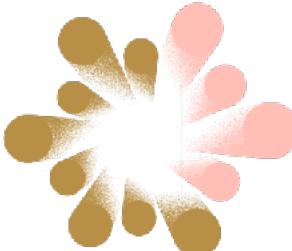
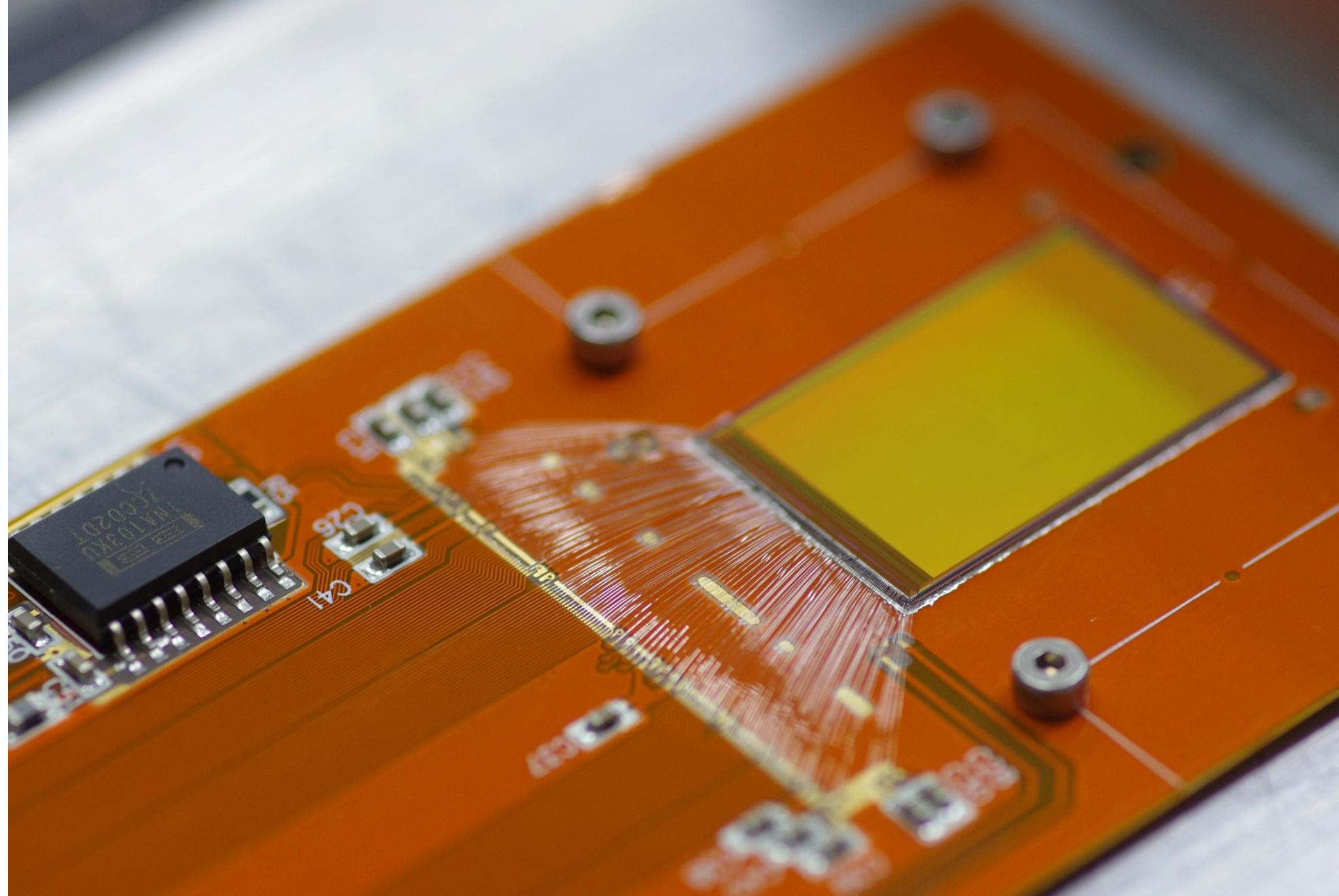


# 新型X線ピクセル検出器を使った太陽アクシオン探査 (Investigating Solar Axion by Iron-57, ISAI)

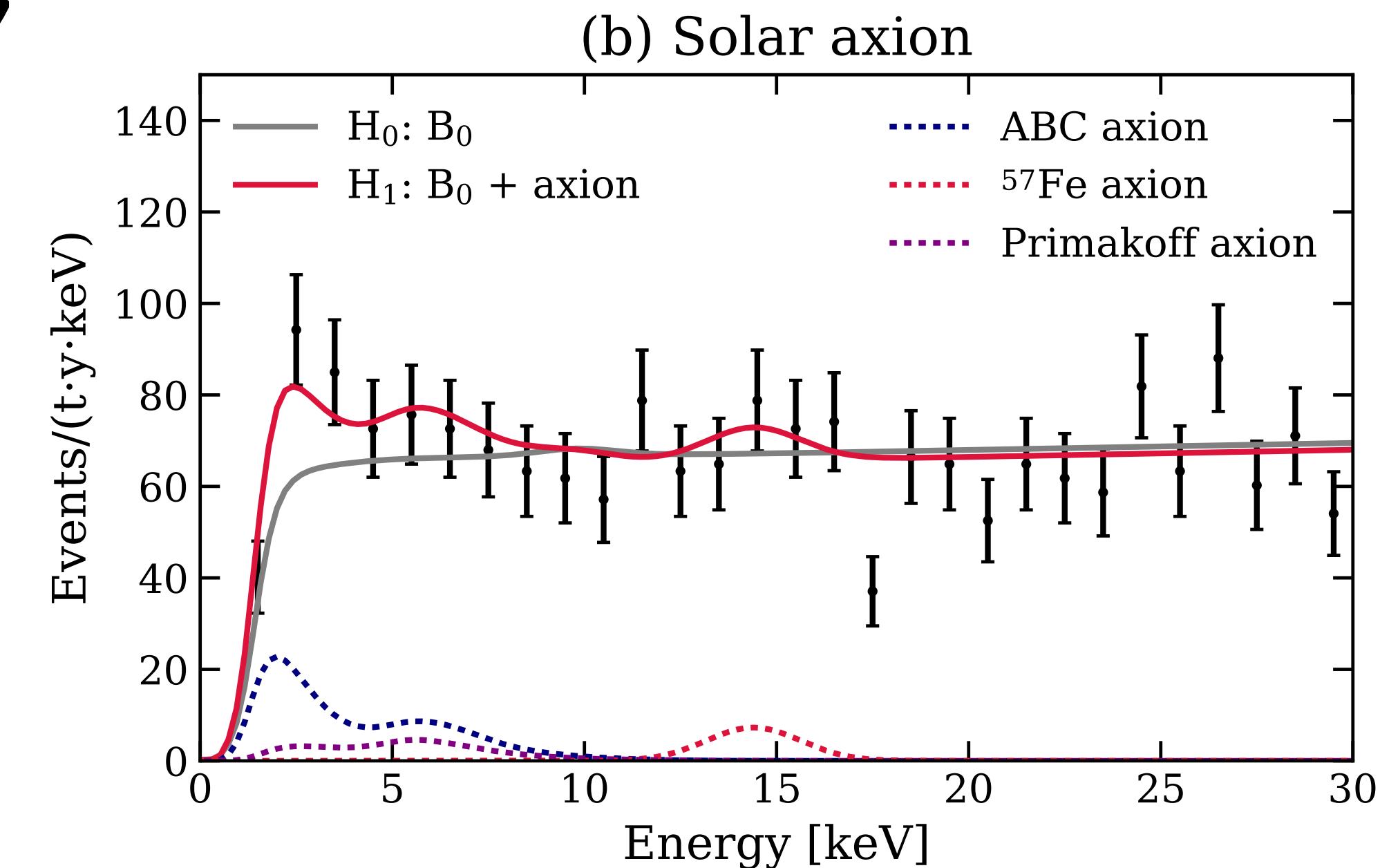


藤井 俊博 (京大理/白眉) [fujii@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp](mailto:fujii@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp)

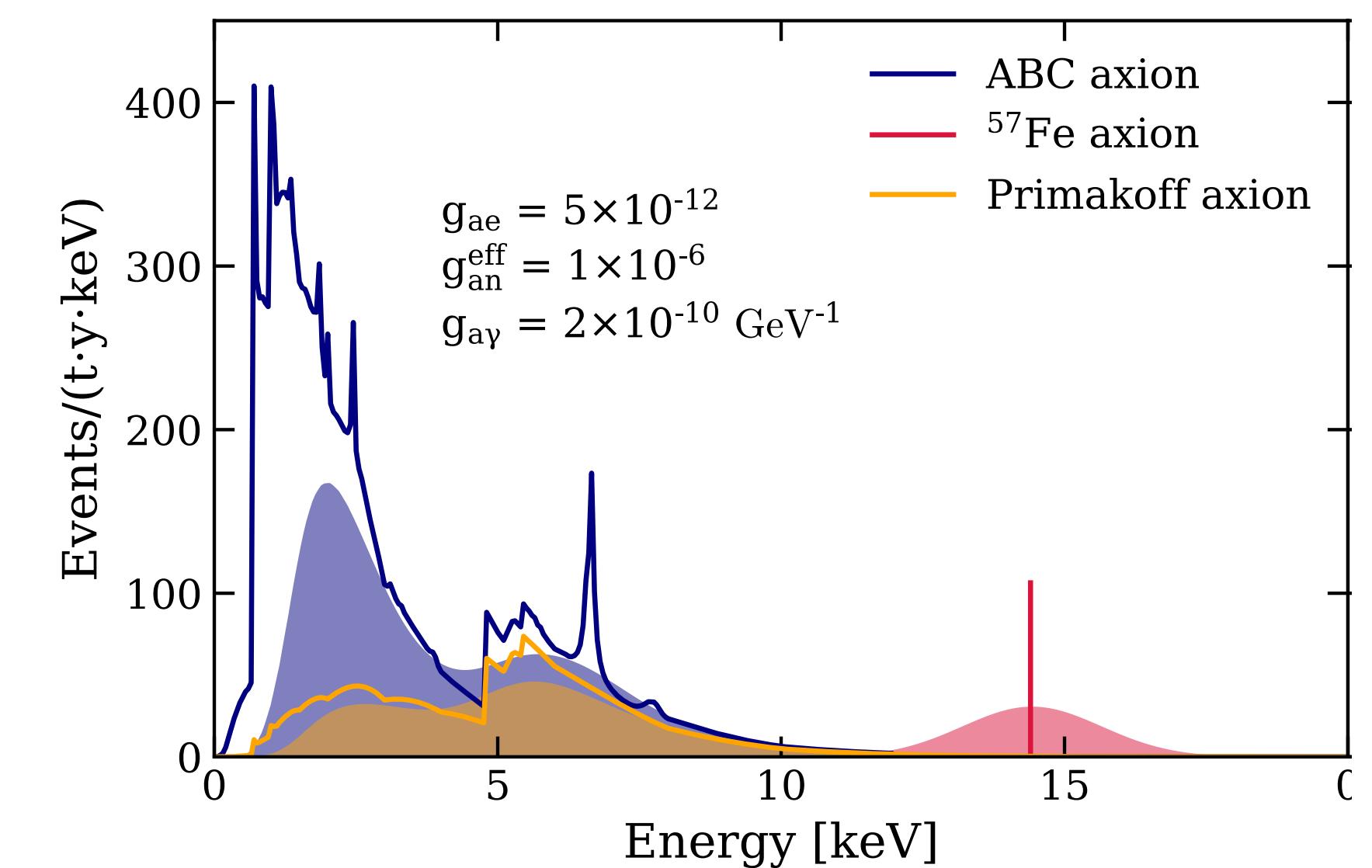
鶴 剛, 池田 智法, 天野 雄輝, 山田 龍 (京大理) 身内 賢太朗 (神大理) 小貫 良行 (東大理/素セ)

# アクション

- 量子色力学の「強いCP問題」を"洗い流す"解決策 (Peccei-Quinn機構) から予言される新粒子 R.D. Peccei and H.R. Quinn, Phys.Rev.Lett. 38, 1440 (1977)
- 理論では対称性が破れるはずだが、実験では保存されている
- 暗黒物質として十分な量が初期宇宙に生成された可能性も
- XENON1Tから太陽アクションと解釈可能な結果**
  - $m_a \sim 46 - 56$  eV が示唆されている
  - 先行研究である、天体からのアクションの制限  $m_A < 10$  meV とは矛盾している

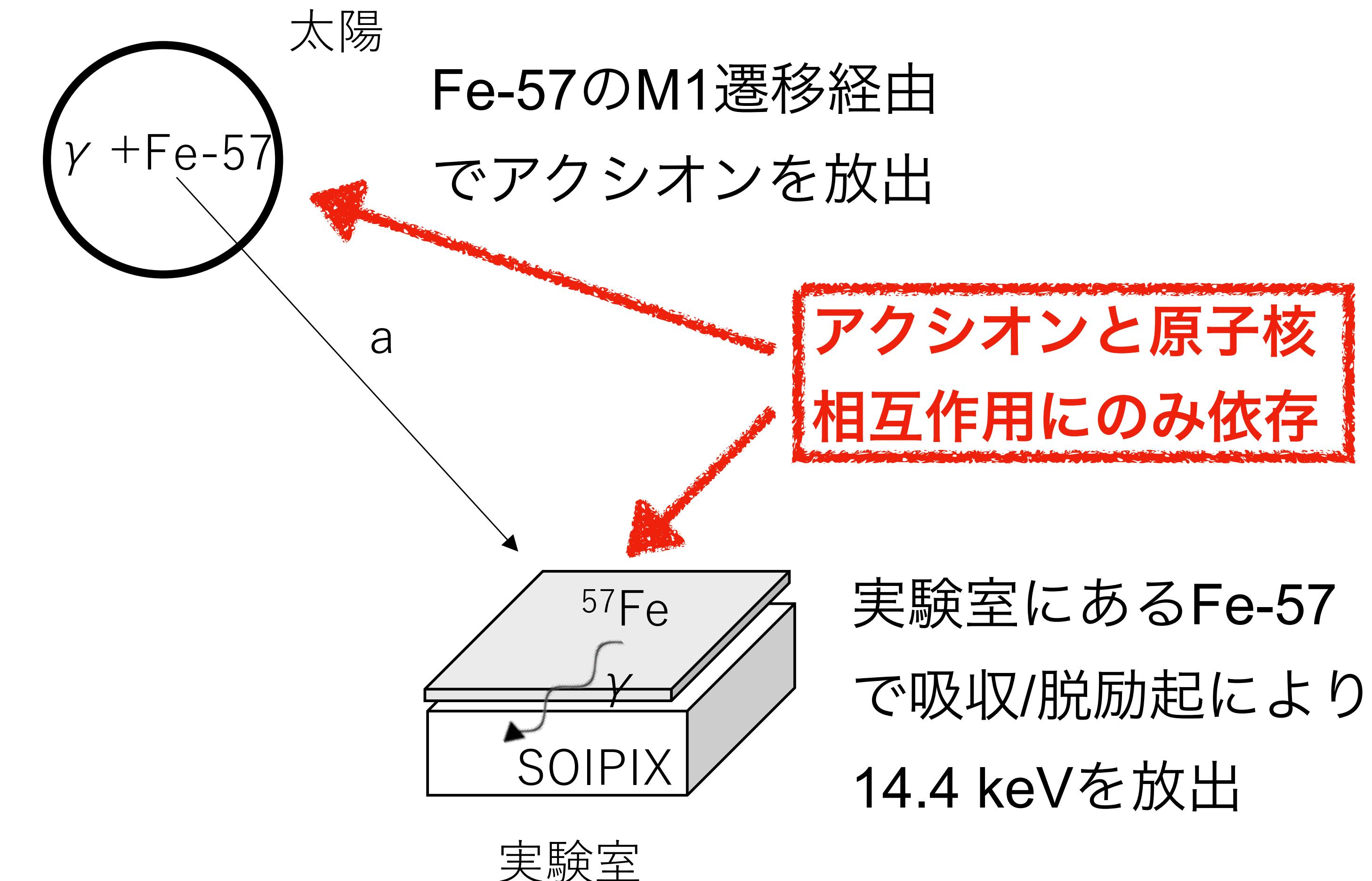
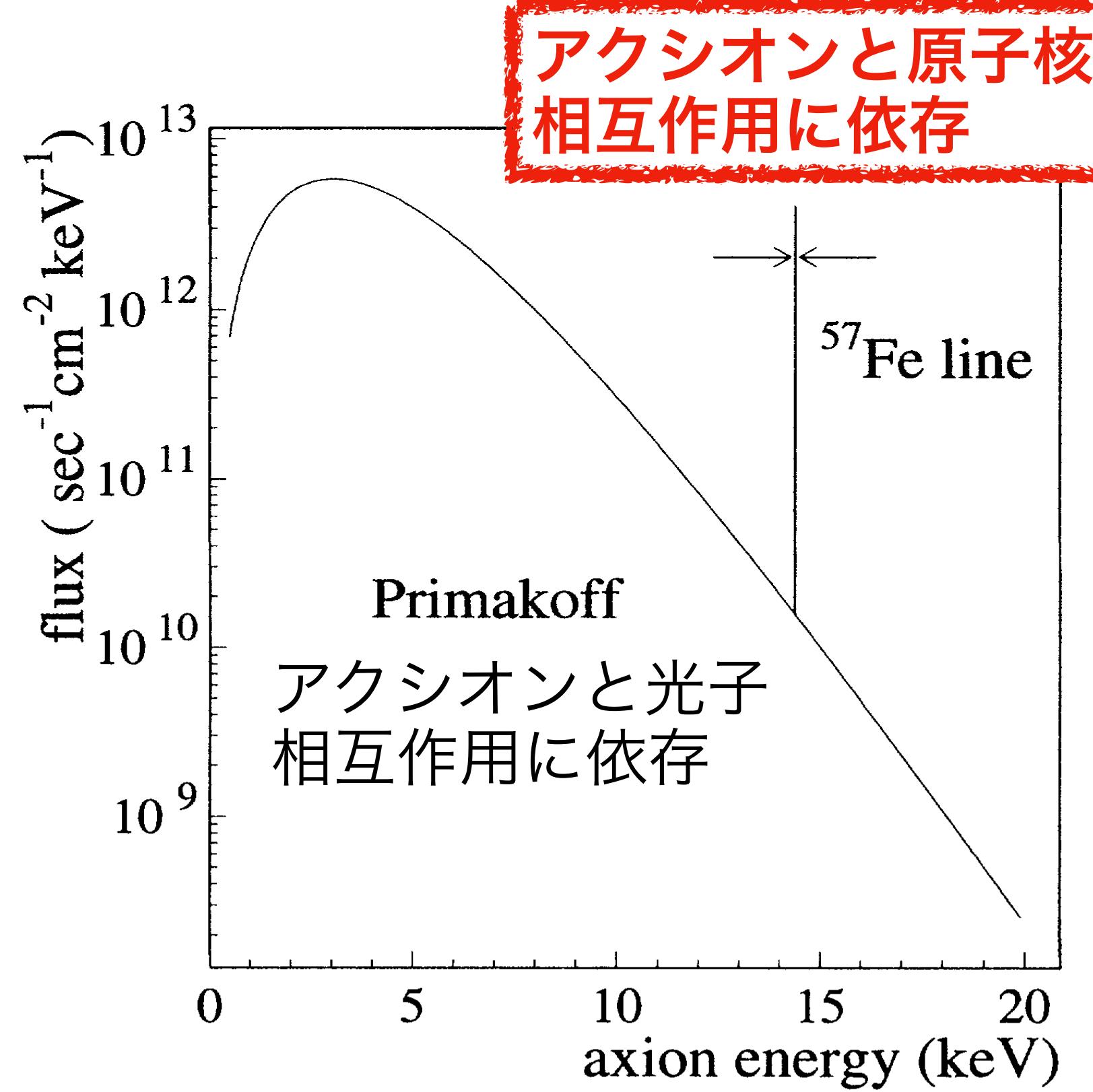


XENON1T collaboration, arXiv:2006.09721

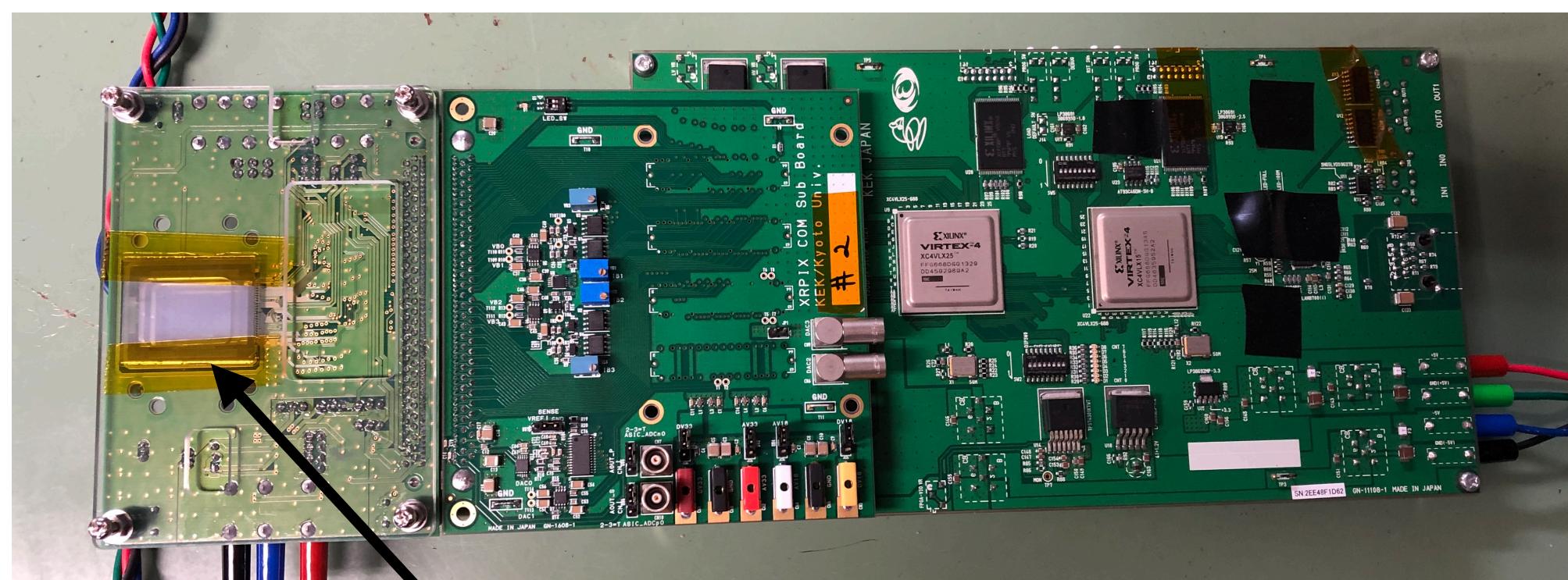
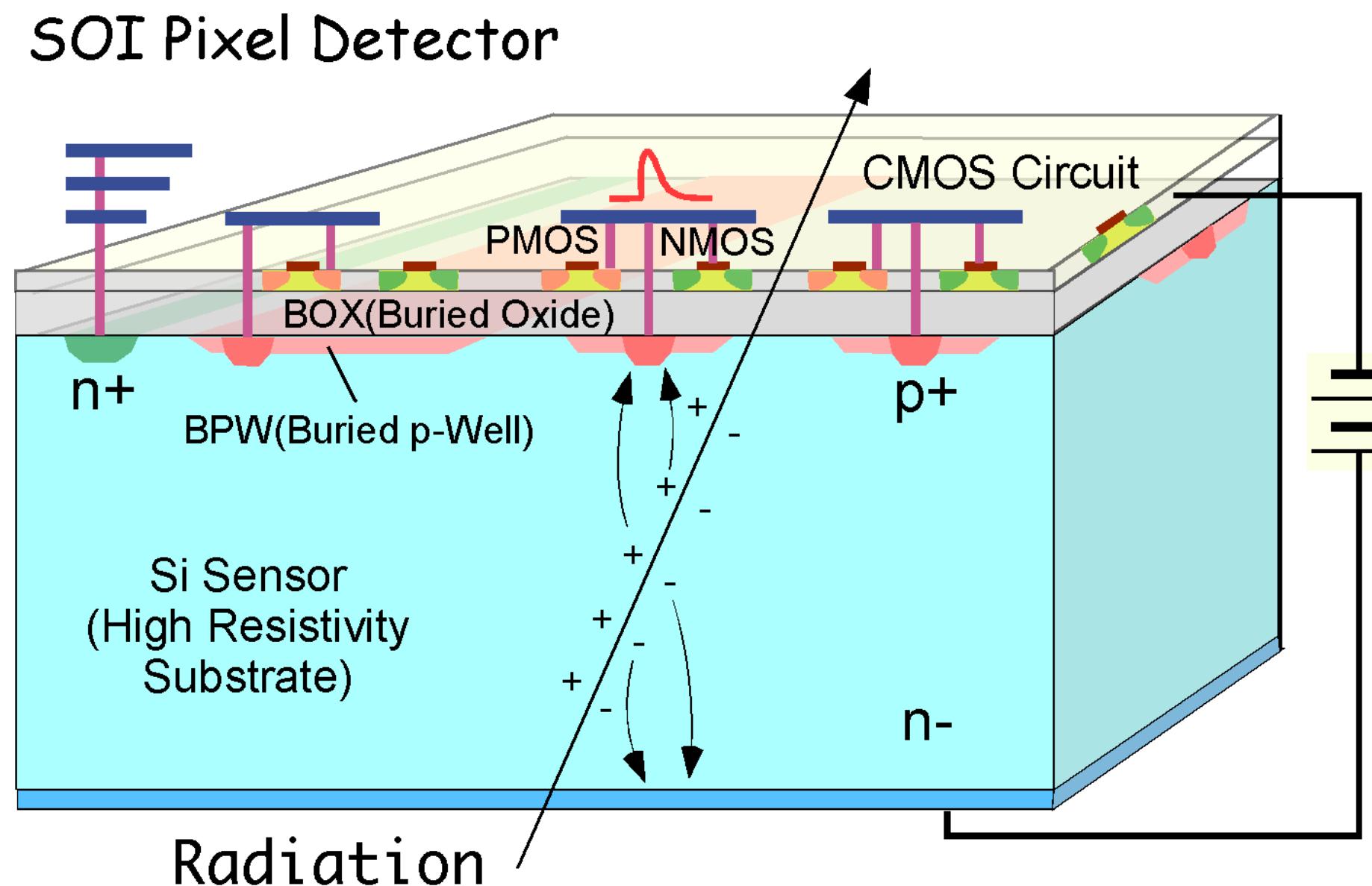


# アクシオン-原子核反応( $g_{aN}$ )に特化した検出方法

- XENON1Tはアクシオンの3種類（電子 $g_{ae}$ 、光子 $g_{a\gamma}$ 、原子核 $g_{aN}$ ）の相互作用が混在
- アクシオン - 原子核反応 $g_{aN}$ に特化した検出方法で、アクシオンの性質を調べる



# 新型X線ピクセル検出器 (XRPIX7)



XRPIX7

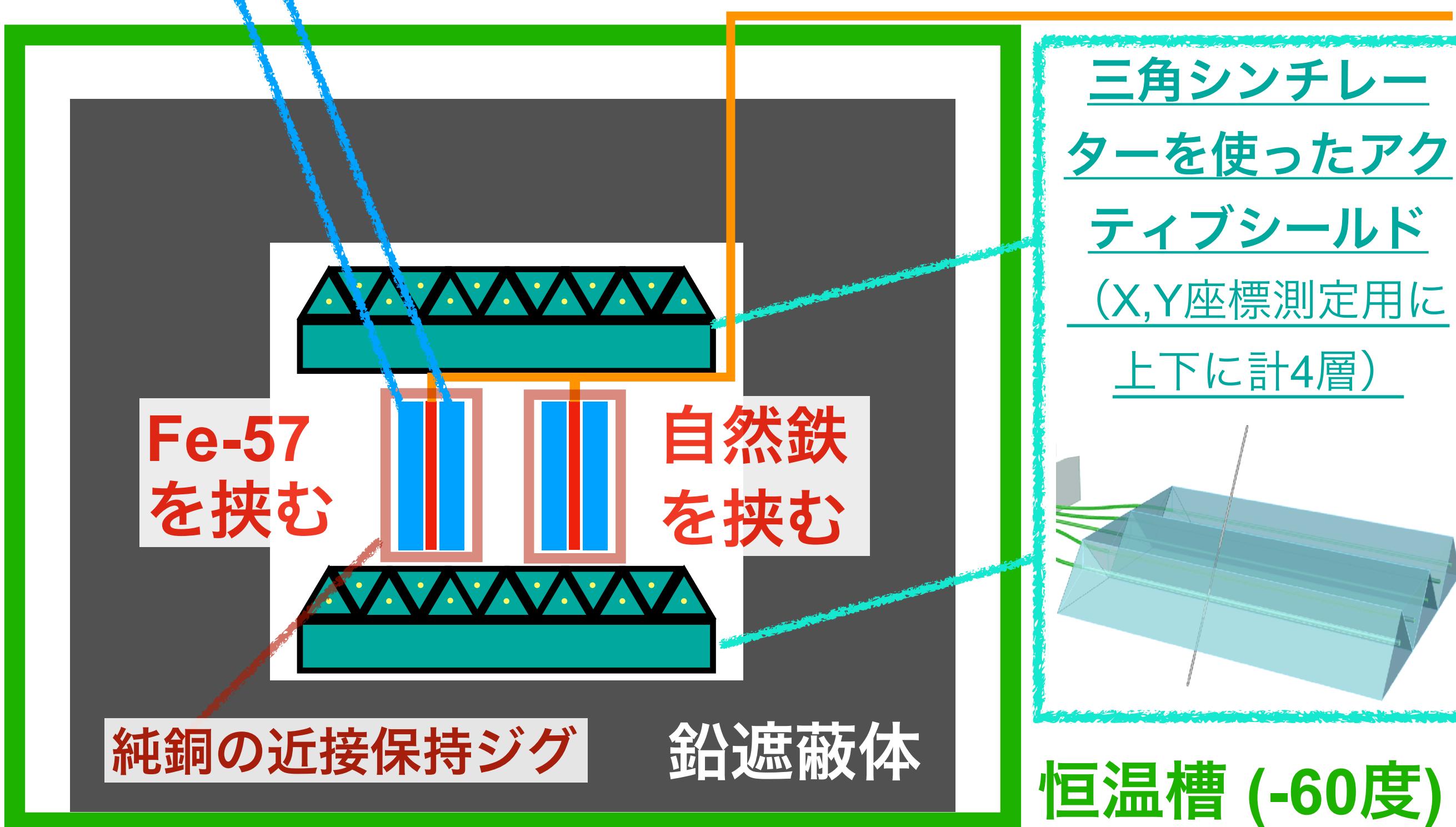
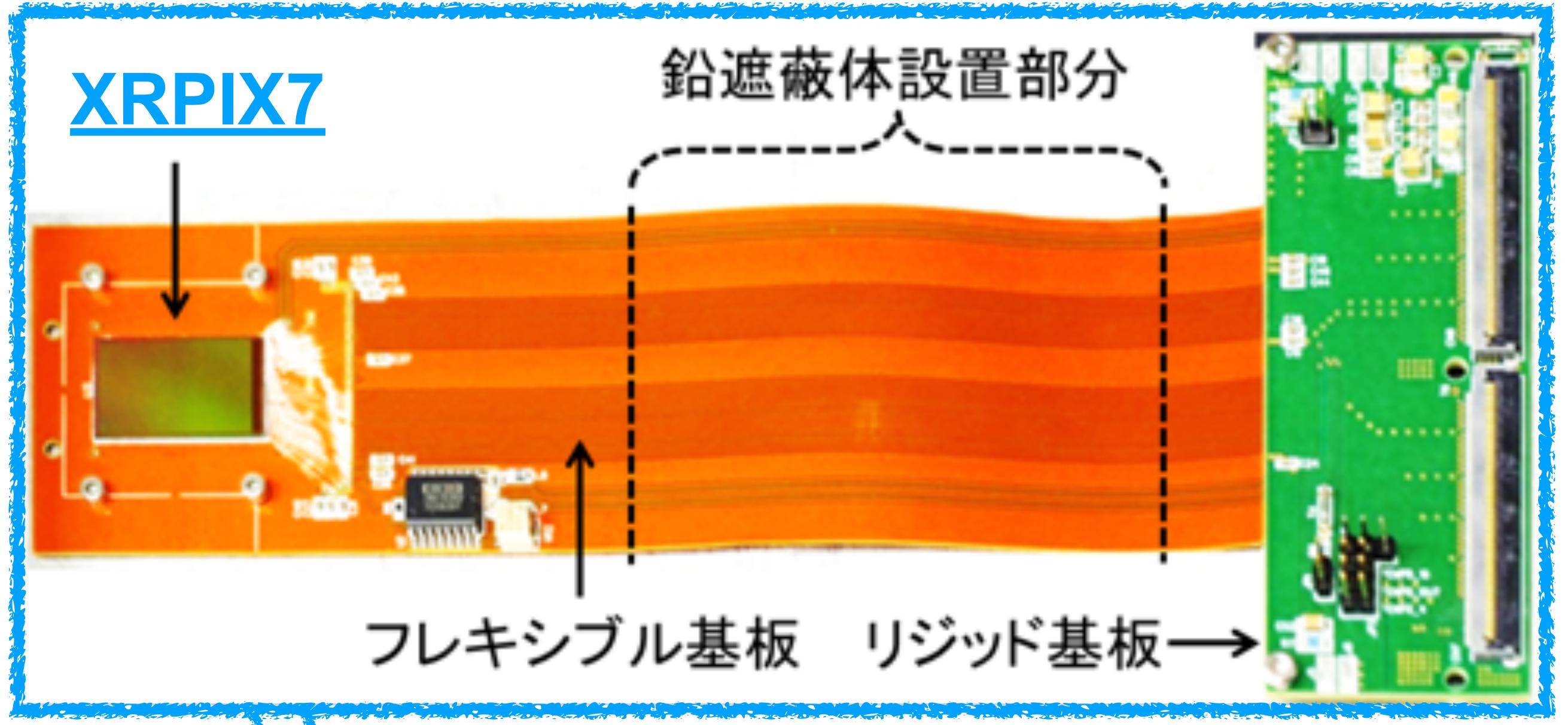
- 次世代X線衛星搭載用に開発された新型X線ピクセル検出器 (XRPIX7)
- 24.6 mm × 15.3 mm × 300 micron (608 × 384 pixels)**
- 各ピクセルに読み出し回路とトリガー機能を実装
- イベント駆動型読み出しが可能 (< 10 μs 時間分解能), 1 kHz のスルーレート
- 高分解能: 14.4 keVで  $\sigma \sim 250$  eV (FWHM 590 eV)
- 目標:  $\sigma \sim 110$  eV (FWHM 250 eV)
- 反同時計数法によりさらなる低バックグラウンド化
- イメージング能力を持ち、イベントが残すトラックからもBG除去が可能

# 高分解、低BG、大面積を実現する上で最適

項目	PINフォト ダイオード	CCD (Charge-Coupled device)	<b>XRPIX7 (本研究)</b>	DSSD (Double-sided Silicon Strip Detector)	超伝導TES (※)
分解能 (半値全幅)	3500 eV	200 eV	<b>250 eV</b>	1000 eV	10 eV
トラッキング	×	○	○	△	△
反同時 計数法	○	×	○	○	○
大面積	○	○	○	○	△

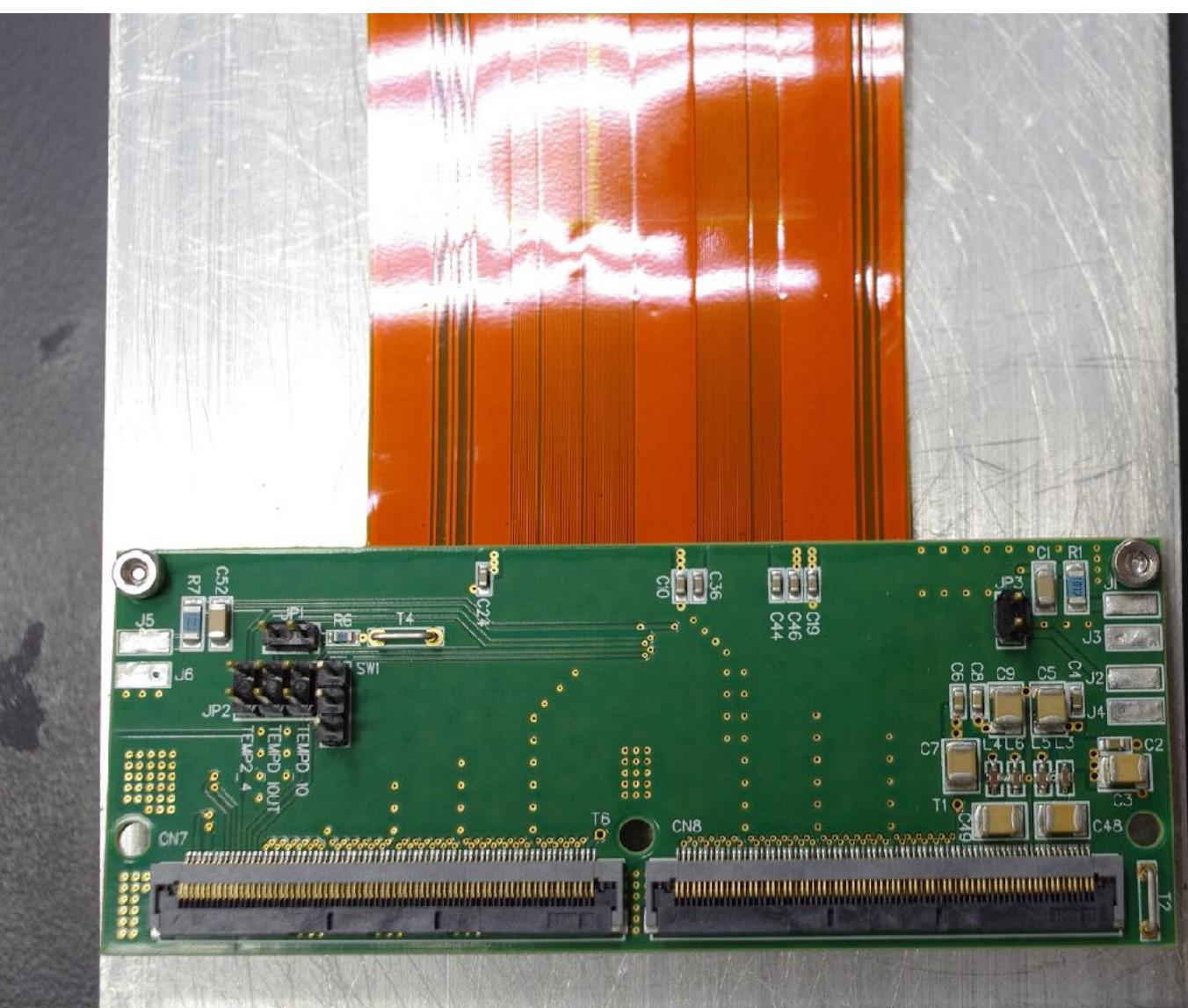
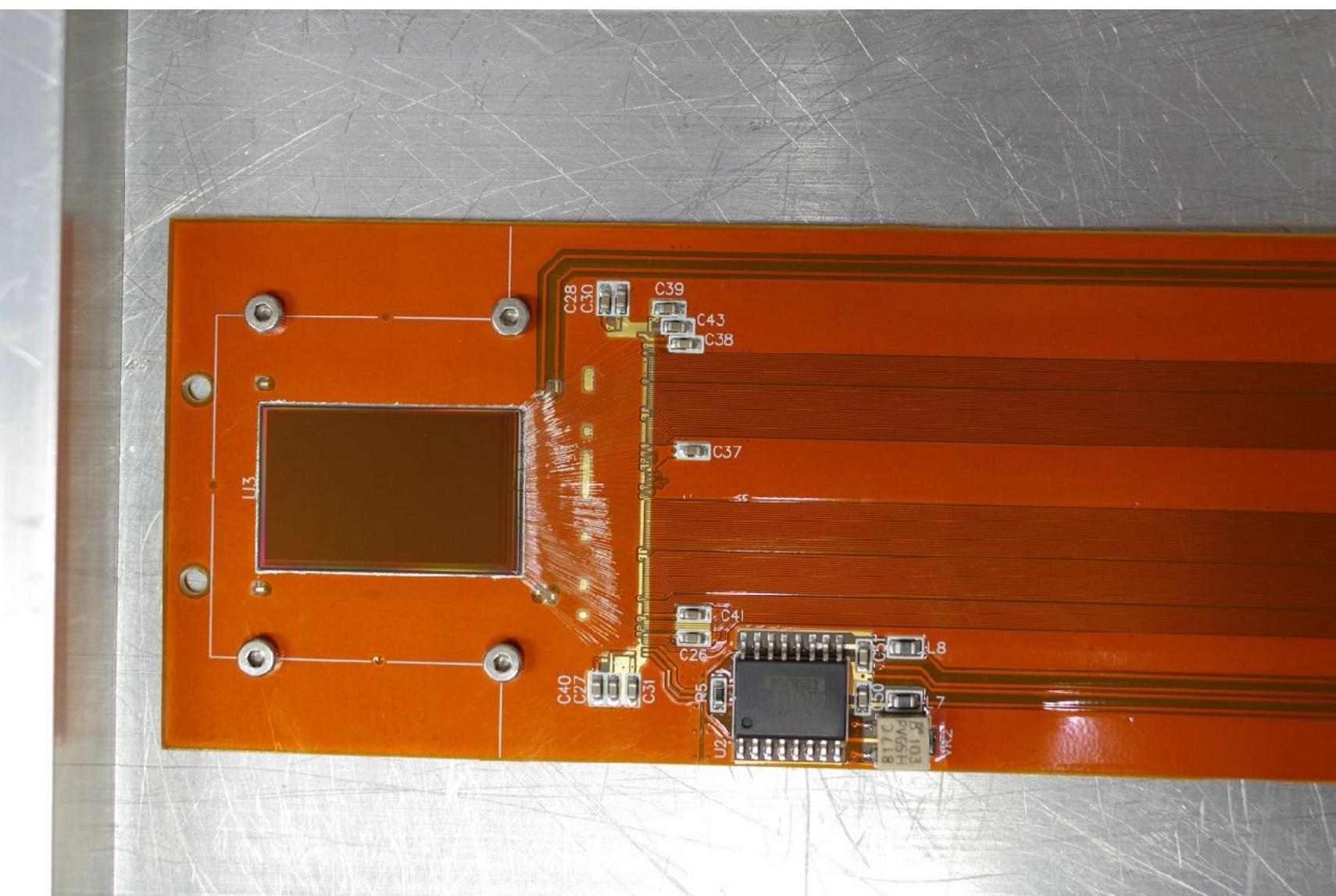
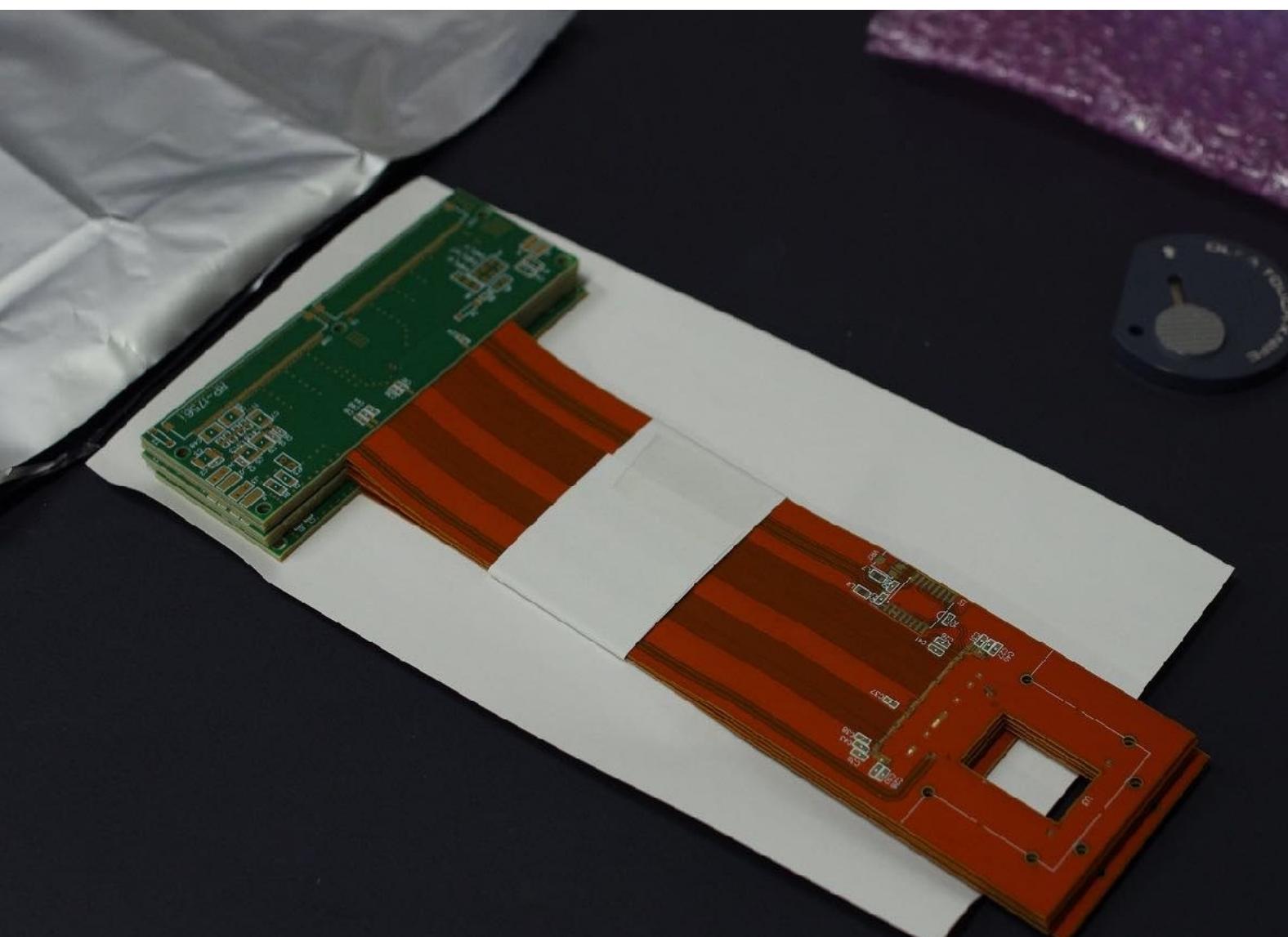
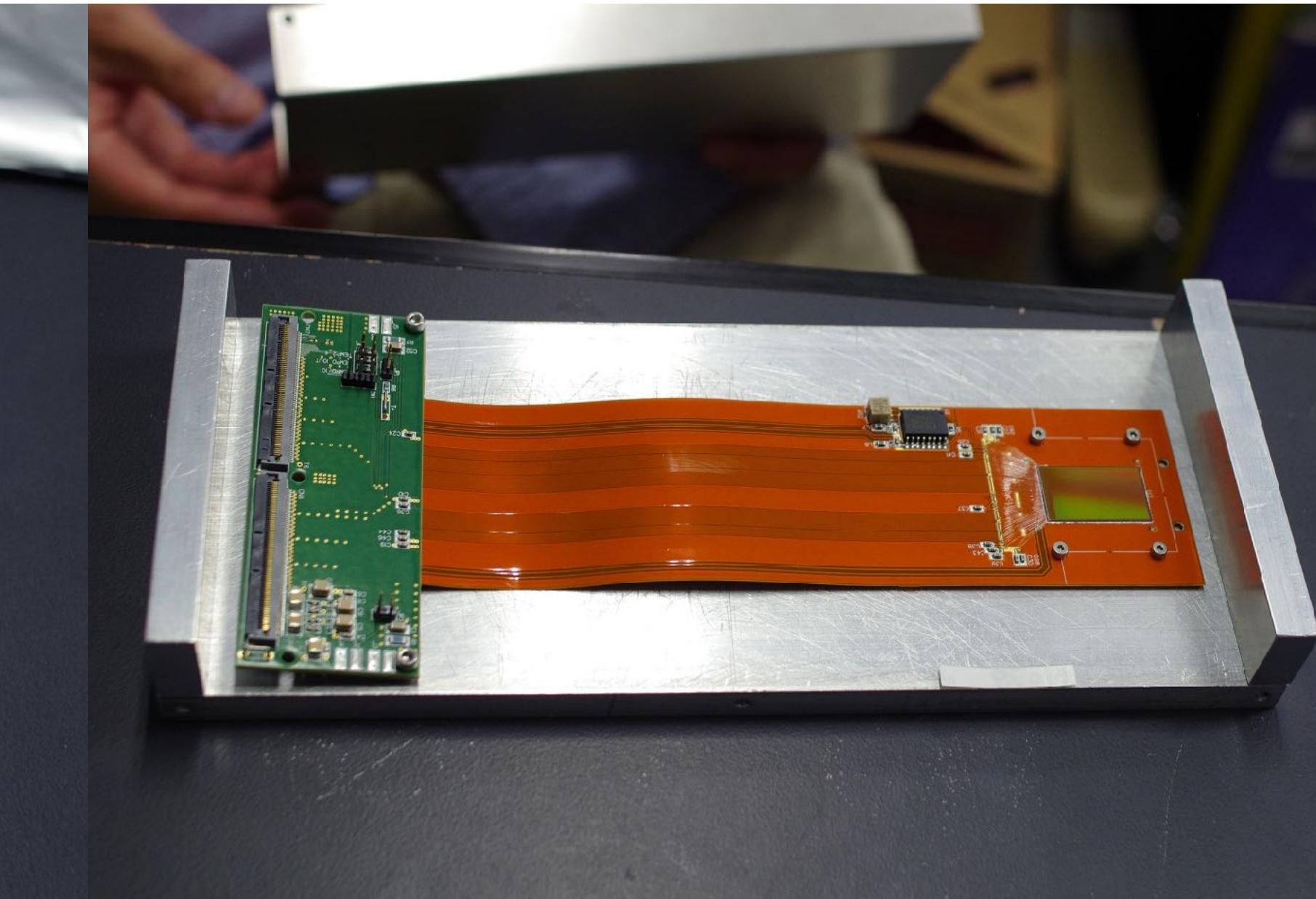
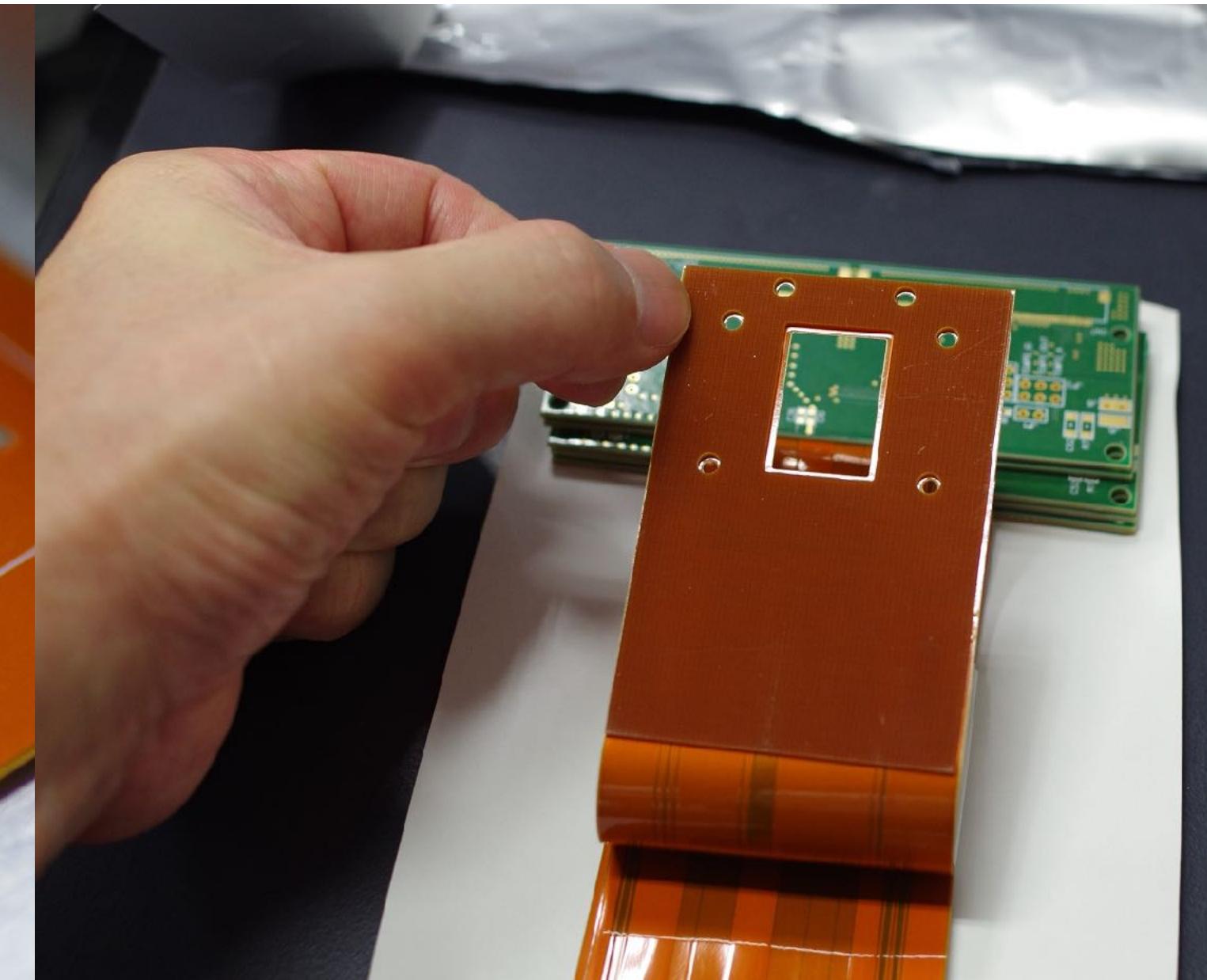
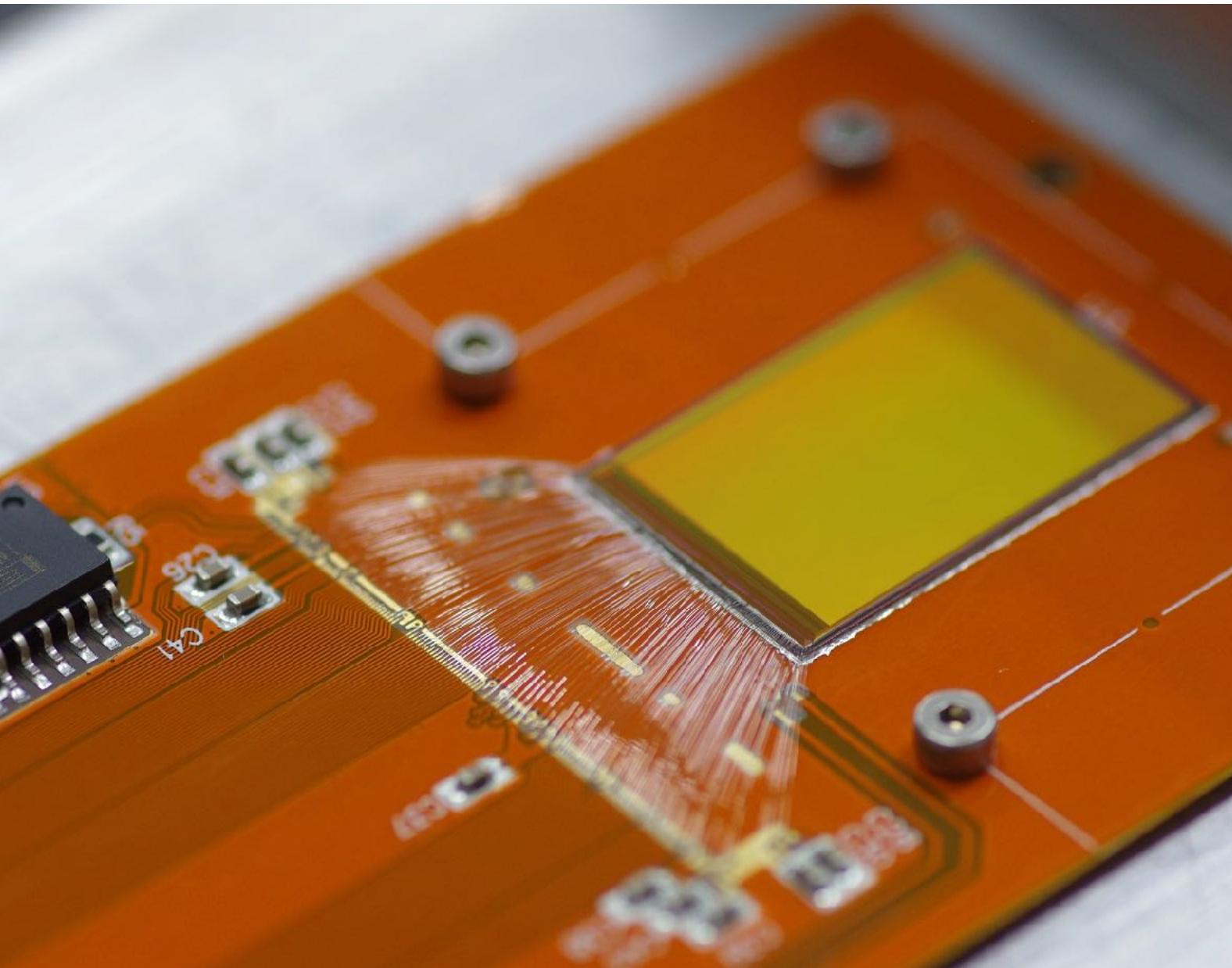
(※) 超伝導TESは高い分解能を持つが、ターゲットとなる $^{57}\text{Fe}$ によって性能が落ちてしまい、 $^{57}\text{Fe}$ の質量を多くとれない（満田 Darkon 2019 より）

# Investigating Solar Axion by Iron-57 (ISAI) 実験



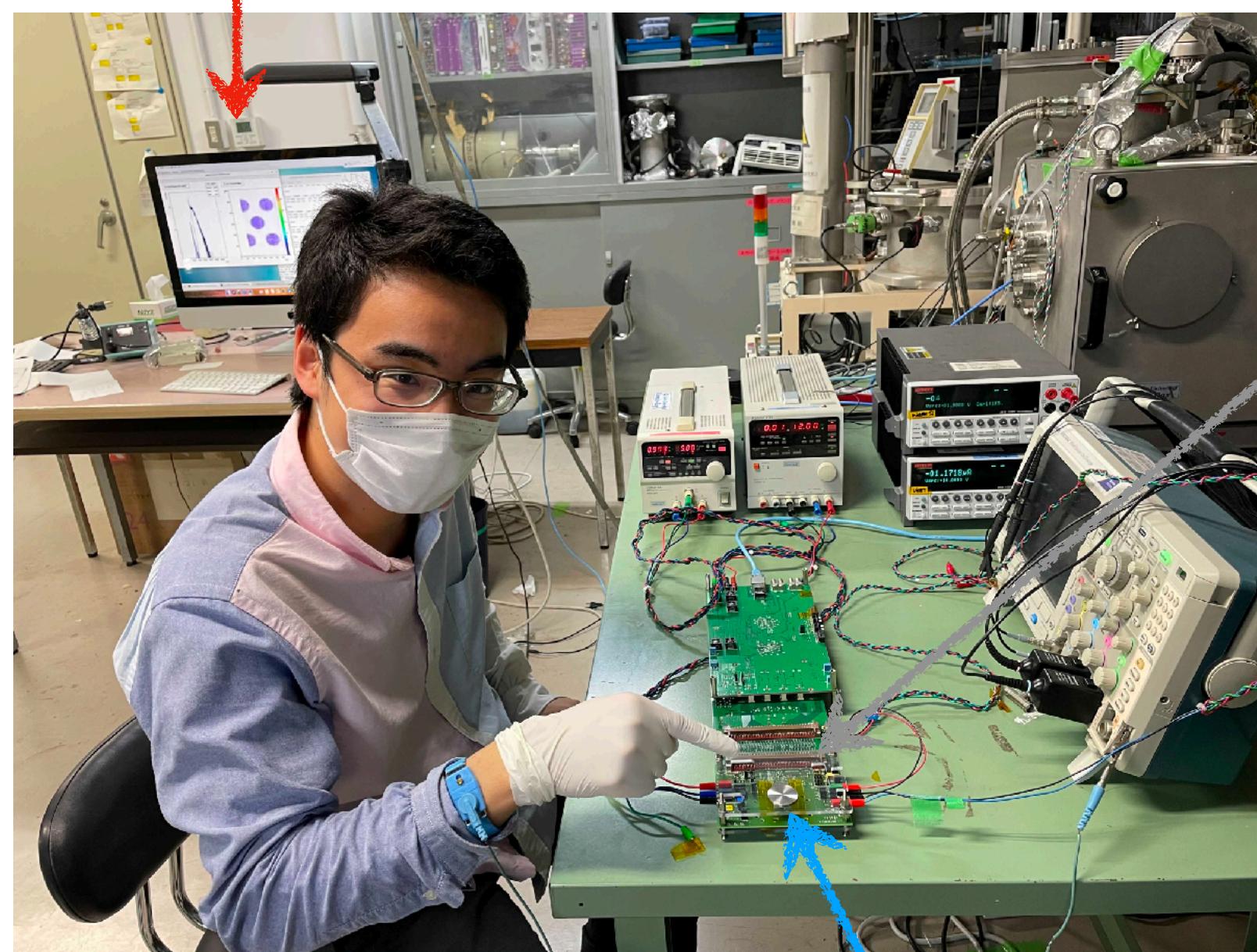
- リジッド・フレキシブル基板のXRPIX7を4枚使用
- $^{57}\text{Fe}$ を2枚のXRPIX7で挟む
- 天然Feを2枚のXRPIX7で挟む
- XRPIX7 (24.6 mm × 15.3 mm) と同じ大きさの鉄箔を設置
  - $^{57}\text{Fe}$ の質量 127 mg (厚さ 40 micron)
- 恒温槽内の鉛シールド内部に設置
- 三角シンチレーターを格子状に設置したアクティブシールド
- 一ヶ月の試験観測ののち、定常観測へ

# リジッド・フレキシブル基板のXRPIX7



# 実験室でのXRPIX7の動作試験

データ収集用PC

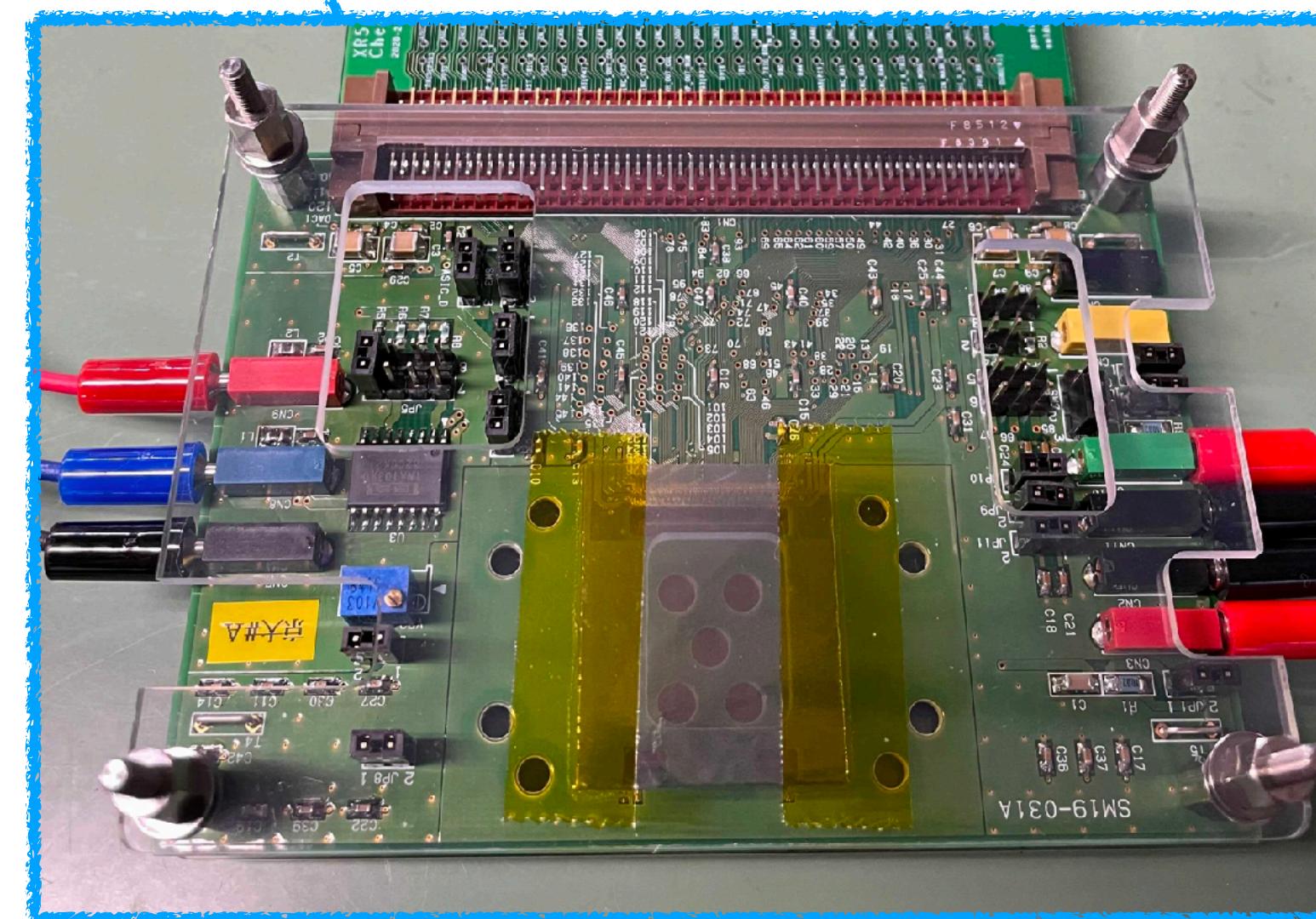


241Am線源

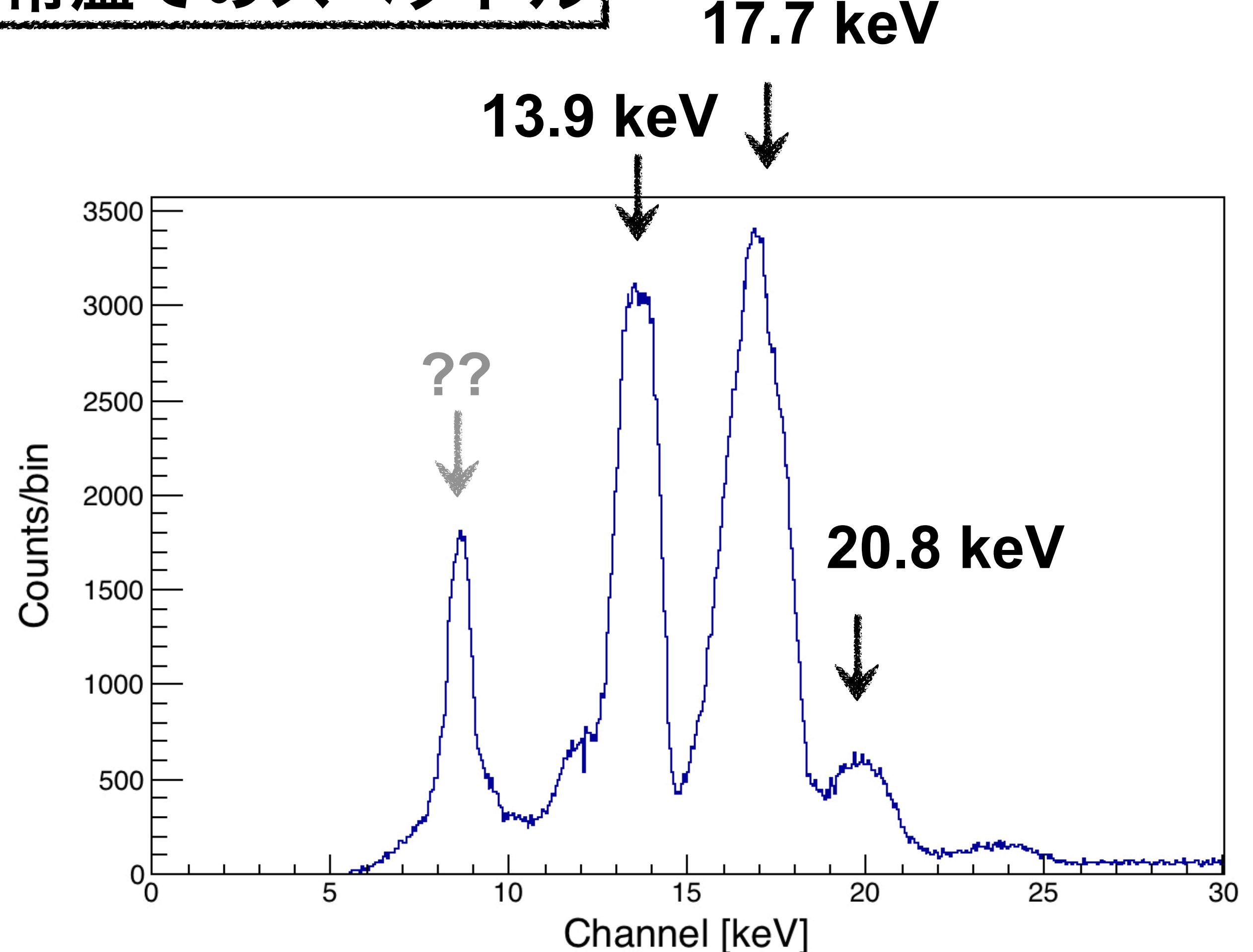
XRPIX7

M1 山田 龍

D2 天野 雄輝



常温でのスペクトル



# ISAI実験によるアクシオン上限値の予想感度

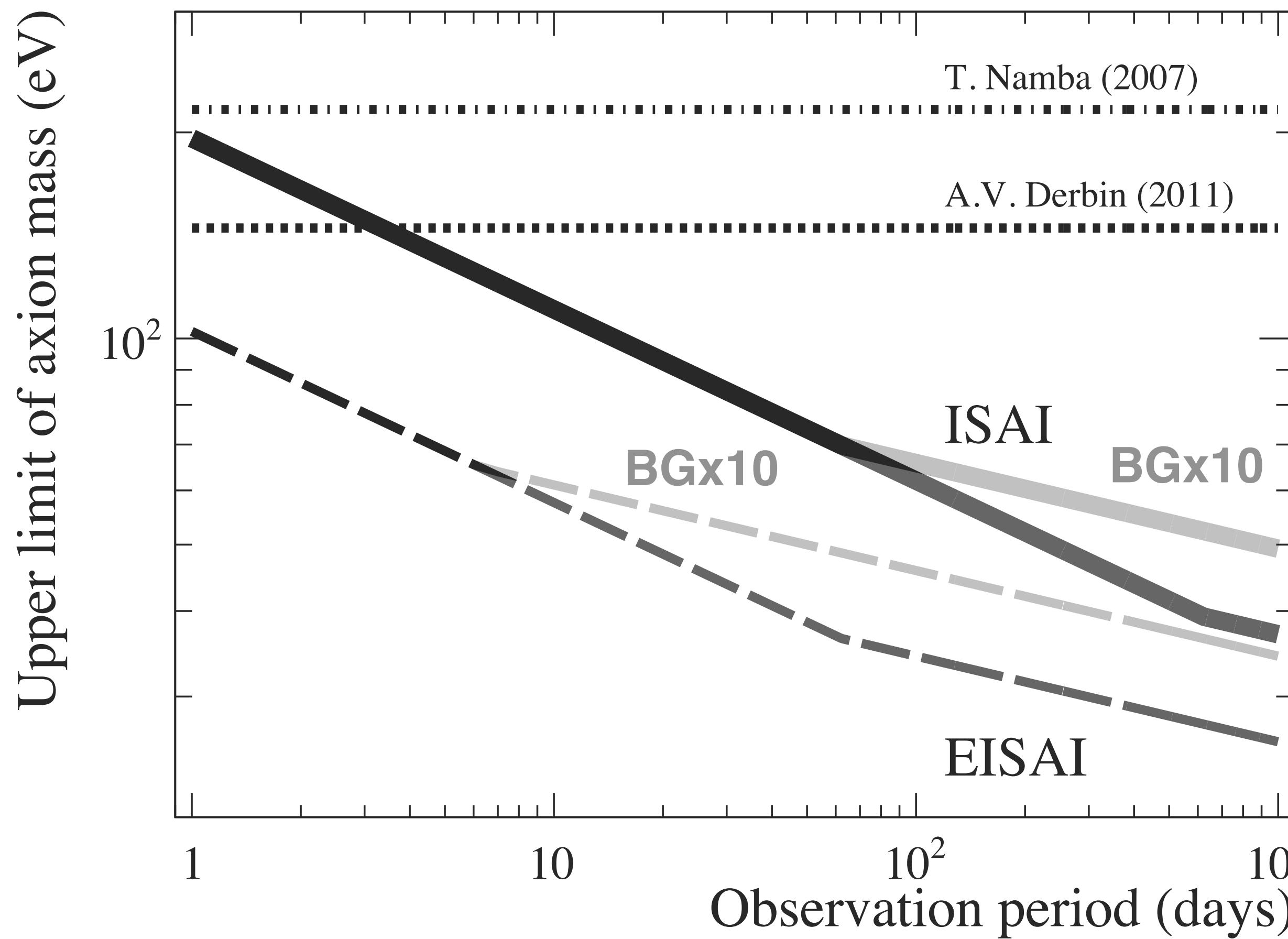
S. Moriyama, Phys.Rev.Lett. 75, 18 (1995)

$$m_a = 1 \text{ eV} \frac{\sqrt{z}}{1+z} \frac{1.3 \times 10^7 \text{ GeV}}{C \times 10^6} \left( \frac{R}{3 \times 10^2} \right)^{1/4}$$

- $C = 0.27$  核構造のパラメータ
- $z = 0.56$  トップとダウントンクオーカーの質量比
- $R$ : 検出レート (観測量)

$$m_a (\text{eV}) = 5.55 \times R^{1/4}$$

$$R = S / (M\eta\varepsilon)$$



- 上限値  $S$  - 観測時間およびBG量に依存
- $57\text{Fe}$ の質量  $M = 127 \text{ mg}$
- $14.4 \text{ keV}$ 放出確率  $\eta = 0.105$
- 検出効率 (Simulation)  $\varepsilon = 0.149$

1ヶ月: 83 eV, 半年: 53 eV の上限値へ

# まとめと今後

- アクション-原子核反応 $g_{\text{aN}}$ に特化した、テーブルトップ型実験で世界最高感度を目指す  
**Investigating Solar Axion by Iron-57, ISAI実験**
- $^{57}\text{Fe}$ と衛星搭載用の新型X線ピクセル検出器を、飛跡検出型アクティブシールドで囲む
  - 高分解能、トラッキング能力、反同時係数法により低BG化が期待
  - 1ヶ月で 83 eV, 半年で 53 eV のアクションの上限値へ到達できる
  - XENON1Tから示唆される  $m_a = 50 \text{ eV}$  を仮定した場合、2年で  $3.1\sigma$  の兆候が見える
- 将来計画：**Extensional Investigating Solar Axion by Iron-57, EISAI実験**
- 同じ恒温槽内に  $^{57}\text{Fe}$  と新型X線ピクセル検出器を 10 組並べ、さらに高感度化
- ISAI実験での  $3.1\sigma$  の兆候の結果から、EISAI実験での  $6.9\sigma$  の発見を目指す

# Backup

# 先行研究 (PDG 2020)

- $m_A < 145 \text{ eV}$ ,  $^{57}\text{Fe} + \text{Si(Li)}$ 検出器 (直径66 mm, 厚さ5 mm) で45日間の測定
- A.V. Derbin, Phys.At.Nucl. 74, 596 (2011)
- $m_A < 216 \text{ eV}$ ,  $^{57}\text{Fe} + \text{PIN}$ フォトダイオード 2個で14日間の測定
- T. Namba, Phys.Lett.B 645, 398 (2007)
- $m_A < 12.7 \text{ eV}$ ,  $^{83}\text{Kr}(9.4 \text{ keV})$ による比例係数管で613日測定 ( $g_{\text{aN}}$ 反応ではない)
- Y. M. Gavriluk et al., JETP Lett., 107, 10, 589 (2018)

Particle Data Group, PTEP, 083C01 (2020)  
<http://pdglive.lbl.gov/DataBlock.action?node=S029IAN>

## Invisible $A^0$ (Axion) Limits from Nucleon Coupling

Limits are for the axion mass in eV.

VALUE (eV)	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
••• We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. •••				
< 0.03		1 LEINSON 2019	ASTR	Neutron star cooling
$< 9.6 \times 10^{-3}$	95	2 LLOYD 2019	ASTR	$\gamma$ -rays from NS
		3 SMORRA 2019		$\bar{p}$ g-factor
		4 WU 2019	NMR	Axion dark matter
< 65	95	5 AKHMATOV 2018	CNTR	Solar axion
< 6.6	90	6 ARMENGAUD 2018	EDE3	Solar axion
< 0.085	90	7 BEZNOGOV 2018	ASTR	Neutron star cooling
$< 12.7$	95	8 GAVRILYUK 2018	CNTR	Solar axion
< 0.01		9 HAMAGUCHI 2018	ASTR	Neutron star cooling
		10 ABEL 2017		Neutron EDM
< 93	90	11 ABGRALL 2017	HPGE	Solar axion
< 4	90	12 FU 2017A	PNDX	Solar axion
		13 KLIMCHITSKAYA 2017A		Casimir effect
< 177	90	14 LIU 2017A	CDEX	Solar axion
< 0.079	95	15 BERENJI 2016	ASTR	$\gamma$ -rays from NS
< 100	95	16 GAVRILYUK 2015	CNTR	Solar axion
		17 KLIMCHITSKAYA 2015		Casimir-less
		18 BEZERRA 2014		Casimir effect
		19 BEZERRA 2014A		Casimir effect
		20 BEZERRA 2014B		Casimir effect
		21 BEZERRA 2014C		Casimir effect
		22 BLUM 2014	COSM	${}^4\text{He}$ abundance
		23 LEINSON 2014	ASTR	Neutron star cooling
< 250	95	24 ALESSANDRIA 2013	CNTR	Solar axion
< 155	90	25 ARMENGAUD 2013	EDEL	Solar axion
$< 8.6 \times 10^3$	90	26 BELLI 2012	CNTR	Solar axion
$< 1.4 \times 10^4$	90	27 BELLINI 2012B	BORX	Solar axion
$< 145$	95	28 DERBIN 2011	CNTR	Solar axion
		29 BELLINI 2008	CNTR	Solar axion
		30 ADELBERGER 2007		Test of Newton's law

# 先行研究で測定されたスペクトル

A.V.Derbin, Phys.At.Nucl. 74, 596 (2011)

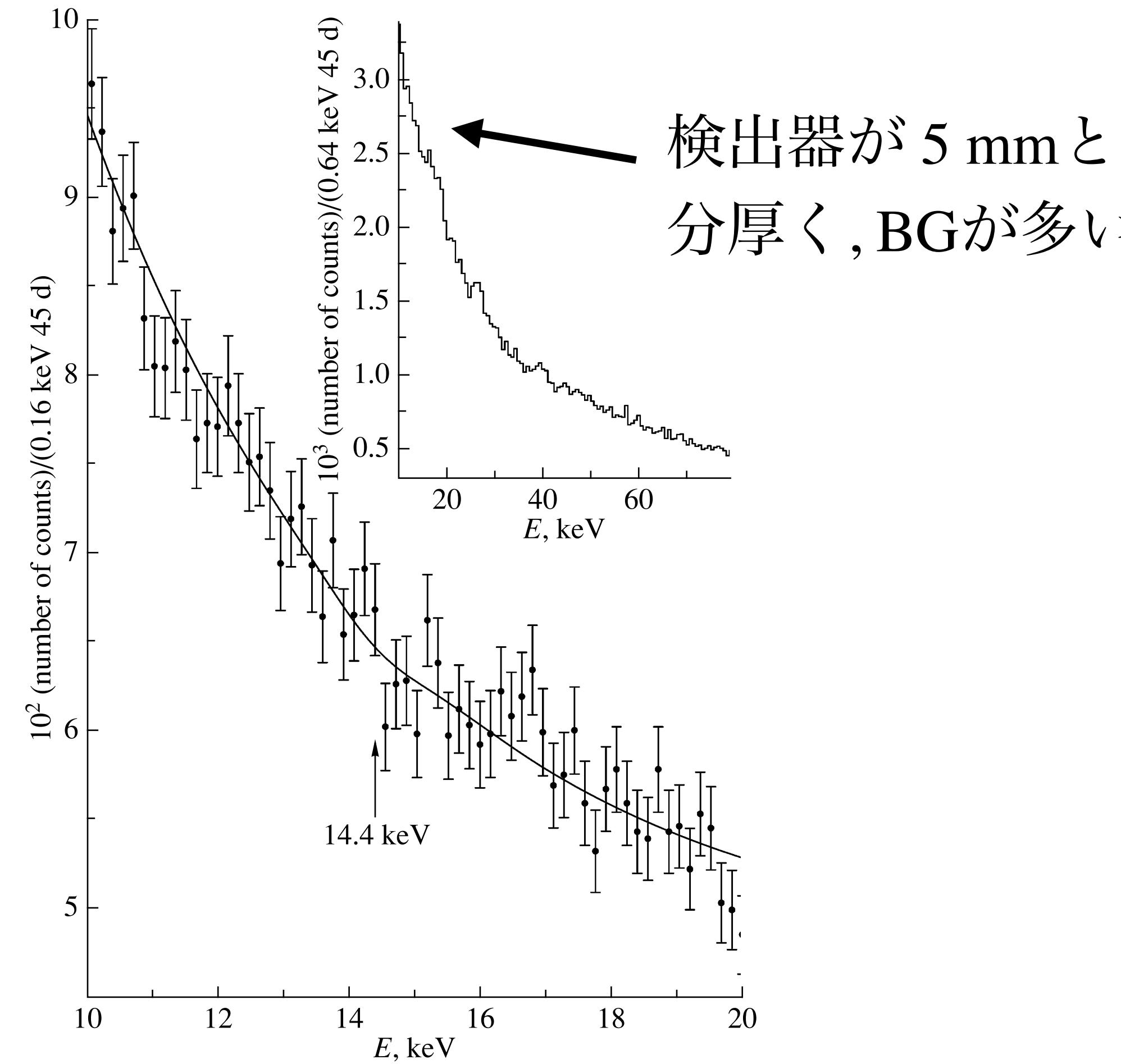


Fig. 1. Result of approximating the spectrum measured in anticoincidence with an active-shield signal in the range 10–20 keV. The inset shows the Si(Li)-detector spectrum measured in the range 10–80 keV.

T. Namba, Phy.Lett.B 645 (2007) 398

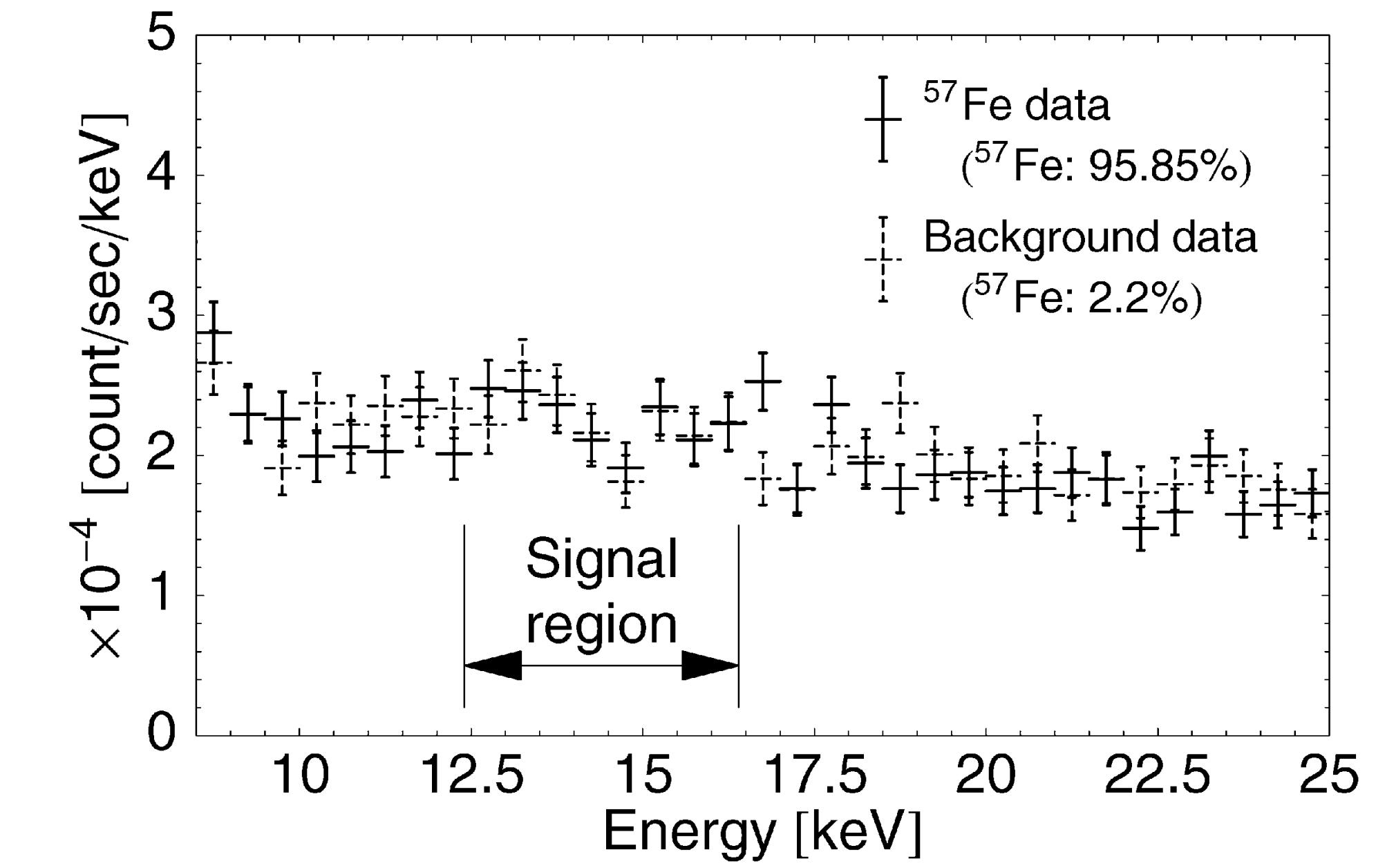


Fig. 2. The solid histogram shows the source measurements with the enriched  $^{57}\text{Fe}$  foil (95.85% of  $^{57}\text{Fe}$ ), and the dashed shows the background measurements with the natural iron (2.2% of  $^{57}\text{Fe}$ ). The energy region from 12.4 keV to 16.4 keV is used for the analysis.

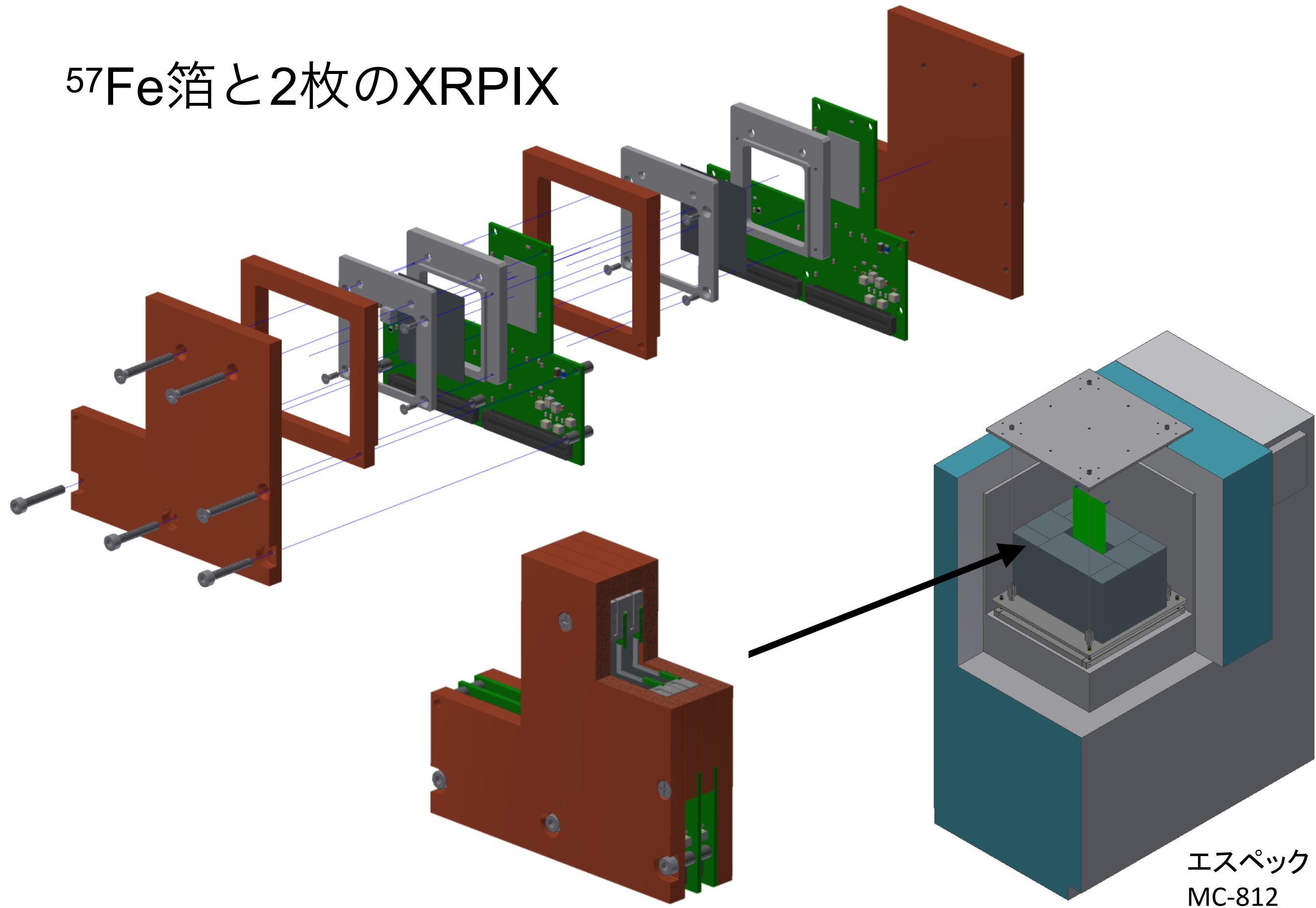
高分解能、低BGな装置による長期観測で  $m_A < 100 \text{ eV}$  を狙う

# 実験装置の準備状況

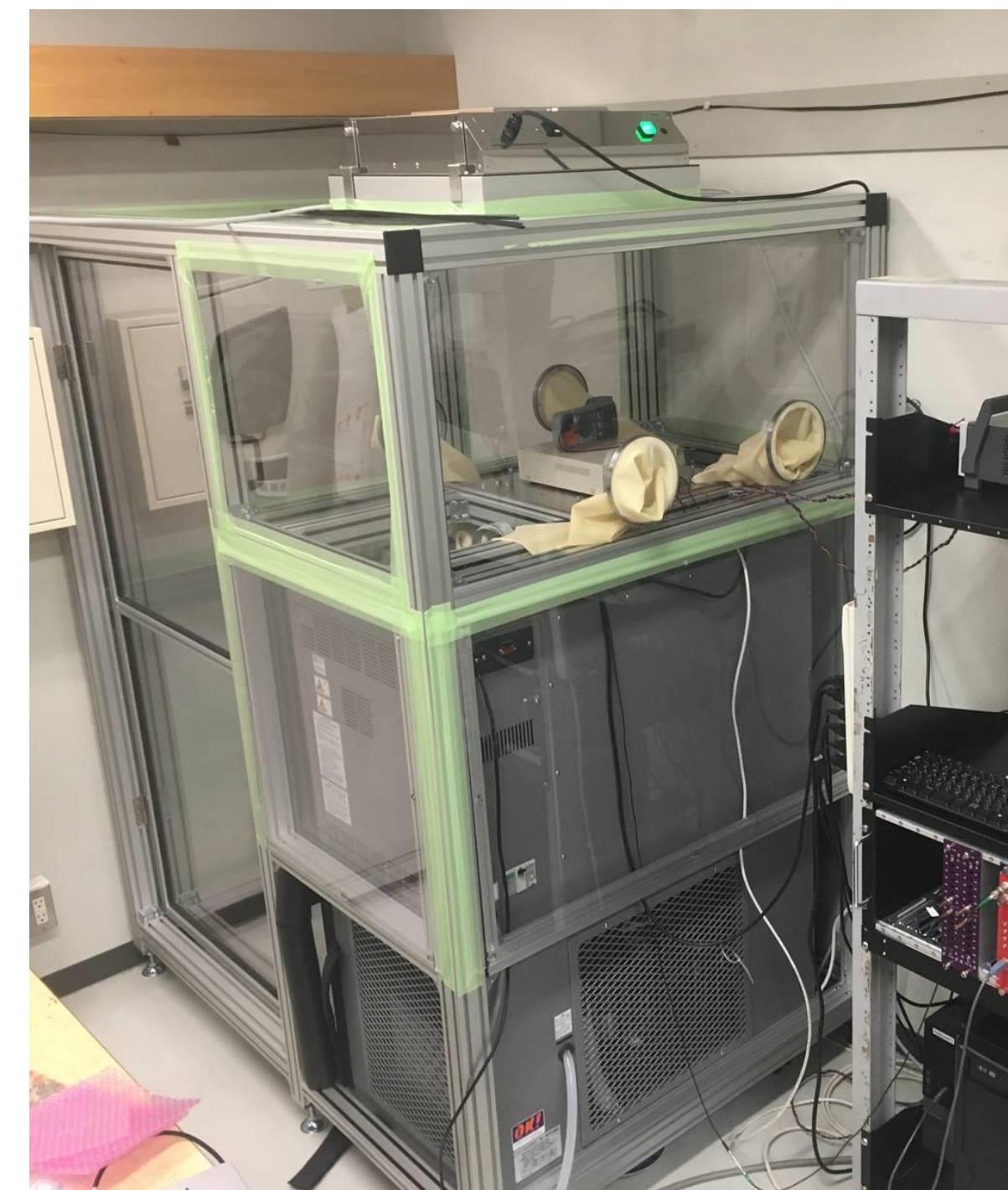
小貫（東大）

- 2枚のXRPIX7で<sup>57</sup>Fe箔を挟み、40 cm立方体の恒温槽内 (-85°C) に設置
  - 基板 (G10 Chip-board) に含まれる放射線がBG源になる

<sup>57</sup>Fe箔と2枚のXRPIX



クリーンブース化

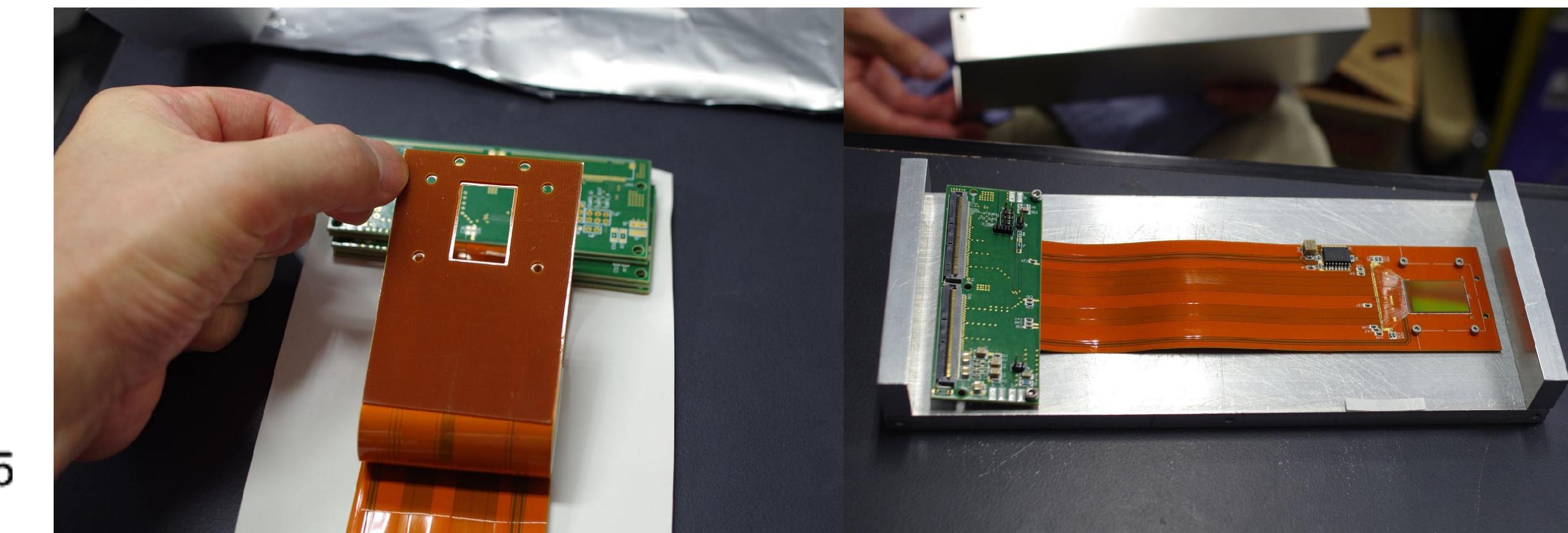
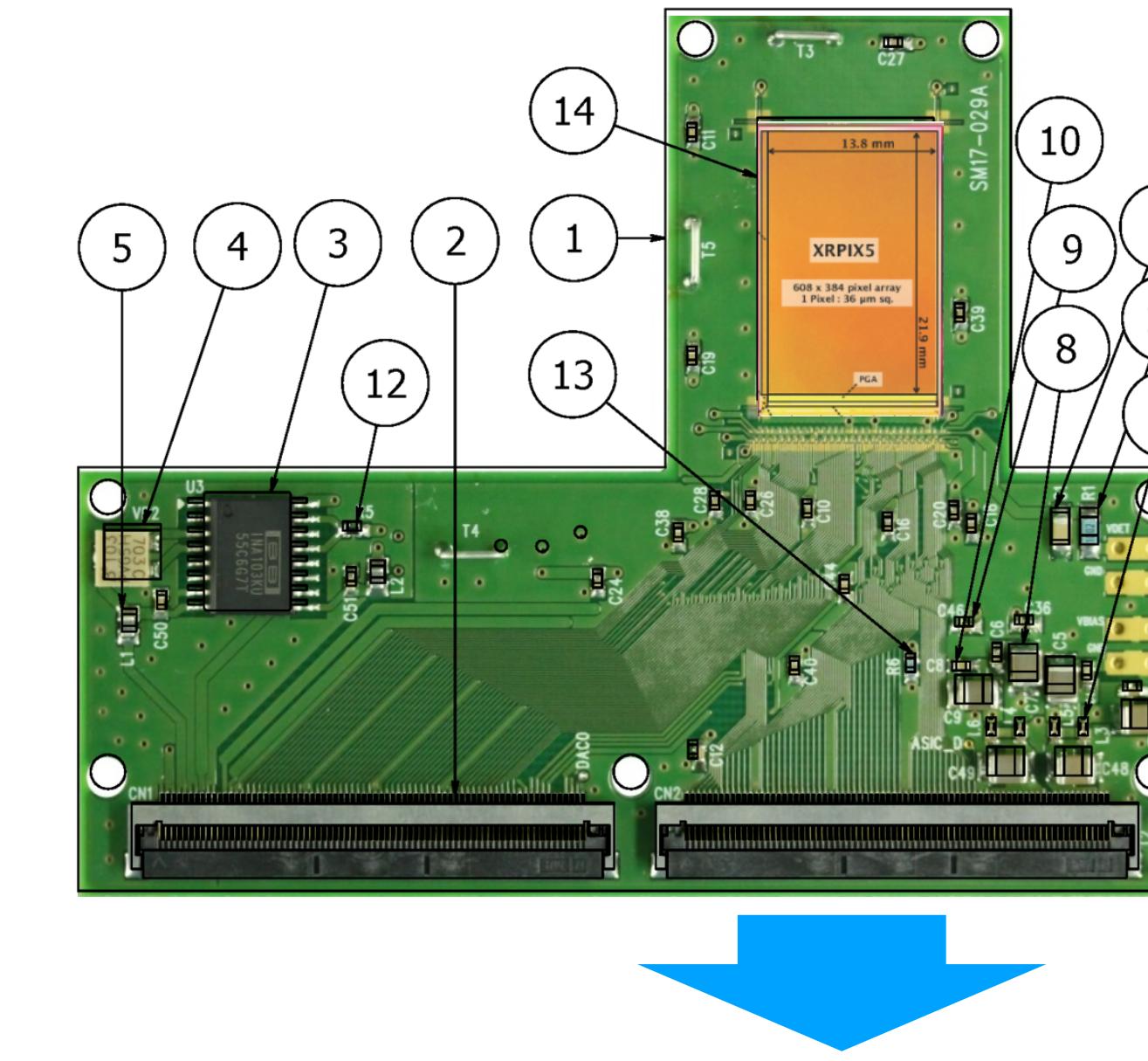
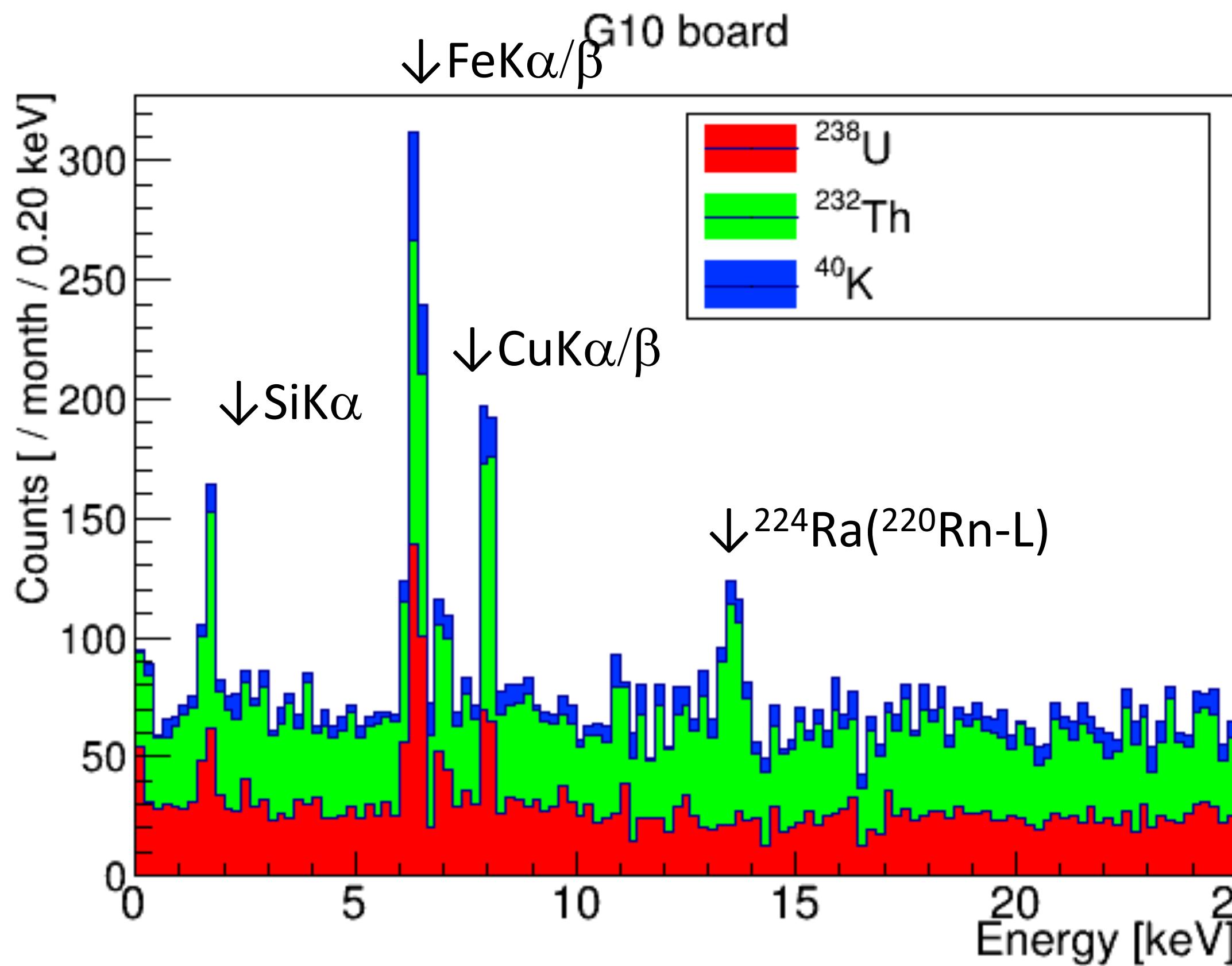


>50 mmの鉛で  
環境放射線を遮蔽



# リジット・フレキシブル基板による低BG化

リジッド基板の放射線量を高純度Geで測定し、シミュレーションで1ヶ月間のBGを推定



左図の1/100以上の低BG化により、ほぼBGフリーな測定を目指す

# 低BG化

**Table 1**

Result of radioactivities in the chip-board.

No	Category	Quantity [/board]	$^{238}\text{U}$ ( $^{214}\text{Bi}$ ) [mBq/unit]	$^{232}\text{Th}$ ( $^{208}\text{Tl}$ ) [mBq/unit]	$^{40}\text{K}$ [mBq/unit]
1	Chip-board	1(16.4 g)	$52.5 \pm 2.3$	$94.7 \pm 3.7$	$71.7 \pm 9.0$
2	Connector	2	$2.24 \pm 0.15$	$2.13 \pm 0.20$	$1.91 \pm 0.56$
3	Inst. amp.	1	$-0.02 \pm 0.24$	$-0.03 \pm 0.38$	$-1.8 \pm 1.2$
4	Potentiometer	1	$-0.07 \pm 0.24$	$0.59 \pm 0.40$	$1.4 \pm 1.3$
5	Ferrite beads	2	$0.000 \pm 0.010$	$0.042 \pm 0.016$	$-0.01 \pm 0.05$
6	EMI filter	4	$0.097 \pm 0.012$	$-0.014 \pm 0.016$	$-0.13 \pm 0.05$
7	$0.047 \mu\text{F}$ MLCC	1	$1.24 \pm 0.03$	$0.031 \pm 0.017$	$-0.05 \pm 0.05$
8	$100 \mu\text{F}$ MLCC	6	$0.63 \pm 0.02$	$0.09 \pm 0.02$	$-0.11 \pm 0.05$
9	$0.1 \mu\text{F}$ MLCC	19	$0.083 \pm 0.012$	$0.028 \pm 0.018$	$-0.04 \pm 0.05$
10	$10 \mu\text{F}$ MLCC	4	$0.082 \pm 0.013$	$0.028 \pm 0.019$	$-0.03 \pm 0.05$
11	$10\text{k}\Omega$ Resistor	1	$0.004 \pm 0.009$	$0.020 \pm 0.015$	$-0.03 \pm 0.05$
12	$6\text{k}\Omega$ Resistor	1	$0.016 \pm 0.010$	$-0.017 \pm 0.014$	$-0.06 \pm 0.04$
13	$10\text{k}\Omega$ Resistor	1	$0.003 \pm 0.009$	$0.008 \pm 0.014$	$-0.01 \pm 0.05$
14	XRPIX5b	1g	$-0.103 \pm 0.090$	$-0.015 \pm 0.153$	$-0.27 \pm 0.45$
15	Ag paste	1g	$-0.049 \pm 0.098$	$0.06 \pm 0.16$	$-0.86 \pm 0.48$
16	Pb free solder	1g	$-0.014 \pm 0.037$	$-0.002 \pm 0.058$	$-0.01 \pm 0.20$
17	Pb/Sn solder	1g	$0.021 \pm 0.066$	$-0.01 \pm 0.10$	$0.13 \pm 0.34$
Total [/board]		1	$\sim 64$	$\sim 100$	$\sim 76$

遮蔽後の一一番のBG源はチップ付近の  
積層セラミックコンデンサ（9番）

実測で1/5の低BGのものを実装

# Efficiency計算

- 有感体積を最悪値で計算
  - 57Fe箔とXRPIXの可能な距離感 : 1mm
  - 更に間に Al 箔 : 0.2um, Si : 0.2um
  - 検出効率 : **14.9%**

