

PIKACHU実験

～ Phase 1 はじめました ～

Ce: Gd₃Al₂Ga₃O₁₂
(GAGG) Crystal

2025 Jun. 25th (Wed)

飯田崇史 (筑波大)

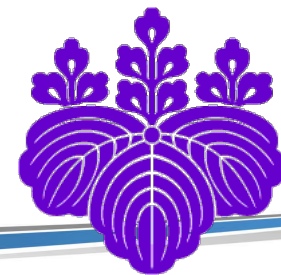
For the PIKACHU collaboration

T. Omori, S. Ishidate, M. Ishigami,
M. Yoshino, K. Kamada, Y. Shoji,
A. Gando, K. Hosokawa, K. Fushimi,
K. Mizukoshi, K. Nakajima,
N. Hinohara, T. Kishimoto



学術変革(A)領域研究会@東大駒場

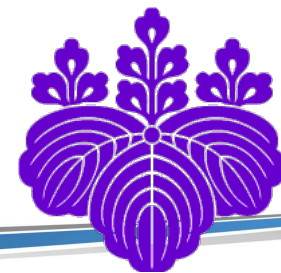
もくじ



1. イントロダクション
2. PIKACHU実験概要
3. 神岡でのPhase 1開始
4. 今後の展望



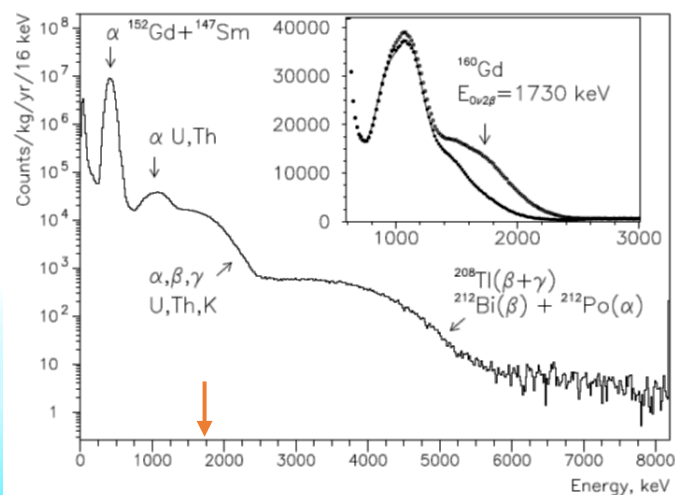
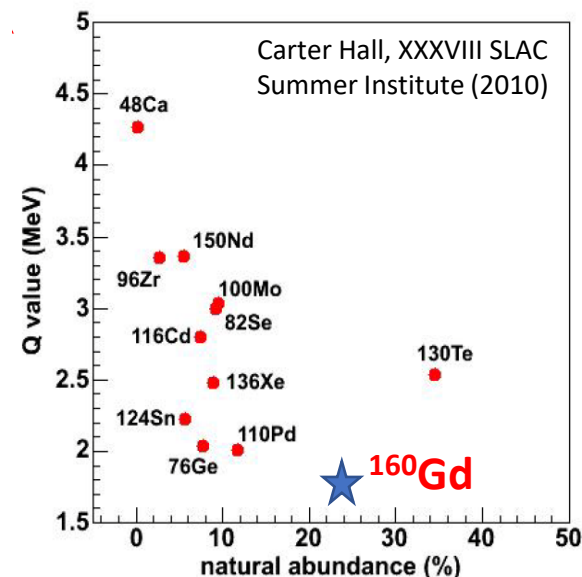
昨年12月のPhase 1
立ち上げの様子



^{160}Gd の二重ベータ崩壊

- ^{160}Gd は二重ベータ崩壊核の一つ。
 - ✓ Q 値= 1730 keV
 - ✓ 自然存在比= 21.8%
- $0\nu\beta\beta$ 、 $2\nu\beta\beta$ 共に未発見
- ^{160}Gd の $\beta\beta$ 探索では、2インチのGSOシンチレータを用いたウクライナでの実験[1]が世界一。

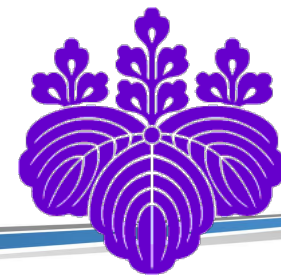
[1] F.A.Danevich et al., Nucl. Phys. A, Vol. 694, Iss. 1–2, 2001, Pages 375-391



現在の ^{160}Gd 二重ベータ最高感度

検出器	GSOシンチレータ
^{160}Gd の量	100g
データ取得日数	約2年
主要BG	U/Thのアルファ PMTのガンマ
0ν 半減期リミット*	$> 2.3 \times 10^{21}$ 年
2ν 半減期リミット*	$> 2.1 \times 10^{19}$ 年

^{160}Gd $2\nu\beta\beta$ 半減期理論予想



- 2種の理論で約一桁異なる $2\nu\beta\beta$ 半減期予想。

$$T_{1/2}^{2\nu} \sim 6.02 \times 10^{21} \text{ yr} \quad [2] \text{ (pseudo-SU (3) model)}$$

$$T_{1/2}^{2\nu} \sim 4.7 \times 10^{20} \text{ yr}^* \quad [3] \text{ (QRPA model)}$$

* using same phase-space factor as ref. [2]

Theoretical description of the double beta decay of ^{160}Gd

Jorge G. Hirsch,^{*} Octavio Castaños,[†] and Peter O. Hess[‡]

Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, A. P. 70-543 México 04510 D.F.

Osvaldo Civitarese[§]

Departamento de Física, Universidad Nacional de La Plata, c.c.67; 1900, La Plata, Argentina

[2] J. G. Hirsch et al., Phys.Rev. C 66, 015502 (2002)

[3] N. Hinohara et al., Phys. Rev. C 105, 044314 (2022)

Global calculation of two-neutrino double- β decay within the finite amplitude method in nuclear density functional theory

Nobuo Hinohara^{1,2,*} and Jonathan Engel^{3,†}

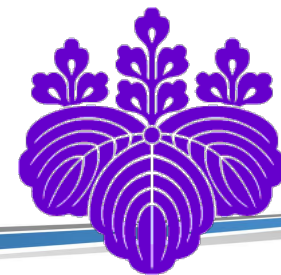
¹Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8577, Japan

²Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8571, Japan

³Department of Physics and Astronomy, University of North Carolina, Chapel Hill, North Carolina 27516-3255, USA

先行研究より約一桁の感度向上で発見の可能性！！

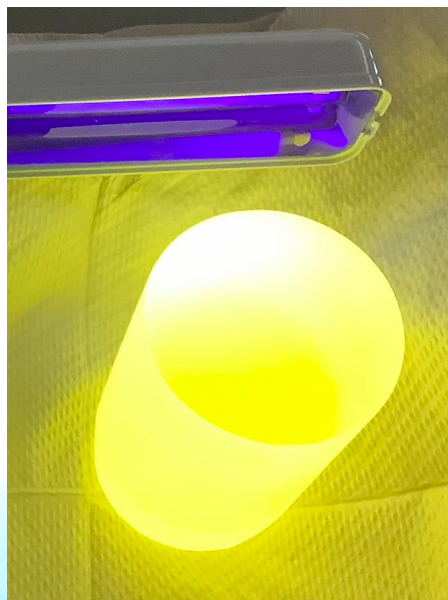
PIKACHU実験



^{160}Gd の $2\nu\beta\beta$ 発見を目指して2020年に「PIKACHU実験」を立ち上げた。

*Pure Inorganic scintillator experiment in
KAmioka for CHallenging Underground sciences*

高純度 $\text{Ce}:\text{Gd}_3\text{Ga}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$ 単結晶シンチレータ(GAGG)
を使った ^{160}Gd の二重ベータ崩壊実験

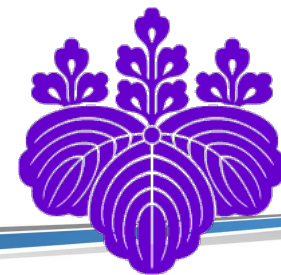


○実験の目標

- Phase 1 (2024年～)
先行研究の感度更新
- Phase 2 (202X年?～)
さらに一桁感度を上げて、
 $2\nu\beta\beta$ 発見！！



PIKACHU共同研究グループ



筑波大、東北大を中心に6機関、14名の研究者が協力！！

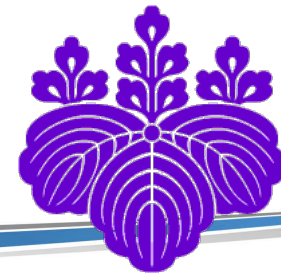
名前	所属	担当
飯田崇史	筑波大	全体統括 他
筑波大生 3名	筑波大	解析、シミュレーション
日野原伸生	筑波大CCS	理論への反映
吉野将生	東北大金研	データ解析、性能評価
鎌田圭	東北大金研	結晶育成、加工
庄子育宏	東北大金研	結晶育成、加工
細川佳志	東北大RCNS	原料純度測定
水越慧太	東北大RCNS	データ解析(機械学習)
寺島亜寿紗	帯広畜産大	神岡地下実験室関連
伏見賢一	徳島大	結晶原料純化
中島恭平	福井大学	結晶内不純物評価
岸本忠史	阪大RCNP	同位体濃縮

New collaborator is WELCOME!!



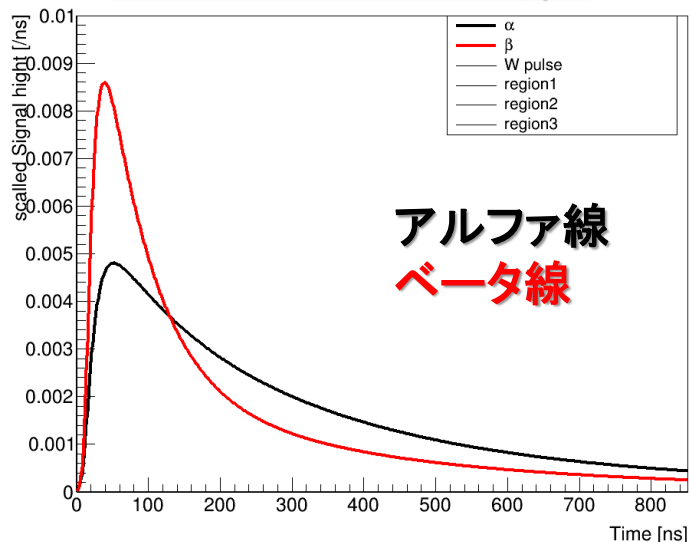
**新規参加者
募集中！**

PIKACHUの強み



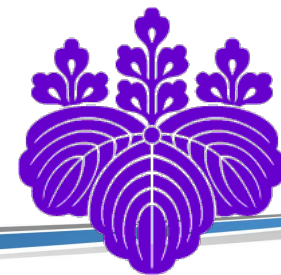
- **大型結晶**: 1結晶で先行研究の3~4倍。3つ置けば簡単に一桁増。
 - **大発光量**: 数倍の発光量で、分解能が改善。
 - **粒子識別能**: α 線と β 線は波形情報からほぼ100%分離可能(PSD)。
 - **低BG技術**: 当時は無かった低放射能PMTの開発 等
- ◆あとは、**結晶内部のU/Th系列の放射性不純物を落とす必要**がある。

GAGGの平均波形(α/β)

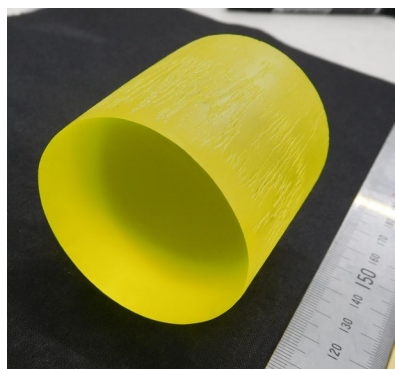


	ウクライナ	PIKACHU
検出器	GSOシンチレータ	GAGGシンチレータ
^{160}Gd の量	100 g	1 kg (3結晶)
発光量	10,000 ph./MeV	60,000 ph./MeV
データ取得	約2年	2-3年
BGレベル	[1]参照	PSDで一桁改善
半減期リミット	$T^{0\nu} > 2.3 \times 10^{21} \text{ y}$ $T^{2\nu} > 2.1 \times 10^{19} \text{ y}$	目標: 一桁以上改善、 $2\nu\beta\beta$ 発見

高純度GAGG結晶 (Cr#1)

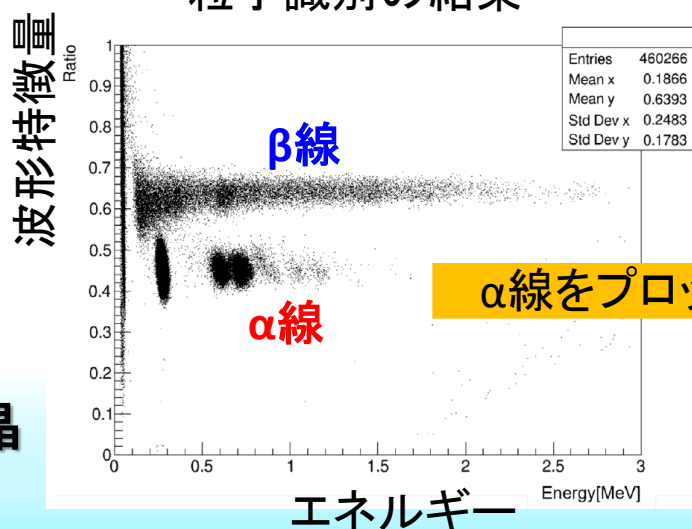


- Gd_2O_3 と Al_2O_3 に関して、原料を純化および選別。
- 高純度原料で2インチのGAGG結晶を育成@東北大金研
- 2023年に高純度GAGG結晶 (Cr#1) が完成。神岡でBG調査。
- アルファ線レートで約一桁のU/Th低減に成功！

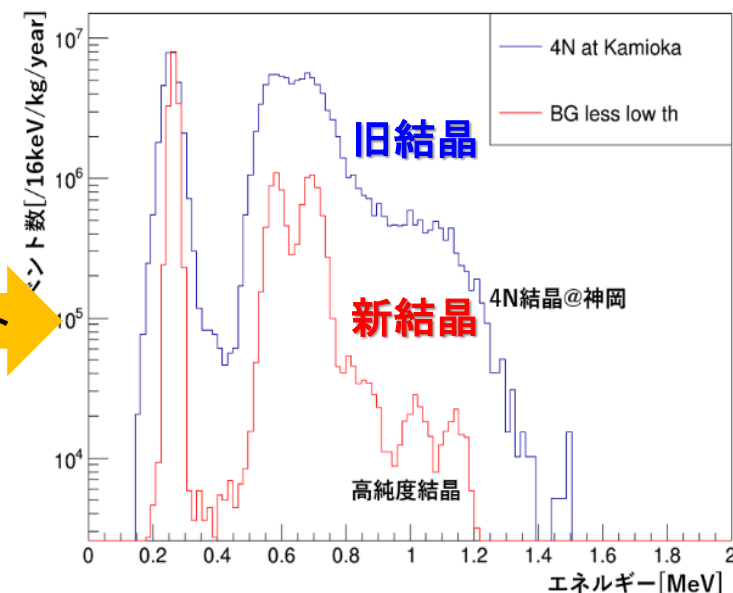


高純度GAGG単結晶
(Cr#1)

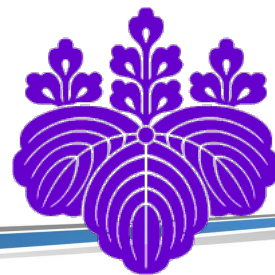
粒子識別の結果



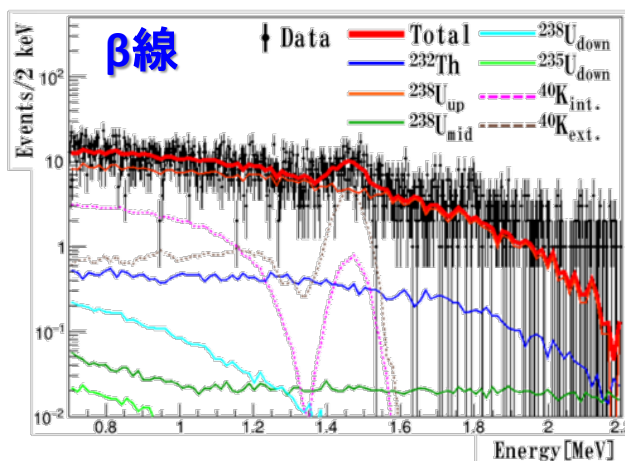
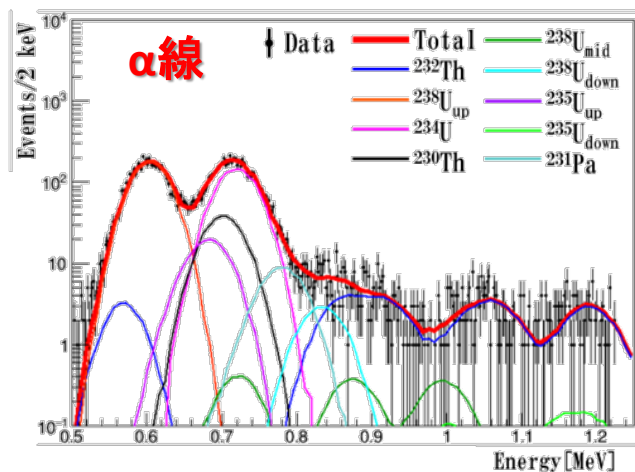
学術変革(A)領域研究会@東大駒場



シミュレーションによるBG理解



- U/Th系列の放射性バックグラウンドをGEANT4シミュレーションでBGのエネルギースペクトルを再現。データにフィット。

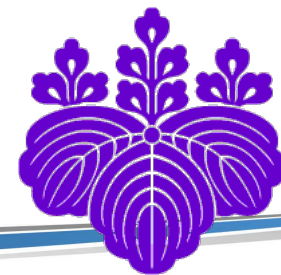


シミュレーション
でBGの再現に
成功！

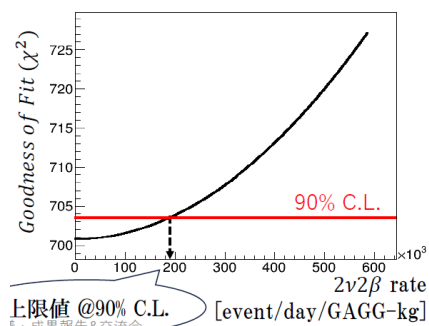
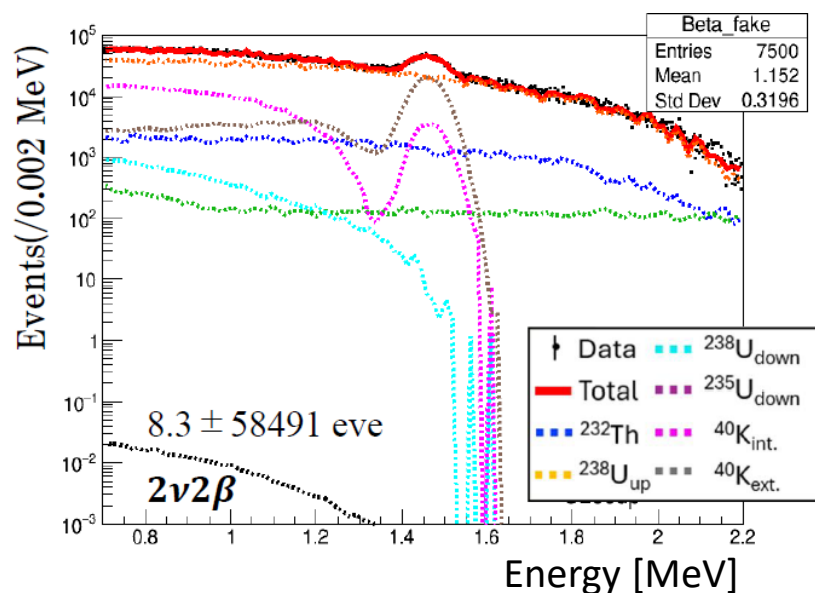
mBq/kg	^{238}U 上流	^{232}Th
旧結晶	911 ± 10	289 ± 20
新結晶	125 ± 2	1.9 ± 0.1

- 定量的な議論が可能となった。
- また、主要BGが ^{238}U 上流であることが判明した。
- 新結晶は、従来の結晶よりも ^{238}U を1/7以下に低減。

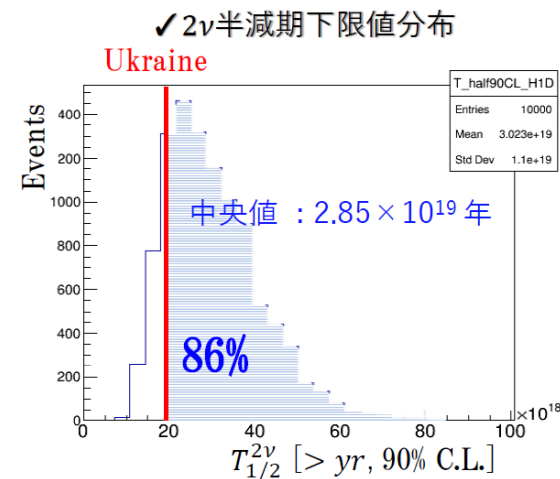
探索感度の評価



- 大型の高純度GAGG結晶で2年間測定した場合の疑似データ(10000データセット)に対して、BGスペクトルを同様にフィット。
- χ^2 検定による $2\nu\beta\beta$ 崩壊レートの制限(90%信頼度)を探索感度とした。



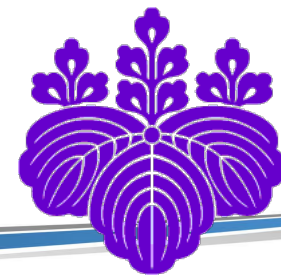
✓ 90% (68%) C.L. lower limit



**先行研究を上回り、世界最高感度
での ^{160}Gd $2\nu\beta\beta$ 探索が可能！！**

	$T_{1/2}^{0\nu}$ [yr]	$T_{1/2}^{2\nu}$ [yr]
Phase 1 2年探索	$1.71(2.90) \times 10^{21}$	$2.85(4.83) \times 10^{19}$
ウクライナ 1.6年探索	$1.3(2.3) \times 10^{21}$	$1.9(3.1) \times 10^{19}$

結晶大型化 (Cr#4) とPhase 1



- 昨年、高純度結晶 (Cr#1, 784 g) の大型化を試みた。
- 新結晶 (Cr#4, 2436 g) は、**3.1倍の大型化に成功した**。
- **神岡(東北大エリア)で2024年12月にPhase 1を立ち上げた**。
- 現在、遠隔で結晶2本体制の長期データ取得を行っている。
- 結晶を入れ替え、サイズや純度を改善しながら、

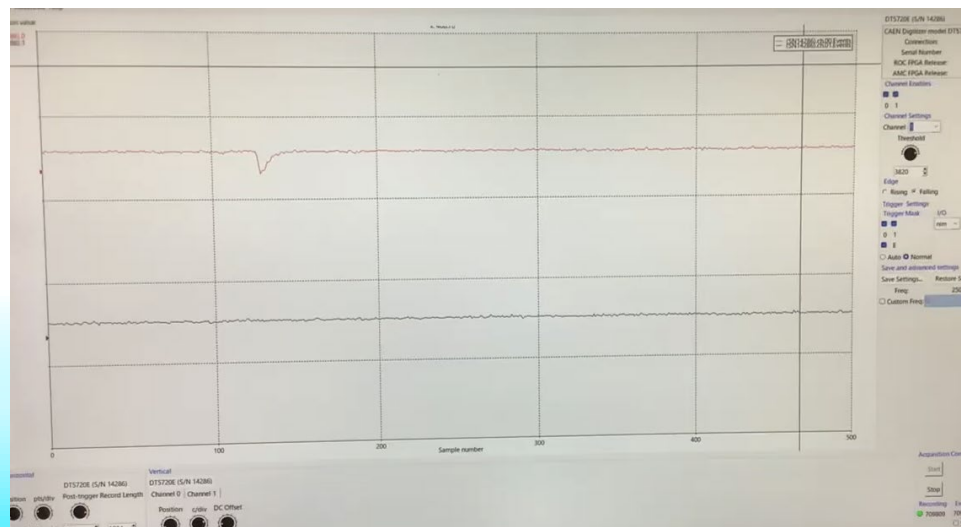
PIKACHU Phase 1で、探索感度更新を狙う！！



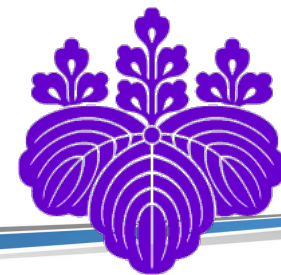
高純度結晶
(Cr#4)



Phase 1立ち上げ作業風景



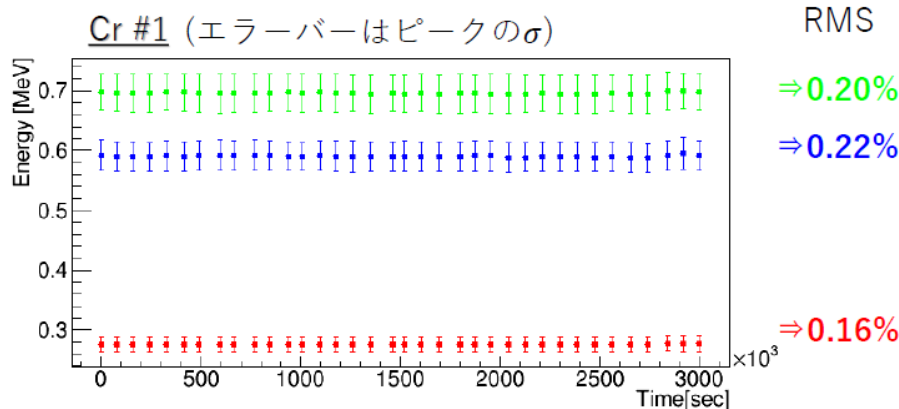
Phase 1の解析現状



✓ 現在、Phase 1実験データの解析を進めている。

※以下は、約1か月分のデータの解析。

○ゲイン安定性



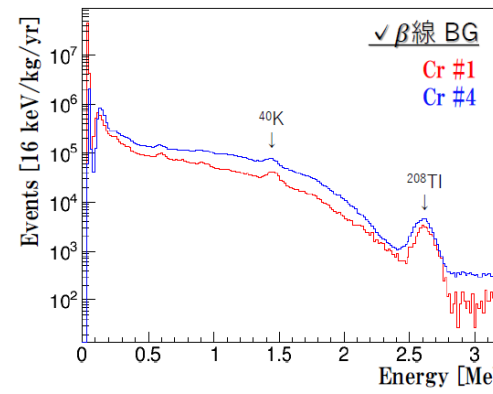
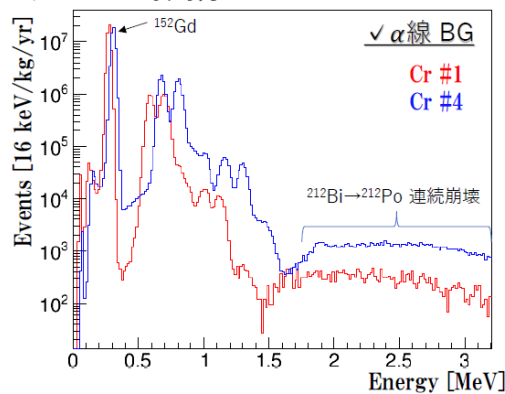
- アルファ線ピーク (^{152}Gd , ^{238}U , ^{234}U) を用いて、ゲイン変動を調査。
- 0.2%程度で安定しており、エネルギー分解能 ($\sigma \sim 2.3\% @ Q$ 値) よりも十分に小さい。

○エネルギースペクトル

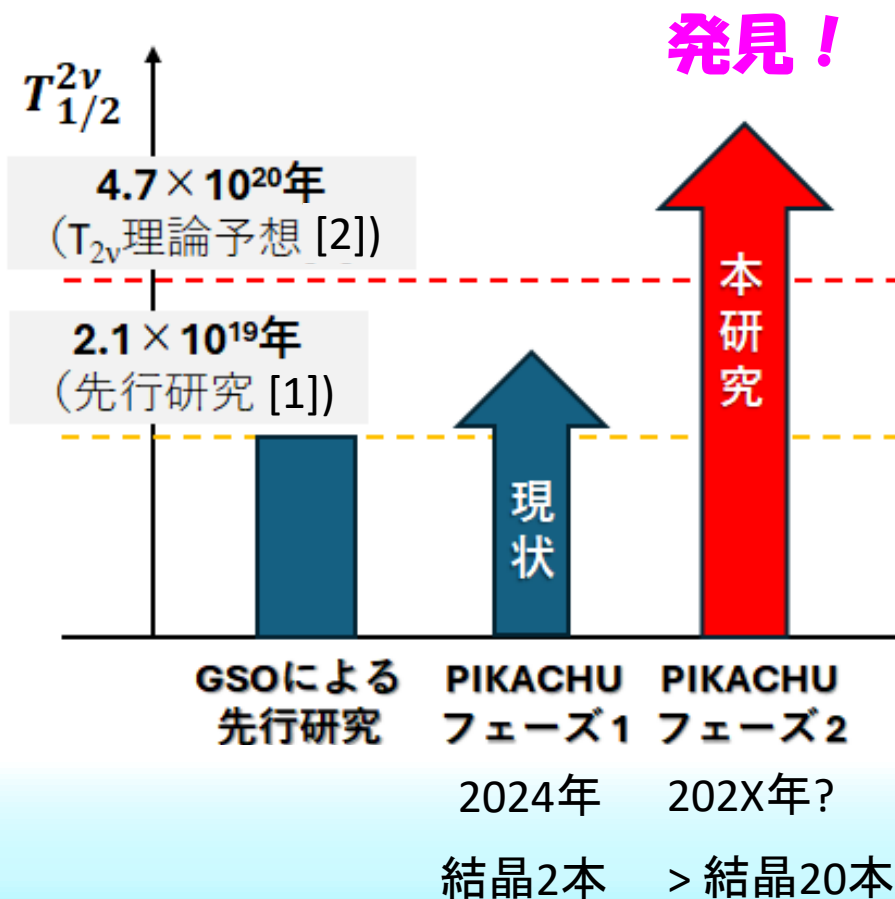
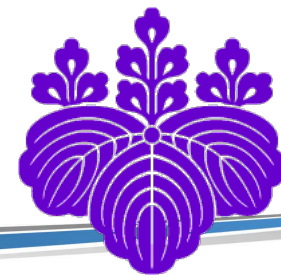
- 閾値は100 keV程度。
- DAQレートは 8 Hz程度で安定。
- BGレベル: Cr#4 > Cr#1 ☹

今後は詳細な解析！

- ◆ γ 線ピーク (^{22}Na , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{208}Tl) でエネルギー較正
- ◆ 854.3 時間分のデータ



2νββ発見に向けた展望



- Phase 1を開始した。今後2年程度で、世界最高感度更新を目指す。
- Phase 2では、感度をさらに一桁向上させ、理論予想の範囲まで探索。

→BGをさらに一桁低減

→もう一桁高純度なGAGG

半減期感度

$$T_{1/2}^{0\nu}(\text{exp}) = (\ln 2) N_a \frac{a}{A} \frac{\epsilon}{\sqrt{\frac{M \cdot \text{time}}{\text{bkg} \cdot \Delta E}}}$$

Isotopic Abundance

Detection Efficiency

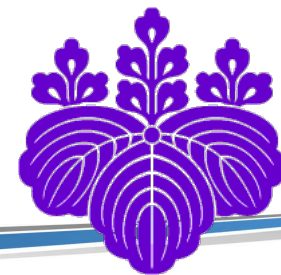
Detector Mass

Atomic mass

Background level (count/keV kg year)

Energy Resolution

GAGG結晶のさらなる純化

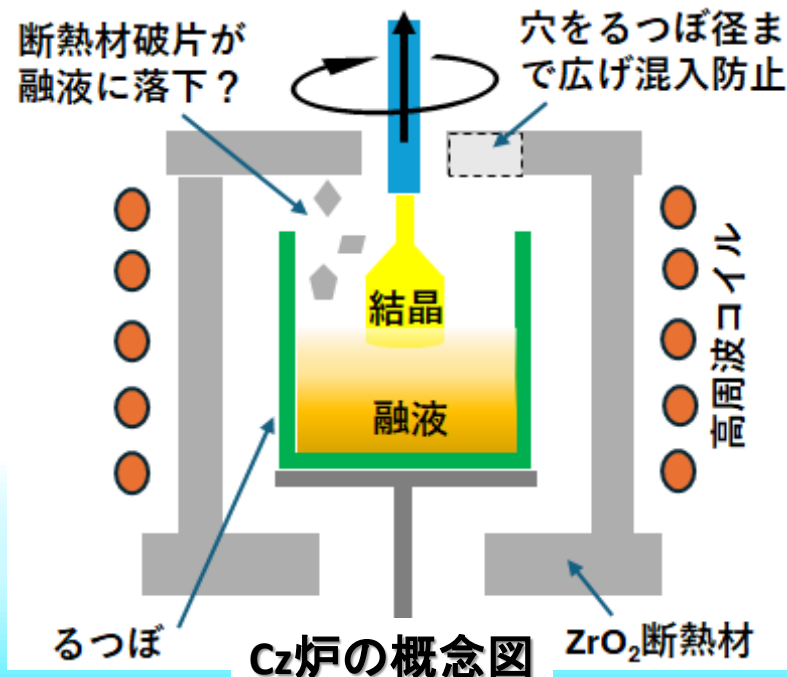


- 結晶内のU/Th不純物量は原料と比較すると多い(左表)。
- 結晶はCz法で育成(右図)。るつぼ周りのジルコニア断熱材がU/Th不純物を大量に含んでいることが分かっている。
- 断熱材の破片などがメルトに混入しないよう工夫をして、次の結晶育成に臨んでいるところ。

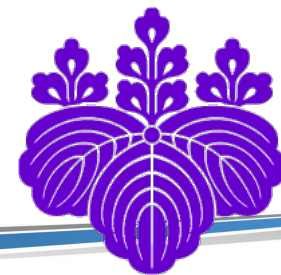
新旧結晶と原料の不純物比較

	^{238}U 上流	^{232}Th
旧結晶	911 ± 10	289 ± 20
新結晶	125 ± 2	10.2 ± 0.4
Gd ₂ O ₃ 原料	< 16.3	1.66 ± 0.41

[mBq/kg]



論文の宣伝

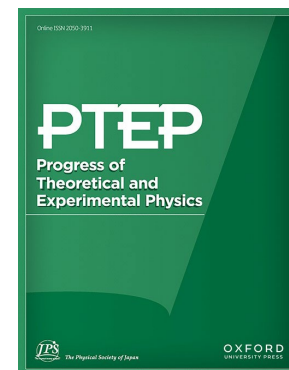


・高純度GAGG結晶開発

PTEP, Vol.2024, Iss.3, (2024) 033D01

First Study of the PIKACHU Project: Development and Evaluation of High-Purity $\text{Gd}_3\text{Ga}_3\text{Al}_2\text{O}_{12}:\text{Ce}$ Crystals for ^{160}Gd Double Beta Decay Search 

Takumi Omori, Takashi Iida , Azusa Gando, Keishi Hosokawa, Kei Kamada,



・シミュレーションと感度評価

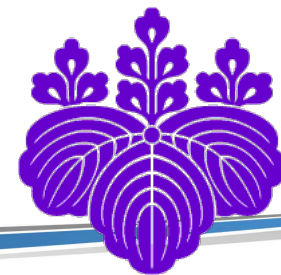
arXiv:2412.04712 [hep-ex]

Simulation Tool Development and Sensitivity Analysis of ^{160}Gd Double Beta Decay Search by the PIKACHU Project

Takumi Omori, Takashi Iida, Nobuo Hinohara, Kotaro Takahashi, Ken-Ichi Fushimi, Azusa Gando, Keishi Hosokawa, Shotaro Ishidate, Motonao Ishigami, Kei Kamada, Keita Mizukoshi, Yasuhiro Shoji, Hisanori Suzuki, Masao Yoshino

ぜひ読んでください！！

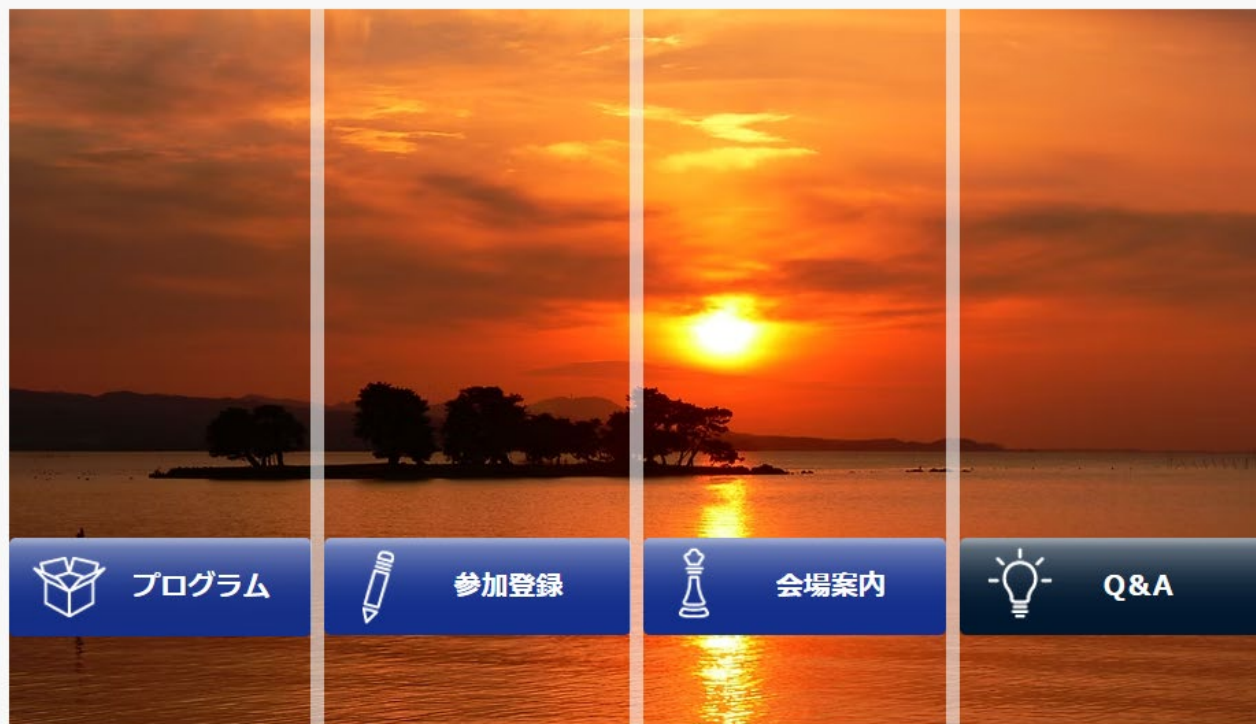
シンチレータ研究会@松江



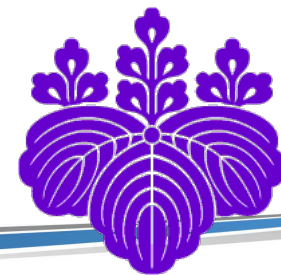
SMART 2025

Scintillator for Medical, Astroparticle and
environmental Radiation Technologies
2025年10月12～15日 松江しんじ湖温泉

- ✓ シンチレータ研究会
SMAR2025を、今年10
月に島根県で開催し
ます！！
- ✓ 医療、環境、素核実
験、材料などの研究
者が集います。
- ✓ 一般講演、ポスター
講演もありますので、
ぜひご参加ください。
- ✓ 学生大歓迎！



PIKACHU ポスター発表



石舘正太郎(P14)

「PIKACHU実験 ～高純度GAGG結晶の性能評価～」

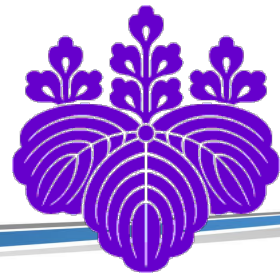
- 高純度GAGG結晶(Cr#1, Cr#3, Cr#4)開発の経緯と、それらの発光量やBG量などの評価。

石上元直(P15)

「PIKACHU実験における ^{40}K 背景事象低減に向けた試み」

- PMT内部起源の ^{40}K 事象のシミュレーションによる見積もりと、その低減方法の検討。

まとめ



- **PIKACHU**は ^{160}Gd の二重ベータ崩壊探索実験。
- 従来より一桁きれいなGAGG結晶開発に成功。
- 2024年12月よりPhase 1を開始、今後2年+ α で世界最高感度到達を目指す。
- 並行して ^{160}Gd の $2\nu\beta\beta$ 発見に向け、一桁純度を高めた超高純度GAGG結晶を作ろうとしている。

共同研究や飲みのお誘いはこちらへ！

→ tiida@hep.px.tsukuba.ac.jp

