

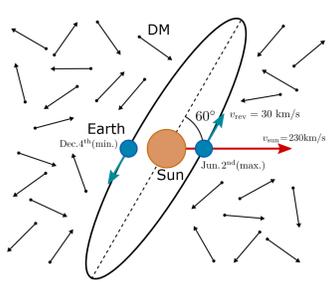
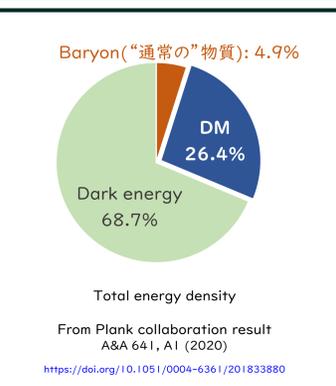
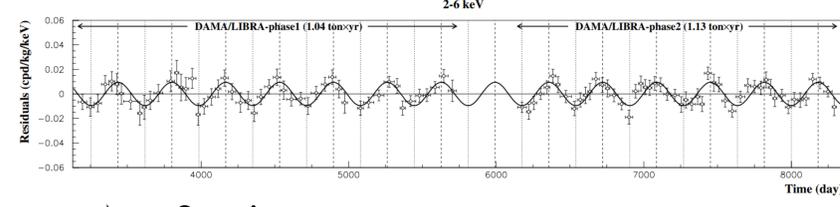
K. Kotera^(A), K. Fushimi^(B), D. Chernyak^(C), H. Ejiri^(D), K. Hata^(E), R. Hazama^(F), T. Iida^(G), H. Ikeda^(E), K. Imagawa^(H), K. Inoue^(E,I), H. Ito^(J), T. Kishimoto^(K), M. Koga^(E,I), A. Kozlov^(L), K. Nakamura^(L,M), R. Orito^(B), T. Shima^(D), Y. Takemoto^(I,J), S. Umehara^(D), Y. Urano^(N), Y. Yamamoto^(B), K. Yasuda^(H), S. Yoshida^(K)
(by PICOLON collaboration)
Grad school of Tokushima Univ.^A, Tokushima Univ.^B, Univ. of Alabama^C, RCNP^D, RCNS^E, Osaka Sangyo Univ.^F, Tsukuba Univ.^G, I.S.C.Lab^H, IPMU^I, Tokyo Univ. Sci.^J, Osaka Univ.^K, MPhI^L, Osaka Butsuryo Univ.^M, Tohoku Univ.^N

PICOLON実験

(Pure Inorganic Crystal Observatory for Low-energy Neutr(al)ino)

NaI(Tl)検出器を用いた宇宙暗黒物質探索:

- 宇宙暗黒物質(DM): 光学的に観測できない.
- WIMPは重要な候補→季節変動を調べる.
- DAMA/LIBRAが季節変動を報告.
↔ COSINE, ANAIS:DM由来の季節変動の可能性を排除.
- DAMA/LIBRA:
「低バックグラウンド(BG)NaI(Tl)検出器を用いた検証が必須」.

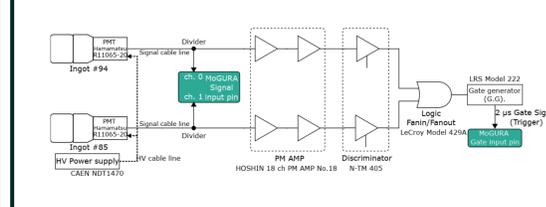
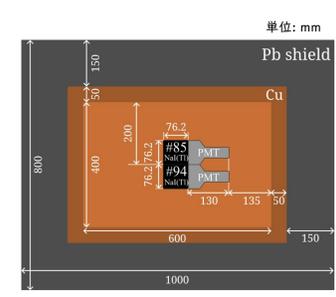


Reference
[1] R. Bernabei et al. Nucl. Phys. A, Energy, 307-325, (2018).
[2] K. Fushimi et al. Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 043F01.

実験セットアップ

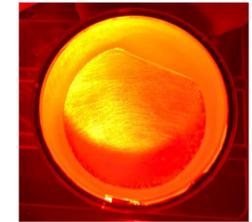
DAQ

- Ingot#94と#85結晶を同一シールドにインストール.
- OR Triggerよりデータ収集.



Exposure

- 156.0 d × 1.3 kg (Real time: 192.6 d)

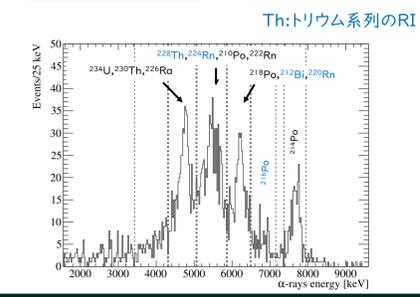


Ingot#94 (crystal) Φ 3 inch × 3 inch

結晶中のBG

40K, 232Th(Th系列), 226Ra, 210Pb(U系列).
• 40K, 210Pb: 長い半減期→深刻なBG汚染源.

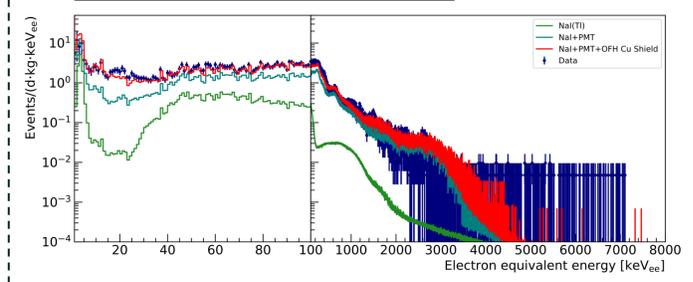
データ解析: 波形弁別法を用いてα事象を抽出



Activity/group [μBq/kg]	PICOLON		
	#94 (1st result) ^[3]	#94 (This work)	Comp. Goal
natK	≤ 1000 ^[2]	≤ 600 ^[2]	~1000
232Th	4.6 ± 1.2 ^[2]	7.4 ± 0.7	< 10
226Ra	7.9 ± 4.4 ^[2]	12.6 ± 0.9	~10
210Pb	1.9 ± 6 ^[2]	15 ± 2	< 50
BG Rate (dru)	~3 ^[2]	~1 (~10)	> 1

BG安定性を確認!

結晶中のBGをシミュレーション:光伝播とPMT応答を考慮してfit



- NaI(Tl)結晶
- Ingot#85と同等のBGスペクトルを確認.
 - 40K濃度 < 300 uBq/kg.

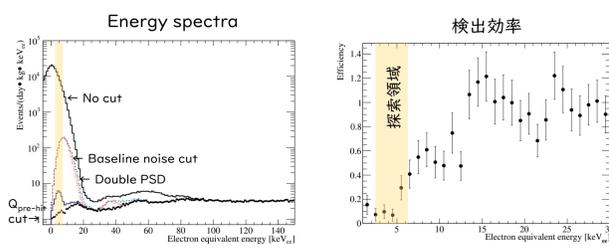
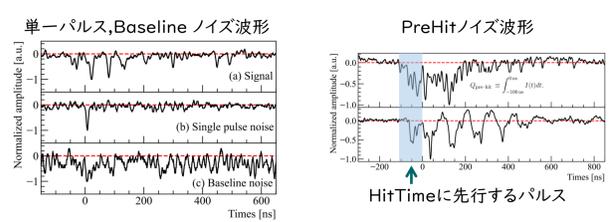
BGに対するFitting

- NaI(Tl):
• α測定での結果値で固定.
• 残りはfit.
- PMT(Breeder):
HPGe計測値で固定.
- 残りは: Cuシールド由来を仮定.

- 汚染→結晶外部
- OFH Cu shield表面(1桁程度).
 - PMT回路(1桁程度).

ノイズカット

単一パルスNoise → Baseline → PSD → PreHitで除去



Event Rate: ~1 dru, 15 keV以下で検出効率低下.

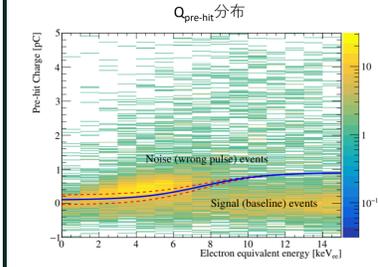
系統不確かさ

計数率の変動: 周辺環境やノイズイベントによりイベント数が増減 → 系統不確かさを考慮

系統不確かさ:

以下の三つの要素をファクタとして採用

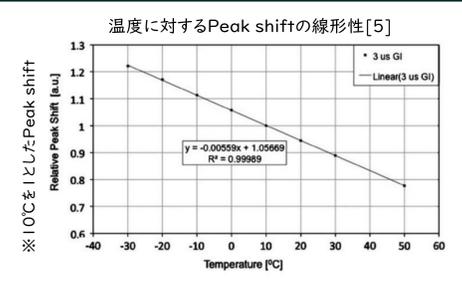
- 温度変化:
室温と同様の温度変化^[4]とPeakシフト量^[5]を仮定: 3%
- エネルギー較正のパラメータゆらぎ: 2%
- ROI周辺における、ノイズカットによるイベント数変化の寄与率(支配的):



- ROIに対して20%程度のCut揺らぎを仮定
- イベント数の変化量で規格化

カットによる不確かさ:
 $f_{cut} = 1.00^{+0.51}_{-0.27}$

[4] A. Kozlov et al. (PICOLON), Nucl. Phys. Res. Sec. A, 958, 2019, 162239 (2020).
[5] K. Ivanekiev et al., Nuclear Inst. Met. Phys. Sect. A., 607, 432 (2009).



※Scaling factorは室温(18°C)を基準に規格化

全系統不確かさ:

$$f_{sys} = f_{temp} f_{calib} f_{cut} \pm \sqrt{\sigma_{temp}^2 + \sigma_{calib}^2 + \sigma_{cut}^2}$$

系統不確かさのまとめ

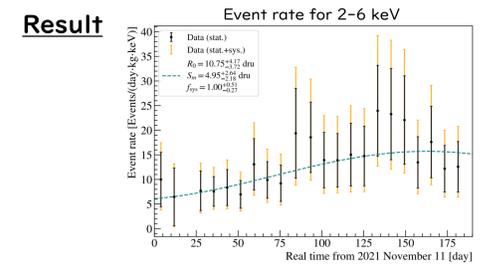
	Uncertainty
Room temperature f_{temp}	1.00 ± 0.03
Energy calibration f_{calib}	1.00 ± 0.02
Noise cut f_{cut}	1.00 ^{+0.51} _{-0.27}
Total f_{sys}	1.00 ^{+0.52} _{-0.28}

検出器の感度

ANAISの解析を参照

計数率: $R = R_0 + S_m \cos\left\{\frac{2\pi}{365d}(t - 165.5d)\right\}$ [dru]
→ イベント数へ換算: $N_i = \left[R_0 + S_m \cos\left\{\frac{2\pi}{365d}(t_i - 165.5d)\right\}\right] M \Delta t_i \Delta E$

系統不確かさを考慮した χ^2 fit:
$$\chi^2 = \sum_{bins} \left(\frac{N_{Exp,i} - f_{sys} N_i}{\sigma_{Exp,i}} \right)^2 + \left(\frac{f_{sys} - 1}{\sigma_{sys}} \right)^2$$



Fit result

Parameters	非常に大きい...
非変動項 R_0	10.8 ^{+4.2} _{-3.8} dru
変動振幅 S_m	5.0 ^{+2.7} _{-2.2} dru

変動: 2σ程度

他グループとの比較

	振幅 S_m [dru]
DAMA/LIBRA	0.0102 ± 0.0008
COSINE	0.0031 ± 0.0037
ANAIS	0.0053 ± 0.0031
This work	5.0 ^{+2.7} _{-2.2}

変動: DM以外(ノイズ)に起因する可能性大
→ 今後のハードウェア&ソフトウェア改善によるノイズ低減
→ 長期測定による測定による感度向上に期待

まとめと展望

- まとめ
- BGは最高純度&安定 → DAMA/LIBRA水準の結晶では世界で唯一
 - 外部由来のBG: 結晶BGに対して2桁程度
 - 感度: DAMA/LIBRAまで1桁程度

- 展望
- ノイズ除去と外部BG低減が必要
 - 新型NaI(Tl)検出器を開発中(B4-M2)
 - 両読み、防湿ケース、PMTからのBGをCuで遮蔽
 - 機械学習を用いたノイズ除去(天羽: P8).
 - DAMA/LIBRA水準のBG計数率を目指す!

PICOLON NaI(Tl)は世界最高純度!

Activity/group [μBq/kg]	DAMA	COSINE	ANAIS	SABRE	PICOLON		
	#94 (30 d ¹)	#94 (This work)	Comp. Goal				
natK	< 600	< 1060	545-1200	120	≤ 1000 ^[2]	< 300	~1000
232Th	2-31	2.5-35	< 4	0.8	4.6 ± 1.2	7.5 ± 0.7	< 10
226Ra	8.7-124	11-45.1	< 10	5	7.9 ± 4.4	12.7 ± 0.9	~10
210Pb	5-30	10-3000	740-3150	360	19 ± 6	15 ± 2	< 50
BG Rate (dru)	1	3	3.605 ± 0.003	1.39 ± 0.02	~3	~1	> 1

