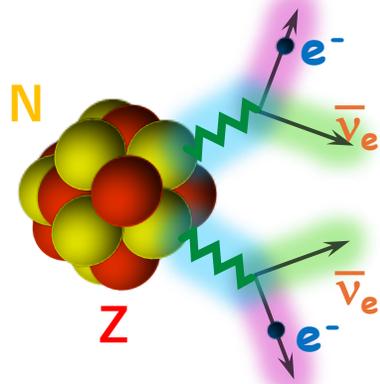


$0\nu\beta\beta$ 崩壊探索のための CaF_2 蛍光熱量検出器の開発

大阪大学 物理学専攻
野田 健太

0νββ探索

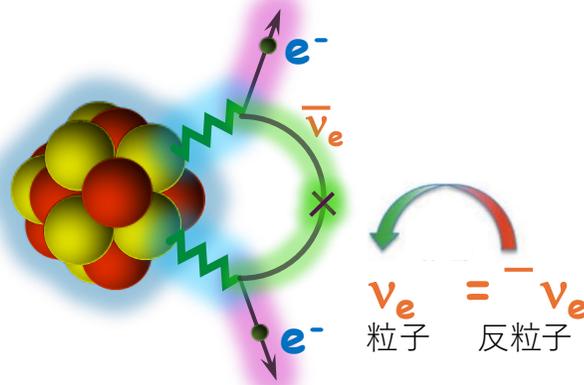
① 2νββ 崩壊



$$(Z, N) \rightarrow (Z+2, N-2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$$

- 既に10以上の同位体で観測
- ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{136}Xe , etc
- 半減期 ; $10^{18} - 10^{24}$ yr

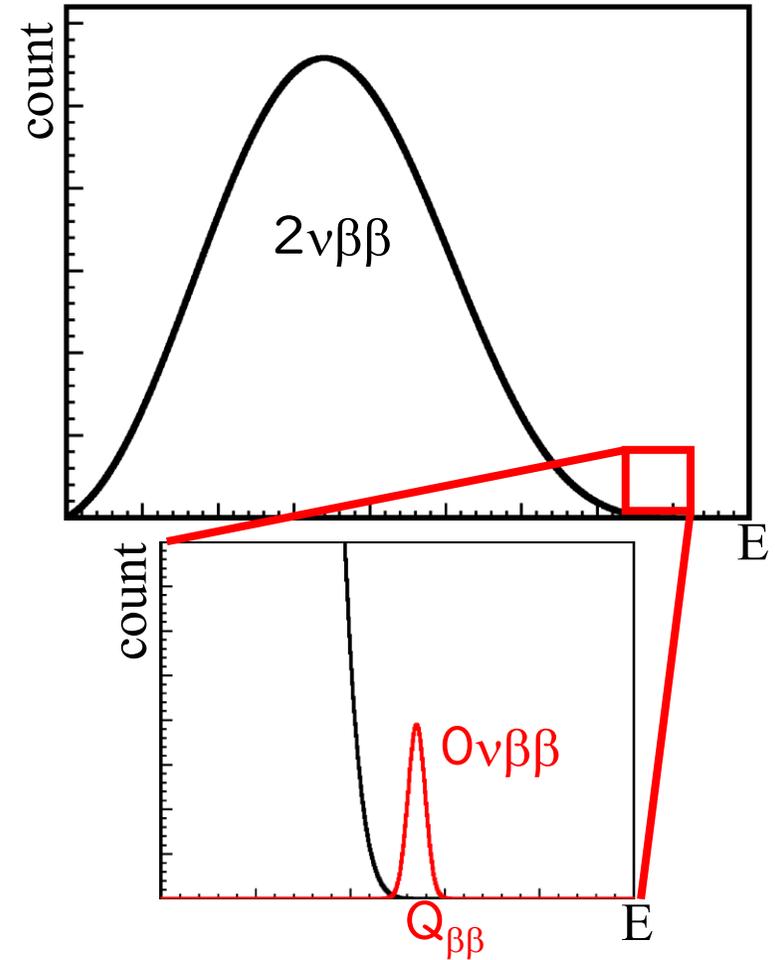
② 0νββ 崩壊



$$(Z, N) \rightarrow (Z+2, N-2) + 2e^-$$

- マヨラナニュートリノ
- 半減期の下限值 ; $T_{1/2} \geq 10^{26}$ yr
- レプトン数非保存過程

2e-のエネルギー和を測定



0νββ観測 → 新物理

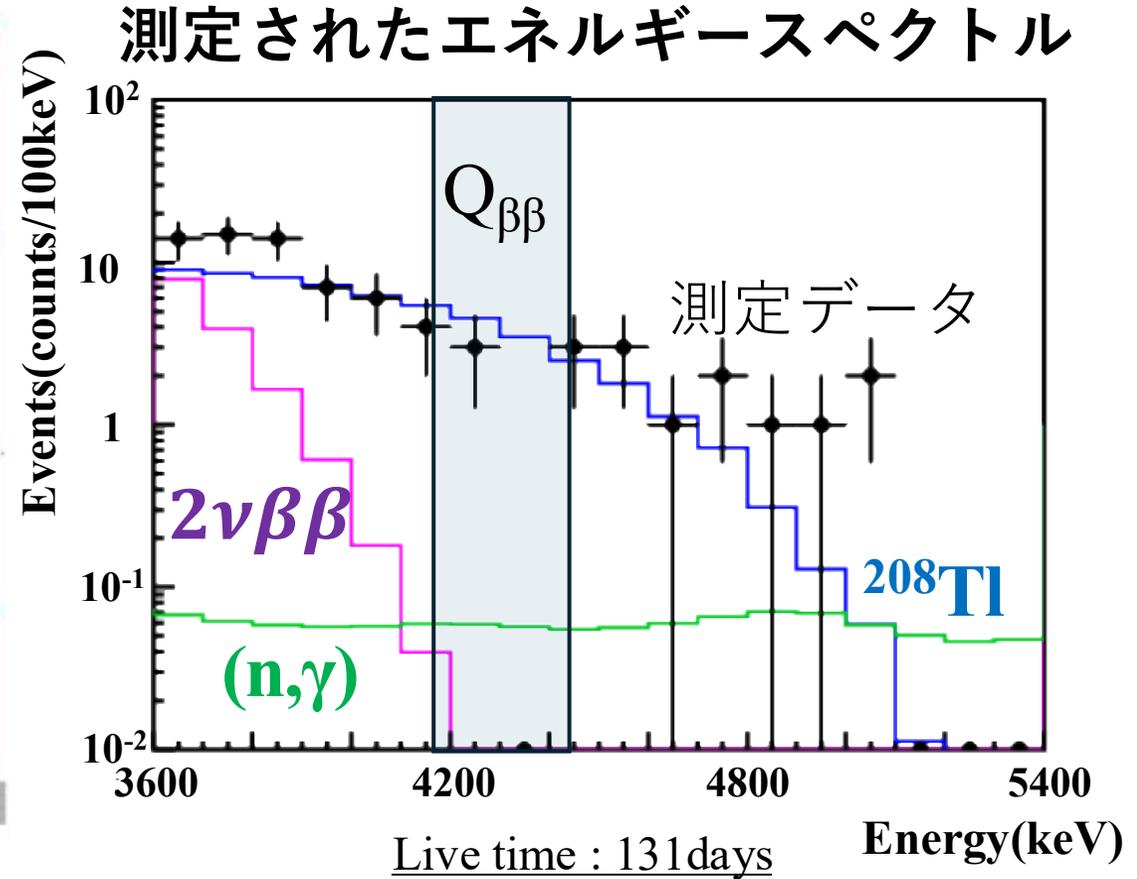
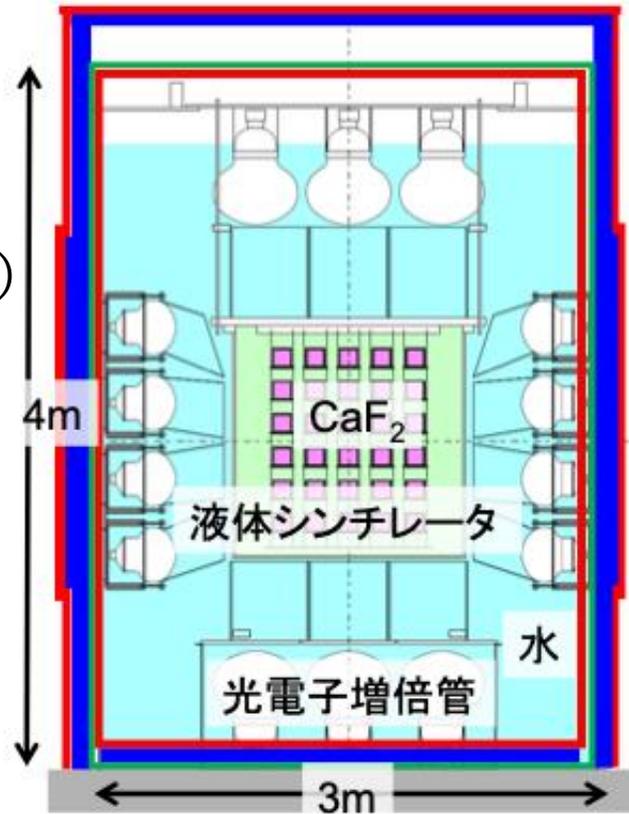
CANDLES-III実験

^{48}Ca を含む CaF_2 結晶を用いた検出器

$Q_{\beta\beta}$ (4.27 MeV) (全核種中最大)
→バックグラウンド候補が少ない

シンチレーション光を
PMTで収集

- 神岡実験室(地下1000 m)
- **CaF_2 結晶** ; 305 kgを準備
- 液体シンチレータ(LS)
- 環境バックグラウンドを低減

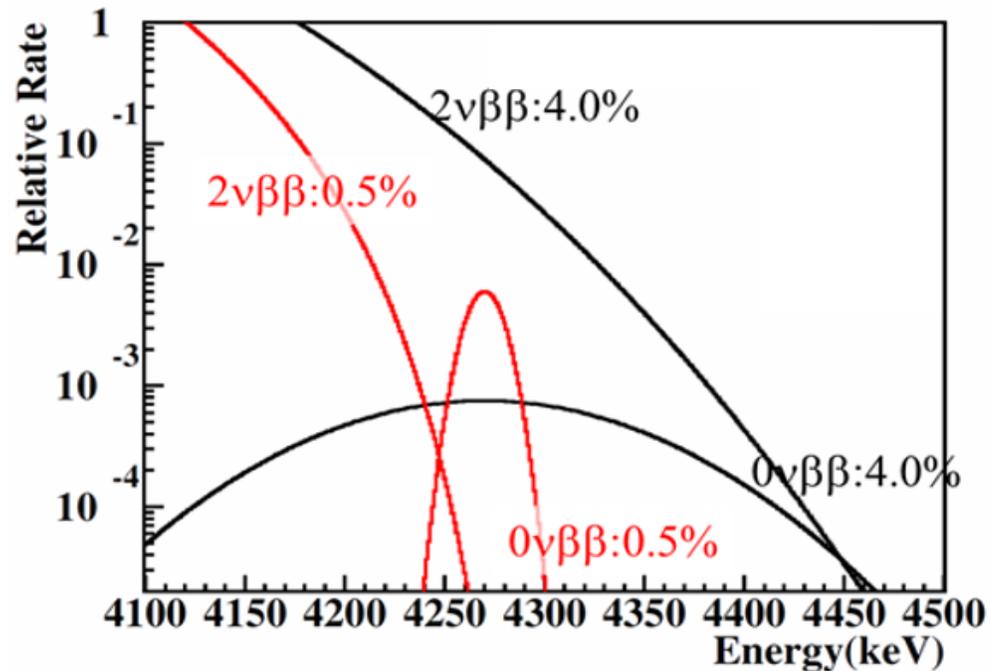


$0\nu\beta\beta$ 事象は未観測

半減期 $\geq 5.8 \times 10^{22}$ yr、エネルギー分解能 5.64%(FWHM) @ 4.27 MeV

高エネルギー分解能

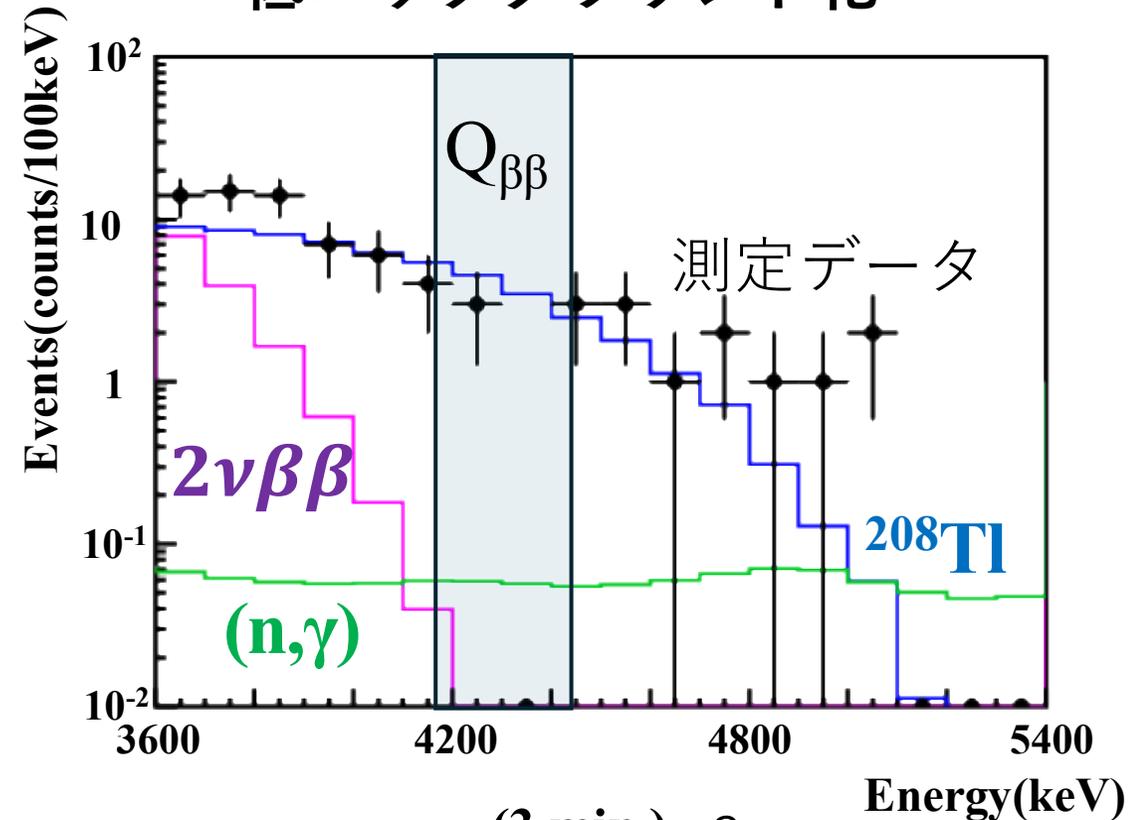
予想される ^{48}Ca のエネルギースペクトル
($0\nu\beta\beta$ の半減期 10^{28} yrと仮定)



目標値：半減期 $\geq 10^{28}$ 年，

エネルギー分解能 0.50%(FWHM) @4.27 MeV

低バックグラウンド化



α 事象タグ付による除去

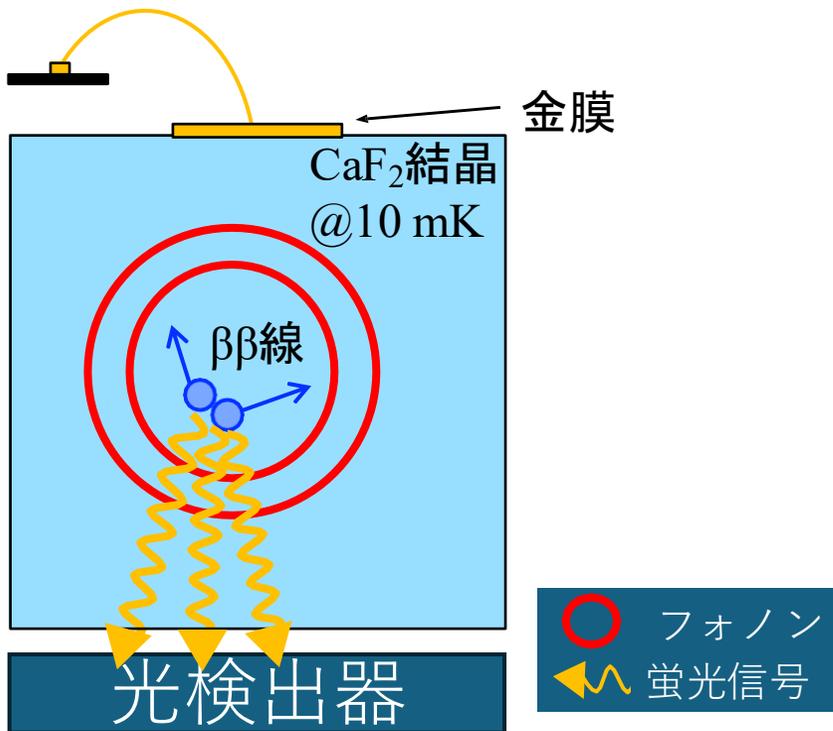
β/γ 事象 と α 事象の識別機能の精度向上

蛍光熱量検出器

希釈冷凍機を用いて~10 mKまで冷却→CaF₂結晶からの熱量+蛍光量を測定

熱量測定

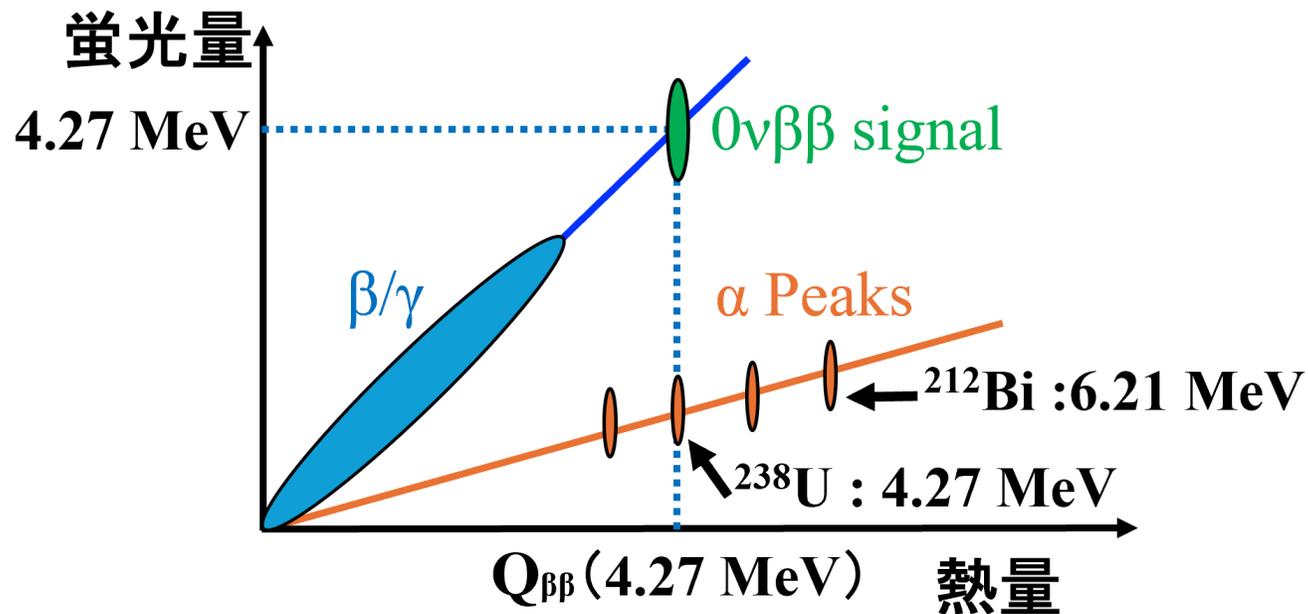
フォノン測定→高エネルギー分解能



蛍光量測定

α粒子のクエンチング効果→粒子識別

²³⁸Uのα崩壊、α事象タグ付による²⁰⁸Tl除去

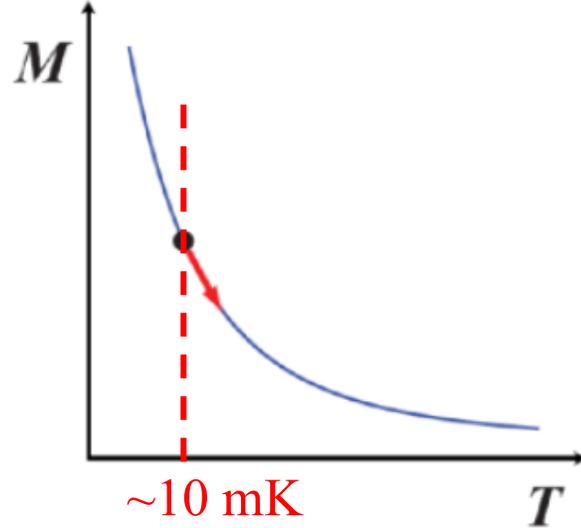
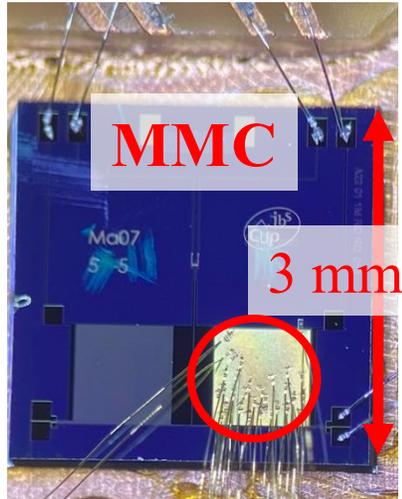


蛍光熱量検出器で分解能向上と粒子識別機構を実装

センサー特性と読み出し開発

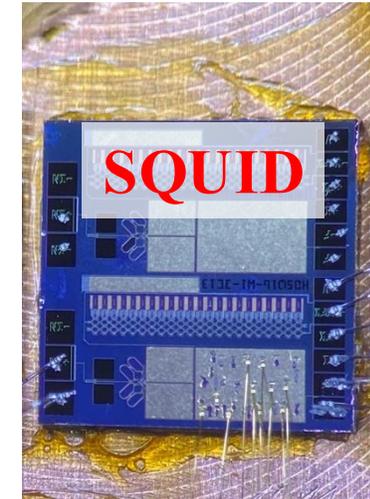
5

Metallic Magnetic Calorimeter (MMC)



- 温度変化 ΔT を磁化変化 ΔM に変換
- ダイナミックレンジが広い, 5桁~6桁
- 高い線形性

超伝導量子干渉計 (SQUID)



- MMCの磁化変化 $\Delta M \rightarrow \Delta V$ として読み出す
- 微小磁束変化($\sim \text{fT}$)を測定可能
(地磁気 $\sim 10^{-5} \text{T}$)

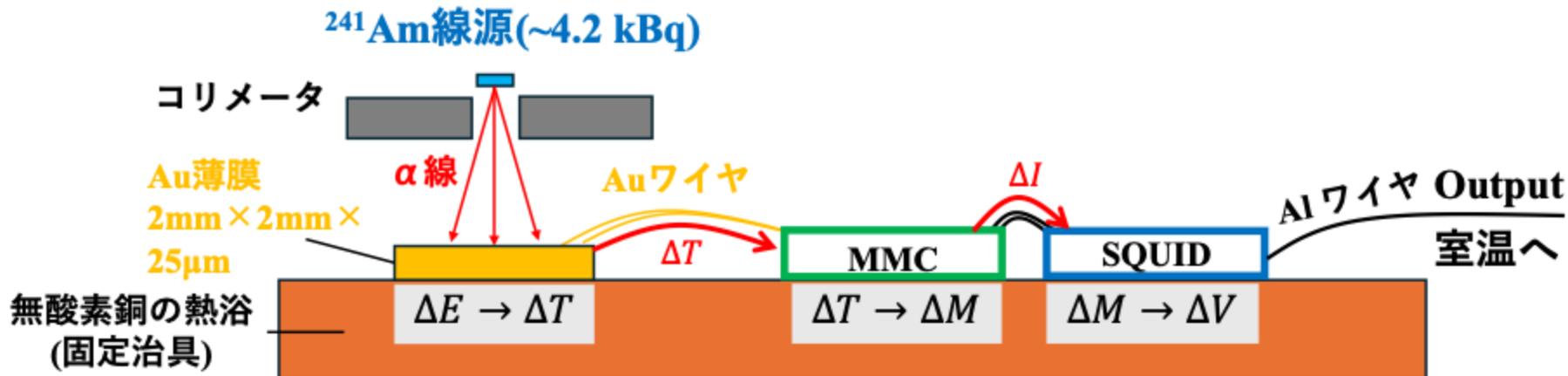
MMC, SQUIDセンサーを使った $0\nu\beta\beta$ 探索
AMoRE実験：エネルギー分解能 **0.40 % FWHM**を実証

AMoRE実験を主導する韓国IBSと協力

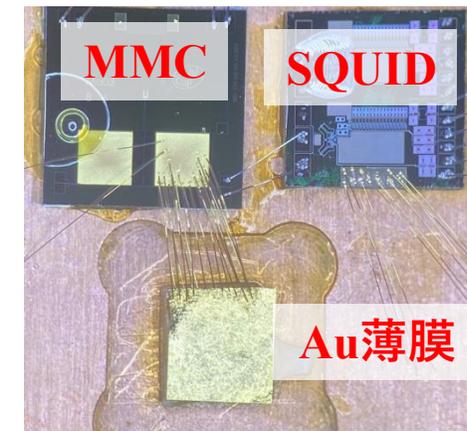
昨年度、IBSでセンサーの動作テストを実施

IBSでのセンサーの動作テスト (昨年度実施) 6

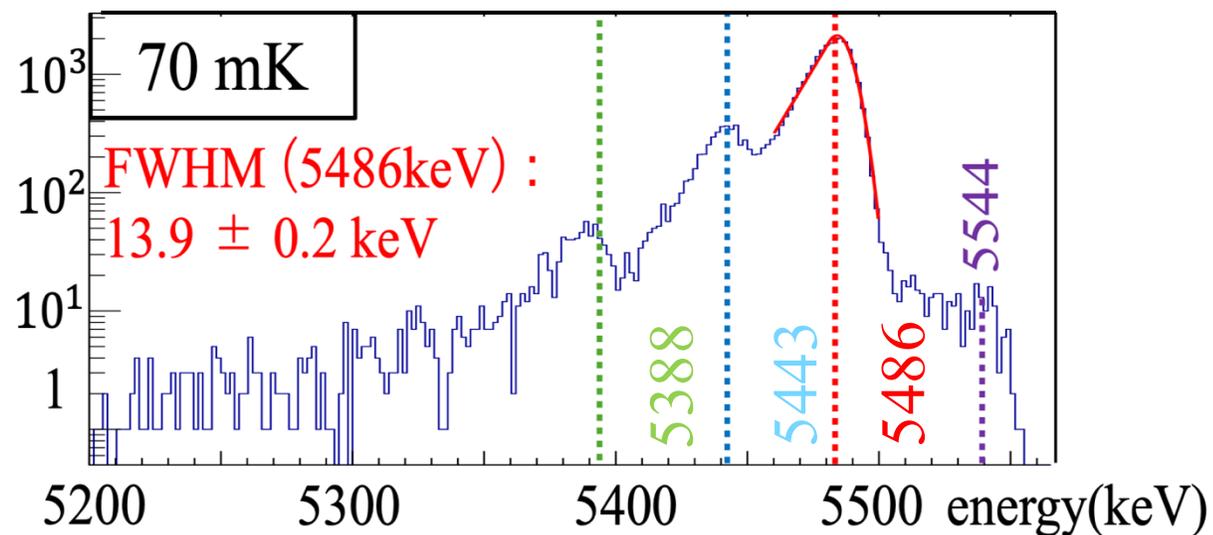
検出器のセットアップ



実際の検出器の写真



得られたエネルギースペクトル



IBSで実施した実験の結果
エネルギー分解能 0.25% を達成



大阪大学にて、センサーの試験を実施

大阪大学での実験環境構築に向けて

今実験の目的：大阪大学での測定環境の検証を行う

実験実施場所	IBS	大阪大学
冷凍機	ADR冷凍機 (>50 mK)	希釈冷凍機 (>15 mK)
α 線源 ^{241}Am	強度 4.2 kBq コリメート径 0.5 mm	強度 30 Bq コリメート径 3 mm

信号読み出し部の配線、センサー制御、 etc.

IBS

- 実験実施
故障によるセンサーの取り替え×2回
→繊細な取り扱い
- 実験終了後、分解、梱包

大阪大学

- 組み立て
- 組み立て不良がないか
動作確認のためのテスト
- 冷凍機にマウント

測定環境の検証→センサーのテスト環境を整える

4K test

- 液体ヘリウムを用いた簡易的なテスト

- Johnson Noise (JN)

導体内部の自由電子の熱的な運動によって生じる熱ノイズ

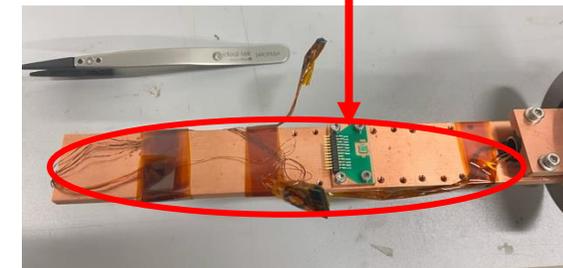
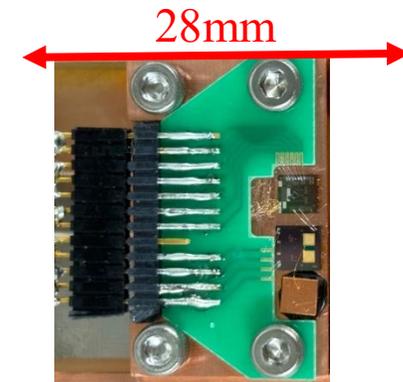
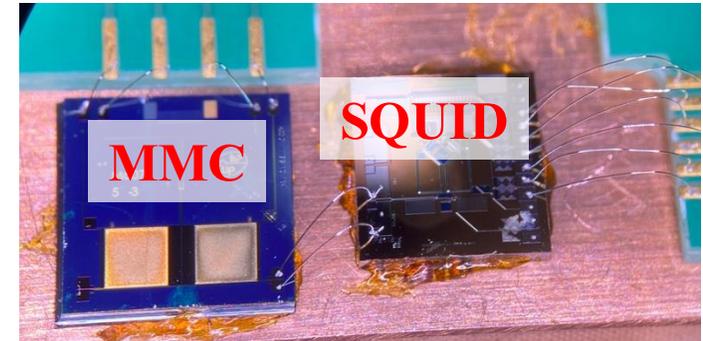
→SQUIDで磁束変化として測定

- MMCセンサー内のコイルのインダクタンスを測定

- LHe (4.2 K) 1hour ↔ 希釈冷凍機 1week

- 手順

1. センサー、銅プレートなどを洗淨
2. センサー接着
3. Al ワイヤーボンディングによる配線
4. 液体ヘリウムによる液浸冷却



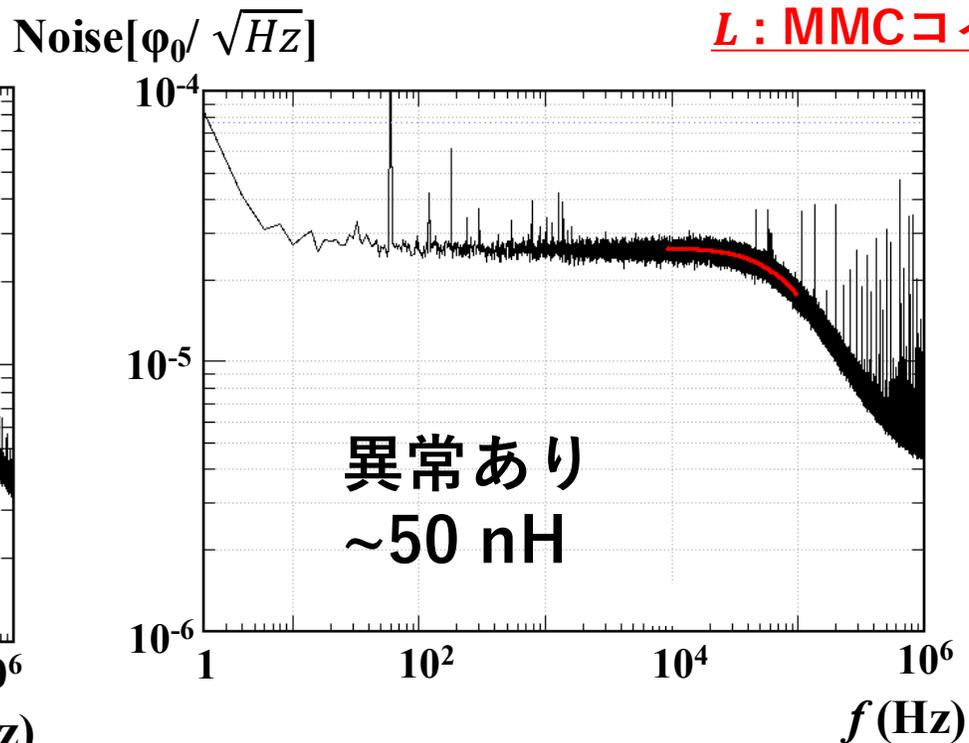
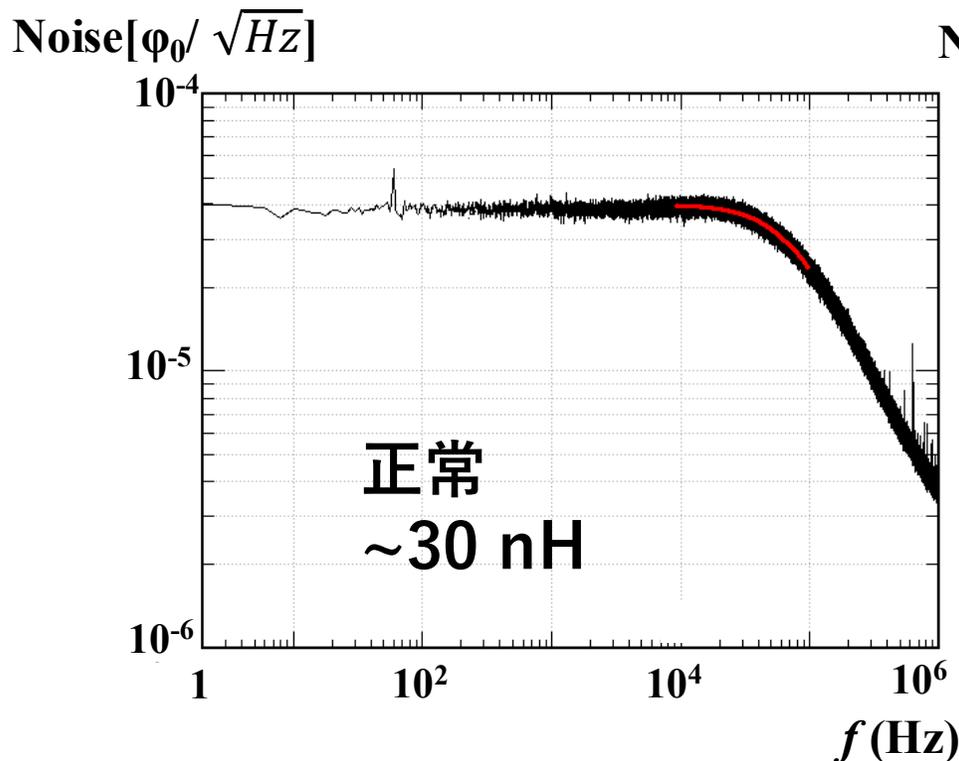
液体ヘリウムで冷却

センサーのJN測定

- 磁束振幅スペクトル密度の周波数依存性

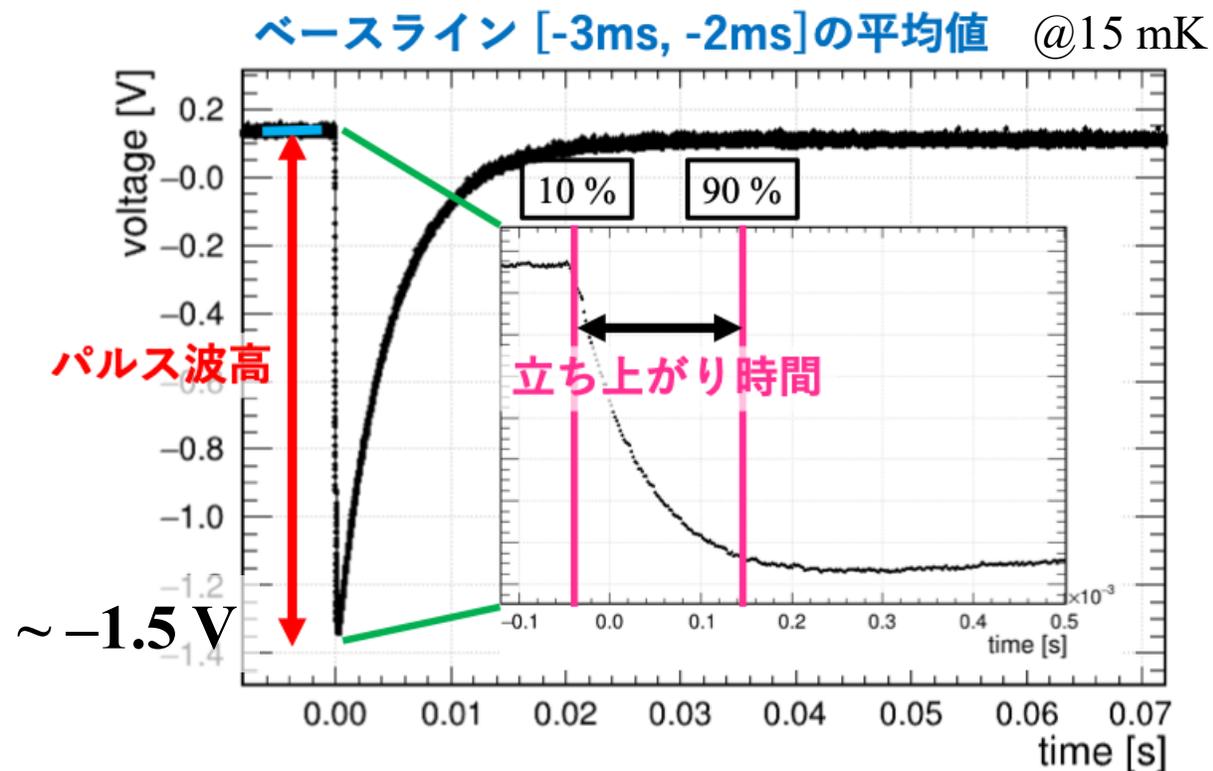
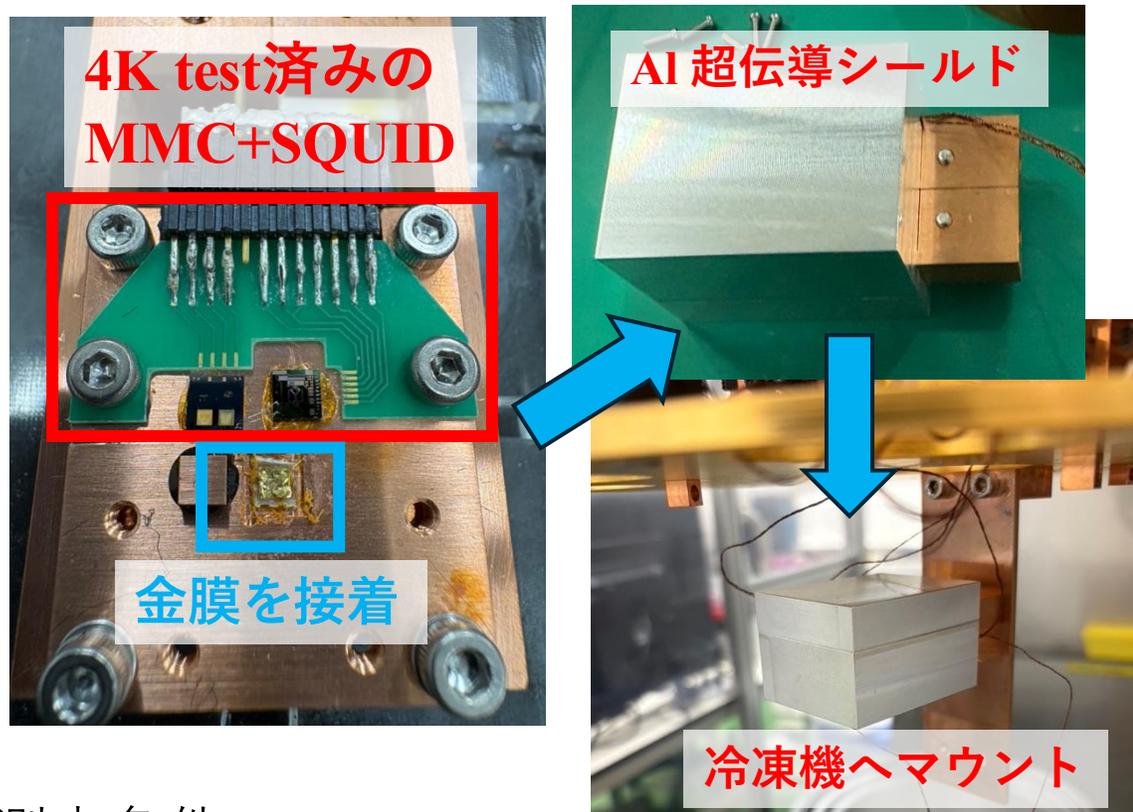
$$\phi_{RMS}/\phi_0 = M_{in} \sqrt{\frac{4k_b T}{R + (2\pi f)^2 L^2 / R}} \left(\frac{1}{\sqrt{\text{Hz}}} \right)$$

ϕ_{RMS} : 磁束振幅スペクトル密度
 ϕ_0 : 磁束量子単位
 M_{in} : Input coilの相互インダクタンス
 k_b : ボルツマン定数
 T : 温度
 R : MMC-SQUID間の抵抗
 L : MMCコイルのインダクタンス



センサーに不具合
↓
インダクタンス大

テストに合格したセンサーセットアップを物理測定に使用



^{241}Am 線源 : コリメートして~0.5 Hzに調整

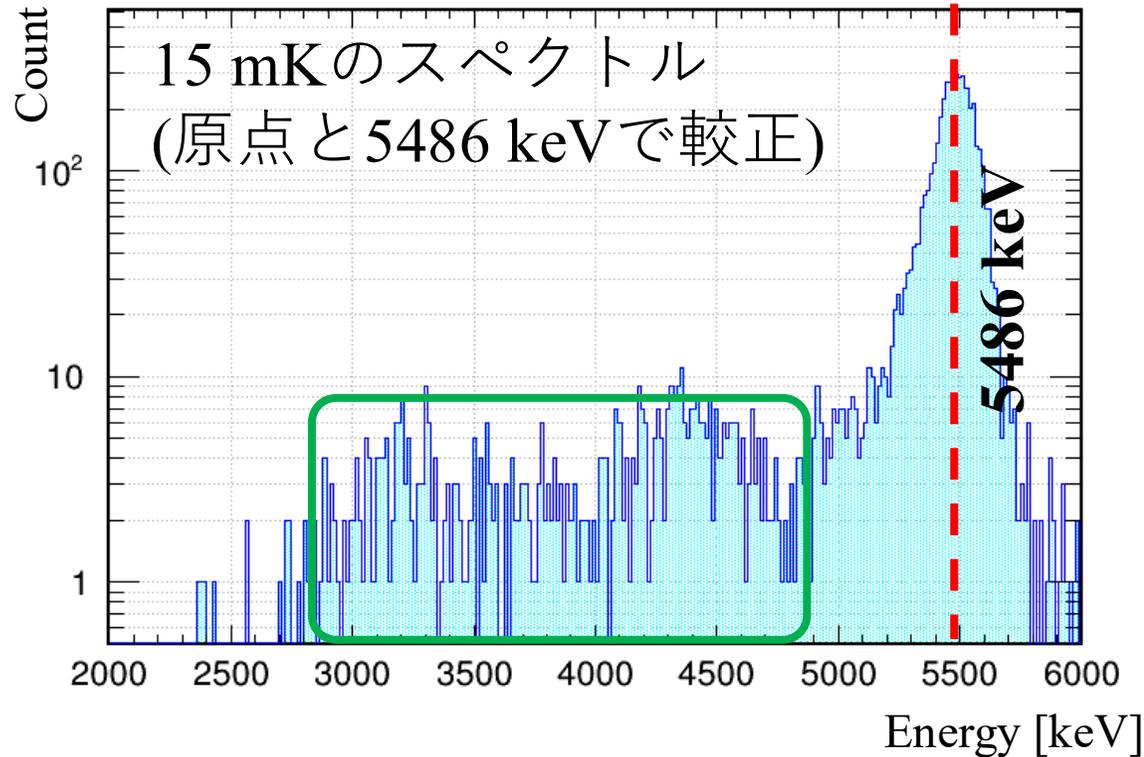
測定条件

- 測定温度 : 15 mK, 30 mK, 50 mK
- トリガー閾値 : 0.4 V
- サンプリング : 500 kHz \times 40000point = 0.080 s

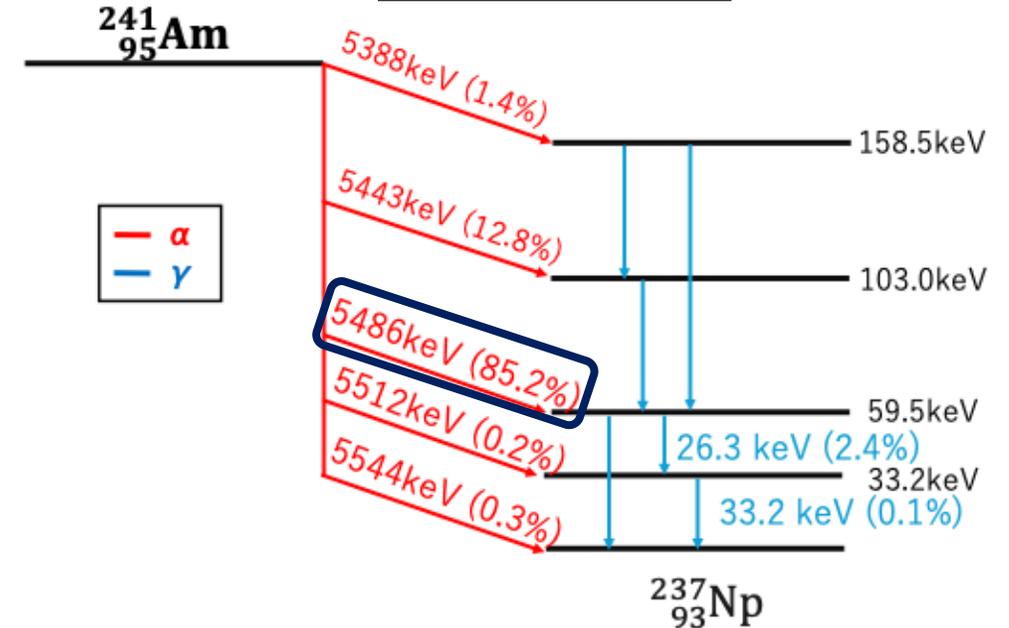
温度(mK)	イベント数	rate(Hz)
15	5048	0.478
30	5120	0.488
50	7733	0.473

エネルギースペクトル

得られたエネルギースペクトル



^{241}Am 崩壊図



原点と5486 keVでエネルギー較正

大阪大学での極低温環境下で、初めて物理信号を確認！

一方で、

- エネルギー分解能 FWHM 3.05 % @5486 keV
- 2900–4900 keVで未同定イベント

IBSでのエネルギー分解能の12倍

- エネルギー分解能

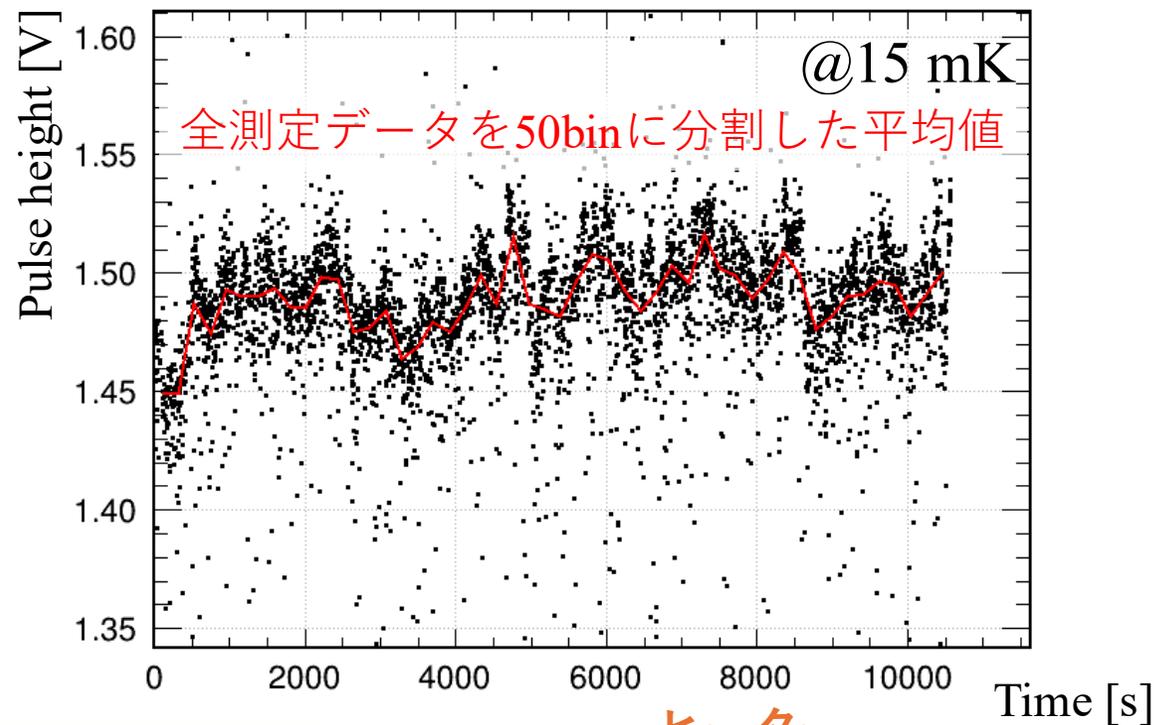
大阪大学 : 3.05%

IBS : 0.25%

- ゲインの時間変動の寄与を定量評価

ドリフト成分20%が影響

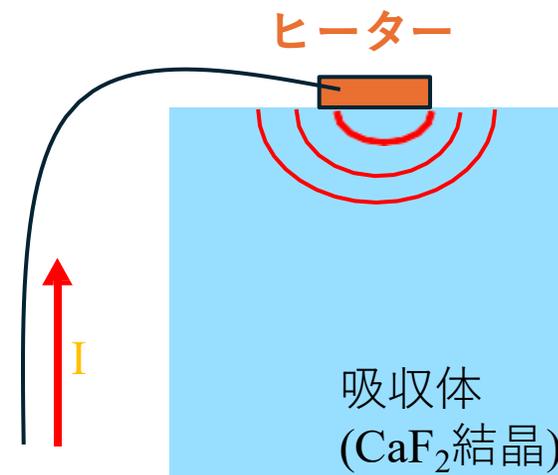
→エネルギー分解能0.6%分に相当



対策

→吸収体にヒーターを取り付け、人工的な熱パルス信号を送ることで、ゲインを補正する

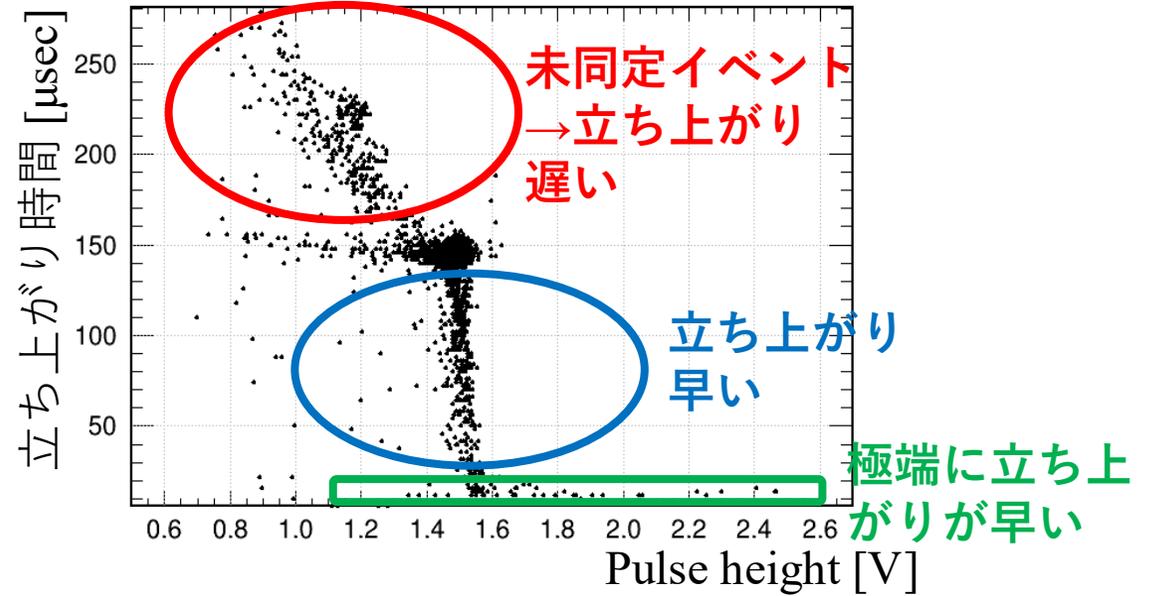
主要因については現在調査中



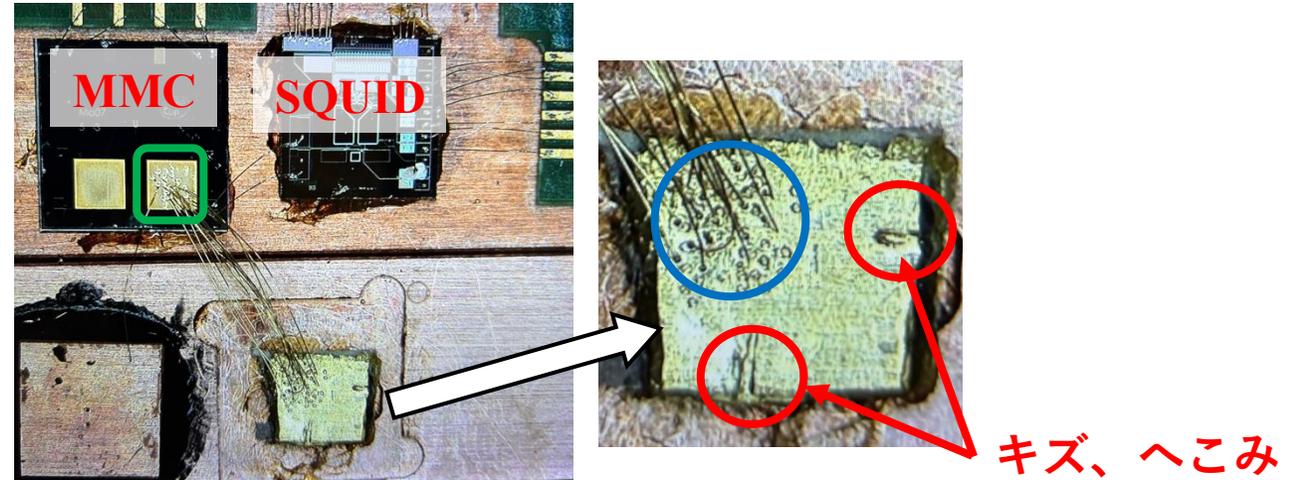
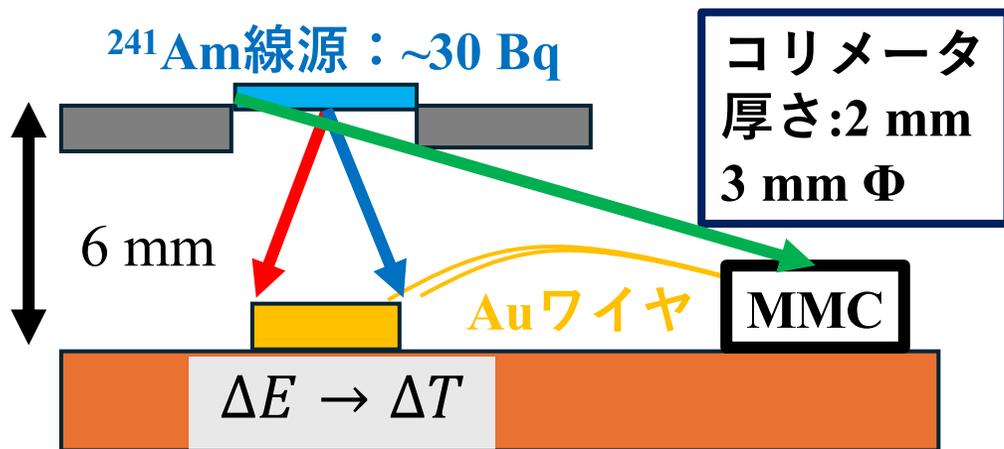
未同定イベント解析

- 立ち上がり時間とパルス波高の相関
@大阪大学

IBSでの実験では見られなかった成分が存在
未同定ピークは立ち上がりが遅い成分



- コリメータによる影響



α 線照射場所の局所化

まとめ

- $0\nu\beta\beta$ 事象探索のために蛍光熱量検出器開発を行っている
- 大阪大学で、読み出し部分のセンサーの組み立て、4Kテストを行った
- 極低温環境下での検出器の動作確認とデータ取得が可能であることを実証した
- 簡易的なセットアップで測定を行い、 ^{241}Am 由来の物理信号を測定した
- センサーのテストは完了し、吸収体に CaF_2 結晶を使用できる準備が整った

展望

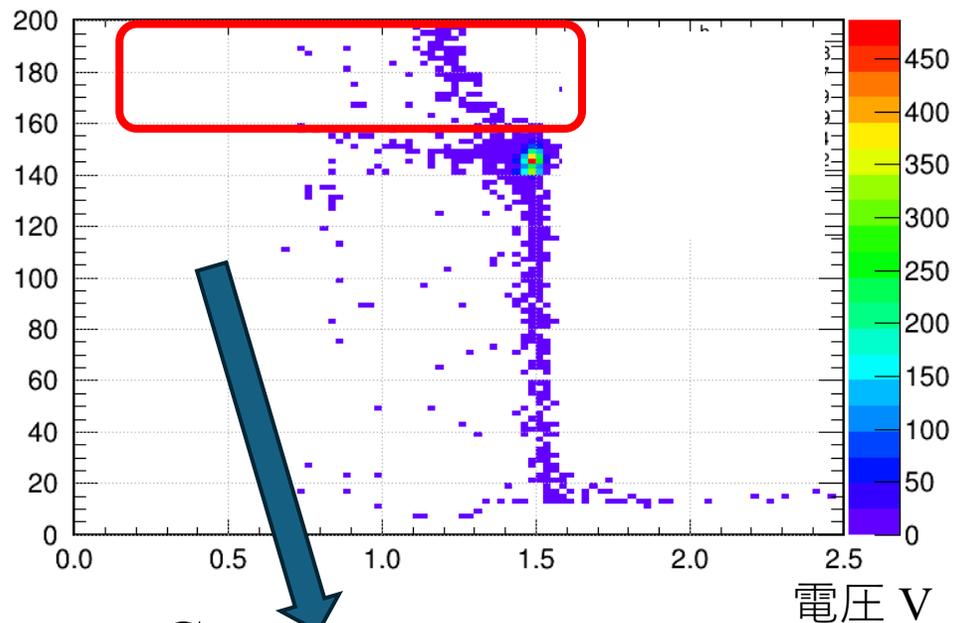
- 温度揺らぎに起因するゲインドリフトとエネルギー分解能悪化
→吸収体にヒーターを取り付け、パルス的な熱信号で変動を補正する
- 現在よりコリメートしたセットアップで実験を行う

バックアップ

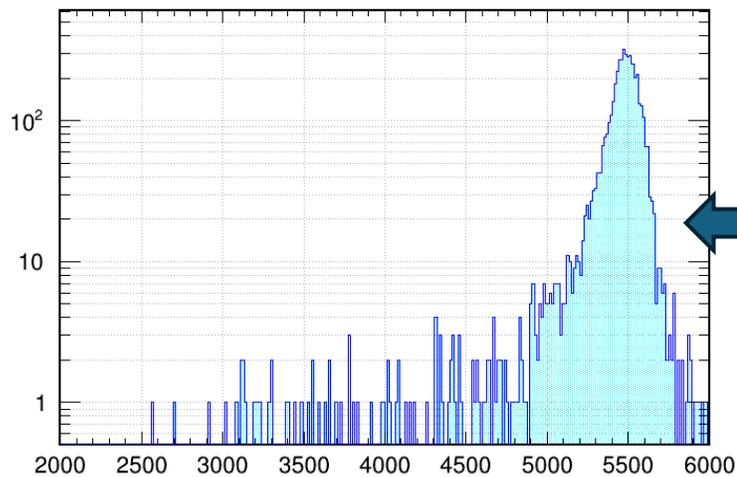
立ち上がりのIBSとの比較

立ち上がり時間 μsec

大阪

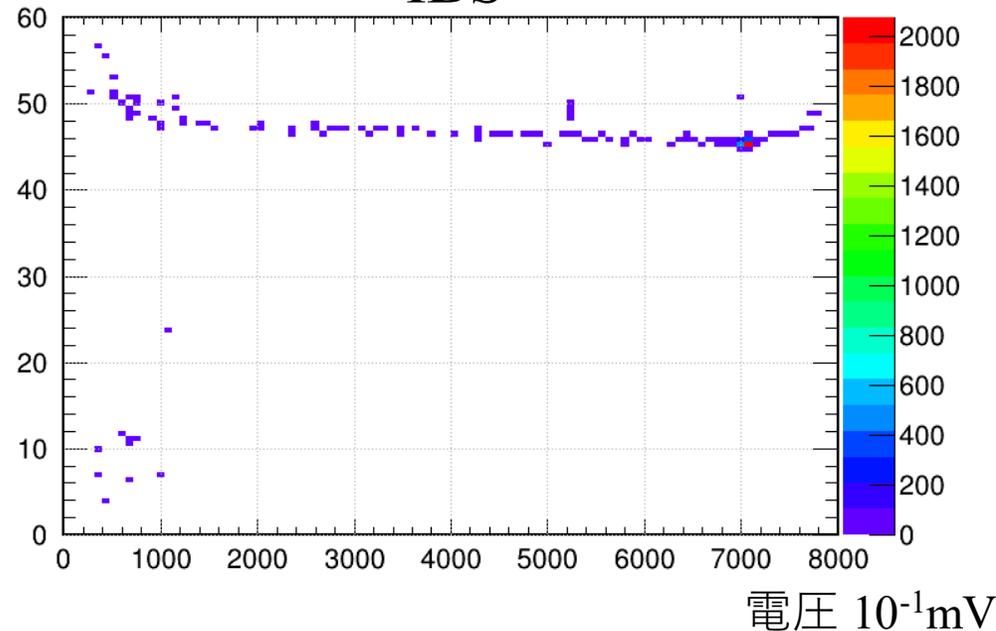


Cut

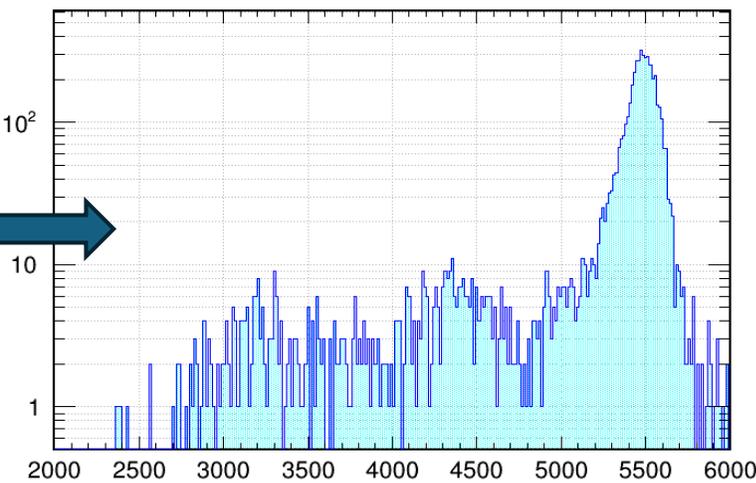


IBS

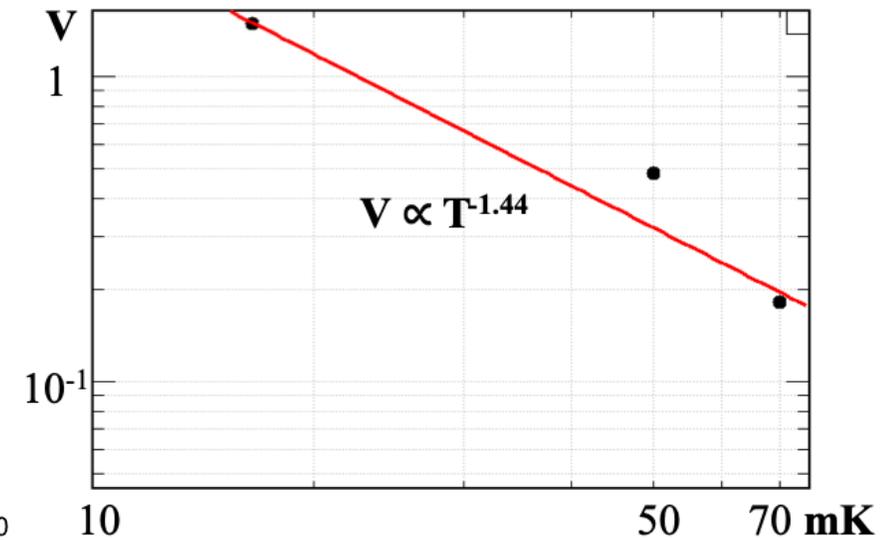
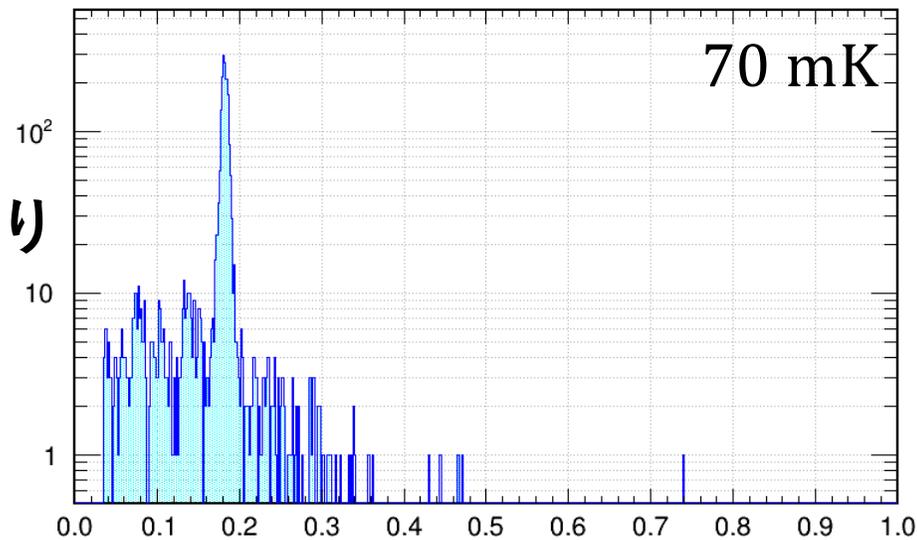
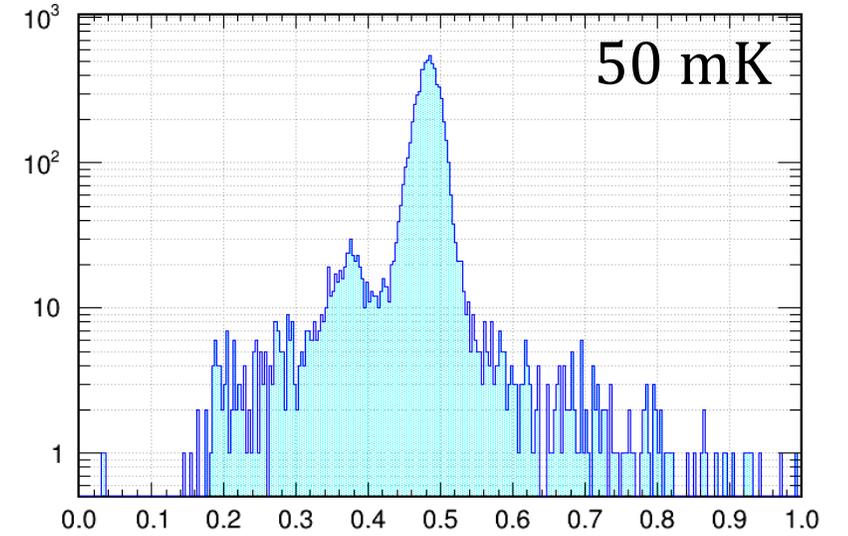
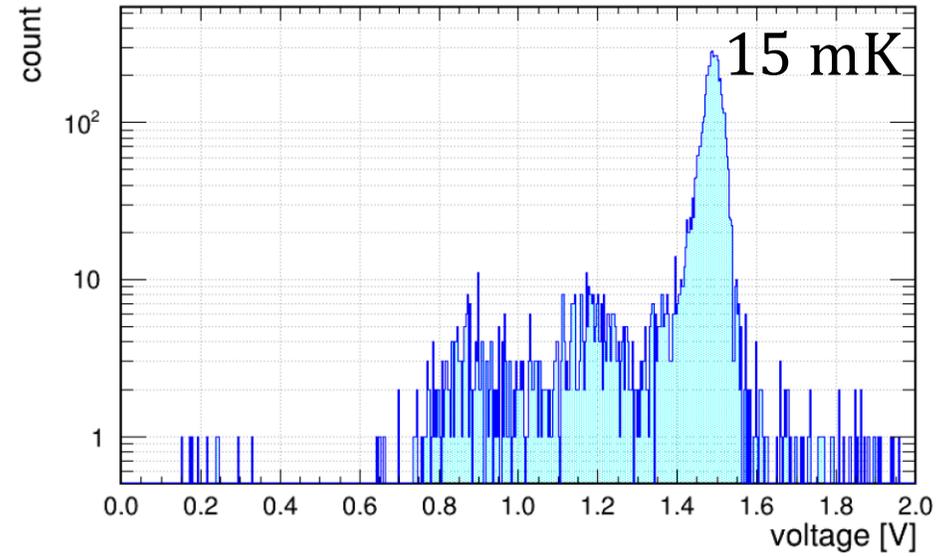
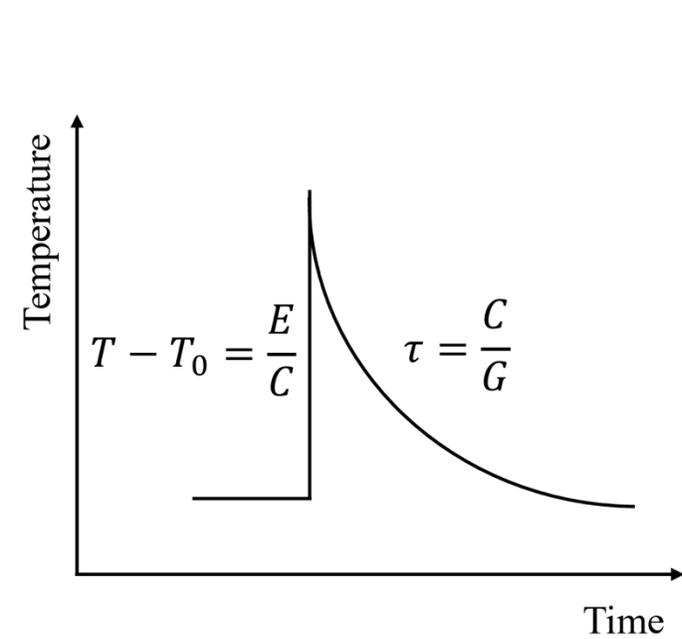
立ち上がり時間 μsec



立ち上がり時間 μsec



温度依存性



低温での熱容量 $C \propto T^3$ より
Gain $\propto T^{-3}$

信号の温度依存性@IBS

- ・ 温度が低くなるほどゲインが大きくなる

パルスハイト
= 最大値とベースラインの差

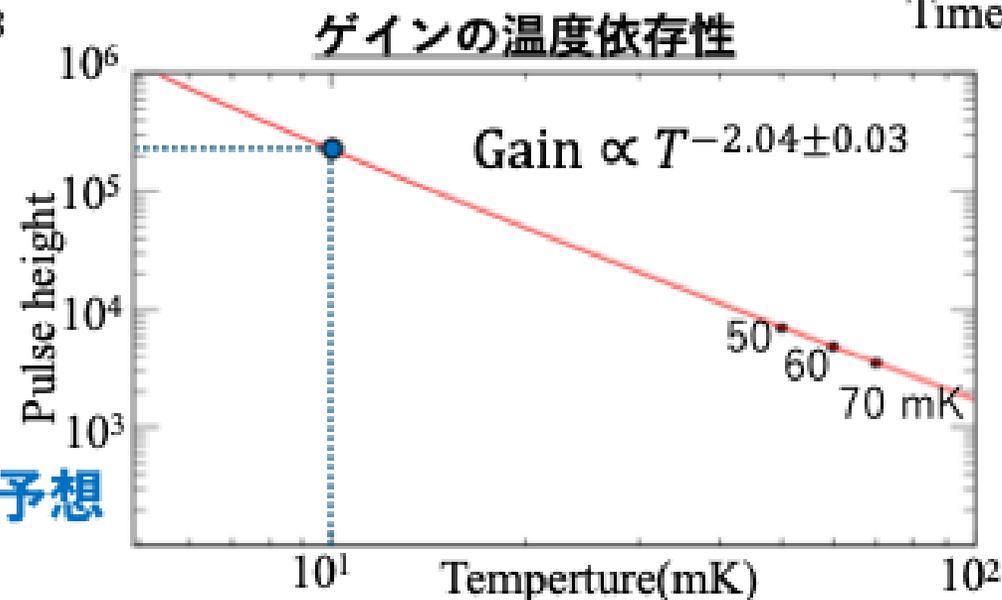
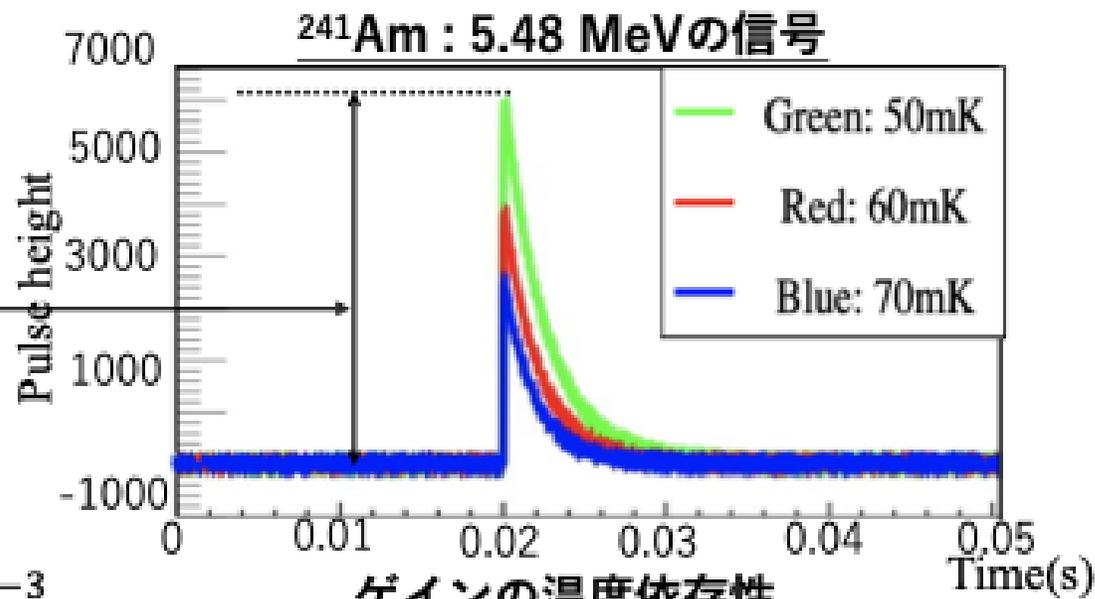
ゲインの温度依存性は

予想：低温での熱容量 $C \propto T^3$ より、 $\text{Gain} \propto T^{-3}$

結果： $\text{Gain} \propto T^{-2.04 \pm 0.03}$

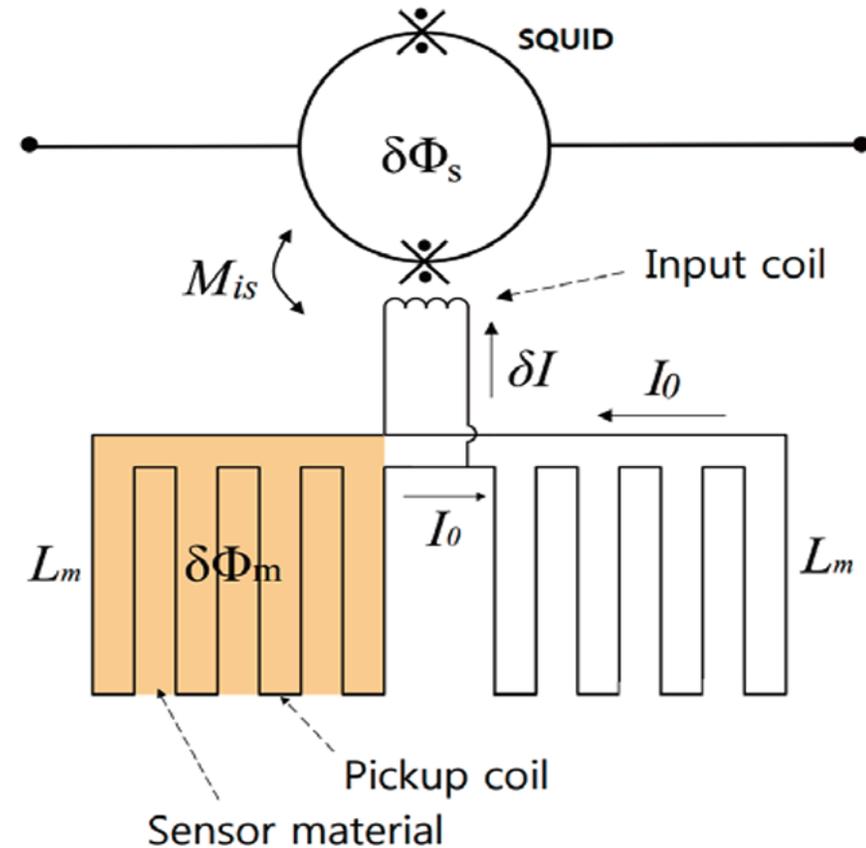
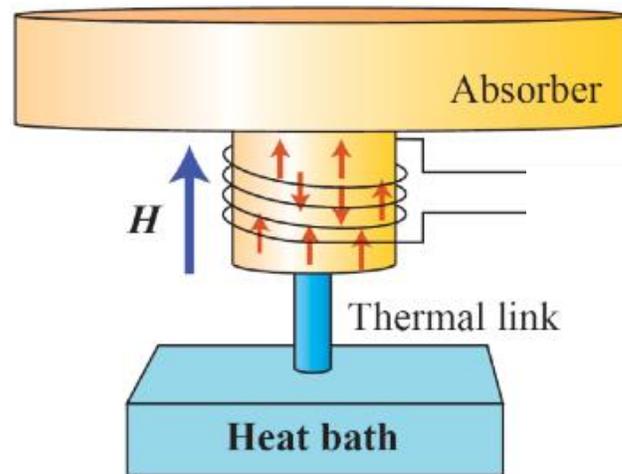
エネルギー吸収時の温度上昇によって T^{-3} からずれたのではと考えた

希釈冷凍機：10 mKで~30.0 V信号が見えると予想



Metallic Magnetic Calorimeter (MMC)

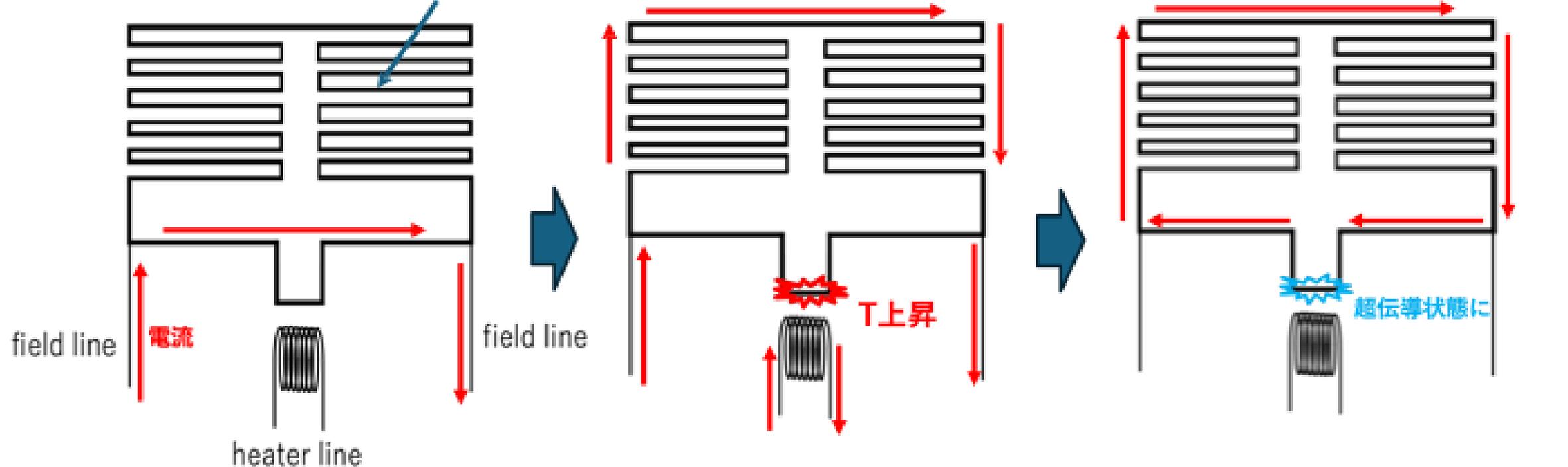
- 常磁性イオンをわずかに含むAu (Absorber)
- 超伝導電流→スピン整列
- 温度上昇→スピン反転→誘導電流
- 広い範囲で線形性を持つ
- 数MeV領域での測定



フィールドドインジェクション

$T < 100\text{mK}$

MMCセンサー



- ・ field lineにパルス電流を流す
- ・ 抵抗が大きいコイル側には電流が流れない

- ・ heater lineにパルス電流を流す
- ・ 回路一部の温度上昇
- ・ コイル側に電流が流れる

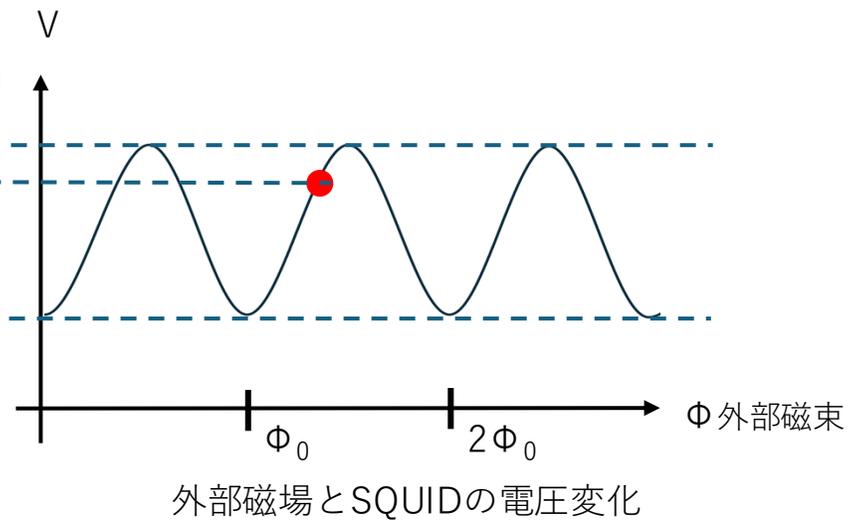
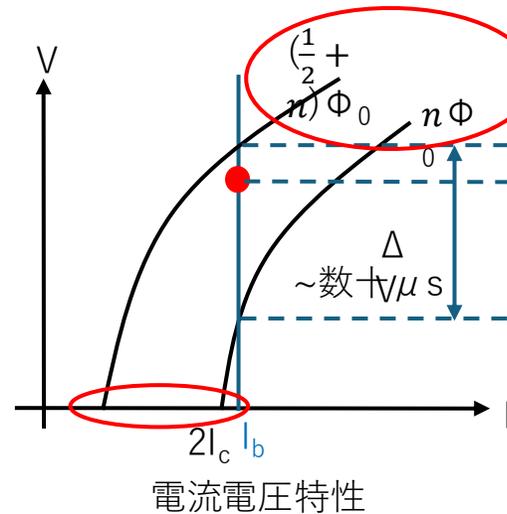
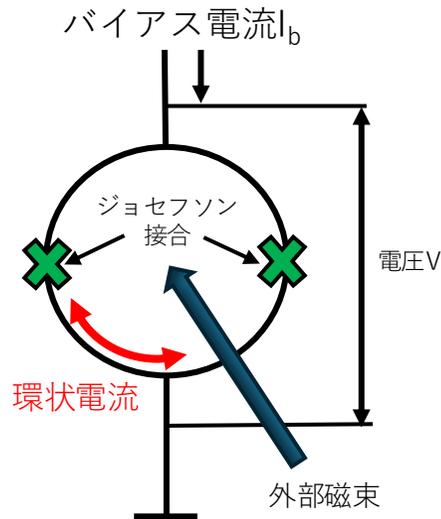
- ・ heaterのパルス電流が切れると回路の温度低下→超伝導

MMC内にループ電流完成

SQUIDの原理

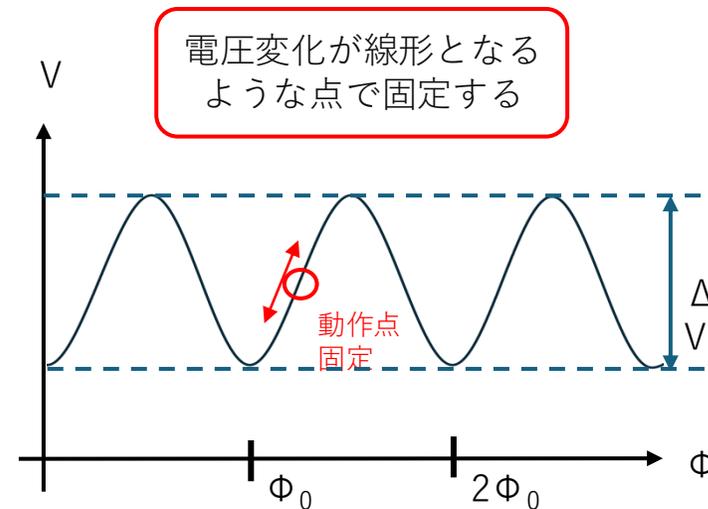
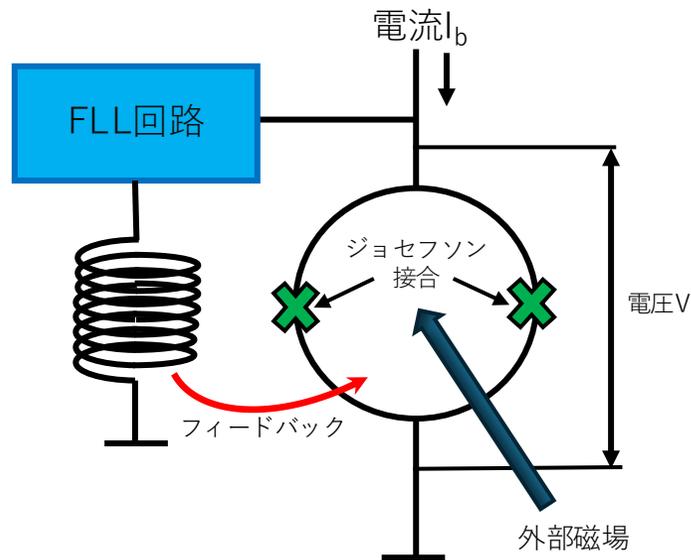
- ジョセフソン接合
超伝導体二つを薄い絶縁体で接合することで0電圧のままでも超伝導電流が流れる(ジョセフソン電流)
最大値 I_c を超えると電圧が発生し、常伝導電流も流れるようになる。

- 磁束の量子化
リング内部の磁束はリングに環状電流が流れることにより磁束量子 Φ_0 ($h/2e=2.07 \times 10^{-15} \text{Wb}$)の整数倍になる



SQUIDの原理

- Flux Locked Loop(FLL)回路
磁束変化に対して線形な電圧変化を取り出したい
外部磁場が加わった時にその変化分を元に戻すような回路



バイアス電流やフィードバックの設定といったチューニングが必要