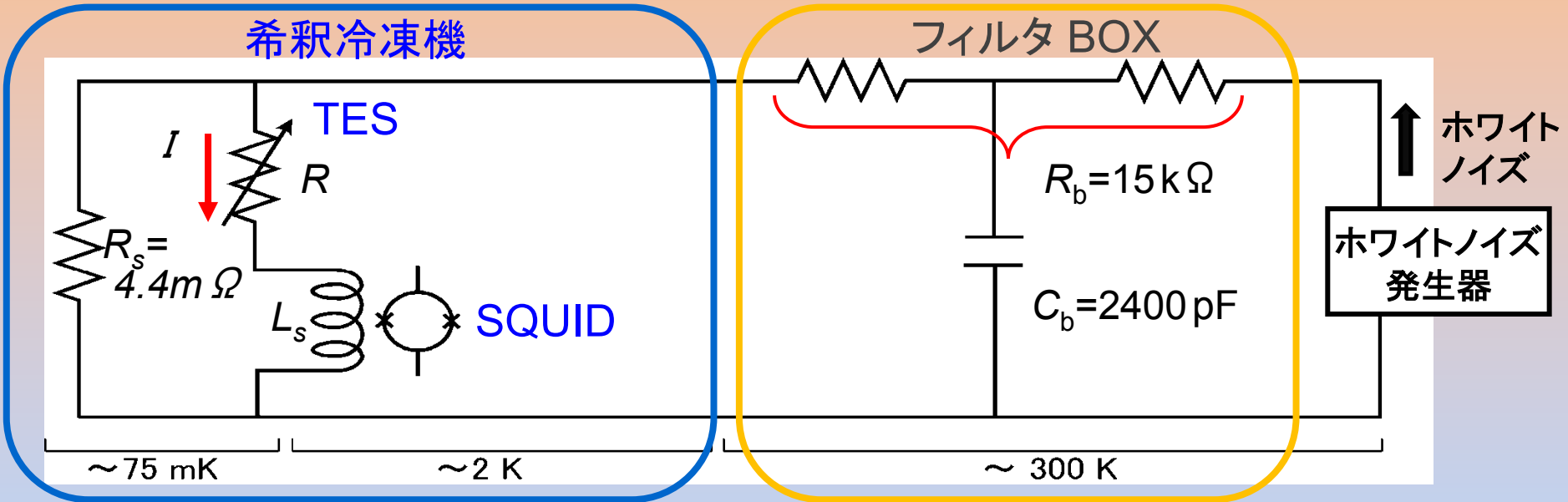
フィードバックの
ループゲイン $\mathcal{L} = \frac{\mathcal{P}\alpha}{GT}$

素子の熱的な応答分だけ
フィードバックが遅れていく

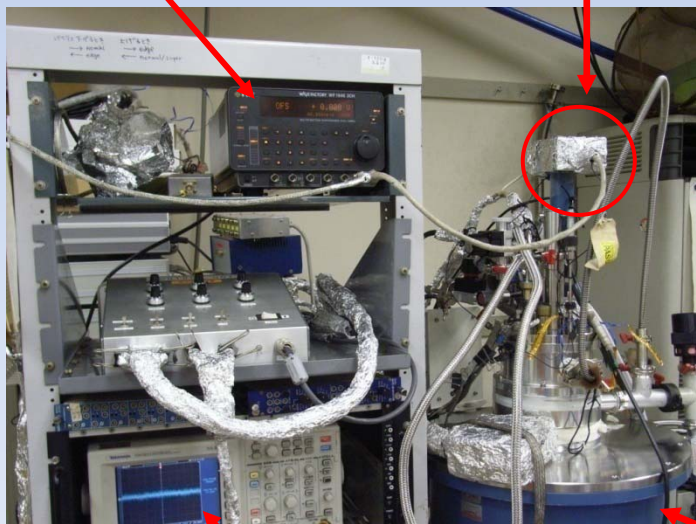
フィードバックが追いつかず
ただの抵抗と見なせる



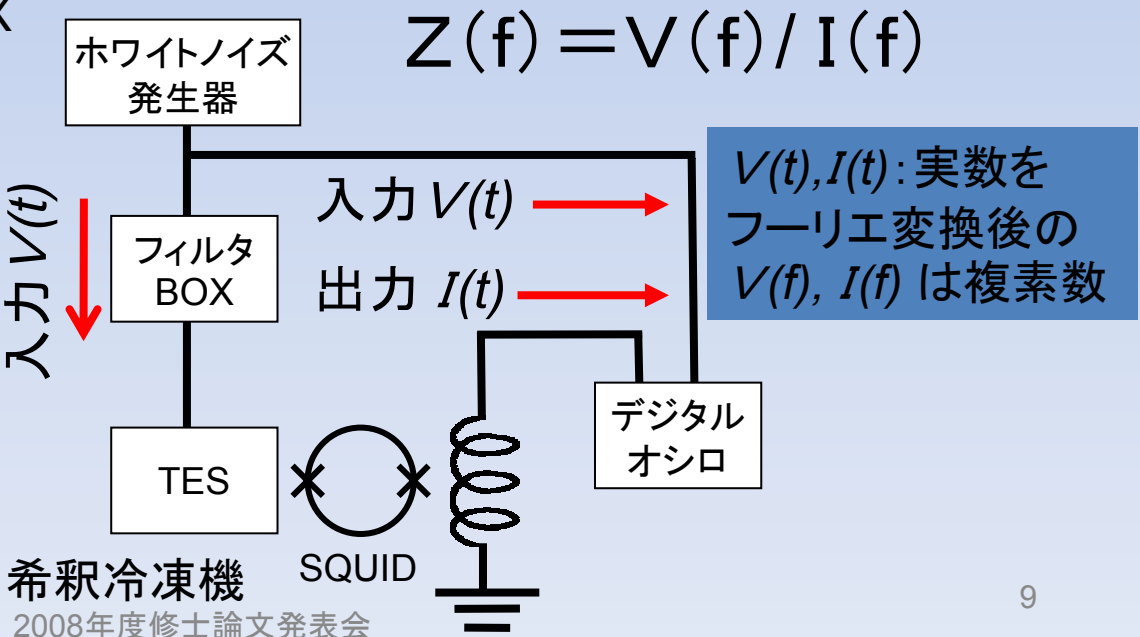
測定回路



ホワイトノイズ発生器 フィルタBOX



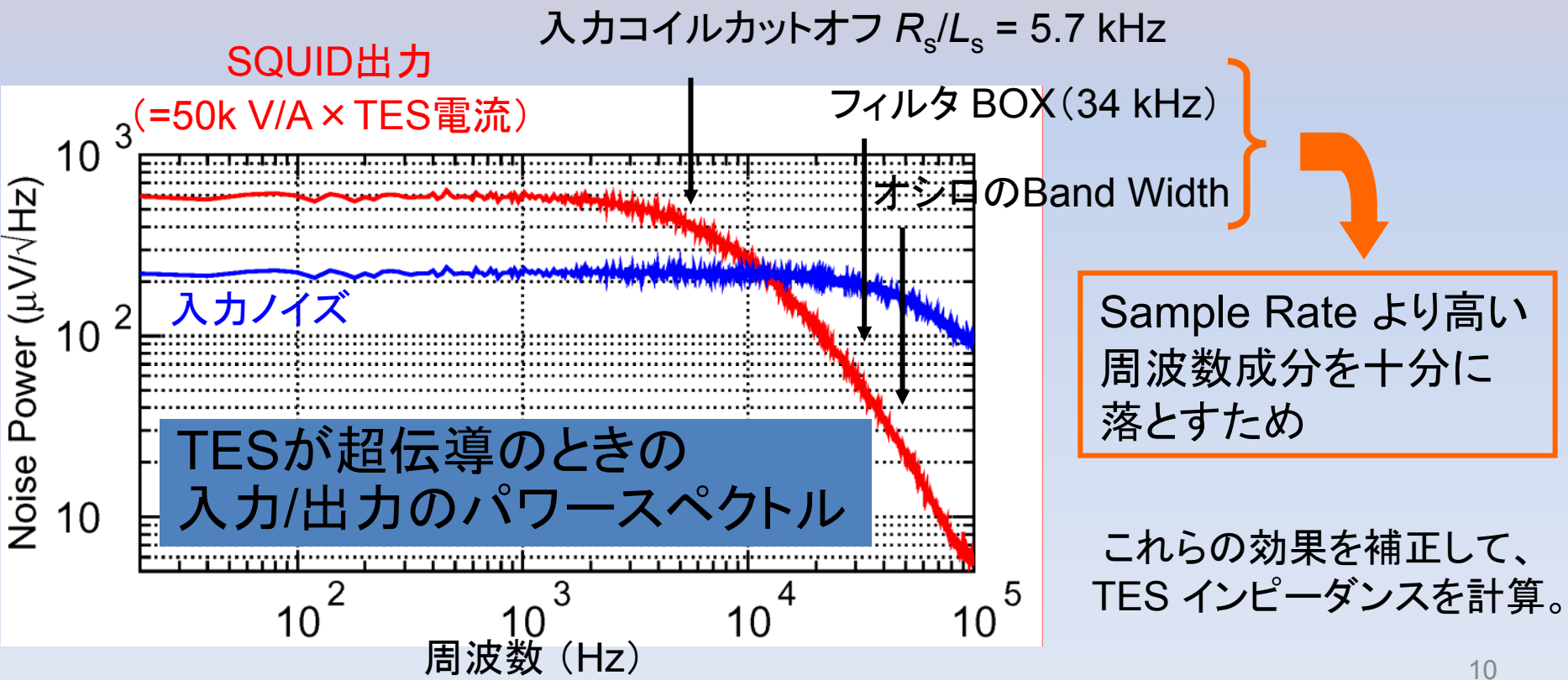
オシロスコープ



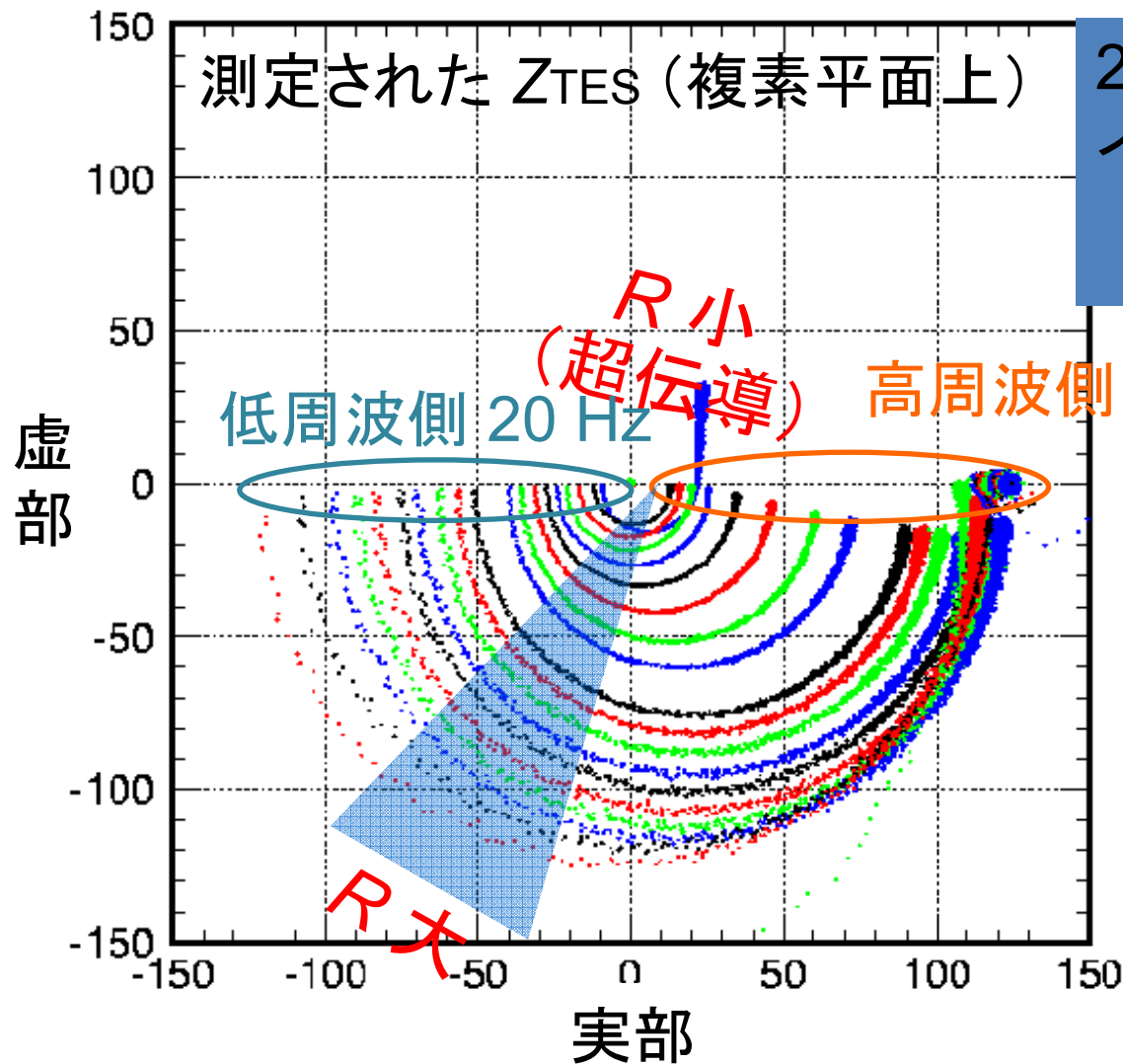
時系列データの取得方法

ADCボードで時空間のデータを取得しフーリエ変換して評価

Sample Rate	Sample Number (サンプル時間)	Records = 平均数	Band Width	入力ノイズ
200 kHz	10k (50ms)	340	50 kHz	2 V _{pp}



5. 評価結果 複素インピーダンス



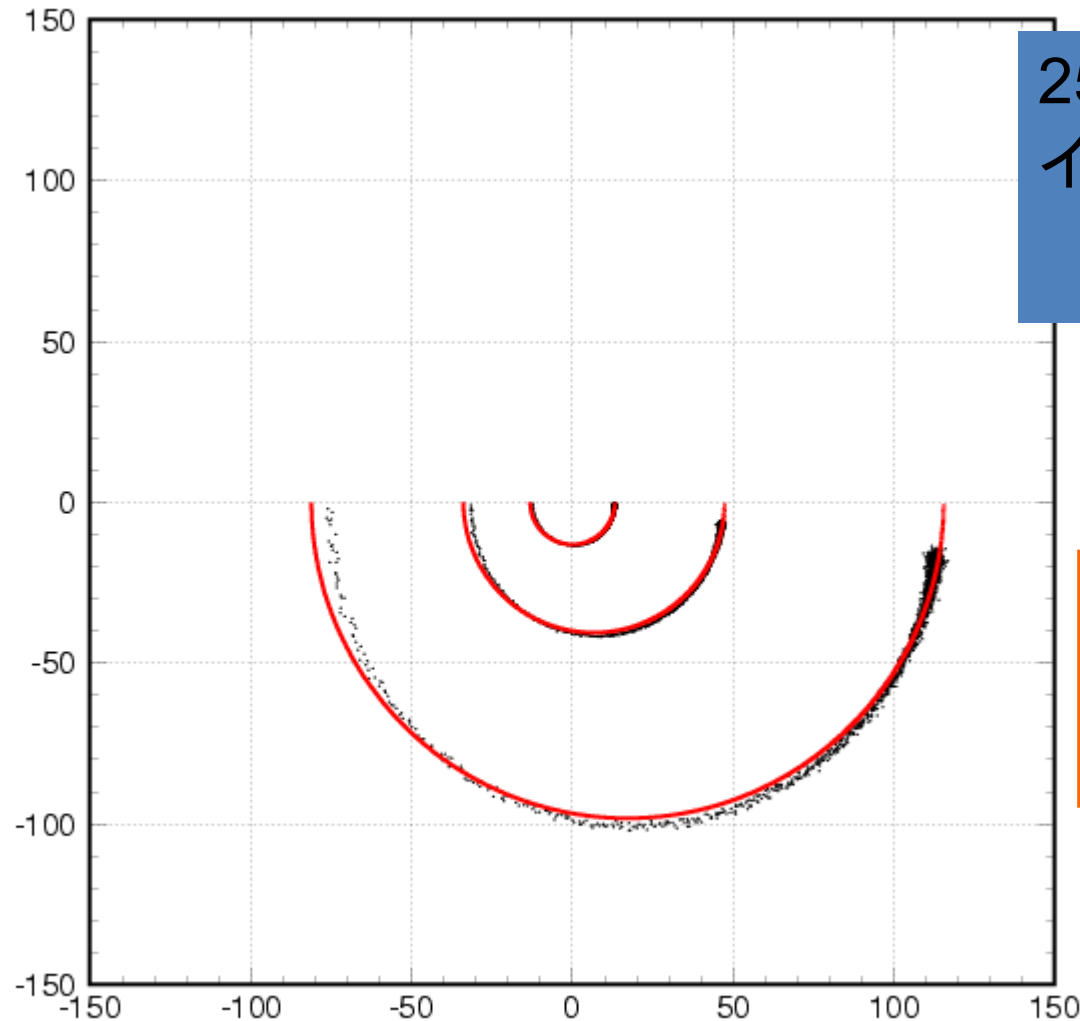
25箇所の異なる抵抗値で
インピーダンスを測定

$$R = 8 \sim 120 \text{ m}\Omega$$

モデルインピーダンス
をフィットすることで
 α 、 β 、 C が得られる

5. 評価結果 複素インピーダンス

虚部



実部

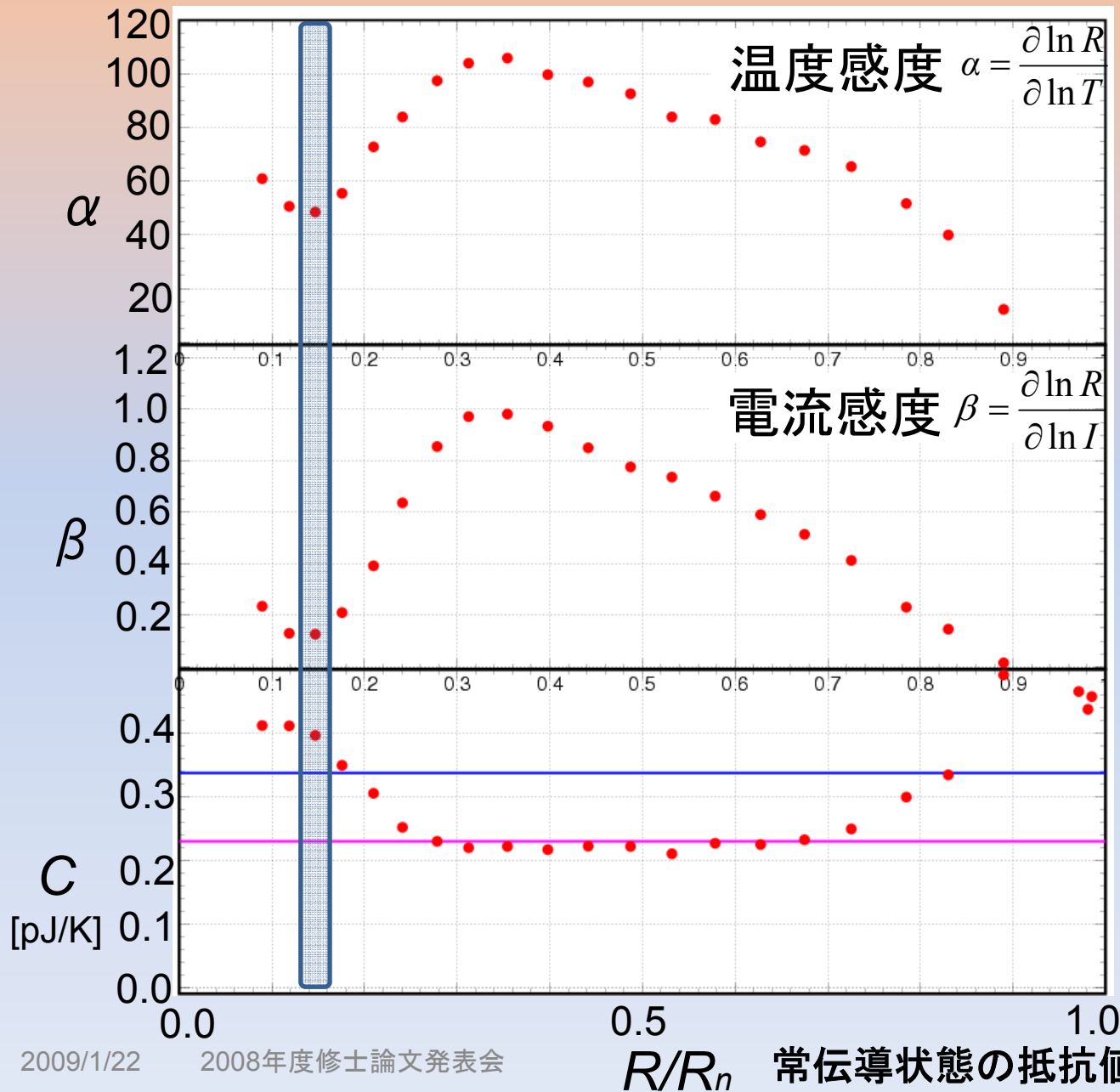
25箇所異なる抵抗値で
インピーダンスを測定

$$R = 8 \sim 120 \text{ m}\Omega$$

kHz

モデルインピーダンス
をフィットすることで
 α 、 β 、 C が得られる

パラメータの抵抗値依存性



動作点でのパラメータを用いてノイズ解析

熱容量Cは遷移中で
常伝導状態に近い値

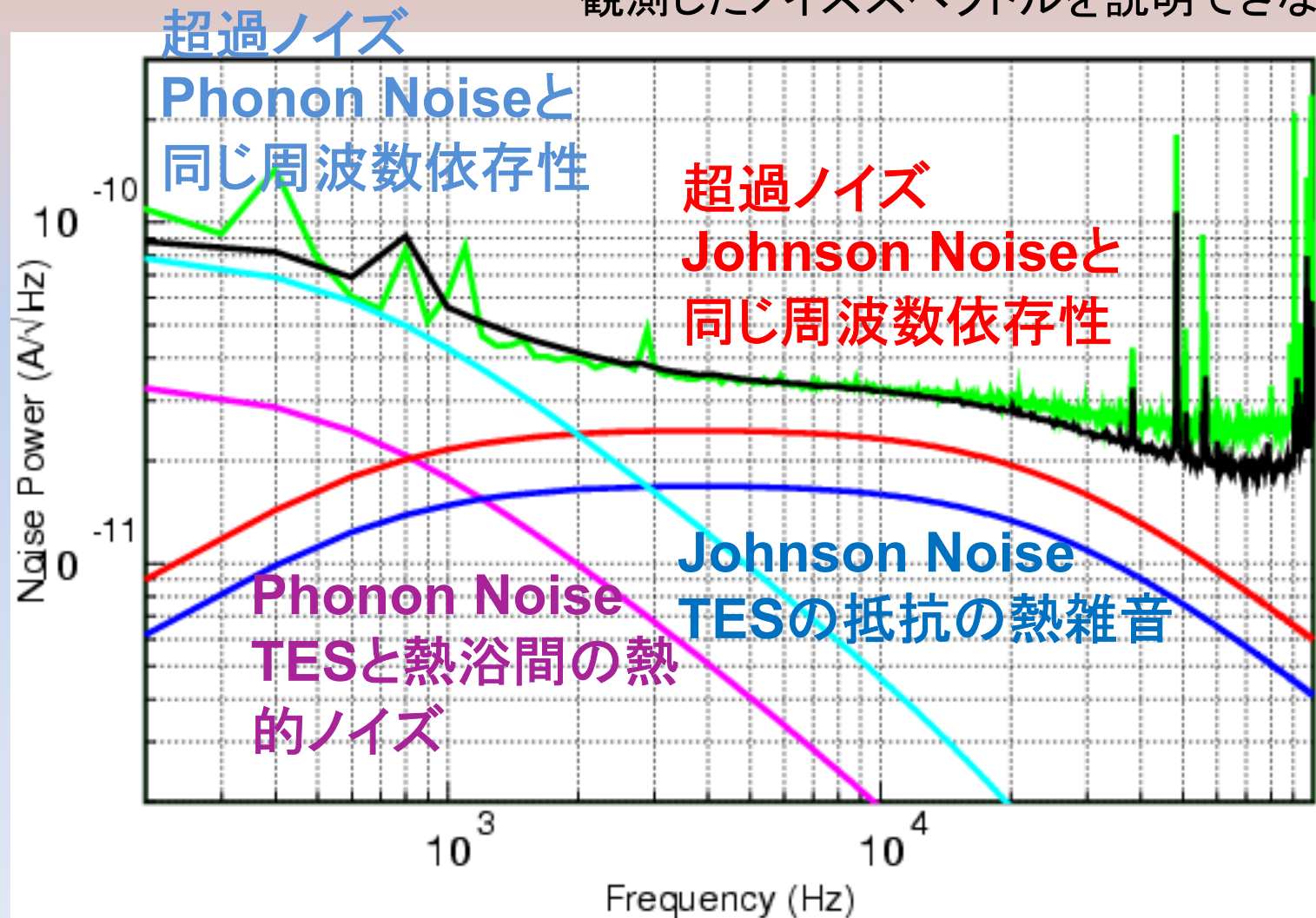
TESが超伝導を仮定

TESが常伝導を仮定

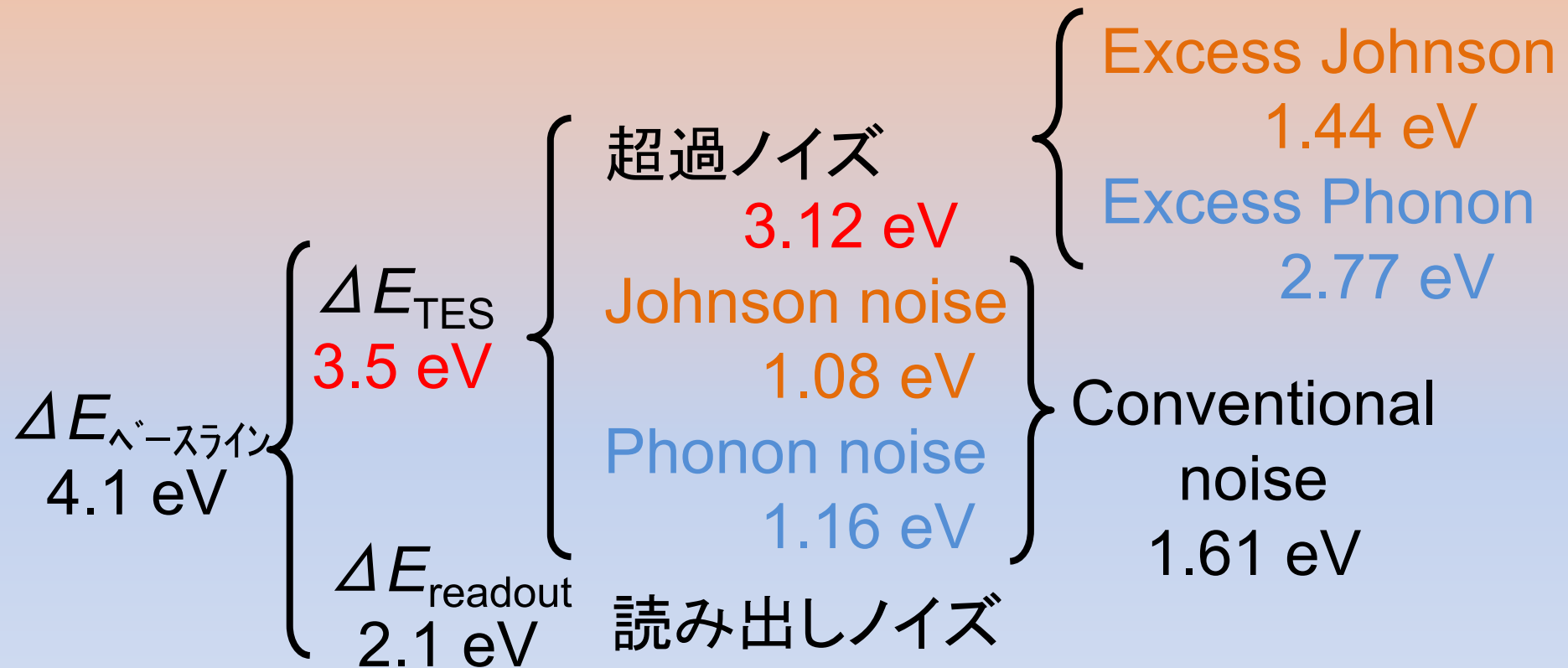
X線照射時の動作点におけるノイズ解析

得たパラメータ(α 、 β 、 C)を用いて理論式でノイズスペクトルを評価

理論モデルと読み出しノイズのみでは
観測したノイズスペクトルを説明できない



TMU146-4dのエネルギー分解能内訳

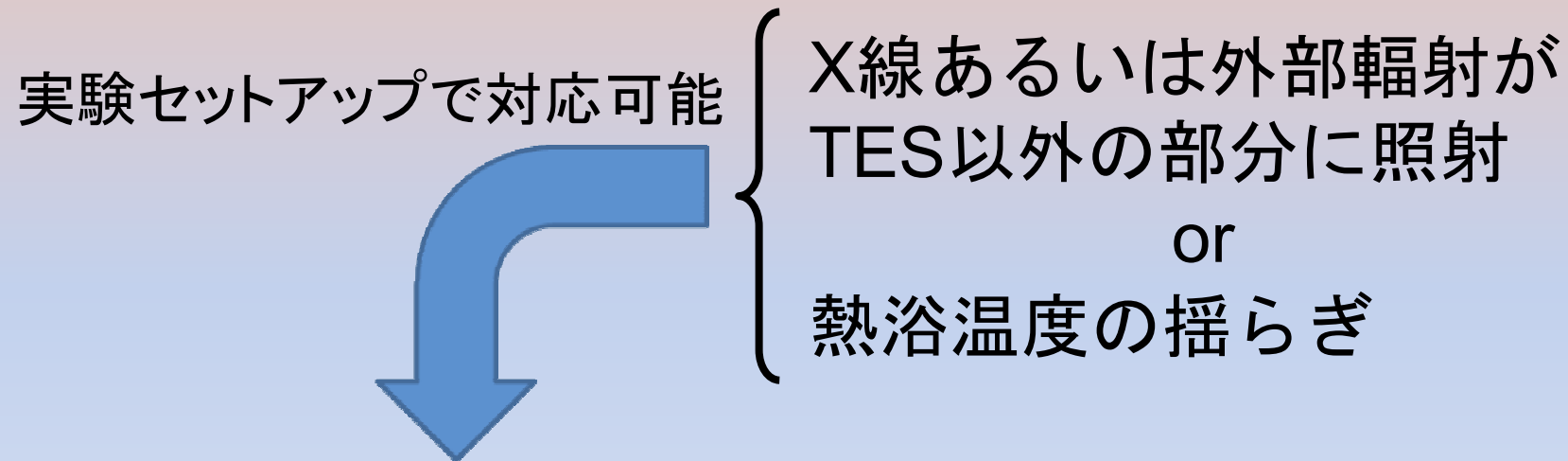


二種類の超過ノイズ成分の存在を確認

Phonon noise 的な超過ノイズ

エネルギー分解能に最も大きな寄与(2.77 eV)

原因 ⇒ 素子の温度揺らぎ

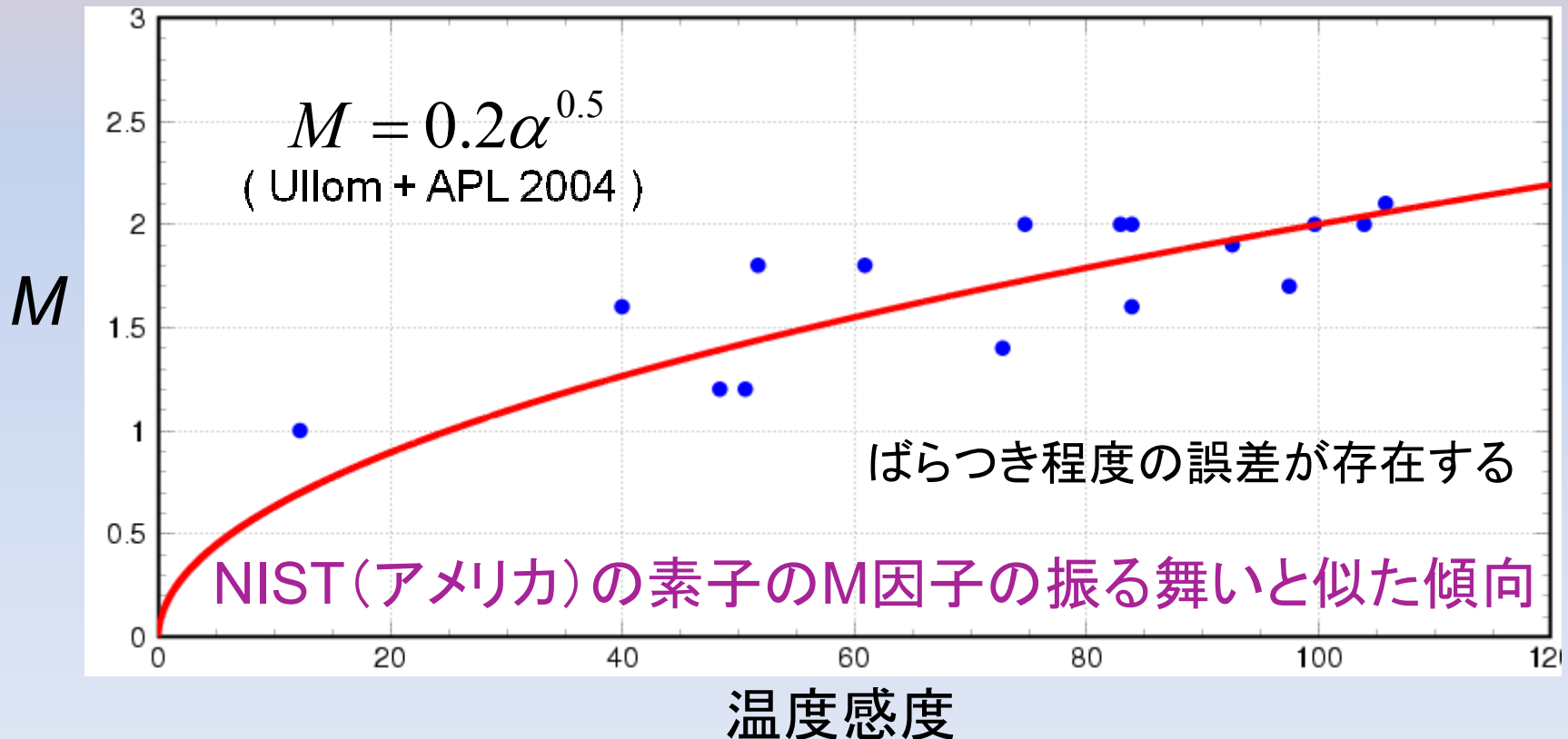


コリメータを用いてTESのみにX線照射
冷凍機の温度安定度を改善

Johnson noise 的な超過ノイズ

他機関ではこちらだけ観測され大きな寄与
原因未解明⇐振る舞いの理解が重要

$$\text{超過ノイズ [A}/\sqrt{\text{Hz}}] = M \times \text{Johnson Noise [A}/\sqrt{\text{Hz}}]$$



6.測定結果のまとめ

- インピーダンスを用いてTESのパラメータを評価する方法を確立
- TMU146-4dの α 、 β 、 C を評価
- Phonon 的とJohnson 的の二種類の超過ノイズがあることを明らかにした
- Johnson noise 的な超過ノイズの振る舞いを評価 ($M \sim 0.2 \alpha^{0.5}$)

6. 今後の課題

TMU146-4dにおいて、conventional noiseの寄与 **1.61 eV**
超過ノイズの抑制がカギ

- Phonon noise 的な超過ノイズ成分

⇒ 熱的な揺らぎが原因

コリメータを用いてTESのみにX線を照射(2月上旬予定)

冷凍機の温度安定度を改善

- Johnson noise 的な超過ノイズ成分

⇒ 温度感度 α と相関 ($M = 0.2\alpha^{0.5}$)

超伝導遷移が急に進むことで、TES内で遷移の

非一様性が大きくなり、ノイズ源になることを示唆

電流の流れる経路を制限することで非一様性を抑制

- 読み出しノイズ(2.1 eV 相当)の改善

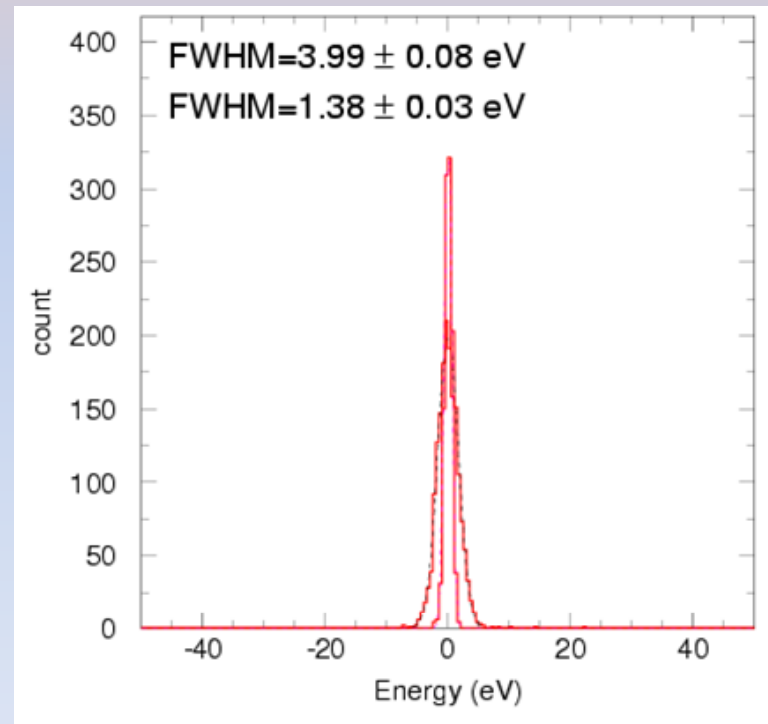
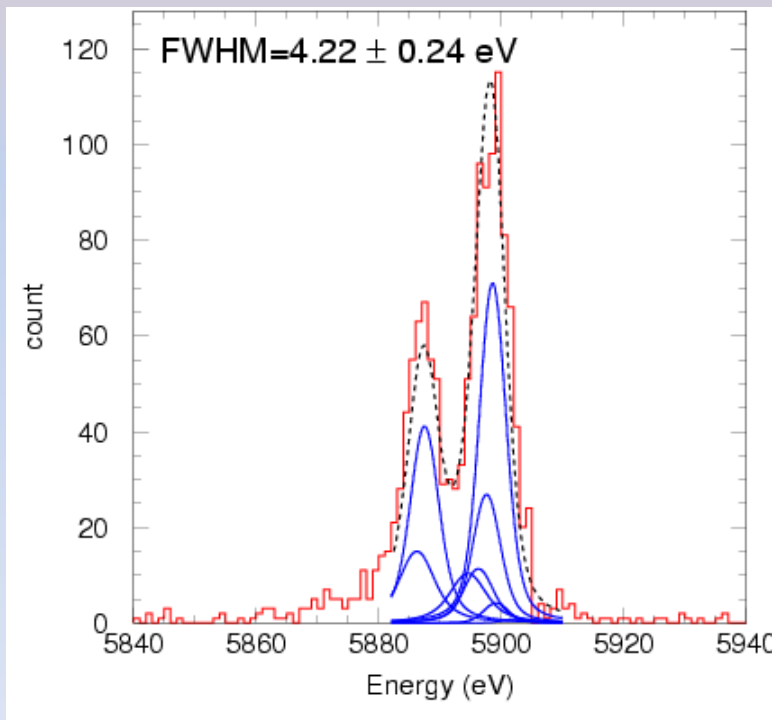
熱揺らぎ対策を行ったTMU146-4d再評価

熱揺らぎ対策

シリコンコリメータ(TMU168用を流用。TESに対して60%の穴)

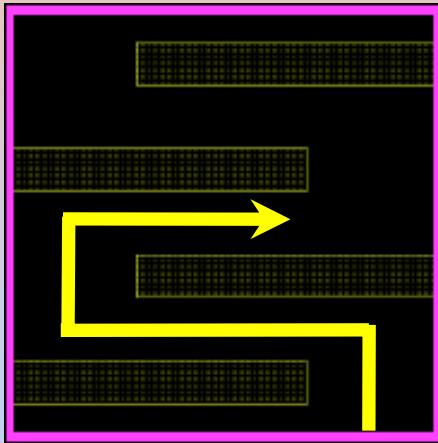
輻射対策

他の温度領域が見えないようにアルミテープ

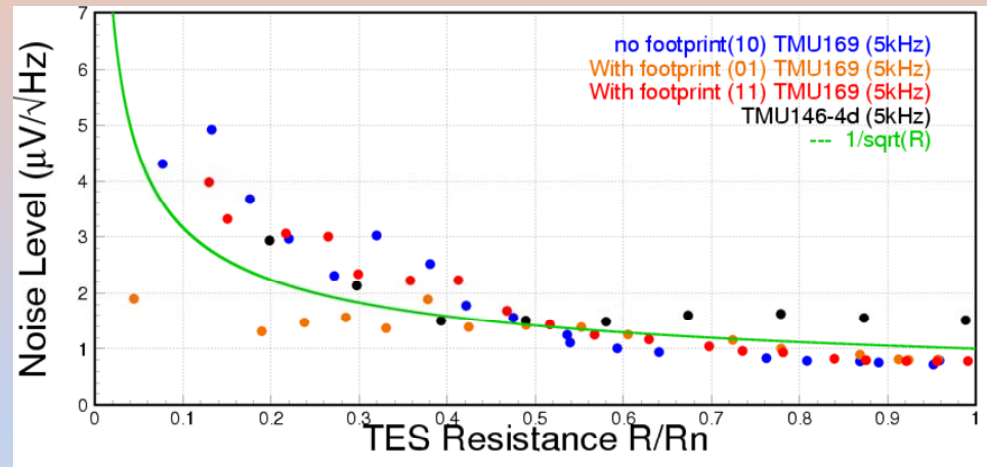


ノイズ抑制を目指した素子開発

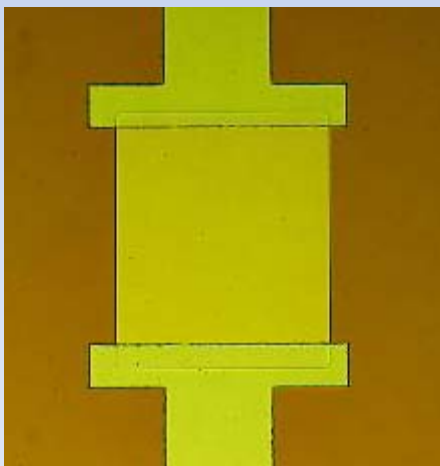
電流の流れる経路を制限することで、超伝導遷移の非一様性を解消



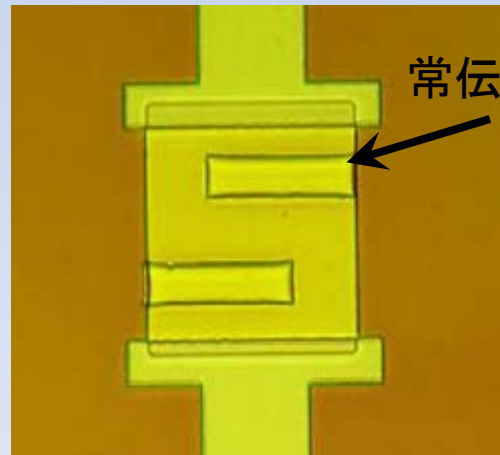
電流の
流れる方向



TMU169-10

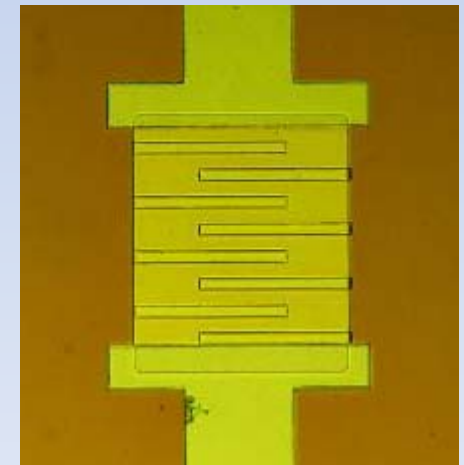


TMU169-11

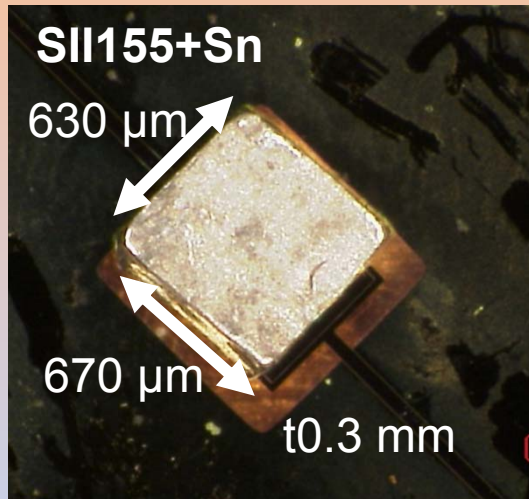


常伝導金属

TMU169-01

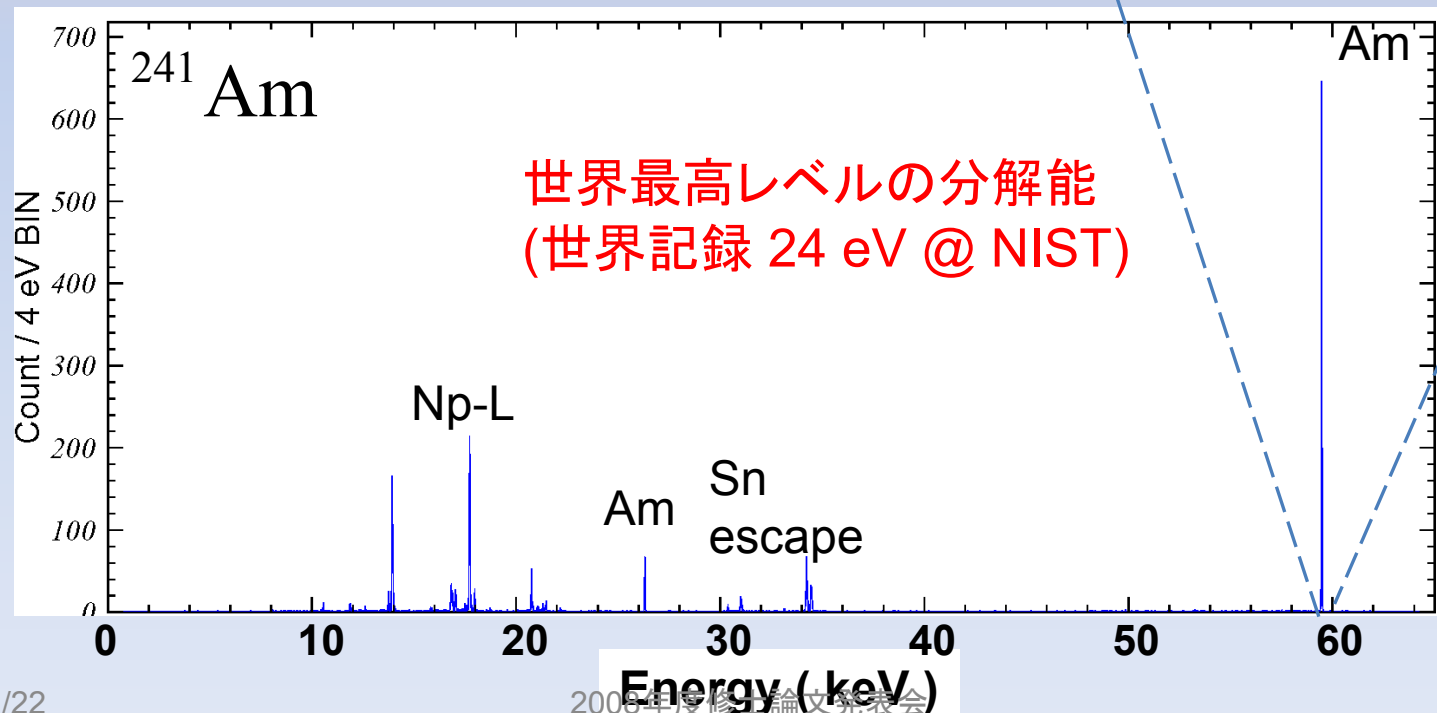
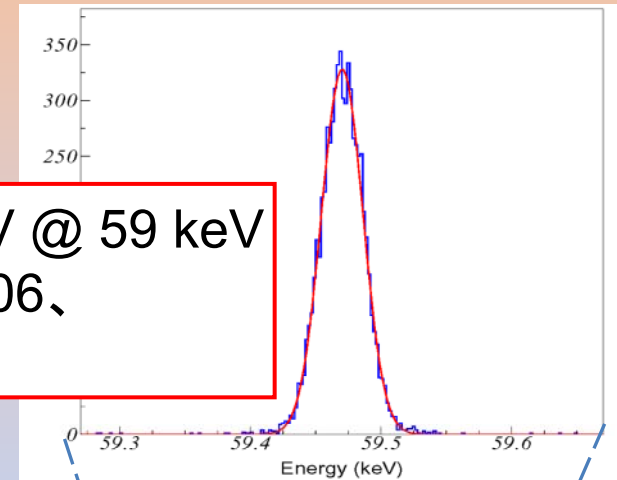


測定した TES型 γ 線マイクロカロリメータ



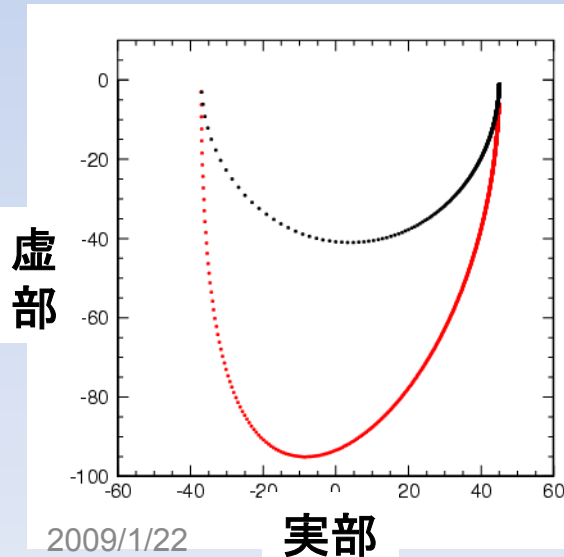
スズ ($Z=50$)
吸収体貼り付け
Stycast2850

$\Delta E_{\text{FWHM}} = 38.4 \pm 0.9\text{ eV @ } 59\text{ keV}$
(首都大 山川修論 2006、
Oshima et al 2008)

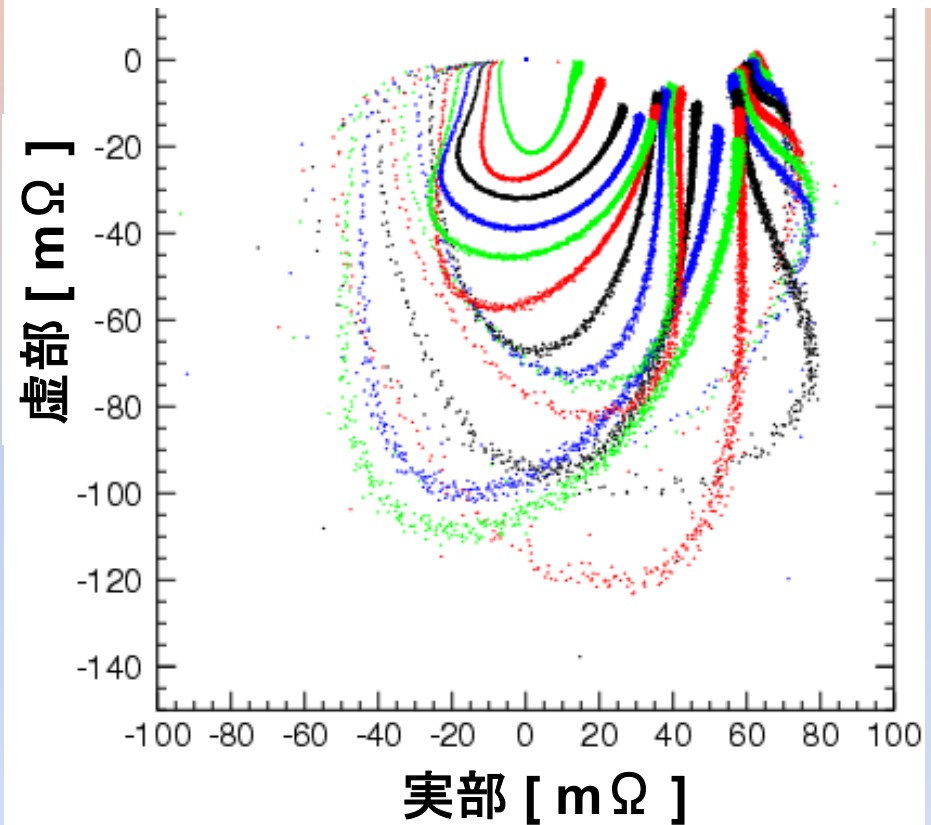


SII155+Snのインピーダンス測定結果

吸収体 – TES間の熱伝導度を
考慮した熱モデル



測定された Z_{TES} (複素平面上)

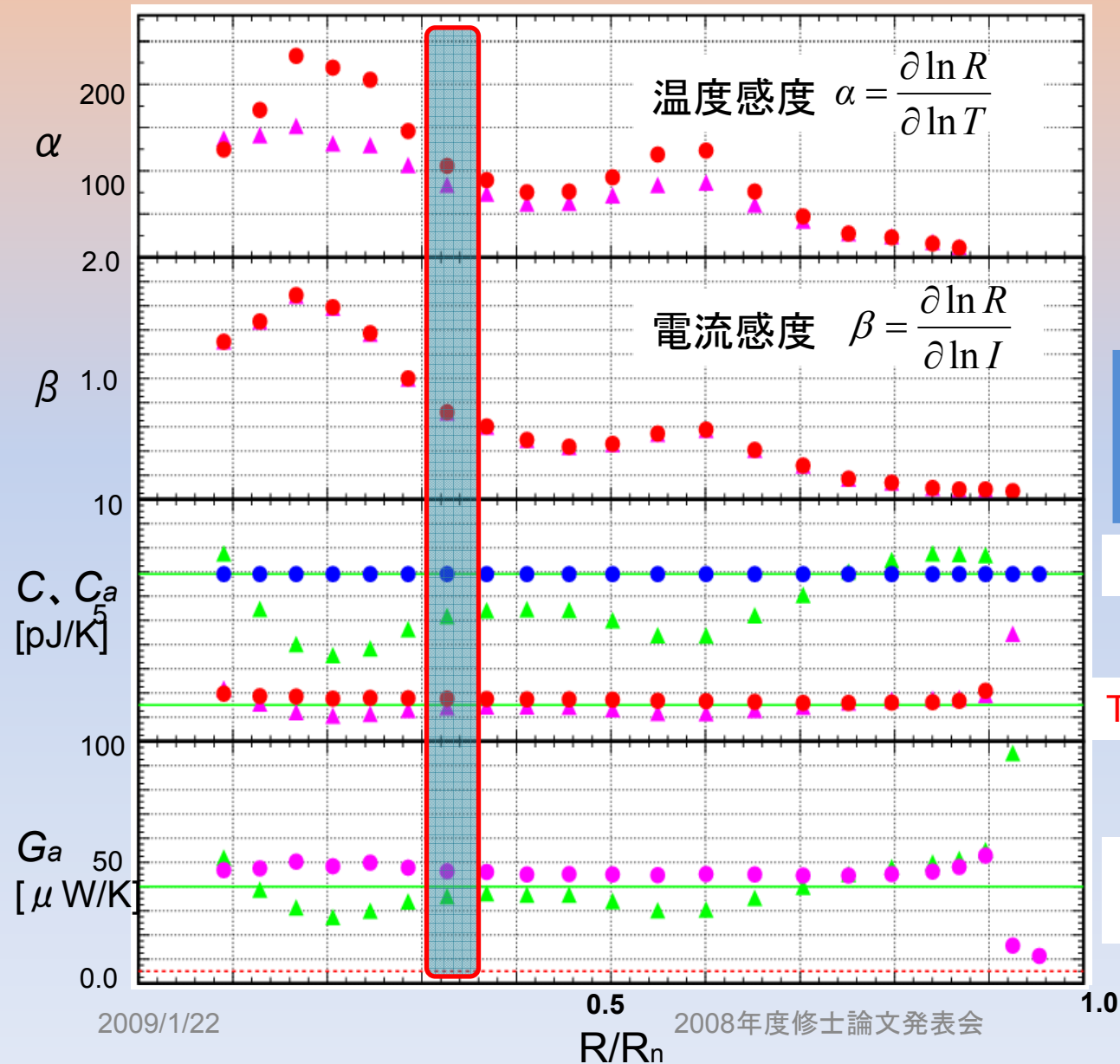


黒:熱伝導度が良い場合
赤:熱伝導度が悪い場合

フィットパラメータ

$$\alpha = \frac{\partial \ln R}{\partial \ln T} \quad \beta = \frac{\partial \ln R}{\partial \ln I} \quad \begin{matrix} \mathbf{C} & \mathbf{C}_a \\ \mathbf{G}_a & \end{matrix}$$

SII155+Snのインピーダンス測定結果



すべてのパラメータをfit



吸収体の熱容量は一定なはず
物性値で固定

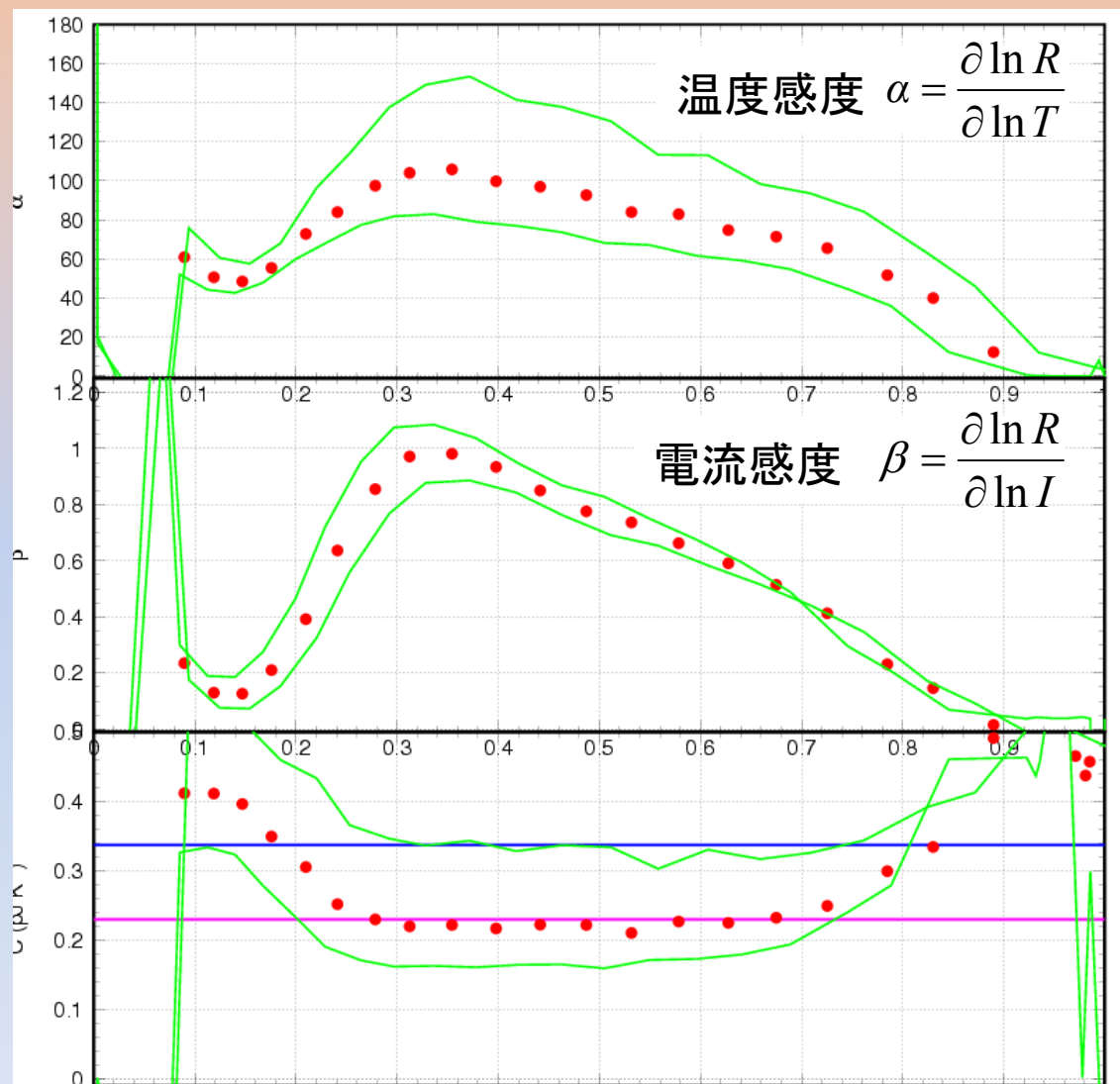
この動作点 ($R / R_n = 0.33$)
のパラメータを用いて
ノイズ解析

吸収体の熱容量 C_a

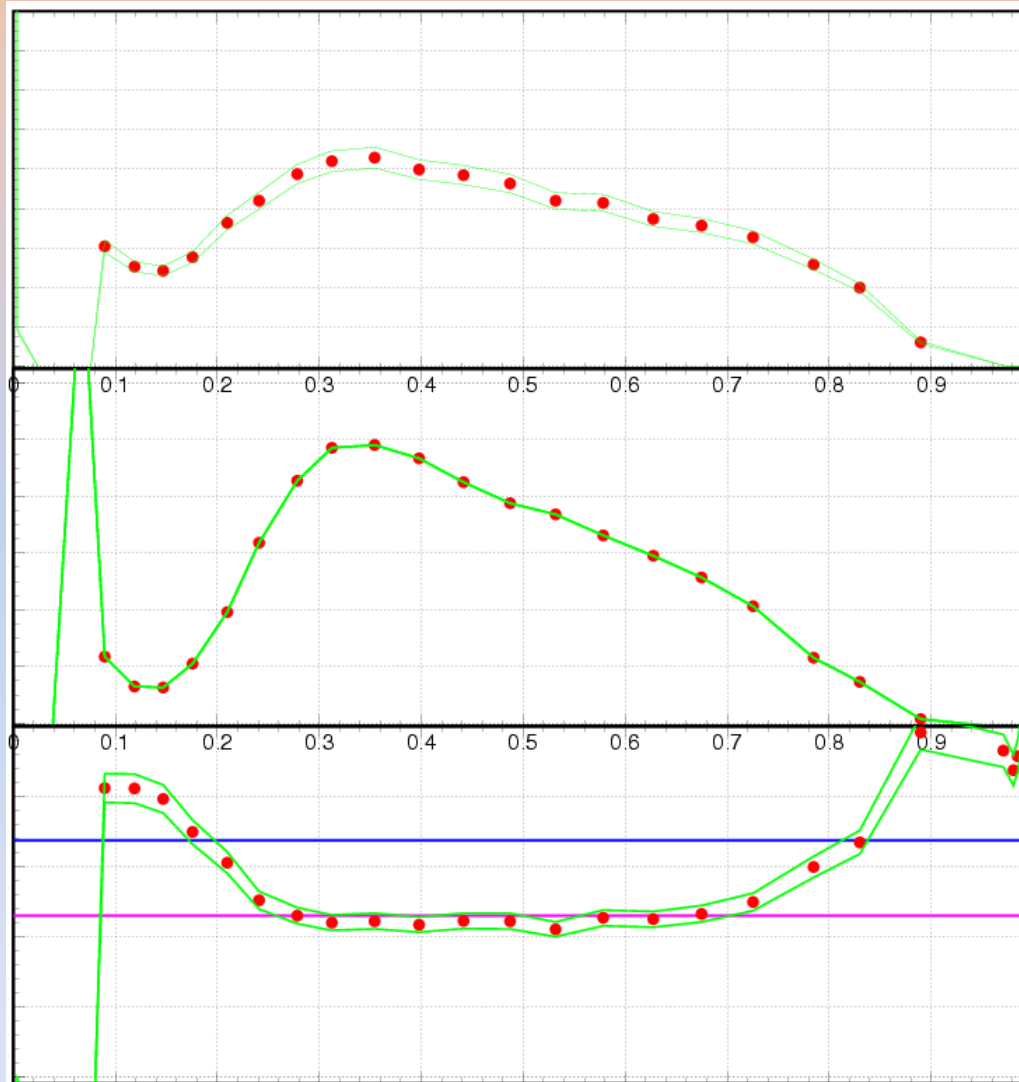
TESの熱容量 C

吸収体とTES
間の熱伝導度 G_a

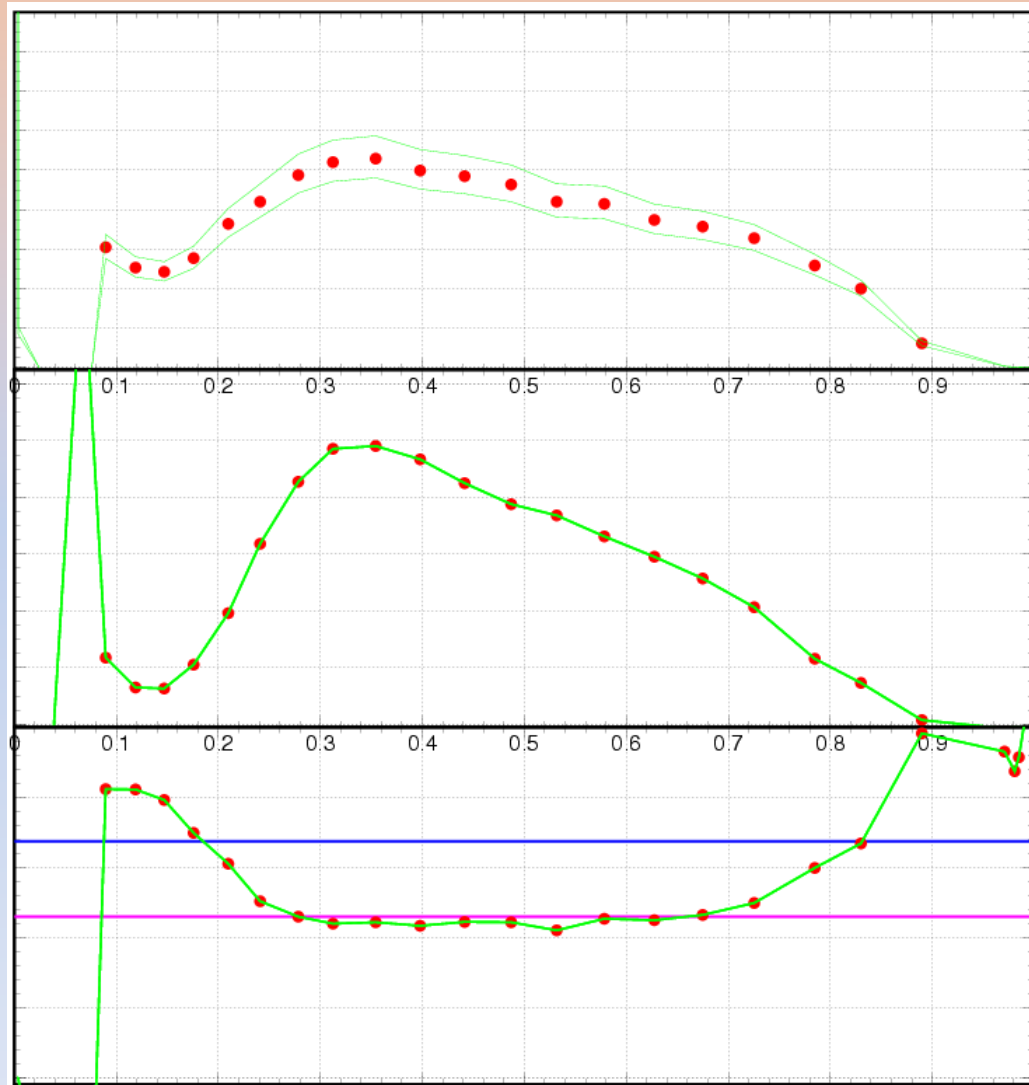
Rを5%ふった場合



Gを5%ふった場合



Iを5%ふった場合



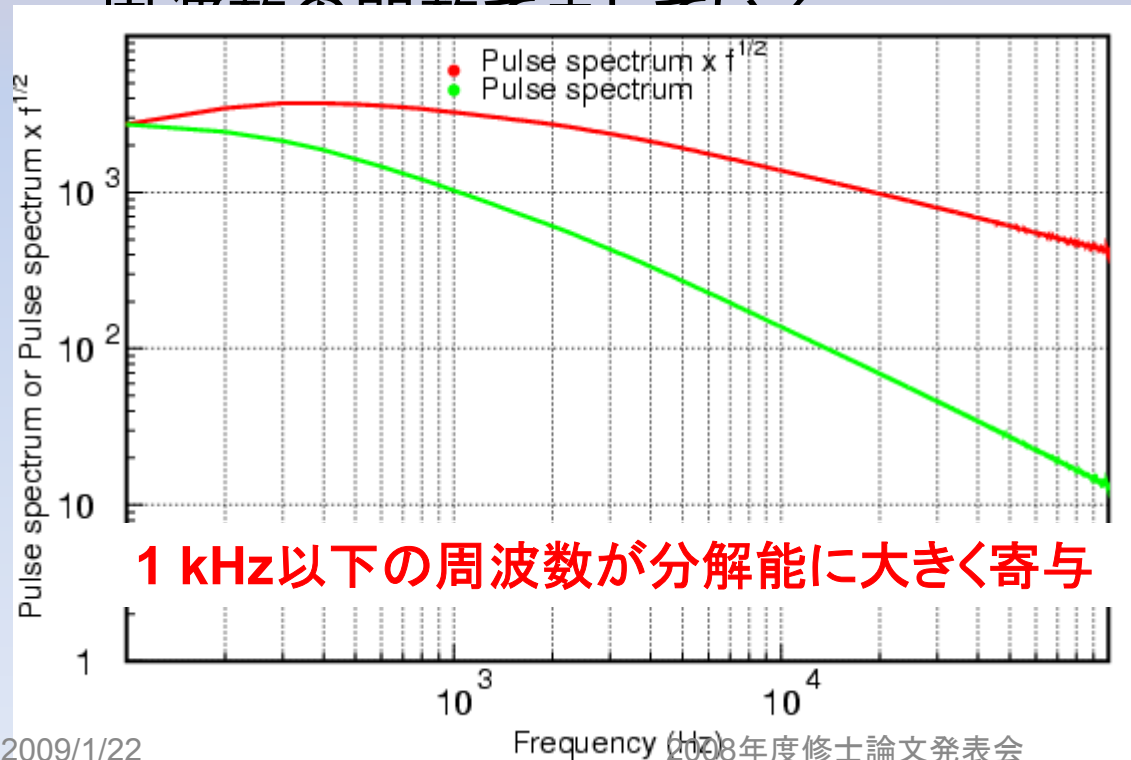
エネルギー分解能へのノイズの寄与

カロリメータのエネルギー分解能 (Moseley et al., 1984)

$$\Delta E_{rms} = \left(\int_0^{\infty} \frac{4df}{NEP^2(f)} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

パルススペクトル $\times \sqrt{f}$ はエネルギー分解能への寄与を

周波数の関数として示す



パルススペクトル $\times \sqrt{f}$

パルススペクトル

超伝導遷移に関する仮定

遷移の進み方

ほぼ超伝導状態
with phase slips

ほぼ常伝導状態

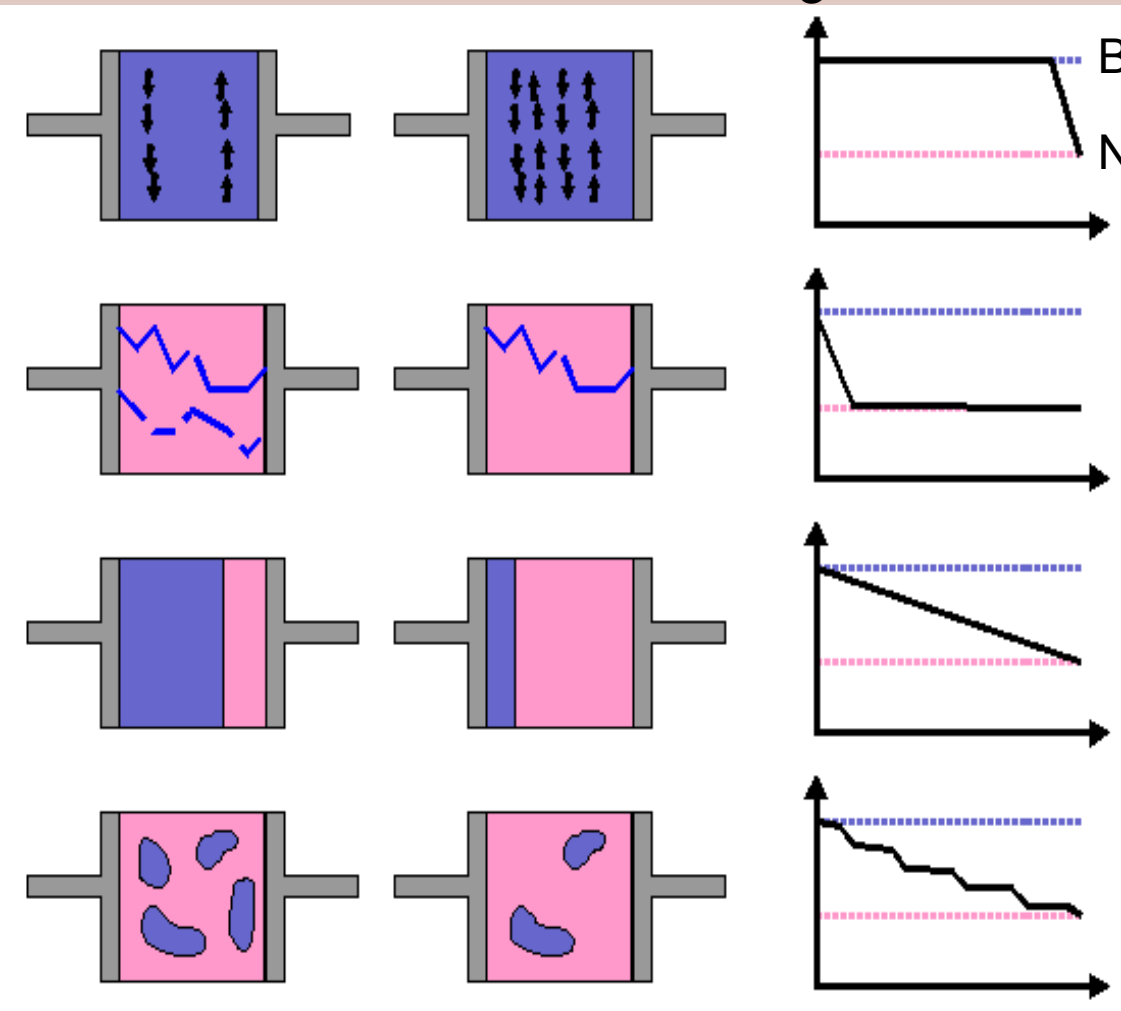
滑らかに遷移が進行

超伝導状態の塊

抵抗が小さい

抵抗が大きい

熱容量の振る舞い



エネルギー分解能 (TMU-146) の内訳

$$\Delta E_{\text{FWHM}} \begin{cases} \Delta E_{\text{ばらつき}} \begin{cases} \text{熱浴の温度揺らぎ} \propto E \\ \text{波高値のX線入射位置依存性} \end{cases} \\ \Delta E_{\text{ベースライン}} \begin{cases} \Delta E_{\text{TES}} \begin{cases} \text{Unknown noise} \\ \text{Johnson noise} \\ \text{Phonon noise} \\ \cdot \text{TES - 熱浴間} \end{cases} \\ \Delta E_{\text{readout}} \begin{cases} \text{SQUID noise} \\ \text{外乱 noise} \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

4.8 eV

2.5 eV

4.1 eV

3.5 eV

2.1 eV

質問

- なぜ2eVが必要なのか(住吉先生)
 - ⇒酸素基線を観測したいが、銀河からの酸素の分離を行うため
- すでに読み出しノイズが2eV存在するがどうするのか(住吉先生)
 - ⇒SQUIDを変えることで可能??
- 二段転移はどうにかならんのか(佐藤先生)
 - ⇒薄膜を用いているので、難しい
- Phononノイズって何、なぜそのような周波数依存性??(青木先生)
 - ⇒答えられなかった。今後報告に行く
- Phononノイズは物性では別の意味を示す(佐藤先生)
- 前半と後半で話のつながりが分からない(宮原先生)
 - ⇒特性パラメータを評価するのにインピーダンスが必要
- なんで、変な動作点で評価したの??(佐藤先生)
 - ⇒X線照射したのが、この動作点だから(本当はほかだとサチってしまううちことを言った方が良かった)

林質問

- 打ち上げの影響は？？良くなれば影響が効いてくるのでは？（宮原先生）
- アライメントプレートの精度は十分なのか？
- 去年に比べて位置決め誤差が増えたように見えるが（マサイ先生）
- すべて入れるとどのようになりますか（住吉先生）
- 内外でどのような傾向がありますか？（住吉先生）
- CCDカメラで見た時の形状はなぜできる（青木先生）
- 他の望遠鏡はないの？（住吉先生）

白田質問

- 凹面鏡ではやっていないのですか？（宮原先生）
- 端がだれているのは、どうにかできないのか？（宮原先生）
- コメント意味不明（佐藤先生）
- 弱点は？（東先生）