

高純度NaI(Tl)による PICOLON宇宙暗黒物質探索実験の現状

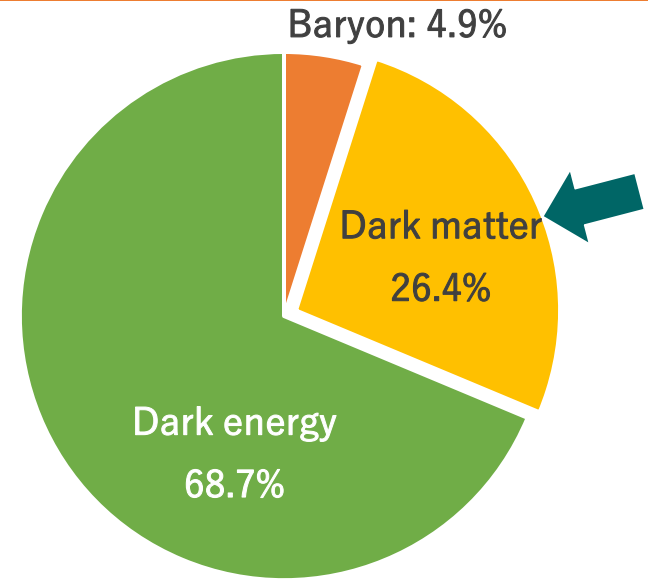
Tokushima Univ.
K.Kotera (M2)

Out Line

- | | |
|-----------------|----------|
| 1. 宇宙暗黒物質 | 4. 結果と考察 |
| 2. PICOLON計画 | 5. まとめ |
| 3. 実験のセットアップと解析 | |

宇宙暗黒物質

- 宇宙暗黒物質の探索
- 宇宙物理の背景
 - 宇宙の大規模構造の成因.
 - 全宇宙の成分のうち26.4 %を占める.
- 素粒子物理の背景
 - 標準模型は不十分.
 - 標準模型を超える究極の理論の裏付けになる可能性がある.
→未知の素粒子発見は非常に重要.

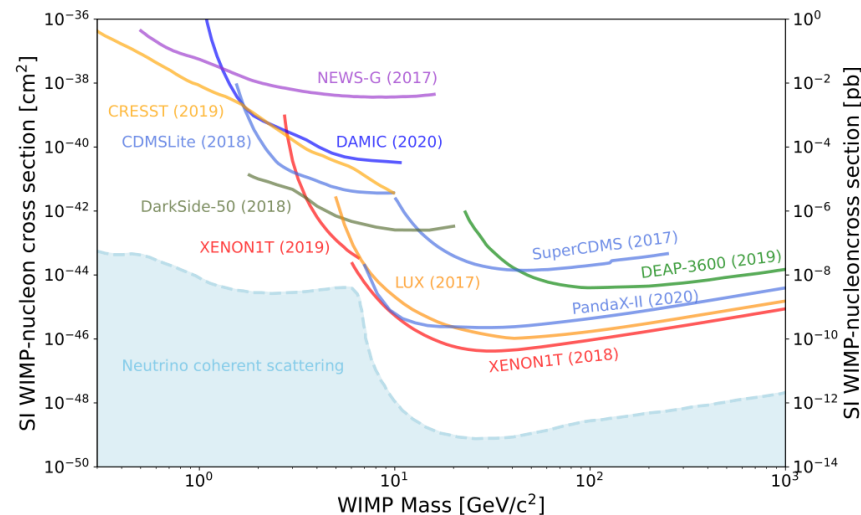


R.L. Workman et al. (Particle Data Group) Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)より作成

世界で行われている宇宙暗黒物質探索

- WIMP探索
 - 最も重要な候補の一つ.
 - 軽い(Sub-GeVオーダー)のWIMPも提唱されている.
- 探索は非常に困難
 - 低エネルギー: 数keV以下かつ、
低バックグラウンド: $10^{-4} \sim 10^{-6}$ Event/(day·kg·keV).

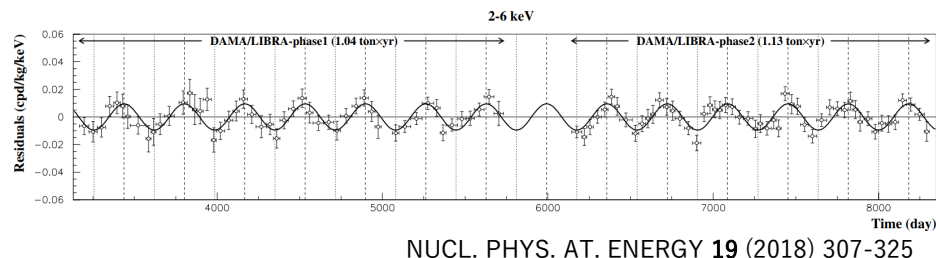
- XENONnT
 - 8.5トンの液体Xe.
Phys. Rev. Lett. **129**,161805 (2022)
 - 世界で最も高感度な検出器.
 - 宇宙暗黒物質の発見は未だされていない.



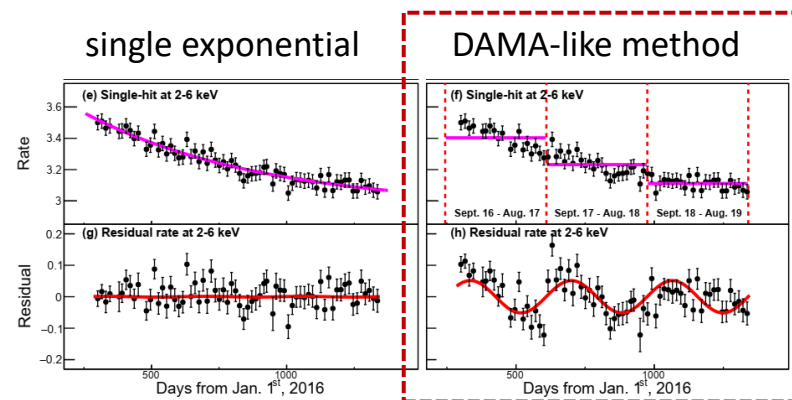
R.L. Workman et al. (Particle Data Group)
Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)

世界で行われている宇宙暗黒物質探索

- NaI(Tl)は大混乱!
- DAMA/LIBRA: いまだに主張やめず.
 - 250 kg NaI(Tl)検出器.
 - 未知の季節変動を主張. (驚異の 11.9σ C.L. !!)



- COSINE & ANAIS & SABRE
 - DAMA/LIBRAグループの直接検証.
 - ANAIS: 季節変動を否定.
 - COSINE: 逆位相の季節変動を主張.



10 Aug. 2022 arXiv:2208.05158

- NaI(Tl)全体の共通点
 - NaI(Tl)結晶のバックグラウンド濃度が高い.
 - NaI(Tl)中で最高感度であるDAMA/LIBRAでもXenonより6桁上.

- PICOLON: Pure Inorganic Crystal Observatory for Low-energy Neut(ra)lino.

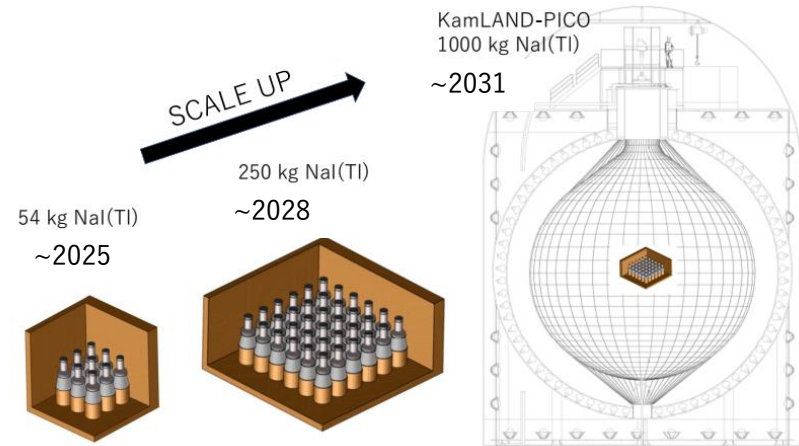
- 目標

- 高純度NaI(Tl)結晶を用いた宇宙暗黒物質探索.
- DAMA/LIBRA実験による未知の季節変動の検証.

- 現状

- Ingot #85 (2020)が結晶純化に成功.

論文にて報告済み(K.Fushimi et al. PTEP 2021 043F01)



純化手法の再現性を確認.

→同じ純化手法で新結晶Ingot #94を作成.

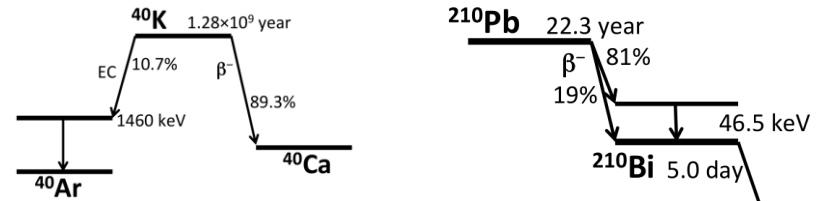
Ingot #85 (2020)	
Crystal size	7.62φ × 7.62 cm ³
²³² Th [μBq/kg]	0.3 ± 0.5
²²⁶ Ra [μBq/kg]	1.0 ± 0.4
²¹⁰ Po [μBq/kg]	< 5.7

NaI(Tl)のバックグラウンド源

- 主なバックグラウンド源: ^{nat}K , Th-chain, U-chain.

Our target value

Radioactive impurities	Target purities
^{nat}K ($^{40}\text{K} = 0.017\%$)	$< 600 \mu\text{Bq/kg}$
Th-series(^{232}Th)	$< 16 \mu\text{Bq/kg}$
U-series Middle (^{226}Ra)	$< 120 \mu\text{Bq/kg}$
U-series Bottom(^{210}Pb)	$< 50 \mu\text{Bq/kg}$



^{40}K and ^{210}Pb : 深刻なBG源となる

DAMA: NIM A592 (2008) 297.
 ANAIS,SABRE: Talk poster in TAUP2021.
 COSINE: Talk poster in TAUP2021.

NaI(Tl)を用いた4つの探索グループにおけるNaI(Tl)結晶のバックグラウンド濃度と我々の目標値

	DAMA	COSINE	ANAIS	SABRE	PICOLON	
					Ingot#85	goal
^{nat}K [$\mu\text{Bq/kg}$]	< 600	< 1060	$545\sim 1200$	120	< 600	600
^{232}Th [$\mu\text{Bq/kg}$]	$2\sim 31$	$2.5\sim 35$	~ 4	0.8	0.3 ± 0.5	10
^{226}Ra [$\mu\text{Bq/kg}$]	$8.7\sim 124$	$11\sim 451$	~ 10	5	1.0 ± 0.4	10
^{210}Pb [$\mu\text{Bq/kg}$]	$5\sim 30$	$10\sim 3000$	$740\sim 3150$	360	< 5.7	50

The DAMA/LIBRAグループの結晶は世界最高純度！！

実験のセットアップ

- Ingot #85 & Ingot #94 →それぞれ検出器を作成して別々のシールドヘインストール.
Low BG PMT: R11065-20



Ingot#94 (crystal)



Detector(#94)



Shield (# 94)

1. 2つの検出器からDAQ triggerを生成.
2. 3つの線源(^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co)でエネルギー較正.
3. 約1か月バックグラウンド測定した.



Shield (# 85)

データ解析: α -ray

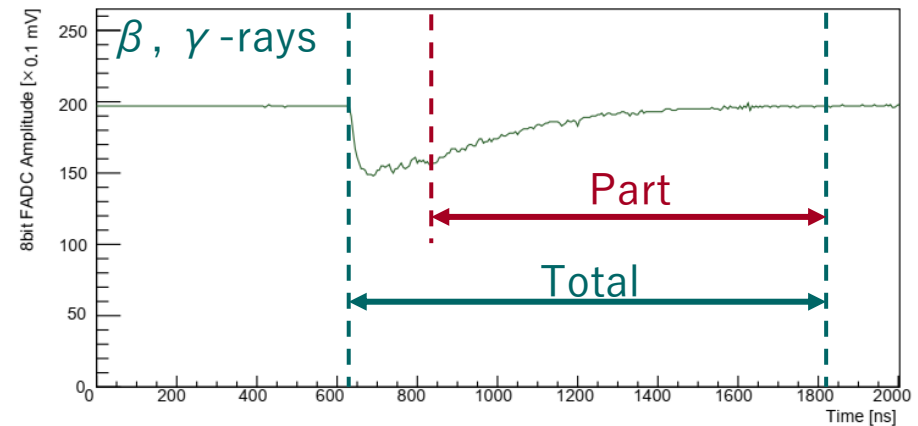
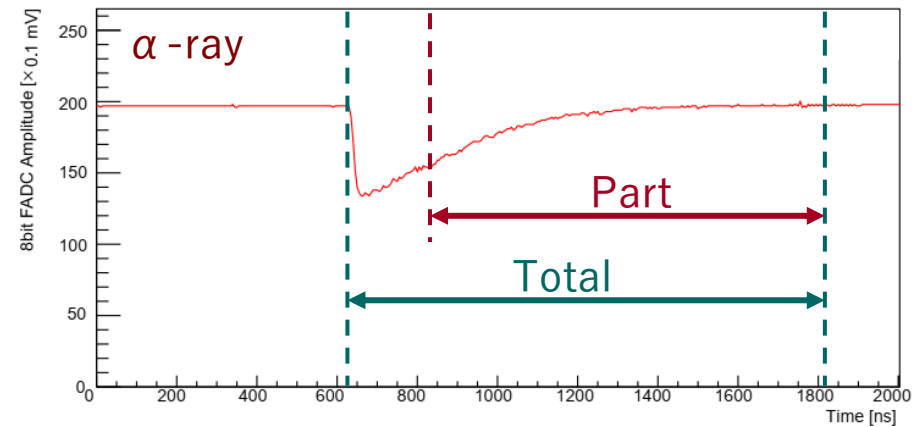
- α 線イベントを抽出
- 波形弁別法(Pulse Shape Discrimination: PSD)を利用.

- α -ray & β, γ -rays' events:
 $\tau_{\alpha} \sim 190$ ns, $\tau_{\beta, \gamma} \sim 230$ ns.

PSD Ratio: R_{PSD}

$$R_{\text{PSD}} = \frac{Q_{\text{Part}}}{Q_{\text{Total}}} = \frac{\int_{200 \text{ ns}}^{1200 \text{ ns}} I(t) dt}{\int_{0 \text{ ns}}^{1200 \text{ ns}} I(t) dt}$$

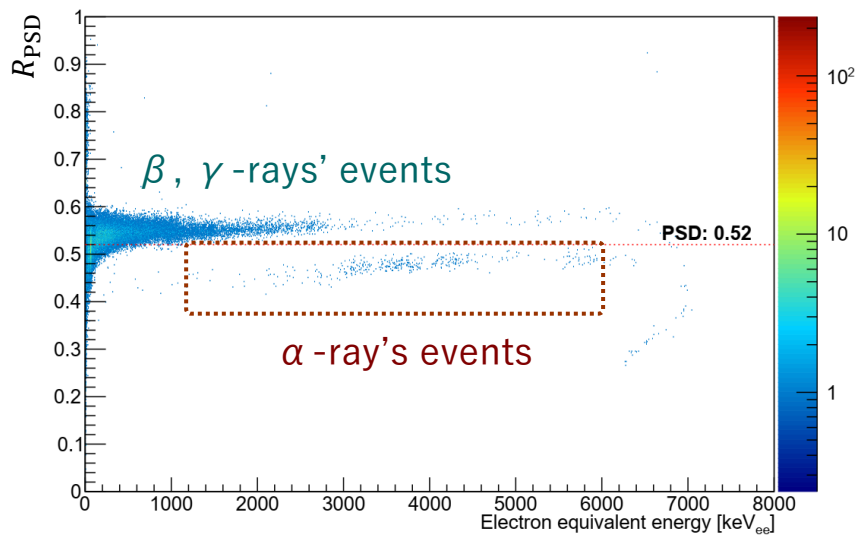
Waveform (α and β, γ event)



データ解析: α -ray

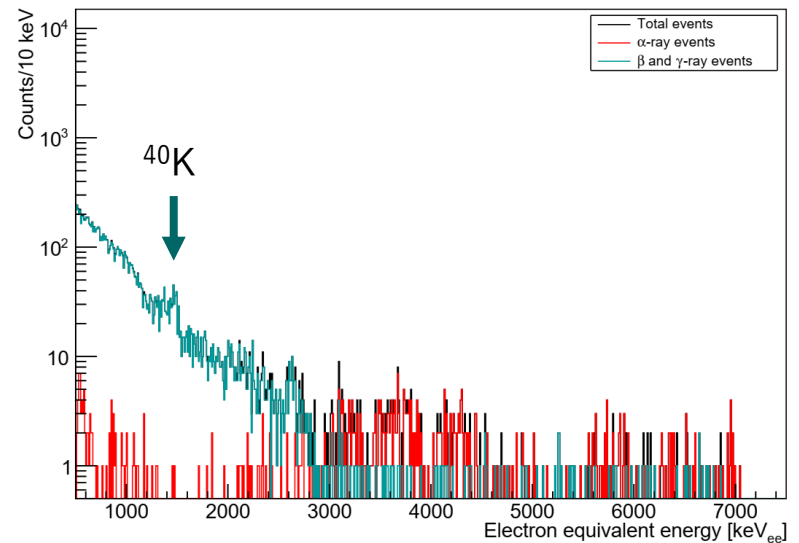
- α 線イベントの抽出.

PSD Ratio for Electron equivalent energy.



extract

Energy spectrum after PSD.

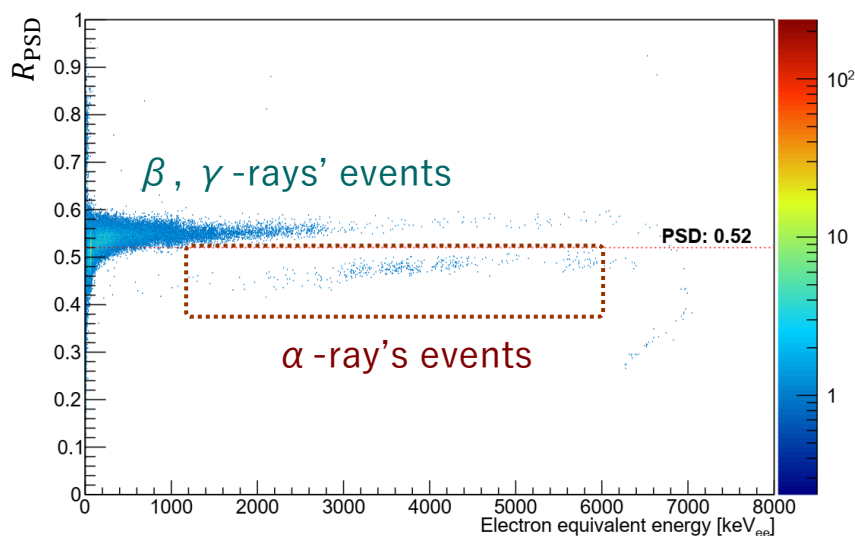


Ingot #94: 28.2596 day \times 1.344 kg

データ解析: α -ray

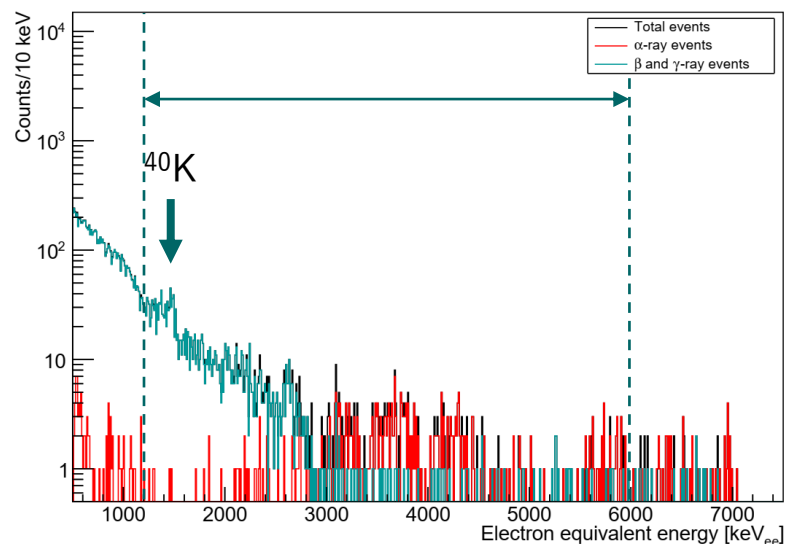
- α 線イベントの抽出.
- 抽出の条件
 - PSDに対する閾値: $R_{\text{PSD}} < 0.52$.
 - エネルギー領域に対する閾値: 1200~6000 keV_{ee}.
 - 波形弁別法による抽出の能力: 5.52σ .

PSD Ratio for Electron equivalent energy.



extract

Energy spectrum after PSD.

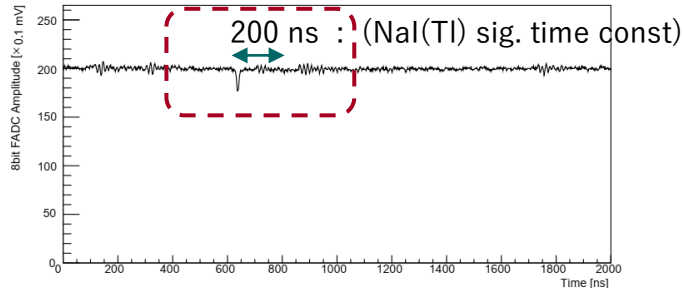


Ingot #94: 28.2596 day \times 1.344 kg

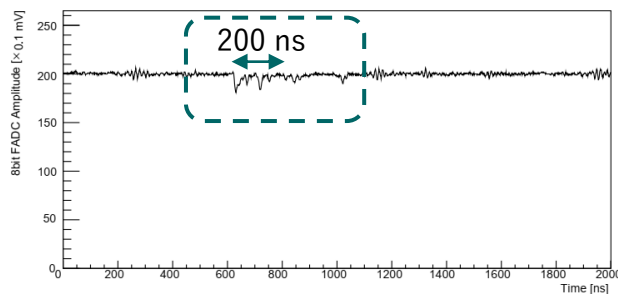
データ解析: 低エネルギー域($\approx 100 \text{ keV}_{ee}$)

- 低エネルギー域($\approx 100 \text{ keV}_{ee}$)ではPMT由来のノイズ信号が混入.
→2つのノイズ除去手法を利用.
- Single noise reduction:
 - 既存の除去手法.
 - ノイズ信号とNaI(Tl)信号の波形の違いを利用する.

single pulse noise event reduction



ノイズ信号: **単発のパルス**

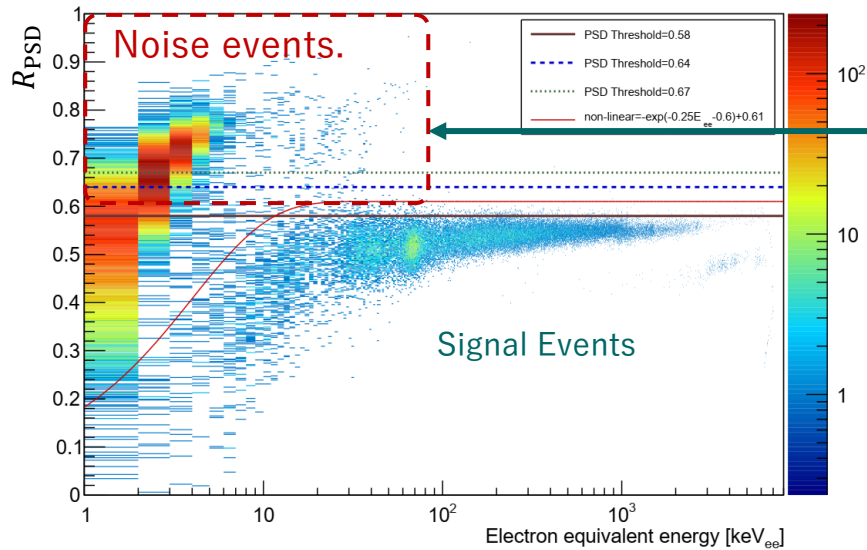


NaI(Tl)信号: **たくさんのパルス**

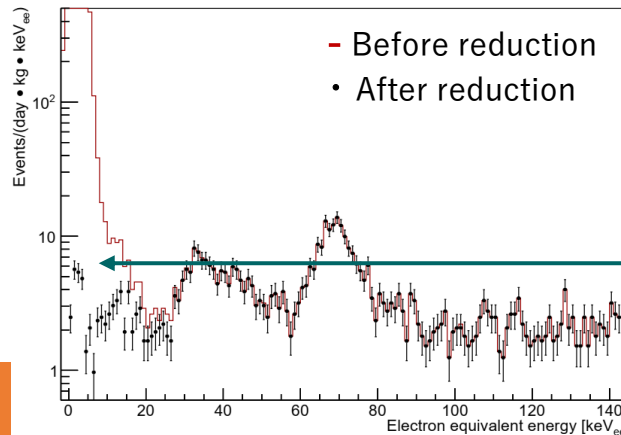
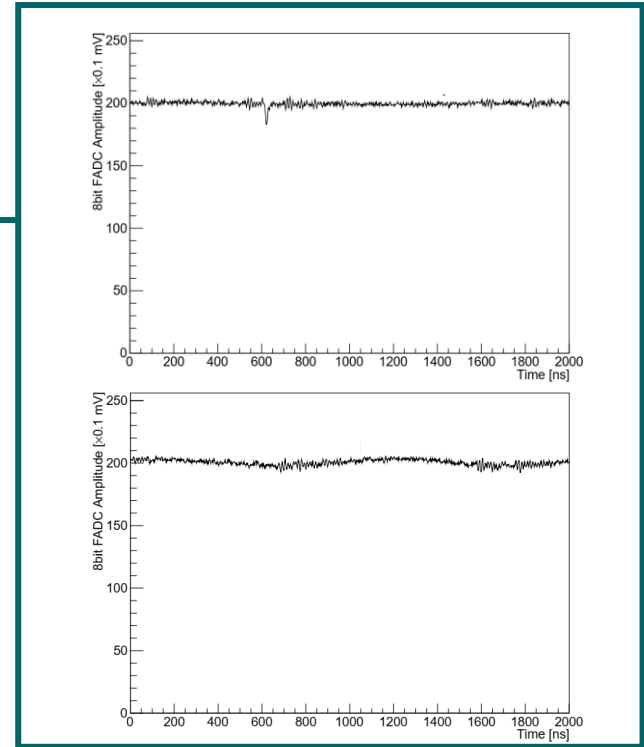
データ解析: 低エネルギー域 ($\approx 100 \text{ keV}_{ee}$)

- PSDを用いたノイズ除去

noise reduction using PSD (new reduction method)



Noise events: $R_{PSD} > 0.64$



ノイズ除去: 効果あり.

ただし、 3 keV_{ee} のノイズは残存.

解析結果: α -ray

- 5つの明確なピークを確認

	RIs	Energy Range [keV _{ee}]	Events
A	$^{238}\text{U}(\text{U}) + ^{232}\text{Th}(\text{Th})$	2210-2900	33±6
B	$^{234}\text{U}(\text{U}) + ^{230}\text{Th}(\text{Th}) + ^{226}\text{Ra}(\text{U})$	2950-3350	72±9
C	$^{228}\text{Th}(\text{Th}) + ^{224}\text{Rn}^*(\text{U}) + ^{210}\text{Po}(\text{U})$	3380-3970	118±11
D	$^{218}\text{Po}(\text{U}) + ^{212}\text{Bi}(\text{Th}) + ^{224}\text{Rn}^*(\text{U}) + ^{220}\text{Rn}(\text{Th})$	4000-4480	71±9
E	$^{216}\text{Po}(\text{Th})$	4690-5150	15±4

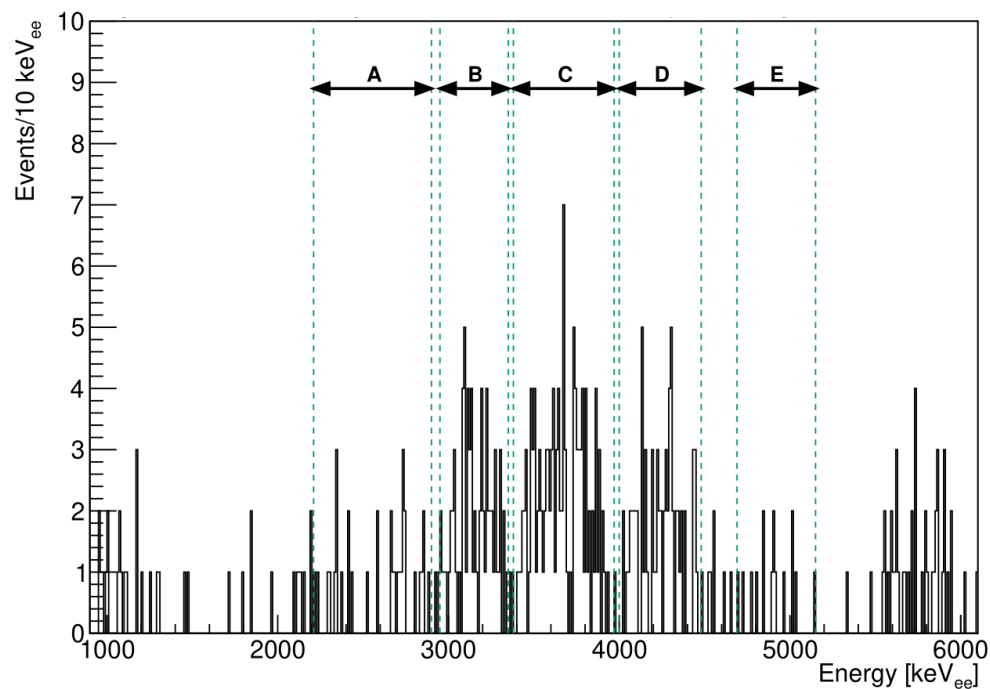
$$\text{Concentration} = \frac{\text{Counts}}{\text{LiveTime} \times \text{IngotMass}}$$

Ingot #94: 28.2596 day × 1.344 kg



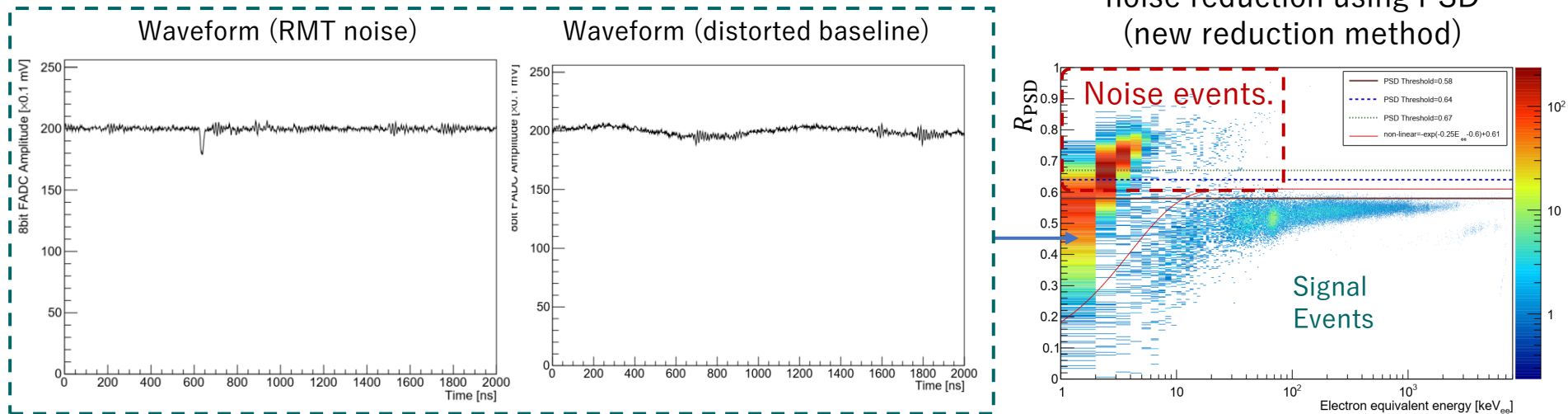
RI	BG濃度[μBq/kg]	Goal
Th-chain (^{232}Th)	4.6±1.2	<10
^{226}Ra	8.7±1.5	<10
^{210}Po	28±5	<50

目標達成!



3 keV_{ee} 以下の残存ノイズについて

- ベースラインの揺らぎによりPSDが変動
→ノイズイベントがNaI(Tl)イベントと混ざるためノイズ除去効率が低下する。



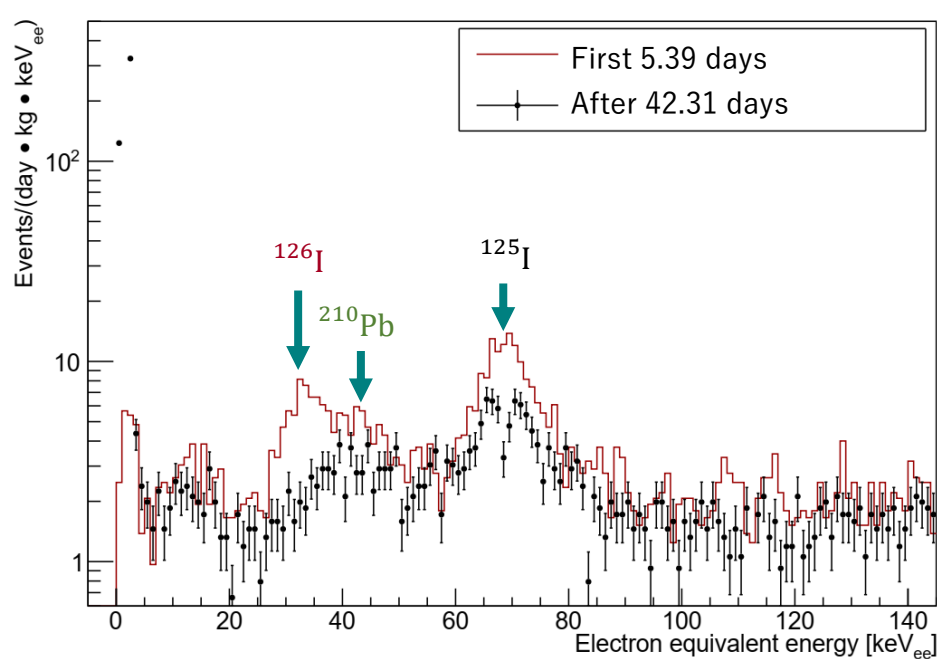
- 機械学習を利用したノイズ除去を行いたい (進行中！！)

解析結果: 低エネルギー域

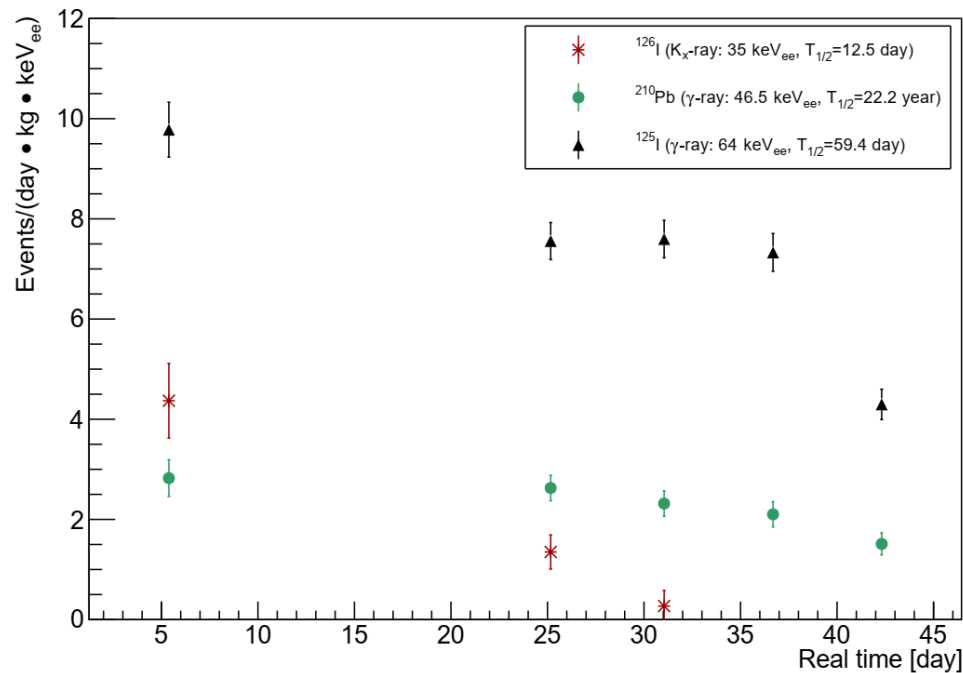
RI	Energy	$T_{1/2}$
^{126}I	35 keV _{ee} (x-ray)	12.5d
^{210}Pb	46.5 keV _{ee} (γ -ray)	22.2y
^{125}I	64 keV _{ee} (γ -ray)	59.4d

- 3つのピークを確認(^{125}I 、 ^{126}I 、 ^{210}Pb).
- ^{125}I 、 ^{126}I : 時間経過によるBG濃度の減少を確認

Spectral comparison



Temporal variation of RI concentration



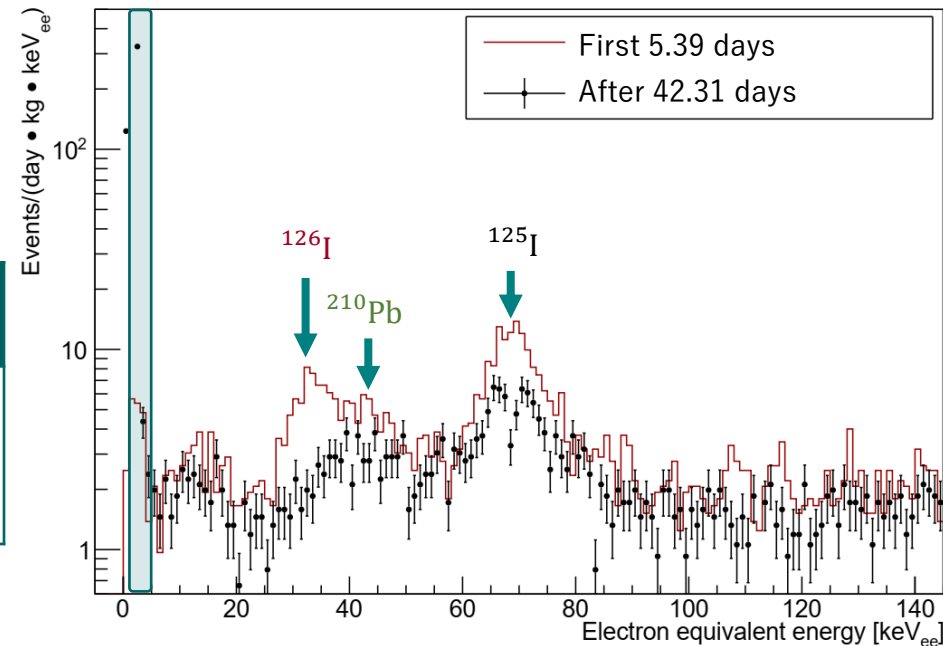
解析結果: 2-6 keV_{ee}のバックグラウンド濃度

- 探索に必要な2-6 keV_{ee}におけるBG濃度を計算
- 最初の5.39 日間(Real Time)のデータを使用.
- 3 keV_{ee}:ノイズイベントが多い.
 - 3つのエネルギー区間で計算.

区間 [keV _{ee}]	BG濃度 (90 % C.L.) Events/(day · kg · keV _{ee})
2~6	3.42 ± 0.42
2~4	5.11 ± 0.69
4~6	1.73 ± 0.59

DAMA/LIBRAの濃度の2~5倍程度

Spectral comparison



まとめ

- Ingot#85に続き、高純度なNaI(Tl)結晶の作成に成功。
→結晶の純化手法の再現性も確認。

	DAMA/LIBRA (NIM A592 (2008) 297.)	Ingot #85 (2020)	Ingot #94 (This work)
Crystal size	$10.2 \times 10.2 \times 25.4 \text{ cm}^3$	$7.62\phi \times 7.62 \text{ cm}^3$	
^{232}Th [$\mu\text{Bq/kg}$]	2~31	0.3 ± 0.5	4.6 ± 1.2
^{226}Ra [$\mu\text{Bq/kg}$]	8.7~124	1.0 ± 0.4	8.7 ± 1.5
^{210}Po [$\mu\text{Bq/kg}$]	5~30	< 5.7	28 ± 5

- **NaI(Tl)結晶を用いた高感度な宇宙暗黒物質探索装置の建設が可能に！**
- BG Rate: 約 2 ~ 5 Events/(day · kg · keV_{ee}) (90 % C.L., 4-6 keV_{ee})

区間 [keV _{ee}]	BG濃度 (90 % C.L.) Events/(day · kg · keV _{ee})
2~6	3.42 ± 0.42
2~4	5.11 ± 0.69
4~6	1.73 ± 0.59

現在論文執筆中!



- 残る検出器中の主なバックグラウンド源: PMT

Purification of NaI

- 再結晶+イオン交換樹脂によるバックグラウンド源の除去



- 再結晶

- 100 °CのNaI(Tl)飽和水溶液を作成.
- ゆっくり冷却しカリウム(KI)を除去.
- ろ過により析出したNaI結晶を取り出した.

- イオン交換樹脂

- 鉛に有効な2種類のイオン交換樹脂(“C”, “D”)を使用.
※窒素ガス入のグローブボックス下にて作業.

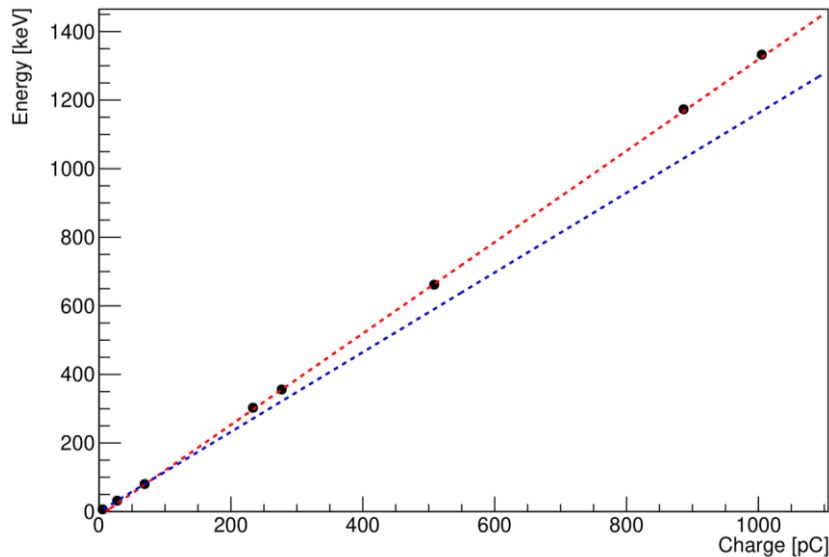


Energy calibration

- Ingot #94

--- : Calibration Boundary

Charge vs Energy



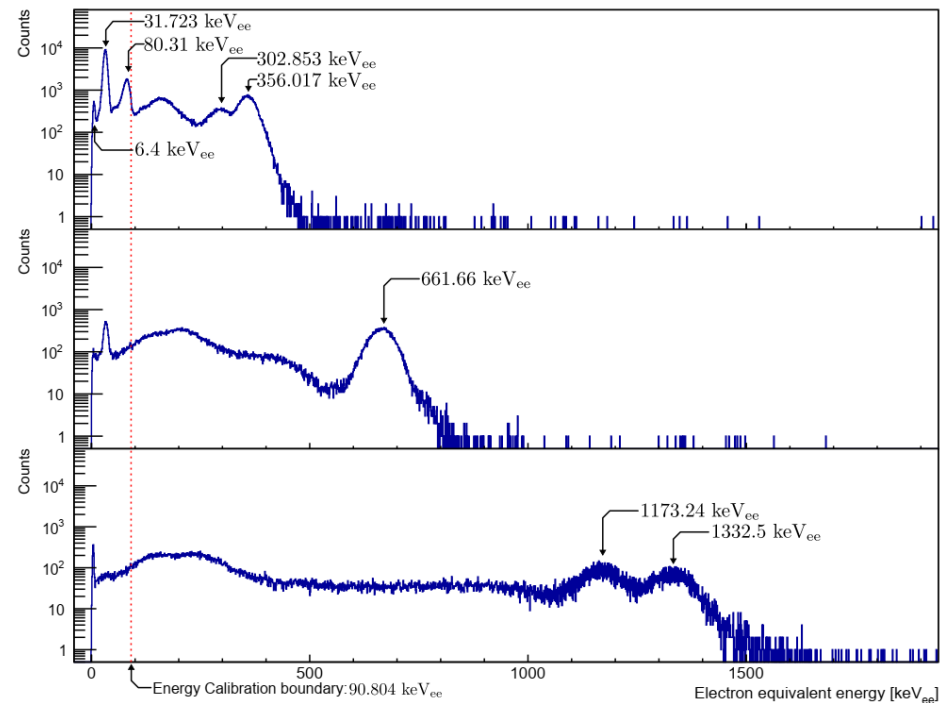
Low Energy (<100 keV peaks):

$$E_{\text{Low}} = p_0 Q = 1.1620Q$$
$$p_0 = 1.1620 \pm 0.0005 \text{ [keV/pC]}$$

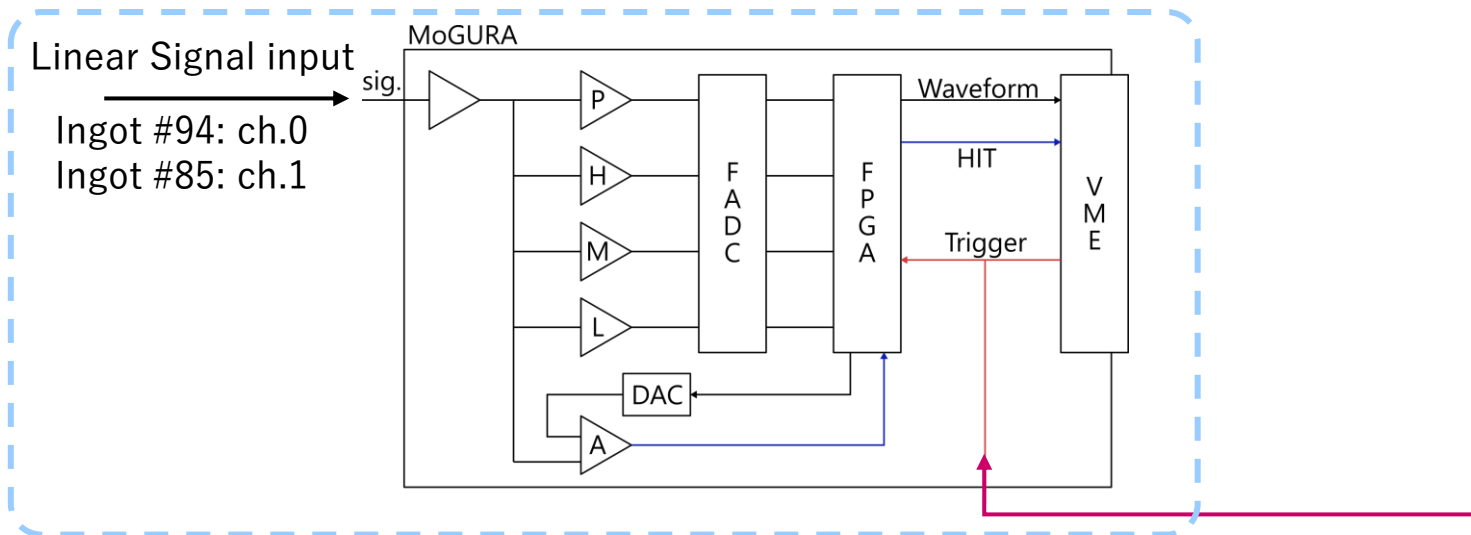
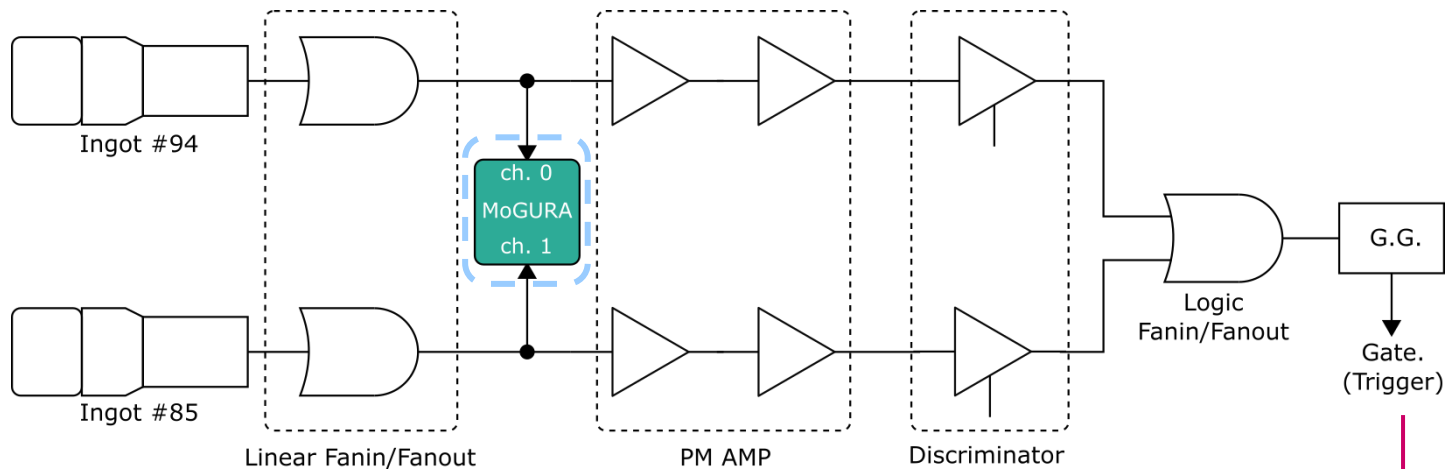
High Energy (≥ 100 keV peaks):

$$E_{\text{Hi}} = p_0 Q + p_1 = 1.3318Q - 13.3$$
$$\begin{cases} p_0 = 1.3318 \pm 0.0008 \text{ [keV/pC]} \\ p_1 = -13.3 \pm 0.4 \text{ [keV]} \end{cases}$$

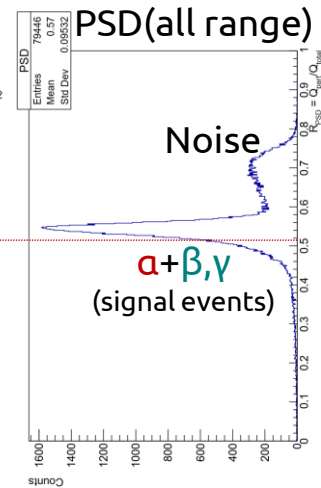
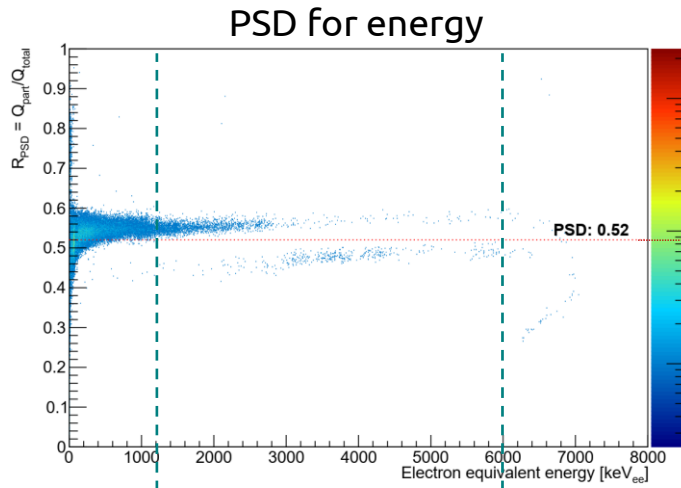
Spectrum After Energy Calibration



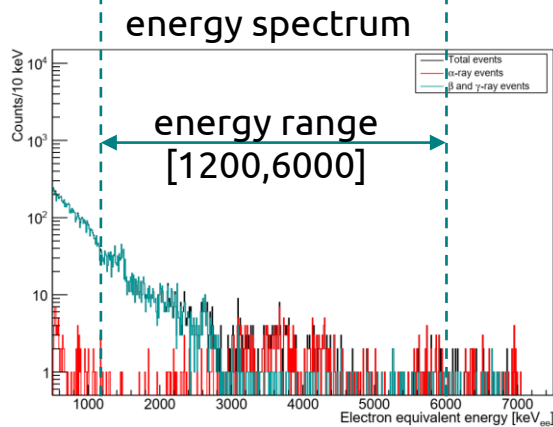
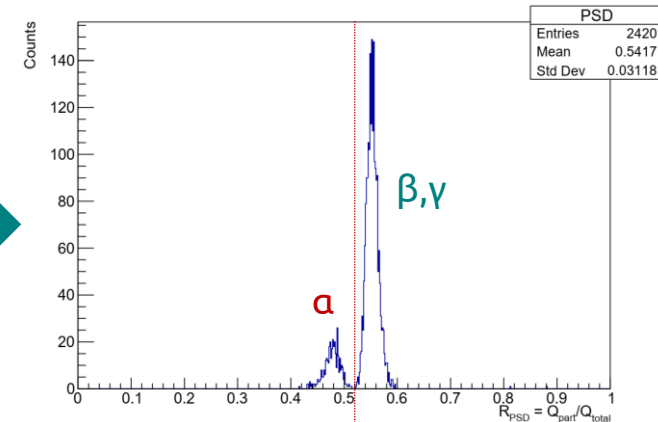
- Both signals of two detectors make a DAQ trigger.



PSD ability

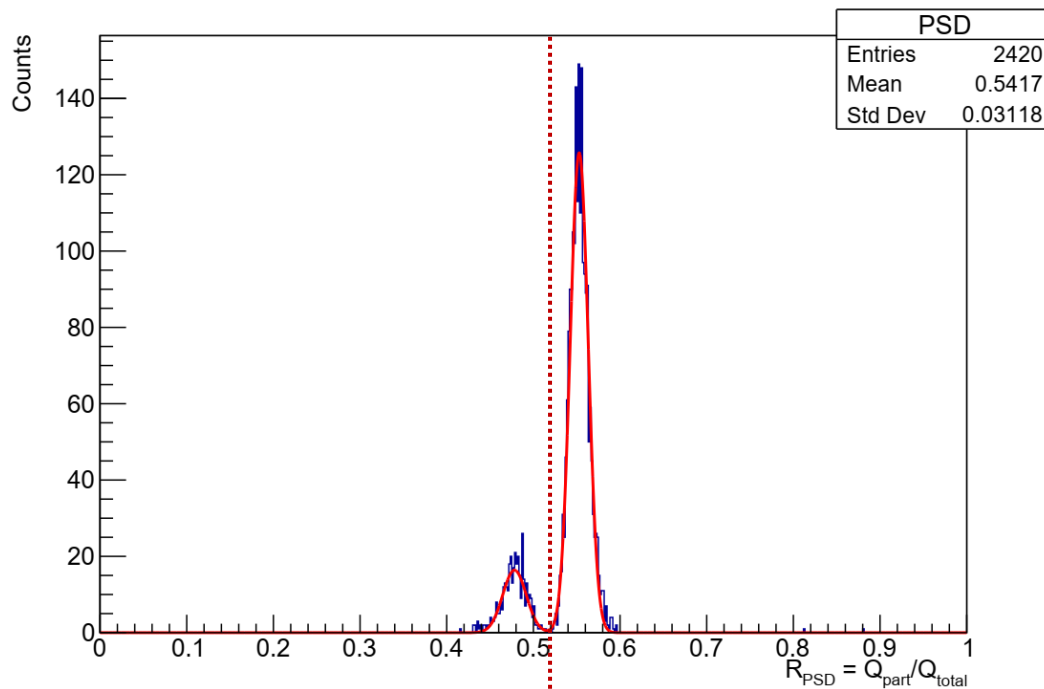


PSD for [1200, 6000] keV_{ee}



PSD threshold
for α -events
(=0.52)

PSD ability



PSD threshold
for α -events
(=0.52)

Obtained parameters:

$$\sigma_{\alpha} = 0.013534$$

$$\mu_{\alpha} = 0.478197$$

$$\mu_{\beta,\gamma} = 0.552893$$

Therefore, PSD ability is

$$\frac{\Delta\mu}{\sigma_{\alpha}} = \frac{|\mu_{\alpha} - \mu_{\beta,\gamma}|}{\sigma_{\alpha}}$$

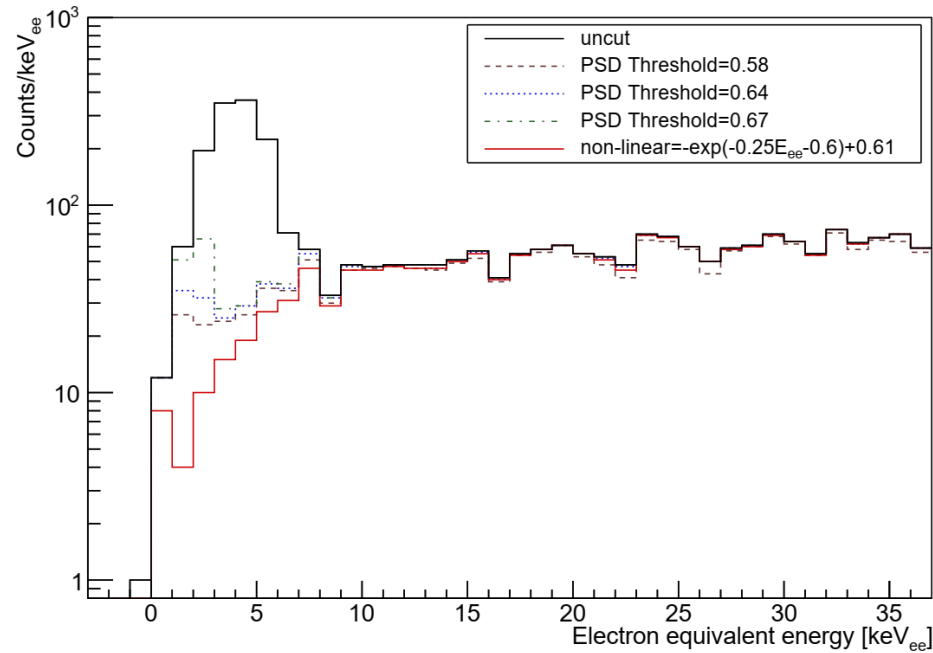
$$= \frac{|0.478197 - 0.552893|}{0.013534}$$

$$= 5.52 \sigma$$

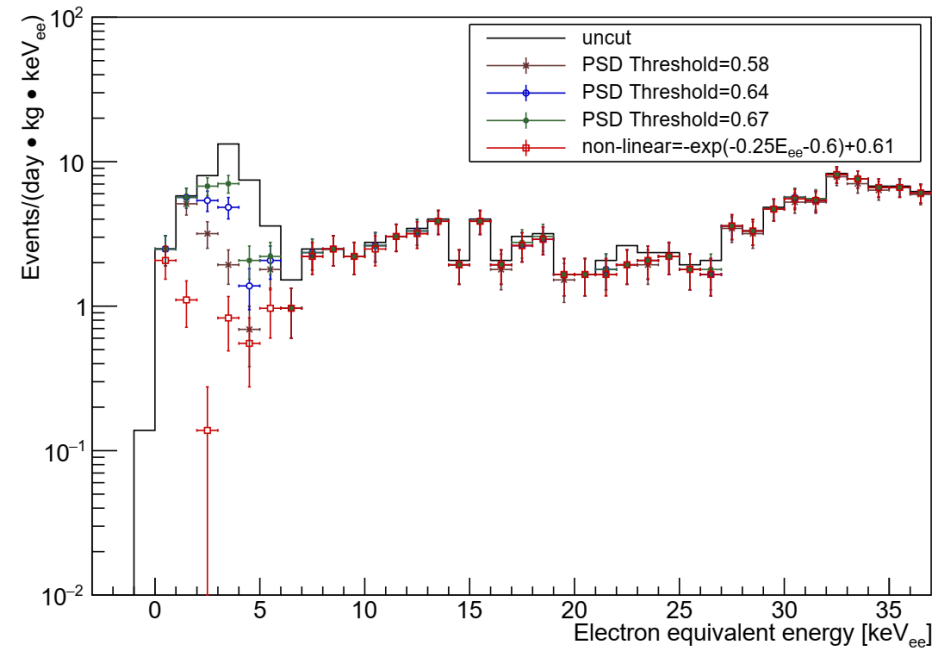
Data Analysis(Low Energy region)

- PSD Noise reduction.

Changes in ^{60}Co spectrum due to cut conditions



Changes in BG spectrum due to cut conditions

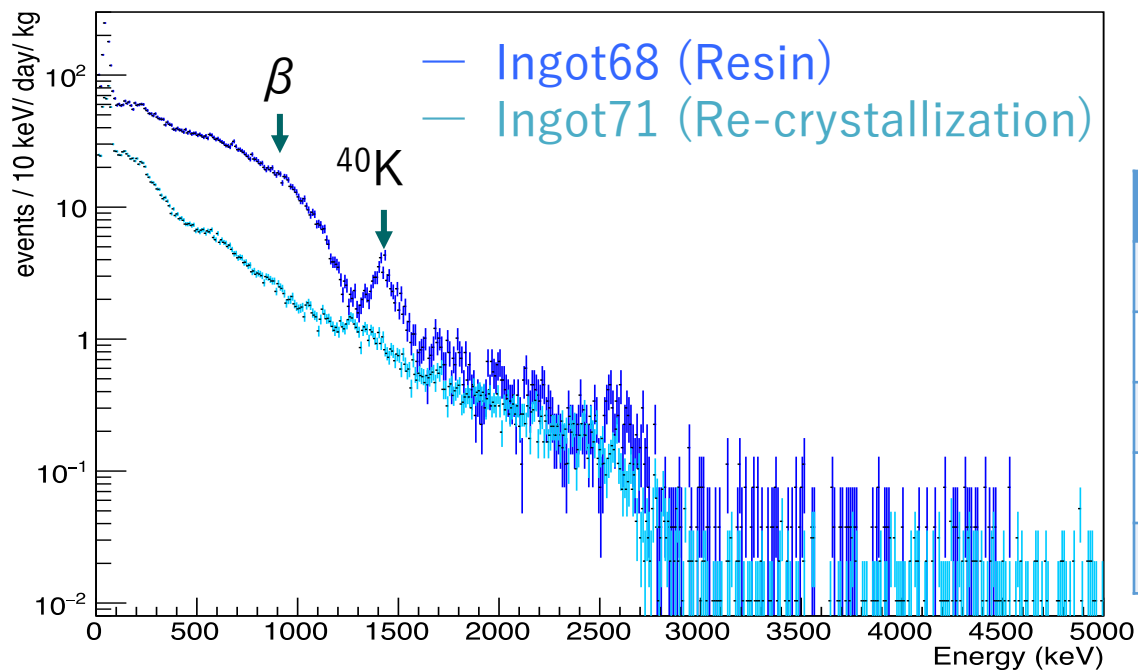


We set the PSD reduction threshold to 0.64.

Background

- The evidence for our present NaI(Tl) contains no ^{40}K .
- Ingot #68 is a clear excess due to the beta-ray from ^{40}K

Analysis
by Hirata & Takemoto

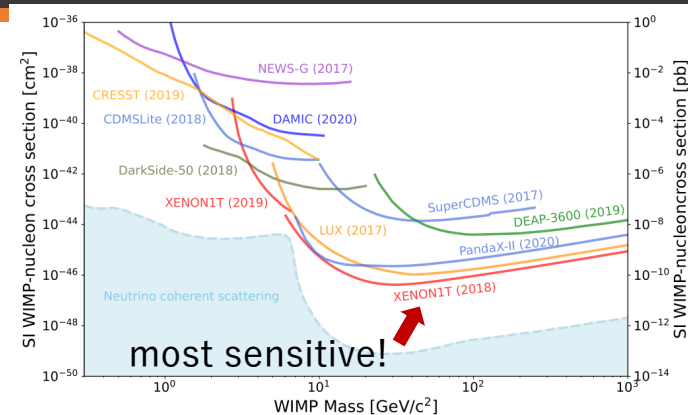


	Ingot68	Ingot71
natK(ppb)	~120	~20
^{232}Th (ppt)	2.1 ± 0.6	1.7 ± 0.2
^{238}U (ppt)	4.6 ± 0.5	9.7 ± 0.8
^{210}Pb (mBq/kg)	~7500	~1100
Events/(day·kg·keV)	~10	~2

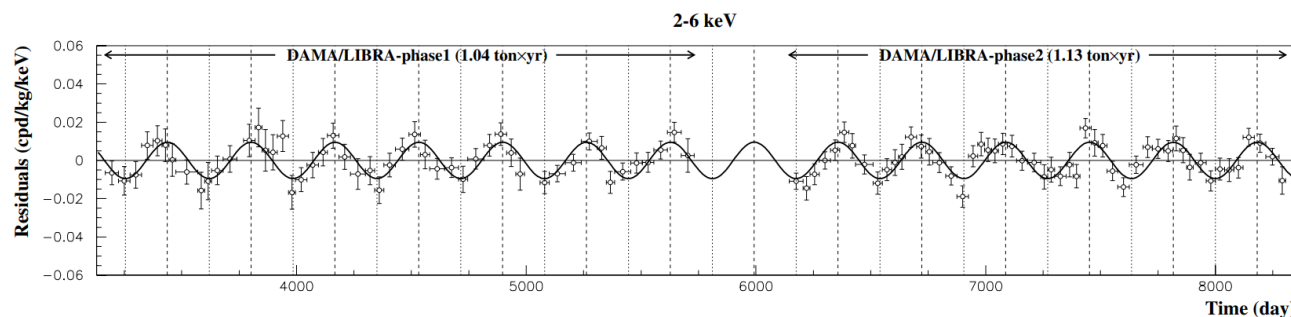
Dark Matter Experiments in the World

- Xenon1T experiment
 - Target: 1-ton liquid Xe
 - The most sensitive detector in the world.

- DAMA/LIBRA experiment
 - Target: 250 kg NaI(Tl)
 - They report unknown annual modulation (11.9 σ C.L. !!)



R.L. Workman et al. (Particle Data Group)
Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)



NUCL. PHYS. AT. ENERGY **19** (2018) 307-325

- COSINE & ANAIS experiments
 - Direct verification of DAMA/LIBRA.
 - They ruled out the possibility of annual modulation.
 - BG of NaI(Tl) crystals is high and direct verification is insufficient.
 - annual modulation with opposite phase.(arXiv:2208.05158)

Dark Matter

- Dark Matter (DM)
 - 20% of the total mass energy comes from DM.
 - It cannot be observed optically.
- Cold Dark Matter(CDM, e.g. **WIMP** and **Axion**) is the main component of DM.

