

極低温技術による 宇宙素粒子研究の高感度化

計画研究D02

【代表】

吉田 齊（大阪大学）：低温検出器による $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索

【分担】

岸本康宏（東北大RCNS）：低温強磁場空洞の開発

石徹白晃治（東北大RCNS）：低温検出器による暗黒物質探索

美馬 覚（理化学研究所）：超伝導センサー、計測技術開発

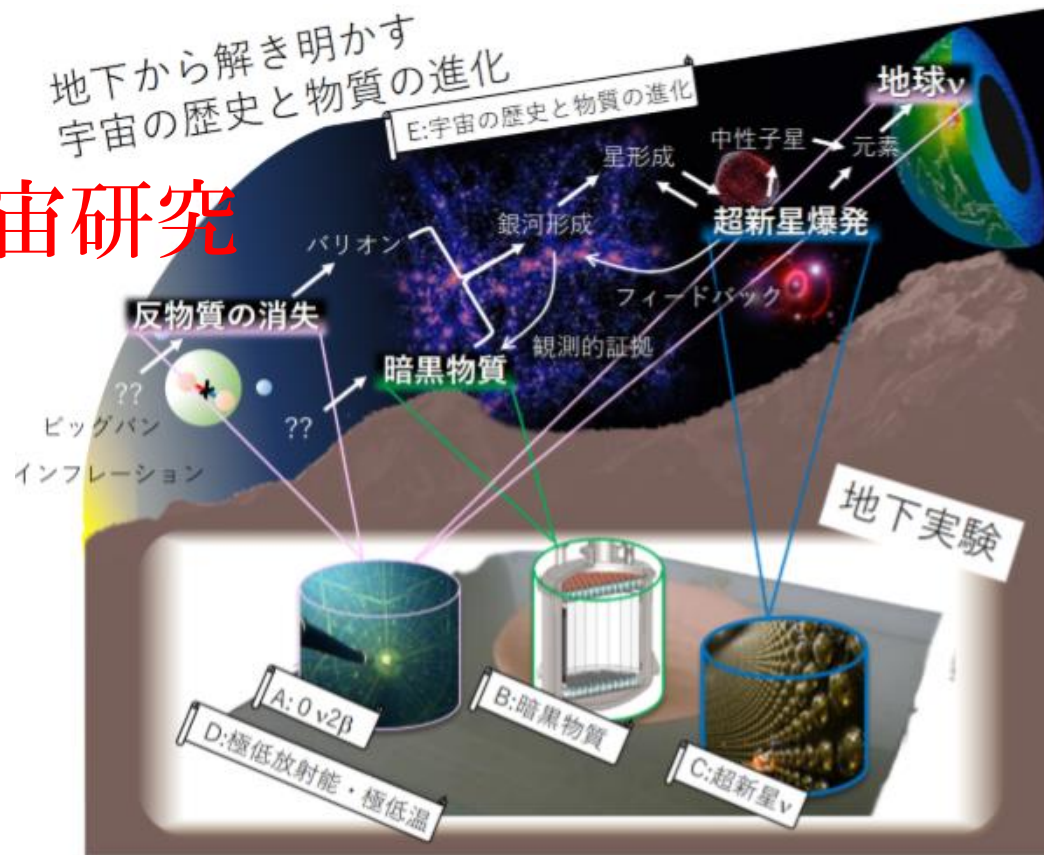
新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」

極低放射能技術研究会

2021年3月24、25日 @ オンライン

新学術領域「地下宇宙」

地下宇宙研究

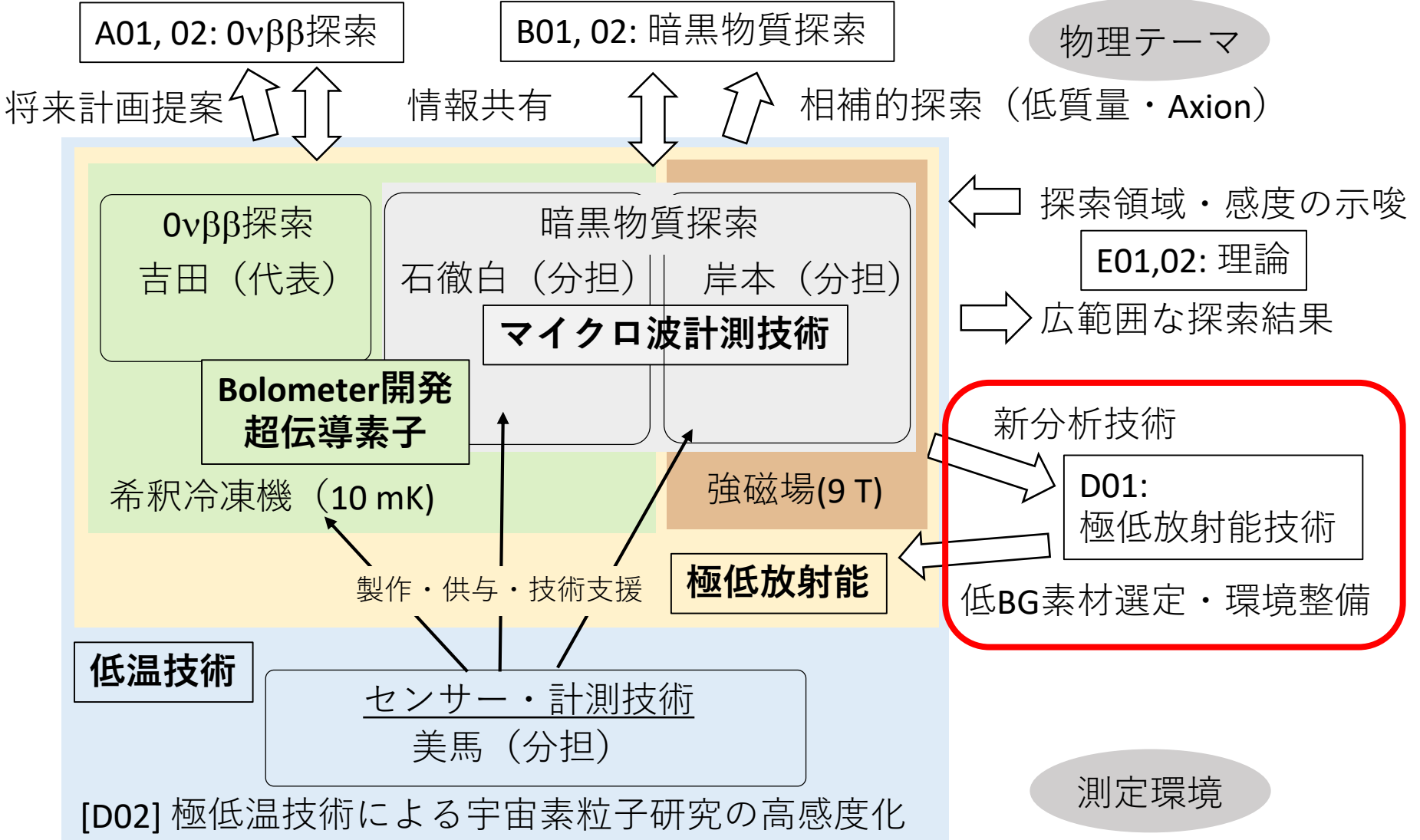


D02班: 極低温技術による宇宙素粒子研究の高感度化

- さらなる高感度化 → 極低温技術を取り入れる **連携**
- 低温・超伝導センサー、強磁場空洞 → 物理課題への応用・展開 **波及**

領域内+領域外

新学術領域内での連携



【公募】エアブリッジインダクタンスによる超伝導力学インダクタンス検出器の高感度化
埼玉大学 成瀬さん

計画研究D02の目的・手法

● 研究目的

- 極低温下での温度上昇を利用するScintillating-Bolometerを開発し、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の $Q_{\beta\beta}$ 値(2~4MeV)領域でエネルギー分解能20 keV以下を実現する。
- 低質量WIMPsの探索を目的として、エネルギーしきい値10 eV以下の超伝導検出器を実現する。
- アクシオン探索への利用を目的に、超伝導強磁場共振空洞の開発を行い、通常よりも2桁以上高い共振空洞の増幅度(Q_c 値)を実現する。

5年、10年先の飛躍的發展を実現できる技術開発

● 共通のインフラ整備・計画班での連携

- 共通の極低温検出器開発用のインフラを整備し、そこを中心に連携して研究を推進する。有望な検出器技術の大型化前のR&Dを行う
- 地下実験室のクリーンルーム内に、極低BG素材を利用した希釈冷凍機を整備する。低BG測定まで実施する。
- 共通する超伝導センサー、マイクロ波計測などの技術を共同開発する

領域内での開発+領域外との連携・協力

領域内外への波及

低温技術研究会を開催

低温技術研究会

- 計画研究D02主催の研究会
 - 低温技術に関する研究会の開催

2019年度に第1回を開催 →

- 2020年度はコロナで開催の目途が立たず → Spot的にセミナーを開催

チュートリアル講演の企画1

半導体微細構造を用いた量子デバイス

講師: 大塚朋廣氏(東北大電気通信研究所)

日時: 2020年12月23日

チュートリアル講演の企画2

超伝導量子ビットに関する話題

講師: 中村泰信氏(東大先端研/理研)

日時: 2021年06月18日 10:00~

(オンライン配信をします)

日時: 2020年1月10日(金)、11日(土)

場所: 理化学研究所(和光)

トピックス: 低温検出器に関する技術

超伝導センサー、読み出し技術、冷凍機、強磁場など

- 研究会の目的 **30数名の参加者・今年度以降も継続したい**
 - 参加者の相互理解
チュートリアル講演を企画(若手研究者および領域内研究者向け)
 - **新たな連携+情報交換**
低温技術を利用した領域内外の研究に関する講演
- チュートリアル講演
 - 超伝導センサー(1月10日)
 - 超伝導検出器KID 埼玉大学 成瀬 雅人先生
 - 超伝導検出器TES 東京大学 大野 雅史先生
 - 強磁場(1月11日)
 - 強磁場生成の過去・現在・未来 東北大学 淡路 智先生
 - 強磁場下での実験 東京大学 難波 俊雄先生

将来展望(野望):

Q-bitの放射線・宇宙線の影響調査
地下での測定

発展的に勉強会を開催中 → 量子デバイス研究会

月1ペースで10~15人くらい

興味があればお声かけください

振動ノイズ, 読み出し, とか。。。。

2020/09/28 吉田 超伝導センサーを使った極低温放射線検出器

2020/10/30 大塚朋廣 半導体量子ドット

2020/12/03 美馬 覚 MKID動作原理・製法など

2021/01/14 岸本康宏 Axion, ALPの空洞を使った探索

2021/02/18 大塚朋廣 量子ホール効果とポイントコンタクト

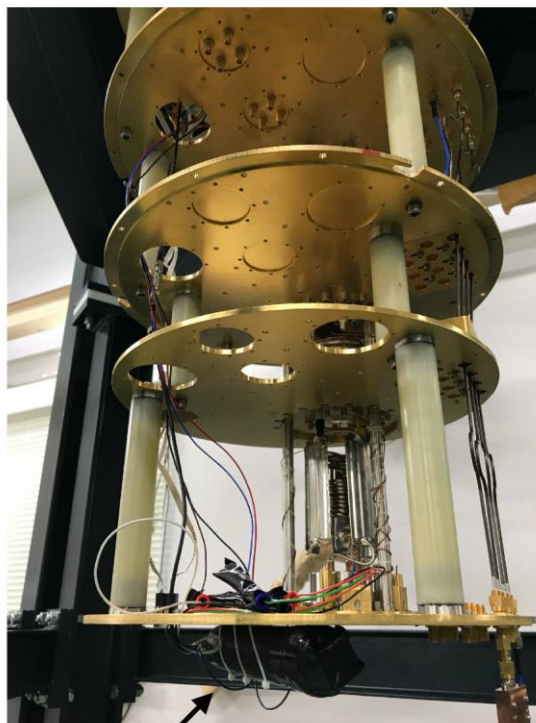
2021/03/17 中山和則(東大) (軽い)暗黒物質探索と固体物理

共通インフラの整備 希釈冷凍機の低BG化

希釈冷凍機の低放射能化

- 2021年度

- シールド導入予定：MC直下および黒体放射用シールドの低放射能化

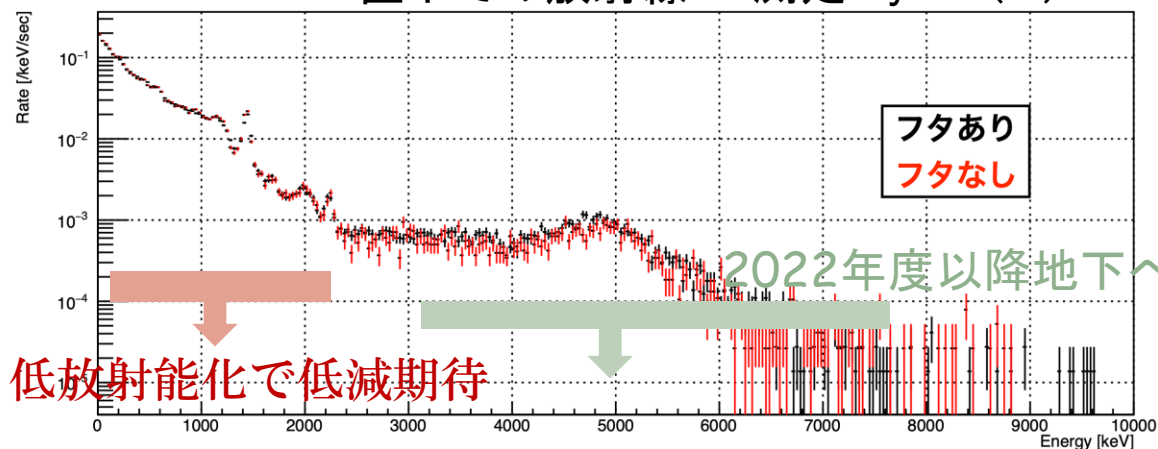


PMT + CsI

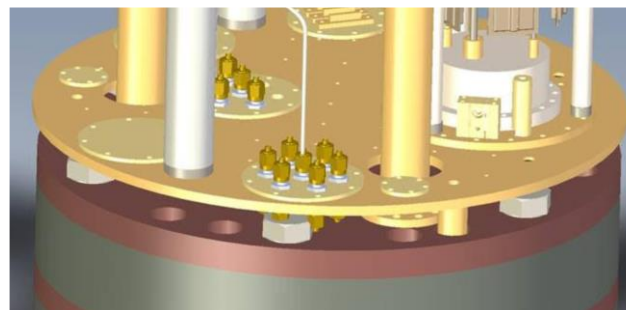
黒体放射用シールド → 低BG素材へ

導入効果検証の準備

MC直下での放射線BG測定 by CsI(Tl)



MC直下にシールド導入



希釈冷凍機の低放射能化

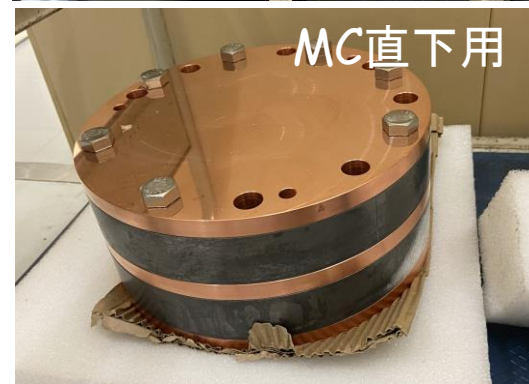
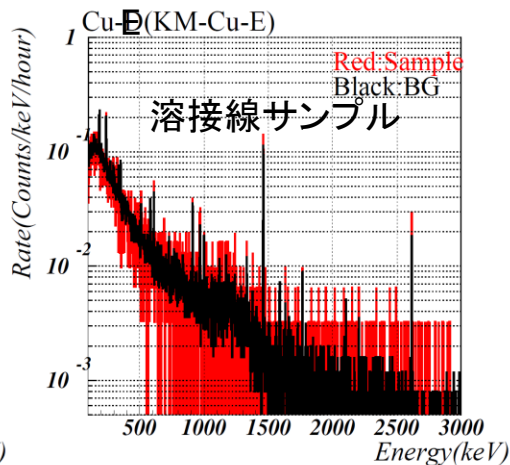
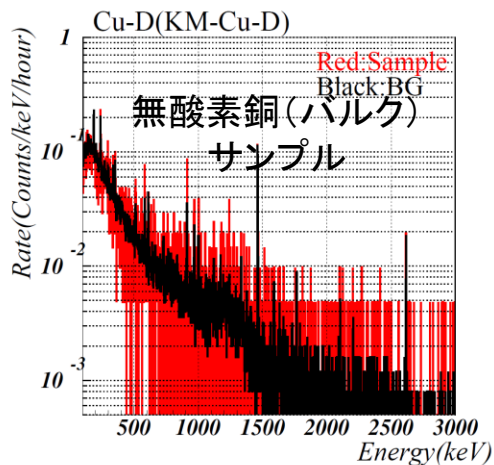
- MC直下および黒体放射用シールドが納品(3月)
 - Install予定 → 放射線BG環境の測定
 - 低放射能環境のためには、周囲の遮蔽体設置が必要
 - 地下実験室への移設：KamLANDエリアのクリーンルームに移設（予定）



- 素材サンプルのGe測定（@実験室D）

RCNP国際共同利用課題：

希釈冷凍機用極低バックグラウンド遮蔽材サンプルの微量放射能分析



溶接線サンプル

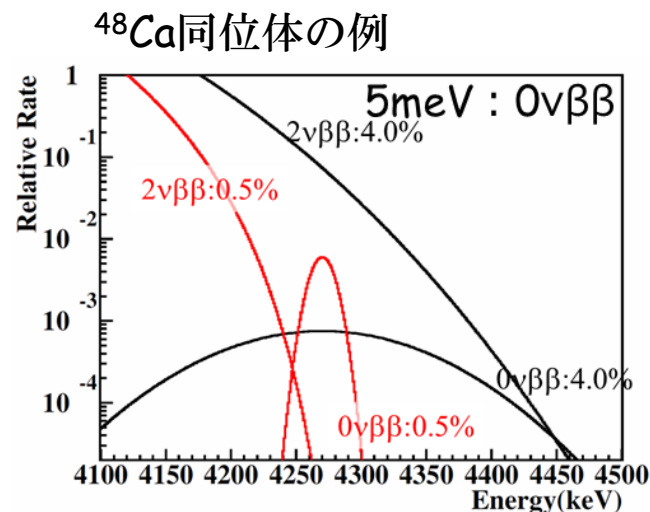
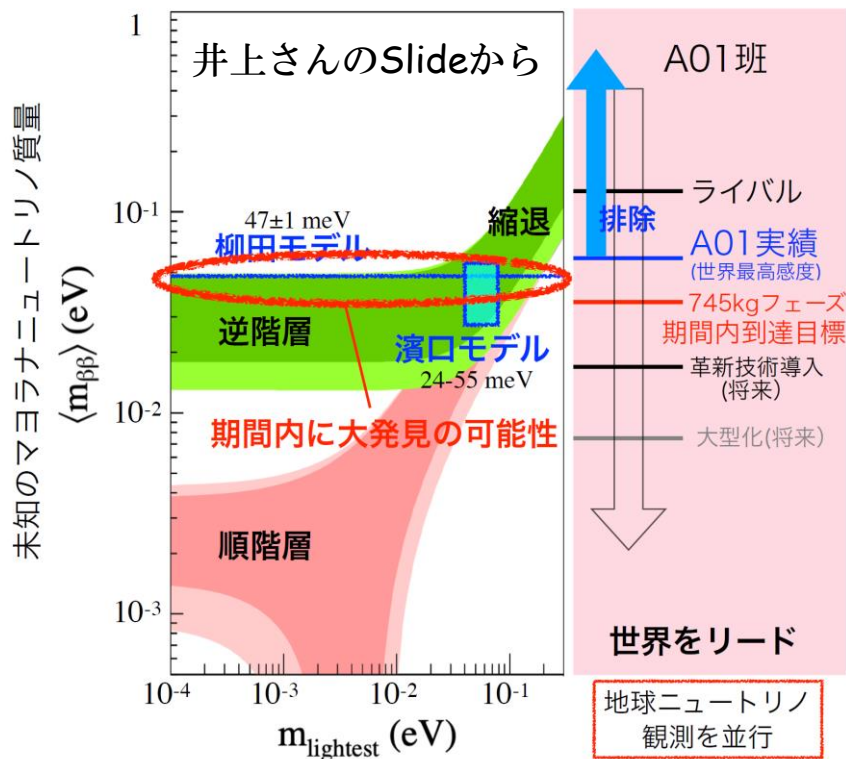


Material	Contamination [mBq/kg]							
	^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	Th(^{228}Ac)	Th(^{228}Th 以下)	^{40}K	^{137}Cs	^{60}Co
KM-Cu-D(/kg)	131 ± 86	< 4.7	—	< 8.6 (10.3 ± 6.0)	5.2 ± 3.2	< 38	< 2.0	< 1.7
KM-Cu-E(/サンプル)	< 83	< 2.4 (10 ± 8)	—	< 4.2 (3.8 ± 3.6)	< 3.5 (11 ± 8)	< 24	< 0.8	< 0.9

CaF₂ Scintillating Bolometer開発

$0\nu\beta\beta$ 探索実験(A班)の高感度化

● A班: マヨラナ性の検証



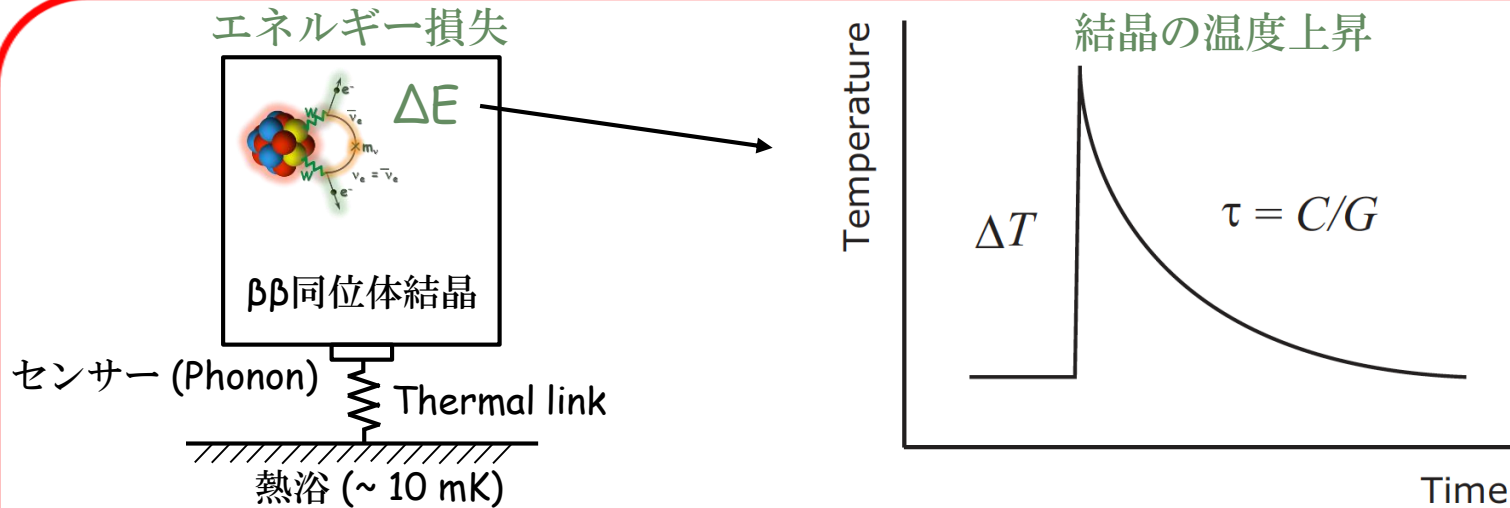
● Inverted階層 → Normal階層領域の探索

- マルチトン規模の検出器の実現
- エネルギー分解能の飛躍的改善 ($2\nu\beta\beta$ 事象 + ^8B 太陽- ν によるBGの低減)

● 現在のEnergy測定原理(シンチレータ)では分解能の大幅な改善は不可能

→ ボロメータ開発への挑戦

Bolometer (熱量計) による高分解能化



● Bolometer (熱量放射線検出器) の原理

- Target(ββ同位体、暗黒物質散乱体) 結晶を極低温 (~ 10mK) に冷却
- 【例】 2 cmの立方体(~ 30 g)のCaF₂ のQ値(4.27MeV)での温度上昇は~ 140 [mK] @ 10mK
- センサーで温度上昇を測定 → エネルギーの測定
- 高いエネルギー分解能、大きい信号が期待できる (ノイズで制限)

● 温度を測定する センサーの選択肢

計画研究で全て実施(センサーの多様化)

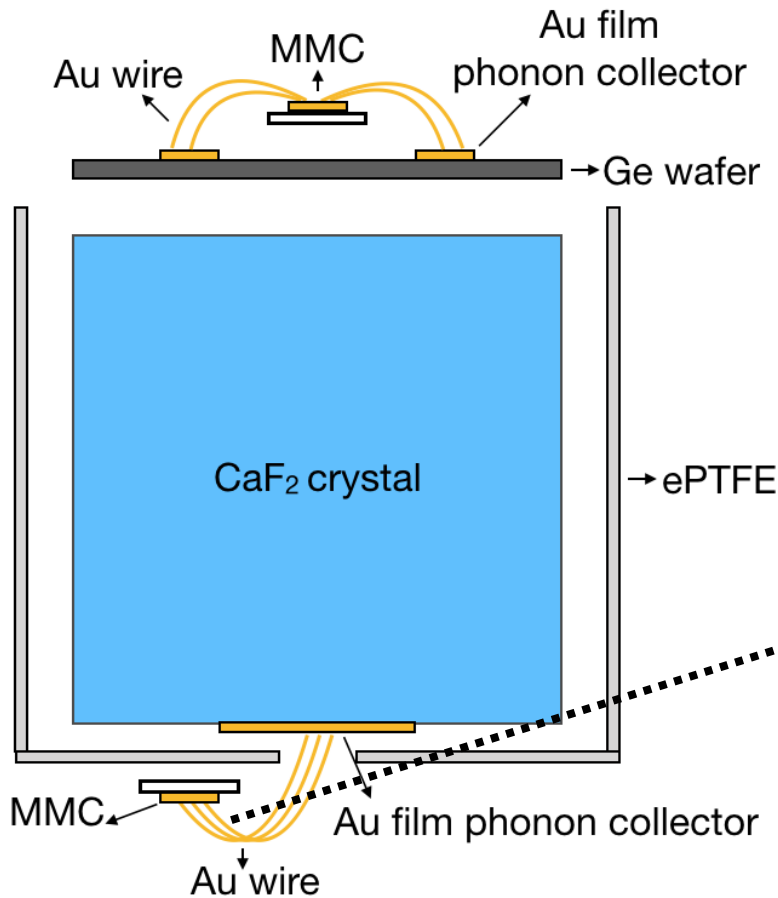
- R-変化 ● Thermistors (NTD Ge)
- TES (Transition Edge Sensor)
- 磁化変化 ● MMC (Metallic Magnetic Calorimeter)
- L-変化 ● KID (Kinetic Inductance Device)

CUORE, CUPID (some options), 大阪
Light detector, CRESST
AMoRE(共同研究中),
CALDER, 石徹白 (東北大)

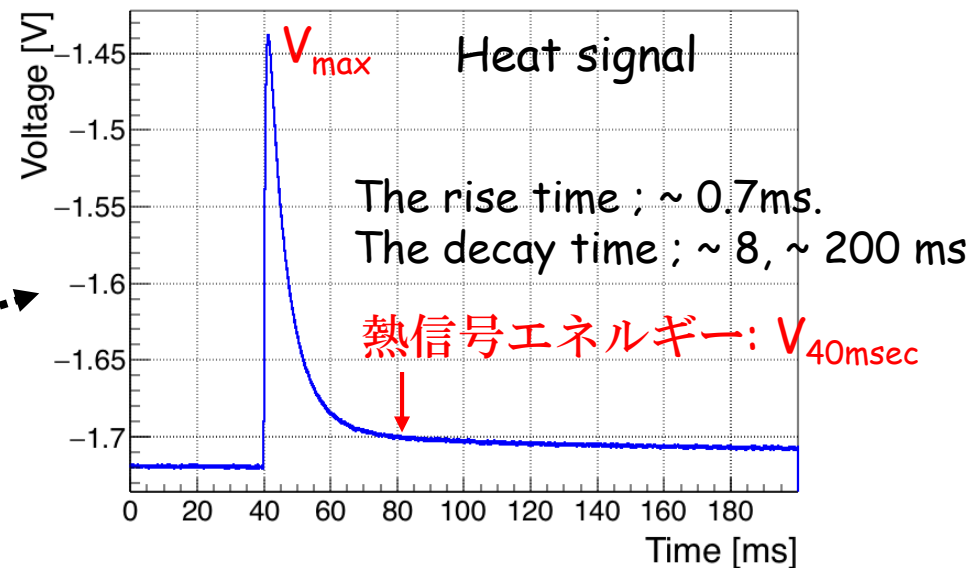
超伝導センサー

CaF₂ Scintillating-Bolometer開発

- 韓国IBSグループとの共同研究開発
 - Sub-Group of CANDLES & AMoRE (Yong-Hamb Kim et. al.)
- 世界初のCaF₂(pure) Scintillating-Bolometerの実現
 - Sensor : MMC (Metallic Magnetic Calorimeter)



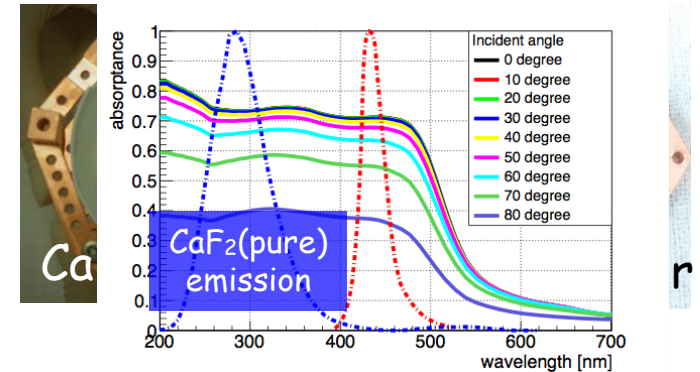
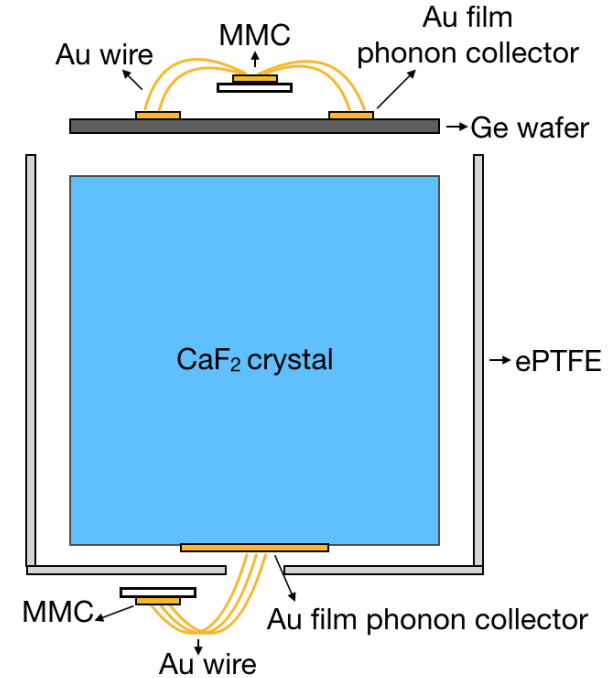
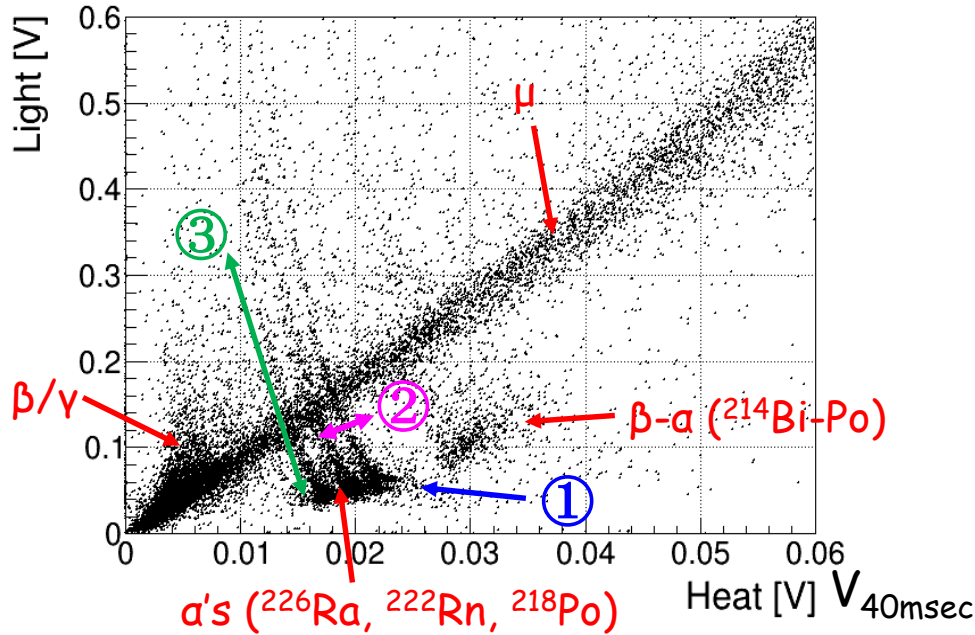
- Crystal: CaF₂(pure)
 - Volume: 312g (5cmφ×5cm)
 - Emission peak : 280nm
 - Light output: 25,000 photons/MeV



CaF₂(pure) Scintillating Bolometer

- First Challenge using CaF₂(pure) and MMC

U系列(²²⁶Ra)の不純物が多い結晶を使用



● 問題点

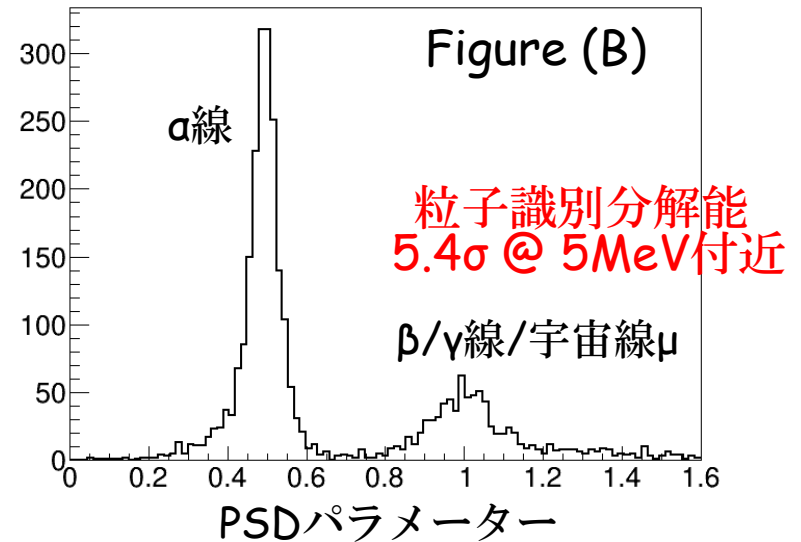
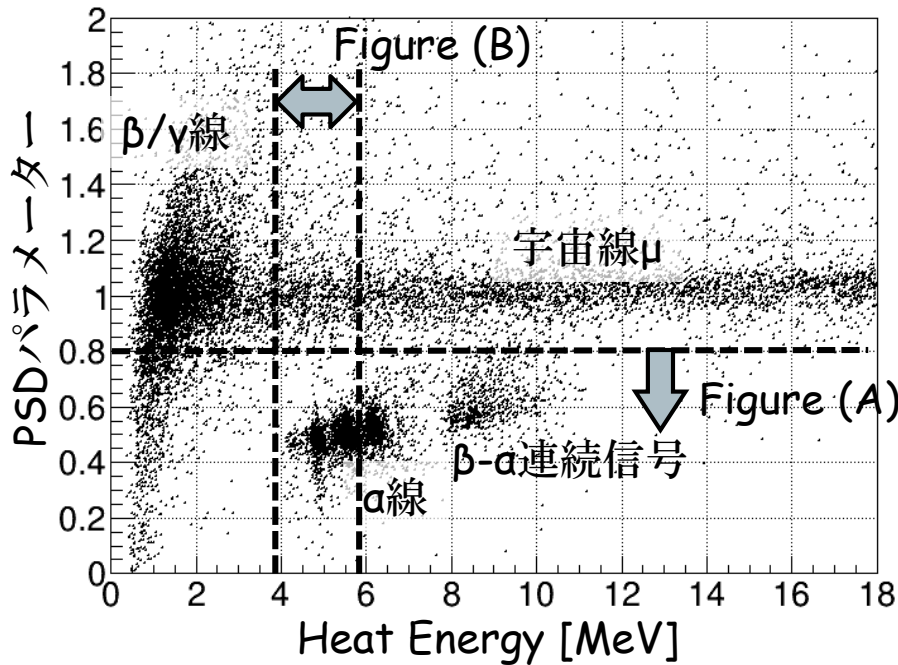
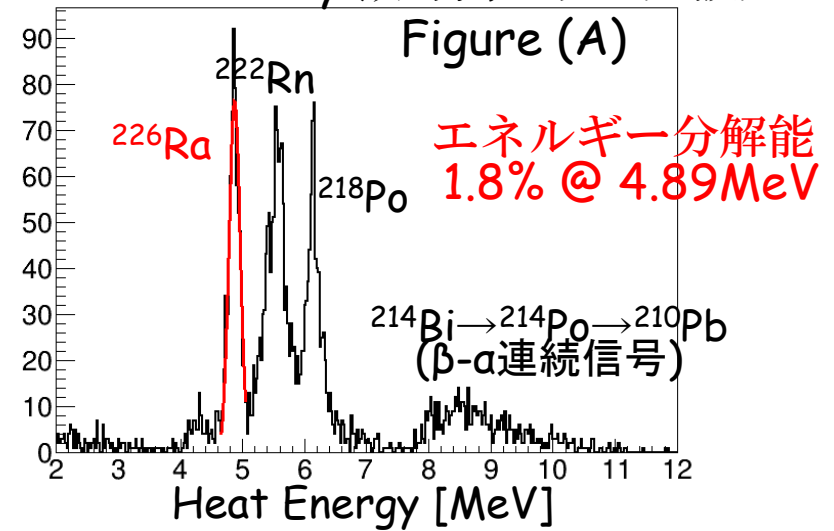
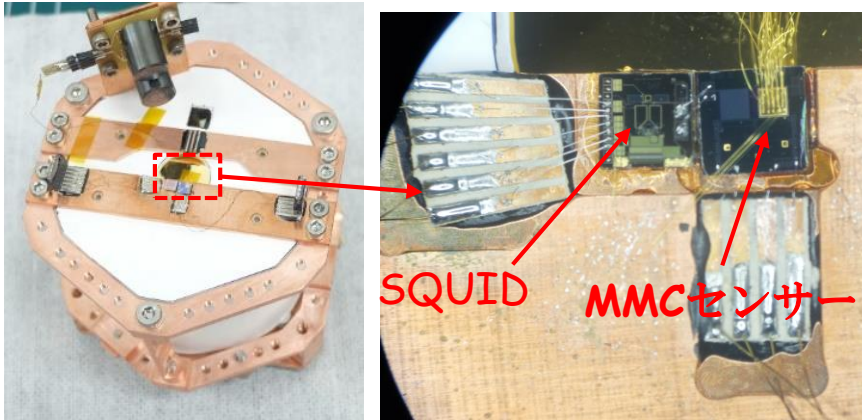
- ① CaF₂(pure)の発光：UV

Au蒸着膜(Phononコレクター)に光が吸収される ← 補正可能

- ② エネルギー分解能がそれほど良くない
- ③ Light信号が広く分布(～10倍以上に広がる)

CaF₂ Scintillating-Bolometer開発

By 鉄野高之助 (大阪大)



● 問題点②

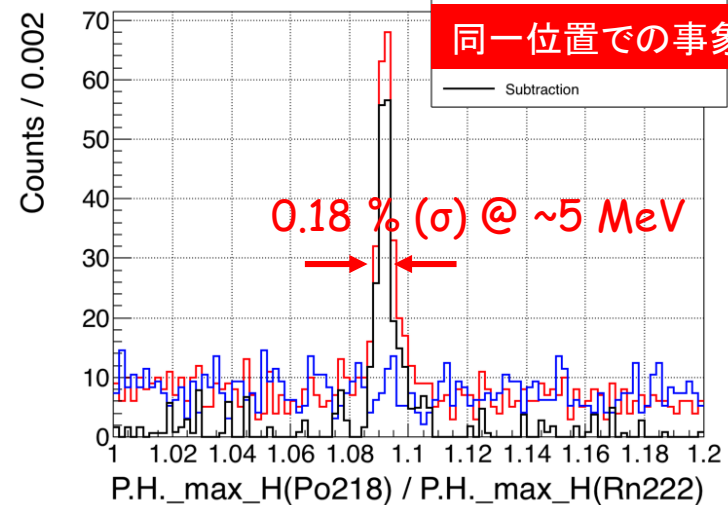
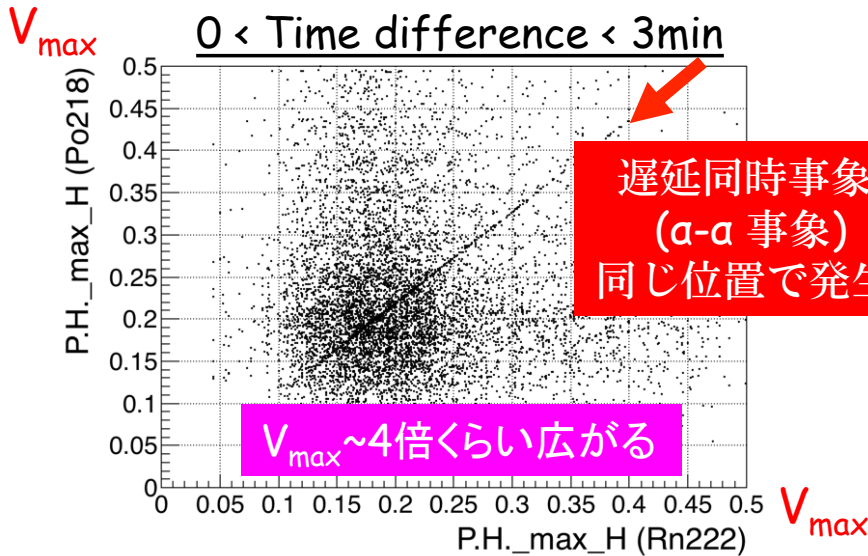
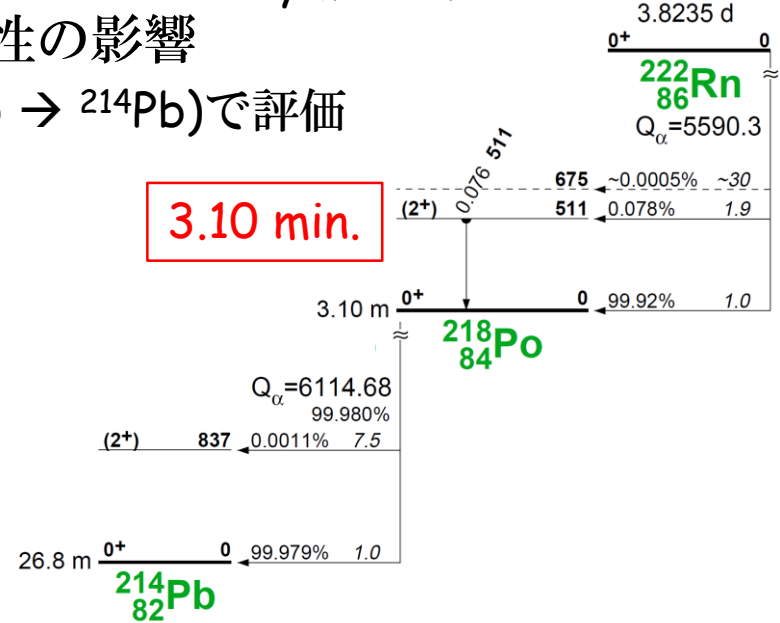
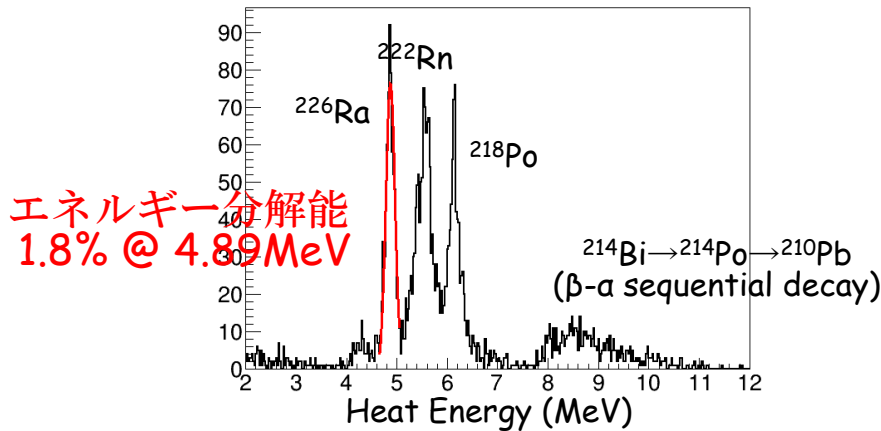
- エネルギー分解能 (熱量信号の位置依存性が大きい) → 構造改良

CaF₂ Scintillating-Bolometer開発

By 鉄野高之助 (大阪大)

● 問題点② エネルギー分解能の位置依存性の影響

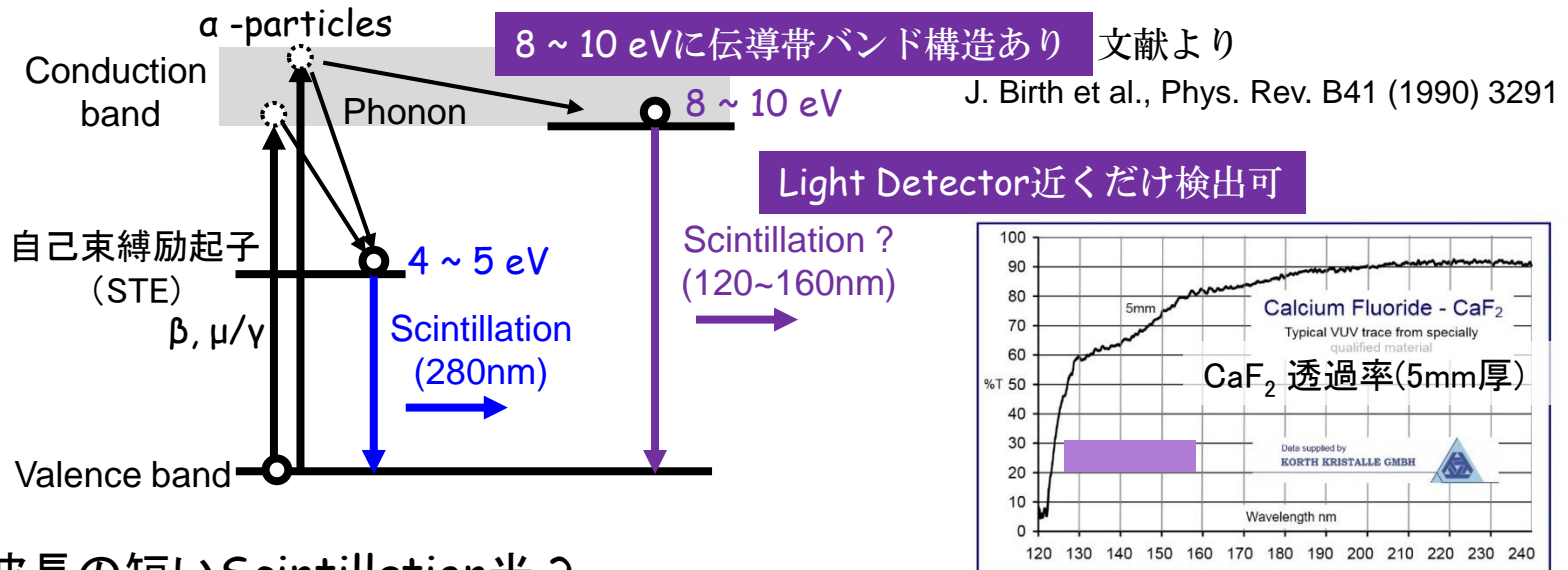
- 結晶内部の遅延同時事象 ($^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Pb}$)で評価



位置依存性が除去できれば、エネルギー分解能が劇的に改善可能

CaF₂ Scintillating-Bolometer開発

- **問題③**：α線事象のLight信号が広く分布
 - 現状での理解（推測）：極端に減衰が大きい蛍光成分がある。



● 波長の短いScintillation光？

- 結晶中での減衰(200nm以下くらいから透過率低下)
- 反射材(未焼成PTFE)での吸収(280 nmでは、これまでOKだった)

TPBで波長変換

ANKOK実験から提供

ありがとうございます！！

今のところ実験データをよく理解できる(矛盾がない) → 実験的に検証してみた (B4 山本詩織)

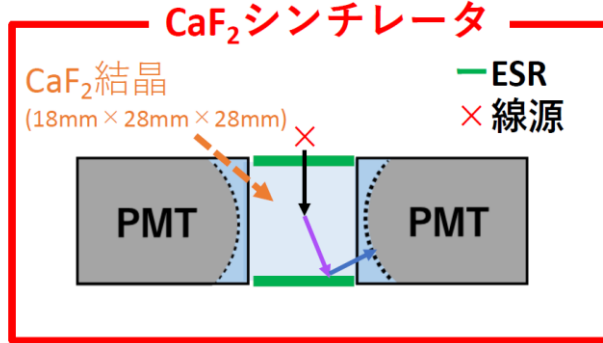
● TPB (1,1,4,4-テトラフェニル-1,3-ブタジエン)

- 液体Arシンチレータ(発光波長:130nm)の波長変換に使用
 - 200nm以下を波長変換することによる光量変化を測定

CaF₂のVUV発光

TPBを蒸着したESR

● CaF₂結晶+PMT (シンプルSetup)



感度波長の異なるPMTで調査 →

検出光量と比較

- ESR w/o TPB
- ESR w/ TPB

➤ 各PMTの $\frac{\text{Peak channel (with TPB)}}{\text{Peak channel (w/o TPB)}}$

PMT1	1.342 ± 0.004
PMT2	1.411 ± 0.002
PMT3	1.585 ± 0.008

最も感度波長が広い

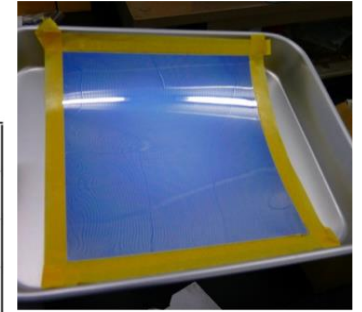
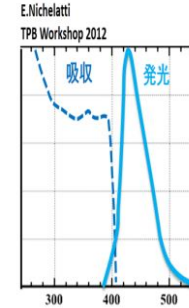
PMT1で増光 → VUVが存在

最も感度波長が狭い

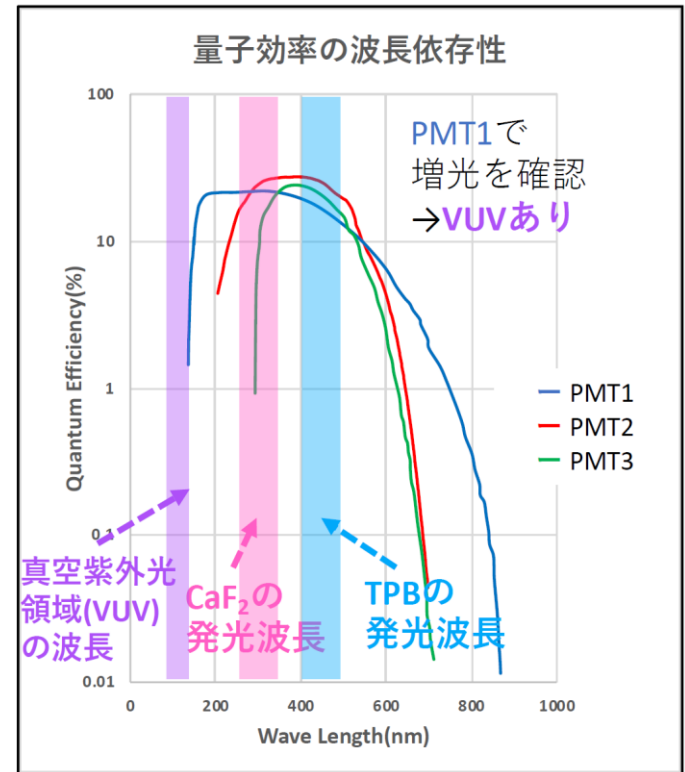
PeakをFitした際の統計誤差

色々な波長特性が絡むので、単純ではないがPMT1で増光 → VUV発光あり

(室温では)20%くらい? 極低温では熱信号が減る → 定量的評価は今後の課題

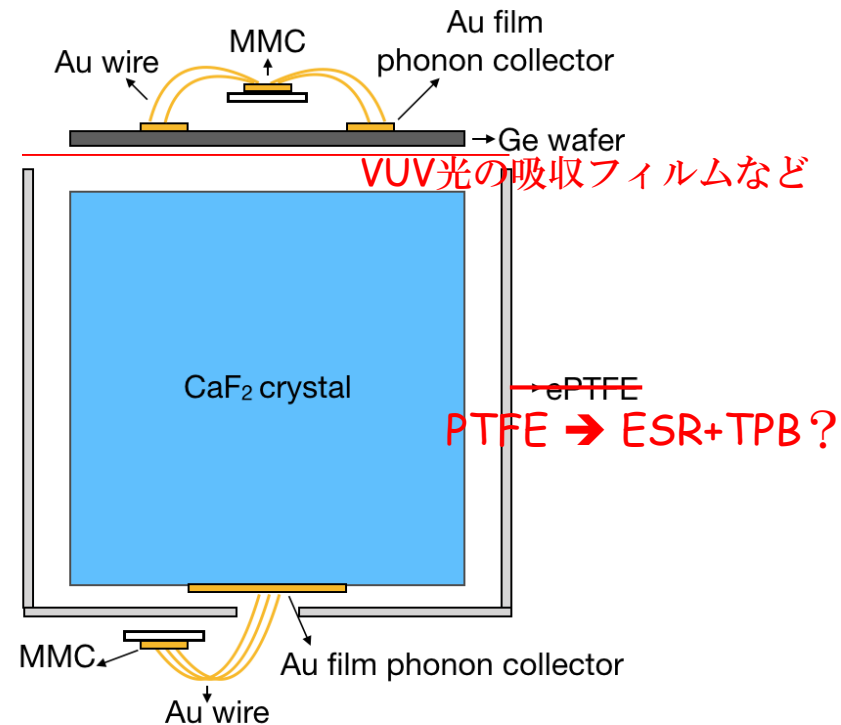
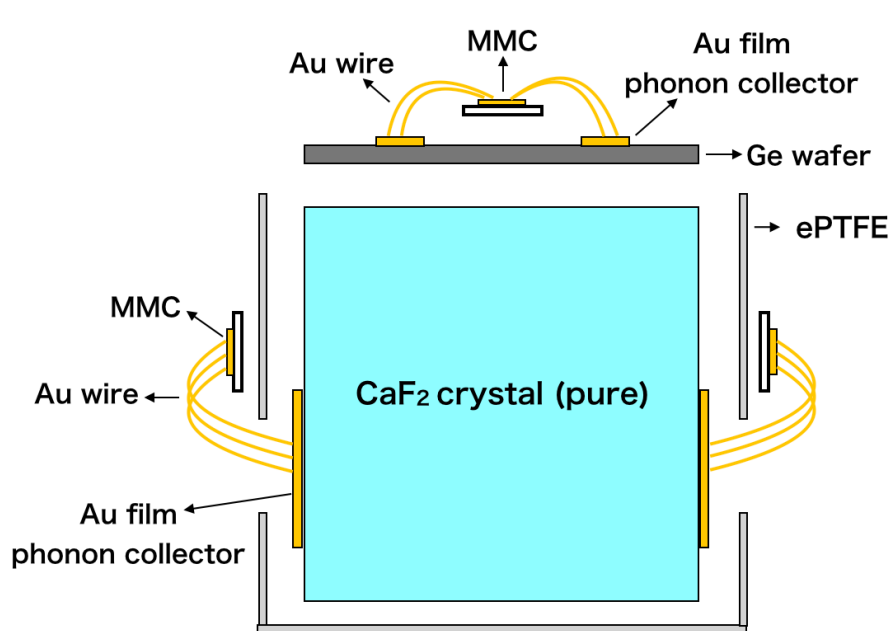


鷲見さん博士論文から



今後のCaF₂+MMC検出器の開発

- CaF₂(pure) scintillating bolometerのエネルギー分解能改善
 - 場所依存性を取り除くことができれば、エネルギー分解能を改善可能
 - 多地点読み出し（左図：2点読み出し）
→ 多地点MMC読み出し：立ち上がりが早いのでMulti-Site事象同定可？
- 粒子同定 CaF₂(pure) 結晶
 - 短波長の蛍光対策



まとめ

- D02班：極低温技術による宇宙素粒子研究の高感度化
 - 低温技術を利用し、領域内研究の高度化
 - 共通インフラの整備
- 希釈冷凍機の低BG化
 - 素材の放射能測定：有意な不純物は見えず
 - MC直下用の遮蔽体が納品 → Install予定
 - 地下移設を目指す → 新しい展開も模索
- $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の高感度化
 - 極低温下でのBolometric手法 → 目標：エネルギー分解能 20 keV @Q値
 - CaF_2 (Pure) Scintillating-Bolometer開発
 - CaF_2 結晶からは、VUV発光がある。（← 早稲田大学の協力）
 - 低温では、UV光に対して10倍？
 - 位置依存性を積極的に利用 ← Position再構成、多地点事象識別？