

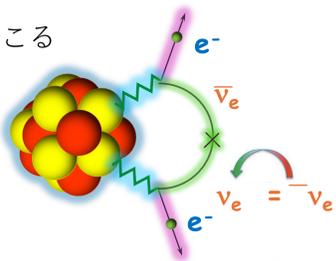
CaF₂ 蛍光熱量検出器の開発

K.Noda T. Matsumoto S.Yoshida ^AS.Umehara ^BY. Kim ^{BH}. Kim Graduate school of Science, Osaka Univ ^ARCNP, Osaka Univ ^BIBS

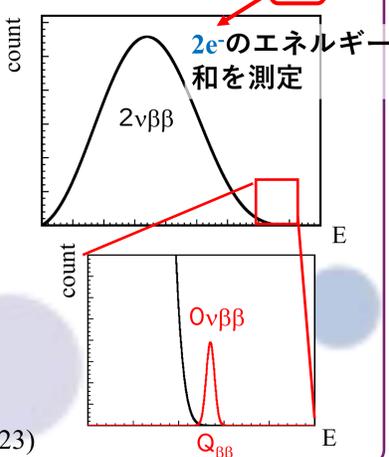
1. ニュートリノレス二重ベータ崩壊(0νββ)

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



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



- 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

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**
最新の下限値 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%
濃縮方法の検討 (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)
- ²⁰⁸Tlγ (2.6 MeV), ²¹⁴Bi (Q_β = 3.3 MeV) 環境放射線の影響を抑えられる

先行実験 CANDLES III

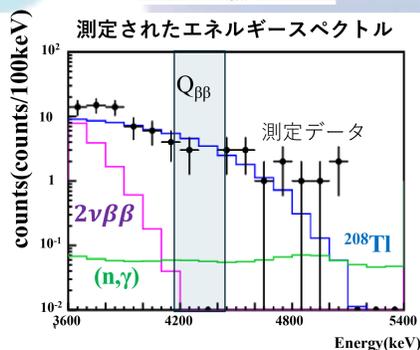
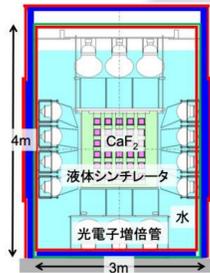
- @ Kamioka observatory
- pure CaF₂ 結晶 × 96 個 (305kg)
- PMT × 62 本 (13inch & 20inch PMTs)
- 液体シンチレータ 4π active shield
- 解析に用いた期間 131 日
- エネルギー分解能 5.64 % @ 4.27 MeV
- BG レベル < 10⁻³ counts/keV/year/(kg of natCa)
- 測定された半減期 $T_{1/2} > 5.8 \times 10^{22}$ 年 (90% C.L.) [2]

[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

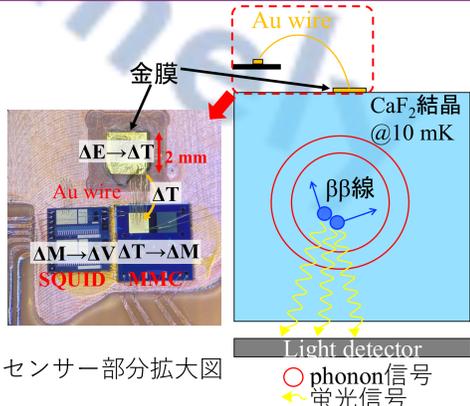
検出器の概要



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 センサー部分拡大図 センサーで読み出す

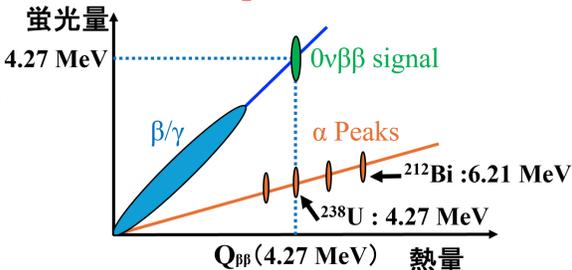


高エネルギー分解能

Phonon → エネルギーキャリアの数 → 多
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
- ²³⁸U, ²⁰⁸Tl (²¹²Bi の α タグ付け) をカット可能!
- 低BG環境の実現



MMC, SQUID センサーを使った 0νββ 探索

AMoRE 実験: エネルギー分解能 0.40 % FWHM を実証

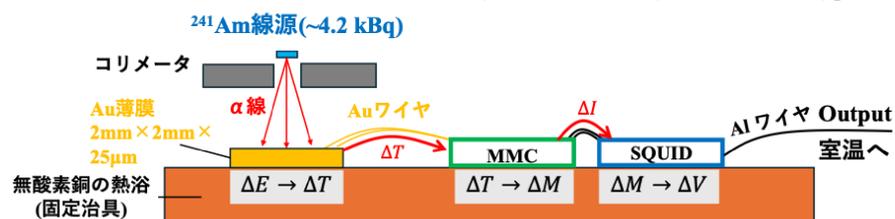
AMoRE 実験を主導する韓国 IBS と協力

昨年度、IBS でセンサーの動作テストを実施

4. IBS で行った物理信号測定

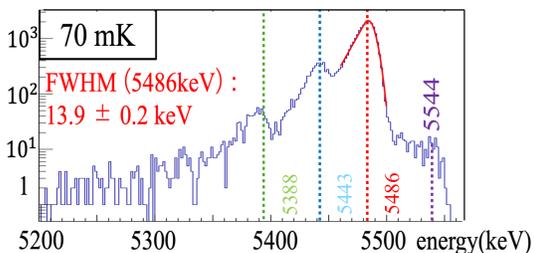
IBS でのテスト

IBS で作成したセンサーのセットアップ (MMC+SQUID) の性能評価 (@ 70 mK)



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



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 コリメータ径 0.5 mm	強度 30 Bq コリメータ径 3 mm

信号読み出し部の配線、センサー制御、etc.

測定環境の検証 → センサーのテスト環境を整える

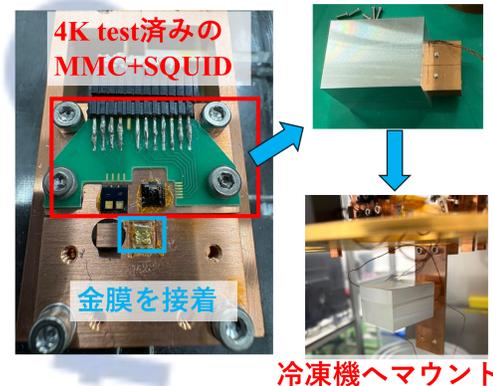
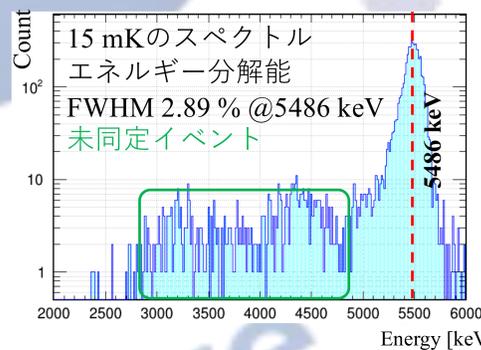
5. 大阪で行った物理信号測定

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 × 40000 point = 0.080 s
- ²⁴¹Am 線源 (30 Bq): 0.5 Hz に調整

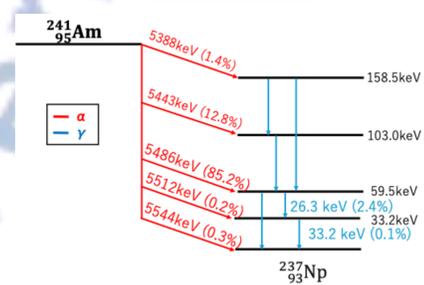
温度 (mK)	イベント数	rate (Hz)
15	5048	0.478
30	5120	0.488
50	7733	0.473

得られたエネルギースペクトル



冷凍機へマウント

²⁴¹Am 崩壊図



原点と 5486 keV でエネルギー較正

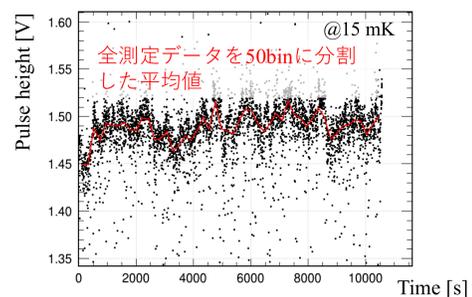
大阪大学での極低温環境下で、初めて物理信号を確認!

エネルギー分解能

ゲインの時間変動の寄与 → 20%
主要因については現在調査中

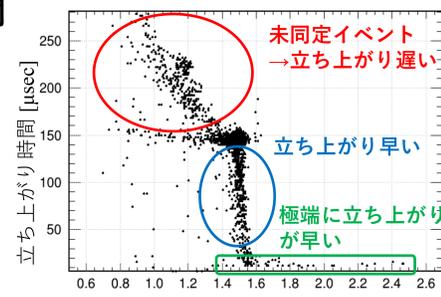
対策

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

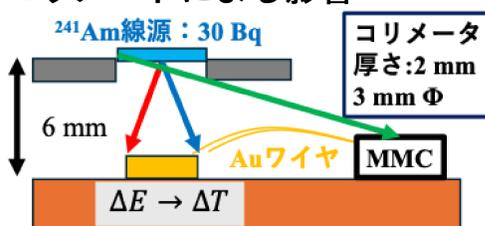


立ち上がり時間とパルス波高の相関

IBS での実験では見られなかった成分
未同定ピークは立ち上がりが遅い成分

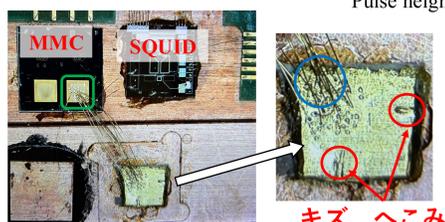


コリメートによる影響



今後

- よりコリメートしたセットでの測定
- 結晶を用いた測定



キズ、へこみ