

A space-themed background featuring a view of Earth from space, the Moon, and the Sun with a bright lens flare. The text is overlaid on a semi-transparent dark band.

宇宙暗黒物質探索のための ヨウ化カルシウムシンチレータの開発

2017年1月27日

飯田崇史(阪大RCNP)

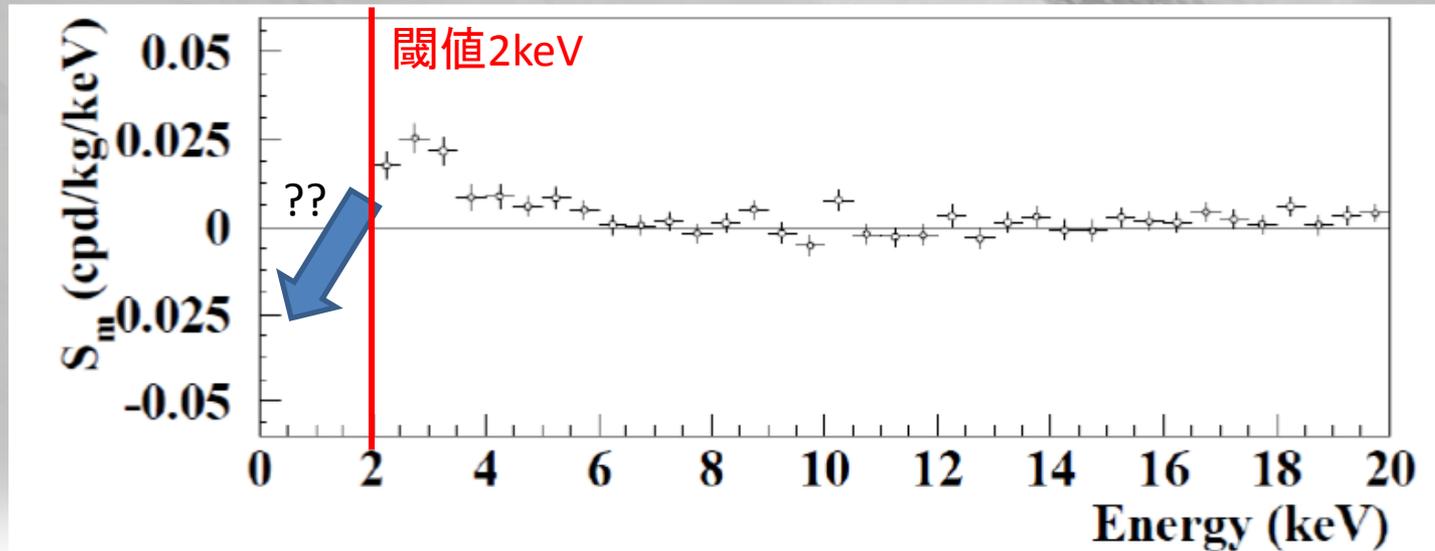
ダークマターの懇談会@梅田

無機結晶を用いたDM実験

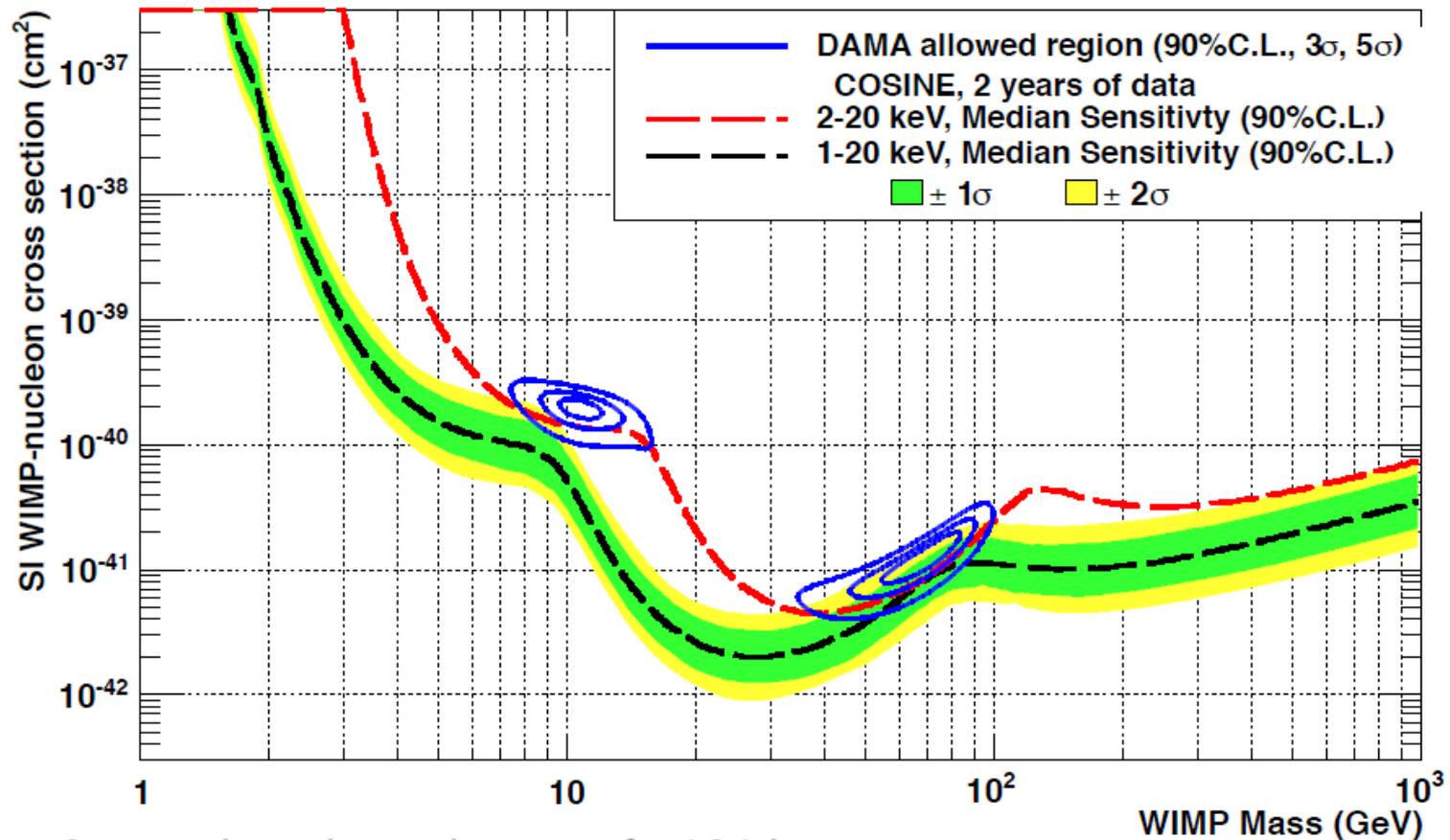
- DAMA (250kg NaI @ LNGS, Italy)
 - 季節変動を発見したと主張してる実験
 - DM-Ice (NaI @ 南極)
 - KIMS (CsI → NaI @ 韓国)
 - 2016年9月100kgでデータ取得開始。2年でDAMA検証。
 - ANAIS (NaI @ Canfranc)
 - SABRE (NaI @ LNGS, Italy)
 - PICOLON (NaI @ 神岡) by 伏見さん
- } COSINE実験 @ 韓国

DMの季節変動

- DAMA実験による季節変動発見報告以来、様々な実験で結果を検証しようとしている。
- キセノンの実験では否定的な結果 & NaI結晶を使った実験も。
- NaI以外の無機結晶等、多角的に検証が必要。
- 季節変動を見るには閾値が低いほうが良い。
- 発光量の大きいCaI2結晶(2倍以上)で季節変動見れないか？



閾値を下げたときのDM感度



8 crystals with total mass of ~ 106 kg
2-4 dru flat background is assumed

ヨウ化カルシウム(CaI₂)



- **ヨウ化カルシウム(CaI₂)**は、1960年代にHofstadter氏によって発見された無機シンチレータ[2]。
- 論文によると**発光量がNaI(Tl)の2倍**、**発光波長は光電子増倍管の感度波長とほぼ一致**。
- 高いシンチレータ性能を持つ一方で、強い潮解性・劈開性を持つため扱いが難しい。

| Material | Density gm/cc | Relative pulse height | Decay constant μ sec | Peak $m\mu$ | Emission Width at half height $m\mu$ |
|-----------------------|---------------|-----------------------|--------------------------|-------------|--------------------------------------|
| Typical NaI(Tl) | 3.67 | 100 | 0.25 | 415 | 90 |
| CaI ₂ | 3.96 | up to 200 | 0.55 | 410 | 98 |
| CaI ₂ (Eu) | 3.96 | up to 200 | 0.79 | 470 | 28 |
| CaI ₂ (Tl) | 3.96 | 100-110 | 1.1 | 420 | 99 |

当時は未熟な結晶育成・加工技術のせいで、一般に普及することなく技術が埋没してしまった。

**最新の技術で復活
出来ないか？**

実験コンセプトは、

知過
新味



CaI₂の長所短所

○シンチレータとしての特徴

- ☺ NaI(Tl)の2倍の発光量 → **低エネルギー閾値**
- ☺ Euなどの活性化剤が必要ない → **透過性、大型化可能**
- ☺ 安価(ペットフードに使うくらい)
- ☺ WIMPとのSI・SD断面積が大きい^{127I}を含む。Ex) $\sigma_{SI} \propto A^2$
- ☺ 二重ベータ崩壊核である^{48Ca}を含む
- ☹ 潮解性あり(要ハウジング)
- ☹ 劈開性あり(加工が大変) → **これが一番やっかい**

東北大学金属材料研究所と共同で、現代の最新技術を駆使し、克服を目指す!!



CaI₂結晶育成

- 金研の持つブリッジマン結晶育成装置、真空グローブボックス、ワイヤーソーによる加工技術を利用。
- CaI₂と近い性質のSrI₂(Eu)単結晶の育成に成功しており※、そのノウハウを応用。
- 2015年10月に最初の挑戦！

そして、、、失敗(´・ω・`)

…蒸発

※ “Growth of Eu:SrI₂ Bulk Crystals and their Scintillation Properties”

J. Cryst. Growth 401 (2014) 343–346

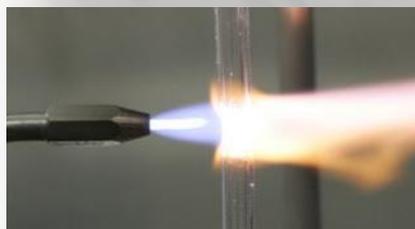
Yuui Yokota, Shunsuke Kurosawa, Kei Nishimoto, Kei Kamada, Akira Yoshikawa

Disappeared
into the air...

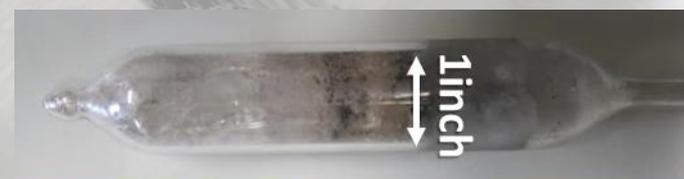
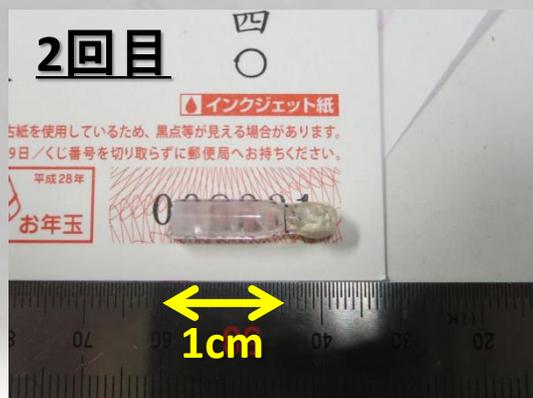
| | SrI ₂ | CaI ₂ |
|----|------------------|------------------|
| 融点 | 538°C | 779°C |
| 沸点 | 1773°C | 1100°C |

CaI₂結晶育成(リベンジ)

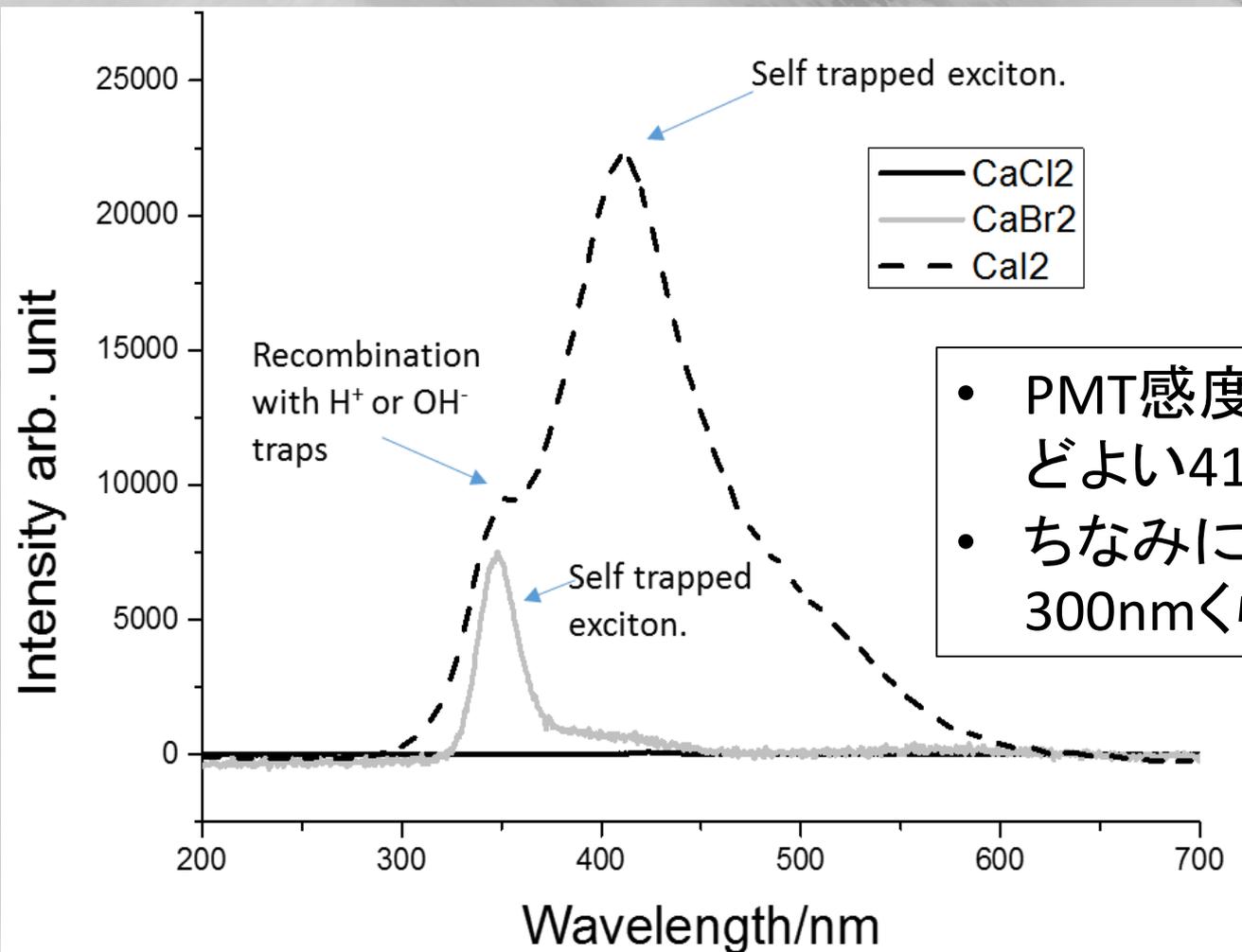
- 蒸発を防ぐため、封じ切りのるつぼを使用。
- 2回目: 2016年2月
4mm × 10mmの無色透明な小型結晶作成に成功。
- 3回目: 2016年5月
25mm × 100mmの結晶作成に成功。クラック入り。
- 劈開性が強く、ペリペリと剥ける。。。加工・研磨は困難。
- 5mm角 × 2mm厚の小さい欠片をガラス板と接着剤で密封し、性能評価用データを取得した。



封じ切りるつぼ



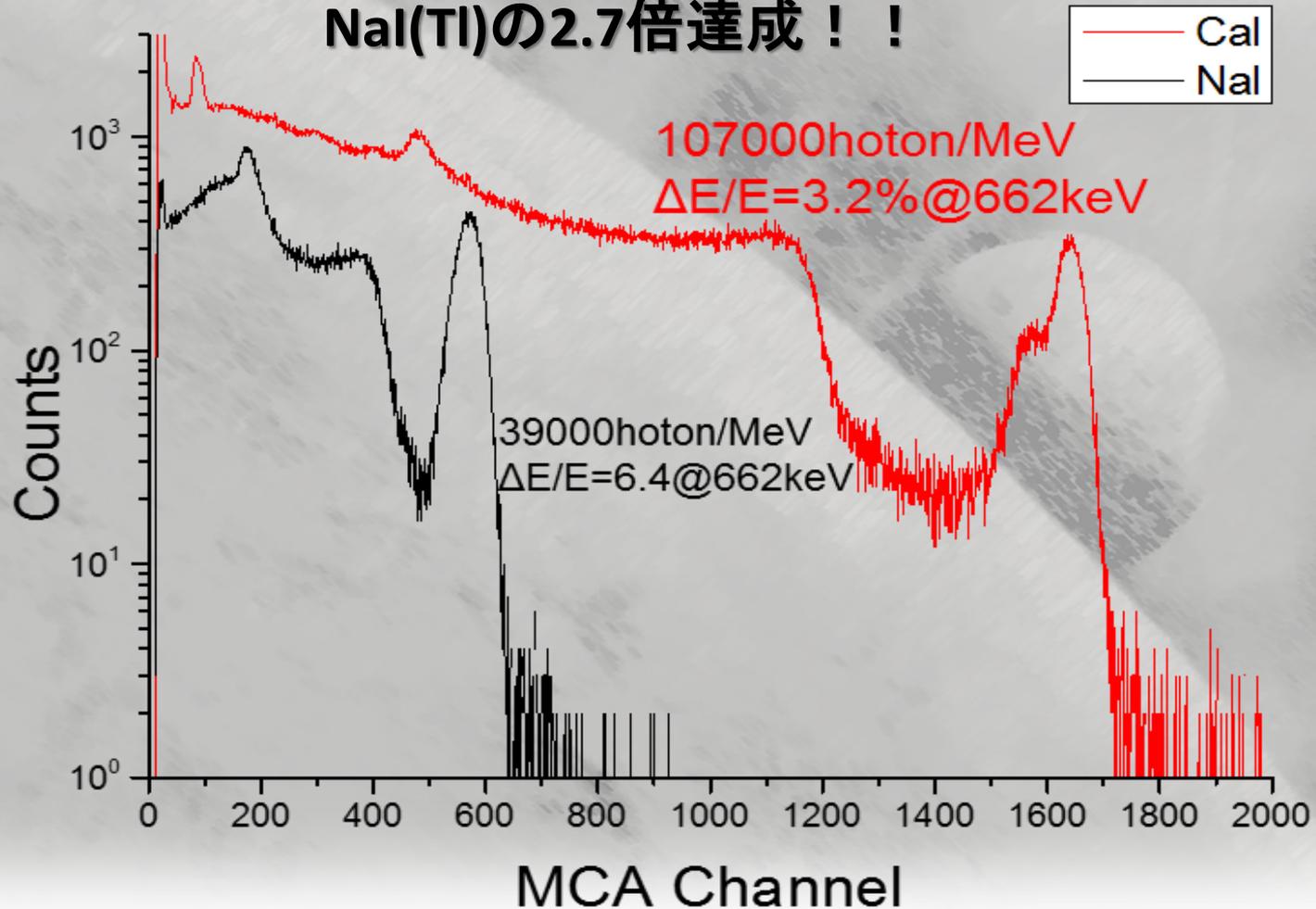
発光波長



- PMT感度波長にちょうどよい410nm！！
- ちなみに励起波長は300nmくらい。

発光量の比較 (vs NaI)

UBAのPMTを用いて測定
NaI(Tl)の2.7倍達成！！



結晶性能評価まとめ

| | CaI ₂ | Eu:CaF ₂ | Eu:CaI ₂ | Eu:SrI ₂ | Tl:NaI |
|----------------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------|
| Light yield photon/MeV | 106000 | 24000 | 90000?? | 90000 | 45000 |
| E.R. %@662keV | 3.2 | 5.4 | 8 | 3-4 | 5.6 |
| Density, g/cm ³ | 3.96 | 3.18 | 3.96 | 5.46 | 3.67 |
| Zeff | 51 | 16.5 | 51 | 50 | 51 |
| Decay time, ns | 834 | 950 | 790 | 1200-1400 | 230 |
| Hygroscopic | Yes | no | Yes | yes | yes |
| m.p., °C | 779 | 1418 | 779 | 538 | 661 |
| Wavelength, nm | 410 | 435 | 470 | 435 | 415 |

結晶育成 & 基礎特性評価で論文執筆中。

将来計画



高感度化への三本柱



たぶんいける

低
閾
値

今後の課題

低
B
G

今後の課題

大
型
化

大型結晶育成に関して **大型化**

- 今のところ、ハーフインチサイズでクラックフリーの結晶育成に成功している。
- 今後は結晶加工、パッケージングの手法開発、及び結晶の大型化(目指せ2インチ)。
- しかし、、、現在は共用の炉を使用しており、順番待ちや封じ切りのセットアップ変更で2ヶ月に一個程度。
- 封じ切りのCaI2専用炉を立ち上げてスピードアップを図る(予算申請中)。
- 加工は金研 & 業者と協力して進めている。

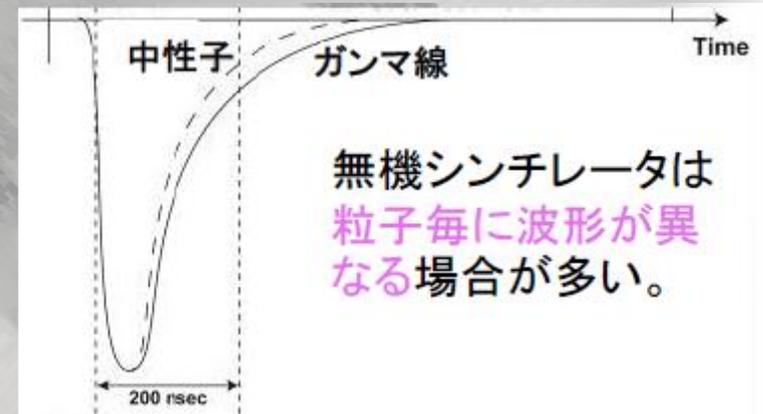


波形弁別能調査

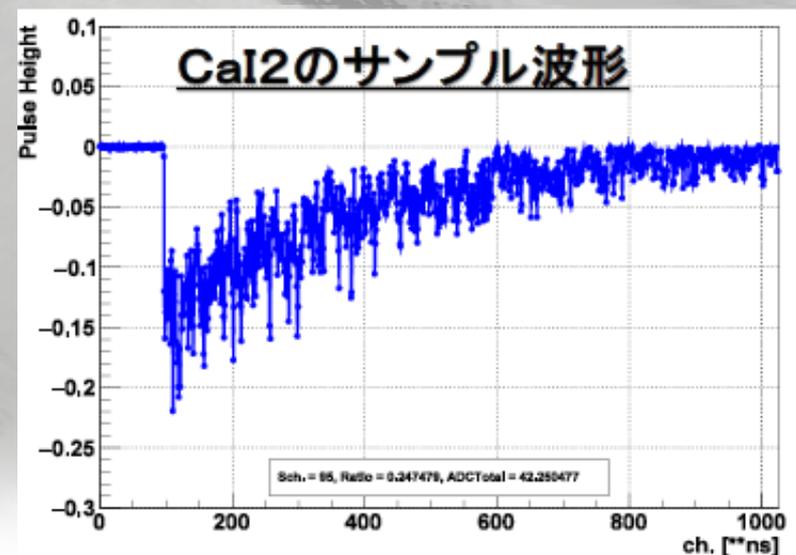
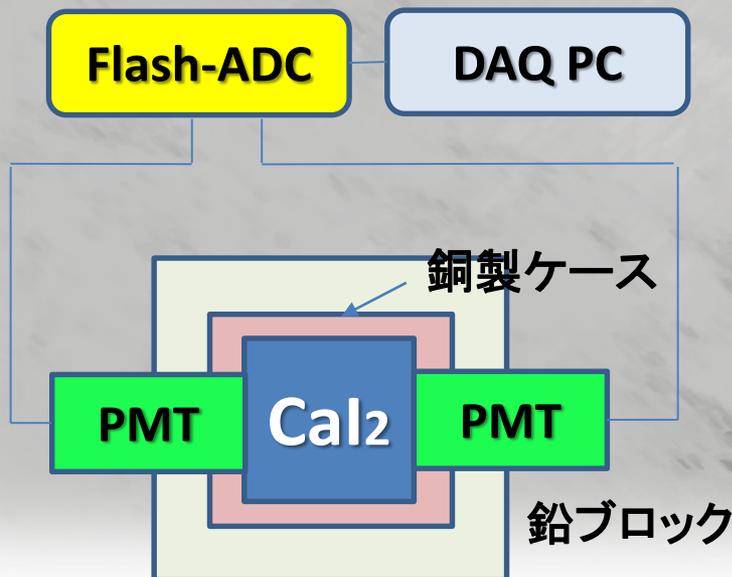
低BG

- $n/\alpha/\beta$ を波形で粒子識別したい。
- 波形弁別が出来ると、低BG暗黒物質探索実験が達成できる。
- 大き目の結晶がパッケージできたら、様々な線源を当てて、調べていきたい。

参考: NaI(Tl)の波形



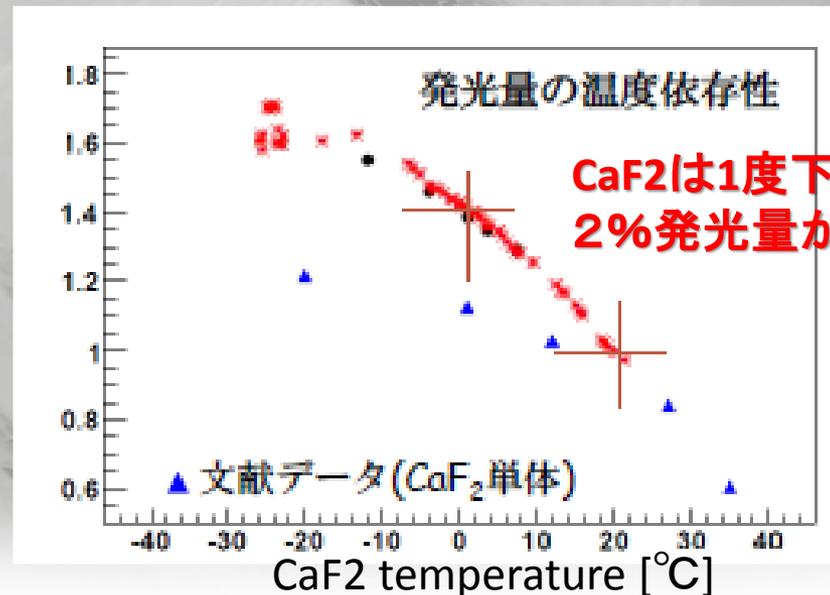
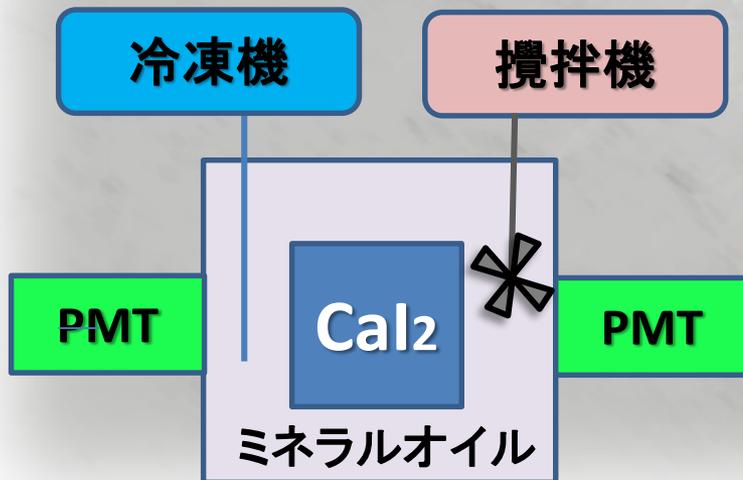
NIM A Vol.758, Page 9-14 (2014) S. Kamada et al.



低温特性評価

低閾値
低BG

- 無機シンチレータは冷やすと発行量が増えたり、波形が変わったりする。
- 冷やして性能が上がるか調べ、論文にまとめる。
- 福井大は以前、CaF₂を液体窒素で冷やし、測定した実績があり、そのノウハウを活かして測定してもらう予定。



その他やりたいこと

低BG

- PMTで光を見ようとするすると汚くてBGが増えるのでMPPCで読み出せないか検討中。
- 複数のMPPCを使えば、位置も再構成できて表面BGを落とせるかも。
- また、へき開性があるということは、結晶構造に異方性があるので、関谷実験(ZnWO_4)のように方向感度がないか。
- 中性子、ミュオンビームで確認したい。



へき開面に垂直・
平行で異方性？



研究体制

この間の科研費で、連携や協力で名前を借りた人たち、、、

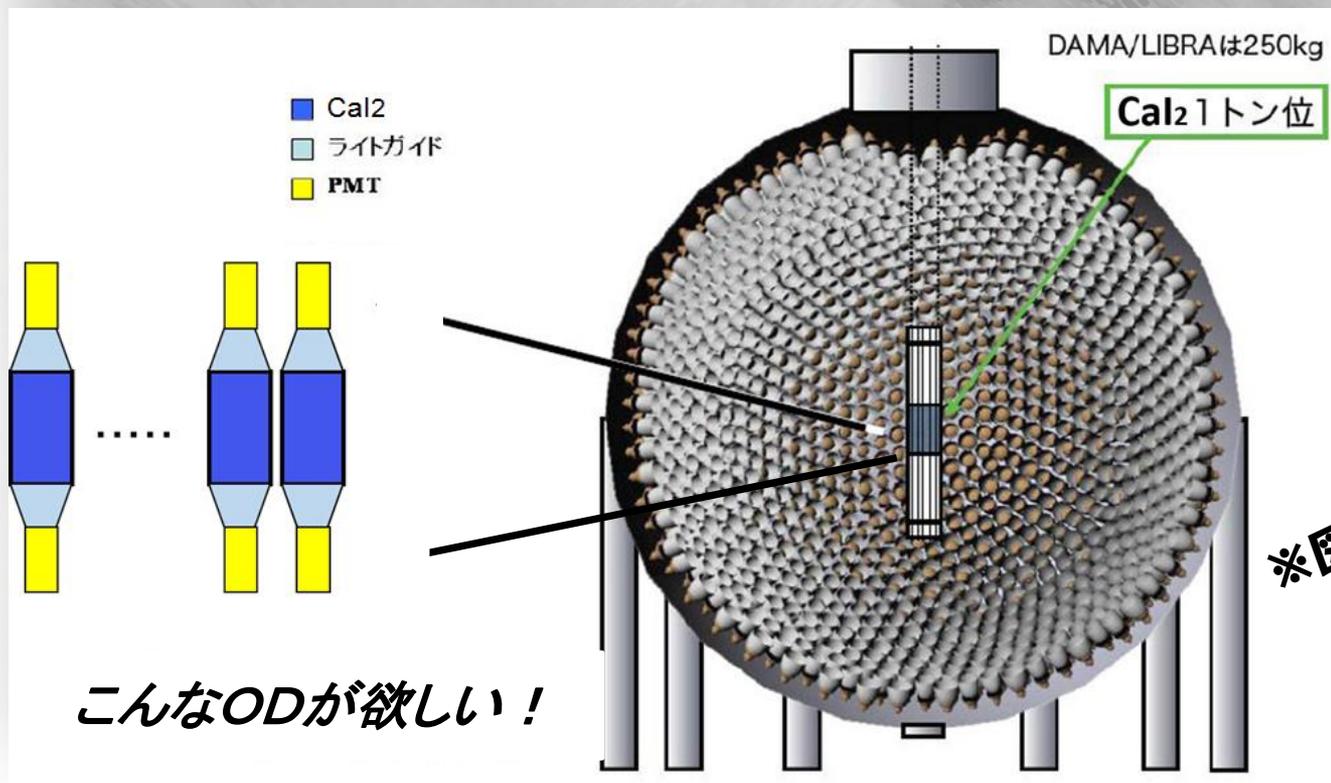
| 名前 | 所属 | 役割 |
|------|-----|----------|
| 飯田崇史 | 阪大 | 色々 |
| 太畑貴綺 | 阪大 | 波形解析 |
| 鎌田圭 | 東北大 | 結晶の育成・加工 |
| 伏見賢一 | 徳島大 | 結晶の低不純物化 |
| 小川泉 | 福井大 | 低温特性評価 |
| 中島恭平 | 福井大 | シミュレーション |

PICOLONとの協力体制

- 今回の科研費から伏見さんが連携に。
- NaIでDAMAを検証し、季節変動が、、、
 - ① 見えた場合： 別の無機結晶で検証
 - ② 見えない場合： 更なる高感度観測
- いずれにしてもPICOLONの低BG装置やノウハウを共有して、CaI2実験を行えたら大変ありがたい。

そう遠くない遠い将来のお話

- 大型の結晶が出来て、大量生産も可能で、低BG化の目途がたったときのお話。
- 大型の液体シンチレータ検出器の中に沈めたら良い感度でのWIMP探索が出来そう |ω・`)ちら



*図はイメージです
KamLANDじゃないよ



マイルストーン

