

CaF₂ 蛍光熱量検出器開発

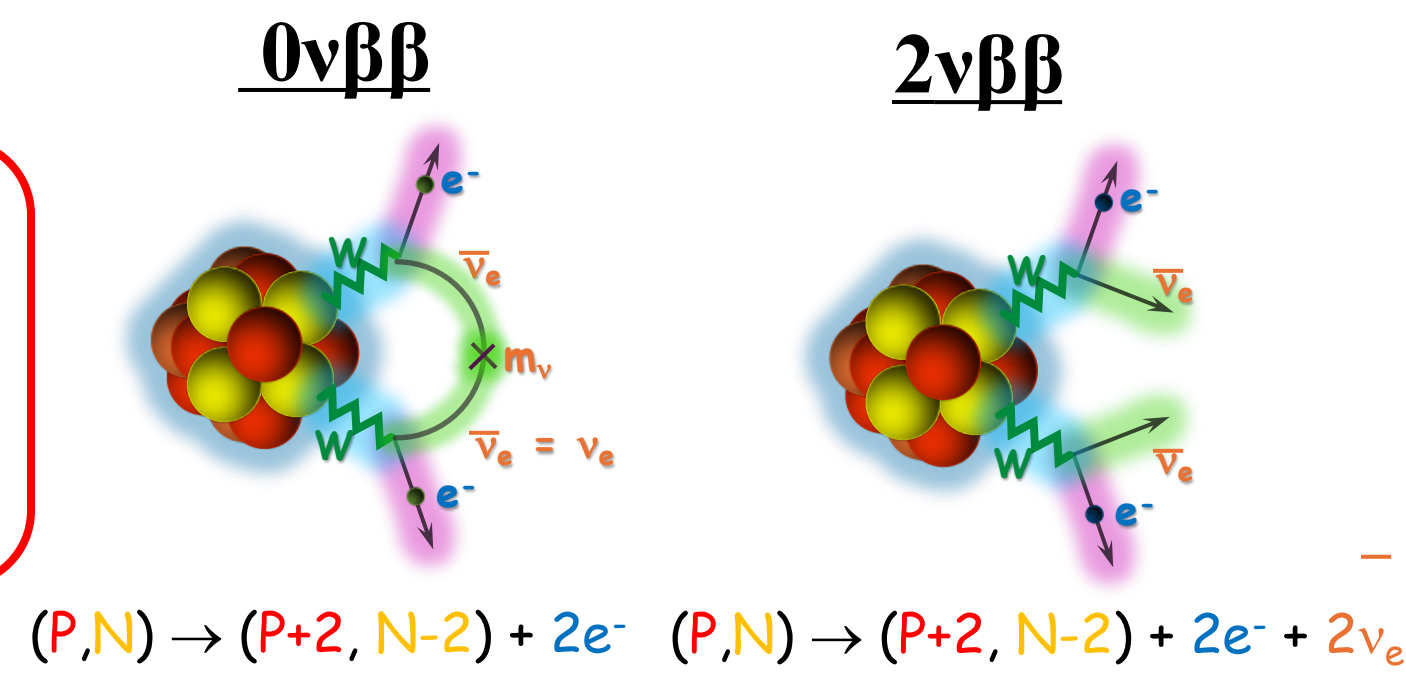
K.Noda *T.Nishikawa* *S.Yoshida* ^A*S.Umehara* ^B*Y. Kim* ^{BH}*. Kim* Graduate school of Science, Osaka Univ ^ARCNP, Osaka Univ ^BIBS

1. ニュートリノレス二重ベータ崩壊(0νββ)

0νββとは

- ニュートリノがマヨラナ粒子である時に起こる
- 二重ベータ崩壊の一つのモード
- 標準理論を超えた事象

- ニュートリノのマヨラナ性の証明
- レプトン数非保存過程
- ニュートリノの有効質量と質量階層性
- 物質優勢宇宙の謎



0νββの測定精度向上に重要なファクター

- 低バックグラウンド (BG) 環境

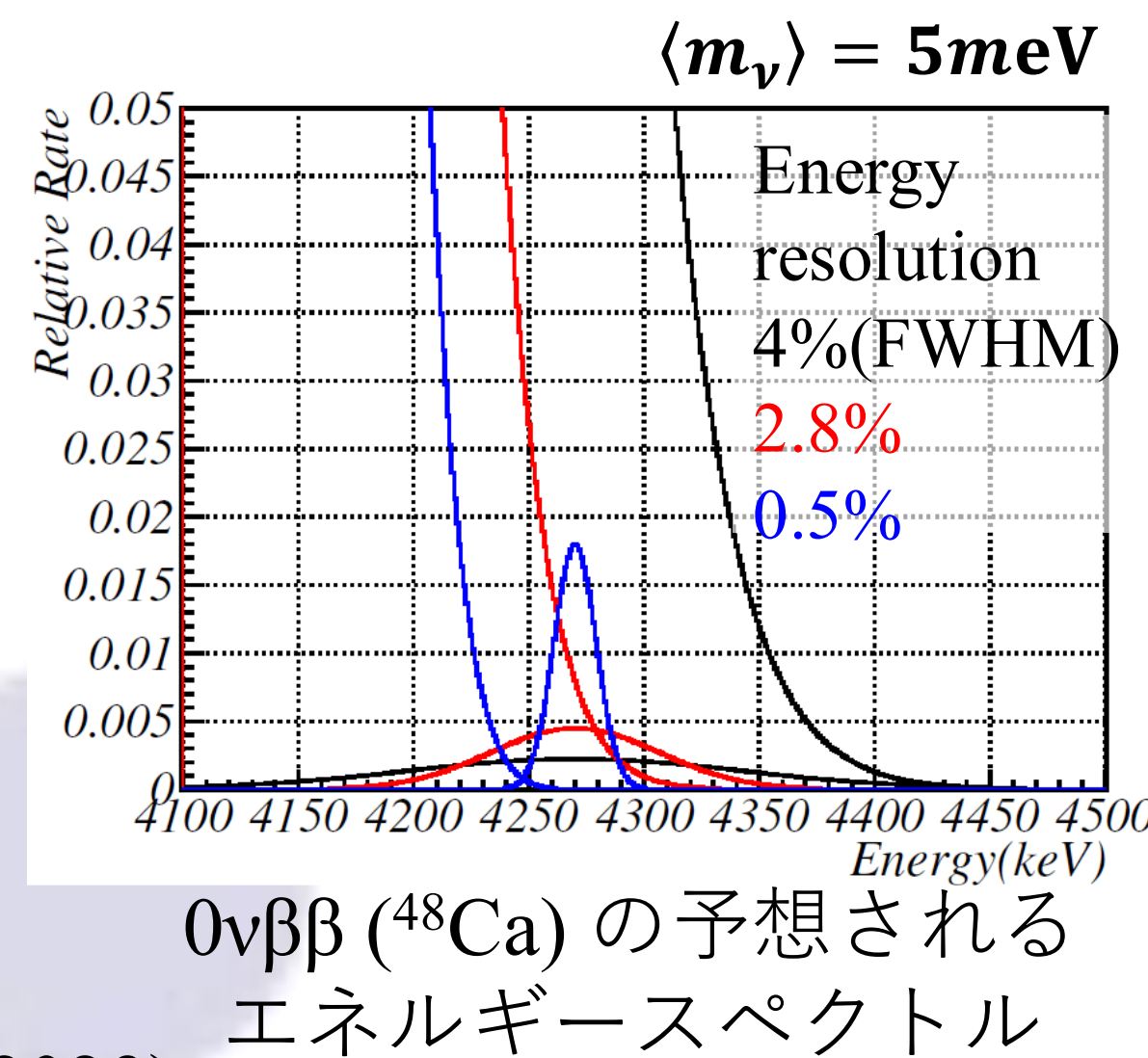
最新の下限值 2.3×10^{26} 年[1] 極稀事象
低バックグラウンド (BG) 環境が必須

- 高エネルギー分解能

エネルギー分解能が低いと0νββの
シングルピークの同定が困難

- 大量の標的核

⁴⁸Caの天然存在比 0.187%
濃縮技術の確立(谷川)



[1] PHYSICAL REVIEW LETTERS 130, 051801 (2023)

2. ⁴⁸Caを用いた0νββ探索(CANDLES実験)

Why ⁴⁸Ca ?

⁴⁸Caは全二重ベータ崩壊候補核中で最大のQ値
(4.27 MeV)

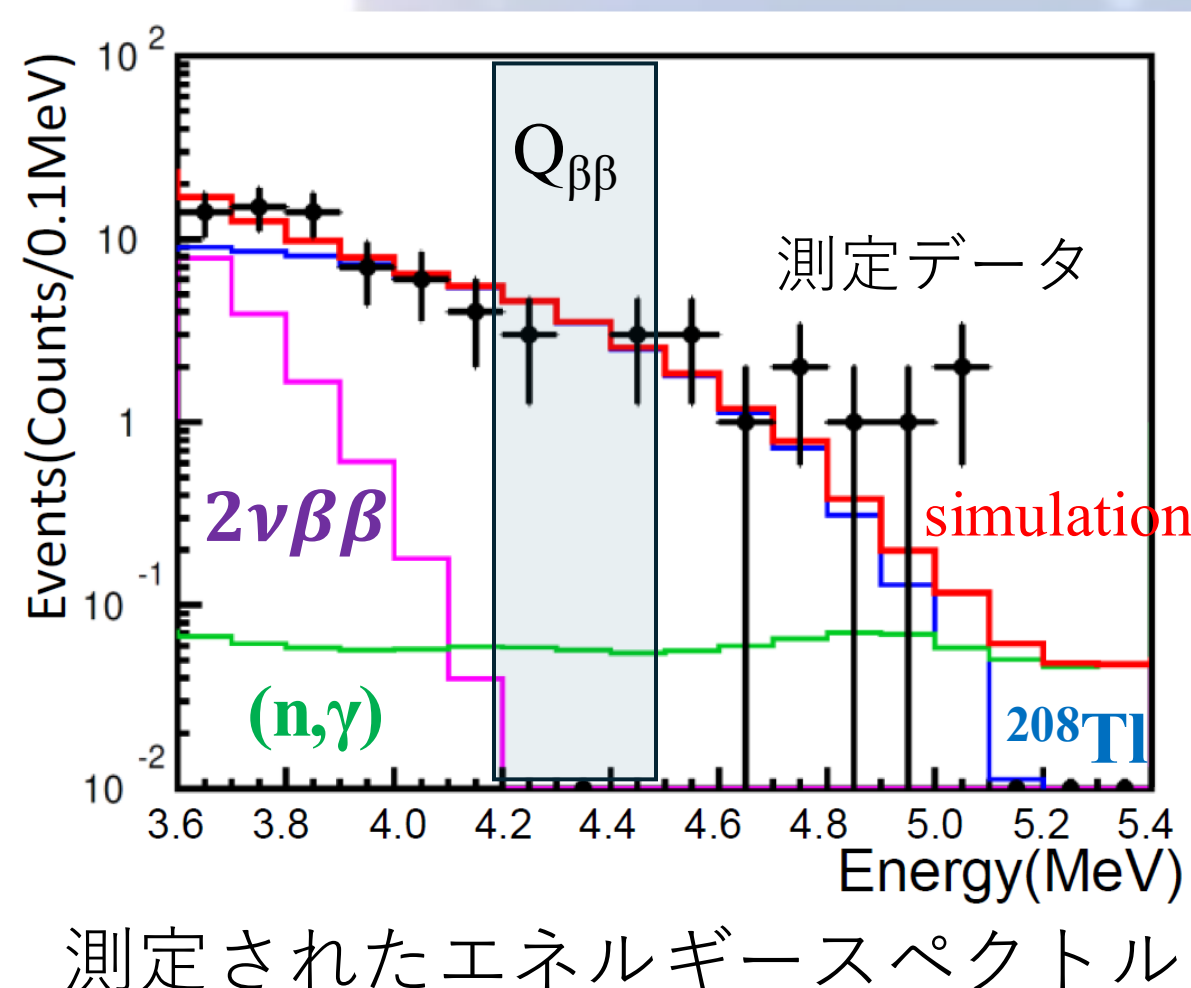
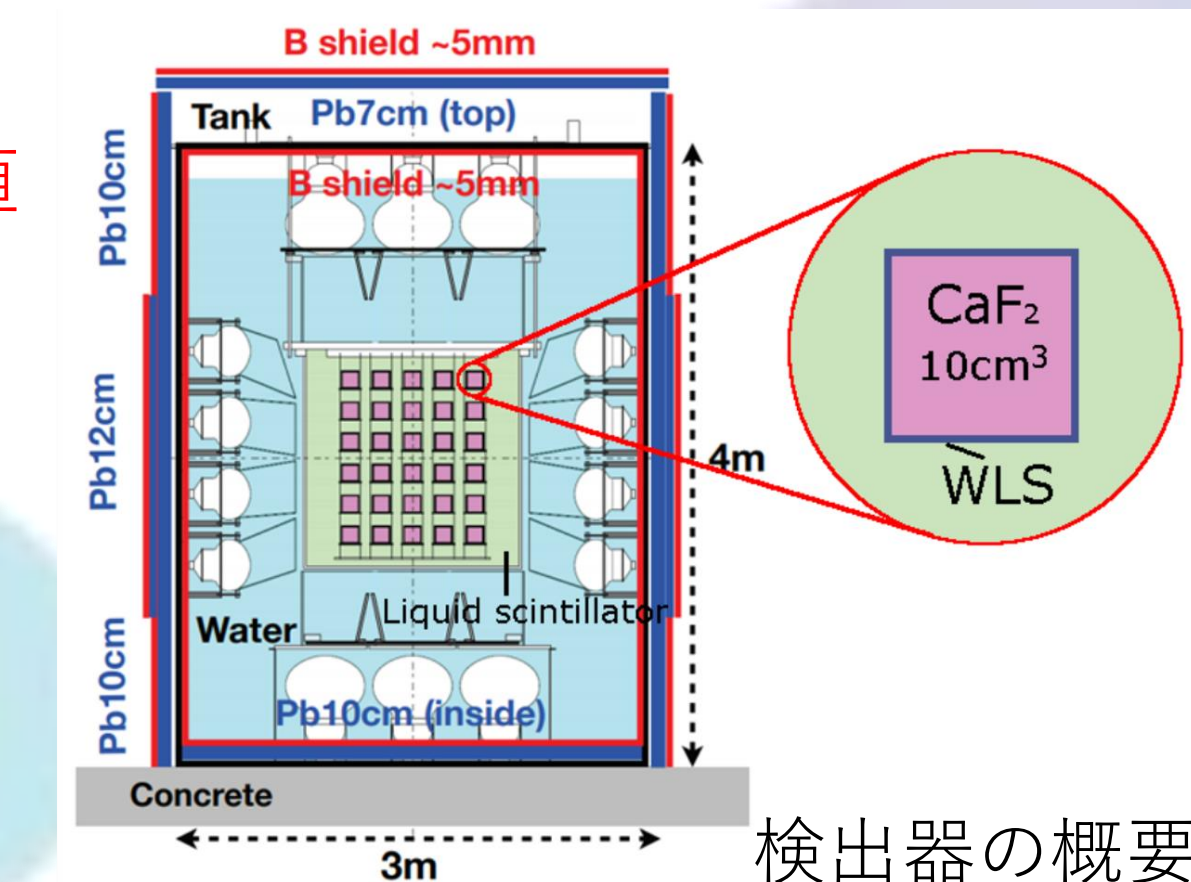
²⁰⁸Tl ($Q_\beta = 2.6$ MeV), ²¹⁴Bi ($Q_\beta = 3.3$ MeV)
環境放射線の影響を抑えられる

先行実験CANDLES III

- @ Kamioka observatory
- pure CaF結晶 × 96 個 (305kg)
- PMT × 62 本 (13inch & 20inch PMTs)
- 液体シンチレータ 4π active shield
- 総測定期間 780 日
- 解析に用いた期間 131 日
- エネルギー分解能 5.64 % @ 4.27 MeV
- BGレベル < 10⁻³ events/keV/year/(kg of ^{nat}Ca)
- 測定された半減期

$T_{1/2} > 5.8 \times 10^{22}$ 年(90% C.L.)[2]

[2] Phys. Rev. C 78, 058501 (2008)



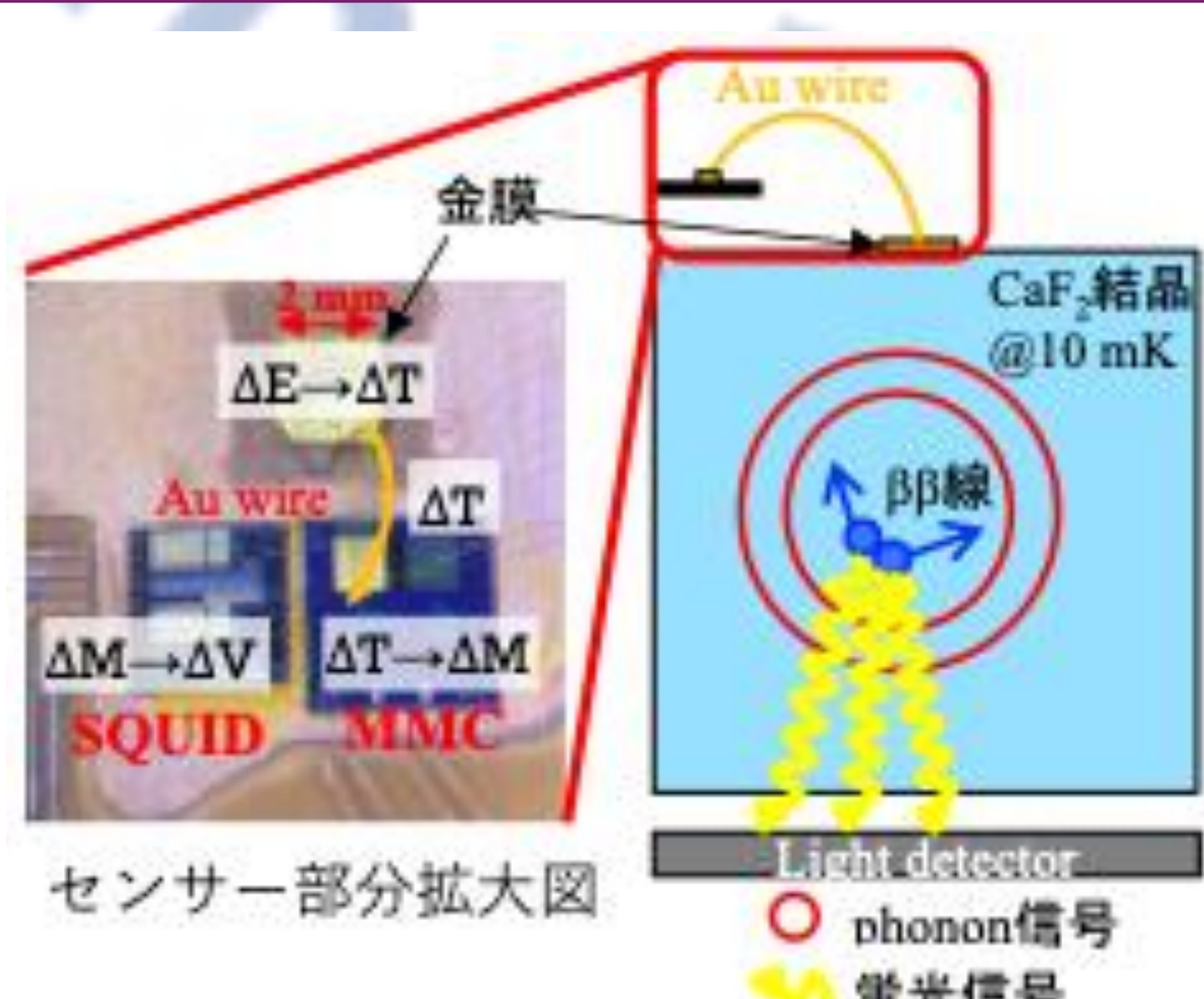
次世代実験に向けた改善

高エネルギー分解能と低BG環境を実現する→ 蛍光熱量検出器の開発

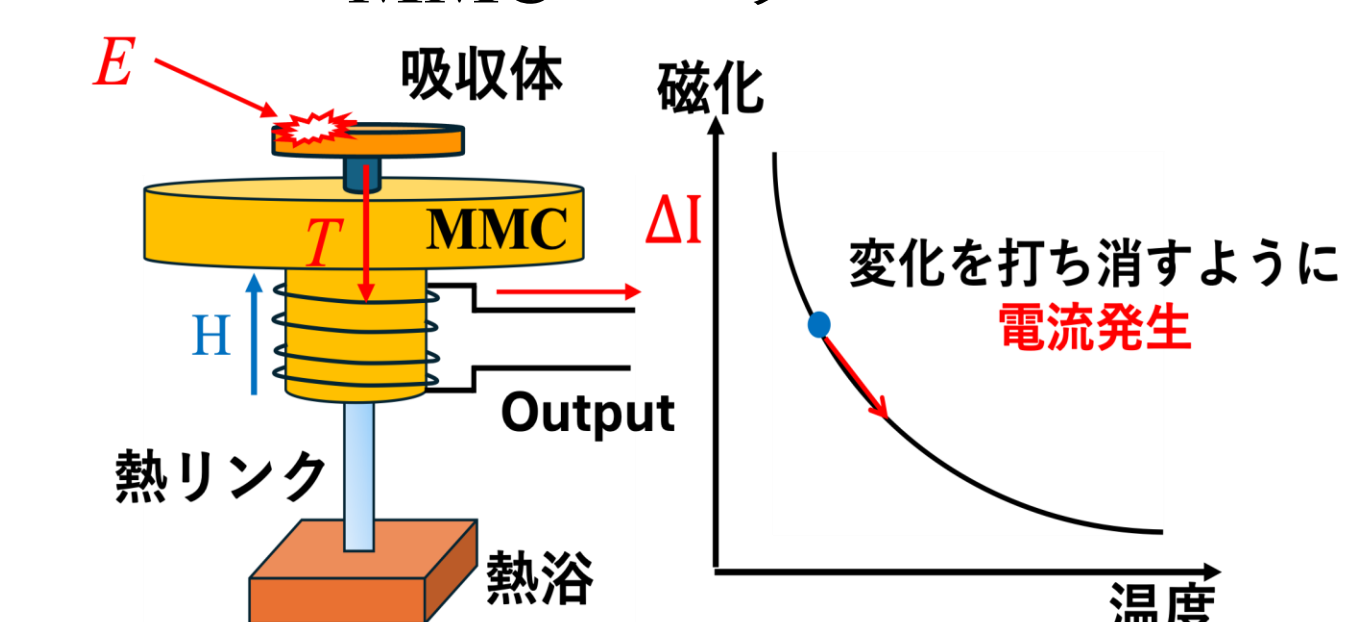
3. 蛍光熱量検出器

検出原理

- 希釈冷凍機→CaF2結晶を極低温~10 mKまで冷却
- 結晶内での放射線のエネルギー損失→phononを励起
- Phononが金膜に到達し、金膜の温度を上昇
- 温度変化をMMCセンサーとSQUIDセンサーで読み出す



MMCセンサー

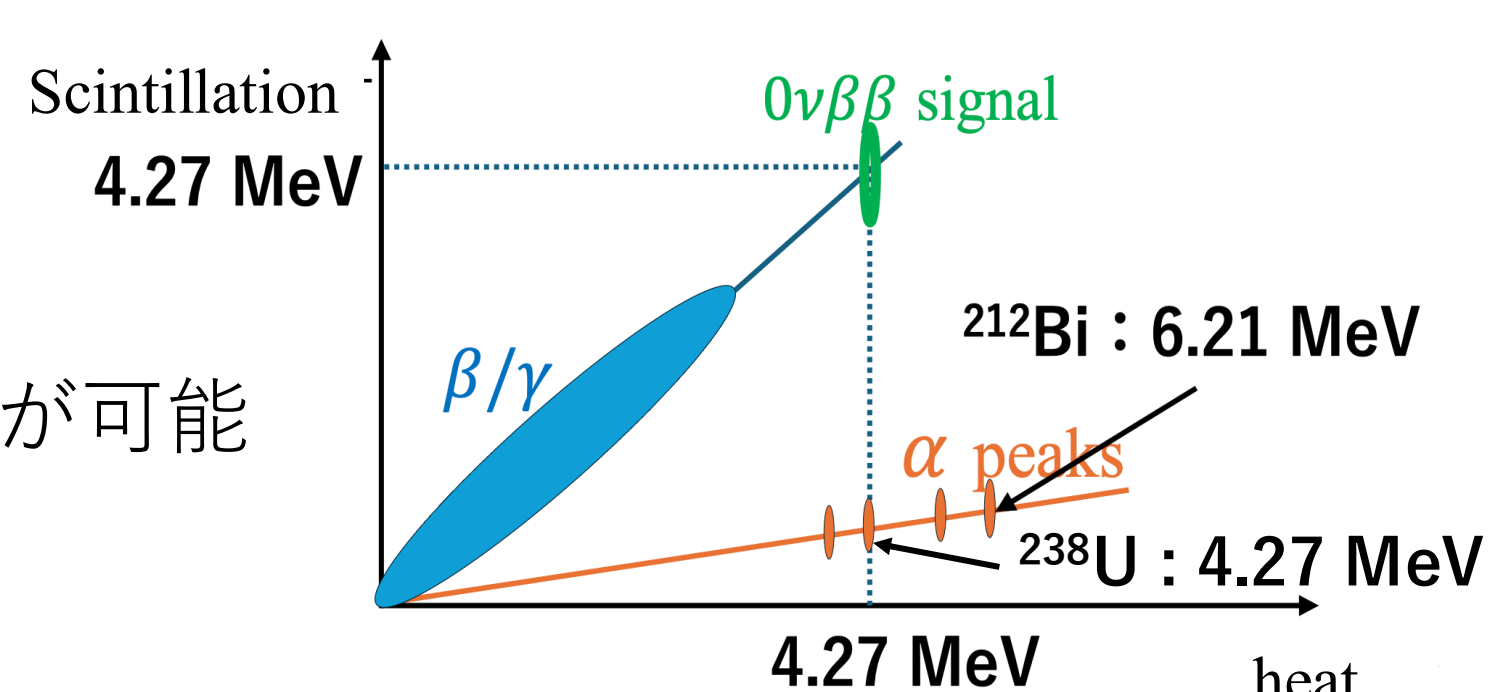


Phonon→エネルギーキャリアの数↑

高エネルギー分解能を実現可能 目標 FWHM 0.5% @4.27 MeV

粒子識別

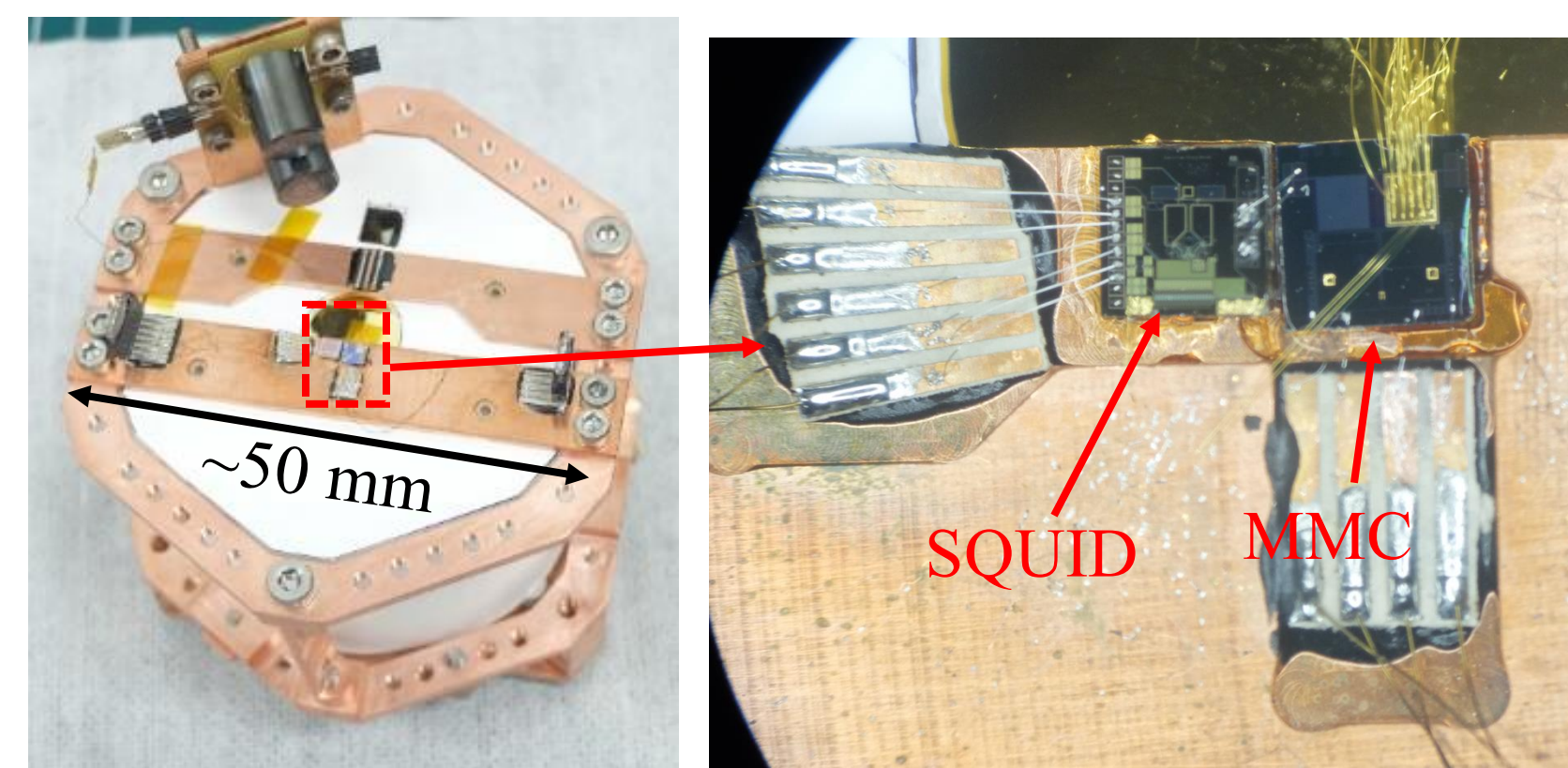
熱信号と光信号を同時に測定
消光効果によりα粒子とβ/γ粒子の識別が可能
低BG環境の実現



4. 開発上の課題

信号強度の位置依存性

CaF₂結晶を用いた先行実験 → IBS/KRISS(AMoRE subgroup)協力のもと実施



実験セットアップ

得られたエネルギー分解能

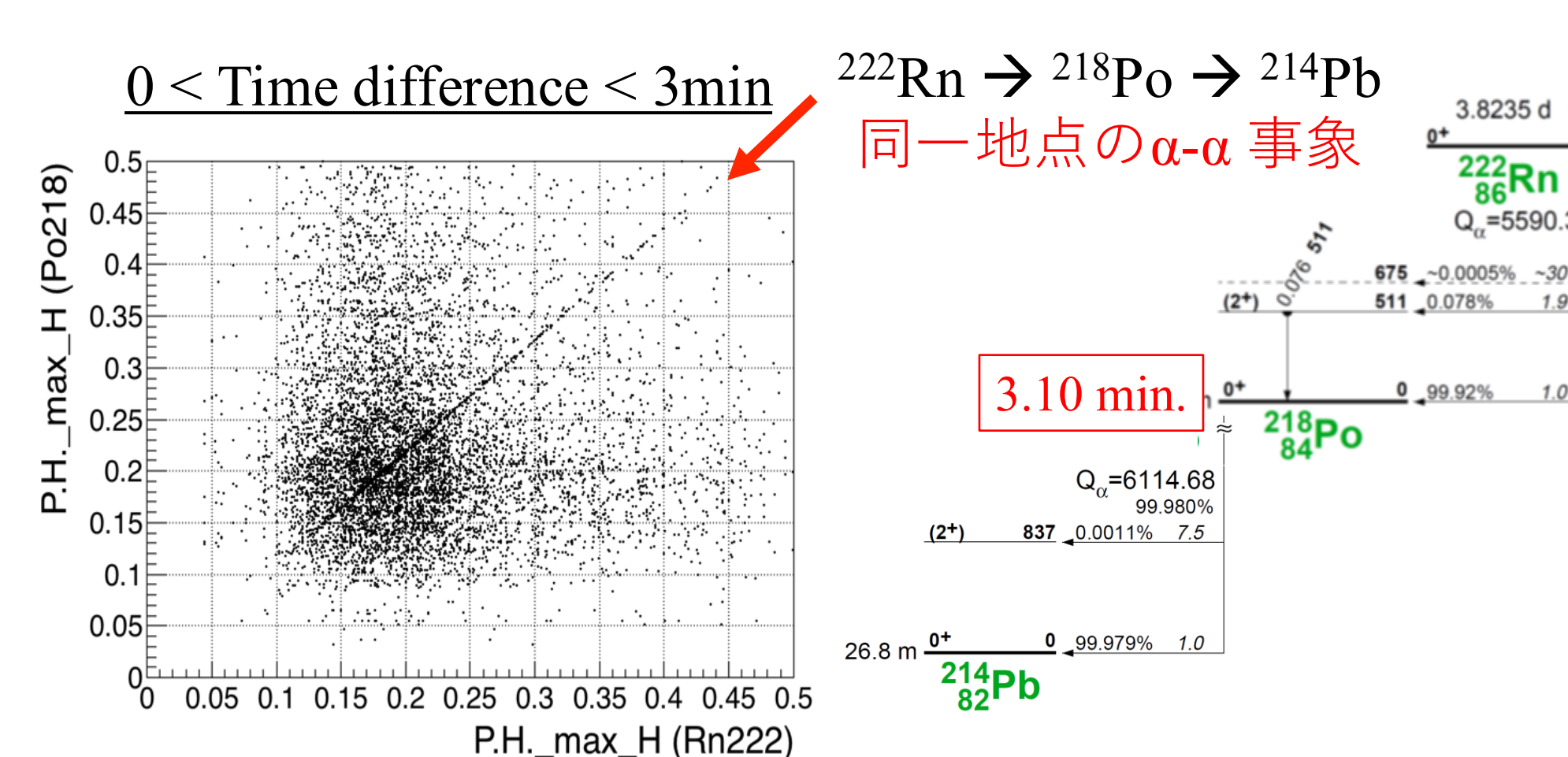
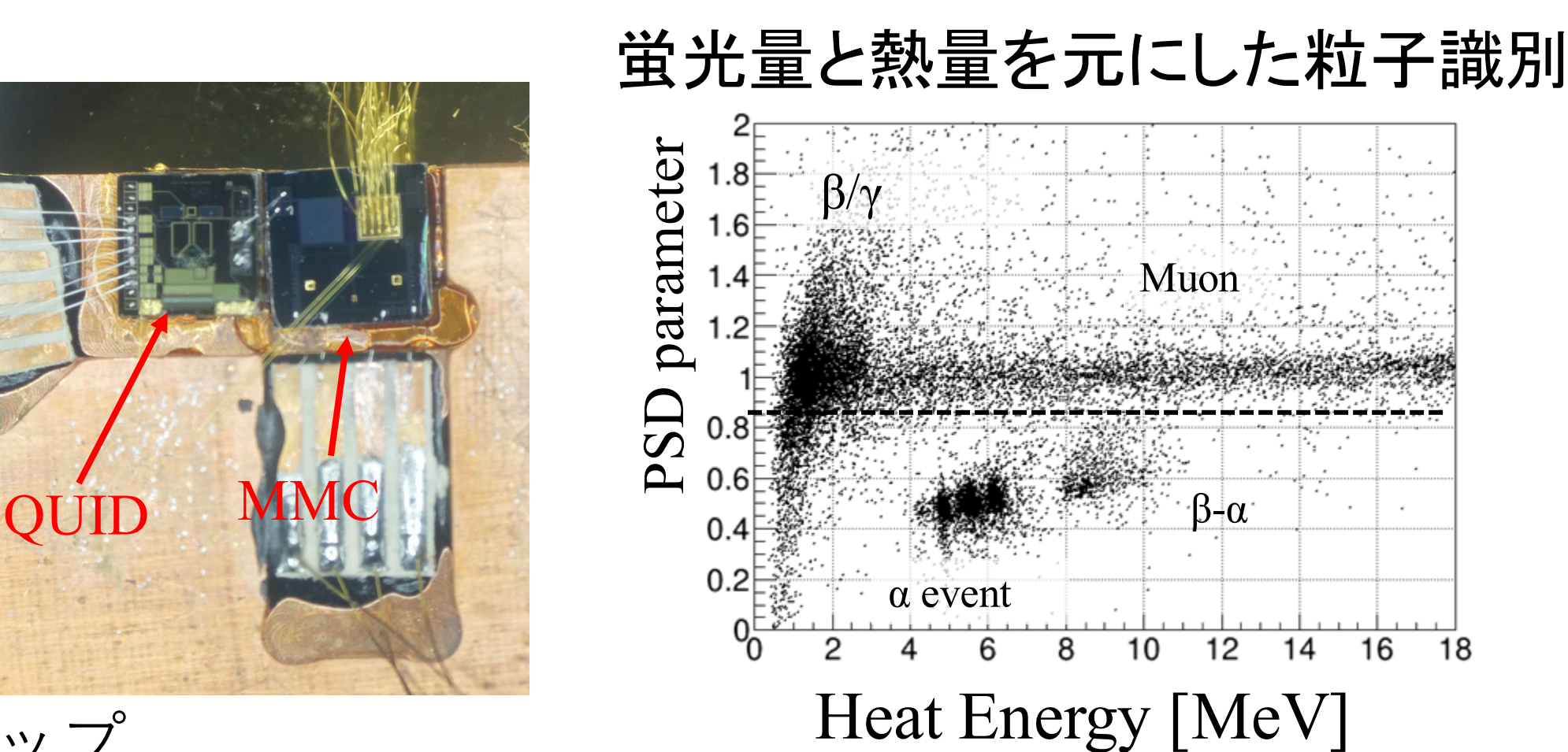
4.4% FWHM @4.87MeV

$^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Pb}$

遅延同時事象を用いた解析
信号強度に位置依存性あり

位置依存性を除いた
理想的なエネルギー分解能

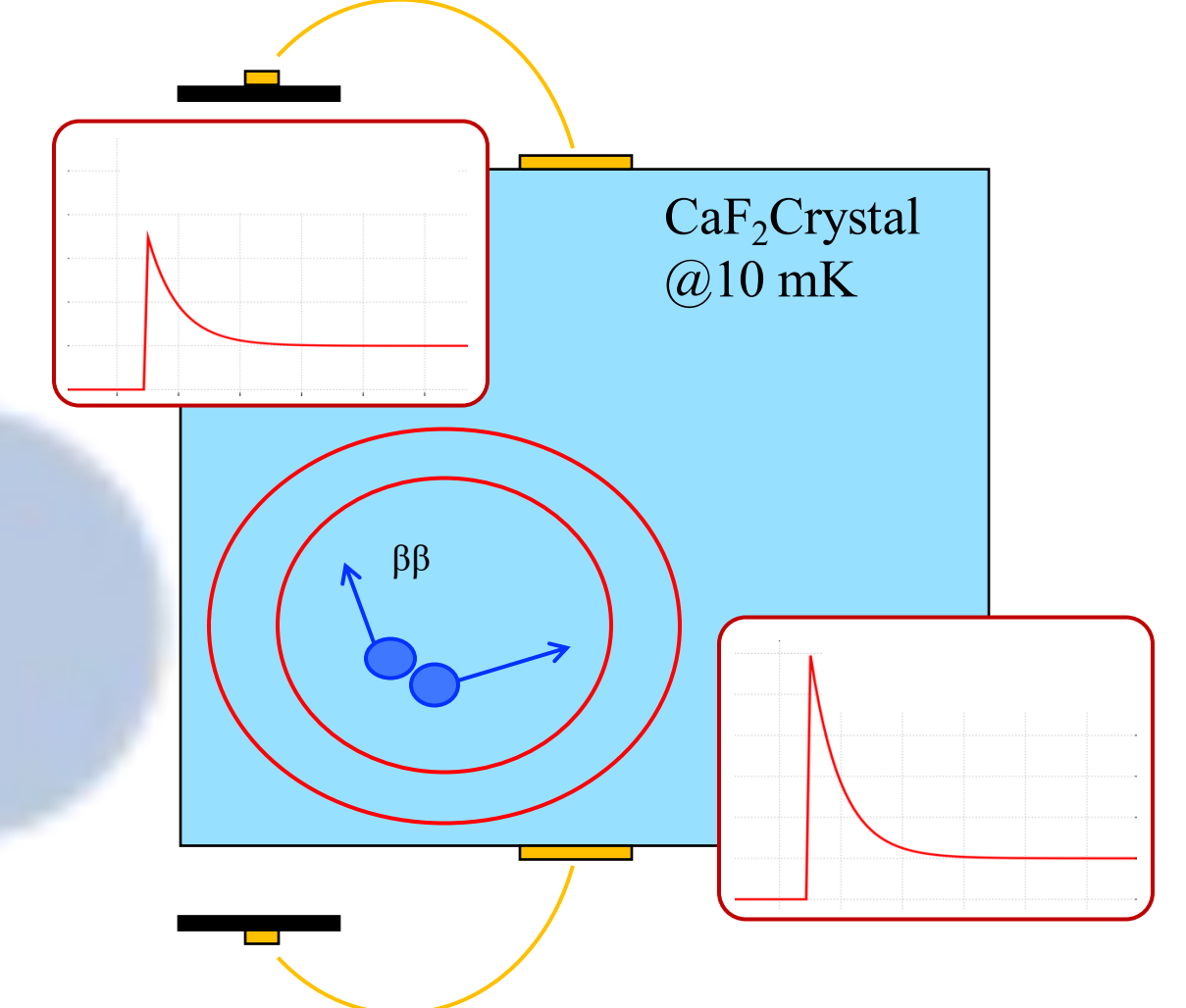
0.42 % FWHM @ 5 MeV



解決策：信号読み出しの多地点化

- 熱信号を2地点から読み出す
- 距離に応じて大小の信号
- 解析で2地点の波形を足すことで位置依存性を改善

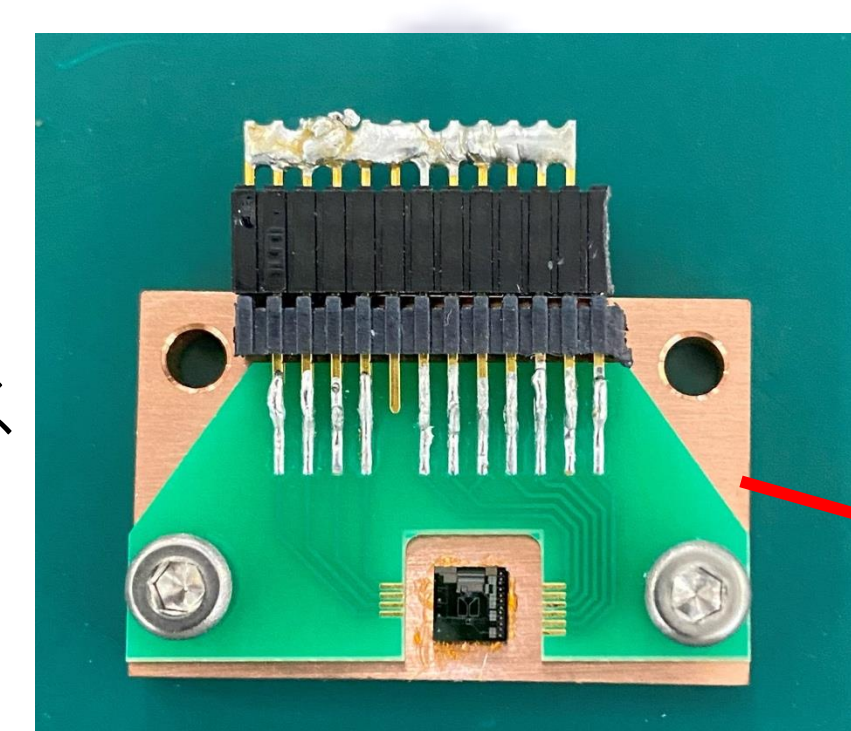
現在、大阪の実験室で測定環境を準備中！



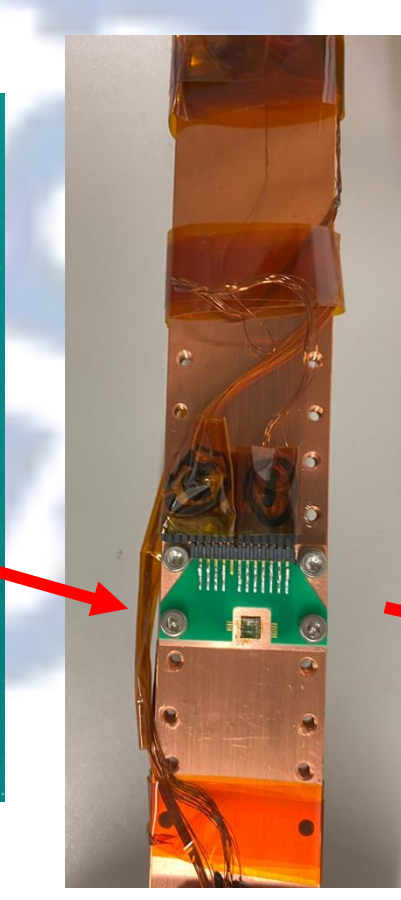
5. センサーの性能テスト

SQUIDセンサーの性能テスト

- 6台のSQUID購入
 - 動作性の確認
 - 磁束印加時の相互インダクタンスを測定
- test sheetと照合して
問題ないか検証



実験セットアップ

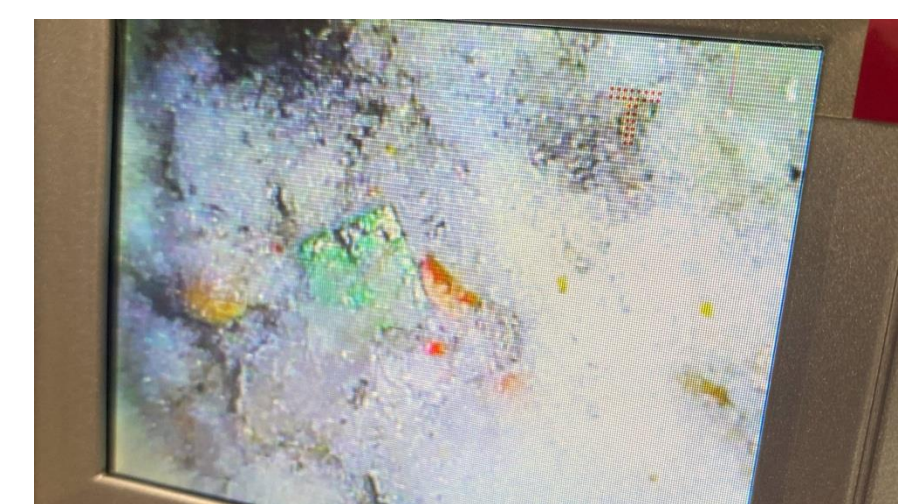


4.2 Kの液体ヘリウムで冷却



その時に起きた問題

- ベースラインに振動ノイズ
- 応答信号が見られない
- センサー落下



信号を入力に対するSQUIDの応答信号

MMCセンサーの性能テスト(予定)

MMCセンサーの回路
Johnson Noise(熱ノイズ)
により生じる磁束を測定

MMCセンサー内部のコイルのインダクタンスを評価

$$\phi_{RMS} = \frac{M_{in} \sqrt{4k_B T}}{\sqrt{R + \omega^2 L^2}} \left(\frac{\phi_0}{\sqrt{Hz}} \right)$$

Min: output coilの相互インダクタンス

Kb: ボルツマン定数

T: 温度

R: MMC回路の抵抗

L: MMCコイルのインダクタンス

今後

- 希釈冷凍機の補修が済み次第測定を行う
- MMCとSQUIDの性能テストも並行して継続していく

