

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】

吉田斉（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

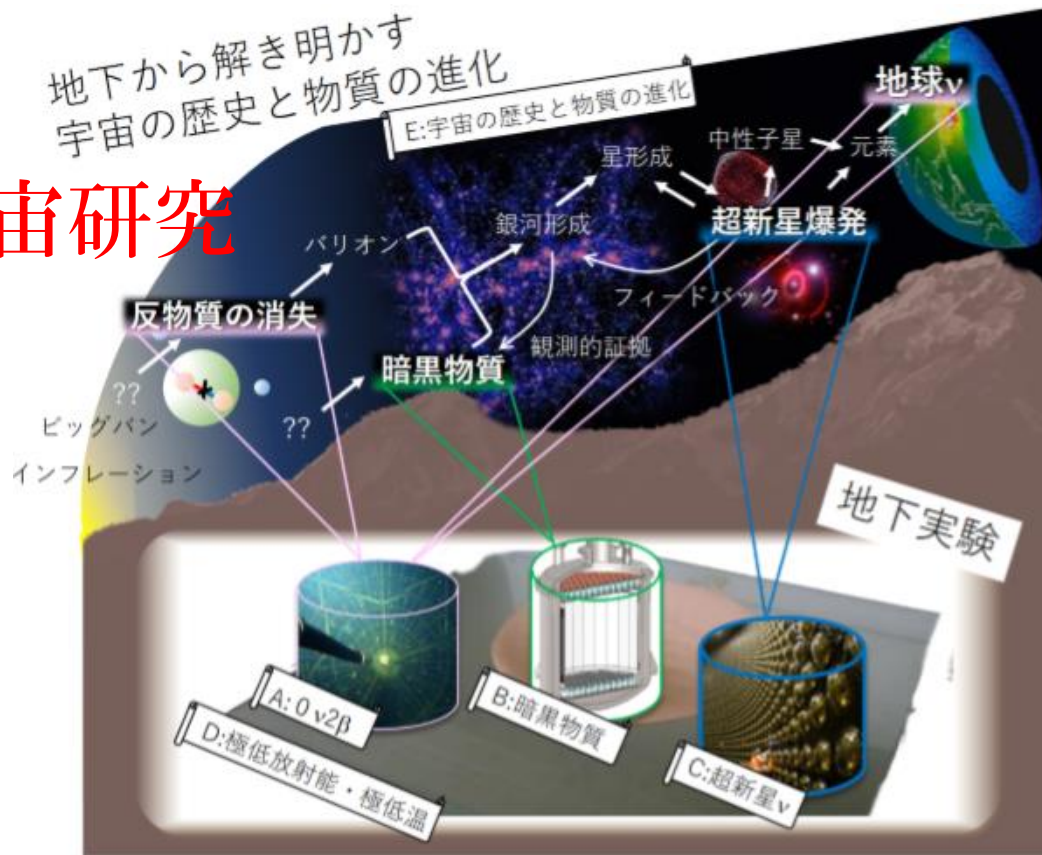
新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」

領域研究会2020

2020年6月02、03日 @ オンライン

新学術領域「地下宇宙」

地下宇宙研究

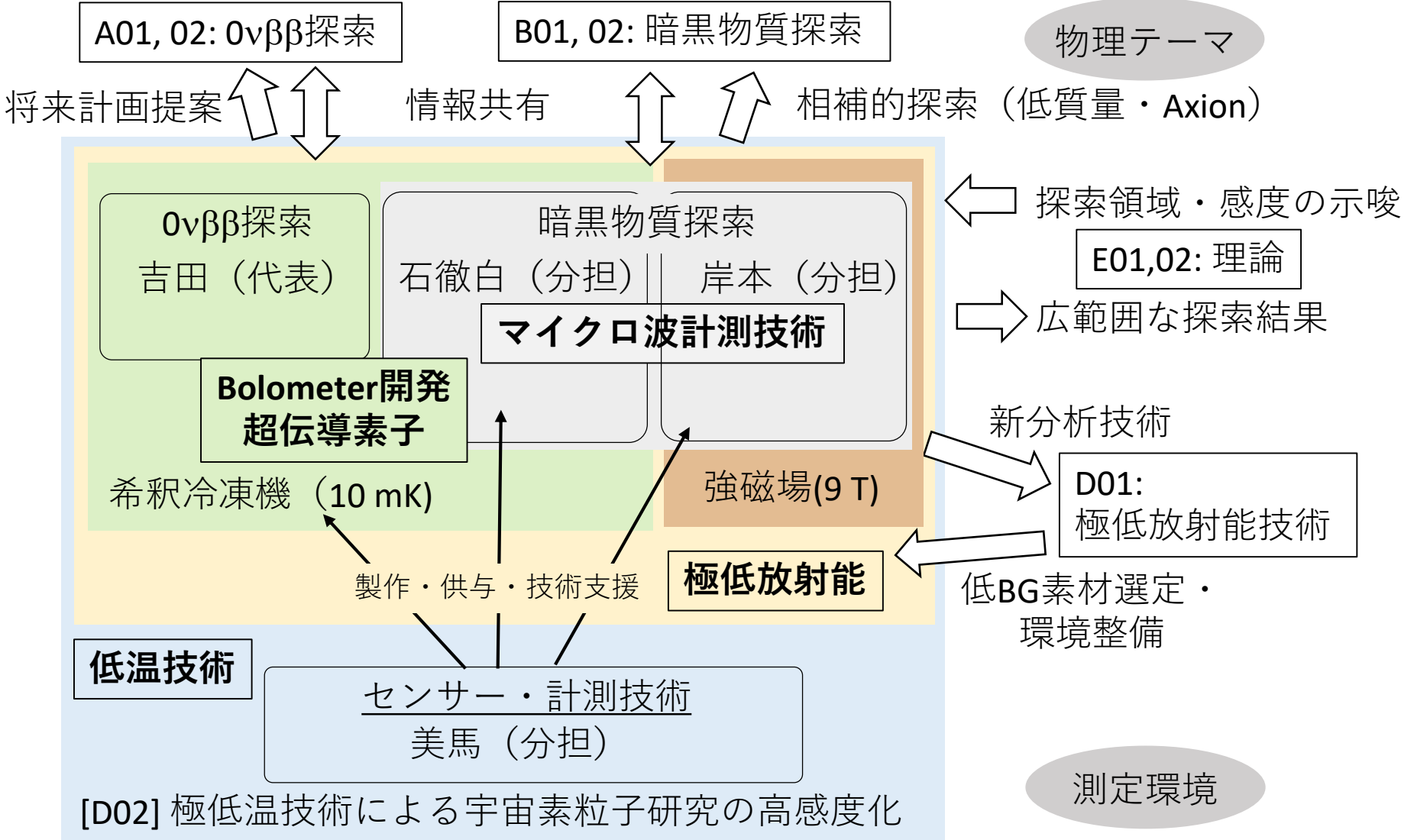


D02班: 極低温技術による宇宙素粒子研究の高感度化

- 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(2020年1月)

低温技術研究会

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）

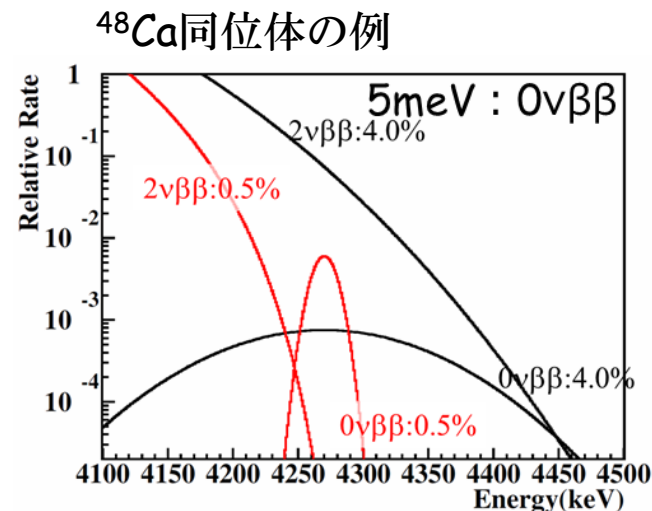
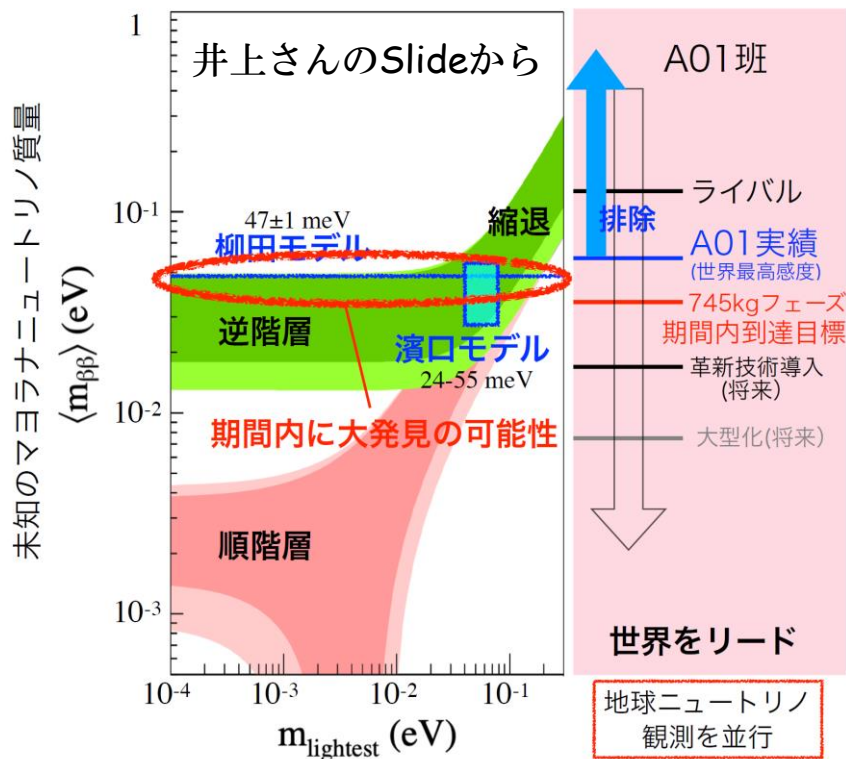
- 強磁場生成の過去・現在・未来 東北大学 淡路 智先生
- 強磁場下での実験 東京大学 難波 俊雄先生

$O\nu\beta\beta$ 探索実験の高度化 Scintillating Bolometer開発

研究代表者：吉田

$0\nu\beta\beta$ 探索実験(A班)の高感度化

● A班: マヨラナ性の検証

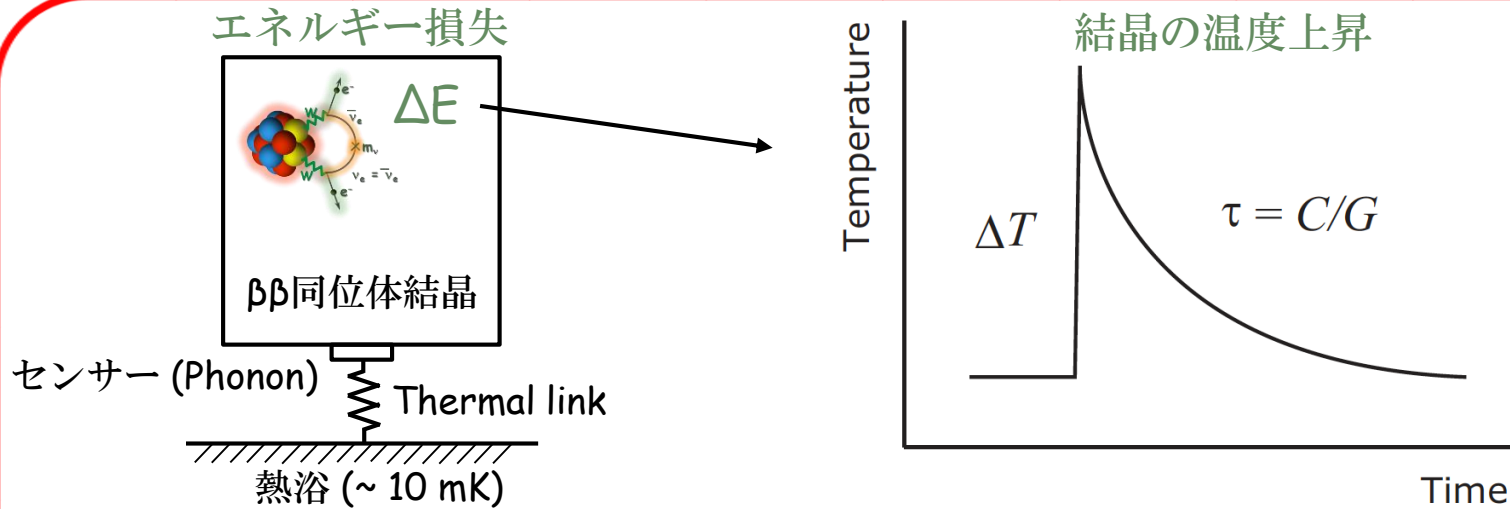


● Inverted階層 → Normal階層領域の探索

- 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

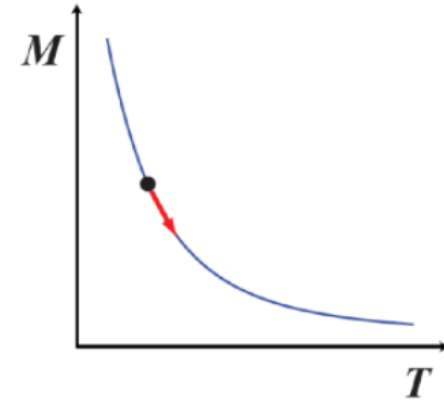
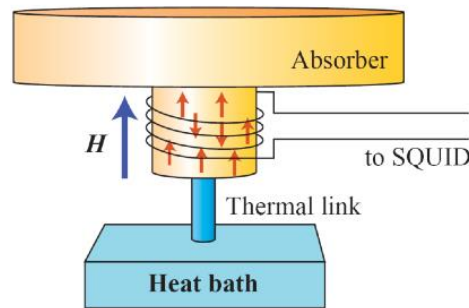
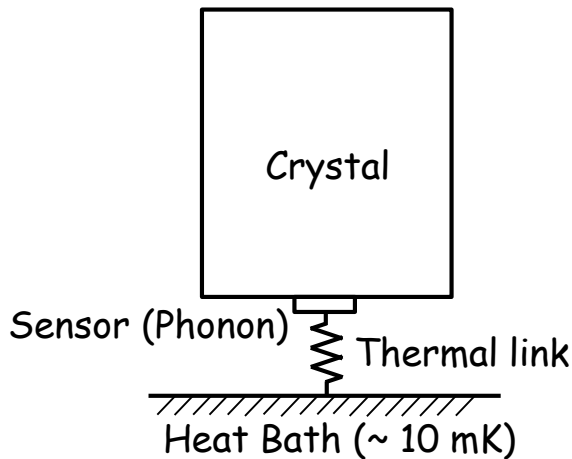
計画研究で全て実施(センサーの多様化)

- 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

MMCセンサー



温度変化 ΔT (増加) \rightarrow 磁化 ΔM (減少)
変化を打ち消すように誘導電流

MMCセンサーの特徴 (Metallic Magnetic Calorimeter)

- 常磁性合金
 - Au:Er(300-1000 ppm), Ag:Er(300-1000 ppm)
- 読み出し：SQUID
- 利点
 - 高分解能、良い線形性+広いダイナミックレンジ、吸収体の選択、No bias heating、比較的Responseが速い
- 欠点
 - ケーブル数と物質が多い (SQUID and MMC) ← 熱流入、BG源

CaF₂ Scintillating Bolometer

- CaF₂ Scintillating Bolometer R&Dの経緯（他グループ）

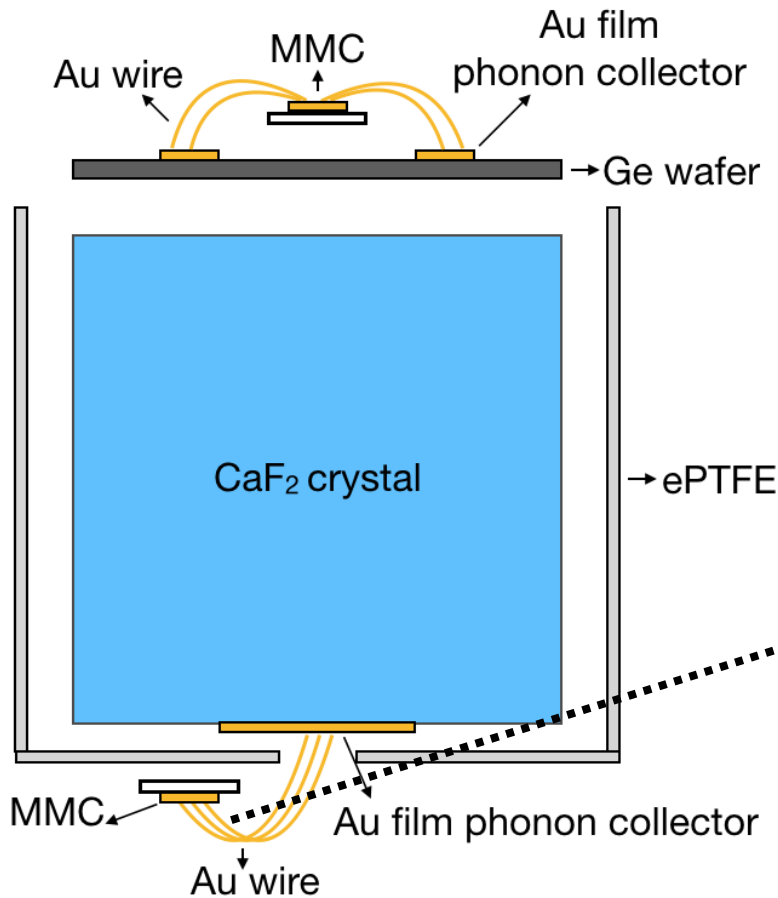
Year	1992	1997	2019
Purpose	DBD	DM	DBD
Crystal	CaF ₂ (Eu) (Eu :0.01~0.07%)	CaF ₂ (Eu) (Eu :0.30%±0.08)	CaF ₂ (pure)
Mass	2.5 g	300 mg	312 g
Senser	NTD-Ge	NTD-Ge	MMC
Light detector	Si-PD	Ge wafer	Ge wafer



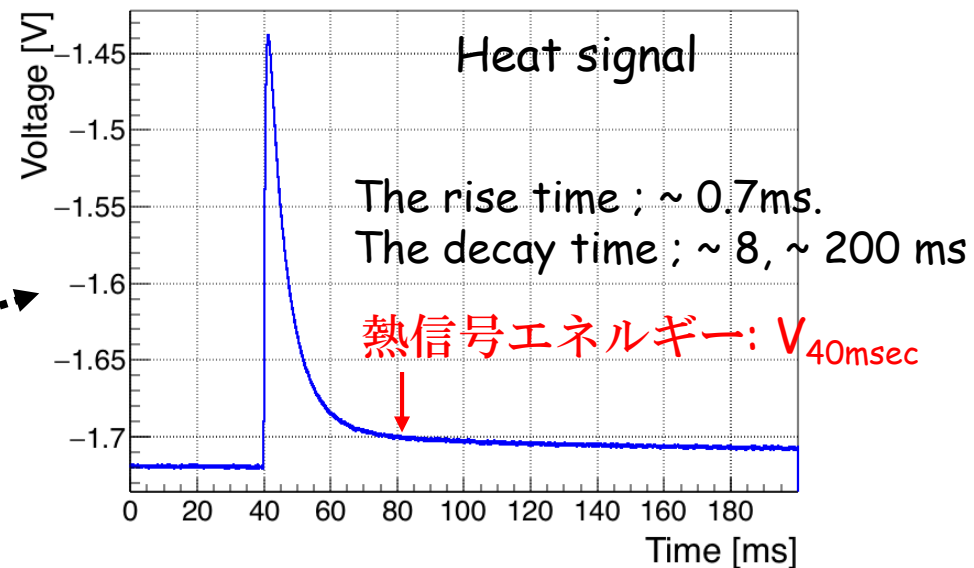
- R&Dを開始
 - CaF₂(pure) 結晶
 - 極低不純物のCaF₂(Pure)結晶がすでにある ← developed by CANDLES project
 - 低温 (数 K) では発光量が増大 ← 室温 (12,000 photons/MeV) の数倍
 - 温度センサー：MMC

CaF₂ Scintillating-Bolometer開発

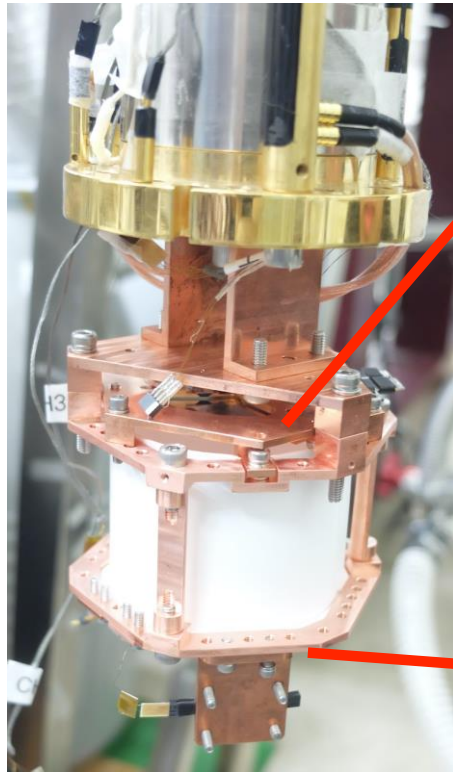
- 韓国IBSグループとの共同研究開発
 - Sub-Group of CANDLES & AMoRE (Yong-Hamb Kim et. al.)
- 世界初のCaF₂(pure) Scintillating-Bolometerの実現
 - Sensor : MMC (Metallic Magnetic Calorimeter)



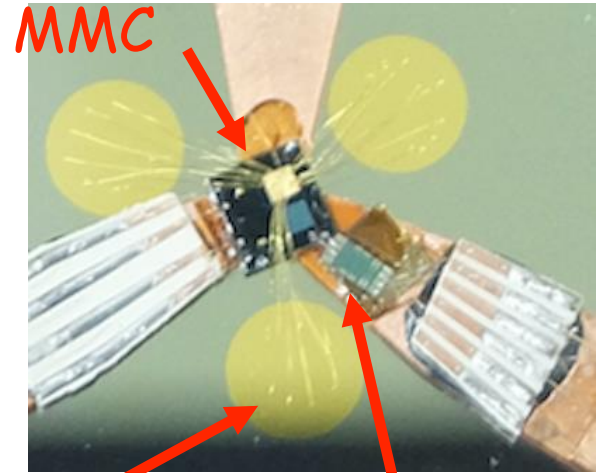
- Crystal: CaF₂(pure)
 - Volume: 312g (5cmφ×5cm)
 - Emission peak : 280nm
 - Light output: 25,000 photons/MeV



CaF₂ Scintillating Bolometer Setup



CaF₂(pure)

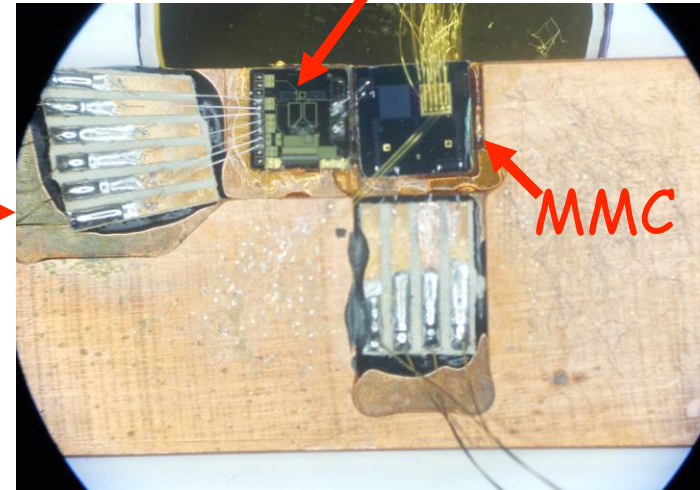
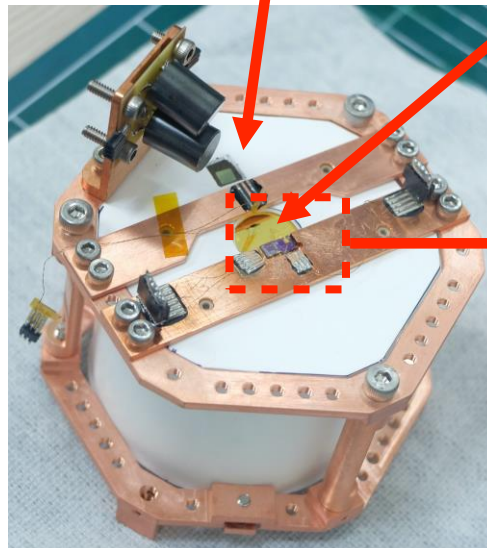


Heat detector

Heater

Au film

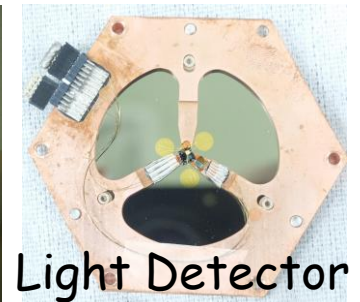
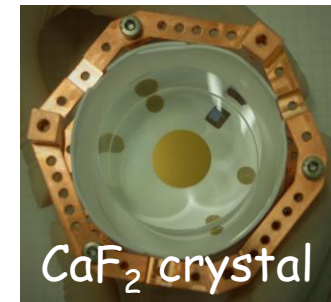
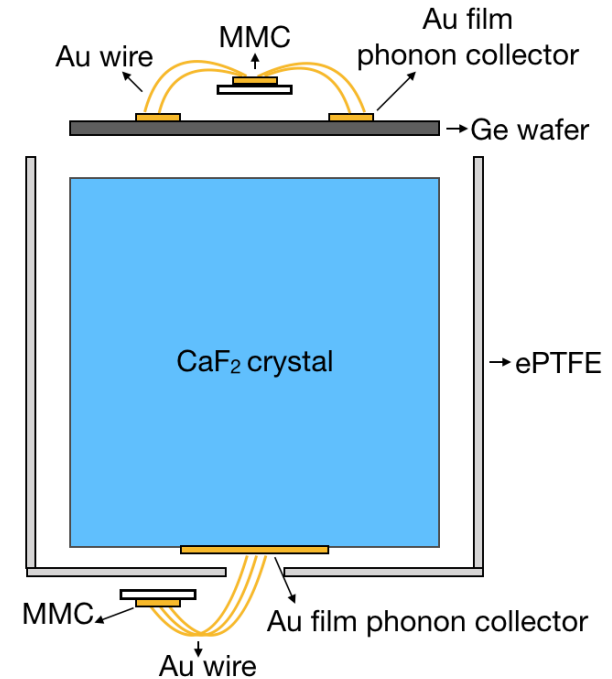
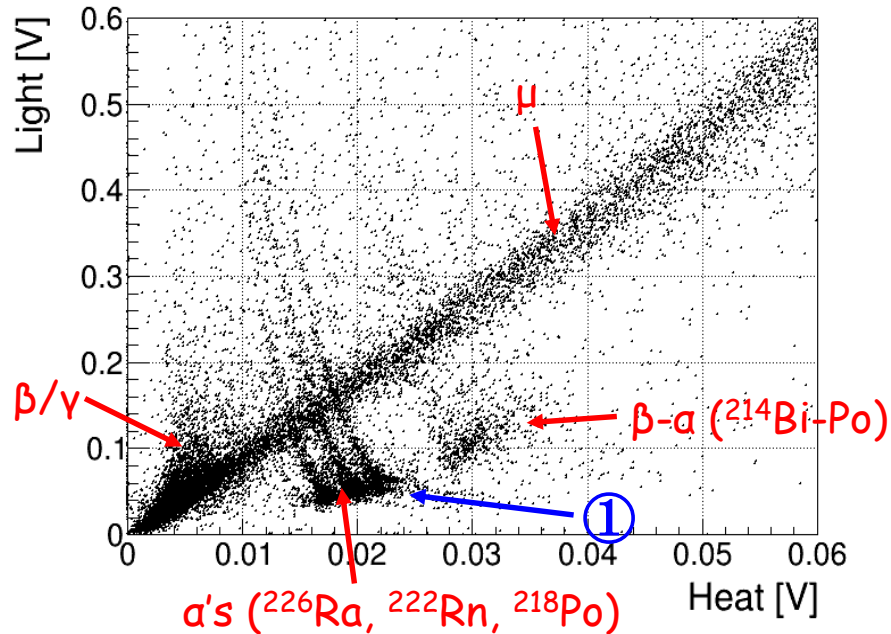
SQUID



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

② エネルギー分解能がそれほど良くない

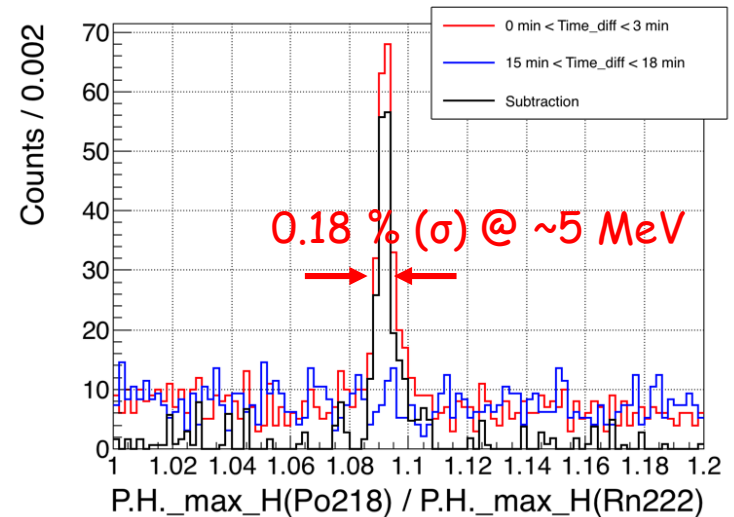
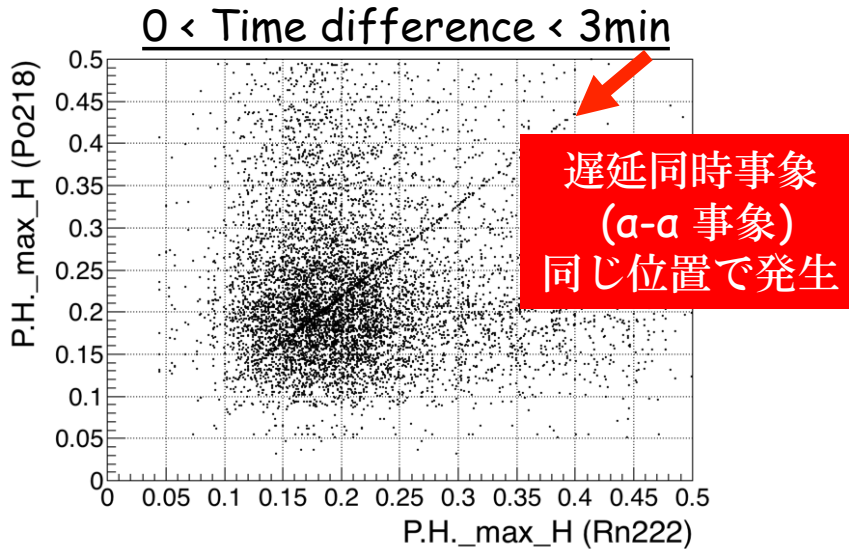
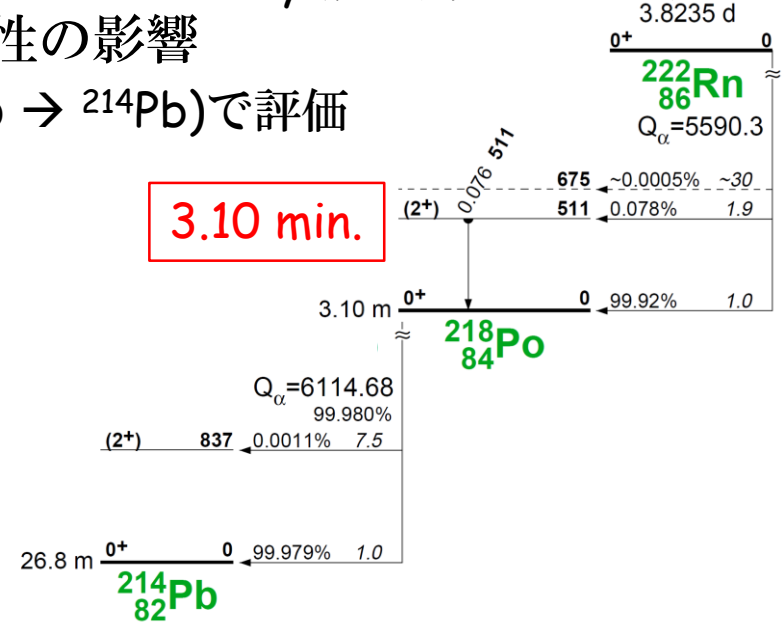
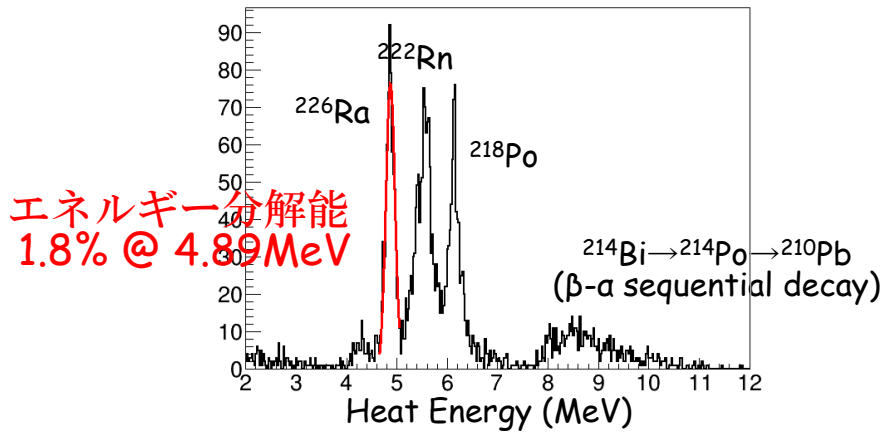
③ Light信号が広く分布

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

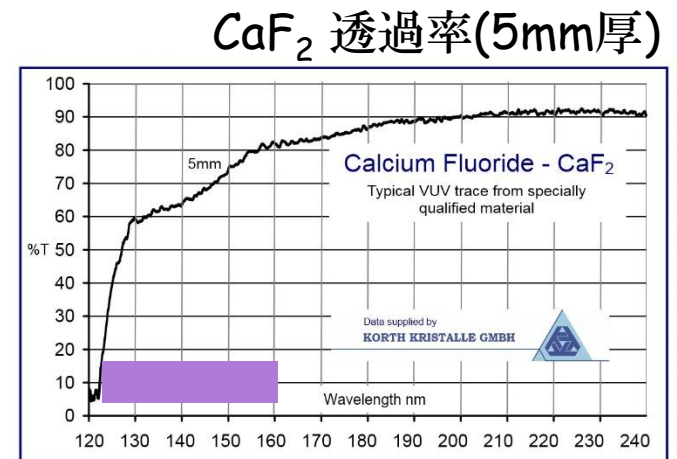
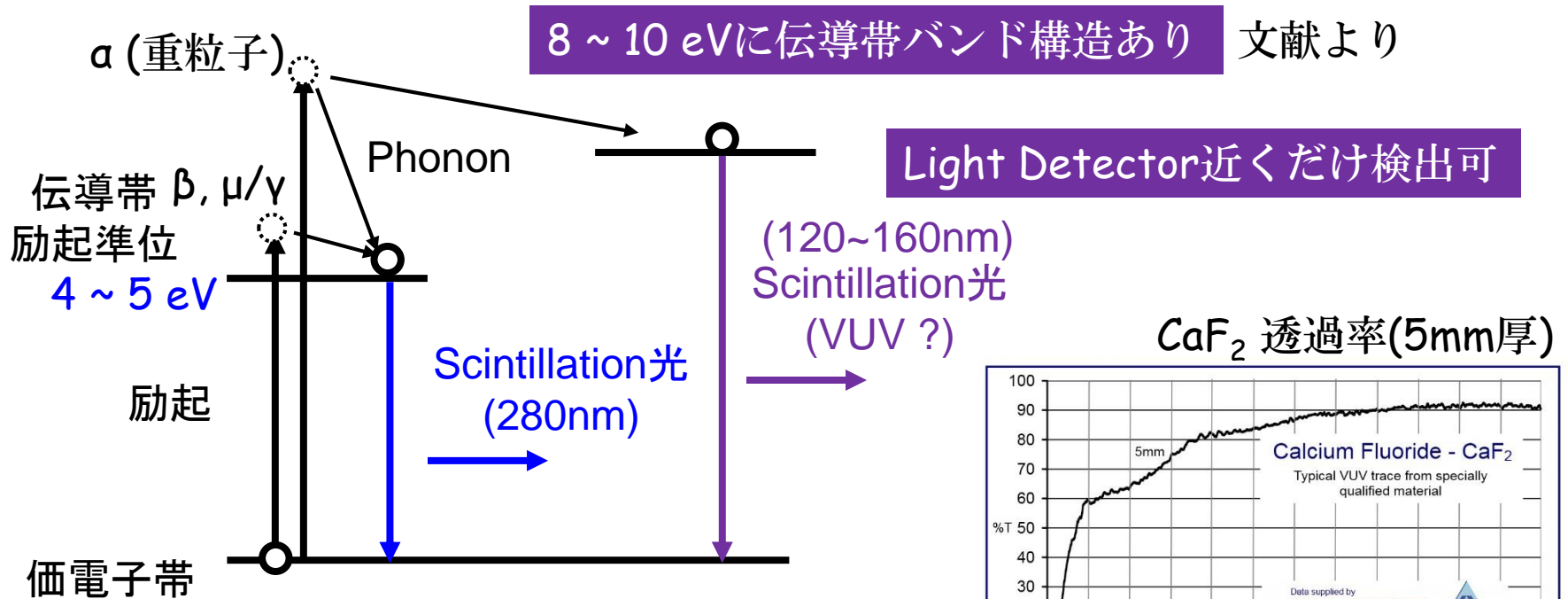


位置依存性が除去できれば、エネルギー分解能が劇的に改善可能

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）

今のところ実験データをよく理解できる（矛盾がない）

今後のCaF₂+MMC検出器の開発

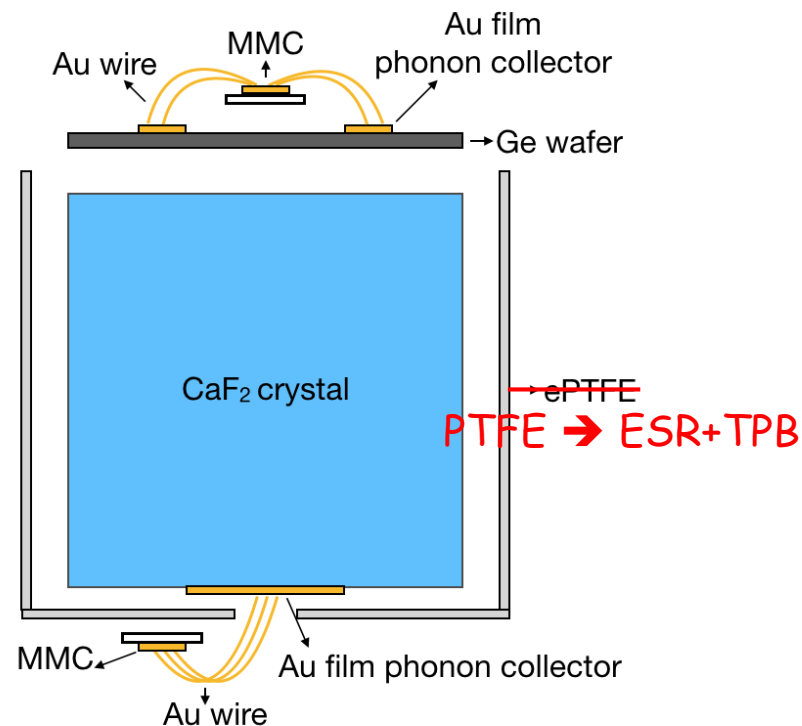
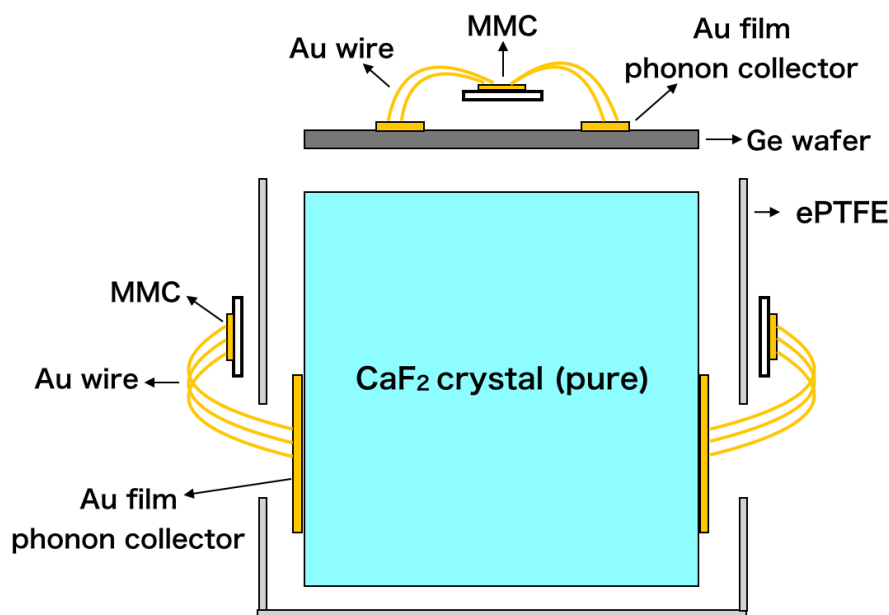
- CaF₂(pure) scintillating bolometerのエネルギー分解能改善
 - 場所依存性を取り除くことができれば、エネルギー分解能を改善可能
 - 多地点読み出し（左図：2点読み出し）
 - 多地点MMC読み出し：立ち上がりが早いのでMulti-Site事象同定可？

- 粒子同定 CaF₂(pure) 結晶

- 短波長の蛍光対策 反射材を変えてみる (PTFE → ESR+TPB)

TPBで波長変換

ANKOK実験から拝借



暗黒物質探索実験の高度化

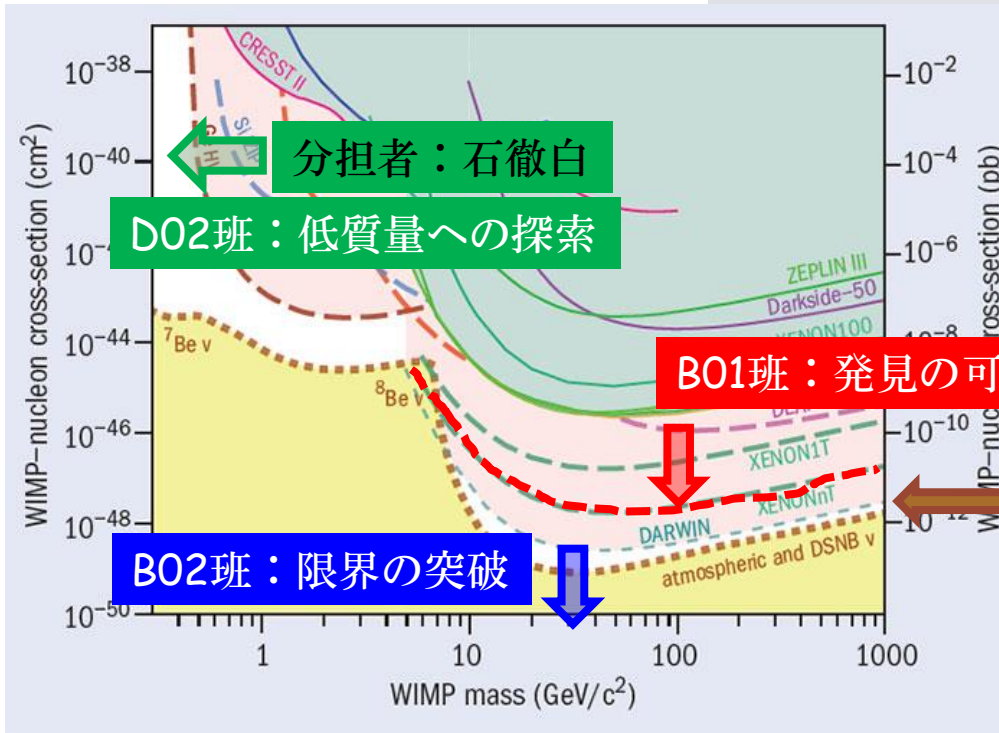
暗黒物質探索実験(B班)の高感度化

● 探索範囲の拡大

WIMPs探索

アクシオン探索に向けて

分担者：岸本



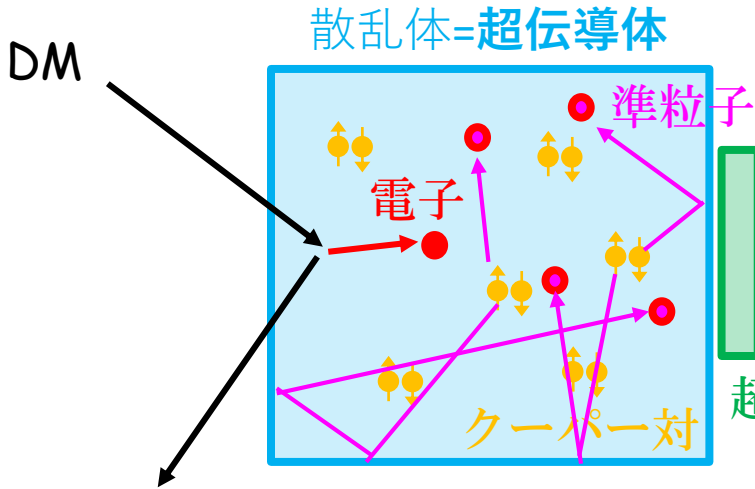
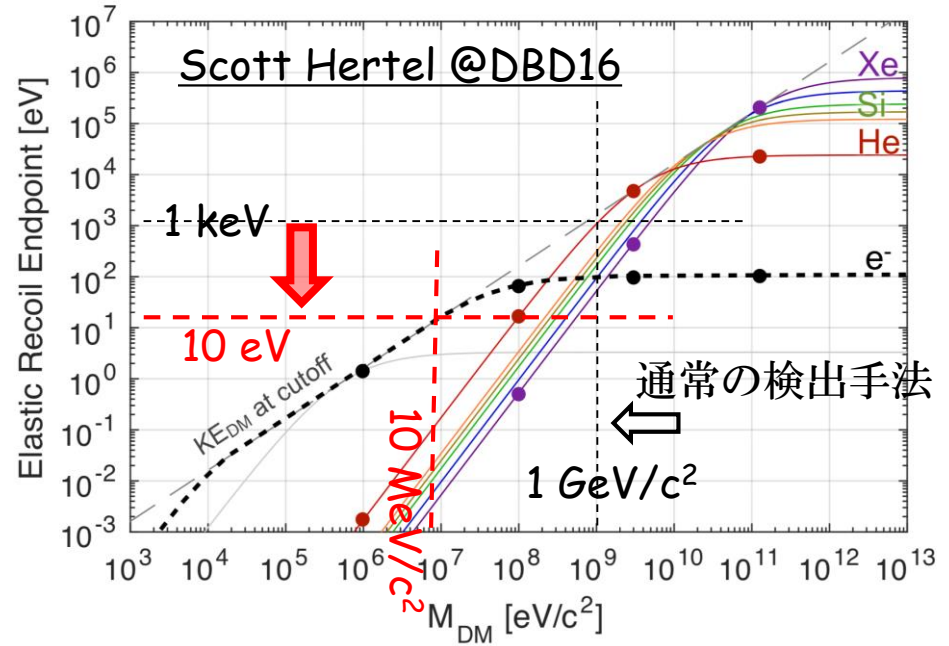
- B01班：XENONnT → 世界最高感度の探索
- B02班：方向感度検出器
→ ニュートリノフロア（通常探索の限界）の突破
- 低質量WIMPsの探索 → 低エネルギー信号の検出
 - 超伝導検出器（センサー）技術を使った低エネルギー信号検出

低質量WIMPsの探索の手法

- 低質量WIMPs探索の条件
 - 軽い原子核標的 / 電子標的
 - 超低エネルギーしきい値

~ eV 信号の検出

- 低エネルギー信号の検出手法
 - 極低温でBolometer原理
 - 超伝導センサーを利用



反跳エネルギーで準粒子へ解離

クーパー対の解離エネルギー
~ meV

目標：低エネルギーしきい値 ~10 eV以下

低質量WIMPsの探索の手法

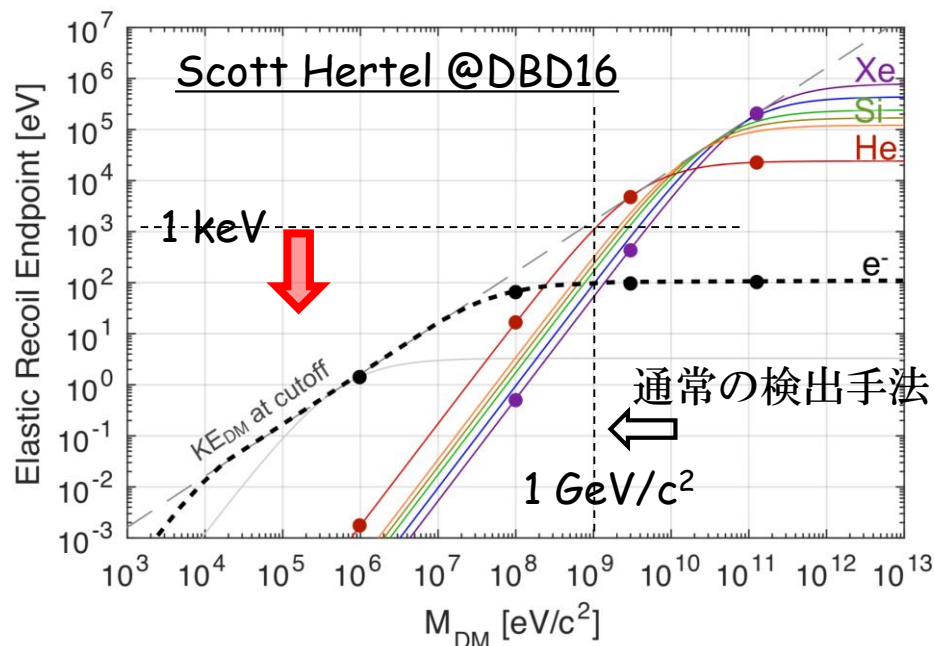
● 低質量WIMPs探索の条件

- 軽い原子核標的 / 電子標的
- 超低エネルギーしきい値

~ eV 信号の検出

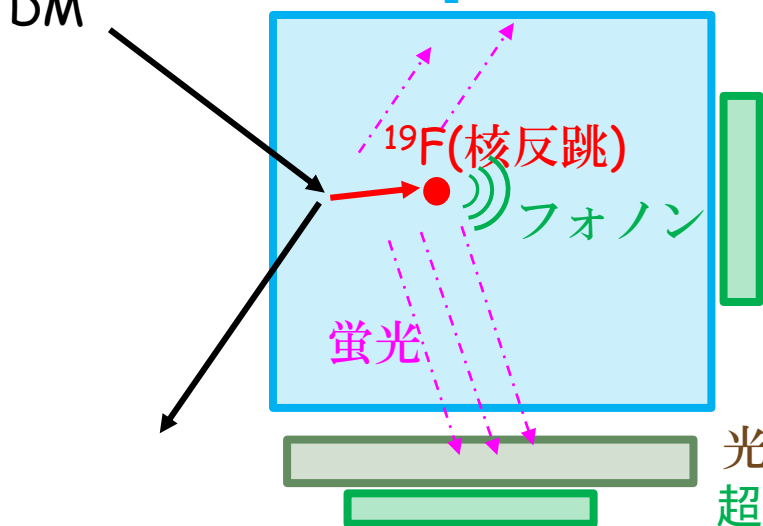
● 低エネルギー信号の検出手法

- 極低温でBolometer原理
- 超伝導センサーを利用



DM

散乱体= CaF_2 シンチレータ



原子核/電子反跳の信号を
発光効率で分離

多センサーによる3D情報取得
BG除去 分担者：美馬

光吸収体(フォノンに転換)
超伝導素子としてTESも検討(ゲイン~大)

CaF₂結晶への超伝導素子の実装

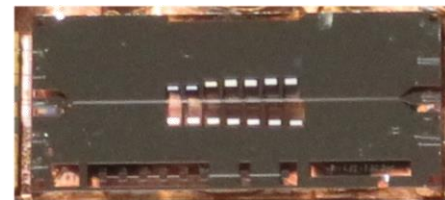
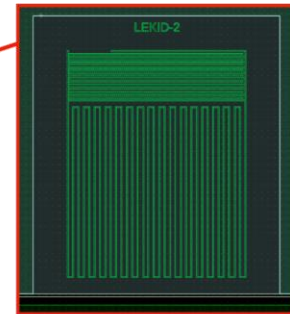
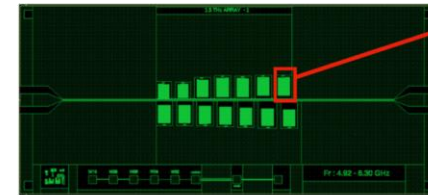
分担者：石徹白（東北大）

- 目標

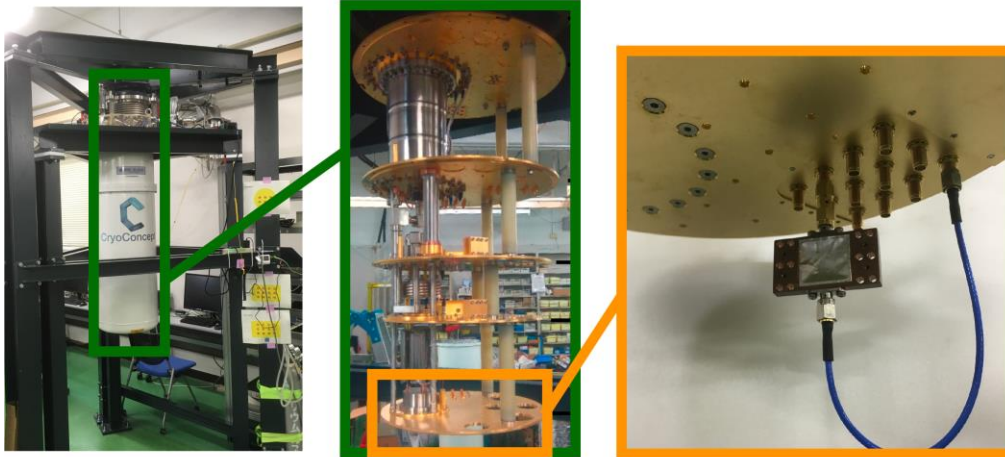
- 質量MeV領域の低質量WIMPの探索手法の確立

- 研究手法

- 基盤をWIMPs標的とする（直接的な信号検出）
- Si基盤 → CaF₂基盤
 - 19-F：SD-WIMPs標的として
 - Scintillating-Bolometerへの発展



CaF₂基盤上にプリントされたKID



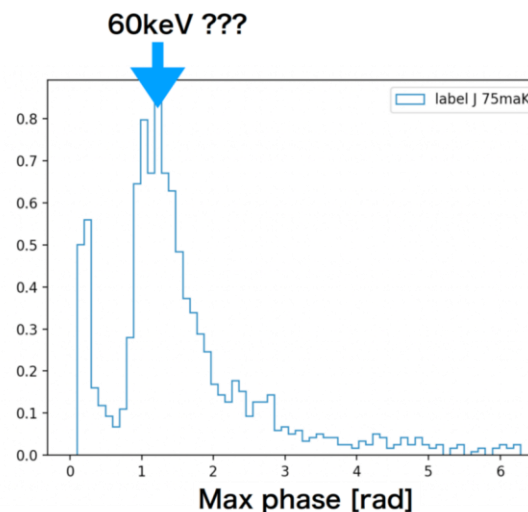
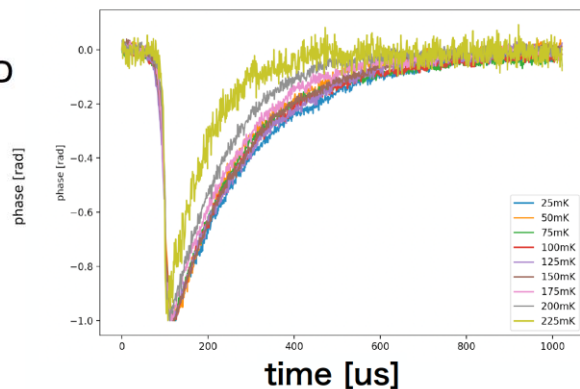
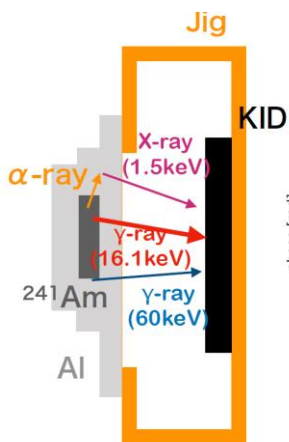
希釈冷凍機にマウントして測定

- 現在の状況

- 通常はSiを基盤に超伝導素子を取り付ける
→ CaF₂を基盤に使っても同等程度の性能であることを確認

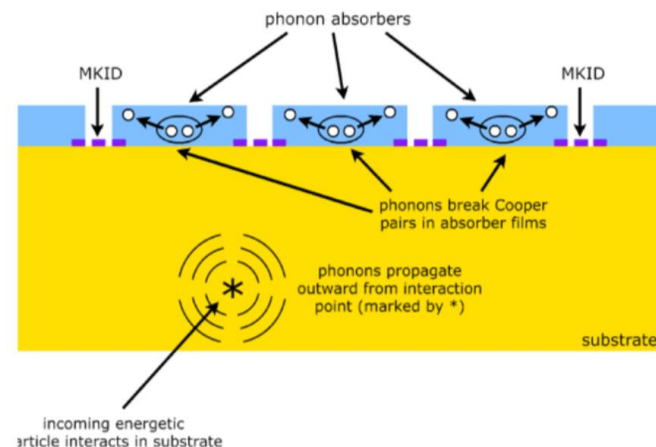
CaF₂結晶への超伝導素子の実装

- 現状: ころうじて60keVが見える程度



- 今後の方針: 放射線検出器としての最適化

- 感度面の最大化
- 吸収体の導入
- 異なる超伝導素子 (TESセンサー)の導入
- 超伝導体をターゲットにするデザイン導入

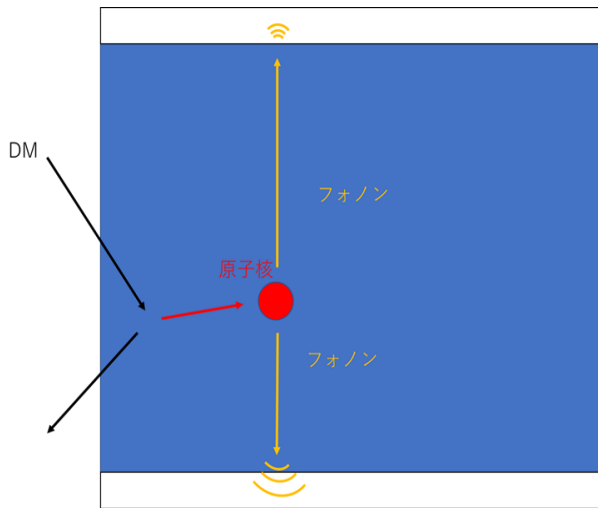


J Low Temp Phys (2008) 151: 550-556

3D超伝導検出器の開発

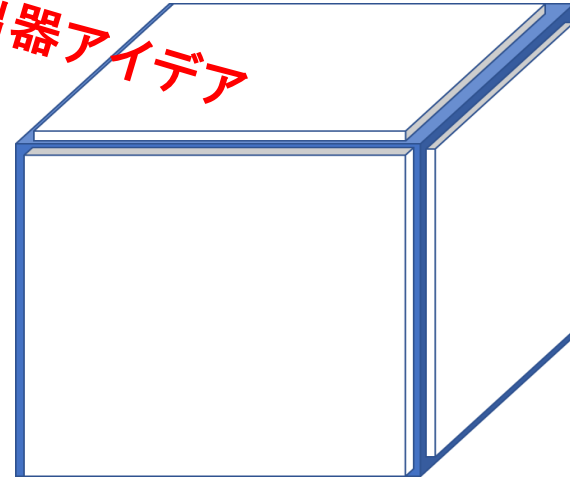
研究分担者：美馬（理研）

検出器のコンセプト



新しい検出器アイデア

3次元化
→



散乱体（結晶）の上下にKIDを配置

位置情報の読み出し → 有効体積カット、多重散乱事象除去

図：河村氏（埼玉大）提供

● 超伝導検出器KID

- ギャップエネルギー ($E_{\text{gap}} \sim 0.1 \text{ meV}$) が小さく高感度・高分解能
- 大規模アレイ化が容易（ ~ 1000 画素）
- 構造がシンプルで試作が容易

● 立体的な暗黒物質探索用の検出器

- DMに感度のある結晶の全面にKIDを作成し、すべての面で信号をえる。

超伝導検出器の開発設備

- 下記の設備を用いた一貫した超伝導素子開発が可能
- 超伝導素子開発環境
 - 理化学研究所（和光市）
テラヘルツイメージング研究チーム
 - 超伝導検出器プロセス装置一式
 - 超伝導スパッタ装置
 - 絶縁体スパッタ装置
 - 多目的スパッタ装置
 - 分子線エピタキシー装置
 - マスクアライナー（露光装置）
 - エッチング装置
 - ドラフトチャンバー
 - 自動現像装置
 - マスクレス露光装置（埼玉大）
 - 検査装置
 - サーフコーダー、光学顕微鏡
 - 超伝導検出器マウント装置
 - ダイシングソー
 - ワイヤーボンダー



超伝導スパッタ装置



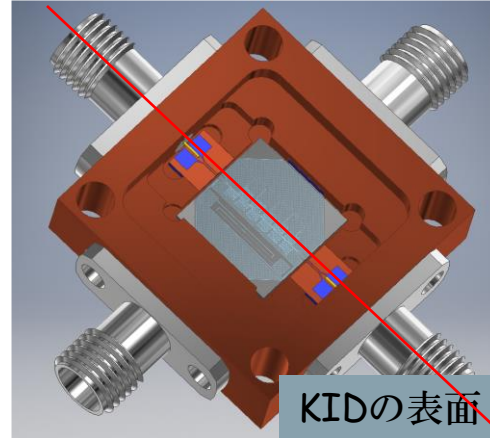
エッチング装置（左）、
露光装置（右）

3D超伝導検出器の開発

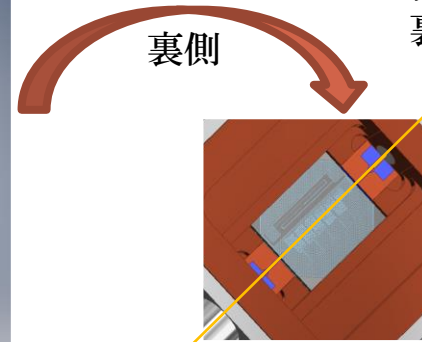
- Si基板両面にKIDを試作した検出器
 - 試験項目：両側のKIDでコインシデンス

研究分担者：美馬（理研）

信号ライン表面（赤線）

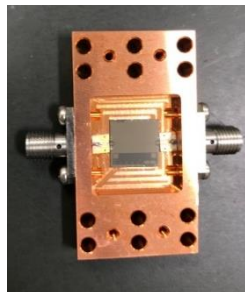
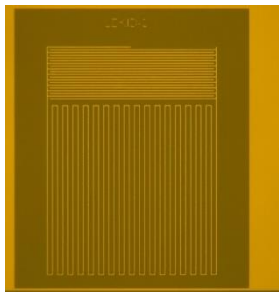


信号ライン裏面（黄色）

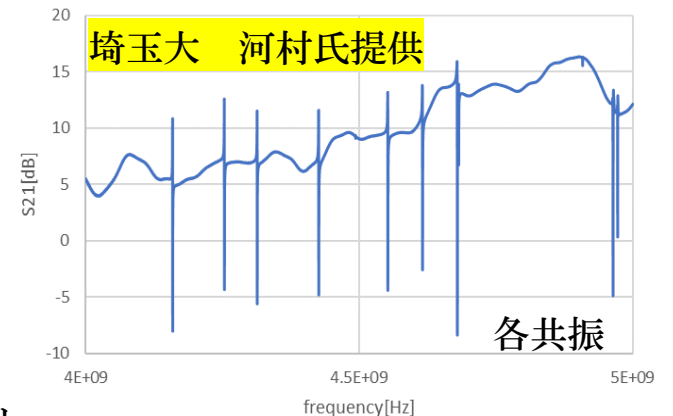


開発状況

- 下は試作した検出器の写真と測定結果
- 試作評価は埼玉大学と共同で行っている。



試作したKID(LE-KID型)
左：共振器拡大、右：マウント



冷凍機を使った共振特性の評価

3D超伝導検出器の開発

- 今後の予定
- 直近
 - 両面に検出器を搭載したKIDの高精度な性能評価
 - 放射線源を用いた、コインシデンス検出
- 長期的に
 - 立方体の結晶の各面にMKIDを試作する
 - 立方体の検出器から読み出す治具の開発
- 今後
 - 散乱体（ CaF_2 など）の立方体にMKIDを搭載した検出器の開発
 - 超伝導検出器の開発できる環境の保守と維持

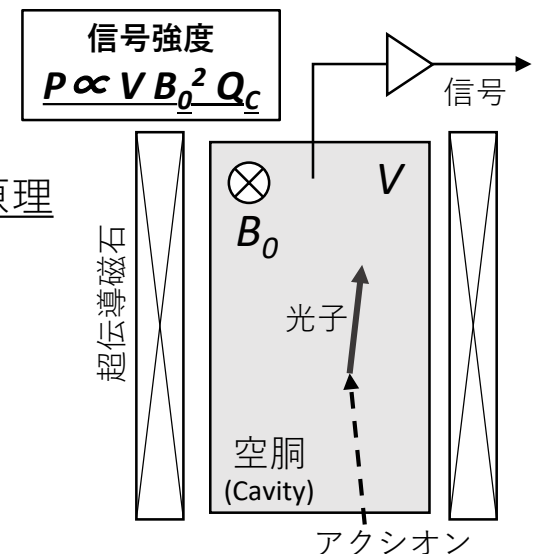
強磁場空洞の開発

暗黒物質探索実験(B班)の高感度化

分担者：岸本（東北大）

- 探索範囲の拡大
 - もう一つの有力候補「Axion」の探索
 - Strong-CP問題 両問題を一気に解決できる魅力的な候補！
 - 暗黒物質問題
 - 暗黒物質「Axion」の探索技術の開発
 - 冷却強磁場 (9T)
 - 空洞のQ値：高純度素材の利用が重要 ← 低BG素材のノウハウが有用
 - 共通するマイクロ波計測技術（超伝導素子の読み出し）

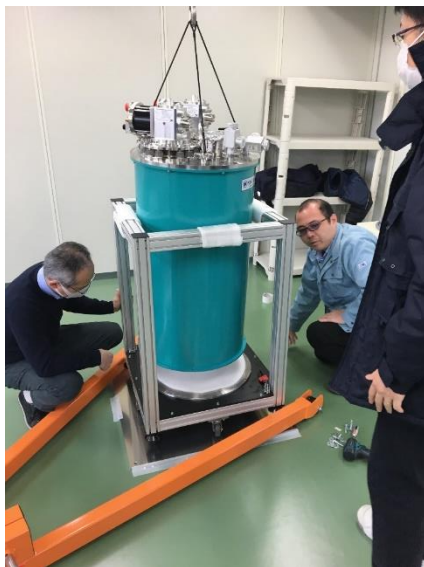
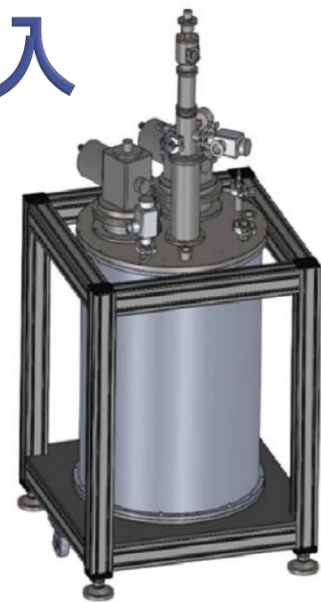
アクシオン検出器の原理



暗黒物質の探索質量領域・有力候補を
網羅できる体制作りと技術開発

超伝導マグネットの導入

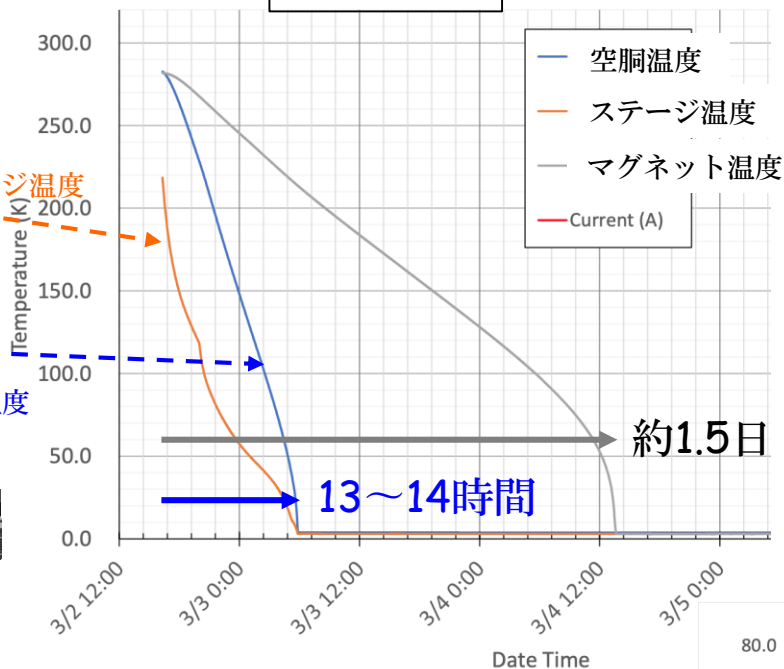
- 磁場性能
 - 最大磁場： $B = 9T$
 - 一様性： $10\% / \Phi 100 \times L200 \text{ mm}$
- 冷却性能
 - キャビティ空間： $\Phi 110 \text{ mm}$ 以上 $\times L200\text{mm}$
 - キャビティ空間温度： 4.2 K 以下
 - 冷凍機能力： 1.0 W 以上 @ 4.2 K
 - 冷却方式：熱交換ガス（Heガス）
- 2020年3月2日～5日, 東北大RCNSに納入



空洞のダミー（銅製） $\Phi 106 \times L200 \text{ mm}$
（上下の空間は、電気系、周波数変調機構などのスペース）

納入時試験(冷却→励磁)

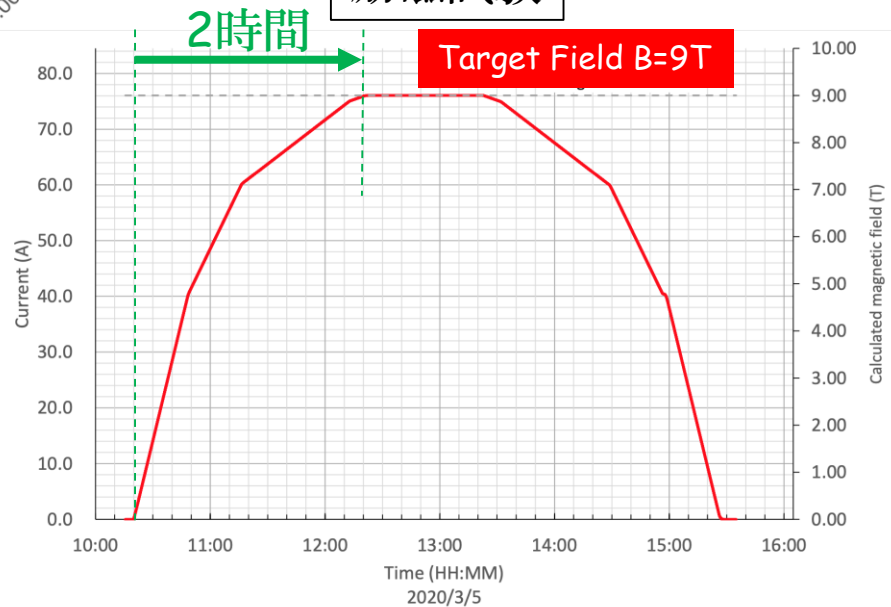
冷却試験



冷却試運転

- 冷却はHeガスによる熱伝導
- 約1.5日でマグネット冷却完了(励磁可能)
 - マグネットが冷えた状態で試料室は取りだし可能
- 13~14時間で試料室周辺が最低温度(3.8 K)
 - 励磁しないなら、この段階で実験可能

励磁試験



- ボタン1つで自動的に励磁
 - 2時間で $B = 9T$

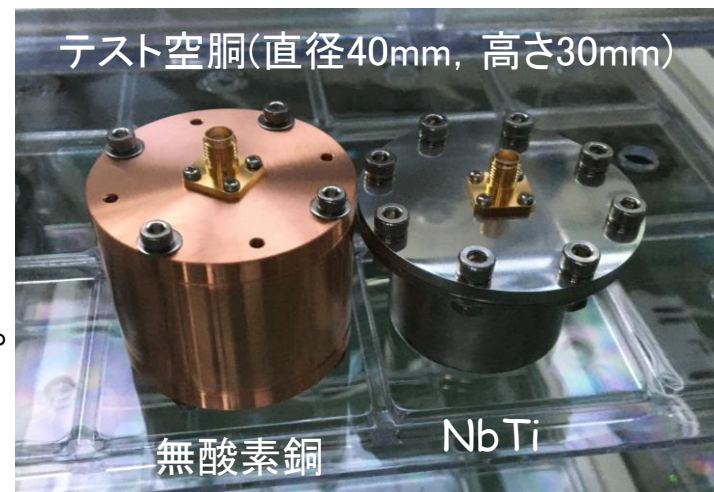
今後の予定

- 直近（実験開始できれば、数ヶ月）
 - 2種類の空洞（無酸素銅、NbTi）の低温でのQ値測定
 - 空洞の磁場とQ値の相関

- 次のステップへ

- 現在の銅製空洞の材料はJIS C1011
- 世の中には 5N等更に高純度の製品がある。
- 表面洗浄など、純度以外の要素もあるので、総合的な取り組みが必要
 - JIS C1011 : 純度99.99%以上。
(Residual Resistivity Ratio, RRR \geq 350)
- NbTi空洞では、磁場依存性が課題
 - RFが磁束を揺り動かしエネルギー損失が生ずる。

- 最終的目標は、 $Q \sim 10^6$ ($Q_0 \sim 2 \times 10^6$)



無酸素銅製空洞

常温での共振周波数と無負荷のQ

$$f_0 = 5.747 \text{ GHz}$$

$$Q_0 = 7.01 \times 10^3$$

NbTi製空洞

常温での共振周波数と無負荷のQ

$$f_0 = 5.734 \text{ GHz}$$

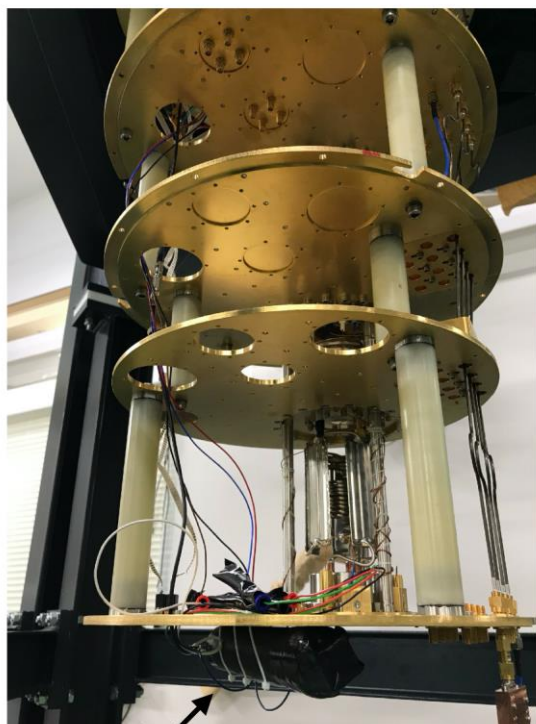
$$Q_0 = 1.71 \times 10^3$$

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

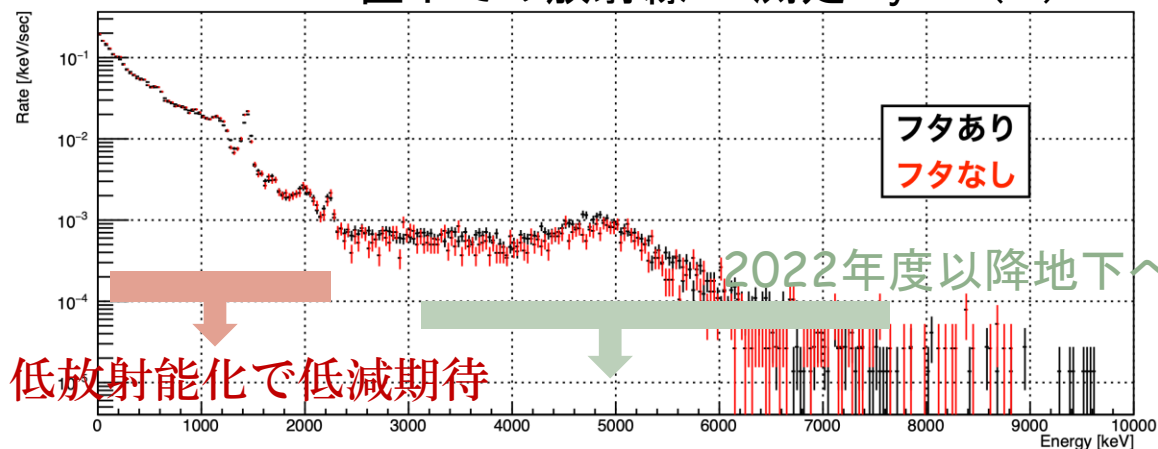


PMT + CsI

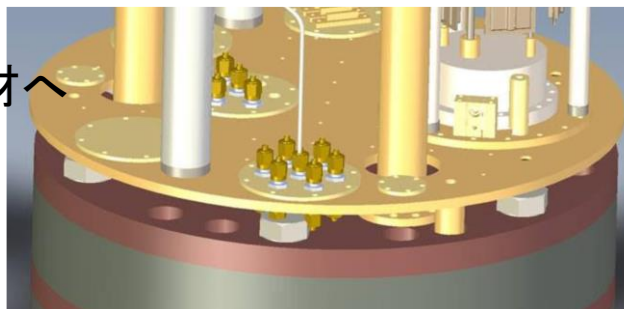
黒体放射用シールド → 低BG素材へ

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



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
- $0\nu\beta\beta$ 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
 - Scintillating-Bolometer開発 (CaF₂(Pure)+MMC)
- 宇宙暗黒物質の探索範囲拡大 (低質量WIMPs)
 - 極低温下で超伝導センサーを使用し、低エネルギーしきい値10eVを実現
 - 散乱体として、CaF₂や超伝導体を使用 (散乱体+KIDセンサー：放射線検出器)
 - 超伝導素子による3次元読み出し検出器の開発 (Si基盤の両面KID実装)
 - 2次元情報が読み出せるか？からスタート
- Axion (ALP) 探索技術の開発
 - 強磁場空洞の開発
 - 超伝導マグネット導入：冷却強磁場 (共通インフラ)
 - ← 空洞のQ値を測定：Quickに測定が可能に！
 - Q~10⁶ を目標に開発を進める