

X線SOI検出器XRPIXを用いた 太陽アクシオン探索

小貫良行

東京大学素粒子物理国際研究センター(ICEPP)

理学部物理学科相原・横山研究室

小瀬樹(M1), Alejandro Mora(M1)

京都大 鶴剛、宮崎大 武田彩希、神戸大 身内賢太郎

ICEPP 井上慶純, KEK 新井康夫

Shelvia Wongso, Nanyang Technology Univ.

Haochen Yan, Univ. of California, Irvine

Irina Skudnova, St. Petersburg Univ.

科研費新学術領域「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」B1班2016公募研究
衛星搭載X線SOI検出器を用いた太陽アクシオン地上探索

ダークマター懇親会

Axion

- 素粒子標準理論の量子色力学QCDにおける強いCP(荷電・パリティ変換対称性)問題
 - QCDにおいてCPは一般に保存しない
 - しかし中性子の電気双極子測定ではCPが良く保存
- Peccei-Quinn機構を導入することでCP問題が解決。Axionを予言。

$$\mathcal{L} = \left(\bar{\Theta} - \frac{\phi_A}{f_A} \right) \frac{\alpha_s}{8\pi} G^{\mu\nu a} \tilde{G}_{\mu\nu}^a$$

1. R. D. Peccei and H. R. Quinn, Phys. Rev. Lett. **38**, 1440 (1977).
2. S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **40**, 223 (1978).
3. F. Wilczek, Phys. Rev. Lett. **40**, 279 (1978).

- Invisible Axion モデル

- DFSZ axion... ツリーレベルでLepton, quarkと相互作用
- KSVZ(hadronic) axion... 核子と相互作用(Lepton, quarkループでのみ)

Axion-光子反応 g_{ay} ... Laser実験, Cavity実験

Axion-電子反応 g_{ae} ... CAST実験、Tokyo実験、XMASS実験、**Si(Li)実験**

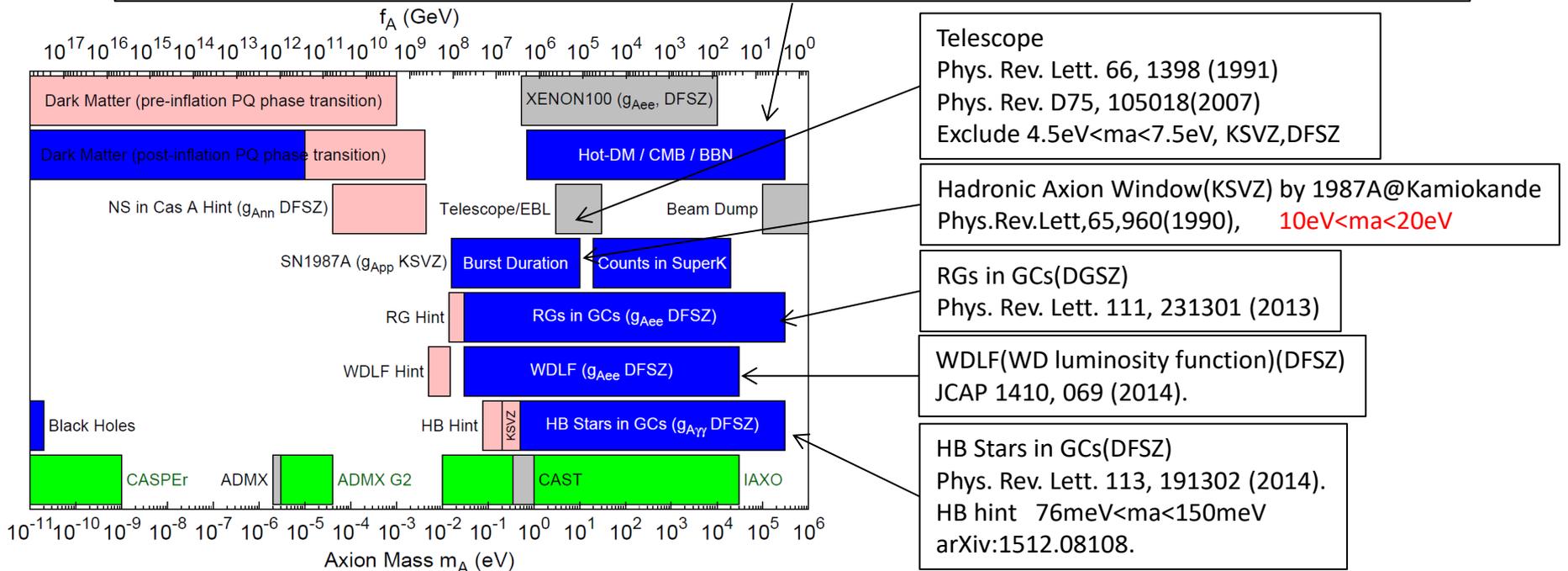
Axion-核子反応 g_{aN} ... **$^{57}\text{Fe}(14.4\text{keV})$ 実験**, $^{83}\text{Kr}(9.7\text{keV})$, $^{169}\text{Tm}(8.4\text{keV})$

研究室規模の素粒子実験

Hadronic Axionの状況

JCAP 0507 (2005) 002, Phys. Lett. B 752(2016)182

Rule out Hadronic Axion Window with $m_a < 0.529 \text{ eV}$ @ 95% C.L as same as method $\Sigma \nu = 0.126 \text{ eV}$



Invisible A^0 (Axion) Limits from Nucleon Coupling

Limits are for the axion mass in eV.

PDG(2014)

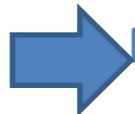
VALUE (eV)	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
● ● ● We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ● ● ●				
$< 2.50 \times 10^2$	95	1 ALESSANDRIA13	CNTR	Solar axion
$< 1.55 \times 10^2$	90	2 ARMENGAUD 13	EDEL	Solar axion
$< 8.6 \times 10^3$	90	3 BELLI 12	CNTR	Solar axion
$< 1.41 \times 10^2$	90	4 BELLINI 12B	BORX	Solar axion
$< 1.45 \times 10^2$	95	5 DERBIN 11	CNTR	Solar axion
		6 BELLINI 08	CNTR	Solar axion
		7 ADELBERGER 07		Test of Newton's law

Invisible A^0 (Axion) Limits from Nucleon Coupling

Limits are for the axion mass in eV.

PDG(2016)

VALUE (eV)	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
● ● ● We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ● ● ●				
$< 1 \times 10^2$	95	1 GAVRILYUK 15	CNTR	Solar axion
		2 KLIMCHITSK...15		Casimir-less
		3 BEZERRA 14		Casimir effect
		4 BEZERRA 14A		Casimir effect
		5 BEZERRA 14B		Casimir effect



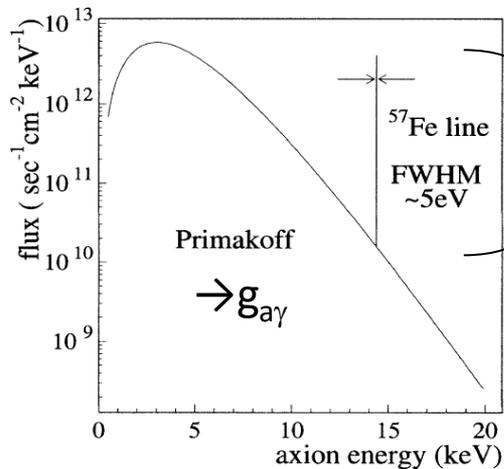
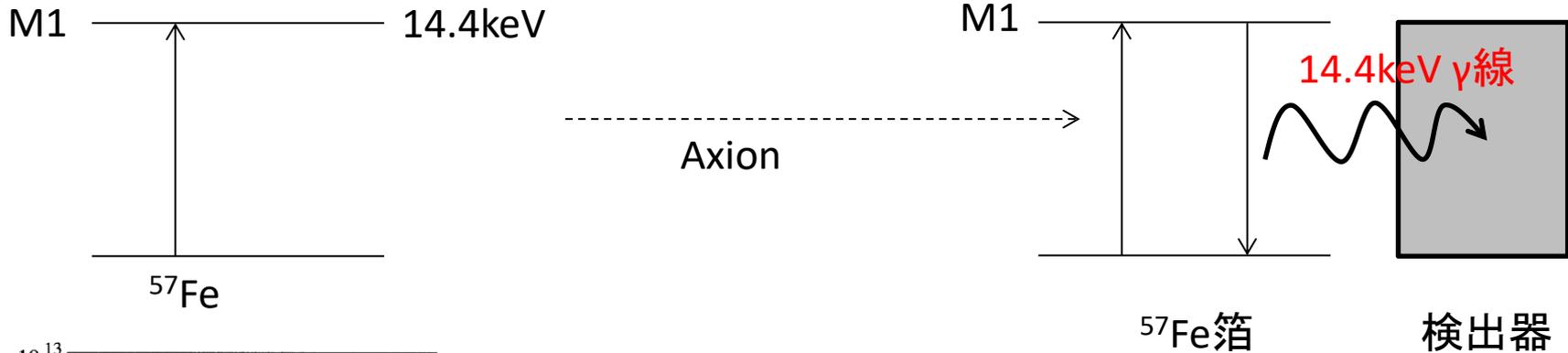
$^{83}\text{Kr}(9.4 \text{ keV})$ で $m_a < 100 \text{ eV}$!

Hadronic Solar Axion

Moriyama, Phys.Rev.Lett,75,3222

太陽コア(1.3keV)

実験室(地球)



Hadronic Axion

$$\rightarrow g_{aN} \propto m_A$$

- 1) ^{57}Fe が太陽コアで熱的にM1励起。
- 2) M1遷移経路でKSVZ Axion放出
- 3) 地上のXRPIX検出器前面の ^{57}Fe 箔でAxion吸収
- 4) 脱励起で14.4keVの γ 線を放出
- 5) 検出器で検出

$$m_A < 1.81 \times 10^8 \times (S_{lim}/(\varepsilon\eta NT))^{1/4}$$

ε : Efficiency,

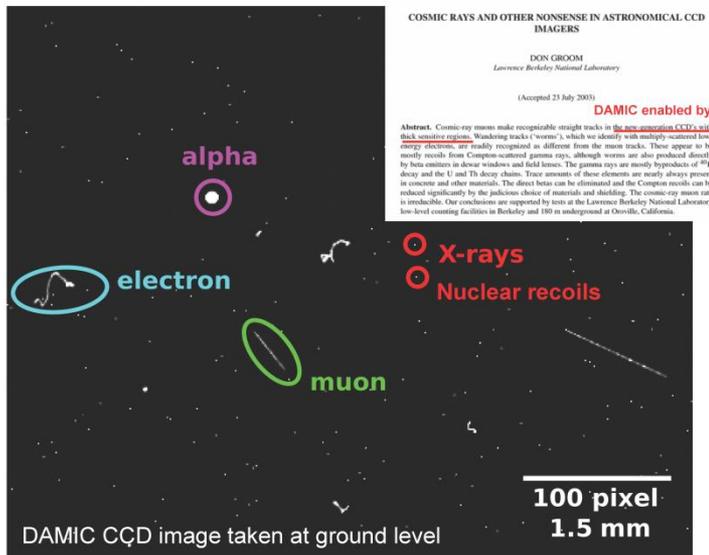
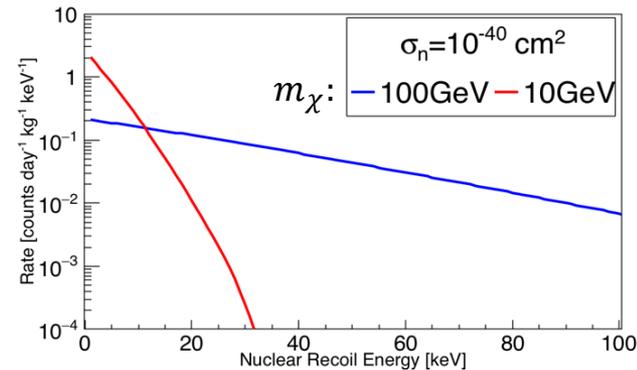
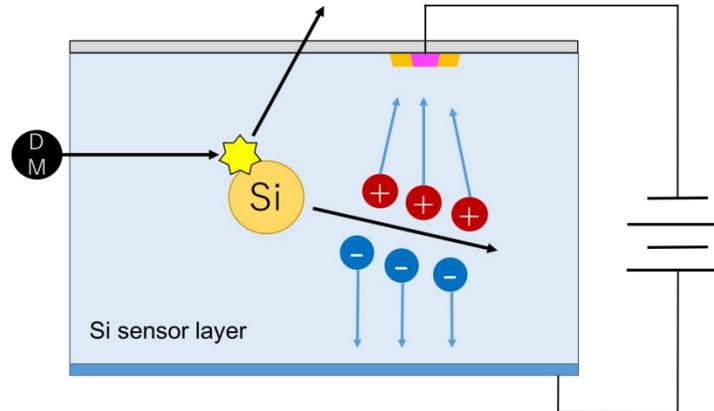
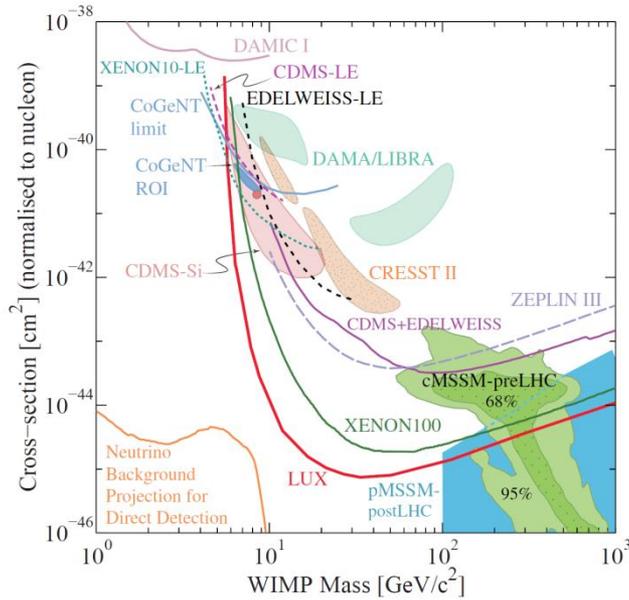
η : (内部転換電子ではなく) γ 線でてくる割合0.105

N : ^{57}Fe 核子数, T : 観測時間

先行実験: $m_A < 145\text{eV}$, Si(Li) detector (diameter = 66 mm, thickness = 5 mm).

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

WIMP探索



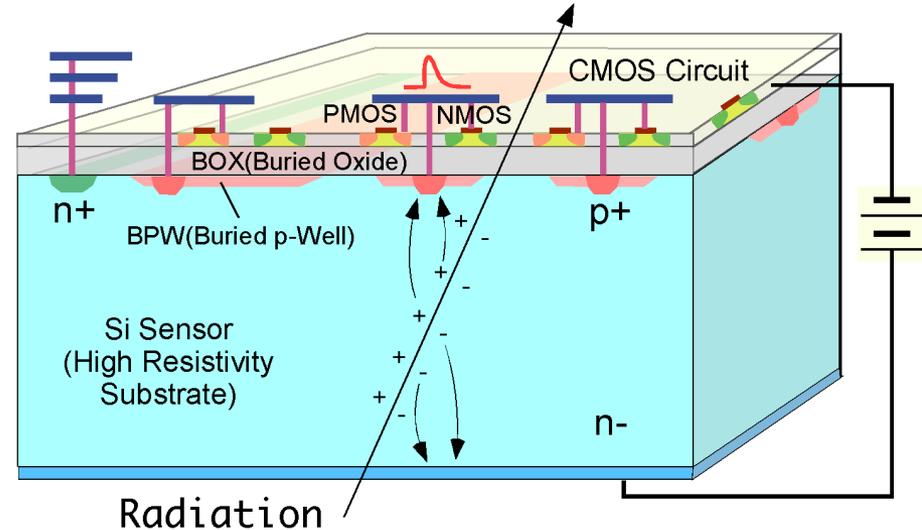
DAMIC(Dark Matter in CCD)実験...軽いWIMP領域

- クラスタリング
 - 粒子識別 $\alpha/\beta/\gamma$ /宇宙線識別
 - 信号拡散による深さ情報
- 反同時計数
- $+\alpha$ (模索中)

Silicon On Insulator(SOI) 検出器

- CMOS回路用Si基板と高抵抗センサーSi基板の一体接合(SOITEC Co.)
- ROHMグループのラピスセミコンダクタ社の商用 Full depleted(FD)-SOIプロセス (0.20 μm) を使用
- Low power, hi-speed, シングルイベント耐性, 広い動作温度(1K~570K)

SOI Pixel Detector



KEK測定器開発室SOIPIXグループが中心に研究開発

- 金属バンプボンド不要
ピクセルサイズ小、高密度、低容量
- 高機能な回路をピクセル内に実装可能
アンプ、計数、メモリ、トリガー回路など
- X線、ガンマ線、荷電粒子検出器などが開発
実用例)SOPHIAS(SACLA@Spring-8)
- 3D検出器の可能性(縦に更に積層)

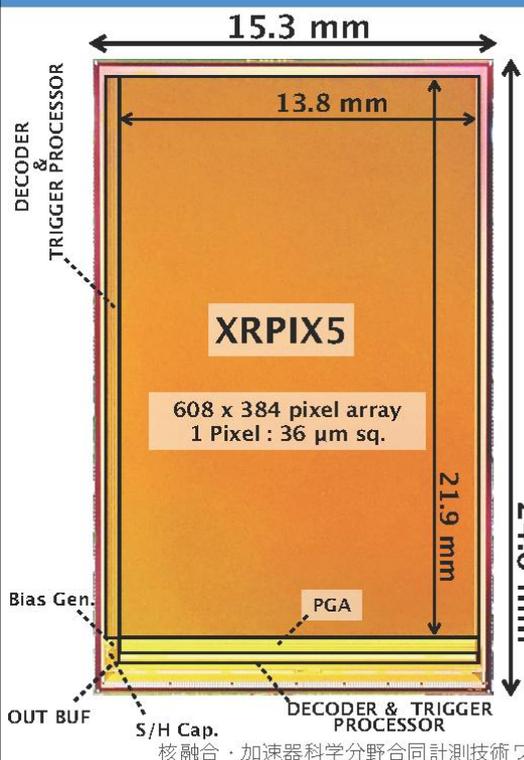
Circuit Layer : ~10 μm
Buried Oxide (BOX) : 200 nm
Sensor Layer : 50 - 725 μm

将来加速器実験の崩壊点検出器としても有望な候補

SOI XRPIX

X線天文衛星(FORCE計画)を目標に京大、宮崎大などが開発しているSOIピクセル素子

XRPIX5の概要



大面積化へ向けた最初のプロトタイプ

2015.06 Submit

2015.12 納品

基本構成

- チップサイズ: 24.6 mm x 15.3 mm
(有効領域: 21.9 mm x 13.8 mm)
- ピクセルサイズ: 36 μm sq.
- ピクセル数: 608 x 384 (= ~233k)
- センサ層厚: 310 μm (CZ wafer)
500 μm (FZ wafer)

回路構成の特徴

各カラムラインにProgrammable Gain Amplifier (PGA)回路を搭載している。

信号レベルとペDESTALレベルを差動出力する。

イベント駆動読み出しに最適化したアーキテクチャ。

-> 8 x 8 ピクセルをユニットとして読み出す。

ヒットパターン情報出力機能を搭載。

核融合・加速器科学分野合同計測技術ワークショップ @ 核融合研 - 武田 彩希 - 2016.10.28

エネルギー分解能 < 300 eV @ 6 keV (目標)

時間分解能 < 10 μsec

位置分解能: ピクセルサイズ 36 μm

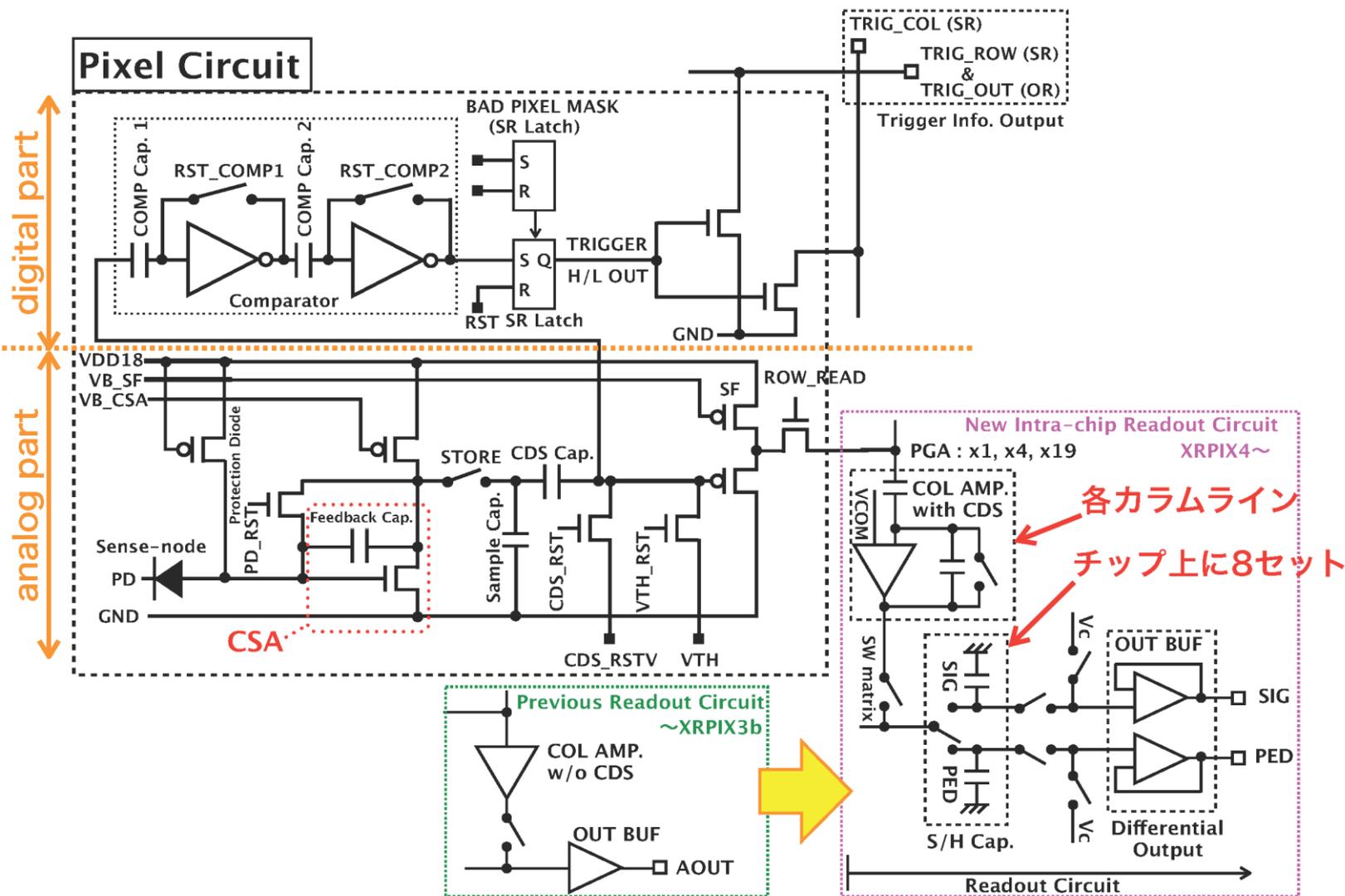
- セルフトリガー読み出し/繰り返し読み出し

- ヒット領域部分読み出し/フレーム読み出し

- XRPIX5bが最新の大型素子(今年春納品)

回路基板(チップボード)上に直接実装
(セラミックパッケージ不使用)

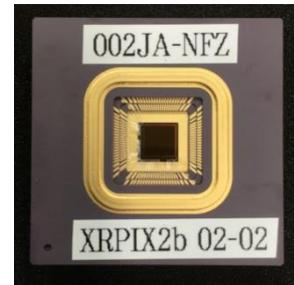
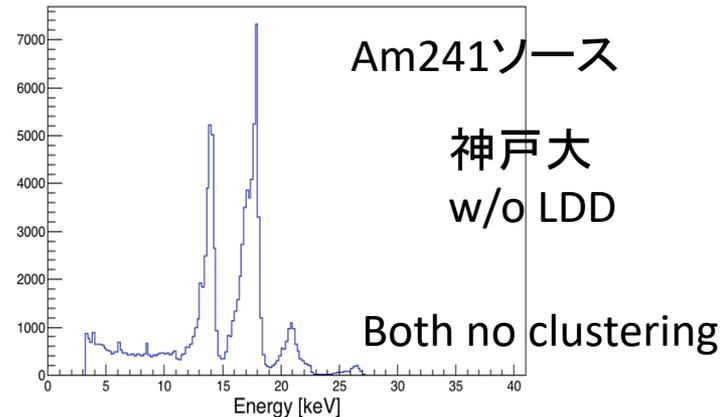
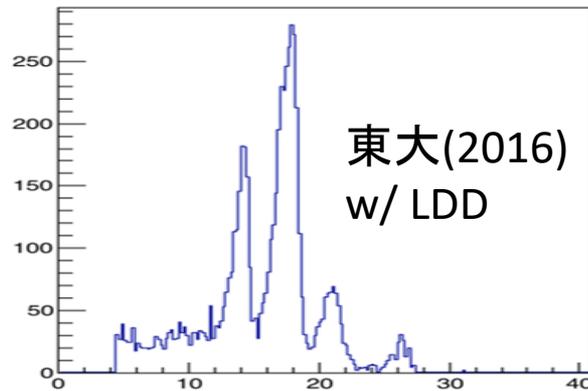
ピクセル回路・アナログ信号読み出し回路の構成



XRPIXチップ状況

- XRPIX2b(4.6 × 4.6 × t0.5mm³)

- LDD(低濃度不純物ドレイン)導入



- イベント駆動(セルフトリガーモード)でノイジー、挙動(?)

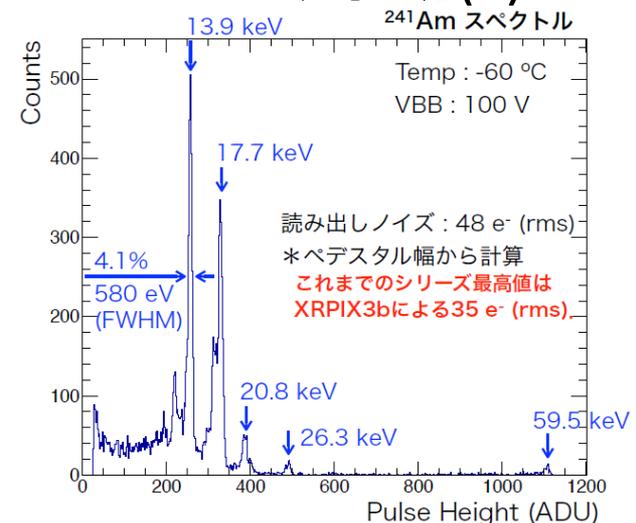
チップ製造時に落雷が原因?

- XRPIX5(21.9 × 13.8 × t0.5mm³)

- 読出しノイズ:48e(r.m.s)

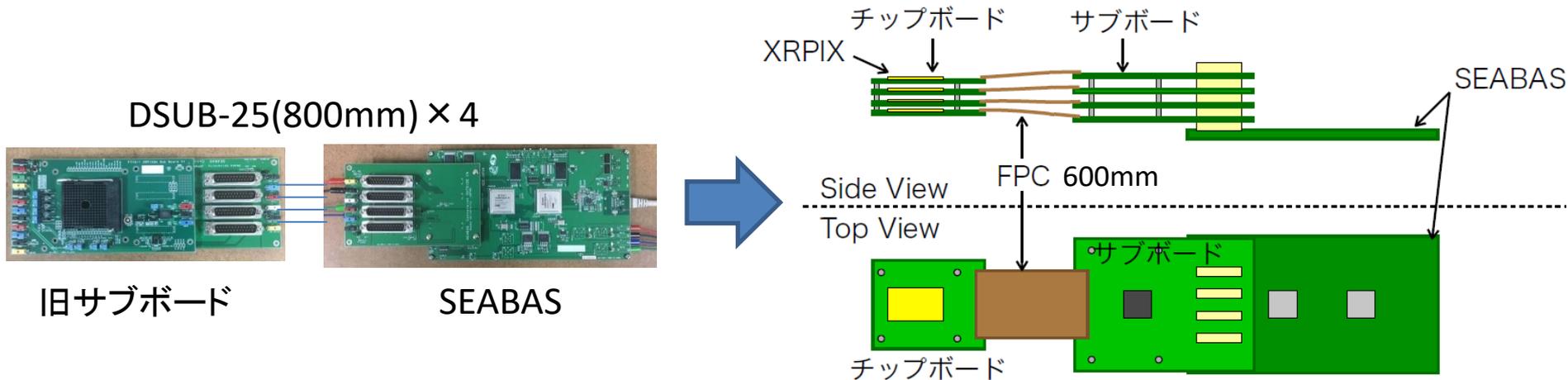
- エネルギー分解能:4.8%@13.9keV

JPS2016秋季大会24aSP-13武田彩希



スタックXRPIX検出器

- XRPIXユーザによる複数XRPIX5b素子のスタック化共同開発
 - 京大、阪大、宮崎大(X線衛星)
 - 東大工(PET, SPECT医療応用)
 - 東大理(Axion/WIMP)



- チップボード(77mm × 98mm)にXRPIX5b素子を直接実装
- 長さ600mmのFPCで信号伝送
- サブボード上のFPGAで各素子同期、SEABASへスイッチング読出し
 - 設計完了、製造会社へ見積・発注。今年度中の納品(目標)
 - 東大理分...XRPIX5を2層。Fe57サンドイッチ。

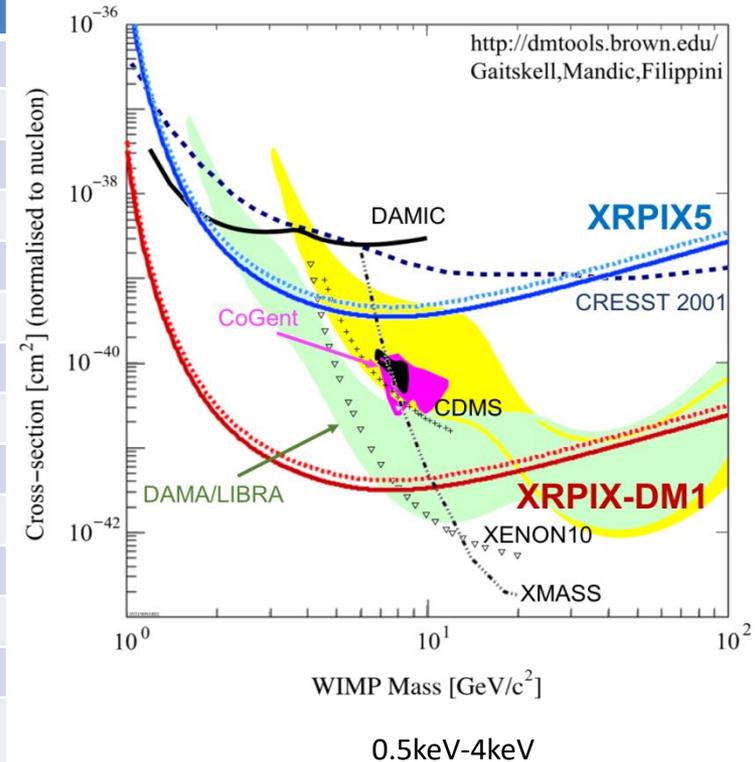
まずは通常基板で製作→回路検証→低BG基板版を製作(来年度¹⁾)

XRPIXの実験感度

Hadronic Axion

Sensor	Si(Li)	XRPIX5	XRPIX-DM1
Sensor size[mm ³]	φ 66 × t 5	21.9 × 13.8 × t 0.5	49.2 × 15.8 × t 0.5
#Channels	9	608 × 384	1400 × 450
#Arrays	1	6	16
Enriched ⁵⁷ Fe [g]	1.120 g	0.544 g	6.219 g
Enriched ratio ⁵⁷ Fe	91 %	95 %	95 %
# ⁵⁷ Fe nucleus	1.21 × 10 ²²	0.587 × 10 ²²	6.71 × 10 ²²
Cooling temperatur[K]	77 K (Liquid N)	188 K ?	←
Energy resolution R	10.2 % @ 14.4 keV	< 4 % @ 14.4 keV	1.3 % @ 14.4 keV
Efficiency ε	8.91 %	20 %	20 %
Duration T[sec]	3.87 × 10 ⁶ (45 days)	←	6.31 × 10 ⁷ (2 years)
#BG in signal region	~4000	~760 (N,R scale)	~2700 (N,R scale)
#Signals	-103 ± 131	0 ± 28	0 ± 53
Signal upper limit S _{lim} @95%.C.L	180	56	103
m _A Upper limit m _A < 1.81 × 10 ⁸ × (S _{lim} / (εηNT)) ^{1/4}	< 145 eV	< 106 eV	< 34 eV

WIMP



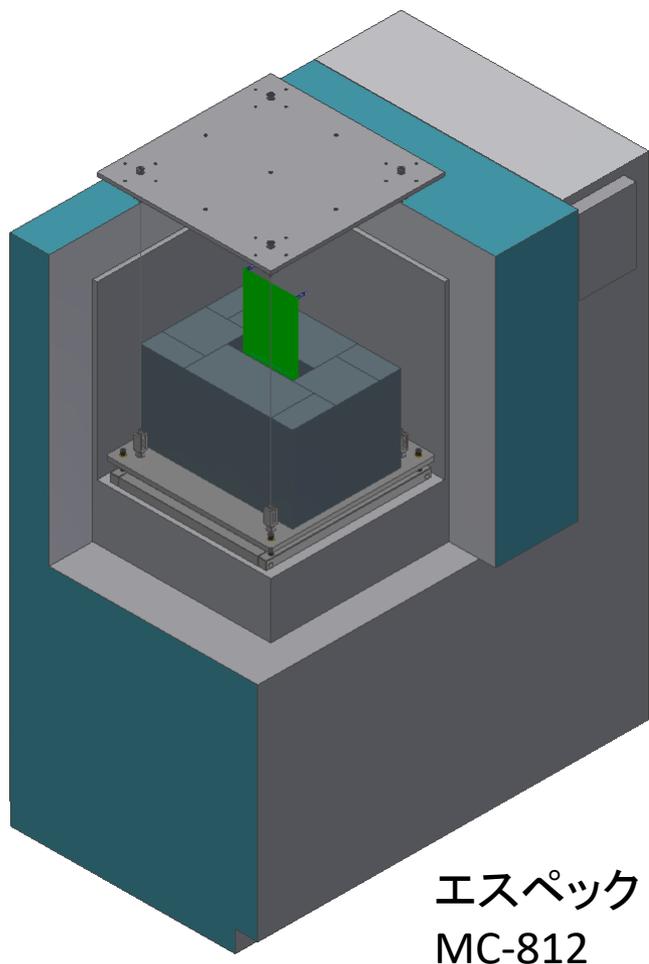
Hadronic Axion... 先行実験100counts/keV/day@14.4keV BG(~1/110)

予備実験Pb5~15cmにより~1/200を目指す。

既存XRPIX素子のアレイ化によってUpper limit更新有望。

WIMP... 更なる低BG化、XRPIX素子の大型化、低エネルギー閾値化などが課題

(予備)実験セットアップ



エスベック
MC-812

外側

恒温槽外
室温

- クリーンブース(Ra吸着塵の除去)
- 外部鉛支持構造体(アルミフレーム)

ワイヤーで懸架

恒温槽内
-85°C
@40x40x40cm³

- 内部鉛支持構造体(SUS430)
- 50mm~150mm厚鉛
- Xmm厚無酸素銅
- 検出器設置体積150x150x50mm³
- XRPIX

内側

予備実験: 鉛ブロック(~100kg)を積載したテーブルを外部からワイヤーで懸架。
小体積低BG環境を作り、そこに冷却した検出器を設置。
速やかに遮蔽+低温環境を構築し予備実験を行う。

冷却と遮蔽



恒温槽($\sim -85^{\circ}\text{C}$)内に遮蔽体($\sim 120\text{kg}$)を設置可能。クリーンブース化(2016年9月)。XRPIX検出器、CdTe検出器を用いた遮蔽体最適化試験が可能。Axionパイロット実験で使用予定。

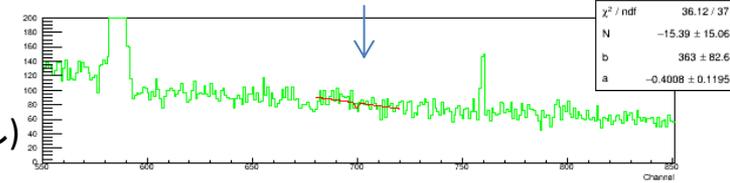
検出器の低BG化

チップボード実装部品のウラン系列元素(Bi-214)測定

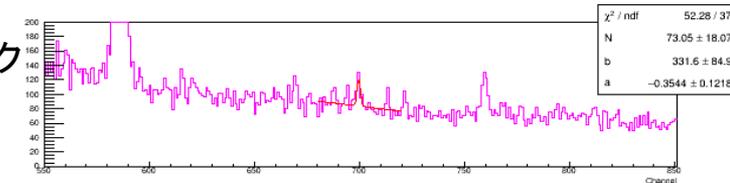
- BG(測定物無し) $(5.7 \pm 5.6) \times 10^{-4} \text{Bq}$
- セラミックパッケージ $(1.7 \pm 0.5) \times 10^{-3} \text{Bq/g}$
- PPE基板(ガラス繊維無し) $(1.7 \pm 0.5) \times 10^{-3} \text{Bq/g}$
- 計装アンプ $(2.5 \pm 1.6) \times 10^{-4} \text{Bq/個}$
- フェライトビーズ $(1.1 \pm 0.6) \times 10^{-5} \text{Bq/個}$
- 銀ペースト(チップ接着) $(1.0 \pm 0.6) \times 10^{-4} \text{Bq/g}$
- 鉛フリーハンダ $(3.1 \pm 2.5) \times 10^{-5} \text{Bq/g}$
- 共晶ハンダ $(1.1 \pm 0.4) \times 10^{-4} \text{Bq/g}$
- FPCコネクタ 測定中

Bi-214(609keV)

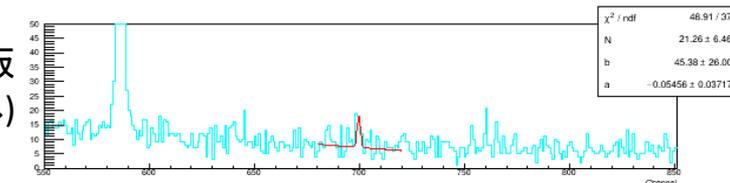
BG
(測定物無し)



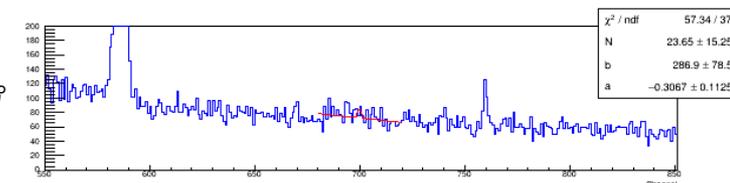
XRPIXセラミック
パッケージ



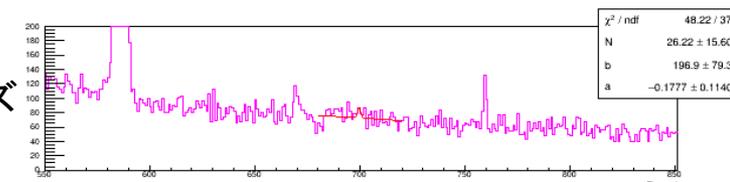
PPE基板
(ガラス繊維無し)



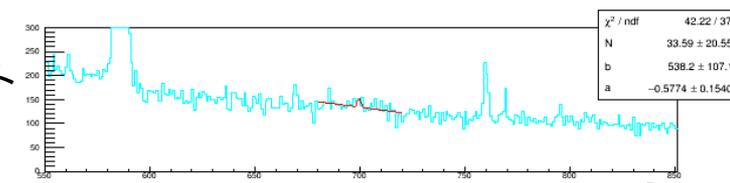
計装アンプ



フェライトビーズ



銀ペースト



Ge: $\phi 57.1 \text{mm} \times 54.6 \text{mm}$

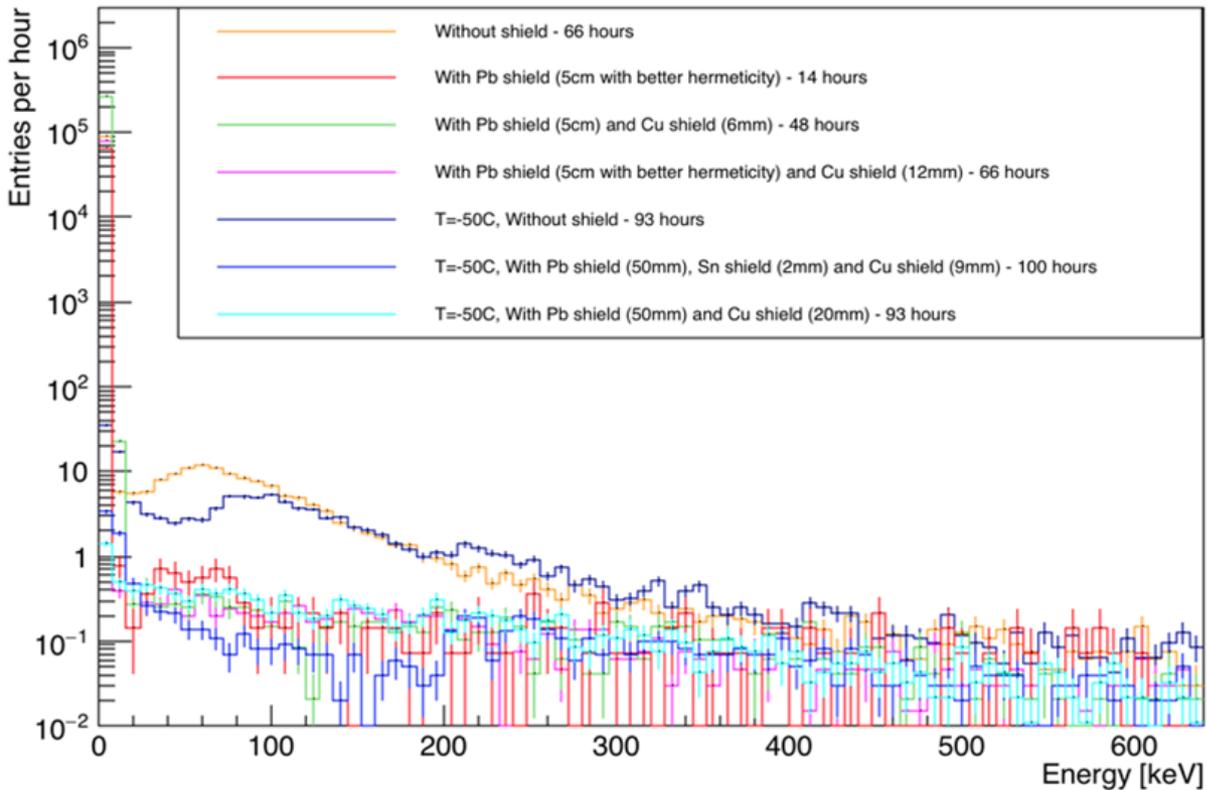


2016年11月に葦輪研Ge検出器の移設、再セットアップ完了。
ICEPP井上さんのご協力での測定。

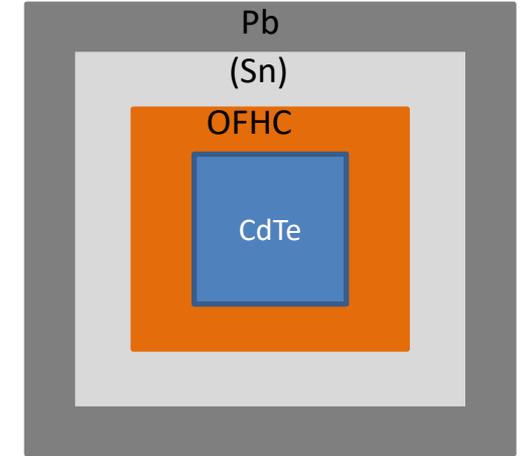
部品のBGLレベル測定 → 低BG部品の選別

CdTeを用いたBG遮蔽試験

Environmental Radiation Measurement Combined Result



恒温槽内: -85°C(設定値)



先行実験(Pb50mmFe35mmCu10mm): $\rightarrow 0.0262 \text{ counts/keV/day/mm}^2$

遮蔽体試験実験(Pb50mmCu12mm): $\rightarrow 0.085 \pm 0.024 \text{ counts/keV/day/mm}^2$

鉛、高純度錫、無酸素銅などを用いた遮蔽体試験。

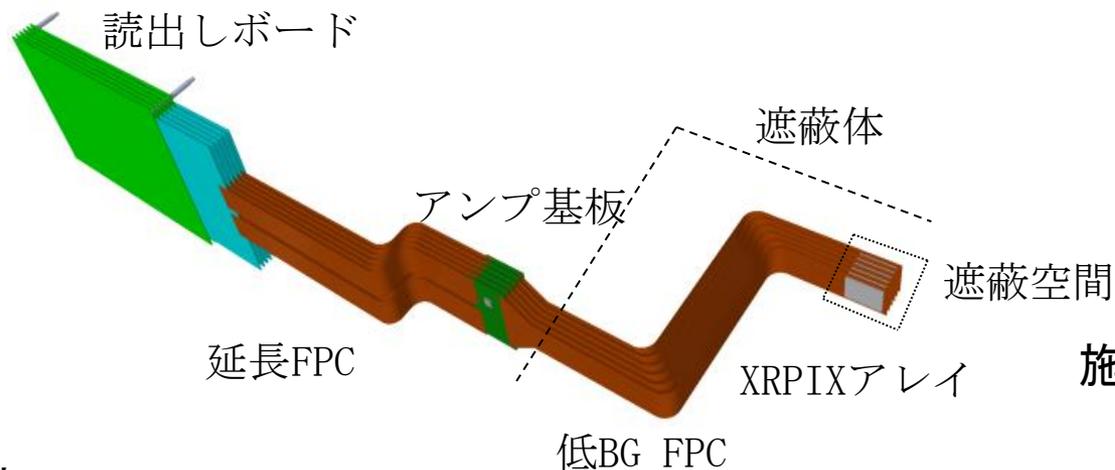
CdTe...Siより広いレンジのスペクトル。室温では分極によりエネルギー分解能悪化が問題。

\rightarrow 恒温槽冷却により分極の抑制確認。一週間程度の長時間測定が可能。

まとめ

- 本年度から科研費新学術領域「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」B1班公募研究採択(2年間)
- SOI技術を用いたX線検出XRPIXを用いてSolar Hadronic Axion探索
- 速やかに遮蔽+低温環境を構築し、予備実験を実施
 - KSVZ Axion $m_A < 145\text{eV}$ w/ ^{57}Fe を更新を目指す
 - 検出器開発...異なる興味を持った人たちで共同開発
 - 遮蔽、低温環境...本郷1号館に構築。CdTeで実測。
 - 低BG検出器開発...GeでBGLレベル測定
- その先
 - Low mass WIMP探索

更なる低BG化、高感度化



低BG化

- FPCにXRPIXを直接実装
- アンプを後段に移動
- 冷却と遮蔽
- 半導体工場内でSiでSiをサンドイッチできないか?

科研費WIMPで申請中

→3D(積層)化の新しい支援事業が開始。
加速器実験の開発動向に注目

高感度化

- 大型化といっても~5cm
- アレイ化といっても数10
- 低閾値XRPIXの開発

X線天文衛星(FORCE計画)に牽引してもらい、協力
→ とても大変そう。
スタックXRPIX共同開発のように様々な応用分野で
需要開拓し、更に人を増やして分担開発が必要
(かもしれない)