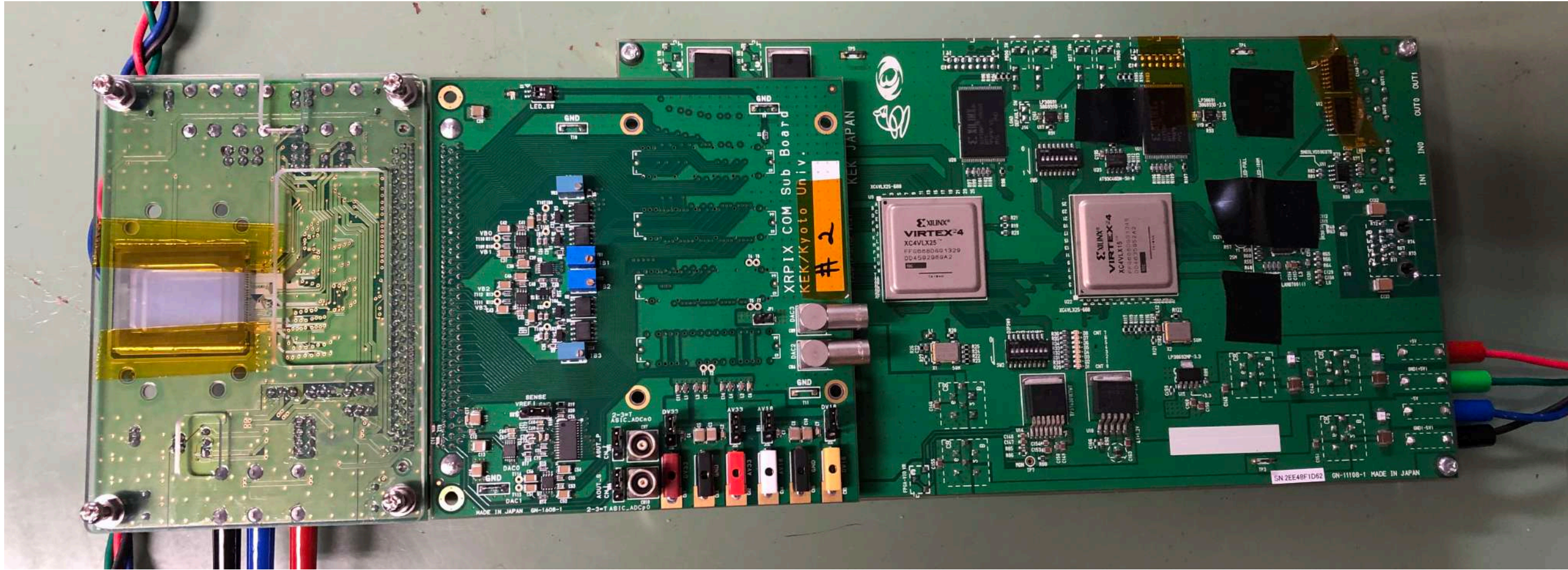


# $^{57}\text{Fe}$ とSOI検出器による太陽アクシオン探査 (Investigating Solar Axion by Iron-57, ISAI)



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 (京大理)

身内 賢太郎, 島田 拓弥 (神大理) 小貫 良行 (東大理)

# アクシオン

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)

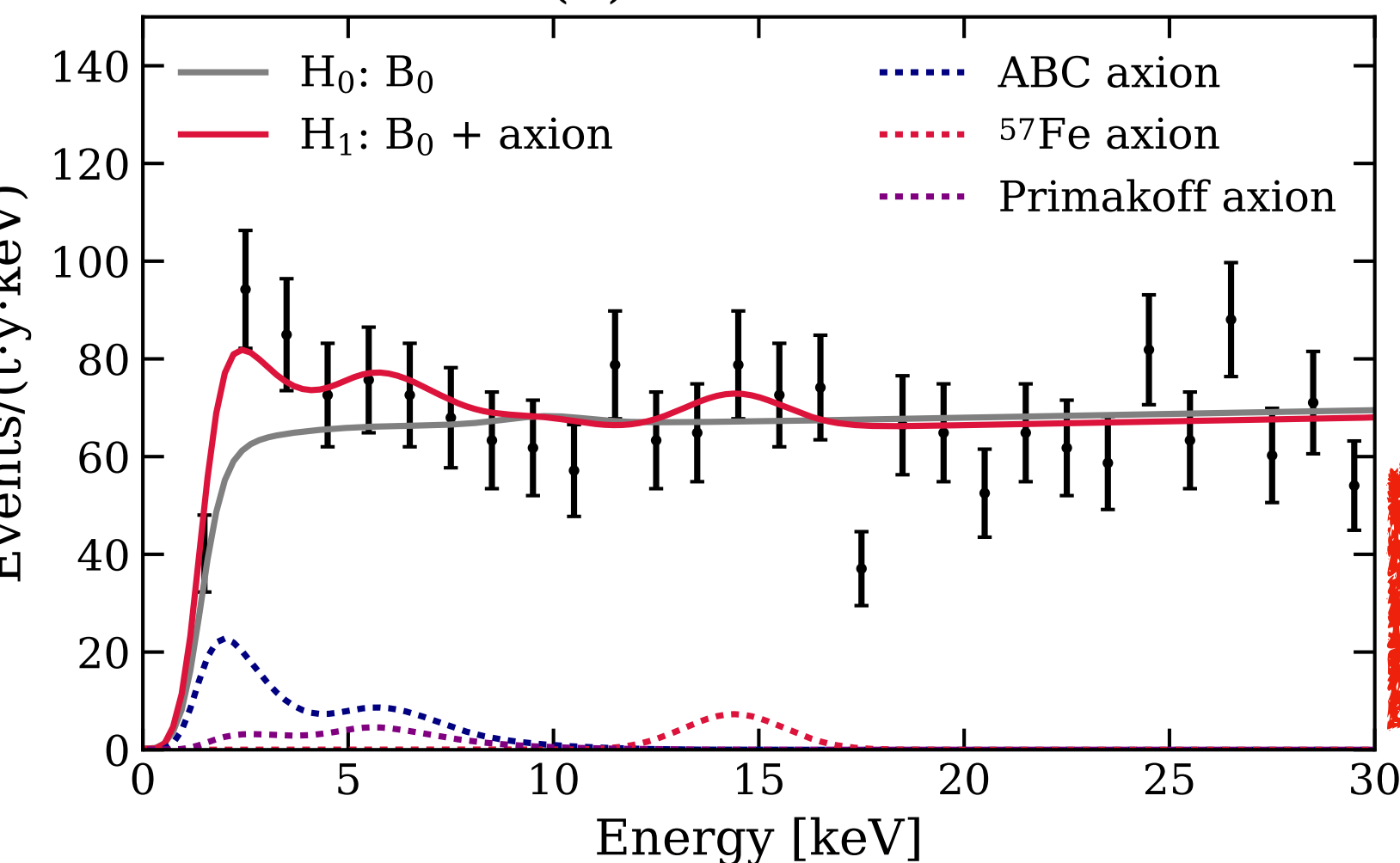


<https://www.bokool.com/products/axion-dish-washing-paste-lime-400-g>

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から太陽アクシオンと解釈可能な結果 ( $m_A \sim 46 - 56 \text{ eV}$ )

(b) Solar axion



The three projections of Fig. 8 can be used to reconstruct the three-dimensional 90% confidence surface for  $g_{ae}$ ,  $g_{ae}g_{a\gamma}$ , and  $g_{ae}g_{an}^{eff}$ . Due to the presence of an excess at low energy, this surface would suggest either a non-zero ABC component or a non-zero Primakoff component. However, the coupling values needed to explain this excess are in strong tension with stellar cooling constraints [106–110]. The CAST constraints [104] as shown are valid for axion masses below  $10 \text{ meV}/c^2$  while those from XENON1T and similar experiments hold for all axion masses up to  $\sim 100 \text{ eV}/c^2$ .

**Interpreting the excess as an axion signal**

**IF**

E. Shockley for XENON | LNGS Webinar | 17 June 2020

**NOTE: not confidence intervals.**

Overlap of specific benchmark models with our model-independent confidence volume.

Should be interpreted as **approximate, consistent mass ranges**

**DFSZ**  
 $m_a \sim 0.1-5 \text{ eV}$

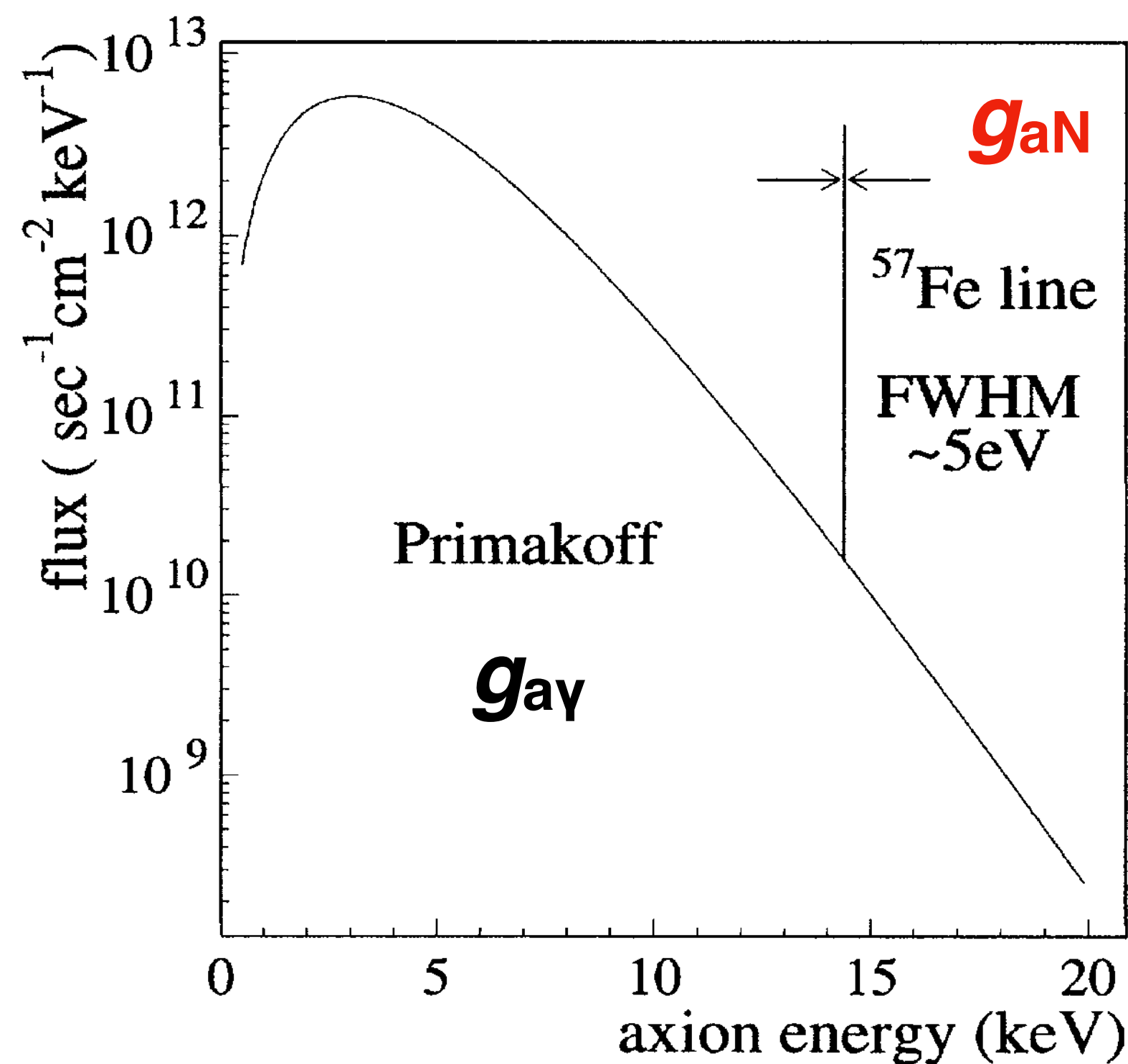
**hadronic**  
 $m_a \sim 5-20 \text{ eV}$   
 $E \sim 5-7$

Did I mention they aren't confidence intervals?

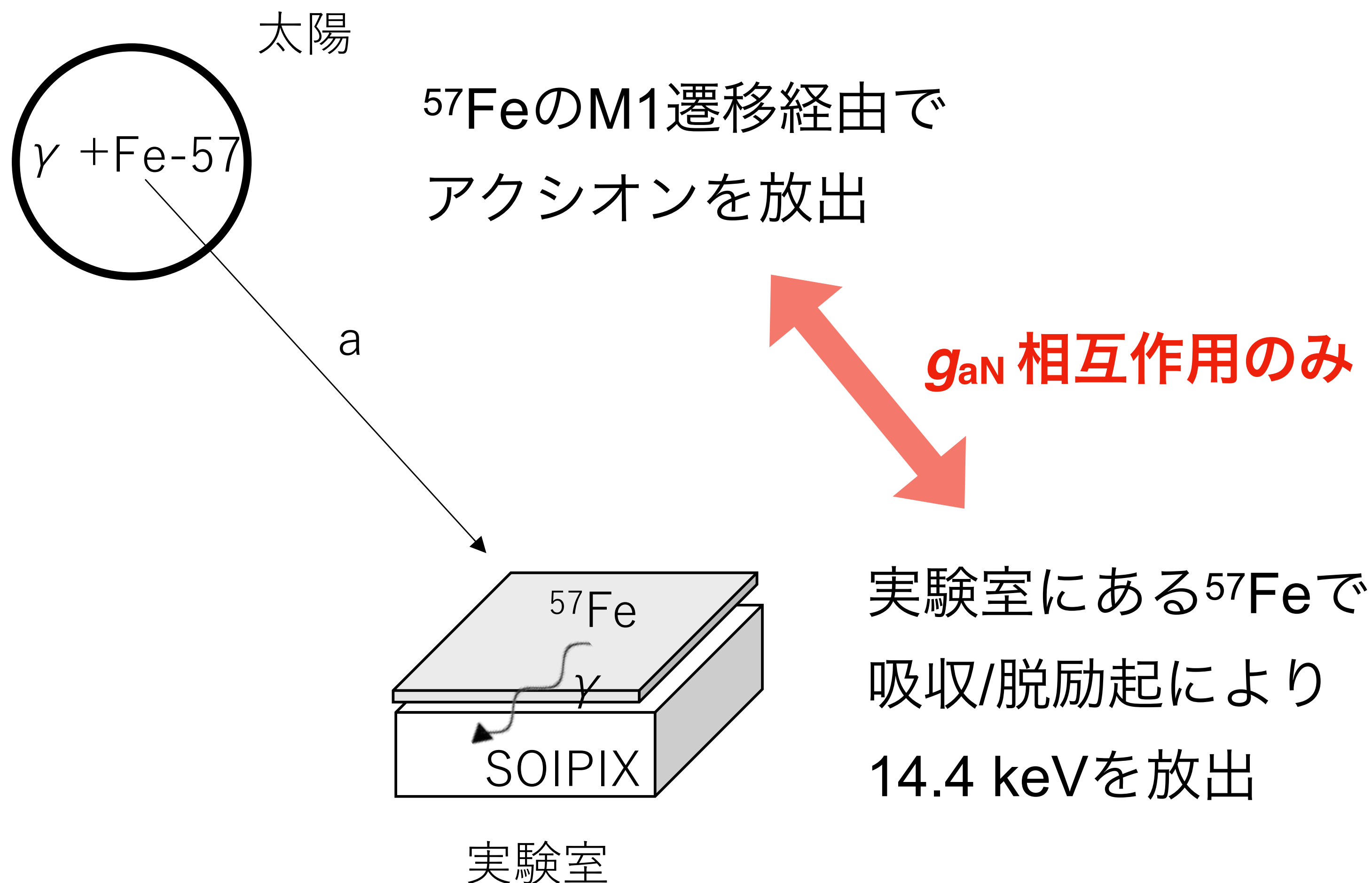
# アクシオン-原子核反応( $g_{aN}$ )に特化した検出方法

- 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

太陽アクシオンの予想Flux



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



Limits are for the axion mass in eV.

# 先行研究 (PDG 2020)

$m_A < 145 \text{ eV}$ ,  $^{57}\text{Fe}+\text{Si}(\text{Li})$ 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 ( $g_{aN}$ 反応ではない)

Y. M. Gavrilyuk et al., JETP Lett., 107, 10, 589 (2018)

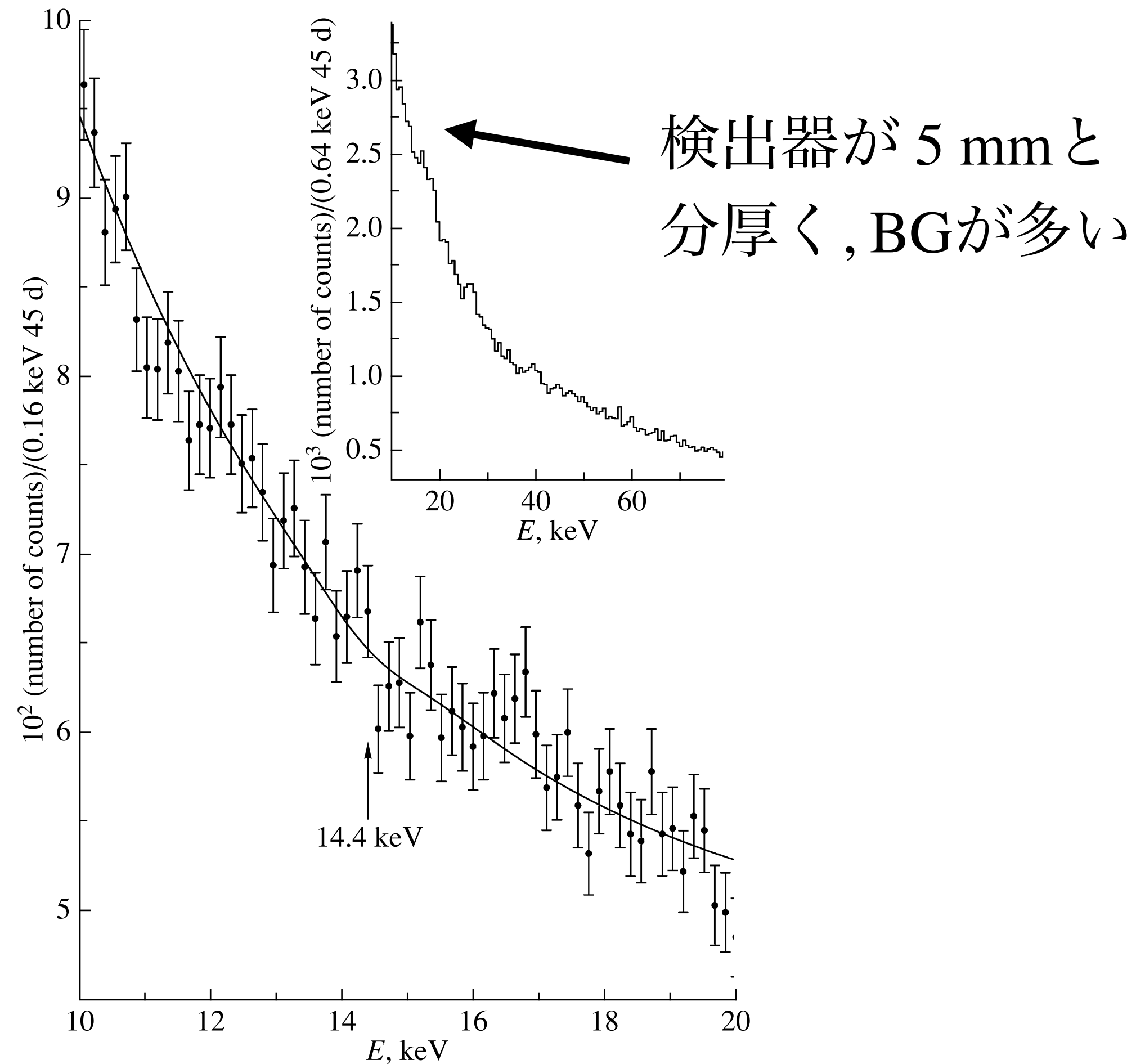
Particle Data Group, PTEP, 083C01 (2020)

<http://pdglive.lbl.gov/DataBlock.action?node=S029IAN>

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)



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

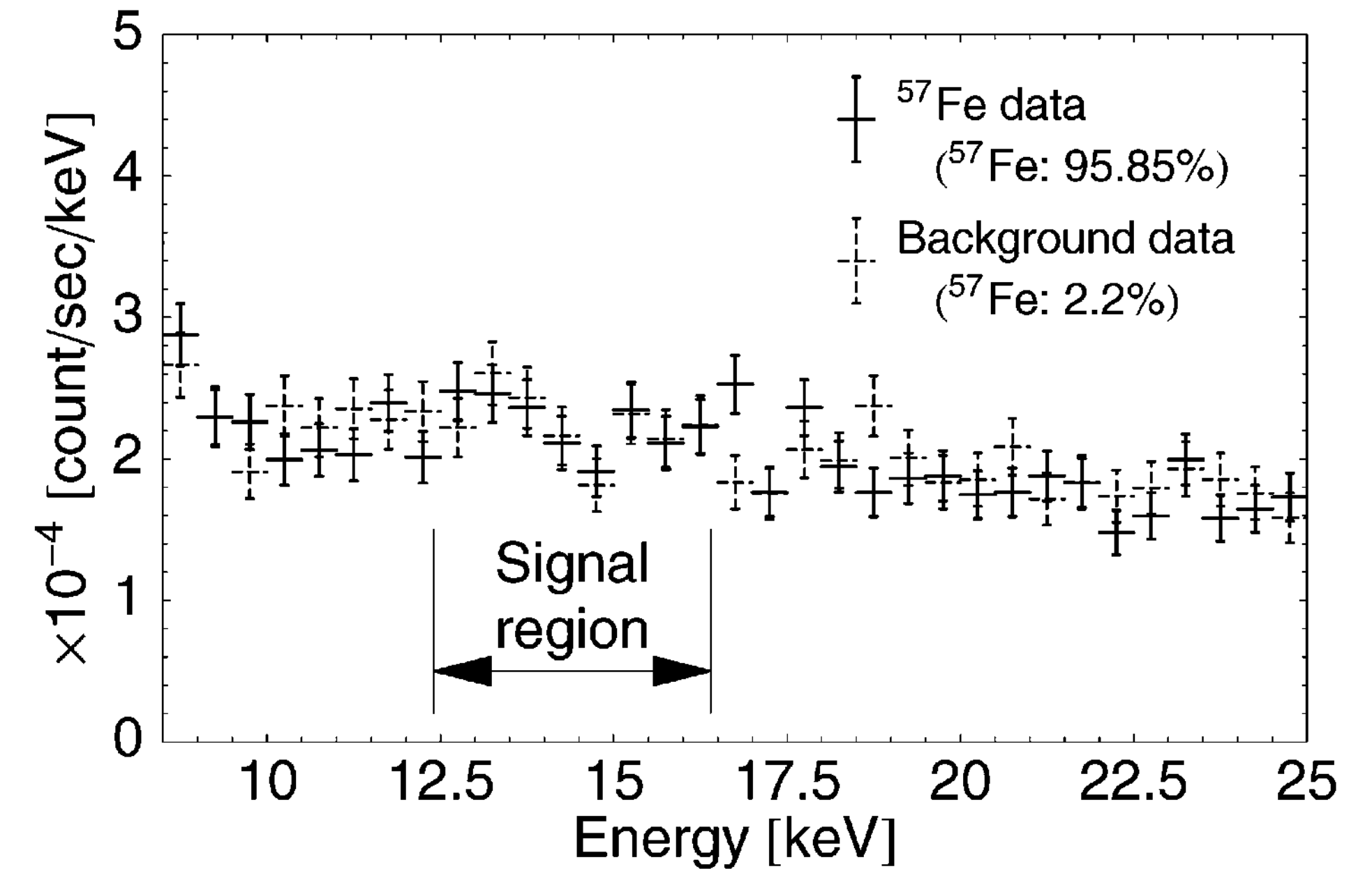


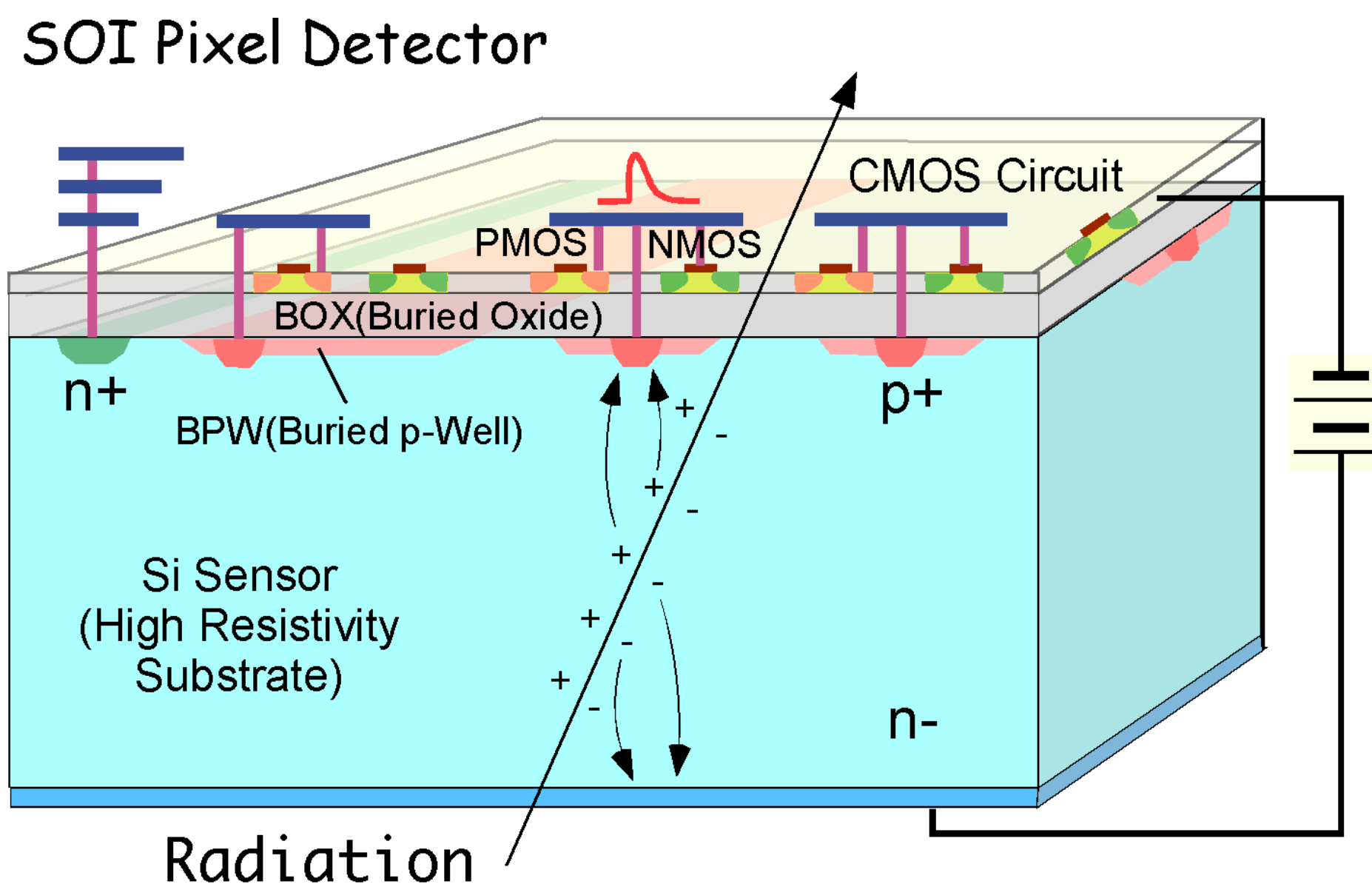
Fig. 2. The solid histogram shows the source measurements with the enriched  $^{57}\text{Fe}$  foil (95.85% of  $^{57}\text{Fe}$ ), and the dashed shows the background measurements with the natural iron (2.2% of  $^{57}\text{Fe}$ ). The energy region from 12.4 keV to 16.4 keV is used for the analysis.

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.

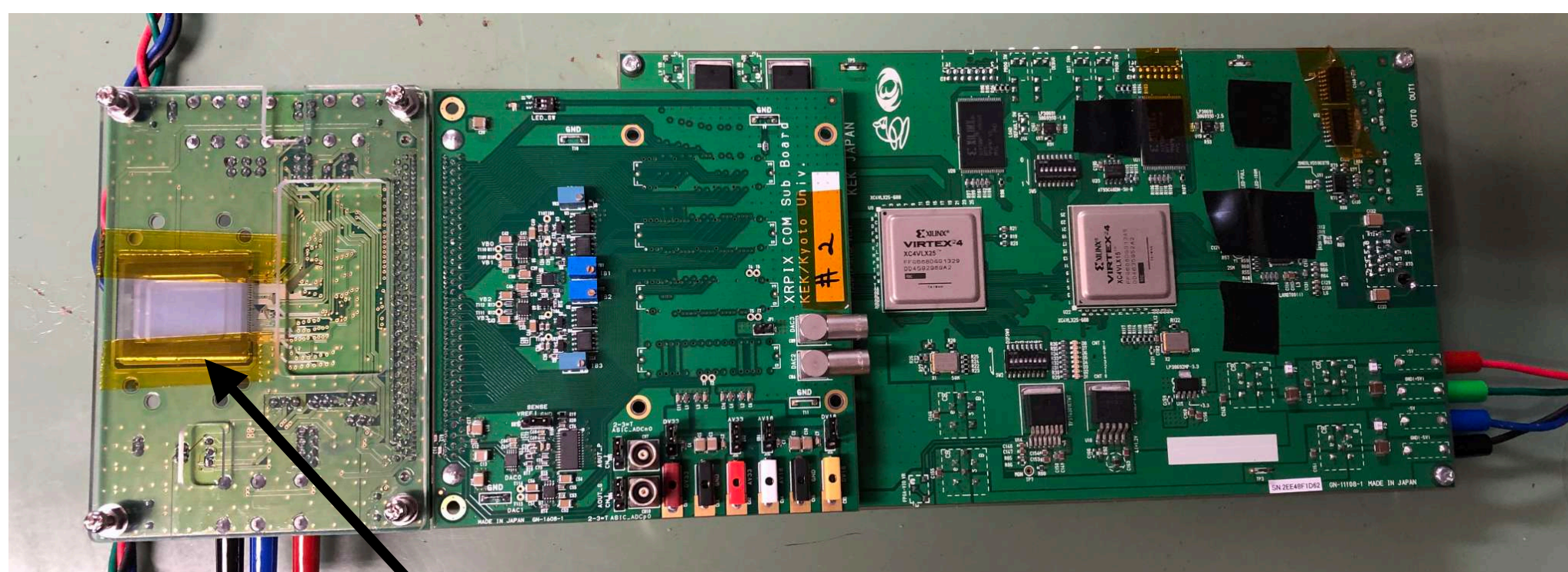
高分解能、低BGな装置による長期観測で  $m_A < 100$  eV を狙う

# SOI検出器 (XRPIX7)

天野、鶴<sup>6</sup>  
(京大)



- 次世代X線衛星搭載用に開発されたSOI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  $\mu$ s 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



XRPIX7

# 低BKGを実現する上で最適なSOI検出器

項目	PINフォトダイオード	CCD	SOI検出器	DSSD	超伝導TES (※)
分解能 (FWHM)	3500 eV	200 eV	250 eV	1000 eV	10 eV
Tracking	×	◎	◎	△	?
反同時 計数法	×	×	◎	◎	◎

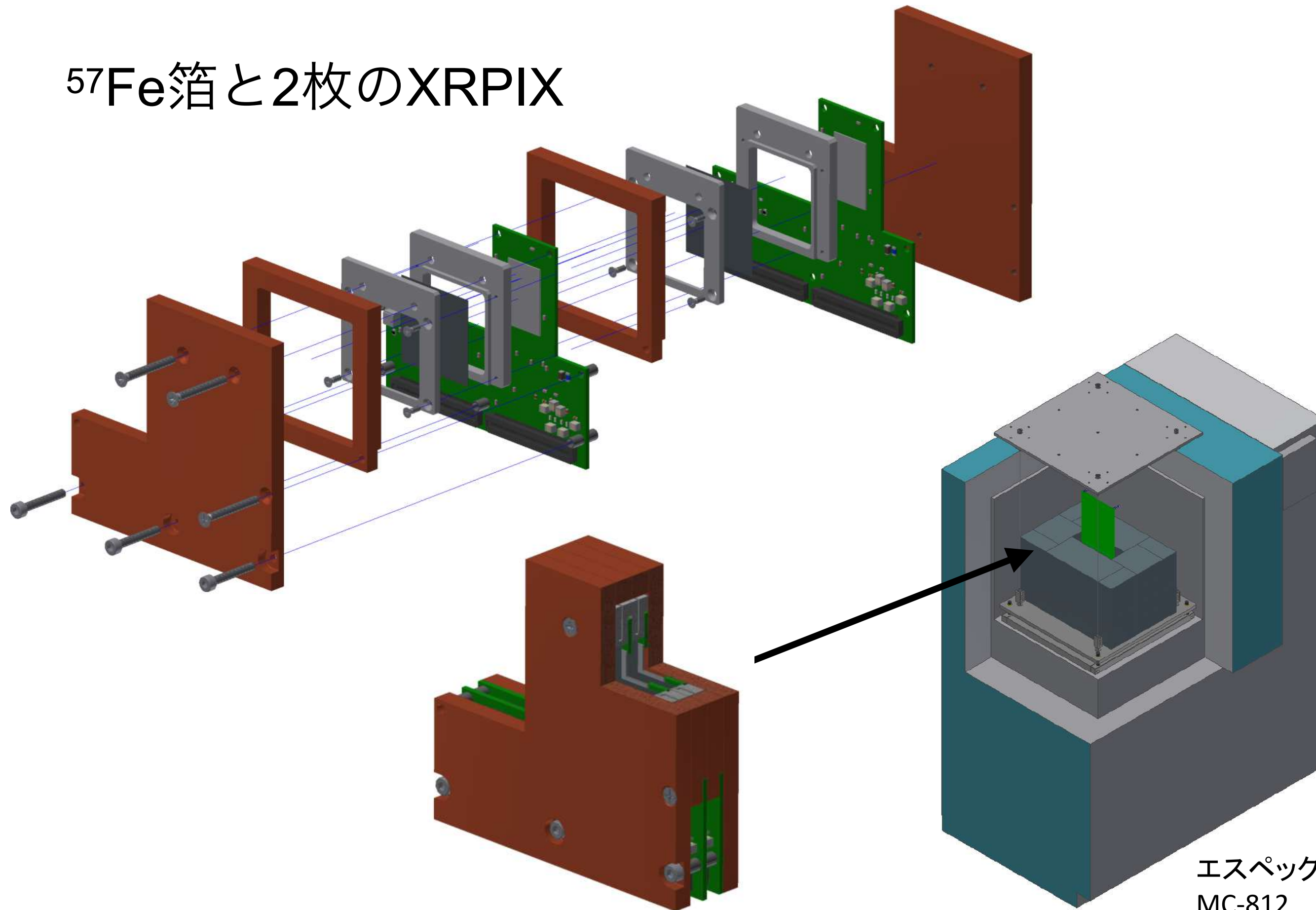
(※) 超伝導TESは高い分解能を持つが、ターゲットとなる $^{57}\text{Fe}$ によって性能が落ちてしまい、 $^{57}\text{Fe}$ の質量を多くとれない (満田 Darkon 2019 より)

DSSD: Double-sided Silicon Strip Detector

# 実験装置の準備状況

- 2枚のXRPIX7で $^{57}\text{Fe}$ 箔を挟み、40 cm立方体の恒温槽内 ( $-85^\circ\text{C}$ ) に設置
- 基板 (G10 Chip-board) に含まれる放射線がBG源になる

$^{57}\text{Fe}$ 箔と2枚のXRPIX



クリーンブース化



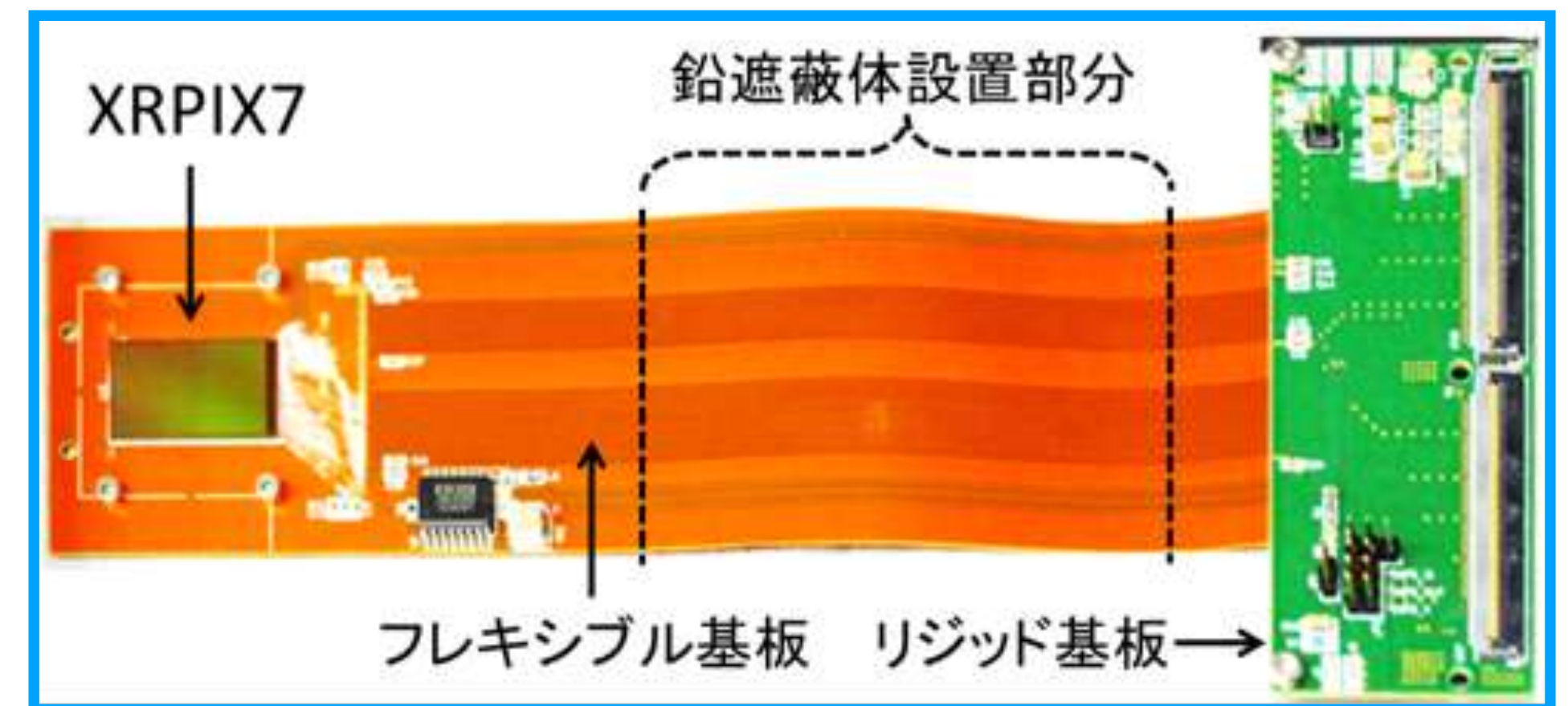
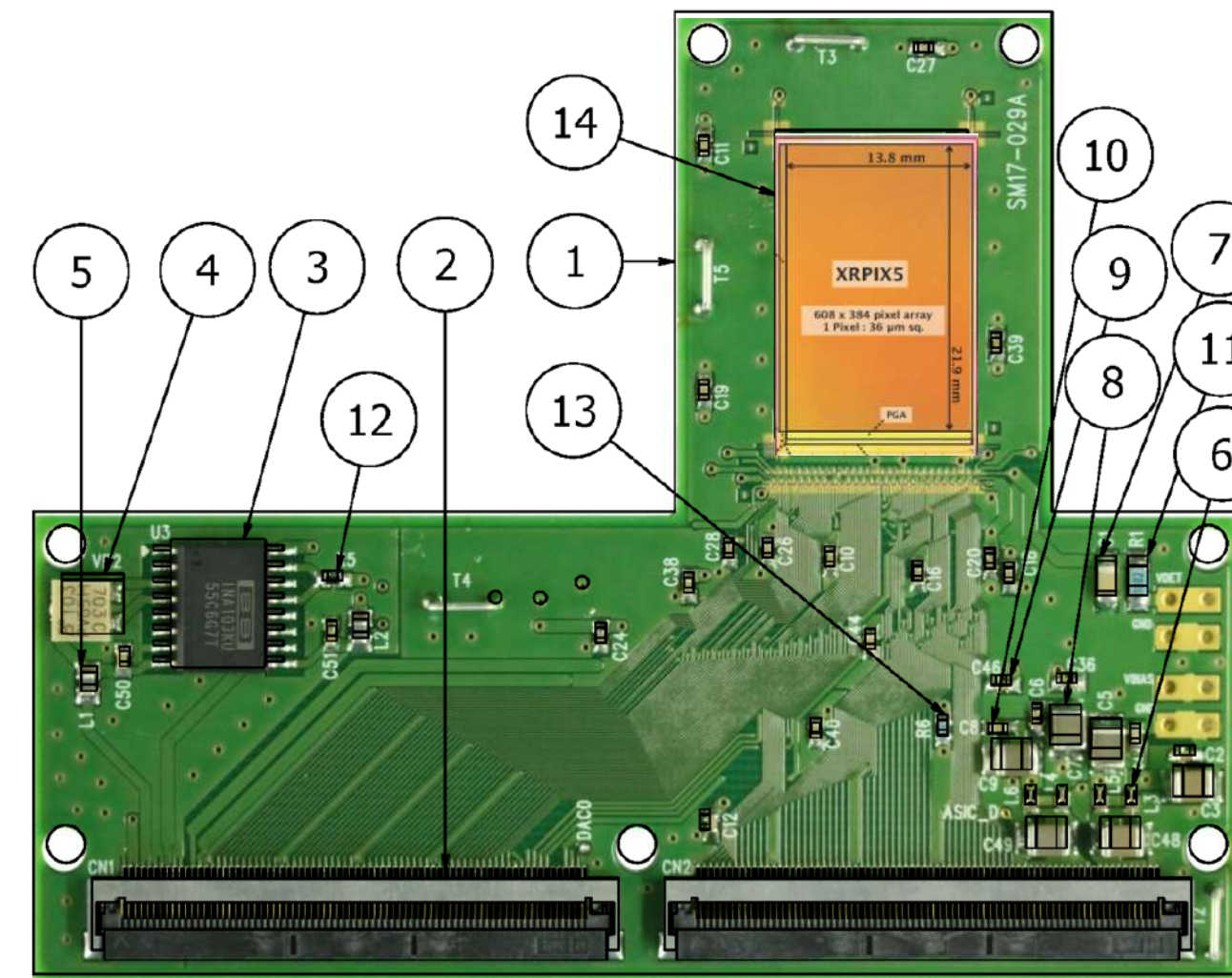
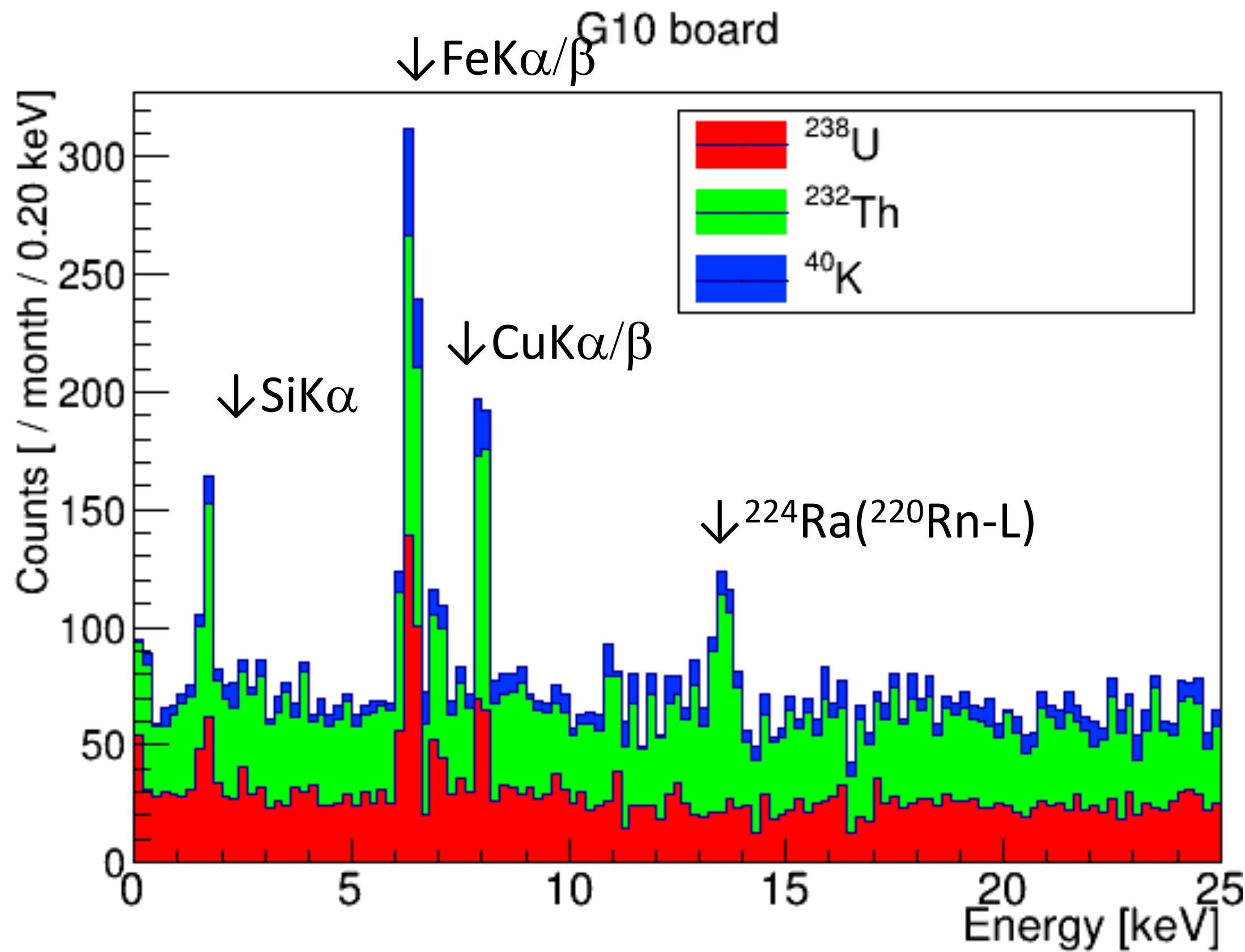
>50 mmの鉛で  
環境放射線を遮蔽





# リジット・フレキシブル基板による低BG化

リジット基板の放射線量をHPGeで測定し、シミュレーションで1ヶ月間のBGを推定

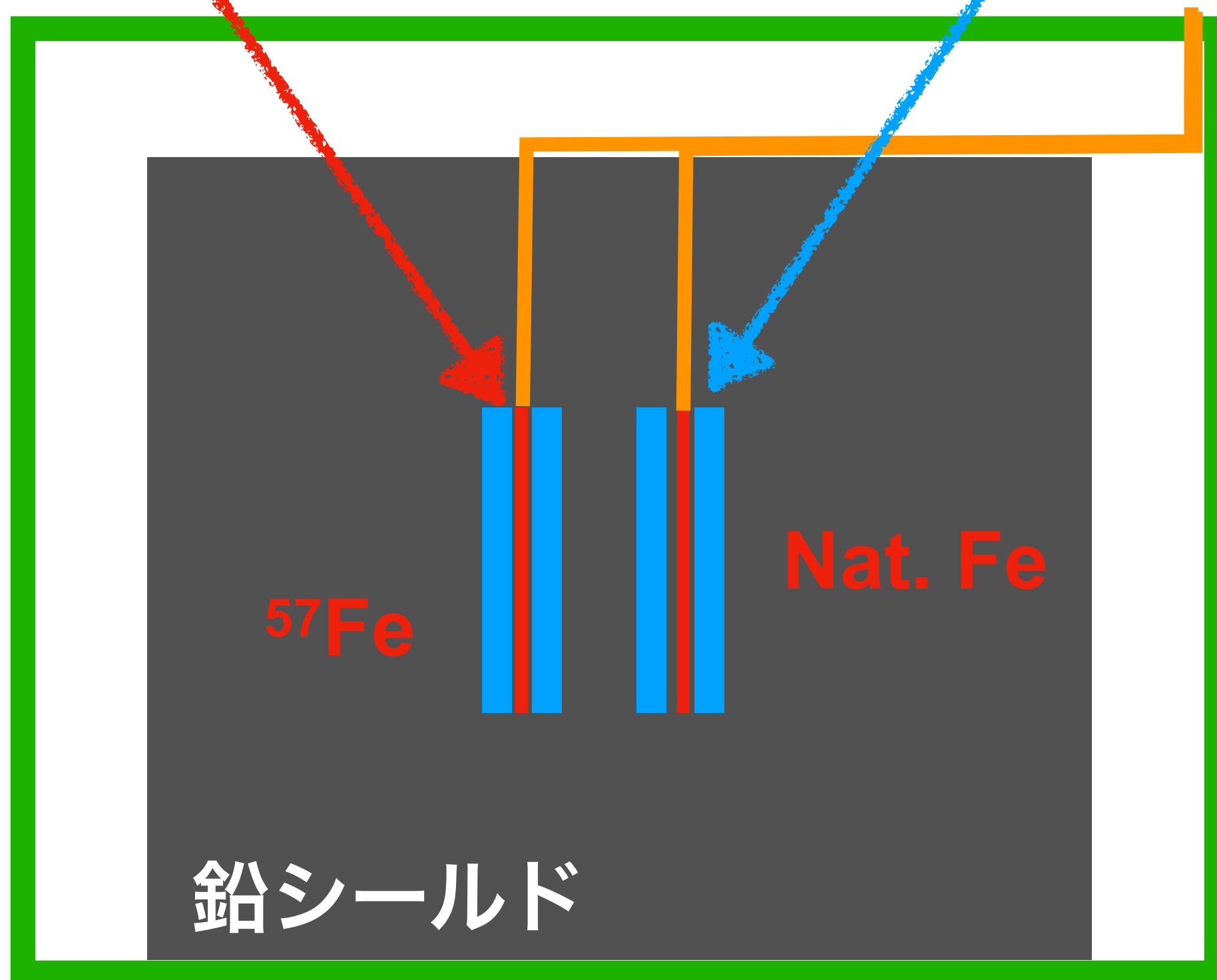
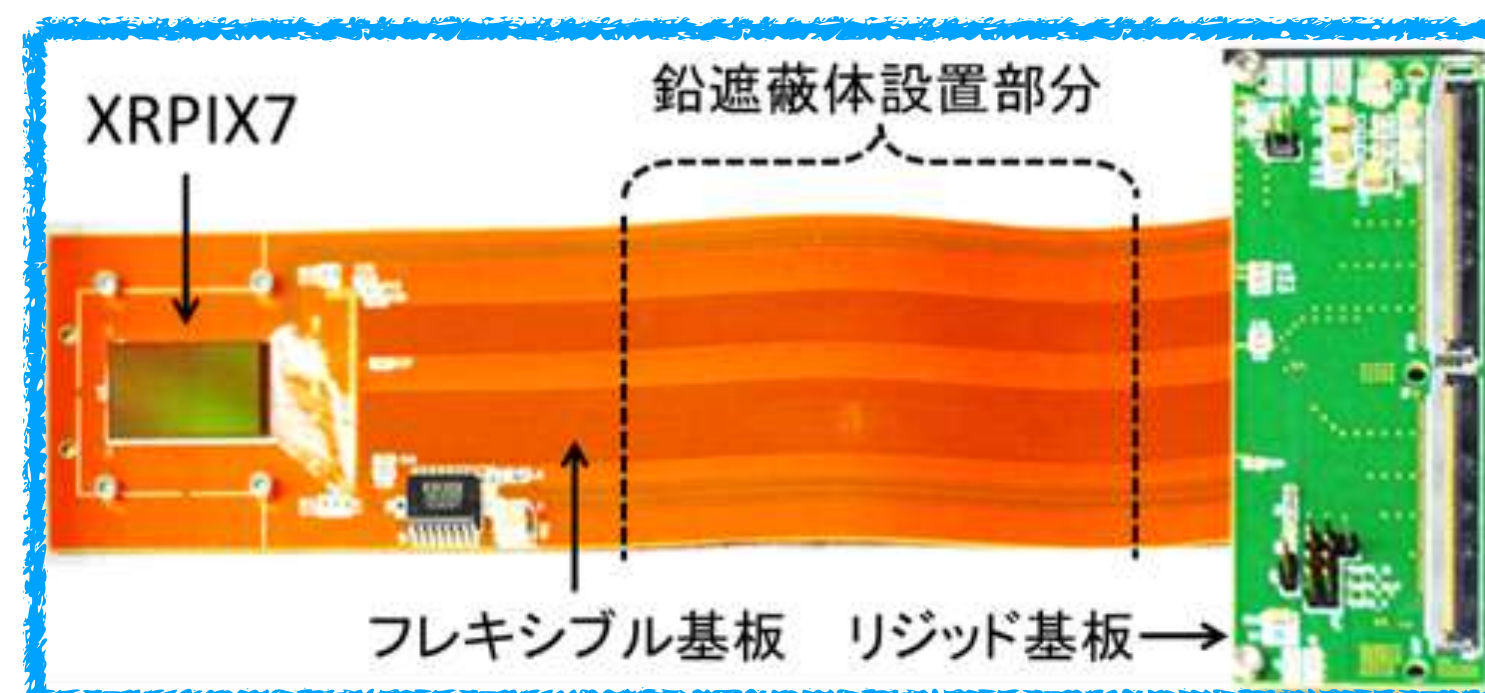
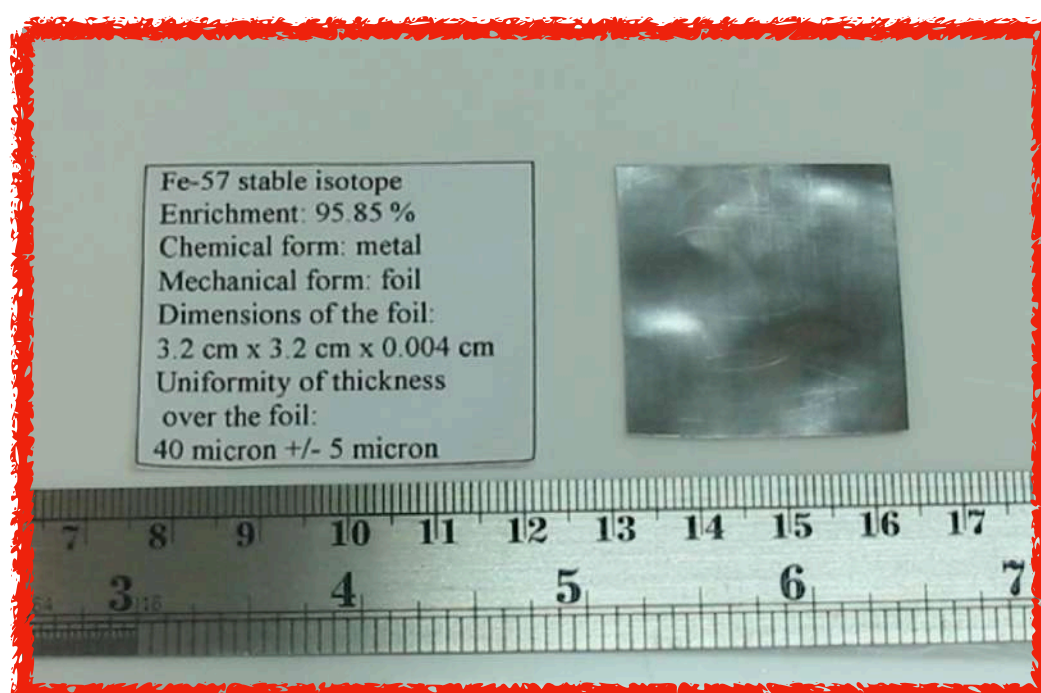


左図の1/100以上の低BG化により、ほぼBGフリーな測定を目指す

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

**$^{57}\text{Fe}$ 鉄箔**

**XRPIX7**



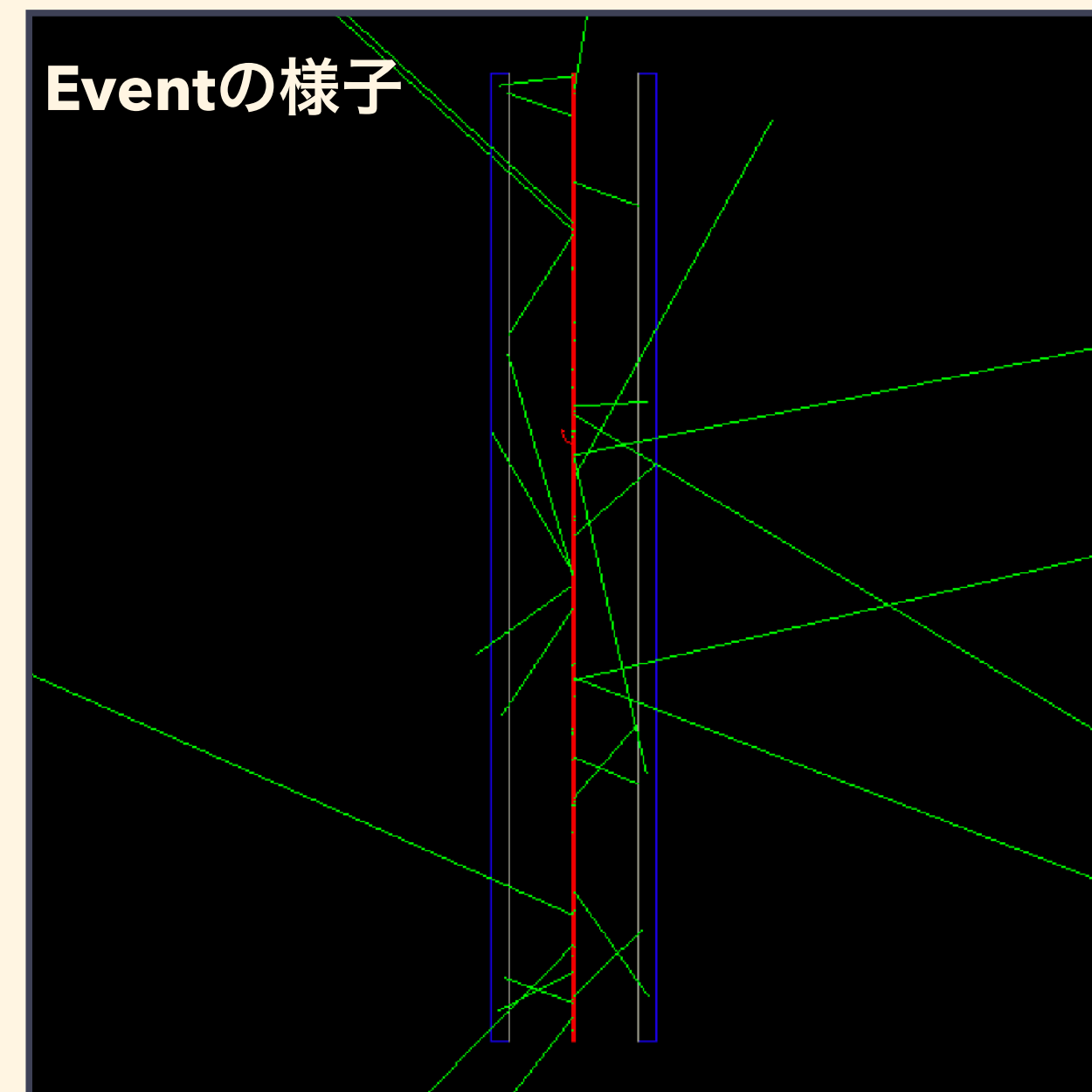
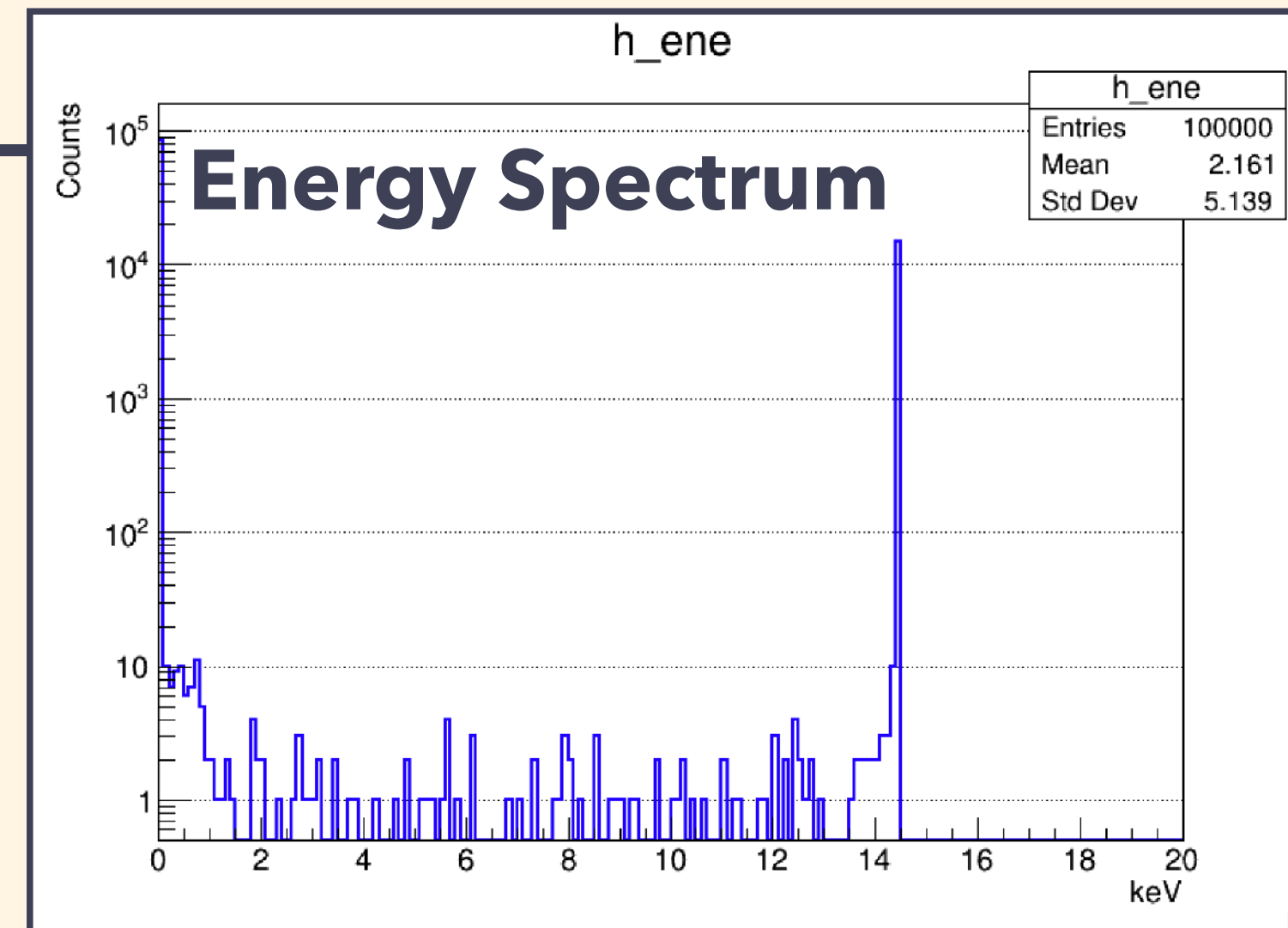
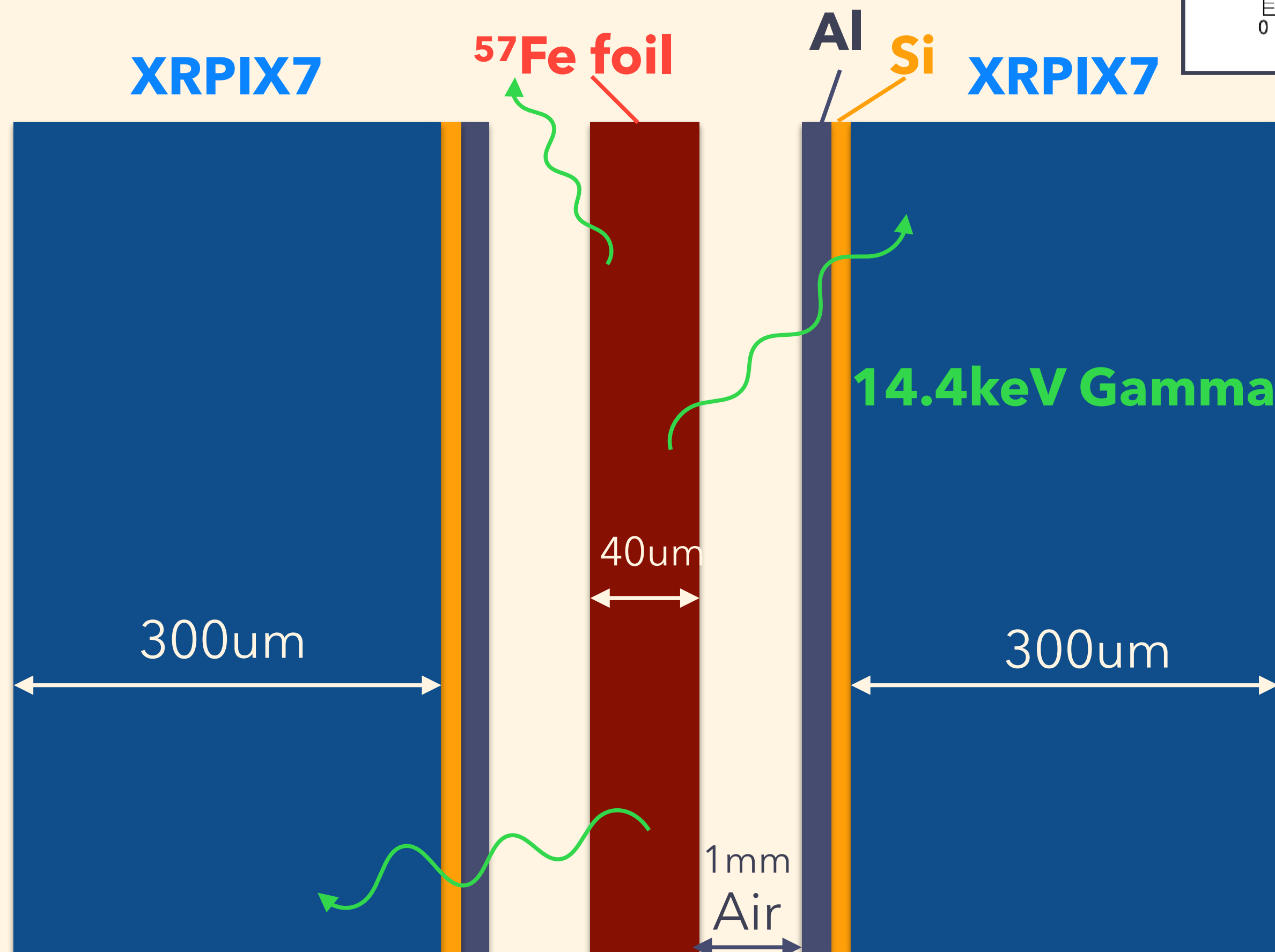
- リジット・フレキシブル基板のXRPIX7を4枚使用
- $^{57}\text{Fe}$  を2枚のXRPIX7で挟む
- Natural Feを2枚のXRPIX7で挟む
- XRPIX (24.6 mm × 15.3 mm) と同じ大きさの鉄箔を設置
- $^{57}\text{Fe}$ の質量 127 mg (厚さ40 micron)
- 恒温槽内の鉛シールド内部に設置
- 30日の試験観測後、1年の本観測を検討

恒温槽  
(-85度)

鉛シールド

# Efficiency計算

- 有感体積を最悪値で計算
  - $^{57}\text{Fe}$ 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%**

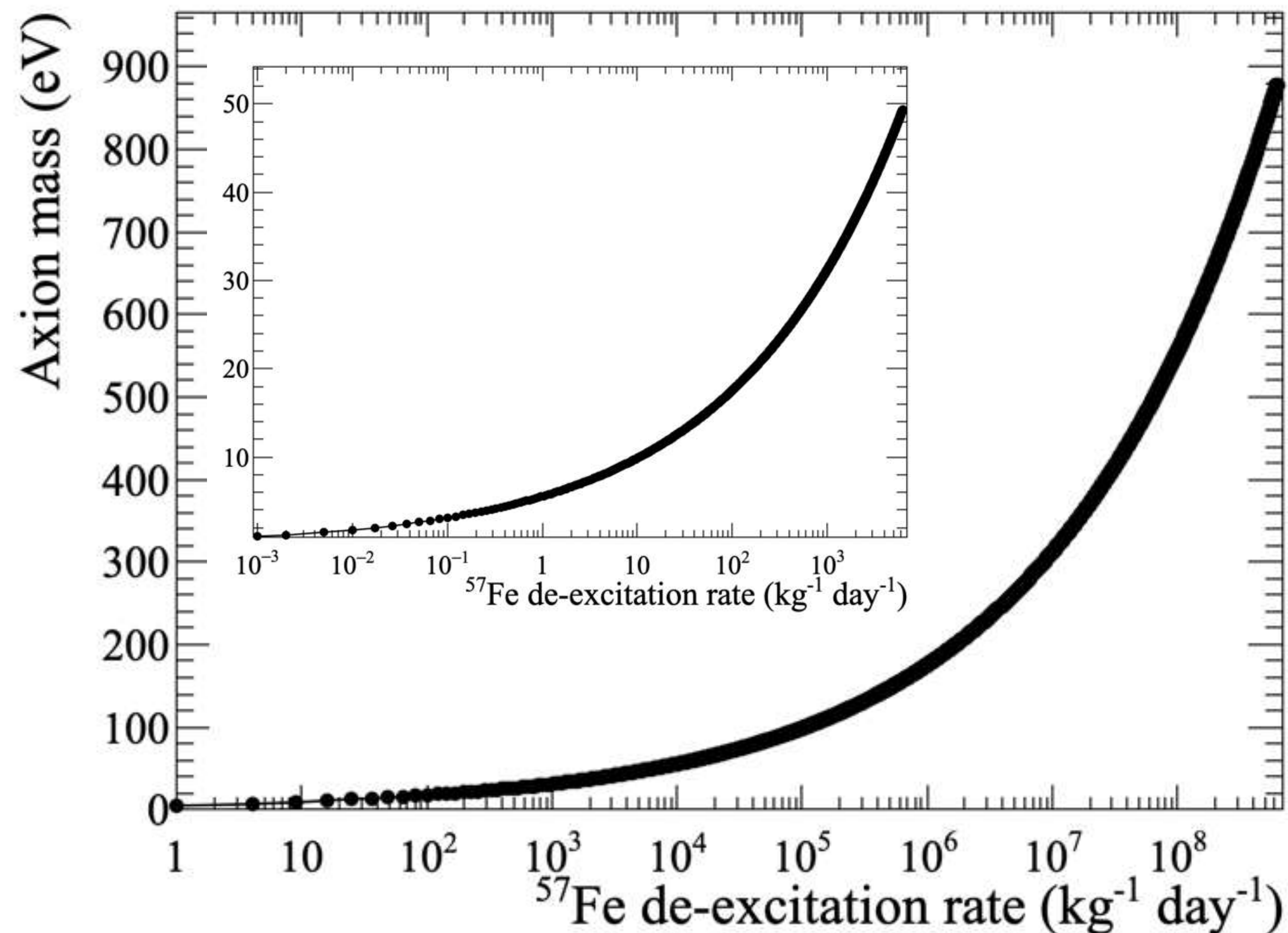


# ISAI実験でのアクシオン質量の予想感度

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

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

- $C = 0.27$  核構造のパラメータ
- $z = 0.56$  トップとダウンクォークの質量比
- $R$ : 検出レート (観測量)



$R$ (day <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> )	$m_A$ (eV)
4.5E+05	145
1E+05	100
1E+04	56
1E+03	31
1E+02	18

# アクシオン質量に対するISAI実験の予想感度

$$m_A \text{ (eV)} = 5.55 \times R^{1/4}, R = S / (M\eta\varepsilon) \quad \eta = 0.105, 14.4 \text{ keV放出確率}$$

	$^{57}\text{Fe}$ Target, $M$	検出効率 $\varepsilon$	$t$ (days)	$S$ , 95%C.L. limit (day $^{-1}$ )	$R$ (day $^{-1}$ kg $^{-1}$ )	$m_A$ (eV)	$m_A=50$ eV の期待値
T. Namba (2007)	197 mg	14.8%	14	7.12	2.33E+06	216	(0.018)
A.V. Derbin (2011)	1260 mg	8.9%	45	(5.30)	(4.5E+05)	145	(0.075)
<b>ISAI 試験観測</b>	<b>127 mg</b>	<b>14.9%</b>	<b>30</b>	<b>2.98 / <math>t</math></b> $N_{\text{obs}}=0, N_{\text{BG}}=0.12$	<b>5.00E+04</b>	<b>83</b>	<b>0.39</b>
<b>ISAI 本観測</b>	<b>127 mg</b>	<b>14.9%</b>	<b>365</b>	<b>5.23 / <math>t</math></b> $N_{\text{obs}}=2, N_{\text{BG}}=1.4$	<b>7.33E+03</b>	<b>51</b>	<b>4.7</b>

# まとめと今後

- 📌 太陽アクシオン探査において異彩を放つ **Investigating Solar Axion by Iron-57, ISAI実験**
  - 📌 アクシオン-原子核反応 $g_{aN}$ に特化した実験
  - 📌  $^{57}\text{Fe}$ とX線衛星搭載用のSOI検出器を使用する
    - 📌 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年の観測で  $m_A = 51 \text{ eV}$ まで到達でき、XENON1Tの結果を独立な手法で検証する**
    - 📌 テーブルトップ型装置で、世界最高感度を実現できる
- 📌 将来計画：**Extensionally Investigating Solar Axion by Iron-57, EISAI実験**
  - 📌 同じ恒温槽内に10組の $^{57}\text{Fe}$ とSOI検出器を並べ、それぞれの検出器を1.6倍の高効率化
  - 📌 EISAI実験の1年観測で  $m_A = 26 \text{ eV}$ まで到達でき、太陽アクシオン探査の英才へ
- 📌 基板の開発・試験費用が必要なため、次の科研費申請予定