

公募研究課題番号 15H01035

薄膜蛍光フィルムを利用した 表面バックグラウンド除去技術の開発

大阪大学理学研究科 吉田齊

連携研究者

丸藤裕仁（東北大学ニュートリノ）

伏見賢一（徳島大学）

「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」

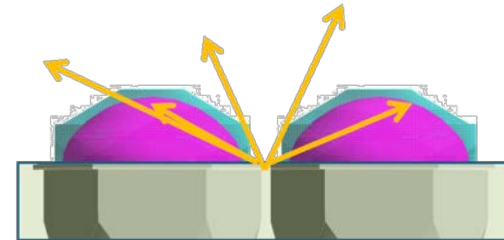
2015年領域研究会

2015年5月15日-17日 神戸大学百年記念館 六甲ホール



研究目的（着想）

- 宇宙暗黒物質直接探索実験における、**表面バックグラウンド**の低減
 - 表面に付着する放射性不純物を徹底的に除去・防止
 - それでも残るBGは？
 - XMASSの場合は、位置情報から除去



岸本さんのスライドから

なるほど！ じゃあ、位置の検出が難しい場合は？

- **表面バックグラウンド**の低減化に対して新しい除去技術を提供したい
 - 表面での事象信号に特徴があればいい？
 - それから、新学術領域が発足して、連携を強化するのであれば、それぞれの得意技術を持ち寄って新しいものを作れないか？

A02班：CANDLES実験

検出器内部

Main 検出器
CaF₂ 結晶
(全部で305kg)

液体シンチレータ
(KamLANDとほぼ一緒)
アクリル製タンク(2.1 m³)

4πアクティブシールド

- ⁴⁸Ca同位体を使った二重ベータ崩壊の研究を実施
- 宇宙の物質優勢の謎の解明に挑戦する
- ~1 event/年というレベルで観測
- 二重ベータ崩壊が起こると、**CaF₂結晶**から光が発生して、**光電子増倍管**で計測

2種類のシンチレータ信号を分離 (信号波形の記録)

CANDLES検出器全体

高さ4 m

直径3 m

タンク内部(光電子増倍管)

光電子増倍管(62本)

13 inch (side) ; x 48本

20.7 inch (top & bottom) ; x 14本

発光場所の特定 PSD

4πアクティブシールド

● 波形弁別による発光場所の特定(CaF₂ と LS信号)

Scintillation時定数の違いを利用

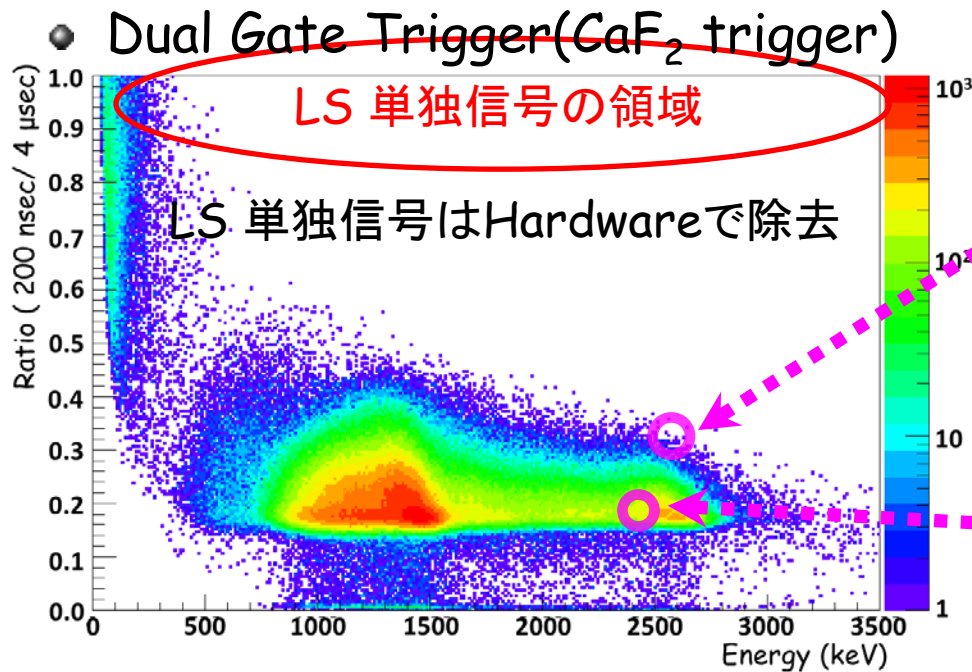
- CaF₂ ; ~ 1000 nsec
- LS ; a few 10 nsec

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Prompt Pulse (200 nsec)}}{\text{Total Pulse (4 } \mu\text{sec)}}$$

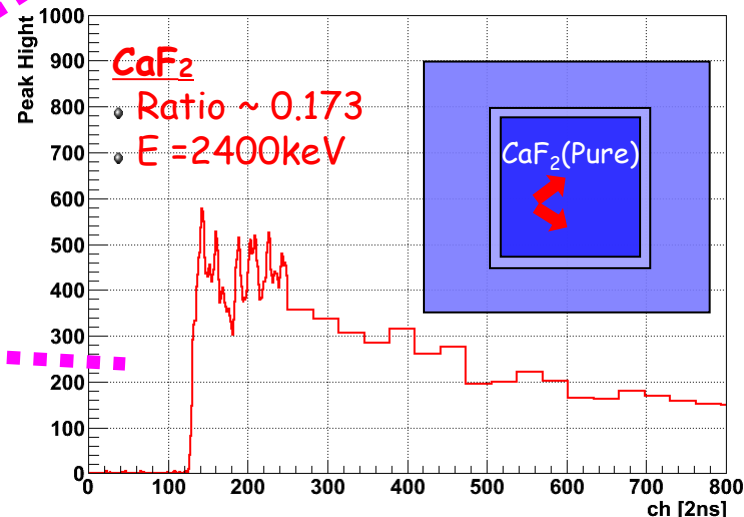
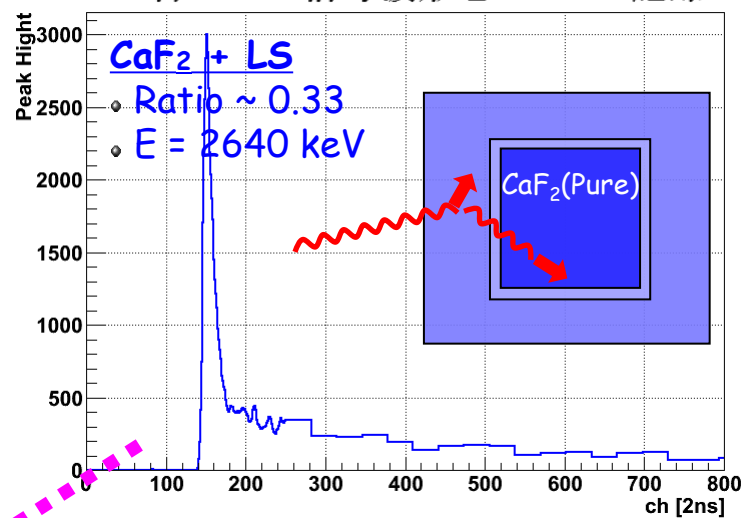
● Dual Gate Trigger(CaF₂ trigger)

LS 単独信号の領域

LS 単独信号はHardwareで除去



● 各PMTの信号波形をFADCで記録



波形解析の実例

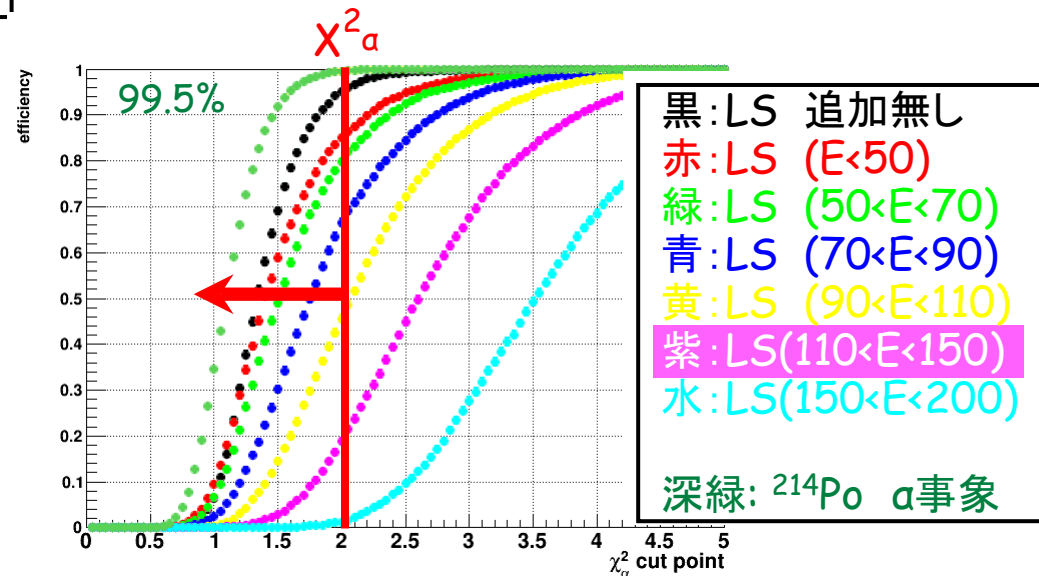
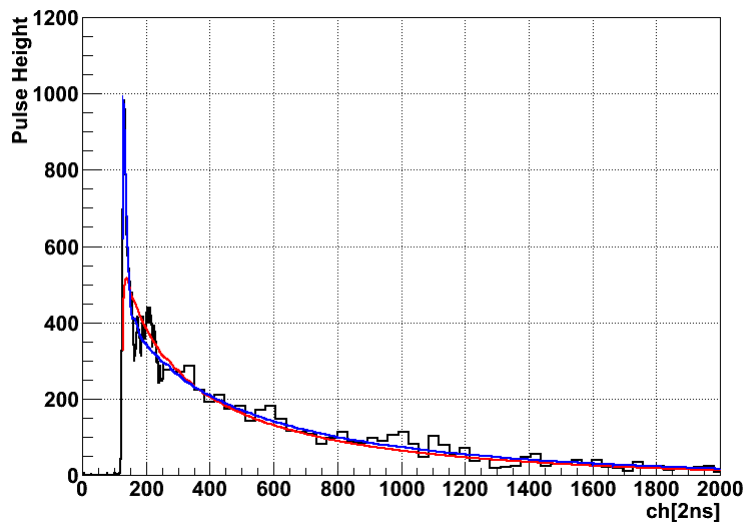
● 波形からの事象特定

● 微量なLSが乗ってる場合

- Ratio ~ 0.216
- Energy ~ 2430 keV
- $\chi^2_{\beta} = 3.3$, $\chi^2_{\alpha} = 2.4$, $\chi^2_{\beta+LS} = 1.0$

詳細 → 太畑のPoster

2.6MeV結晶にdepositした場合の分離能

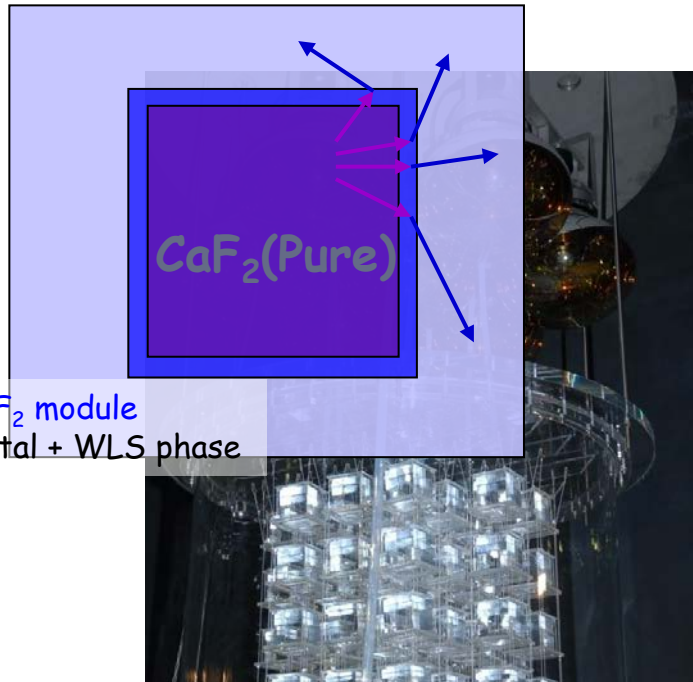


● この方法は、かなりうまくいっている

- CaF₂検出器の場合、2.6 MeV付近では $\sim 1/30$ 程度のLSで発光があれば除去可能
→ 低エネルギーにおいても有効か？

CANDLESの集光機構（結晶回り）

CANDLESの構造は、undoped CaF_2 シンチレータに最適化されているため、結構複雑



- 広範な実験計画で有用とされる材料開発を目指したい
- 液体シンチレータとか大変
- そこで目を付けたのが・・・

Scintillation光の伝搬機構

● WLS 層

- Mineralオイル(100%) + bis-MSB (0.1g/L)
- 厚さ; 5 mm
- 再発光効率 (~ 0.93)

● Veto 層

- Mineralオイル(80%)+Pseudocumene(20%) + PPO(1.0g/L) + bis-MSB (0.1 g/L)
- 大発光量 (CaF_2 と同等)

CaF₂ Emission (~280nm)



(WLS 層)

Conversion by bis-MSB (~420nm)



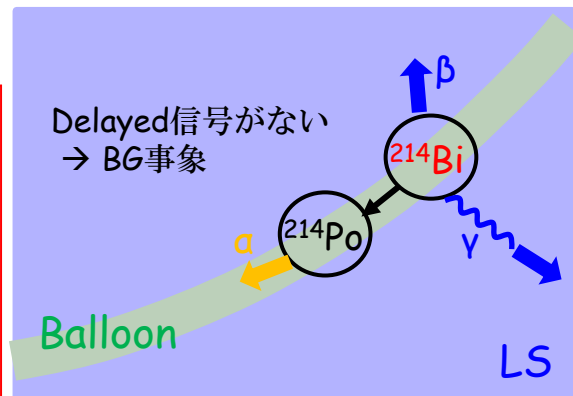
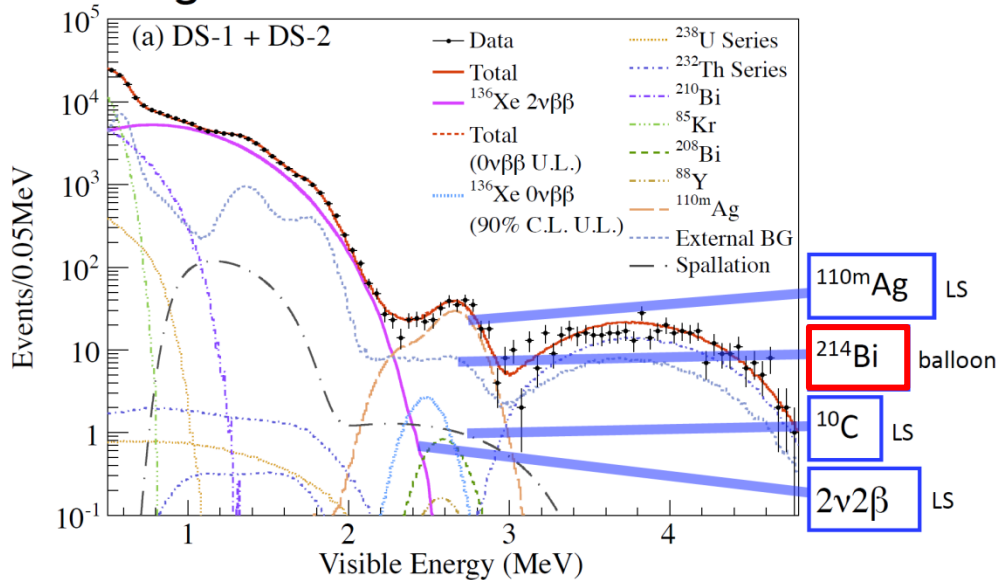
Propagate in Veto 層

PMT

A01班：KamLAND-Zen実験

昨日の井上さんのSlide

Phase-1 320kg



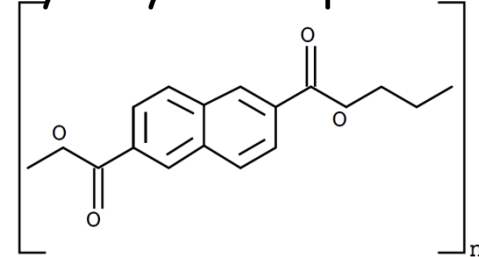
Balloonを新しくする
将来的には発光バルーン

- KamLAND-Zen実験用に開発している発光Filmを使うといいかも
 - 光量もあり、薄膜化 (Film製造) も可能
 - 熱可塑性に注目

素材	発光量(photons/MeV)	発光波長 (nm)	熱可塑性	融点(°C)
PS	10000	425	○	240
PEN [1]	10500	425	○	262

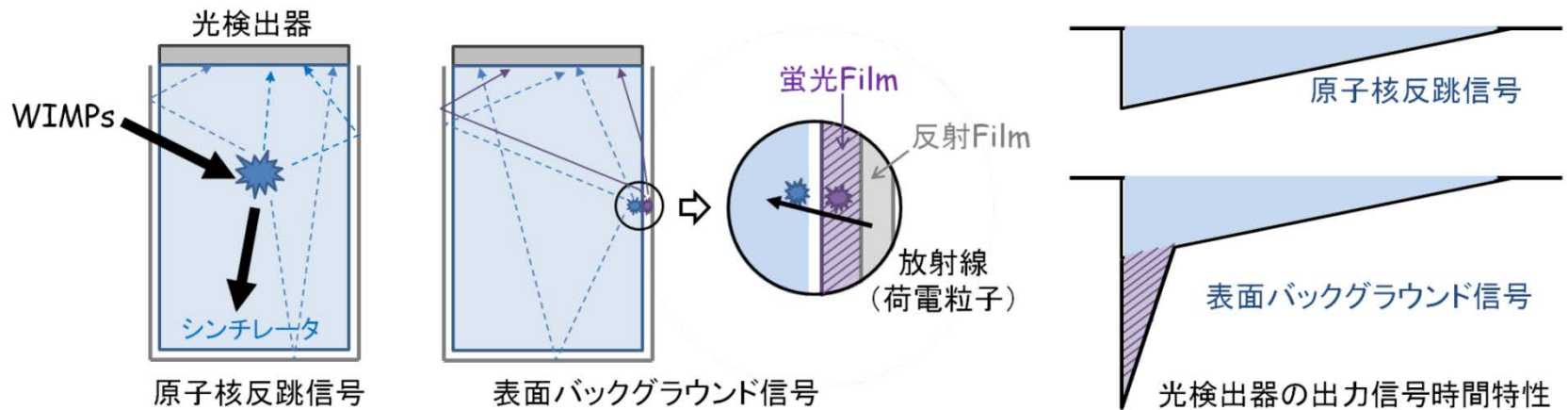
[1] http://www.teijin.com/news/2011/ebd110907_00.html

PolyEthyleneNaphthalate



新表面素材の概念

- 例：検出器の反射材表面に発光Filmを溶着させる



- Filmの発光時定数 ~20 nsecが主成分
 - 検出器としては、時定数が長いものが適している
- どのくらい光量があれば分離可能？
 - 低エネルギーの表面BG事象は、検出器外で大部分のエネルギーを失った α 線や β 線の検出器への染み込み → 結構光るか？
 - 効果は、ある程度Simulationでも評価できる → これからやってみる

薄膜発光Filmの溶着

- 各種検出器材料に熱をかけて溶着させて表面発光素材にする
- 利点
 - 色々な材料に応用できそう
- 欠点
 - 芳香族系（ベンゼン環を持ってる）なので、紫外領域の光は吸収される（再発光しない、もしくはQ.Yが極端に小さい）
 - ➔ 紫外発光の検出器にはそのままでは使えない、不向き
- 開発項目/克服しなければいけない点
 - 新たなBG源にならないか？ きっと丸藤さんが何とかしてくれる！
 - Film中の不純物の低減
 - 発光Film自身が埃等の放射性不純物を集めてしまうと意味がない
 - 熱をかけたり、加工したりでFilm発光特性、素材の性質に変化はないか？

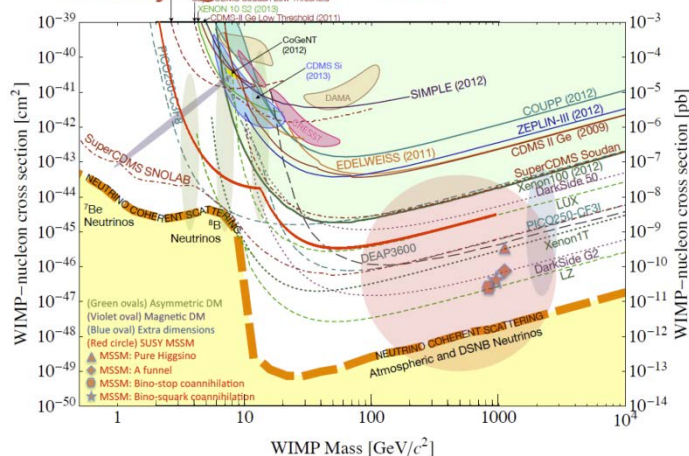


WIMPs直接探索実験への実装

- 第一歩として、最もマッチしそうなNaI(Tl)へ実装を目指す
 - 目を付けたのは、D班：高純度NaI(Tl)：PICO-LON検出器



Expected sensitivity (Elastic, 250 kg*yr)
2.1/day/kg/keV $E_{th}=1\text{keV}$



- NaI(Tl) 特性
 - 時定数：250nsec程度 ⇔ PEN-film発光時定数: ~ 20nsec
 - 発光波長：420 nm ⇔ Film (π電子) に吸収されない
- WIMPsに対する核感度も良好
- 特に、DAMA/NaIの結果に関して追試が可能

NaI(Tl)検出器の表面BGの可能性

● NaI(Tl)実験 @Boulby

- Pulse Shape Discr.を使って低エネルギー領域で原子核反跳事象を探索
 - 時定数が短い信号 = 原子核反跳
 - 原子核反跳領域に信号 (Excess)
 - 中性子線源を使った原子核反跳較正の結果とは異なる
 - NaI(Tl)表面に付着した α -emitter(^{210}Po など)の影響であるという結論だった
- 潮解性を持つので、ハウジングする必要がある、不純物を一緒に閉じ込めてしまったりする

製作時のプロセスを徹底的に管理
+
アクティブに除去する方法

V.A. Kudryavtsev, et. al,
Astroparticle Physics 17 (2002) 401

2. Anomalous fast events

The observation of anomalous fast events in the UKDMC encapsulated NaI(Tl) detectors was first reported by Smith et al. [1]. These events are faster than typical electron recoil pulses and even faster than nuclear recoil pulses [1]. Fig. 1(a) shows typical time constant distribution of events from one run with 330 kg \times days exposure of a 5.2 kg NaI(Tl) encapsulated crystal. The time constant

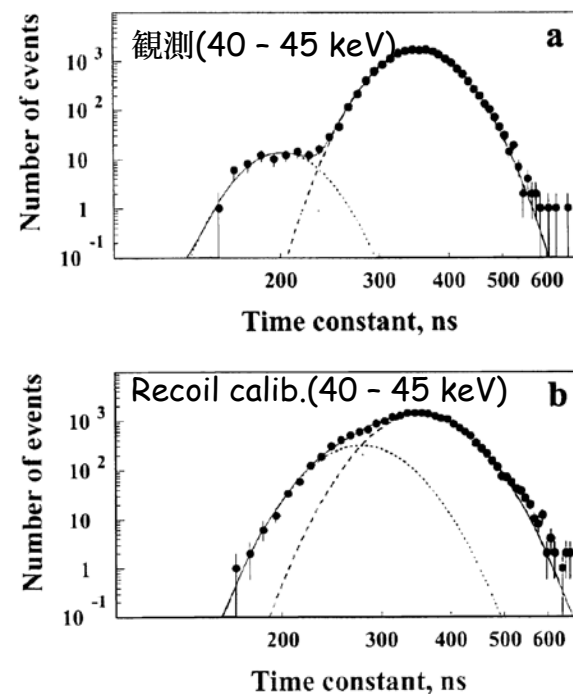
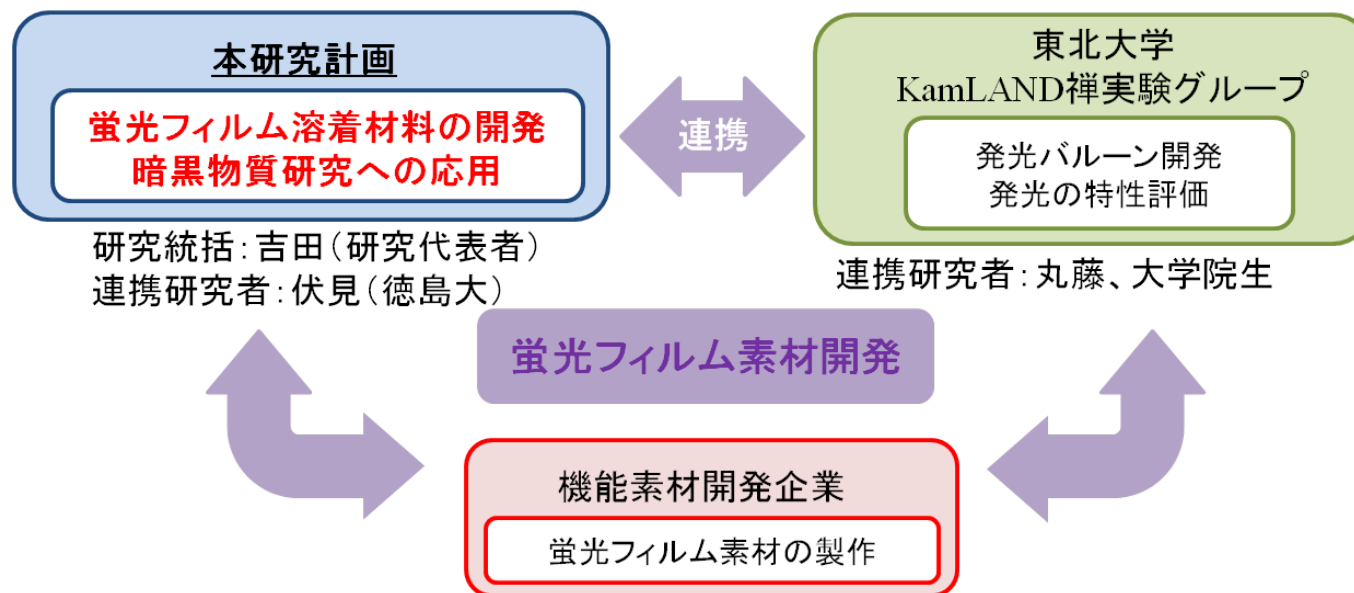


Fig. 2. (a) Time constant distribution for events with visible energy 40-45 keV from encapsulated NaI(Tl) detector, (b) similar distribution for calibration run with neutron source.

研究体制

● 連携研究者

- 丸藤裕仁（東北大学ニュートリノ）
KamLAND-Zen実験用発光フィルムの開発、その利用で協力
- 伏見賢一（徳島大学）
新素材の応用/実用で協力



その他にどんな検出器に実装できそう
か？
あればぜひ、アイデアを！

自分のところでもできるか？

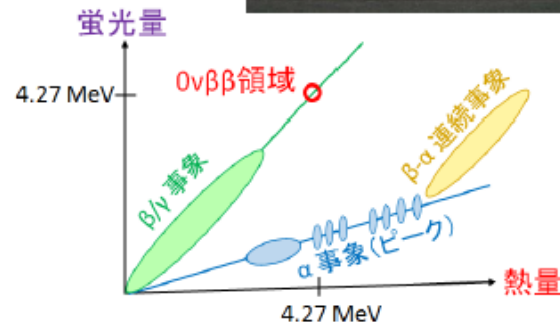
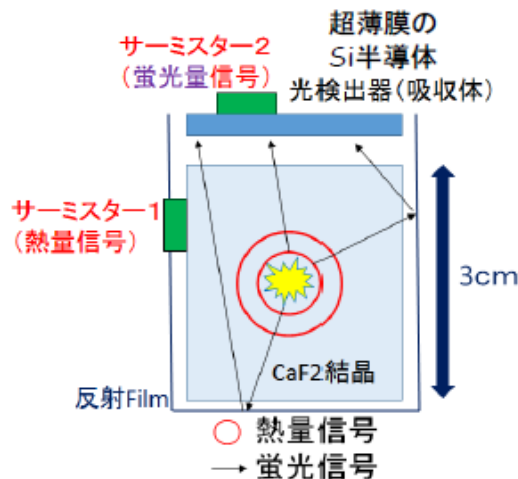
Scintillating Bolometerの原理

Undoped CaF_2 ではUV発光なのでそのままでは厳しい

◆ CRESST-II (CaWO_4), Lucifer, AMoRE

◆ $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ NIMA386 (1997) 453

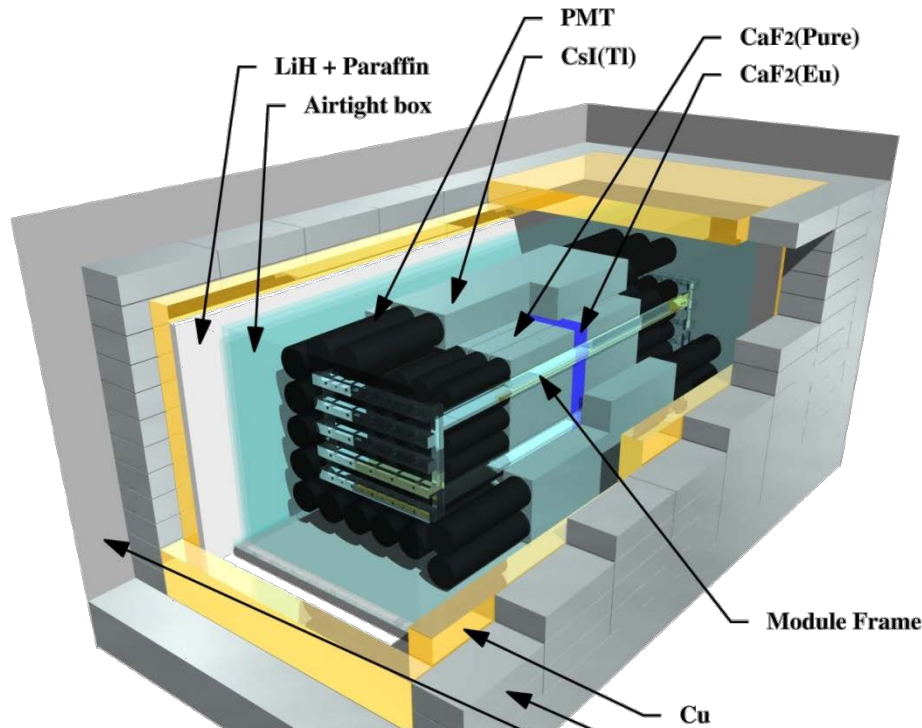
結晶 (0.3 g)、粒子弁別分離能が小さい



- 熱量に加え、蛍光量も同時に測定することで、蛍光のα線クエンチング効果を用いたα/β粒子識別を行う
- 主なBackgroundである ^{238}U のα崩壊事象(Q値=4.27MeV= $0\nu\beta\beta$ 崩壊のQ値)を排除可能

ELEGANT VI

CANDLES検出器の前身

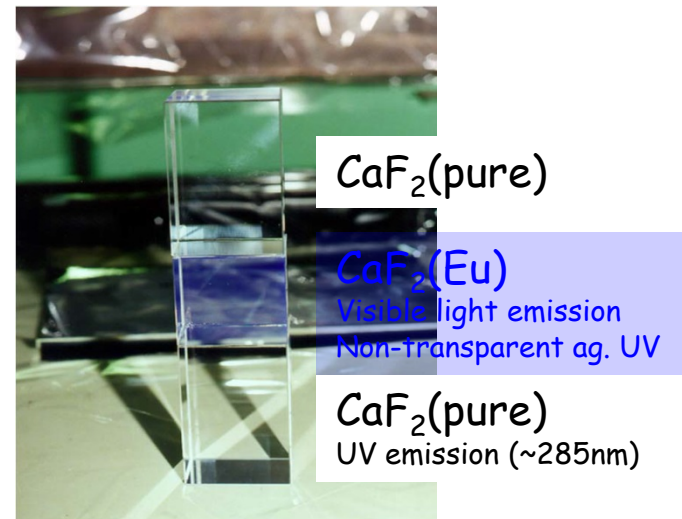


- Large mass
 - scintillator $45 \times 45 \times 45 \text{ cm}^3$
~3.5 kg ^{19}F
- 低Background
 - 高純度結晶
 - 4π active shield
 - $\text{CaF}_2(\text{Eu}) + \text{CaF}_2(\text{pure})$
roll-off ratio
 - 多結晶化
 - $\text{CsI}(\text{Tl})$ 反同時計測

**$\text{CaF}_2(\text{Eu})$ は可視光発光なのでOK
でも、不純物が・・・**

- OFHC Cu(5 cm), Pb(10 cm)
- エアータイト + N_2 gas purge
空気中のRn対策
- LiH + paraffin(15 mm), Cdシート(0.6 mm), H_3BO_3 水タンク

環境中性子対策



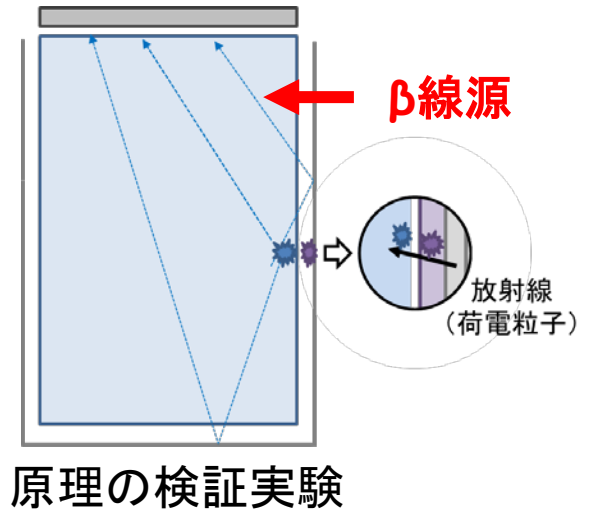
研究計画・目標

● 今年度

- 発光Film、反射材等の素材の耐熱評価
 - 発光特性、反射材反射率等の変化の有無
- 検出原理の検証実験
 - 初めはCaF₂(Eu)検出器使用(すぐできるので)
- Simulation
 - BG除去率の評価
 - 検出器デザインの最適化(厚さ等)
- 発光Filmを実装したNaI(Tl)を試作

● 2年目

- 発光Filmを実装したNaI(Tl)検出器で表面BGの除去効率測定
 - 薄膜のWindowを仕込み、β線源を使ってテスト
 - Rn-richな環境で製作し、表面BGの低減確認
 - Low-BG測定
- 発光Filmの改良
- 本計画の最終目標 → PICO-LONへの実装



まとめ

- WIMPs直接探索実験における、**表面バックグラウンド**の除去技術を開発する
 - 検出器周辺材料に薄膜発光Film（A01班技術）を組み合わせる新素材
 - 発光波長の違いから表面BG事象を同定する（A02班技術）
- 広範な実験で利用される技術の確立を目指す
- 製作時のプロセスを徹底的に管理、高純度化技術に加えて、アクティブに表面BGを除去する方法の確立
- 目標①：PICO-LON実験への実装（NaI(Tl)検出器）
- 目標②：B02班若手研究会に若手として呼んでもらう