

断熱消磁冷凍機を用いた 精密X線分光システムの開発

宇宙物理実験研究室

星野晶夫



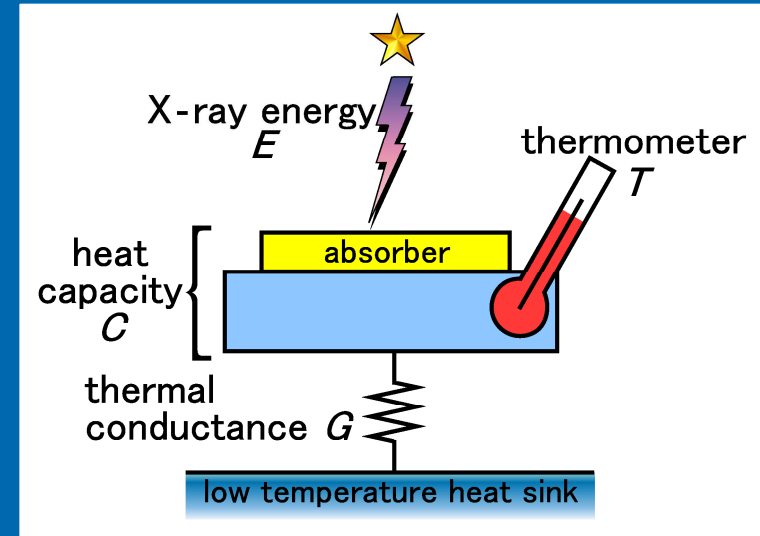
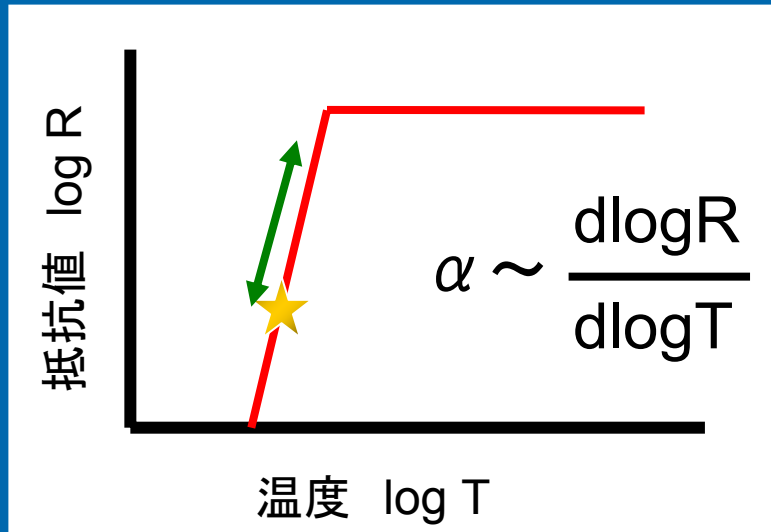
目的

TES型カロリメータを用いた精密X線分光システムの構築

1. 冷凍機のX線検出環境整備
2. 温度制御
3. 低エネルギー側でのX線検出効率の改善

TES型マイクロカロリメータ

◆ X線を光電吸収した際のわずかな温度上昇を大きな抵抗変化で検出



エネルギー分解能(FWHM)は
フォノンの揺らぎで決まる

$$\Delta E = \frac{2.35}{\sqrt{\alpha}} \sqrt{\frac{CT}{k_B T}} \cdot k_B T$$

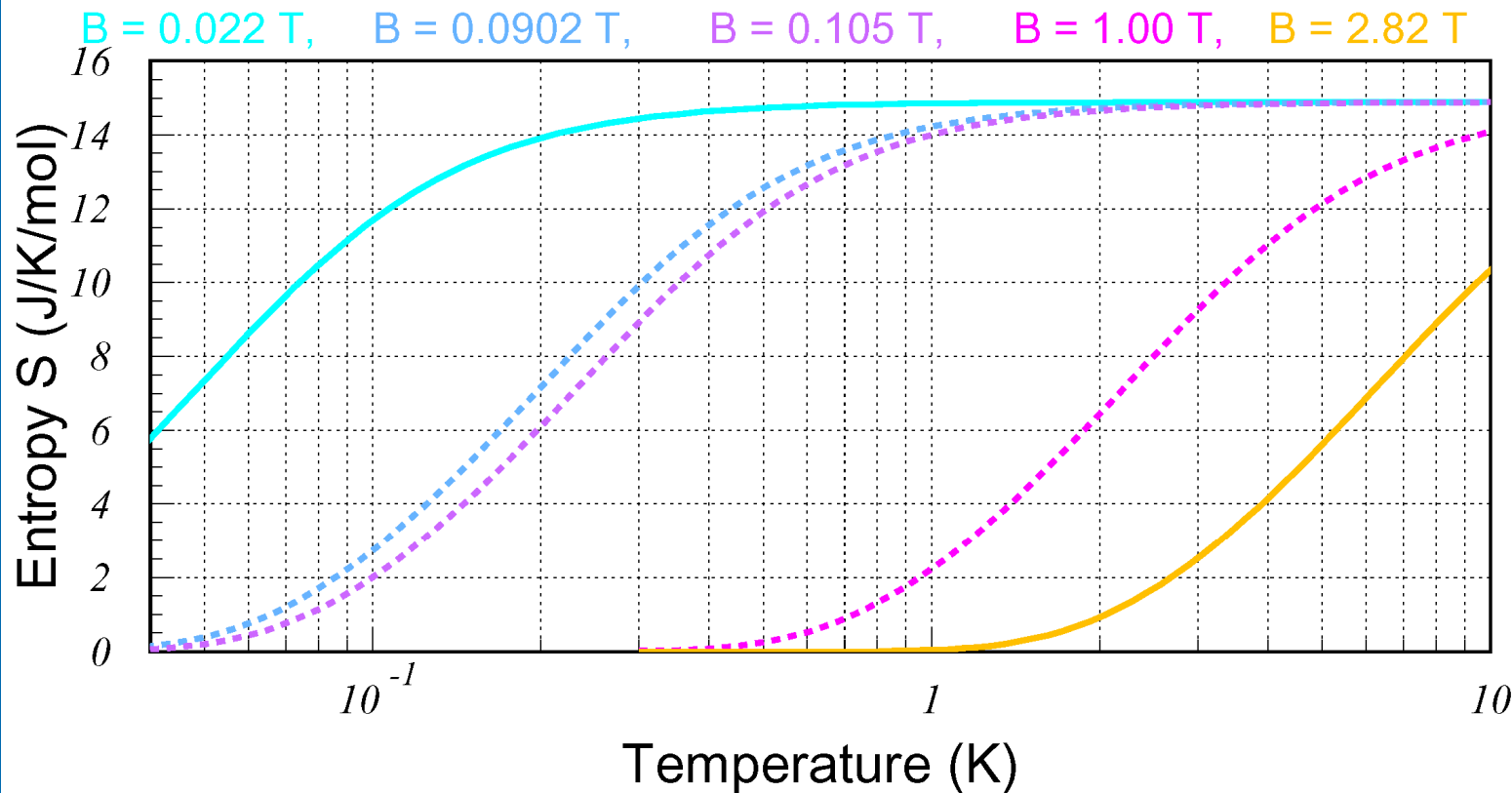
$$= 2.35 \sqrt{\frac{k_B T^2 C}{\alpha}}$$

極低温 (～100 mK) で
優れた分解能を発揮
⇒ 冷凍機が必要

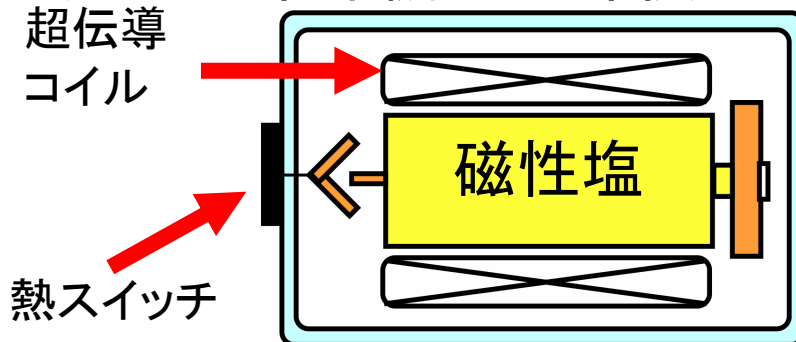
断熱消磁冷凍



冷却サイクル



断熱消磁冷凍機の内部模式図



- ① 等温磁化
- ② 断熱消磁
- ③ 温度制御
- ④ 昇温リサイクル

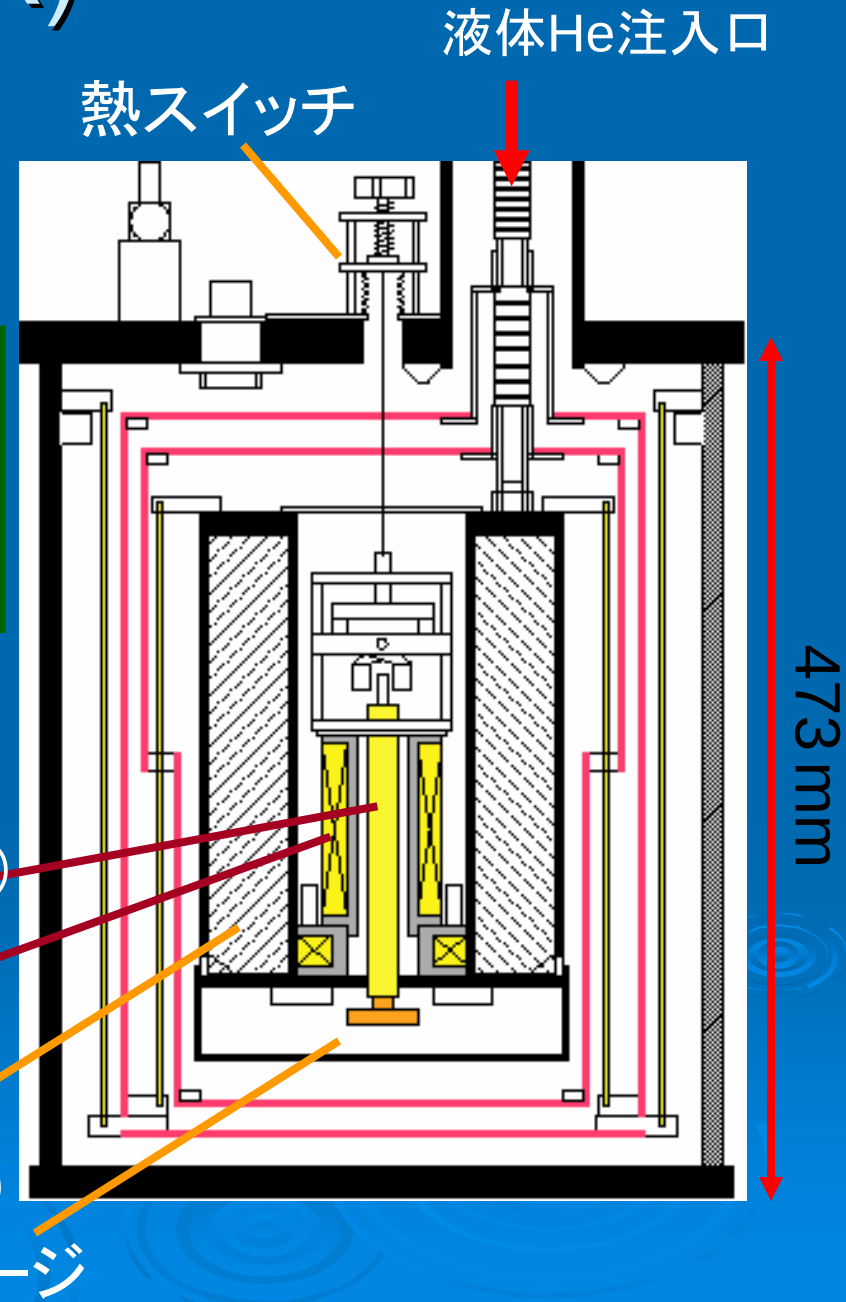
断熱消磁冷凍機 (ADR)

Wisconsin大学でロケット実験用に
開発されたモデル

● 蒸気冷却, 予冷タンク無, コンパクト

液体He保持時間
縦置き: 約42時間
横置き: 約27時間

等温磁化: 2時間
断熱消磁: 1時間
制御時間:
10時間@100mK



温度制御



温度安定度の現状

条件: 温度安定度がエネルギー分解能に影響しないこと。

$$\Delta T / T < \Delta E / E \sim 1 \times 10^{-3}$$

本研究で用いたADRでは、

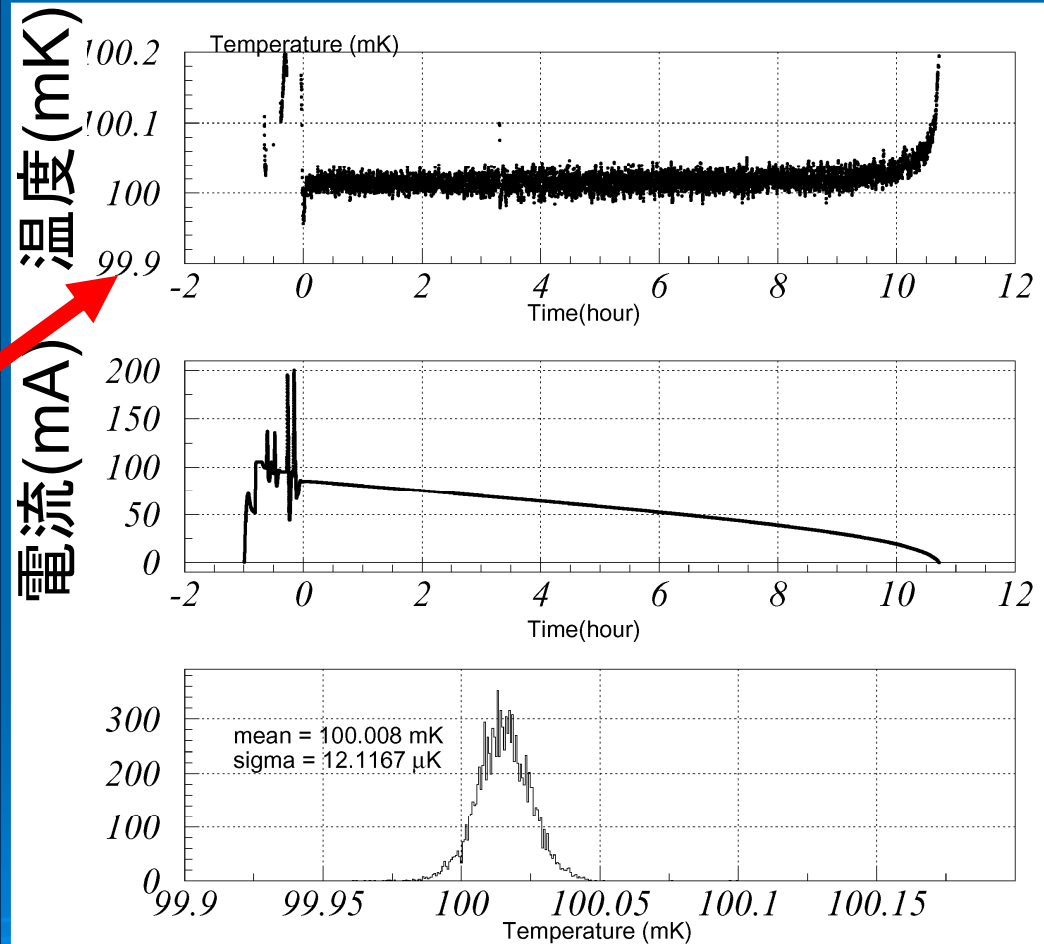
制御温度: 100 mK

温度揺らぎ: rms = 12.1 μ K

制御時間 : 9 時間

$$\Rightarrow \Delta T / T = 1.2 \times 10^{-4}$$

十分な精度を実現。



温度制御の最後の2-3時間は温度上昇のため実験できない。

PIDモデル

P, D: 固定パラメータ, T_{aim} : 目標温度

ヒーター発熱 $W(t)$ を予想するための数学的モデル

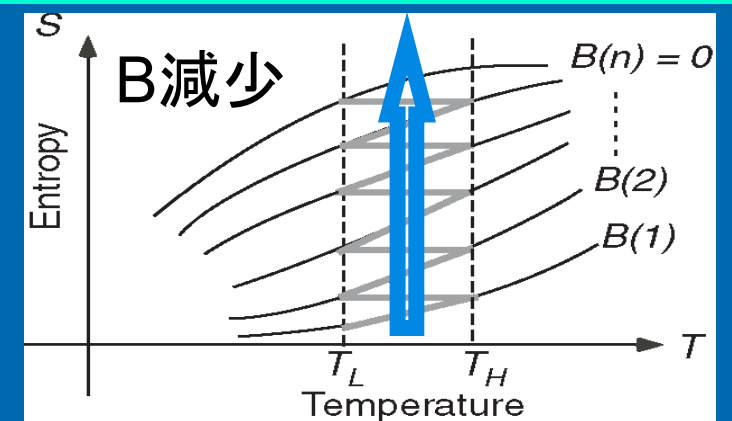
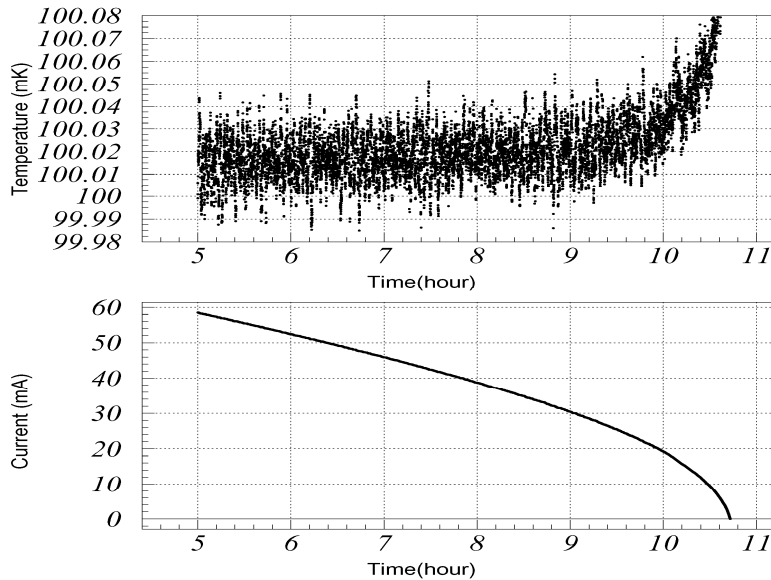
$$W(t) = -P\{T(t) - T_{aim}\} + \bar{W}_0 - D \frac{dT}{dt}(t) + F(t)$$

ADR: $W(t)$ をコイル電流 $i(t)$ に置き換えて使用する。

温度差に比例したフィードバック

発熱の平均

温度変化に対する抑制力



温度制御中の物理状態

冷却能力の減少⇒コイル電流の低下⇒ 温度上昇

解決策

$F(t)$ を付加

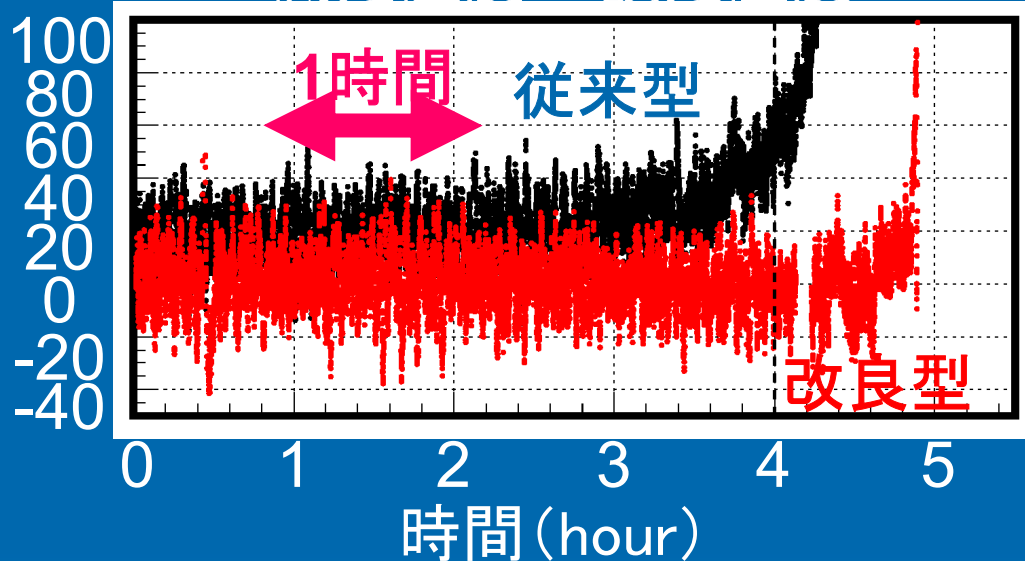
$$F(t) \propto \frac{di}{dt}(t) \propto -\frac{1}{i(t)}$$

低電流で大きなフィードバック

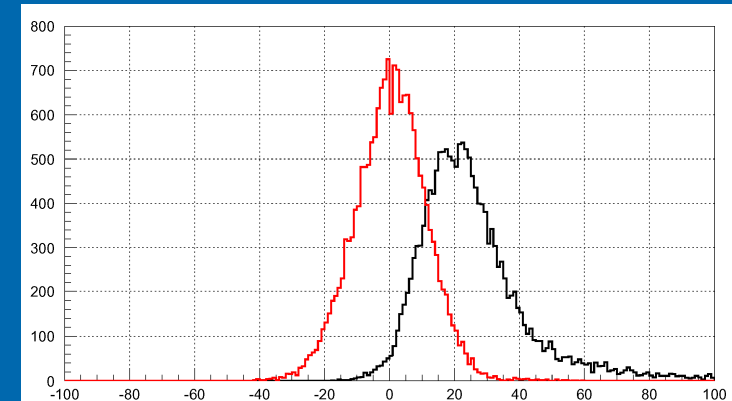
温度制御結果

2種類の制御法を50mAからの制御時間で比較

測定温度 - 設定温度



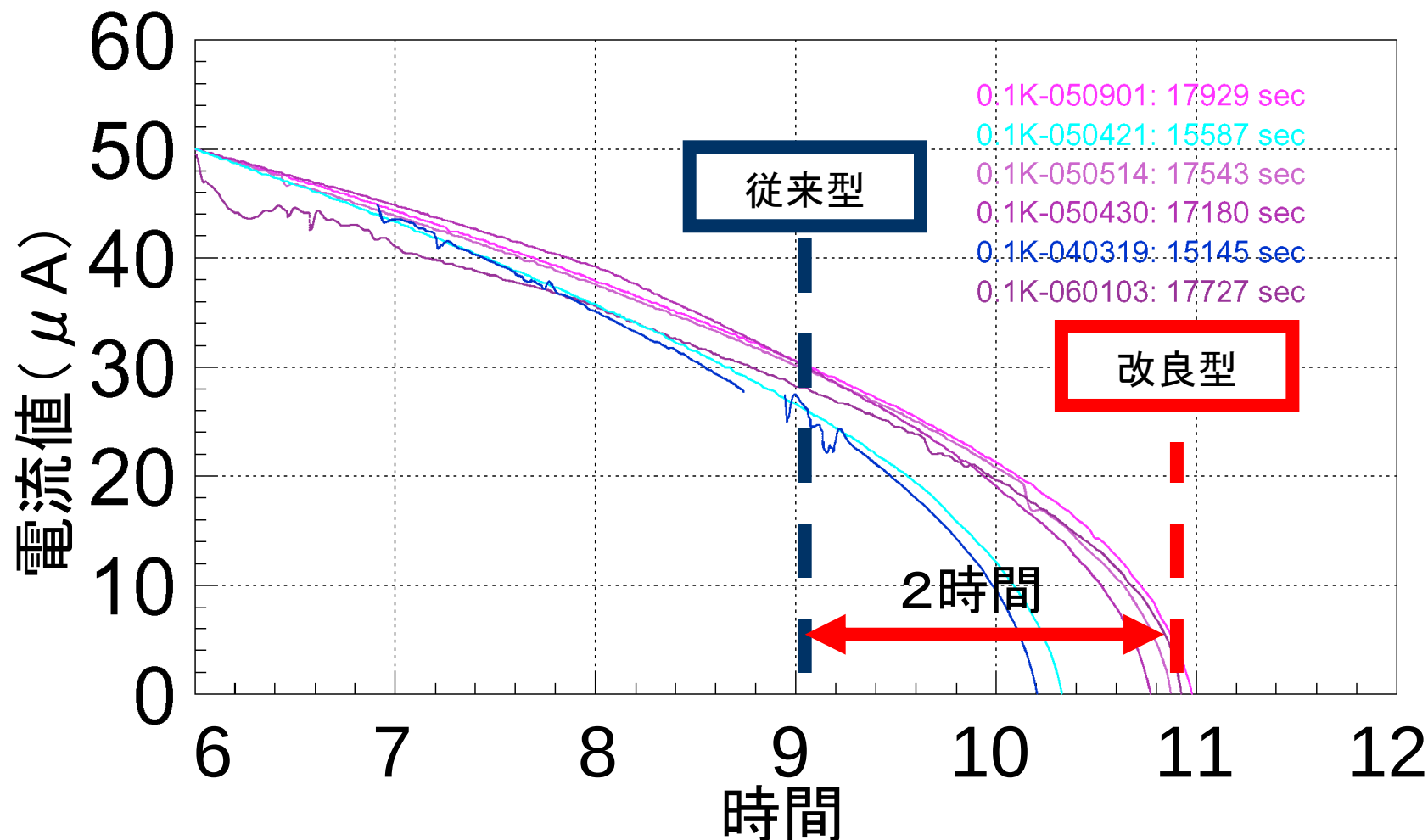
温度安定性



最後まで一定温度を維持

制御法	平均温度 - 設定温度	温度安定性
従来型	25.1 μK	16.3 μK
改良型	0.3 μK	11.0 μK

制御温度の保持時間



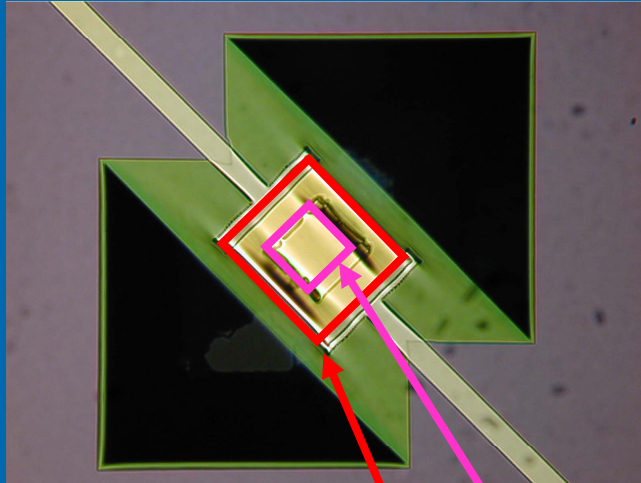
- 改良型温度制御：約5時間（再現性～5分）
 - 従来型温度制御：約3時間
- ⇒約2時間の制御時間の延長が確認できた。

X線検出



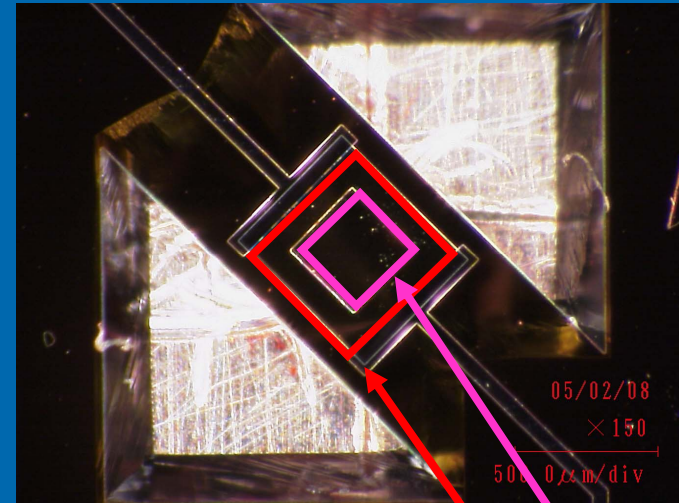
使用したTESカロリメータ

SII-14b



- 遷移温度: 150 mK
- TESサイズ: $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$
- Ti/Au : 40nm / 110nm
- Au吸収体: $0.3\text{mm} \times 0.3\text{mm} \times 300\text{ nm}$

SII-110



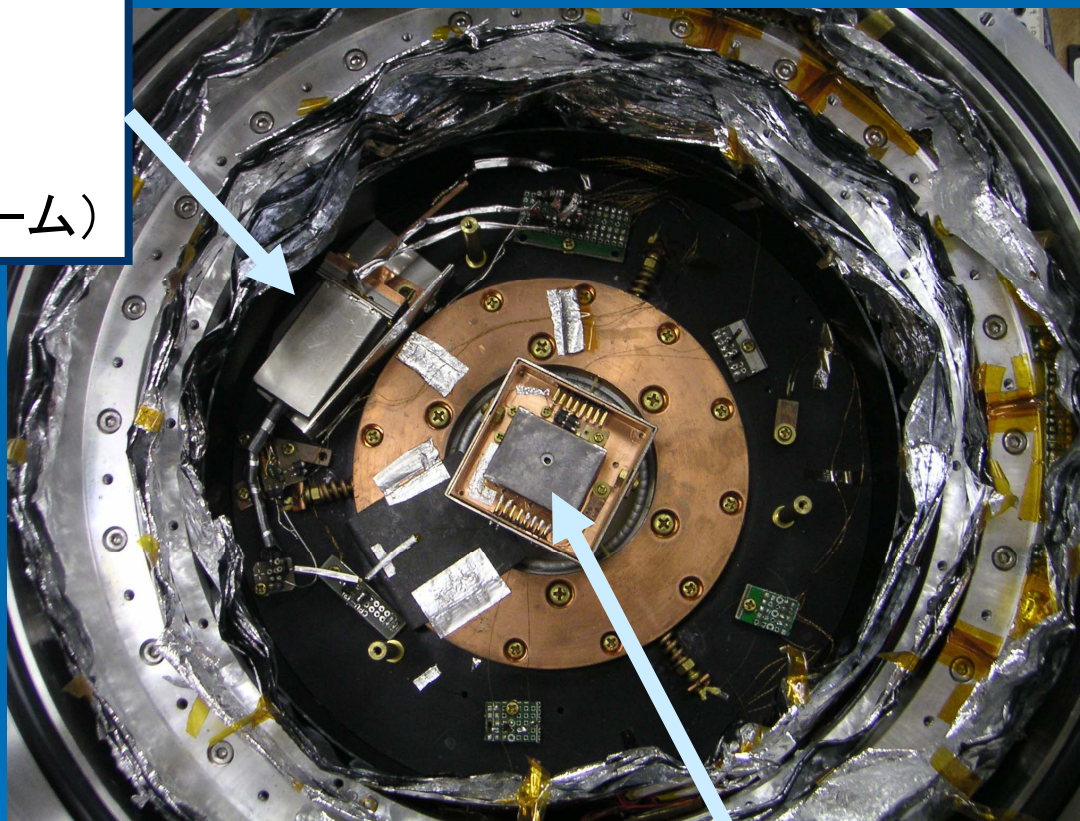
- 遷移温度: 147 mK
- TESサイズ: $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$
- Ti/Au : 40nm / 70nm
- Au吸収体: $0.3\text{mm} \times 0.3\text{mm} \times 500\text{ nm}$

ADR実験ステージ周辺

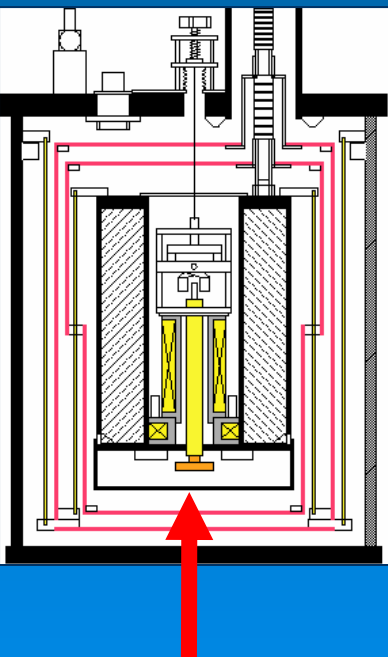
SQUID

磁気シールド

(Nb+クライオパーム)



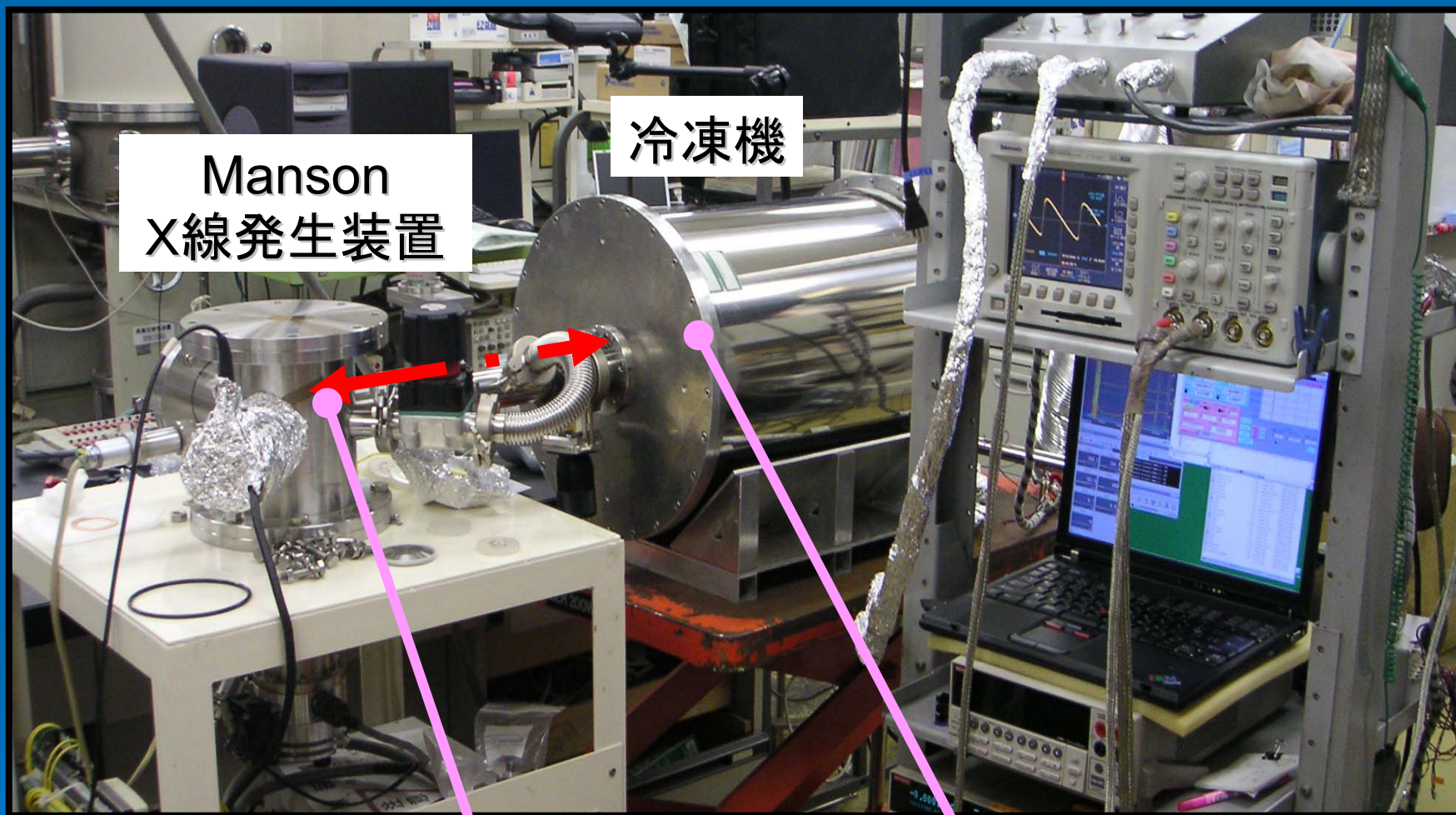
約30cm



実験ステージ

素子は磁気シールドで覆う

実験セットアップ



Manson
X線発生装置

冷凍機

Al 1次ターゲット
(HV 4kV)

TESカロリメータ
(100 mK)

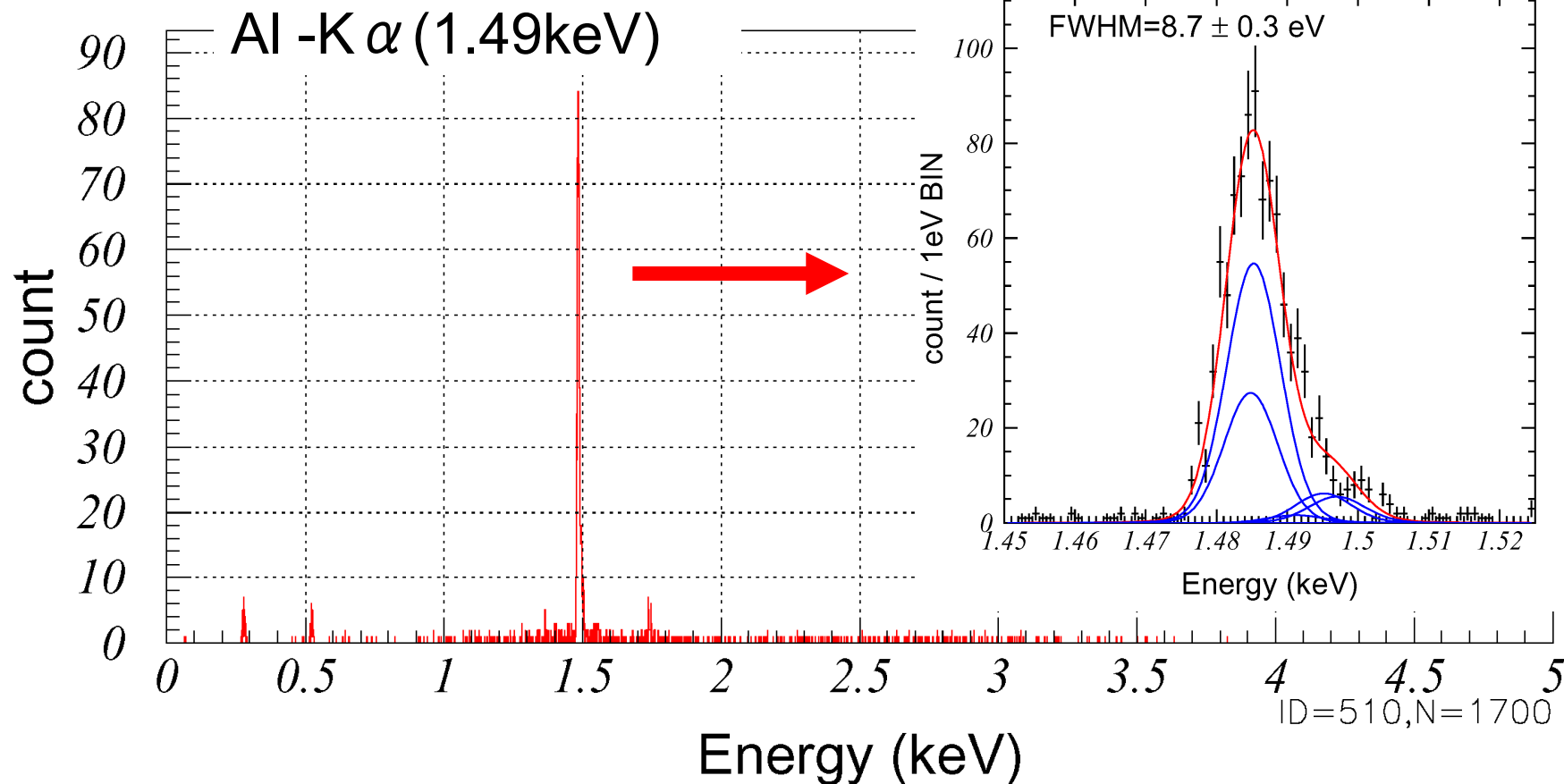
TES カロリメータで1次X線（制動放射+蛍光X線）のスペクトルを取得

X線スペクトルの取得(その1) SII-14b

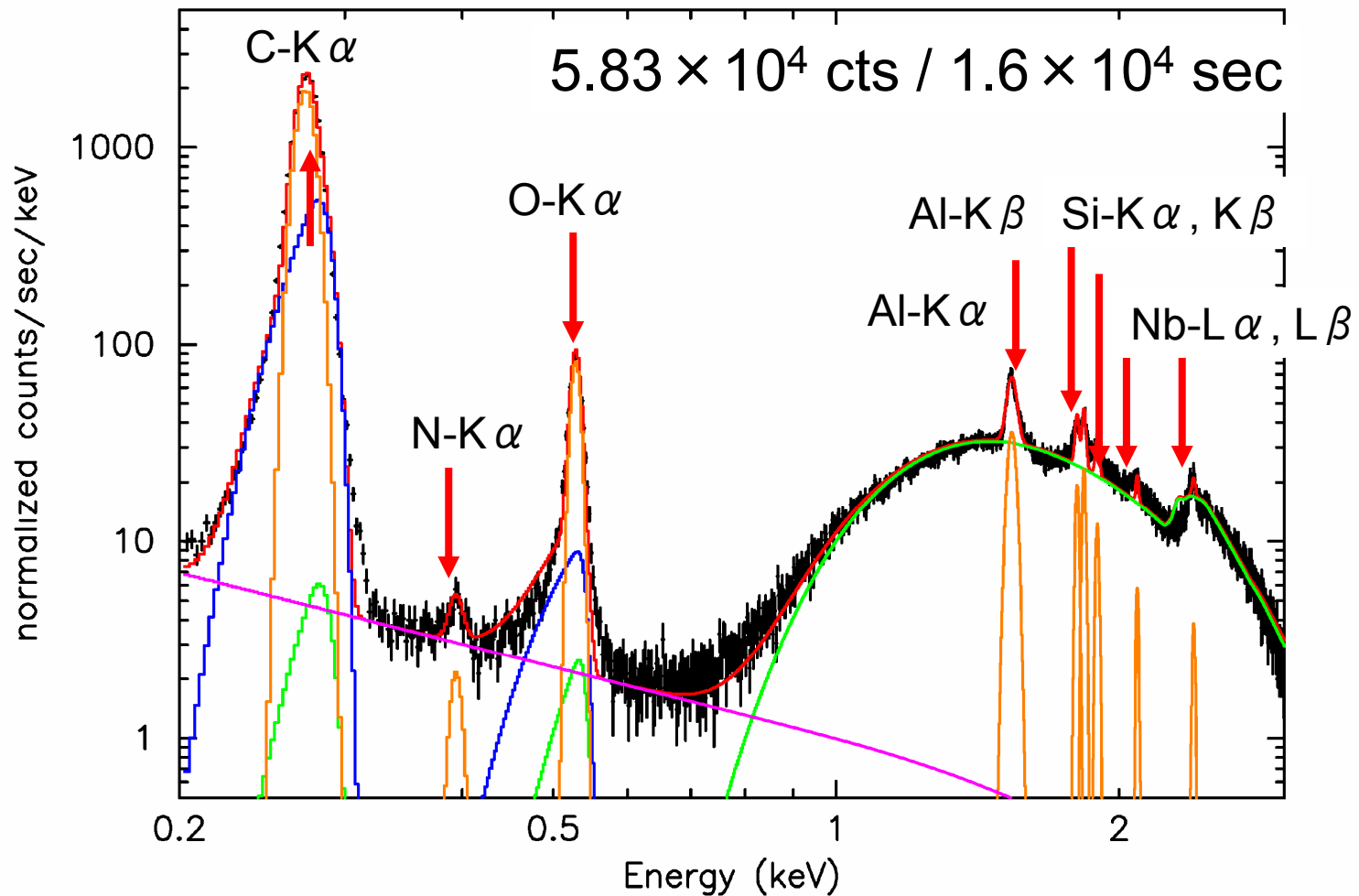
高エネルギー分解能でのX線検出環境を実現

FWHM=8.7 eVを達成。

HV:4kV / 4 μ A 1700cts 291秒



X線スペクトルの取得(その2)



制動放射 + power law + gaussian

1keV以下での検出効率が落ちている。

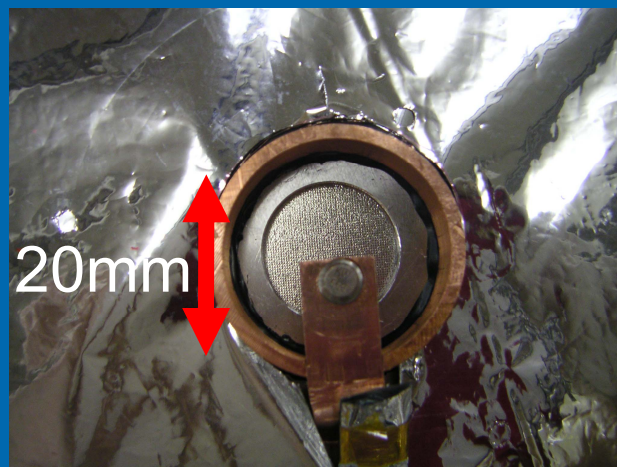
低エネルギー側での検出効率を改善する



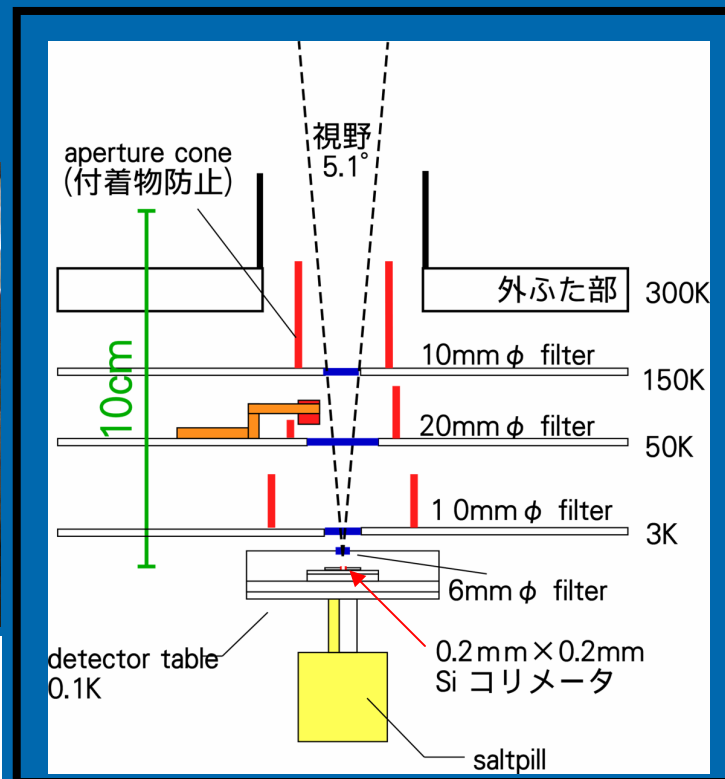
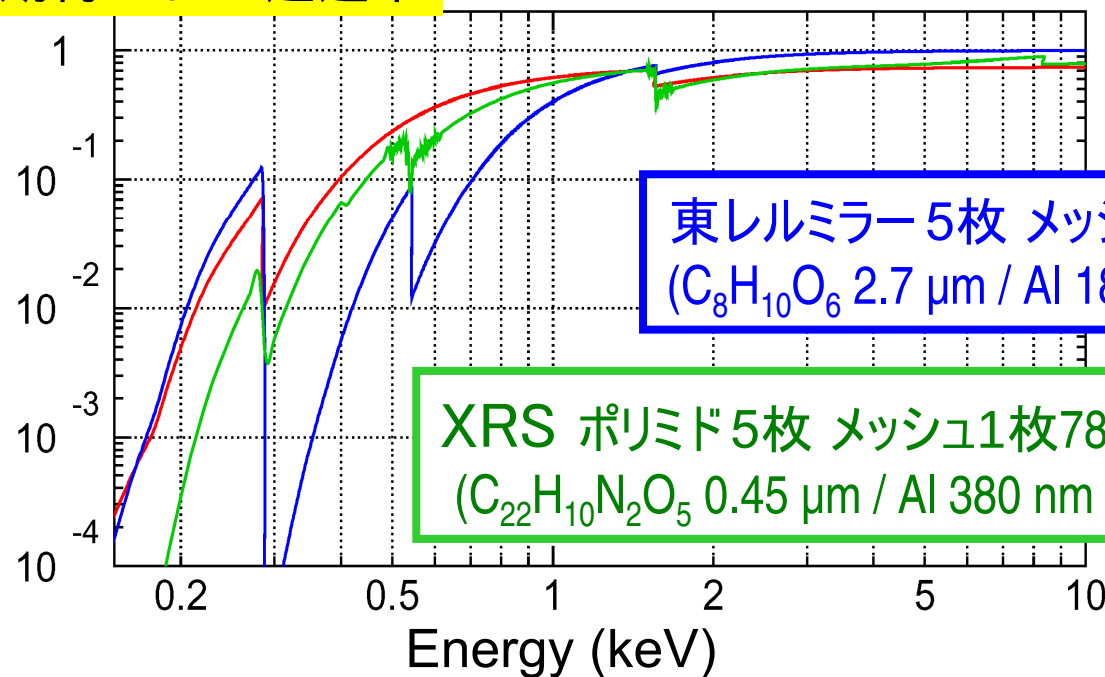
X線入射窓

50 K 入射窓

- 断熱/遮光のため
冷凍機には数段階
の入射窓が必要



期待される透過率

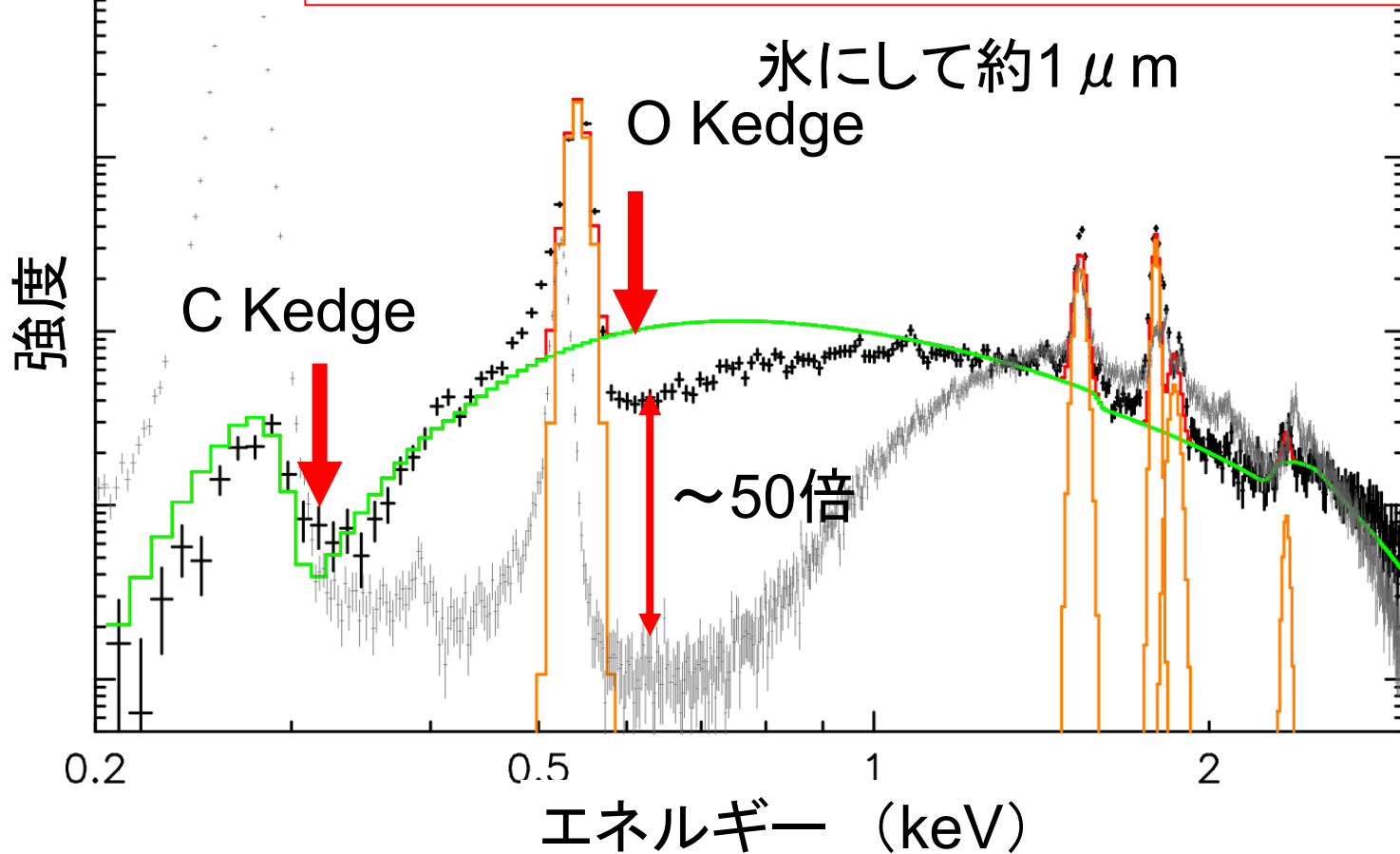


軟X線検出用
パレン4枚 メッシュ2枚73%
(C_8H_8 0.4 μm / Al 280 nm)

※ Lebow co. より購入

取得したX線スペクトル

- 東レルミラー: 5.83×10^4 cts / 1.6×10^4 sec
- パリレン : 0.64×10^4 cts / 0.32×10^4 sec



低エネルギー側の透過率が向上。
パリレンに含まれないはずの酸素のエッジ → 付着物？

まとめ

- X線検出環境：
エネルギー分解能 8eV @ 1.5 keV を達成。
- 温度制御：
約 2 時間の制御温度の延長に成功
温度安定性も50%向上
- 低エネルギー側でのX線検出効率の改善：
パリレンをX線入射窓フィルムに使用することで
1keV以下の検出効率の向上に成功
⇒氷など付着物への対策が重要